



Provning av metoder för snöborttagning vid takmonterade solelanläggningar

RISE ETC-Rapport: 2021–23

Alexander Granlund och Anna Malou Petersson

2021-11-23

Titel	Provning av metoder för snöborttagning vid takmonterade soleanläggningar
Författare	Alexander Granlund och Anna Malou Petersson
Rapportnummer	2021-23
Datum	2021-11-23
Språk	Svenska
Nyckelord	Solceller, snö, snöborttagning, tak
Beställare	Länsförsäkringars Forskningsfond
Avsändare	RISE Energy Technology Center AB, Box 726, 941 28 Piteå Tel. 010-516 6170, epost infoetc@ri.se

Godkänt av:

Datum:

SAMMANFATTNING

Det installeras mycket soleanläggningar i Sverige och de svenska vintrarna med sina låga temperaturer och snö gör att förutsättningarna skiljer sig från den globala solemarknaden. Snö medför ökade belastningar på solcellsmodulerna och låga temperaturer kan göra solcellernas kiselmaterial skörare. Snöborttagning motiveras även av att lasterna på underliggande takkonstruktion behöver reduceras vilket kan vara ett krav från försäkringsbolag vid stora snömängder. Snöborttagning kan dock medföra en skaderisk för solcellerna, därför avråds ofta anläggningsägare från snöborttagning av installatörer eller solcellsmodultillverkare. På grund av detta har olika snöborttagningsmetoder provats under två vintersäsonger från 2019 till 2021, i syfte att identifiera metoder som lämpar sig för snöborttagning vid takmonterade soleanläggningar. Testanläggningen har varit lokaliserad till Piteå och består av ett låglutande tak på 14° med 20 solcellsmoduler i fem grupper om 2×2, varav en grupp utgjorde kontrollgrupp. Metoderna som provades är: eluppvärmning, två ytbehandlingar som vardera testades en vinter och två manuella redskap för mekanisk snöborttagning, snöhyvel respektive takraka.

Eluppvärmningen fungerade och antyder att det kan vara energimässigt lönsamt att smälta undan snö, men det krävdes både mycket energi och tid på denna anläggning. Inköpskostnad och elsäkerhet ses också som problematisk då ingen kommersiell produkt för små anläggningar finns. Långsiktiga studier på hur cellerna påverkas saknas.

För ingen av de testade ytbehandlingarna observerades någon minskad snöansamling eller påskyndad snöavglidning. På ytan uppmättes också kraftigt slitage av ytbehandlingarna efter bara en vinter.

Snöhyveln var enkel att använda och mycket snö kunde röjas bort på kort tid, förutsatt att snön inte var isig eller hade tjock skare. Med just den modell av snöhyvel som användes rasade även block av snö och is ner mot utföraren under snöborttagningen. Redskapets teleskopskaft gjorde det också svårt att ta bort snön högst upp på modulgruppen, något som förväntas ha större påverkan på större anläggningar.

Takrakan var svårare att använda än snöhyveln men mer snö kunde tas bort från modulgruppen. Svårigheten i användningen beror på att redskapet måste lyftas upp ovanför snötäcket och sedan dras ner med ett långt och något flexibelt teleskopskaft. För takrakan observerades den största modulskadorna, som sannolikt orsakats av att rakans huvud vid snöborttagningen roterade och slog i modulen med ett hörn i hårdplast.

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	III
INNEHÅLL	IV
1 INTRODUCTION	1
1.1 SYFTE OCH MÅL	2
2 METOD	3
2.1 VAL AV SNÖBORTTAGNINGSMETODER	3
2.2 UTFORMNING AV TESTANLÄGGNING	3
2.3 MÄTNING OCH UPPFÖLJNING AV DEFEKTER OCH SLITAGE	5
2.4 UTFÖRANDE AV OCH MÄTNINGAR VID PROVNINGSTILLFÄLLEN	6
2.5 SKATTAT ELPRODUKTIONS BORTFALL FRÅN SNÖTÄCKNING	7
3 RESULTAT OCH DISKUSSION	8
3.1 SNÖANSAMLING	8
3.2 UTFÖRD SNÖBORTTAGNING	9
3.3 ELEKTRISK KARAKTÄRISERING	13
3.4 ELEKTROLUMINISCENS OCH TERMOGRAFI	13
3.5 YTMÄTNINGAR	15
3.6 SNÖFÖRLUSTER	17
3.7 UTVÄRDERING AV SNÖBORTTAGNINGSMETODER	19
4 SLUTSATSER	21
5 LITTERATURFÖRTECKNING	22
6 APPENDIX	25
6.1 URVAL AV SNÖBORTTAGNINGSMETODER	25
6.2 PROTOKOLL UTFÖRANDE	26
6.4 TEMPERATURDATA ELUPPVÄRMNING	28

1 INTRODUKTION

Installation av soleanläggningar ökar kraftigt i hela Sverige och majoriteten av installationer genomförs på tak (Lindahl et al., 2020). Till skillnad från de hittills stora marknaderna för solet globalt, förekommer snö och låga temperaturer i varierad omfattning regelbundet i Sverige. En soleanläggnings förväntade levnadstid är minst 30 år och under en så pass lång period kan relativt extrema vintrar förväntas förekomma även i delar av Sverige där vintern normalt inte är snörik. Snölasten medför en risk att solcellsmoduler skadas och publicerad forskning tyder på att temperaturer under -20°C kan bilda sådana anspänningar i solcellsmaterialet att mikroskopiska sprickor uppstår i samband med snölasten (Rowell et al., 2018; Schneller et al., 2019; Seigneur et al., 2019). Sprickorna kan också växa sig större för varje belastningscykel som går (Schneller et al., 2017). Att avlägsna snö från takmonterade moduler kan vara befogat för att minska belastningen på såväl moduler som underliggande takkonstruktion och för att förebygga snöoras. För att skydda konstruktioner som befinner sig nedanför ett tak, till exempel altaner och förråd, från skador orsakade av snöoras kräver försäkringsbranschen att fastighetsägare ska hålla tak snöfria, men kan i nuläget inte svara på hur snön ska avlägsnas när det finns takmonterade solcellsmoduler vilka riskerar att ta skada av snöborttagningen. Snöborttagning kan vidare vara motiverat för att minska snörelaterade produktionsförluster. Idag råder en generell uppfattning i Sverige om att snö inte ska avlägsnas dels för att det är så få dagar som modulerna är snötäckta, dels på grund av en rädsla för att modulerna ska skadas vid utförandet. Flera studier har dock visat att produktionsförluster som uppstår på grund av att moduler täcks av snö kan vara betydande och från södra Tyskland och schweiziska alperna finns dokumenterade snörelaterade skador på soleanläggningar (Bohren & Friesen, 2015). I det avslutade projektet *Resurseffektiv solet för offentliga byggnader och bostadssektorn i kallt klimat* (Tillväxtverket/ERUF, ärende ID 20201303) har observationer gjorts av moduler som skadats av snölast (Lindh et al., 2020). Mängden snö som ansamlas på en takmonterad soleanläggning är relaterad till meteorologiska förhållanden såsom lufttemperatur, förhärskande vindriktning och nederbördsmängd men också utformningen av soleanläggningen.

Flera metoder för att avlägsna snö som ansamlats på moduler har föreslagits och befinner sig på olika TRL (Technology Readiness Level). Exempel på idéer som finns rapporterade i den vetenskapliga litteraturen är ett passivt snösmältningssystem baserat på ljusreflektioner som träffar modulens baksida (Ross & Usher, 1995), hydrodynamiska ytbeläggningar (Andrews et al., 2013) och att värma upp cellerna i modulen genom att mata in ström i dem (Frimannslund & Thiis, 2019; Rahmatmand et al., 2018; Weiss & Weiss, 2016). Eluppvärmning med framström kräver inga ingrepp på modulerna och fungerar genom att man matar in ström i motsatt riktning än vad solcellerna normalt levererar. På grund av terminologin kring halvledare och dioder kan detta framstå som kontraintuitivt för just solceller eftersom de normalt sett levererar en backström, medan ström som matas in bakvägen i cellen är en framström. Denna metod har visat potential i andra forskningsstudier förutsatt att snön kan glida av modulerna. Ramfri modul och brant lutning lyfts fram som gynnsamma förutsättningar för detta och eluppvärmningen kan då göra en modul snöfri inom 20 minuter (Rahmatmand et al., 2018; Weiss & Weiss, 2016). Om avglidning inte sker måste hela snölasten smältas undan. Fasövergången från fast snö och is till flytande vatten är energikrävande, cirka $0,1 \text{ kWh/kg}$, och det kan krävas mer energi att smälta bort all snö än vad man får ut i

ökad solexproduktion beroende på hur länge modulerna förblir snöfria (Aarseth et al., 2018). Uppvärmning med framström kan i teorin tillämpas på redan befintliga anläggningar men kräver i praktiken stora likströmsaggregat för att kunna användas i stor skala, något som är dyrt. Inga forskningsstudier om hur solcellernas livslängd påverkas av framströmmen har identifierats.

Exempel på kommersialiserade snöborttagningsprodukter är SnowAway från Schletter (som en stor rund borste), Weight Watcher från Innos och De-Icing-Box från Inek Solar (smälter snö genom att mata ström genom panelerna så att de utvecklar värme) och Micro Thermal Dynamic från Scirus Technologies (integrerar mikrofilament i modulen som värmer framsidan). Av dessa är det endast Weight Watcher som är installerat på någon större solexanläggning (Frimannslund & Thiis, 2019).

Ytbehandlingar som stöter bort snö och is skulle i teorin kunna undvika att snö eller is överhuvudtaget ansamlas på modulerna. Det finns ingen produkt på marknaden särskilt framtagen för detta ändamål, men mycket forskning pågår. De försök som genomförts i praktiken har däremot problem med dels prestanda, där ingen teknik påvisat goda egenskaper för olika typer av snö samt is och frost, dels robusthet, där många ytbeläggningar snabbt nöts ner (Boinovich et al., 2019; Fillion et al., 2014). I den tillgängliga litteraturen omnämns superhydrofoba beläggningar som lovande (Jelle et al., 2016).

