

Är återvinningsanläggningar redo för solceller innehållande nanotrådar?

LUDVIG KASK OGENBLAD 2019
MVEM03 EXAMENSARBETE FÖR MAGISTEREXAMEN 15 HP
MILJÖVETENSKAP | LUNDS UNIVERSITET

Är återvinningsanläggningar redo för solceller innehållande nanotrådar?

En studie om halvledarnanotrådars risker vid avfallshantering

Ludvig Kask Ogenblad

2019



LUNDS
UNIVERSITET

Ludvig Kask Ogenblad

MVEM03 Examensarbete för magisterexamen 15 hp, Lunds universitet.

Intern handledare: Martijn van Pragh, Centre for Environment and Climate Research, Lunds universitet.

Extern handledare: Anders Hedenstedt, RISE och Jenny Rissler, RISE.

CEC - Centrum för miljö- och klimatforskning
Lunds universitet
Lund 2020

Abstract

The rise of solar cells have been received with open arms as a renewable energy resource in Sweden. The new generation of solar cells containing semi conductive type III-V nanowires may pose, without proper safety measures, negative implications on health and the environment. In this study an overview of possible risks is considered in the waste management with solar cells containing nanowires. Also, a growth estimation of installed solar cells and number of solar cells directed to the waste management in the future was made by analyzing available data. The result revealed that both the Swedish powergrid system and waste management can expect an increased quantity of solar cells in the future. In order to understand how solar cells are treated and identify possible risks with solar cells containing nanowires in the waste management an interview with a waste management corporation was performed. From the interview, possible risks were identified and mapped in the treatment process at waste management of solar cells e.g. when treating solar cells by deconstruction or separation. The waste management methods could possible lead to exposure of nanowires if adequate safety measures are not adopted when treating the next generation solar cells. It is at great importance to further increase the knowledge of risks and treatment methods in the waste management in order to avoid future health inconveniences.

Innehållsförteckning

Abstract	4
Innehållsförteckning	5
Inledning	7
Metod	8
<i>Genomförande av telefonintervjun</i>	9
<i>Insamling av solcellsdata och analys</i>	10
<i>Litteraturstudie av halvledar nanotrådar och solceller</i>	11
<i>Etik</i>	12
Litteraturstudie	13
<i>Nanotrådar i elektronik</i>	13
<i>Solceller i framtiden</i>	14
<i>Tillämplig lagstiftning</i>	14
<i>Solcellers miljöpåverkan</i>	16
<i>Nanotrådar i avfallsledet</i>	16
<i>Nanoträdars hälsorisker</i>	16
Resultat	19
<i>Tillväxtscenarier för solceller i Sverige</i>	19
<i>Hantering av elavfall på återvinningsanläggning</i>	23
<i>Hälsorisker vid hantering av solceller innehållande nanotrådar</i>	26
Diskussion	27

Slutsats.....	30
Tack.....	31
Referenser	32

Inledning

Uppmärksamhet kring nanotrådar och dess tillämpningar inom olika teknikområden har ökat stort på den globala marknaden. Affärspotentialen för nanoindustrin värderas till ett mångmiljardbelopp och förväntas fortsätta växa enligt en marknadsundersökning till omkring 100 miljarder dollar år 2021 (1). Halvledande nanotrådar används inom olika områden exempelvis för effektivisering av solceller och LED-skärmar. Vilka risker en övergång till nanotrådsinnehållande solceller medför vid omhändertagande och materialåtervinning vid återvinningsanläggningar är idag okänt. Den bristfälliga kunskapen om nanotrådars effekt på ekologiska system och människors hälsa kan innebära risker för miljö och hälsa. Aktuell forskning pekar på att nanotrådar har toxiska egenskaper vilket öppnar en diskussion om särskilda skyddsåtgärder bör tillämpas på återvinningsanläggningar för att förhindra olägenheter för miljö och hälsa (2). Syftet med uppsatsen är att sammanställa möjliga risker vid nästa generations solceller innehållande halvledande nanotrådar och uppskatta flödet av antal solceller till återvinningsanläggningar i de kommande årtiondena.

Frågeställningar:

- Hur ser marknaden ut i framtiden för antalet installerade solceller och dess effekt på det svenska elnätverket?
- Hur många solceller förväntas uppkomma till avfall i framtiden?
- Vilka är de potentiella riskerna nanotrådar i solceller kan komma att medföra med avseende på miljö och hälsa i samband med avfallshanteringen?
- Hur behandlas solceller vid återvinningsanläggningar som i framtiden potentiellt kan innehålla nanotrådar?

Metod

Avgränsning: Fokus ligger på hantering av uttjänta solcellers avfallsled i en återvinningsanläggning (sortering och behandling av WEEE-avfall) och vilka steg materialet genomgår d.v.s. mottagning, förbehandling, återvinning, energiåtervinning, bortskaffande, homogenisering, återanvändning och avfall som ej kan återvinnas och vilka arbetskyddsåtgärder som genomförs. En litteraturstudie kommer också genomföras av vilka olika typer av halvledarnanotrådar som kan komma att användas i solceller. Vilka olika miljö- och hälsorisker nanotrådarna kan utgöra.

Följande arbetsmoment ingår i studien:

- Litteraturstudie av avfallshanteringen för solceller idag.
- Telefonintervju med en verksamhetsutövare för återvinningsanläggning för sortering och behandling av WEEE-avfall.
- En uppskattning av mängden solcellsavfall som förväntas uppkomma p.g.a. uttjänta solceller.
- Analys av erhållet material och information med avseende på kritiska moment och aspekter för miljö- och hälsorisker vid framtida återvinning av solceller och skärmar innehållande nanotrådar.

För att möta studiens frågeställningar om avfallshandling av solceller och produktion av halvledarnanotrådar genomfördes telefonintervjun med en återvinningsanläggning efter ”7 stegs intervjuundersökning” d.v.s. tematisera, design, intervju, transkribering, analysering, verifiering och rapportering (3).

Tabell 1. De sju olika stegen vid ”7 stegsintervjuundersökning”, de olika stegen är tematisering, design, intervju, transkribering, analysering, verifiering och rapportering.

Stegen vid intervjuundersökning	Beskrivning
Tematisering	Syfte och varför studien genomförs – frågeställning och syfte.
Design	Utforma intervjun på ett adekvat sätt för att få kunskap och svar om det efterfrågade – intervju med återvinningsanläggning.
Intervju	Genomförande över telefon.
Transkribering	Preparering av data för analys.
Analysering	Kritisk granskning om hantering av solceller utifrån hämtade litteraturkunskaper för bedömning.
Verifiering	Bekräfta analysen utifrån intervjun om den är validerad.
Rapportering	Inlämning.

Genomförande av telefonintervjun

Personen som blev kontaktad är väl införstådd om behandling av elavfall på återvinningsanläggning men behålls anonym för att säkerställa att personen som blir intervjuad ej ska känna att hen behöver svara efter vad som är förväntat utifrån sin position på företaget och av etiska skäl.

Telefonintervjun som genomfördes syftade till att få en kvalitativ inblick i hur verksamheten fungerade och för att identifiera möjliga riskmoment kopplade till nanotrådar i solceller. Frågorna utformades efter att få saklig fakta hur hantering sker men med utrymme för förklaring av hanteringen. Ett exempel på denna typ av fråga är:

”När avfallet ska förflyttas från lastbil till avsedd plats, magasinering, hur görs detta d.v.s. är det via tippning av släp eller annan metod?”

Vilket preciserar hur avfall förflyttas med tekniska moment och med möjlighet för förklaring. Samtalet spelades in och transkriberades därefter och relevanta delar plockades ut och användes i uppsatsen.

Insamling av solcellsdata och analys

Urvalet av data avseende installerad effekt och antal installerad solceller i Sverige gjordes efter tillgänglighet av underlag (bilaga 1). Solceller som inte är kopplade till elnätverket är exkluderat från studien. Statistiska centralbyrån (SCB) erbjuder data av elavfall, solceller inkluderat, dock fanns det ingen möjlighet att särskilja solceller från annat elavfall vilket utgjorde ett problem och användes därför inte. Energimyndighetens databas var begränsad till åren 2016-2018 över installerad effekt och antal installerade solceller. International Energy Agency photovoltaic systems programme (IEA-pvps), ett internationellt energiorgan, har under årliga utgivelsen av marknadsrapporter samlat data om solceller för åren 1992-2016 med antal installerade solceller och effekt. Vid bedömning av vilken typ av modell som är lämplig för uppskattningar av solceller i framtiden hämtades inspiration från vindkraftstillväxten i energimyndighetens rapport (4). Analyserna har inte tagit hänsyn till att effektiviteten ökat från tidigare solceller och nyare modeller vilket har betydelse för uppskattningar av antal installerade solceller och effekt.

För att uppskatta linjärt och exponentiellt scenario för installerade solcellseffekt användes mätdata för installerade effekt från IEA-pvps mellan åren 2007-2016 och energimyndighetens mätdata för åren 2017-2018. En linjär och exponentiell trendlinje kunde således användas baserad på åren 2007-2018 för att uppskatta framtida scenario till år 2040. Formeln för linjär och exponentiell trendlinje enligt:

$$\begin{aligned} & \text{Linjär trendlinje} \\ & y = bx + a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Exponentiell trendlinje} \\ & y = ae^{bx} \end{aligned}$$

Uppskattningen av antalet installerade solceller för åren 1992-2015 genomfördes med tre mätdatapunkter från IEA-pvps och Energimyndigheten mellan 2016-2018. Antalet

installerade solceller adderades ihop och dividerades med summering av installerade effekten från samma period.

$$\text{antal solceller per MW} = \sum \text{solceller} \div \sum \text{installerad effekt}$$

Med antal solceller per MW kunde en uppskattning av antal installerade solceller genomföras för åren med installerad effekt samt estimeras antal installerade solceller i linjärt och exponentiellt scenario fram till år 2040.