I det pågående projektet *Effekter och hantering av snölastar vid takmonterade solexanläggningar* (Energimyndigheten, projektnummer 47838–1) har RISE ETC samlat in erfarenheter från privata solexanläggningsägare och dessa använder vid behov egenutvecklade metoder för att ta bort snö. Sammanfattningsvis har endast ett fåtal metoder utvärderats vetenskapligt och ännu färre har jämförts mot varandra utifrån samma kriterier.

En utvärdering och provning av snöborttagningsmetoder skapar direkt nytta för alla ägare av solexanläggningar som ackumulerar snö. Genom att ta fram kunskap som kan användas för att formulera tydliga riktlinjer runt vad som krävs vid underhåll av solexanläggningar skapas en trygghet för solexanläggningsägare och försäkringsbolag såväl som andra aktörer i branschen. Skador på såväl moduler, underliggande takkonstruktion och konstruktioner i takets fallzon kan förebyggas. Vidare finns en stor produktionspotential i att kunna hålla anläggningar snöfria under vårvintern vid nordliga breddgrader, vilket erfarenheter från Alaska (Nash & Pike, 2018) såväl som resultat från avslutade RISE projekt visar (Lindh et al., 2020; van Noord et al., 2021).

1.1 SYFTE OCH MÅL

Syftet med provningen är att solexanläggningsägare ska kunna avlägsna snö från takmonterade solcellsmoduler utan att dessa tar skada för att på så vis undvika skador som kan uppstå på grund av att snö ackumuleras på modulerna. Målet är att karaktärisera runt fem stycken i dagsläget befintliga metoder med avseende på energiåtgång, tidsåtgång, personsäkerhet, kostnad och skadeeffekt och omsätta resultatet i rekommendationer för snöborttagning vid takmonterade solcellsmoduler.

2 METOD

Projektet inleddes hösten 2019 med avsikt att testa snöborttagningsmetoder under en vinter (2019/2020), med möjlighet att sträcka sig ytterligare en vinter (2020/2021) om den första visade sig snöfattig.

2.1 VAL AV SNÖBORTTAGNINGSMETODER

Inledningsvis genomfördes en litteraturstudie och kartläggning av snöborttagningsmetoder, dessa metoder bedömdes därefter av projektgruppen utifrån den förväntade prestandan i kategorierna: tillgänglighet, pris, snöhantering, ishantering, moduls-kaderisk och persons-kaderisk. De fyra metoder som bedömdes intressanta var eluppvärmning med framström, ytbehandling, snöhyvel och takraka. Appendix 6.1 redovisar urvalet.

Eluppvärmningen med framström innebär i praktiken att man använder el för att få anläggningen snöfri tidigare på året och därmed mer produktiva timmar. För att det ska vara lönsamt måste därmed mer elektricitet produceras under den tiden än vad som gått åt för att få undan snön. Förutsatt att snön kan glida av anläggningen förväntas en relativt låg energimängd behövas, om inte så måste snön smältas undan helt.

För den första vinterns tester valdes en hydrofob ytbehandling med handelsnamnet *Nanoflex®VP 20* eftersom en svensk återförsäljare nämnde solcellsmoduler som tillämpningsområde, behandlingens huvudsakliga syfte är att minska nedsmutsning av exempelvis vindrutor på bilar. Den andra vintern användes en annan hydrofob ytbeläggning särskilt framtagen för solcellsmoduler och blöt snö inom ramarna för ett EU-projekt (Super PV, 2021).

De två återstående metoderna, snöhyvel och takraka, är snarlika. Båda metoderna innebär att man från marknivå mekaniskt tar bort snön från takanläggningen med hjälp av ett verktyg monterat på teleskopskaft. Med snöhyveln skär man ut block av snötäcket som sedan glider ner för en hal presenning medan man med takrakan drar ner lite snö i taget. Metoderna valdes utifrån sin lättillgänglighet och att användning från marknivå ansågs fördelaktigt utifrån en låg risk för persons-kador. För snöhyveln valdes en modell med hjul i plast som säkerställer att själva hyveln inte kommer i direktkontakt med solcellsmodulen, detta för att minimera risken för anläggningsskador. För takrakan valdes en modell där ena sidan av huvudet hade en skumgummilist, även detta för att minimera skaderisken.

2.2 UTFORMNING AV TESTANLÄGGNING

Under hösten 2019 konstruerades en 5x12m byggnad med ett 14°-lutande pulpettak på parkeringen utanför RISE ETC:s lokaler i Piteå (65,3°N). Taklutningen valdes för att motsvara ett låglutande garagetak och bli ett värstafallscenario där mycket snö kan ansamlas utan att enkelt glida av. Det 12-meter breda taket är riktat mot syd och har plats för 20 solcellsmoduler av standardstorlek (1x1,7m). Till sydväst om anläggningen finns pappers- och massabruket *Smurfit Kappa* vars byggnader skuggar anläggningen från ungefär kl. 14, se Figur 1. Detta gör att den naturliga avsmältningen från mars och framåt inte blir fullt lika påtaglig som för en helt oskuggad anläggning.

Takets nedre kant är 1,2 meter högt, längs med kortsidor samt övre långsida finns räcken som permanenta fallskydd. I ett av de övre hörnen sitter en väderstation av typen *Davis Vantage Pro2* som mäter temperatur, vindstyrka, vindriktning, relativ luftfuktighet och regn med 5 minuters intervall. Under vintern 2020/2021

fotograferades även anläggningen med 30 minuters intervall av en *Reolink Go PT* kamera.



Figur 1: testanläggningen den 10 mars 2021 kl. 13:20.

För att säkerställa att modulerna som användes i projektet höll lika kvalitet och hade lika förutsättningar från start var utgångspunkten att inskaffa ett överskott av moduler som sedan kunde granskas i större detalj på plats och sållas ner till de 20 som monterades upp på taket.

Samtliga moduler var under vintern 2019/2020 av typ *Longi LR6-60PB-305M*, vilka är monokristallina kiselmoduler bestående av 60 solceller med en framsida av härdat glas och en svart folie på baksidan. Ramen består av aluminium och är 35 mm djup, den framträder 2 mm från glasets nivå och profilen av kanten mot glaset är rundad. Modulerna är certifierade enligt IEC 61215 för en homogen och statisk snölast på 5400 Pa. Modulerna delades upp i fem grupper med fyra i vardera fördelade på två rader. De monterades längs samma skenor mitt på taket med cirka 20 cm mellan varje grupp, se Figur 1. Infästningspunkterna på modulerna är enligt montagetillverkarens specifikationer. En grupp användes som kontroll, där ingen snöborttagningsmetod tillämpades, medan resterande fyra grupper blev tilldelade varsin snöborttagningsmetod. Figur 2 visar gruppernas placering och interna numrering.

Efter den första vintern byttes de fyra ytbehandlade *Longi*-modulerna ut mot fyra nya ytbehandlade moduler från den litauiska solcellsmodultillverkaren *SoliTek*. Här valdes moduler med så lik utformning som möjligt jämfört med de föregående, vilket blev *SoliTek Standard M.60-B-330*, monokristallina 60-cellsmoduler med svart folie på baksidan och en 35 mm djup aluminiumram. De största skillnaderna mot de föregående modulerna var den lägre IEC 61215 lastklassningen på 3600 Pa och aluminiumramens profil mot glaset som var rätvinklig i stället för rundad mot glaset. Glasets yta och hydrofobicitet kan också variera mellan fabrikaten, men detta framgår inte av databladet. *SoliTek* levererade sex moduler, varav fem var ytbehandlade och en obehandlad för jämförelser.

Den standard som belastningscertifieringen baseras på mäter helt homogena laster i rumstemperatur.



Figur 2: de olika modulgruppernas placering och modulernas interna numrering.

Eftersom syftet med provningen av snöborttagningsmetoder huvudsakligen är dess mekaniska påverkan på solcellsmodulerna kopplades de inte in på elnätet eller mot annan elektrisk last. Elanslutningen från modulerna är däremot indragen i själva byggnaden så att samtliga moduler enkelt kan kopplas mot mätutrustning vid behov.

2.3 MÄTNING OCH UPPFÖLJNING AV DEFEKTER OCH SLITAGE

I projektets uppstart beställdes och levererades solcellsmodulerna från Longi till RISE lokaler i Borås där enheten Mätteknik har en *IV-flasher* som användes för att mäta solcellmodulernas ström- och spänningskaraktäristik. Detta utfördes på samtliga moduler för att kartlägga deras prestanda i nyskick och upptäcka eventuella avvikelser.

När framström matas in i en solcellsmodul utvecklas inte bara värme, det avges också ljus i det nära infraröda spektret i en process kallad elektroluminiscens (EL). Med hjälp av en kamera som kan se detta ljus kan man upptäcka defekter såsom sprickor som inte leder ström och förblir mörka under framströmmen. Detta utfördes i Borås för att upptäcka eventuella skador innan modulerna skickades till Piteå, där det utfördes igen för att kontrollera att inga detekterbara skador uppkommit under transporten. I Piteå genomfördes även termografisk inspektion i det långvågiga infraröda spektret med hjälp av värmekamera, vilket innebär att man söker elektriska defekter som ger avvikande värmeutveckling, så kallade *hot-spots*.

Fyra moduler blev ytbehandlade enligt återförsäljares instruktioner. Därefter utfördes kontaktvinkelmätningar, som mått på hydrofobicitet, med hjälp av en *Pocket Goniometer PGX+*. För avjoniserat vatten uppmättes statiska och dynamiska kontaktvinklar mot solcellmodulens yta. För att en yta ska räknas som hydrofob krävs en statisk kontaktvinkel över 90° och för att vara superhydrofob måste den vara över 150° . Förhållandet mellan en dynamisk droppes avancerande och tillbakadragande kontaktvinkel, benämnt hysteres, är också ett mått på hydrofobicitet. Låg hysteres tyder på hög hydrofobicitet.

Efter varje vinter utfördes fler mätningar för att kartlägga modulernas status. EL-fotografering genomfördes på testanläggningen för att kontrollera om skador uppkommit under vintern och på grund av snöborttagningen. En ytbehandlad modul och en kontrollmodul monterades ner för kontaktvinkelmätning. De monterades upp igen nära inpå nästa vinters början för att undvika slitage som inte beror på vinterförhållanden. Övriga moduler lämnades på taket över sommaren för att undvika icke nödvändig hantering som kunde leda till skador. När modulerna åter var på plats

genomförs ny EL-mätning för att säkerställa att inga nya sprickor uppkommit innan vintern. Vilka mätningar som genomfördes och när presenteras i Tabell 1.