Det förväntade antalet solceller till avfallsledet genomfördes med ett antagande att varje solcell har en livslängd på 25 år. Antalet solceller som når avfallsledet under perioden 2017-2020 motsvarar således antalet installerade solceller för åren 1992-1995. På likartat sätt är antalet solceller som förväntas nå avfallsledet för perioden 2021-2025 beräknad från installerade solceller för åren 1996-2000. Genom denna metod kunde grova uppskattningar av antal solceller till avfallsledet genomföras.

Litteraturstudie av halvledarnanotrådar och solceller

För att hitta vetenskapliga artiklar om hälsorisker av nanotrådar har primärt *pubmed*, en biomedicinsk databas, använts. Relevanta artiklar har systematiskt sökts genom att kombinera sökord exempelvis "Semiconductive nanowires" AND "health risk" eller (nanowires) AND "exposure". För att använda relevant information har enbart artiklar publicerade de senaste 10 åren bedömts som aktuella. Nanotrådar är ett relativt nytt ämne och det har därför också varit nödvändigt att använda artiklar från blandade databaser och källor.

Kvalitativ fakta om avfallshantering och marknadstrender för solceller har inhämtats från publikationer genomförda av myndigheter exempelvis *Energimyndigheten* eller *Naturvårdsverket*. Telefonkontakt med olika myndigheter och organ har också genomförts i syfte att hitta relevanta publikationer inom området och statistik av solceller.

Studien avgränsas till halvledarnanotrådar som potentiellt kan användas till solceller men avgränsningar har genomförts för vilken massa nanotrådarna utgör per solcell och hur nanotrådarna fysiskt är placerade i solcellerna. Andra aspekter som utelämnats är sannolikheten för exponering av nanotrådar genom olika behandlingsmetoder på återvinningsanläggning.

Etik

Studien omfattar en litteraturstudie och intervju med en anställd på återvinningsanläggning. Det är viktigt att eventuella företagshemligheter eller information som på annat sätt kan innebära problematik för företagets intressen inte förmedlas till allmänheten. Det är viktigt att personuppgifter hanteras varsamt samt att den intervjuade personen får klart för sig vad studiens syfte är och att deras uppgifter i sakfrågan kommer användas för analys inom området för att undvika olägenheter för berörda parter.

Det är försvarbart att göra studien eftersom den kopplar samman Sveriges antagna miljömål och det föreligger ett samhällligt intresse p.g.a. generationsmålen och antagna miljömål. Det är också förenligt med miljöbalkens syfte att förhindra, minimera och motverka faktorer av miljö- och hälsoriskskaraktärer.

Litteraturstudie

Nanotrådar i elektronik

Nanotrådar är mycket små trådar som sammanslagna formar en längre kedja. Nanotrådens molekylära sammansättning kan variera vilket spelar en central roll för nanotrådens egenskap som också utnyttjas vid industriell produktion vid olika ändamål exempelvis inom medicin eller elektronisk teknik. Halvledarmaterial som kisel (Si), galliumnitrid (GaN) och indiumfosfid (InP) ger nanotråden halvleder-egenskaper (5). En vanlig komponent i tekniska tillämpningar med nanotrådar är Si som bl.a. används i elektronik, medicin och fotovoltaik. I solceller används s.k. halvleder typ III-V nanotrådar. Dessa är uppkallade efter grundämnen under kategorierna IIIA-VA i det periodiska systemet som äger goda optiska och elektriska egenskaper vilket möjliggör effektivisering av solceller (6). Ett exempel på optimering av solceller genom halvledarnanotrådar är galliumarsenidnanotrådar som har rapporterats öka effektkapacitet med 50% (7). För att producera högkvalitativa halvleder typ III-V nanotrådar kommersiellt, krävs en produktion som ger höga kvantiteter till en låg kostnad vilket tidigare inte varit tillgängligt. En ny metod, aerotaxyteknik, öppnar upp möjligheten att producera nanotrådar i en högre omfattning vilket möjliggör kommersiell tillverkning av solceller med halvleder-nanotrådar (7).

Solcellerna har utvecklats genom flera olika generationer, den första generationen innehöll bulkar med kisel med hög effekt men var dyr att producera. Den andra generationen solceller innehöll amorfiska strukturer eller polykristallint kisel. Den tredje generationens solceller kännetecknades av organiskt material och med en nanokristallin hinna. I den senaste, fjärde generationen, utmärks solceller med ickeorganiska nanostrukturer exempelvis Ag-, ZnO- eller Kisel-nanotrådar (8). Det saknas en sammanställning av vilka typer av nanotrådar som potentiellt kan användas i solceller, men det finns potentiellt ett stort antal olika nanotrådar som potentiellt kan användas. Det breda spektrumet av olika nanotrådar kan försvåra utvärderingen av risker när produkter innehållande materialet tillkommer till avfallsledet.