Tabell 1: redovisning av samtliga mättillfällen under projektet, "Tillfälle" avser plats, höst (H) eller vår (V) och år. "X" markerar att mätning utförts på samtliga moduler och "x" att mätning utförts på ett begränsat urval moduler.

Mätmetod				
Tillfälle	IV-flashning	EL-foto	Termografi	Kontaktvinkel
Borås H19	X	X		
Piteå H19		X*	X	x
Piteå H20		X		x
Piteå V21		X		
Piteå H21		X**		x

* Utfördes inomhus till skillnad från resterande tillfällen i Piteå.

** Vid rapportskrivning ännu ej utfört.

2.4 UTFÖRANDE AV OCH MÄTNINGAR VID PROVNINGSTILLFÄLLEN

Efter perioder med snöfall, då snötäcket översteg 20 cm, inleddes den aktiva snöborttagningen med snöhyvel och takraka, för eluppvärmningen inväntades även gynnsamma väderförhållanden. För den ytbehandlade modulgruppen sker snöborttagningen helt passivt. Gemensamt för samtliga grupper är att snödjupet mäts manuellt med tumstock vid takfoten innan provning och taket fotograferas med kamera och drönare. Dessa foton utgör grunden för observationer och utvärdering av den ytbehandlade modulgruppen.

För den eluppvärmda gruppen kopplas ett likströmsaggregat av typ *EA-PS 9000T 1500 W* i serie med de fyra modulerna och en framström på 1200 W matas in, detta valdes för att inte överstiga modulernas enskilda märkeffekt på 305 W. För att veta hur mycket energi som går åt för att smälta snön noteras tiden när försöket inleds och avslutas och aggregatet kopplas in mot en energimätare. Den använda effekten på 1,2 kW motsvarar en avsmältning på cirka 12 kg/h för hela gruppen. Modulernas area medför att detta motsvarar en lastreduktion på cirka 17 Pa/h. Som exempel motsvarar 10 cm snö med en densitet på 200 kg/m³ 196 Pa och enbart fasövergången skulle således ta cirka 12 timmar. För att följa värmeutvecklingen i modulerna monterades *Tinytag Plus 2* med externa PT100-givare på baksidan av en eluppvärmd modul och en kontrollmodul. Då ingen fast elinstallation finns i anläggningen drogs el in från närliggande motorvärmarstolpe över parkeringen via en kabelvinda. Eluppvärmning genomfördes endast under kontorstid och efter parkeringen skottats vid snöfall för att undvika skottningsrelaterade skador på kablage och elutrustning. Eluppvärmning utfördes inte samtidigt som annan aktiv snöborttagning om temperaturen var lägre än -15°C eftersom det bedömdes ineffektivt.

Med snöhyveln togs så mycket snö som möjligt bort. Hyvelns huvud med sina hjul placerades på modulernas nedre kant och sköts upp över modulgruppens båda rader.

Med takrakan togs beroende på snödjupet ca 10–20 cm snö bort åt gången tills övre kant av modulerna nåtts. Enbart sidan med skumgummilist var menad att användas för att minska risken för skador på modulerna.

Efter snöborttagningen fotograferades taket åter med kamera och drönare. Mätförfarandet finns sammanfattat i protokollet i Appendix 6.2.

2.5 SKATTAT ELPRODUKTIONSORTFALL FRÅN SNÖTÄCKNING

För att uppskatta eventuella produktionsbortfall från snötäckning genomfördes simuleringar i programmet *PVsystem*. Dessa simuleringar utgår från fyra solcellsmoduler identiska med de *Longi*-moduler som är monterade på anläggningen och är i simuleringen kopplade mot mikroväxelriktare för att kunna hantera den relativt låga simulerade effekten från respektive grupp. Resultaten baseras dock på likströmseffekten för att undvika växelriktarnas inverkan. Från SMHI:s mätstation i Luleå, den närmsta med högkvalitativa data, användes data för globalinstrålning, temperatur och vindstyrka. Elproduktionen simulerades över ett år på timnivå. Från övervakningskamerans bilder fastställdes också vilka timmar under vintern som modulerna var snötäckta. Timmarna med snötäckning matchades mot den simulerade elproduktionen för att skatta elproduktionsbortfallet. Jämförs den resulterande årsproduktionen med den simulerade utan snöskuggning erhålls de årliga snöförlusterna. Hänsyn har inte tagits till skuggningen från *Smurfit Kappa* i simuleringarna.

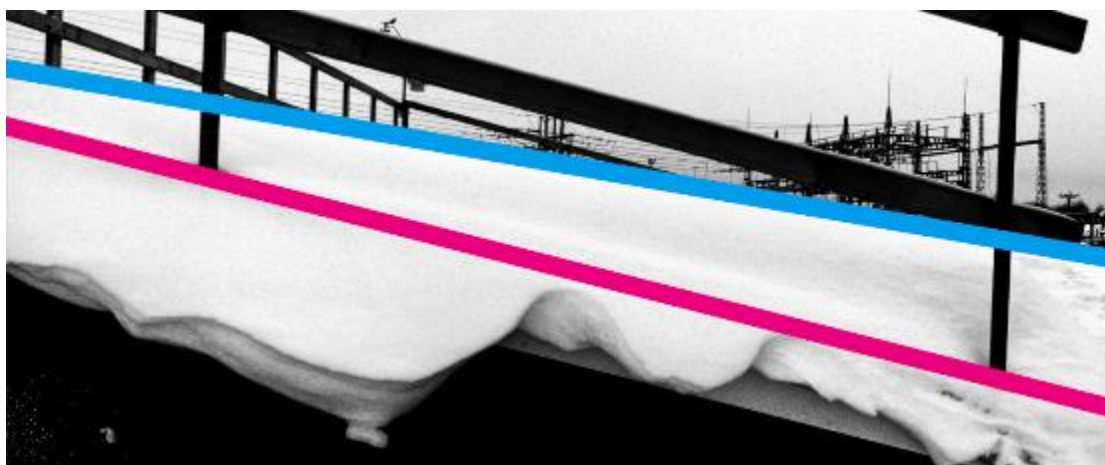
Att modellera produktionen vid snötäckning kräver en del förenklingar och antaganden. En delvis snötäckt modul kan helt tappa sin elproduktion, därför bedömdes delvis snötäckning medföra helt utebliven elproduktion i bildanalysen. Undantag gjordes för snö som bedömdes ligga kvar på grund av de små modulgrupperna och de korta avstånden mellan dem, det vill säga snö som sannolikt ej legat kvar på en större anläggning med färre kanteffekter som använt samma snöborttagningsmetod. Detta har en liten effekt på slutresultatet då det endast omfattar några få dagar. Bildanalysen utfördes dessutom på gruppnivå, inte modulnivå, då det är vanligt att moduler är kopplade på gemensam sträng där den modul med lägst effekt kan begränsa resterande moduler. Det vill säga, om enbart en modul var snötäckt så försumrades hela gruppens elproduktion i analysen.

3 RESULTAT OCH DISKUSSION

Vintern 2019/2020 präglades av ojämna temperaturer och ovanligt lite snö. Detta medförde att det enbart blev ett snöborttagningstillfälle. Snön hade då påtagliga inslag av skare och is. Vintern 2020/2021 blev snörik med längre kalla perioder och snön var ofta torr och vindpackad utan skare vid snöborttagningstillfällena.

3.1 SNÖANSAMLING

Viss variation observerades i snöns ansamling på taket. Mindre snö ansamlades närmast takets kanter och mer snö ansamlades på takets nedre halva. Det vill säga att mest snö, och därmed tyngst snölaster bedöms ha ansamlats på den nedre modulraden och de centrala grupperna, se Figur 3 och Figur 4 (a).



Figur 3: asymmetrisk snöansamling på testanläggningen 2021-01-25. Lutningen av snötäckets profil representeras av den blå linjen, medan den röda representerar takets lutning, skillnaden påvisar att mer snö ansamlades på takets nedre del.

Snödjupet vid takfoten vid modulgrupperna före och efter olika snöborttagningstillfällen presenteras i Tabell 2. Typiskt sett låg 0–5 cm snö kvar på modulernas nedre kant efter mekanisk snöborttagning. Mer snö ansamlades på de ytor där snö tagits bort mellan snöborttagningstillfällena, sannolikt bidrar den omgivande orörda snön med vindförhållanden som gör att snön deponeras just där. Vid maxnoteringen 2021-02-25 uppmättes en snödensitet på närliggande yta till 212 kg/m^3 vilket ger en maximal snölaster på 1040 Pa för eluppvärmd, ytbehandlad och kontrollgrupp.

Tabell 2: snödjup för de olika grupperna vid olika tillfällena. Mätningarna utfördes vid takfoten mitt framför respektive modulgrupp före och efter snöborttagning.

		Snödjup [cm]				
Datum		Eluppvärmd	Ytbehandlad	Kontroll	Snöhyvel	Takraka
2020-02-07	Före	30	30	30	30	30
	Efter	30	30	30	2	0
2021-01-14	Före	40	40	40	40	40
	Efter	40	40	40	5	5
2021-01-25	Före	45	45	45	20	20
	Efter	45	45	45	2	0
2021-02-15	Före	40	40	40	9	8
	Efter	40	40	40	3	1
2021-02-25	Före	50	50	50	20	20
	Efter	40	50	50	2	1

3.2 UTFÖRD SNÖBORTTAGNING

3.2.1 ELUPPVÄRMNING MED FRAMSTRÖM

Ingen snöavglidning observerades och i stället smälte snön bort, vilket tog lång tid. Eluppvärmningen utfördes enbart under kontorstid när bemanning fanns på plats. Det skedde över flera dagar i perioder om 6–8 timmar. Den uppdelade uppvärmningen innebär att en viss del av smältvattnet och den blöta snön kommer kunna återfrysas mellan dessa tillfällen och behöva smältas om igen.

Taklutningen påverkar friktionen mellan modul och snö och var under rådande förhållanden inte tillräckligt hög för att snötäcket skulle kunna glida av. Modulernas ramar medförde även att snön kunde förankras mer i modulerna, vilket sannolikt förstärktes av de återfrysningsscykler som förekom. Modulgruppens storlek gör att kanterna är långa relativt ytarean, vilket även detta sannolikt bidrar till kraftigare förankring och att omgivande snö ”håller fast” snön på modulerna mer än om man haft större modulgrupp. Taket nedanför modulgruppen ansamlar också snö, vilket motverkar att snötäcket på modulerna ska kunna glida av vid uppvärmning. Denna parameter eliminerades i försöket den 15 februari genom att all snö nedanför modulgruppen togs bort med snöhyveln, men ingen snöavglidning skedde vid uppvärmning trots detta. Detta kan ha berott på att snötäcket var förankrat ovanför och på sidorna av modulerna och/eller hölls fasts av omgivande snötäcke. I framtida tester på samma tak bör därför snön på modulerna helt frigöras från omgivande snötäcke för att avgöra om lutningen och kanterna i sig är tillräckliga för att avglidning ska kunna ske. Detta kan indikera att snöavglidning skulle kunna ske vid låg lutning vid en större modulgrupp och gynnsamma förhållanden.

Eluppvärmningsförsöken under 2021 använde totalt 32,89 kWh el över 27,4 timmar för att smälta undan snö över fyra dagar med gynnsamma förhållanden, dessa dagar var 8/2, 15/2, 25/2 och 26/2. Lufttemperaturen var som lägst -8°C och som högst +8°C. Detta finns sammanställt i Tabell 3. Smältning observerades vid samtliga tillfällen men modulerna blev aldrig helt snöfria. Toppnoteringen på 1040 Pa snölast var inhomogen

över de lutande modulerna, grovt uppskattat kan den förväntade faktiska lasten ligga inom intervallet 520–1040 Pa, alltså hälften till toppnotering. Den lasten motsvarar cirka 32–64 timmars eluppvärmning vilket får anses ligga nära det faktiska utfallet där inte all snö smältes undan helt. Temperaturer för baksida på eluppvärmd och kontrollmodul redovisas för tillfällena under 2021 i Appendix 6.4. Notera att den eluppvärmda modulens baksida snabbt blev över 0°C för att sedan stabiliseras vid cirka +2°C, detta tyder på att ett jämviktsläge uppstått där modulens framsida är varm nog för att smälta snö och is vid 0°C medan baksidan är något varmare. Undantaget är den 15 februari där baksidan når en maxtemperatur över 5°C under en inledande period. Detta kan bero på att det bildats en kavitet när snön smält bort i föregående försök. Detta får som följd att kavitetens luft måste värmas upp tillräckligt för att konvektivt smälta snön, något som observerats i forskningslitteratur (Rahmatmand et al., 2018). Det sista tillfället ägde rum på en fredag och då blev modulerna delvis snöfria. Detta återspeglas också i temperaturdatat, där temperaturen vid dagens slut snabbare ändrades för den eluppvärmda modulen som nu saknade ett isolerande snötäcke. Under följande helg var det konstant plusgrader och dagarna var soliga, vilket gjorde att alla moduler i den eluppvärmda gruppen utom den nedre som angränsade den ytbehandlade modulgruppen var snöfria på måndagen 1/3. Bilder från detta förlopp visas i Figur 4.

Tabell 3: förutsättningar inför varje eluppvärmningstillfälle.

Datum	Lufttemperatur min/max [°C]	Snödjup före [cm]	Tid [h]	Använd el [kWh]	Kommentar
2020-02-07*	-1,8/-1,3	30	1,5	0,46	Enskild modul under kort tid
2021-02-08	-7,8/-4,7	40**	6,4	7,73	
2021-02-15	-7,7/-1,9	40	6,2	7,43	Snö nedanför moduler togs bort innan försöket. Mycket is närmst modulerna.
2021-02-25	+1,7/+7,9	50	7,3	8,72	
2021-02-26	+2,9/+6,8	45**	7,5	9,01	Hörnet uppe till vänster snöfritt.

* Testtillfälle på enskild modul under kort tid.

** Ingen mätning genomförd, snödjup uppskattat från bildmaterial.



Figur 4: (a) anläggningen innan den sista eluppvärmningen, (b) efter eluppvärmning, (c) efter helgen när den mesta återstående snön smält undan naturligt från modulgruppen.

3.2.2 YTBEHANDLING

För de ytbehandlingar som testades observerades ingen reducerad snöackumulering. SoliTek-modulerna presterade snarare sämre än kontrollmodulerna och detta beror sannolikt på utformningen av modulramens kant mot glaset. Två exempel presenteras i Figur 5.



Figur 5: ytbehandlad SoliTek-grupp i rött, vid två tillfällen; (a) tunt lager blöt snö som sannolikt hålls kvar av ramkanterna; (b) snömängd som täcker både ytbehandlad och kontrollgrupp långt in på våren.

3.2.3 SNÖHYVEL

Hyveln var enkel att använda och avlägsnade snön effektivt. Då redskapets huvud sköts fram längs med modulen med ett litet avstånd undveks hastiga dynamiska krafter ortogonala mot modulen och risken för modulsador upplevdes låg.

Viss problematik uppstod på grund av just den valda snöhyvelmodellens utformning. Skaftet var fäst vid redskapshuvudet undersida, vilket medförde att skare eller andra block av sammansatt snö och is kunde glida ner längs skaftet mot den som utförde snöborttagningen. Dessutom visade sig is och skare problematiskt att skära sig genom, därför bedöms denna metod framför allt vara lämpad att använda innan skare uppstår, det vill säga före perioder med plusgrader eller regn.

Ju längre teleskopskaftet blev desto svårare blev det att ta undan snö. I stället för att hjulen låg mot modulen så hyveln kunde ta bort den mesta snön fanns en tendens till att det långa glasfiberskaftet fjädrade upp hyveln och snö packades under den och byggde en slags ramp ju högre upp man kom. Detta var särskilt påtagligt vid lös och sockrig snö. Vid små snömängder gled hyveln över snötäcket i stället för att avlägsna det. Detta ledde till att det ofta låg kvar mer snö vid anläggningens topp. Snöhyveln lämnade kvar cirka 2 cm snö längst ner på modulgruppen och upp mot 10 cm vid dess övre kant beroende på snöns karaktäristik. Figur 6 visar exempel på snöborttagningen vid olika typer av snö.

3.2.4 TAKRAKA

Jämfört med snöhyveln var snöborttagning med takrakan mer tidskrävande och arbetsintensiv att utföra. Även för det relativt få antalet moduler blev det svårhanterligt med teleskopskaftet utvecklat då takrakan måste lyftas upp ovan de snöpartier man vill ta bort och sedan måste all snö dras ner från taket. Bara en liten snömängd kan rakas ner åt gången och kräver därmed många repetitioner vid större snömängder. När redskapet faller genom snötäcket för att sedan kunna rakas av utsätter man

underliggande moduler för ökade dynamiska krafter, vilket kan medföra ökad risk för skador. Detta blir särskilt påtaglig när man har skare eller packad och blöt snö som takrakan inte enkelt kan falla genom. Då krävs ökad kraft och därmed skaderisk för att få modulerna snöfria.

En brist i den typ av takraka som användes är att bara en långsida har skumgummilist. Vid det repetitiva arbetet med teleskopskaft i kalla temperaturer fanns risk för att tappa greppet så takrakan kan rotera och en kant i hårdplast kan träffa modulerna i stället för skumgummit. Detta skedde vid snöborttagningen den 7 februari 2020, då slog ett hörn av hårdplast hos takrakan i modul 1 eller 3 i gruppen.

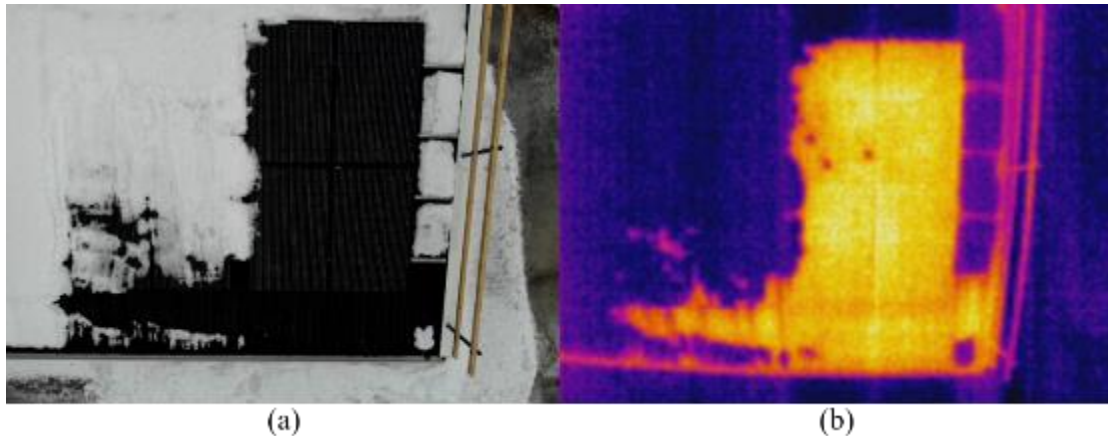
Takrakan efterlämnade generellt sett lite snö tillsammans med den frost och is som satt fast på modulglaset. Figur 6 visar hur mycket snö som inte kunde tas bort vid två tillfällen med olika förhållanden.



Figur 6: modulgrupper efter mekanisk snöborttagning; (a) 2020-02-07, grov och sockrig snö med skare gjorde att snön vid snöhyvelgruppens topp inte kunde avlägsnas, takrakans grupp blev nästan helt snöfri; (b) 2021-01-25, finkornig, vindpackad och torr snö kunde tas bort effektivt med snöhyvel men fjädringen i teleskopskaftet gjorde det svårt att ta undan den översta snön, takrakan kunde inte ta bort den sista finkorniga snön från modulerna.