Solceller i framtiden

Livslängden för solceller varierar beroende på produkt, växelriktare, underhåll m.m. men generellt uppskattas livslängden till mellan 25-30 år (9). Antalet solceller har ökat markant, bara under året 2016 växte antalet installerade solcellsanläggningar med 63% jämfört med föregående år i Sverige (10). I en studie utförd av Irena, ett internationellt energiorgan, uppskattades globalt att 43500-250000 ton installerade solceller hamnade i avfallsledet år 2016. Vid år 2030 förväntas avfallet öka till 1,7-8,0 miljoner ton per år. Slutligen uppskattas 60-78 miljoner ton avfall uppkomma år 2050 (11). I Sverige fastslogs energiöverenskommelsen under år 2016 som innebär att landets elförsörjning enbart ska utvinnas från förnyelsebar energi år 2040. Energimyndigheten uppskattade att ett scenario med exponentiell tillväxt av solenergiproduktion till år 2040 skulle innebära att solenergin utgör 5-10 %, motsvarande 7-10 TWh, av elproduktionen i det svenska elnätet (12). Dock tog rapporten inte hänsyn till effektivisering av solceller i sin beräkning vilket skulle kunna innebära en ännu högre energiproduktion. Med en växande marknad kommer också större intressen ligga för producenter att optimera och effektivisera solceller med ny teknik och produktion.

Tillämplig lagstiftning

I dagsläget i Sverige råder flera olika lagstiftningar och bestämmelser gällande solceller. En av de mer viktiga bestämmelserna är WEEE-direktivet som principiellt lägger ansvaret på producenten att bistå med vägledning för elproduktens innehavare och handlingar för att minska mängden avfall. Minska eventuella negativa påverkan på miljö och hälsa samt ta ansvar för när produkten har blivit avfall och när avfallet ska samlas in och omhändertas (5). Individer som brukar solceller ska enligt avfallsförordningen (2011:927) sortera ut solceller från övrigt avfall och överlämna till en lämplig mottagare, exempelvis en producent eller återvinningscentral. Andra regler som solceller berörs av är avfallsdirektivet (2008/98/EG) med betoning i en avfallshierarki för att minimera mängd avfall och med syfte att vägleda lagstiftning och politiken (13). Ramdirektivets bestämmelser prioriterar förebyggande högst följt av förberedelse för återanvändning, materialåtervinning, annan återvinning och bortskaffande (14).

Syftet med RoHS-direktivet är att minimera toxiska ämnen i elektronik, dock gäller ej reglerna för solceller monterade av yrkesmän för elproduktion till industri eller bostäder (15). Solceller berörs även av REACH på så sätt att producenter ska registrera vilka ämnen och eventuella risker materialet medför (16).

Naturvårdsverket har upprättat en vägledningsrapport för elavfall vilket solceller kategoriskt faller under. Rapporten för elavfall ”*Förbehandling av elavfall*” är utformad efter föreskrifterna (2005:10) och skriven år 2017. Föreskrifterna har blivit ersatta av nya om yrkesmässig lagring och hantering av avfall (2018:11) som trädde i kraft 2019-02-01. I nuläget har ingen ny vägledning utgivits av Naturvårdsverket (17),(18). Enligt avfallsförordningen (2011:927) 8 § definieras elektriskt och elektroniskt avfall som på något sätt:

- Framför elektriska strömmar i elektromagnetiska fält.
- Generering, överför eller mäter av elektroniska strömmar eller elektromagnetiska fält.
- Komponenter av produkt som fungerat enligt ovanstående punkter.

Utifrån den givna definitionen ska separerade delar från solceller, fastän om dessa solcellskomponenter inte uppfyller den första eller andra punkten, definieras som elavfall. När separeringsfasen resulterat i enbart en kategori av material exempelvis metall eller plast ska materialet inte längre betraktas som elavfall (18).

Föreskrifterna från Naturvårdsverket ”Föreskrifter om yrkesmässig lagring och hantering av elavfall” (2018:11) om elavfall ställer krav på verksamhetsutövare som magasinerar och behandlar elavfall. Först och främst ska elavfallet samlas in separeras från annat avfall för att undvika att farligt avfall läcker ut i miljön och orsakar olägenheter för människor och miljön. Verksamhetsutövare ska ha en tillfredställande miljömässig metod för separering eller demontering och säkerställa att materialet kan återinföras i materialflödet genom återvinning eller återanvändning. Vid insamling och behandling av elavfall gäller en mängd olika försiktighetsmått. Exempelvis ska elavfallets lagringsplats vara skyddad mot nederbörd, ha en ogenomsläpplig yta, lagras på en separerad plats från annat avfall, våg för mätning av mängd massa elavfall. Kunskapskrav om vilka materialdelar från elavfall som ska separeras finns också stadgat i Naturvårdsverket föreskrifter (2018:11).

Solcellers miljöpåverkan

För att producera solceller krävs en mängd olika material och metaller. Miljöpåverkan från solceller kommer bland annat genom framställning och utvinning av ändliga resurser och preparering av material exempelvis stål och aluminium som tär på miljön (19). Vid utvinningsfasen uppkommer utsläpp av metaller som kan orsaka miljöförstörelse från lakning och landskapsförändringar. Flera typer av miljöföroreningar uppkommer från luftpartiklar och utsläpp vilket orsakar mark- och vattenföroreningar (19). Solcellers livslängd förväntas till cirka 25 år men kan förlängas genom tjänster exempelvis tillämpbar underhållning, återtillverkning och reparation av solceller (20).