3.2.5 GENERELLT

De mekaniska metoderna var effektiva på att minska snölasten, men modulerna blev aldrig helt snöfria av enbart dem. För att modulerna ska bli snöfria krävs också gynnsamt väder, det vill säga antingen plusgrader eller hög solinstrålning utan att det är för kallt. Ju mindre snö som finns på modulerna desto snabbare tinar de fram och mer elektricitet kan produceras. Om enbart ett litet område av modulen blir snöfritt verkar snösmältningen påskyndas markant, detta då den svarta modulen absorberar solljuset och värms upp snabbare än den reflektiva snön. Figur 7 visar fenomenet tre dagar efter snöborttagningen i Figur 6 (a). För 2021 dröjde det till slutet av februari tills det kom dagar med regelbundna lufttemperaturer nära noll grader.



Figur 7: 2020-02-10, (a) grupperna med mekanisk snöborttagning efter några dagar med gynnsamma förhållanden; (b) samma moduler fotograferade med värmekamera, gult är varmt och lila kallt. Temperaturskillnaden mellan modulerna och snön är tre grader under en mulen dag.

Snöborttagningen är enklare att genomföra innan det bildats skare eller snön är för blöt och tung. Om anläggningen är täckt med mycket snö kan det därför vara lämpligt att utföra snöborttagningen medan snön fortfarande är torr, innan töväder eller regn.

3.3 ELEKTRISK KARAKTÄRISERING

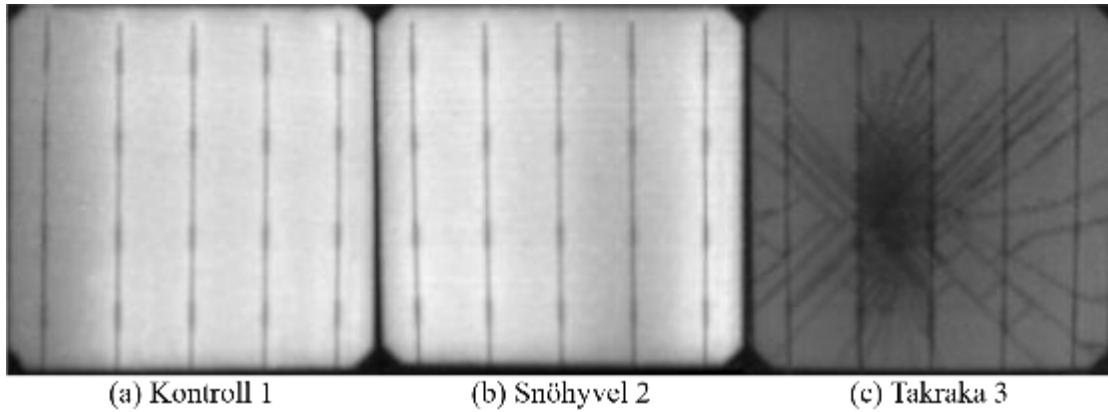
Vid den inledande elektriska karakteriseringen presterade de flesta modulerna som förväntat. Alla levererade en effekt på 307–309 W baserat på tre mätserier, vilket var inom den utlovade effektspannet på 305 W + 5 W.

3.4 ELEKTROLUMINISCENS OCH TERMOGRAFI

Vid inledande EL-karakterisering i Borås uppmärksammades inga fel på någon av de moduler som slutligen monterades upp på testanläggningen. När modulerna anlät till Piteå genomfördes ytterligare en EL-karakterisering, samt termografering, inga nya defekter hittades.

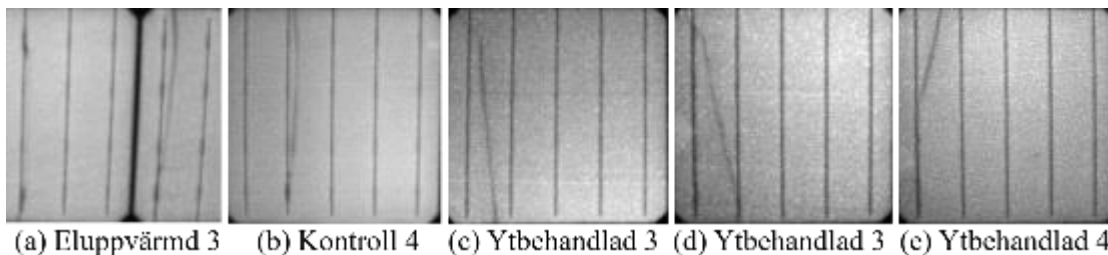
Efter den första vintern när modulerna från *SoliTek* anlände EL-karakteriserades även dessa. Ingen modul påvisade sprickor, men vissa mindre materialdefekter fanns.

Inför den andra vintern utfördes ny EL-karakterisering av modulerna. Tre defekta celler identifierades i tre olika moduler, se Figur 8. För Kontroll 1 och Snöhyvel 2 vittnar mörka områden vid enskilda strömskenor ("busbars") att de sannolikt delvis tappat kontakt. Detta kan bero på produktionsfel och bedöms inte vara relaterat till snö. För Takraka 3 har en hel cell spruckit med en tydlig belastningspunkt. Detta har sannolikt skett i samband med snöborttagningen beskriven i 3.2.4 Takraka, men eftersom ingen EL-karakterisering utfördes mellan installation och snöborttagning kan det inte uteslutas helt att skadan uppstått under själva installationen.



Figur 8: EL-foton efter en vinters snöborttagning: (a) och (b) defekta strömskenor, (c) sprucken cell från punktbelastning.

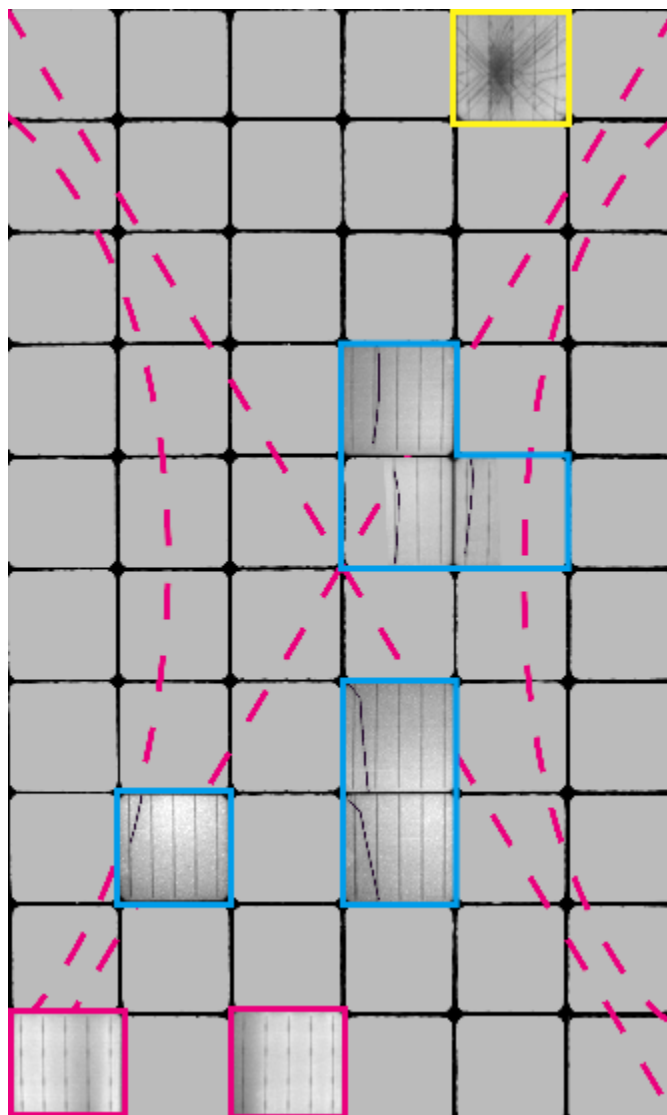
Efter den andra vintern, i maj 2021, utfördes återigen ny EL-karaktärisering. Celler från en eluppvärmd och en kontrollmodul uppvisade snarlika skador där det till synes bildats svängande sprickor längs med strömskenor, se Figur 9 (a) och (b). I Figur 9 (c), (d) och (e) visas defekter i två ytbehandlade moduler, som var av annat fabrikat än övriga moduler, där samtliga har uppstått mellan samma strömskenor. Notera att (c) och (d) nästan är identiska och från två intilliggande celler i samma modul. Samtliga moduler är från den nedre modulraden, där mer snö ansamlades. Dessa skador kan ha uppstått som en följd av snöbelastningar, trots att den uppmätta lasten vid maximalt snödjup var 1040 Pa, vilket är långt under vad modulerna är klassade att tåla. Denna klassning kan dock vara bristfällig då den utförs vid 25°C medan kalla temperaturer verkar underlätta uppkomsten av mikrosprickor som sedan kan växa sig större under ytterligare belastningar (Schneller et al., 2019; Seigneur et al., 2019). Eftersom skadorna är snarlika mellan cellerna inom respektive fabrikat, och dessa sannolikt kommer från samma produktionsserie, är det möjligt att det är en svaghet i cellerna härstammande från produktionen bidragit till att skadorna har kunnat utlösas vid så pass låg belastning.



Figur 9: EL-foton på de defekter som uppmärksammats efter den andra vintern: (a) och (b), snarlika defekter för olika ledningsband på olika celler och olika Longi-moduler; (c) – (e) defekter i celler på SoliTek-moduler.

De skadade cellerna från Figur 8 och Figur 9 är sammanställda i Figur 10 för att visa vart på respektive modul som skadorna uppstått. Vid homogena belastningsskador är det typiskt att sprickor bildar ett X-mönster över modulen (Köntges et al., 2014; Seigneur et al., 2019), vilket sprickorna här har en tendens att göra. Sprickorna har inte medfört några isolerade och mörka områden, vilket innebär att elektronerna från områden runt sprickorna kan ledas till strömskenorna. Elproduktionen från dessa celler är därför sannolikt inte märkbart lägre än intilliggande celler och modulen i sig kan förväntas fortsatt producera el. På sikt kan det finnas risk att sprickorna propagerar så

att cellområden isoleras och får reducerad elproduktion. I samband med mätningar av ytskiktet hos ytbehandlad modul 3 genomfördes även termografi där ingen avvikande värmeutveckling vid sprickorna uppmärksammades. Detta innebär i sin tur att mekaniskt slitage hos en solcellsmodul i nordliga förhållanden, i varje fall i det initiala skedet, inte nödvändigtvis kan upptäckas med minskad produktion eller termografi. Denna sprickbildning blir sannolikt mer påtaglig för varje vinter som går med nya belastningscykler och kan på sikt i värsta fall medföra kraftig degradering och produktionsbortfall (Schneller et al., 2017).



Figur 10: de identifierade cellskadorna från olika moduler och deras placering sammansatta i en schematisk modul: i gult den krossade cellen från Figur 8 (c); i blått de potentiella belastningssprickorna från Figur 9, sprickorna har markerats med svart för bättre synlighet; i rött de defekta strömskenorna från Figur 8 (a) och (b). De rödstreckade linjerna visar det typiska sprickmönstret för homogena belastningar.

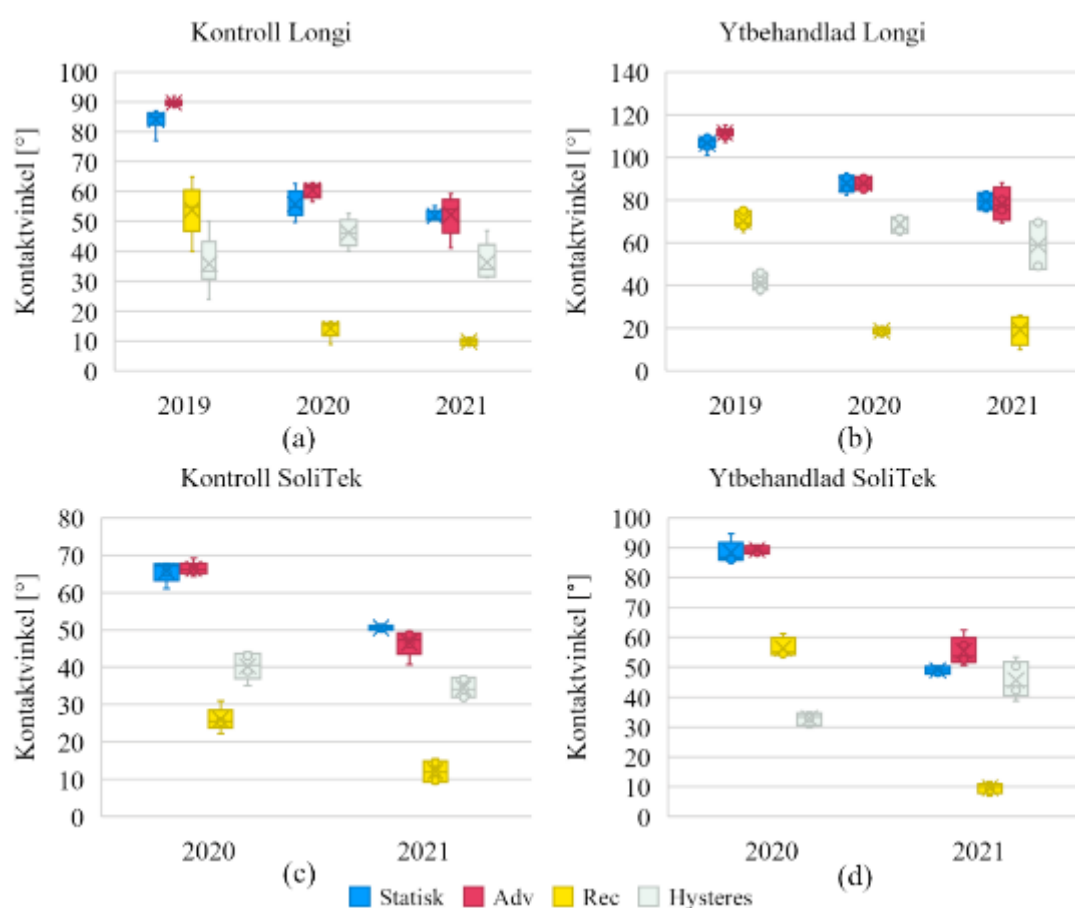
3.5 YTMÄTNINGAR

För att mäta slitage och degradering av ytskikt utfördes inför varje vinter kontaktvinkelmätningar på ett urval ytbehandlade och icke-ytbehandlade moduler. Den

ytbehandlade *Longi*-modulen påvisade inledningsvis god hydrofobicitet med statistiska kontaktvinklar mellan 101–110° medan kontrollmodulen av samma fabrikat låg lägre på 77–86°. Efter en vinters slitage hade de degraderat till 82–93° respektive 50–63° och efter ytterligare en vinter uppmätte de 75–84° respektive 51–55°. Notera att de ytbehandlade *Longi*-modulerna var inomhus hela den andra vintern då de ersatts av *SoliTek*-moduler, se Figur 11 (a) och (b). Ytbehandlingen verkar alltså degraderat men fortfarande ha viss effekt.

SoliTek-modulens ytbehandling påvisade inte lika god hydrofobicitet och uppmätte inledningsvis 86–95° medan kontrollmodulen uppmätte 61–68°. Notera att ingen av *Longi*-modulerna i kontrollgruppen på testanläggningen ersattes med *SoliTek*-modulen. Efter en vinters slitage uppmätte den ytbehandlade 47–50° och nya mätningar på kontrollmodulen som enbart stått inomhus visade 50–51°. De lägre värdena jämfört med *Longi*-modulerna tyder på att själva glasets ytstruktur skiljer sig åt. Varför kontrollmodulen uppvisar stor skillnad mellan mättillfällena trots att inget slitage bör skett är förvånansvärt. Antingen har mätningarna utförts inkorrekt vid det ena tillfället eller så fanns någon typ av beläggning eller hinna på modulen som inte omedelbart kunde tvättas bort med isopropanol men i stället försvunnit över det senaste året.

Inga tydliga trender går att utläsa från modulytornas hysteres.



Figur 11: statistiska och dynamiska kontaktvinklar samt hysteres för: (a) icke-ytbehandlad *Longi*-modul som varit monterad utomhus två vintrar; (b) ytbehandlad *Longi*-modul som varit monterad utomhus en vinter och sedan stått inomhus; (c) icke-

ytbehandlad SoliTek-modul som enbart stått inomhus; (d) ytbehandlad SoliTek-modul som varit monterad utomhus en vinter.

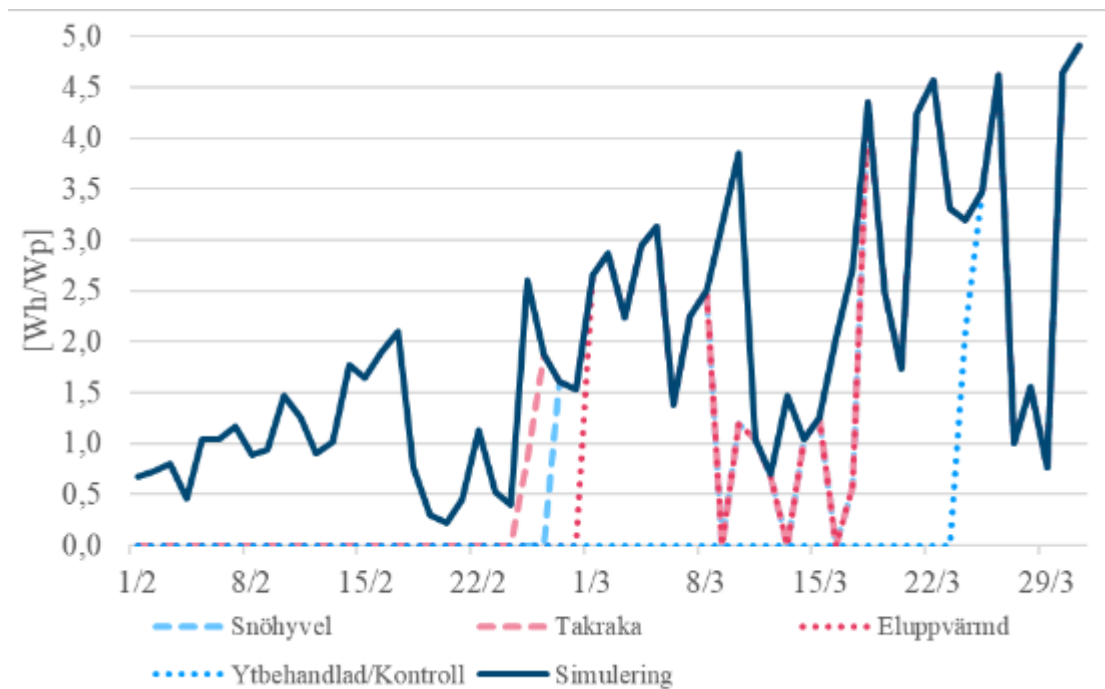
3.6 SNÖFÖRLUSTER

PVSyst-simuleringar genomfördes med ett års väderdata från SMHI:s station i Luleå från 2020-06-01 till och med 2021-05-31. Den simulerade modulgruppen levererade 1181 kWh likström, motsvarande 968 Wh/W_p. Antalet timmar med snötäckning för respektive grupp utifrån bildanalysen presenteras i Tabell 4 tillsammans med relevant simuleringsdata och den faktiska elanvändningen för den eluppvärmda gruppen.

Tabell 4: timmar med snötäckning utifrån bildanalys och simulerad likström som korrigerats mot snöskuggningen.