Nanotrådar i avfallsledet

Kunskapen om produktionsmängden av produkter innehållande nanotrådar och dess genererade mängd avfall är bristfällig. Man kan förenklat utgå från att risk för exponering av människor och miljön med nanotrådar stiger med en växande nanoindustri (21). Nanotrådsavfall uppkommer vid produktionstillfället genom emission, industriell tillverkning, offentlig och privat användning samt när produkter blir avfall och behandlas på återvinningsanläggning. Vid återvinning eller bortskaffning av nanotrådsmaterial kan det finnas risk att nanotrådar hamnar i miljön (16). Ytterligare problematik kring avfallshantering av nanotrådar är dess förmåga att bestå i sin nanotrådsstruktur exempelvis kan en nanotråd aggregera i bulkform vilket kan förändra dess löslighet (22).

Under förutsättning att det finns teknologi för materialåtervinning, är det under premisen att den ekonomiska faktorn av intäkterna från återvinningen motsvarar kostnaderna för insamlingen, uppdelning, transport, behandlingen och annat som avgör om vad som ska materialåtervinnas (23, 24). Den bristande kunskapen om nanotrådars effekt på hälsa och miljö kan motivera tillämpning av försiktighetsprincipen för återvinning av produkter innehållande nanotrådar och för att undvika utsläpp och exponering av nanotrådar som kan skapa olägenheter för människan och ekosystem (5). Det är därför viktigt att kartlägga och analysera vilka potentiella halvledar-nanotrådar i solceller som blir aktuella för att bedöma miljö- och hälsorisker och tillämpning av adekvata behandlingsmetoder.

Nanotrådars hälsorisker

En enkel sökning av nanomaterialens hälsorisker resulterar i över tusen artiklar på pubmed, en biomedicinsk databas, men en likvärdig sökning om nanotrådar ger endast nio artiklar vilket indikerar att forskningen om nanotrådars effekt på organismer är ett okänt forskningsområde.

Kompositionen av nanotrådens kemiska sammansättning utgör olika unika egenskaper vilket utnyttjas kommersiellt. Nanotrådar varierar också i diameter och längd vilket sammantaget innebär en utmaning att kartlägga nanotrådars toxicitet. En analog motsvarighet till nanotrådars nålstruktur är asbest som via inhalering påvisats kunna inducera stimulering av receptorn NLRP3-inflammationen genom lysosomförstörelse som är en organell för nedbrytning i makrofager. Aktivering av receptorn kan leda till frustrerade makrofager som orsakar granulomatös inflammation, en typ av inkapsling av aktiva immunoceller, och lungfibros (11). Ett viktigt kriterium för nanotrådars förmåga att aktivera NLRP3 är dess längd och bredd förhållande. I en in vitro-studie påvisades CeO₂-nanotrådar ett tröskelvärde på ≥ 200 nm och längd och bredd förhållande på ≥ 22 för lysosomal skada i makrofager (25). Vikten av nanotrådars karaktär, längd och bredd förhållande och kemiska sammansättning, är en central faktor för att utvärdera nanotrådars toxicitet.

En in vivo- och en in vitro studie gjordes med exponering av halvledar Ag-nanotrådar på daggmaskar i jord för att karaktärisera cytotoxiciteten och ekotoxikologin av Ag-nanotrådar. In vitro-experimentet visade att Ag-nanotrådar inducerar cytotoxicitet genom att daggmaskars coelomyocyter, motsvarighet till makrofager, ackumulerade Ag-nanotrådarna på cellytan och in vivo-experimentet utförd i torr jord med daggmaskar visade toxiska egenskaper genom en ökning av reaktiva syreföreningar alternativt inhibering av intracellulära esterase enzym. Från studien observerade man även att kortare Ag-nanotrådar var mer toxiska jämfört med längre (26).

En annan studie gjord med ZnO-nanotrådar i in vitro-experiment på hjärtmuskel- och neuronala sekundära cellinjer från möss visade att ZnO-nanotrådarna hade en inhiberande effekt på metabolismen, dock hade primära hjärtmuskelceller en högre toleransnivå (27). Två andra nanotrådar, Si- och GaN-nanotrådar, har också sannolikt visat äga en toxisk egenskap genom att interagera med hippocampusceller på 18-dagar gamla foster-råttceller (28). Det saknas forskning om toxicitet för många halvledar nanotrådar exempelvis GaAs-, InGaAs- och InAs-nanotrådar dock har forskning på nanomaterial innehållande GaAs och InAs i marina däggdjurs lungor och observerat proinflammatoriska egenskaper dock skiljer sig i detta fall att InA-nanomaterial inducerat fibros till skillnad från GaAs-nanomaterial vilket indikerar att kompositionen spelar stor för patologiska mekanismer (29).

Hur exponering av olika typer av nanotrådar inverkar på högre stående organismer är hitills ett relativt outforskat område men att nanotrådar har konsekvenser på ekosystem är sannolikt.

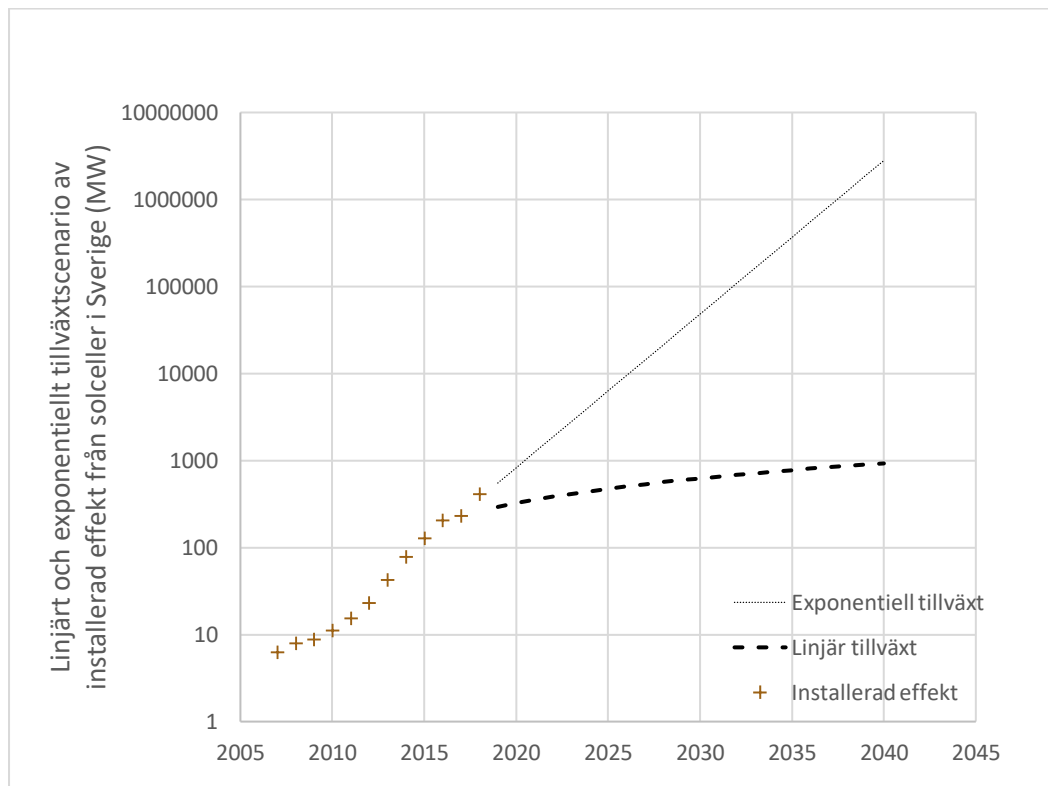
Tabell 2: Potentiella nanotrådars komposition i solceller och dess cytotoxicitet i in vitro och in vivo studier.

Potentiella nanotrådar i solceller	Publicerad	Cytotoxicitet
Kisel, Si	2019	Interaktion med hippocampala råttceller
Silver, Ag	2018	Cytotoxiskt för daggmaskar i torr jord med ökning av ROS. Ackumulerar på utsidan av coelomyocytens membran in vitro.
Zinkoxid, ZnO	2015	Inhiberande effekt på neuronala och hjärtmuskel cellinjer från möss.
Galliumnitrid, GaN	2015	Interaktion med hippocampala råttceller
AluminiumIndium-galliumnitrid, (Al,Ga)N	2015	Saknas forskning
Galliumarsenid, GaAs	2017	Saknas forskning
Indium gallium arsenid, InGaAs	2017	Saknas forskning
Indiumfosfid, InP	2018	Saknas forskning