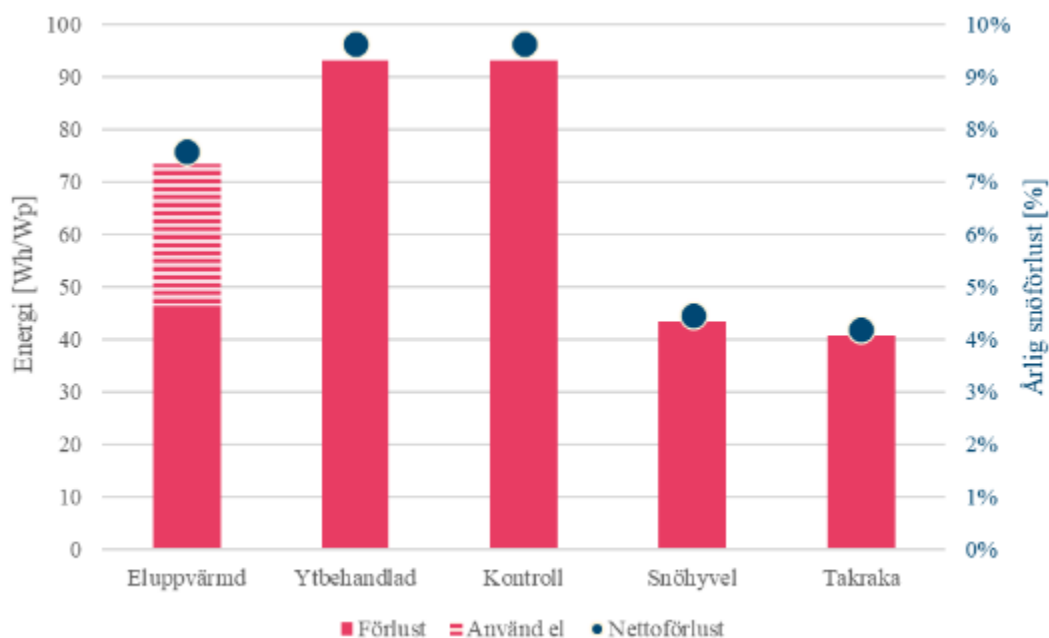
	Simulering	Eluppvärmd	Ytbehandlad	Kontroll	Snöhyvel	Takraka
Timmar med snö [h]	-	1975	2432	2428	1912	1885
Likström [Wh/W_p]	968,5	922,0	875,3	875,3	925,1	927,8
Förlust [Wh/W_p]	-	46,41	93,20	93,20	43,32	40,65
Använd el [Wh/W_p]	-	26,96	-	-	-	-
Årlig nettoförlust	-	7,58%	9,62%	9,62%	4,47%	4,20%

Figur 12 visar den dagliga simulerade elproduktionen tillsammans med respektive modulgrupps produktion för februari och mars 2021 när modulgrupperna blev snöfria. Gruppen med takraka blev snöfri först den 25 februari, en dag före snöhyvelgruppen den 26 februari och den eluppvärmda gruppen räknades som snöfri från första mars. Ytbehandlad och kontrollgrupp blev snöfria samtidigt den 24 mars. Eftersom elproduktion försummas helt vid delvis snötäckning har snötäckta moduler ingen produktion i denna utvärdering, vilket motsvarar ett worst-case scenario där hela modulsträngen begränsas av de snötäckta modulerna. För mer gynnsamma snöskuggningsmönster eller för en soleanläggning där varje modulrad har separat sträng eller optimerarsystem förväntas förlusterna bli mindre eftersom elproduktionen kommer i gång tidigare. Kanteffekterna från anläggningen kan också påverkat och gynnat specifikt den eluppvärmda gruppen eftersom mindre snö verkade ansamlas där jämfört med kontrollgruppen, vilket gör att avsmältningen går fortare.



Figur 12: simulerad daglig elproduktion för februari och mars 2021 med utfallen från bildanalysen.

Figur 13 visar årliga förluster från snöborttagning och använd el för eluppvärmningen tillsammans med den årliga nettoförlusten i procent. Notera att eluppvärmningen enligt detta ger en energivinst jämfört med kontrollgruppen trots de bristande förutsättningarna utan avglidning och utan kontinuerlig avsmältning.



Figur 13: årliga energiförluster och använd el presenteras som kolumner och den procentuella nettoförlusten som punkter.

3.7 UTVÄRDERING AV SNÖBORTTAGNINGSMETODER

Av de undersökta metoderna har snöhyveln påvisat bäst resultat. Den har varit enkel att använda och har tagit bort mycket snö åt gången. Den har medfört låg skaderisk på anläggningen då den har minimal kontakt med själva modulen och inte utsätter den för ökad belastning. Snöhyveln har dock sina brister; för större anläggningar på högre konstruktioner kommer arbete med teleskopskaft vara svårt och de problem som uppmärksammades vid testanläggningen kommer då sannolikt förstärkas. Om förutsättningar finns för att arbeta säkert uppe på taket skall då en *takräv/snöräv* kunna användas. Den bygger på samma princip som snöhyveln men i stället för att vara monterad på skaft drar man den mot sig med linor och undviker på så sätt den fjädrande effekten som upplevdes med teleskopskaftet. Denna metod har dock inte testats under den aktuella provningen.

Eluppvärmningens utförande begränsades av testanläggningens utformning eftersom den inte på ett säkert sätt kunde vara aktiv utanför kontorstid. Suboptimal användning till trots antyder simuleringsresultaten att metoden kan vara lönsamt ur ett energiperspektiv. Frågan är hur anläggningens utformning påverkar; en anläggning med bättre förutsättningar för snöavglidning kommer vara effektivare för eluppvärmningen men även för en motsvarande kontrollgrupp och vice versa för en anläggning med sämre förutsättningar. Ett stort hinder för allmänheten är också elsäkerheten och inköpspriset. För en verklig anläggning måste först modulerna kopplas bort från lasten/el nätet och in mot en likströmskälla. Nya tekniska lösningar från växelriktartillverkare skulle kunna ge möjligheter att konvertera växelström direkt från elnätet till en framriktad likström att mata genom solcellerna. Eluppvärmningen visar potential men den finns i dagsläget inte utvecklad till en färdig produkt som lämpar sig för en bred marknad och kan därmed inte rekommenderas. För att få en lönsam avsmältning av snön krävs pålitliga väderprognoser och gynnsamt väder. Om målet är att eliminera belastningsskador på modulerna kan en kontinuerlig översikt av den aktuella lasten vara gynnsam och för att energianvändningen ska vara försvarbar måste sannolikt snön ha möjlighet att glida av i stället för att måsta smältas undan.

Ytbehandlingar har inte påvisat fördelaktiga resultat i denna studie. Det kan delvis bero på att anläggningens förutsättningar inte är lämpade. På denna anläggning bidrar den låga lutningen, modulernas ramar och det omgivande snötäcket runt om och nedanför modulgruppen till varför snön inte kunde glida av, detta är sant för samtliga modulgrupper. Minskas denna inverkan genom brantare lutning, ramfria moduler och inga störningar från omgivande snö kommer snön enklare glida av för både ytbehandlade och icke-ytbehandlade moduler. Då skapas också förutsättningar där ytbehandlingar får större möjlighet att få genomslag. Däremot vittnar det observerade slitaget av ytbehandlingarna om att de ännu inte är mogna för marknaden.

Även de förhållandevis låga laster som uppmättes relativt modulernas klassning verkar ha medfört belastningsskador på de moduler som ansamlade mest snö. Enligt forskningsresultat (Rowell et al., 2018; Schneller et al., 2019; Seigneur et al., 2019) kan detta bero på låga temperaturer som ökar risken för sprickbildning. Förutsatt att detta är grunden för de observerade sprickorna så motiverar detta mer regelbunden snöborttagning. Fortsatta studier är nödvändiga för att bekräfta detta. Denna problematik skulle sannolikt kunna reduceras för glas/glas moduler, alltså moduler som har glas på båda sidor om solcellsmaterialet i stället för folie på baksidan.

Vädret är en avgörande faktor för att solcellsmodulerna ska bli helt snöfria efter snöborttagning. Den is, frost och snö som ligger närmst modulerna är svår att på säkert sätt ta bort med enbart mekanisk snöborttagning. Det krävs därför oftast gynnsamt

väder som kan smälta undan den sista snön för att få modulerna helt snöfria. De två vintrarnas väder skilde sig markant, lite snö och mildt väder gjorde att lite snö ansamlades första vintern medan det var mycket snö den andra. Denna snö låg kvar länge på grund av långa kalla perioder där töväder inte inträffade förrän i slutet av februari.

Från pågående och avslutade RISE-projekt har erfarenheter samlats in från olika takmonterade solcellsanläggningar. Denna insamlade kunskap pekar på att man aldrig bör gå på modulerna då det dels finns risk för mikrosprickbildning som inte kan upptäckas med blotta ögat och dels en halkrisk som kan medföra personskador och kraftigare modulsador.

4 SLUTSATSER

De olika snöborttagningsmetodernas prestanda i avseende på energiåtgång, tidsåtgång, personsäkerhet, kostnad och skadeeffekt sammanfattas enligt:

- Eluppvärmning med framström – den enda metoden som aktivt använder elektrisk energi för att ta bort snö; dyr och sätter också elsäkerhetskrav på utföraren då ingen kommersiell lösning för små anläggningar finns; hög tidsåtgång om avsmältning krävs, men detta bedöms mindre problematiskt då inget aktivt arbete krävs; långtidsstudier för att utvärdera skadeeffekter saknas.
- Ytbehandlingar – ingen direkt energiåtgång, tidsåtgång eller ökad risk för personsäkerhet, men inte heller någon påvisad reduktion i snöansamling för denna anläggning. Kontaktvinkelmätningarna påvisar markant slitage och de utprovade ytbehandlingarna bedöms därmed inte redo för marknaden.
- Snöhyvel – ingen energiåtgång, låg tidsåtgång, viss risk för personsäkerhet med den specifika modellen då block av snö glider mot utföraren, låg kostnad och ingen uppmärksammas skadeeffekt. Sannolikt bäst lämpad för mindre anläggningar då teleskopskaft gör arbetet svårare ju längre det blir. Bättre på att reducera laster än att få helt snöfri anläggning.
- Takraka – ingen energiåtgång, medelhög tidsåtgång, ingen personsäkerhetsrisk, låg kostnad och medelstor skaderisk där en cell sprack rejält. Tungarbetad vid mycket snö och bättre på att avlägsna mindre mängder.

Snöhyveln påvisade bäst resultat för denna anläggning, något som inte nödvändigtvis behöver stämma för andra anläggningar. Varken eluppvärmning eller ytbehandlingar framstod som mogna tekniker, däremot kan lärdomar från den mekaniska snöborttagningen sammanfattas i allmänna råd för mekanisk snöborttagning av soleanläggningar:

0. Om möjligt, konstruera anläggningen för att undvika snöansamling och underlätta naturlig snöavglidning. Välj en brant lutning och se till att snön inte hindras från att glida av anläggningen av modulramen, montage eller takkonstruktionen.
1. Välj en skonsam metod utan vassa kanter eller direkt kontakt med soleanläggningen och som inte medför ökade belastningar på modulen vid snöborttagning. Du bör inte under några omständigheter gå på modulerna.
2. Det är svårt att ta bort all snö och is från modulerna, lämna i stället några centimeter snö kvar för att undvika att komma i direkt kontakt med modulerna vid snöborttagningen och på så sätt minska risken för anläggningsskador.
3. Ta bort snön innan det bildas skare eller is, gärna innan töväder, då kan det milda vädret också smälta undan den sista snön.

5 LITTERATURFÖRTECKNING

- Aarseth, B. B., Øgaard, M. B., Zhu, J., Strömberg, T., Tsanakas, J. A., Selj, J. H., & Marstein, E. S. (2018). Mitigating Snow on Rooftop PV Systems for Higher Energy Yield and Safer Roofs. *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*.
<https://doi.org/10.4229/35THEUPVSEC20182018-6CO.3.5>
- Andrews, R. W., Pollard, A., & Pearce, J. M. (2013). A new method to determine the effects of hydrodynamic surface coatings on the snow shedding effectiveness of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *113*, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.032>
- Bohren, A., & Friesen, T. (2015). Realistic snowload testing for extreme alpine conditions. *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 1635–1638. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20152015-5BO.9.2>
- Boinovich, L. B., Emelyanenko, A. M., Emelyanenko, K. A., & Modin, E. B. (2019). Modus Operandi of Protective and Anti-icing Mechanisms Underlying the Design of Longstanding Outdoor Icephobic Coatings. *ACS Nano*, *13*(4), 4335–4346. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09549>
- Fillion, R. M., Riahi, A. R., & Edrisy, A. (2014). A review of icing prevention in photovoltaic devices by surface engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *32*, 797–809. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.015>
- Frimannslund, I., & Thiis, T. (2019). A feasibility study of photovoltaic snow mitigation systems for flat roofs. *Czasopismo Techniczne*, *2019*(Volume 7), 81–96. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.19.073.10724>
- Jelle, B. P., Gao, T., Mofid, S. A., Kolås, T., Stenstad, P. M., & Ng, S. (2016). Avoiding Snow and Ice Formation on Exterior Solar Cell Surfaces – A

- Review of Research Pathways and Opportunities. *Procedia Engineering*, 145, 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.084>
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., & Kato, K. (2014). *Performance and reliability of photovoltaic systems: Subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS task 13: external final report IEA-PVPS*. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme.
- Lindahl, J., Dahlberg Rosell, M., & Oller-Westerberg, A. (2020). *National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2019* (p. 78). IEA.
- Lindh, M., Svedjeholm, M., Granlund, A., Petersson, J., & Petersson, A. M. (2020). *Handbok för nordlig solex*. RISE Energy Technology Center.
- Nash, A., & Pike, C. (2018). *A Solar Design Manual for Alaska* (5th ed.). University of Alaska Fairbanks.
- Rahmatmand, A., Harrison, S. J., & Oosthuizen, P. H. (2018). An experimental investigation of snow removal from photovoltaic solar panels by electrical heating. *Solar Energy*, 171, 811–826. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.015>
- Ross, M. M. D., & Usher, E. P. (1995). Photovoltaic array icing and snow accumulation: A study of a passive melting technology. *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada*, 21–26.
- Rowell, M. W., Daroczi, S. G., Harwood, D. W. J., & Gabor, A. M. (2018). The Effect of Laminate Construction and Temperature Cycling on the Fracture Strength and Performance of Encapsulated Solar Cells. *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC 34th EU PVSEC)*, 3927–3931. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547978>

- Schneller, E. J., Gabor, A. M., Lincoln, J., Janoch, R., Anselmo, A., Walters, J., & Seigneur, H. (2017). Evaluating Solar Cell Fracture as a Function of Module Mechanical Loading Conditions. *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference*, 2897–2901. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366463>
- Schneller, E. J., Seigneur, H., Lincoln, J., & Gabor, A. M. (2019). The Impact of Cold Temperature Exposure in Mechanical Durability Testing of PV Modules. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference*, 1521–1524. <https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980533>
- Seigneur, H., Schneller, E., Lincoln, J., Ebrahimi, H., Ghosh, R., Gabor, A. M., Rowell, M., & Victor Huayamave, V. (2019). Microcrack Formation in Silicon Solar Cells during Cold Temperatures. *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.9198968>
- Super PV. (2021, October 18). *Development of superior quality PV systems—Super PV*. <https://www.superpv.eu/>
- van Noord, M., Landelius, T., & Andersson, S. (2021). Snow-Induced PV Loss Modeling Using Production-Data Inferred PV System Models. *Energies*, 14(6), 1574. <https://doi.org/10.3390/en14061574>
- Weiss, A., & Weiss, H. (2016, November 1). Photovoltaic cell electrical heating system for removing snow on panel including verification. *5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*. 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884484>

6 APPENDIX

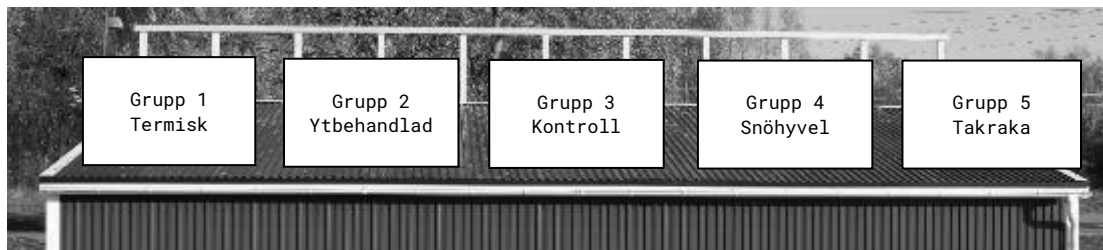
6.1 URVAL AV SNÖBORTTAGNINGSMETODER

		Mekaniska						
Parameter	Viktning	Sopning	Takraka	Skottning	Takräv	Snöhyvel	Lövblås	Spolning
Passiv		Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej
Resurs vid drift		Ingen	Ingen	Ingen	Ingen	Ingen	Bensin	Vatten
Tillgänglighet	2	5	4	5	4	4	4	5
Pris lågt	1	5	5	5	4	4	4	5
Snöhantering	1	3	5	4	4	4	4	2
Ishantering	1	1	1	2	1	1	1	2
Paneuskaderisk låg	3	4	3	2	2	4	5	3
Personskaderisk låg	5	2	4	2	2	4	2	3
Summering		41	48	37	33	49	40	43
		Termiska		Kemiska		Ytbeläggningar		
Parameter	Viktning	Backström	MicroFilament	Tösalt	Urea	ProShield***	CARPRO FlyBy Forte	Aquapel
Passiv		Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja	Ja
Resurs vid drift		El	El	Tösalt	Urea	Ingen	Ingen	Ingen
Tillgänglighet	2	1	2	3	4	3	3	3
Pris lågt	1	4	2	5	5	5	5	5
Snöhantering	1	5	5	4	3	3	3	3
Ishantering	1	5	5	4	2	2	2	2
Paneuskaderisk låg	3	3	3	4	4	4	4	4
Personskaderisk låg	5	5	5	2	2	5	4	4
Summering		50	50	41	40	53	48	48

6.2 PROTOKOLL UTFÖRANDE

Protokoll Snöborttagning Testtak

För mätningar på taket motsvarar protokollets numrering i subskriptet (exempelvis $h_{r,1}$) vilken modulgrupp det är. 1 motsvarar den första gruppen från vänster sett från marknivå, se Figur 14.



Figur 14: De olika gruppernas placering

Protokoll med uppgifter att genomföra före snöborttagning vid testtaket hos RISE ETC.						
Uppgift	Noteringar					X
Drönarfoto	Taket före snöborttagning.					
	Samtliga modulgrupper rakt ovanifrån.					
	Samtliga modulgrupper vinkelrätt mot modulerna.					
	Kortsida av takets båda sidor.					
Snömassa mark, m_g [kg]	Mätning på öppen yta med homogen snöansamling.					
	$m_{g,1}$:					
Snödjup mark, h_g [cm]	Mätning vid samma plats som snötyngd.					
	$h_{g,1}$:					
Snödjup tak, h_r [cm]	Mät vid samtliga grupper.					
	$h_{r,1}$:	$h_{r,2}$:	$h_{r,3}$:	$h_{r,4}$:	$h_{r,5}$:	
Snöns karaktäristik	Blöt	Torr	Lätt	Tung	Isig	Skare
	Kommentar:					
Övriga kommentarer	_____					

Protokoll för snöborttagning med eluppvärmning, grupp 1.		
Uppgift	Noteringar	X
Vid gynnsamma förhållanden	Säkerställ att energimätaren för aggregat är nollställd.	
	Notera klockslag:	

	Starta aggregat.	
Vid snölossning	Drönarfoto med värmekamera	
När gruppen blivit snöfri	Notera klockslag:	
	Stäng av aggregat.	
	Notera energimätare och nollställ:	
Övriga kommentarer		

Protokoll för snöborttagning med snöhyvel, grupp 4.

Uppgift	Noteringar	X
Vid snödjup på moduler >20 cm	Rulla ut mattan och ta bort snön. Låt hjulen ligga mot modulytan om inte snölagret är för tjockt. Arbeta från marknivå.	
Övriga kommentarer		

Protokoll för snöborttagning med snöraka, grupp 5.

Uppgift	Noteringar	X
Vid snödjup på moduler >20 cm	Ta bort snön. Arbeta försiktigt från marknivå, börja nerifrån och arbeta uppåt cirka 20 cm åt gången. Använd sidan med skumgummilist.	
Övriga kommentarer		

Protokoll med uppgifter att utföra efter snöborttagning.

Uppgift	Noteringar	X
Drönarfoto	Hela taket.	
	Samtliga modulgrupper rakt ovanifrån.	
	Samtliga modulgrupper vinkelrätt mot modulerna.	
	Modulytan, speciellt kvarvarande snö/is och ev. modulskador.	
Ladda upp data	Ladda upp bilder på filserver.	
	Fyll i noteringar i kalkylbladet.	
Övriga kommentarer		

OBS! Snöhyvel och takraka får ej förvaras direkt på marken i taket pga. risk att frysa fast!

6.4 TEMPERATURDATA ELUPPVÄRMNING