Resultat

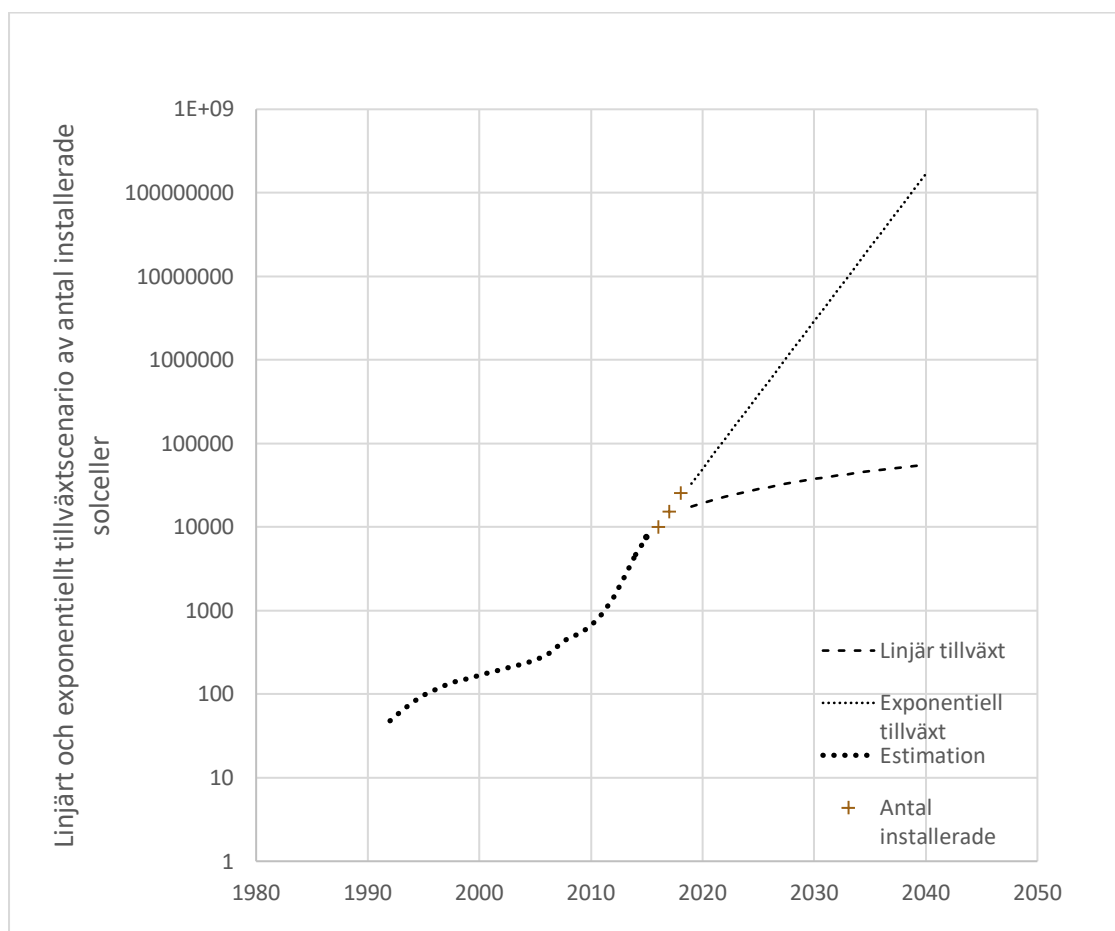
Tillväxtscenarier för solceller i Sverige

Sveriges installerade solcellers effekt (MW) under perioden årsperioden 2007-2018 visar en ökande trend men från en mycket låg effektnivå. Åren 2015-2018 ökar den installerade solcellseffekten kraftigt. Två olika tillväxtscenarier mellan perioderna 2019-2040 uppskattas, exponentiellt och linjärt, av vilken det exponentiella scenariet skulle innebära en mycket hög solcellseffekt i framtiden. Det linjära scenariet visar en mer blygsam ökande solcellseffekt i framtiden.



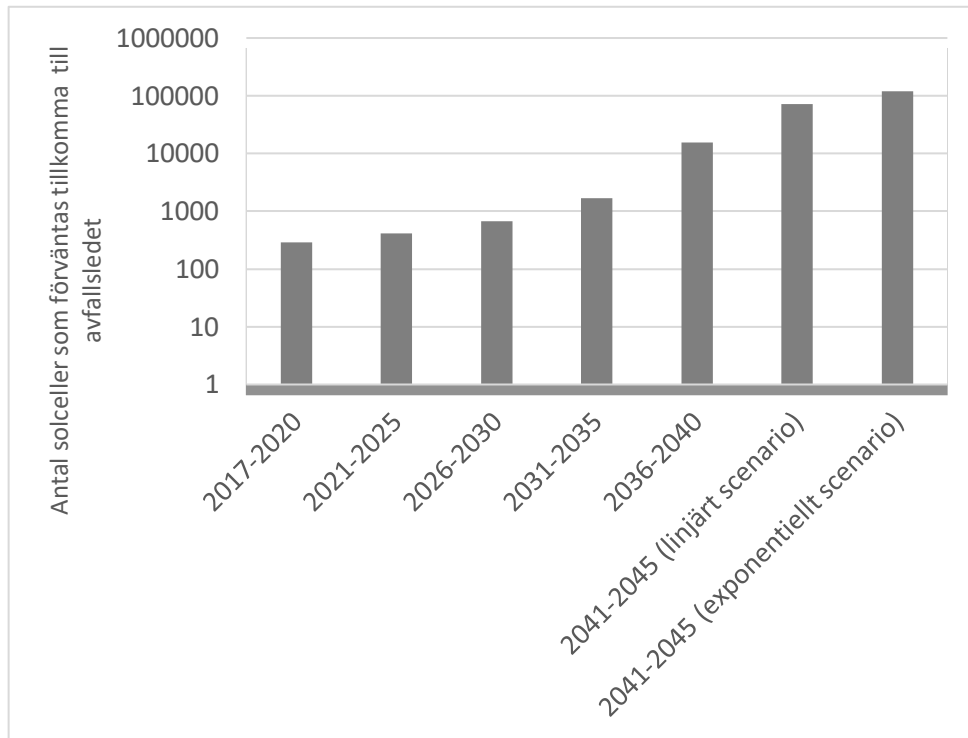
Figur 1. Installerade solcellers effekt mellan år 2007-2018 visar en tydligt ökande trend. Det exponentiella tillväxtsscenariet visar en mycket högre ökning jämfört med det linjära tillväxtscenariet. År 2040 skulle den exponentiella tillväxten av installerade solcellers effekt vara 1000 gånger större i jämförelse med det linjära tillväxtscenariet av installerade solcellers effekt i Sverige.

Antal installerade solceller i figur 2 visar en måttlig ökning mellan årtalen 1992-2010 följt av en kraftig ökning fram till år 2018. Det exponentiella scenariet visar ett mycket högt antal installerade solceller i jämförelse med den mer blygsamma ökningen i det linjära scenariet av installerade solceller.



Figur 2. Det estimerade antalet installerade solceller mellan 1992-2016 har ökat från ett mycket lågt antal till ungefär 10000 installerade solceller. Under perioden 2016-2018 ses en kraftig ökning av installerade solceller. Det totala antalet installerade solceller år 2040 vid exponentiell tillväxt skulle innebära 3000 gånger fler installerade solceller jämfört med en linjär tillväxt vid år 2040.

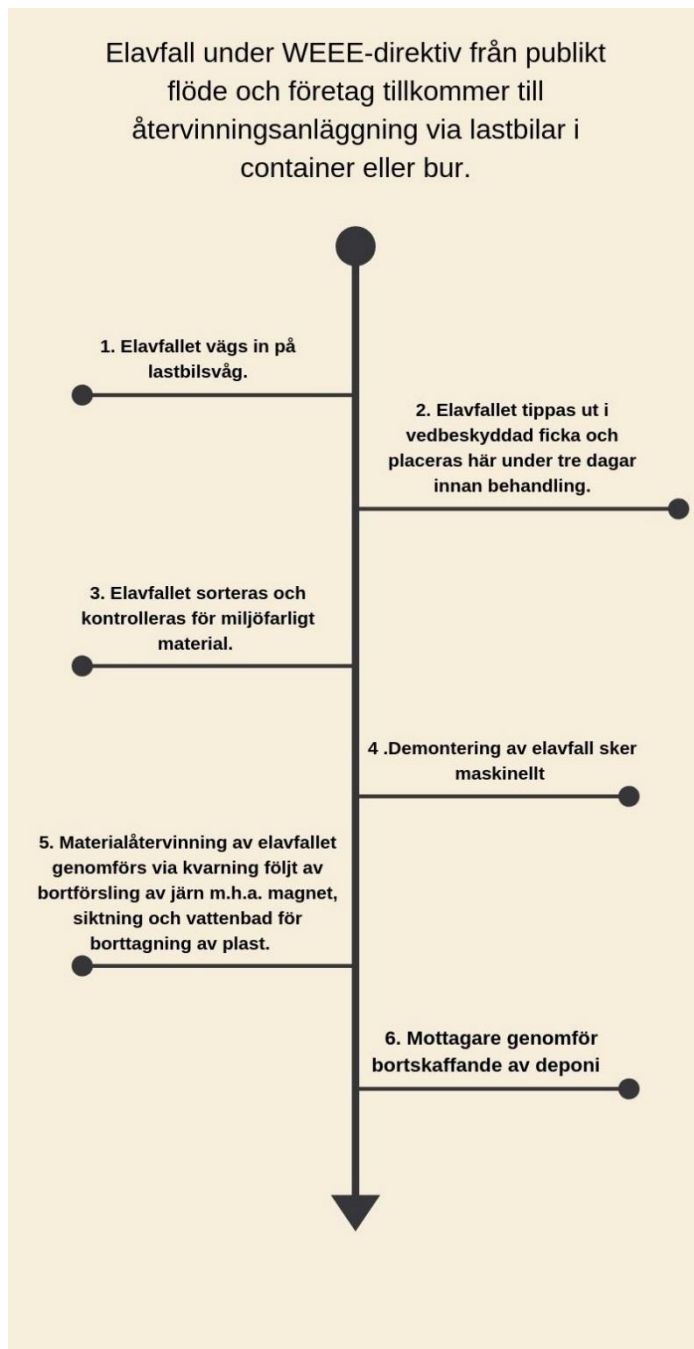
Den förväntade tillkomsten av solceller med antagen livslängd på 25 år till avfallsledet, visar till en början på en liten mängd solceller och under hela årsperioden 2031-2035 stiger antalet till 1000 stycken följt av 10000 stycken för perioden 2036-2040. Under åren 2041-2045 förväntas mängderna höjas till 118 135 solceller vid ett exponentiellt tillväxtscenario och 72 350 solceller vid ett linjärt tillväxtscenario vilket innebär en skillnad på 45 785 stycken, se figur 3. Utifrån installerade solcellers tillväxt, se figur 2, är det sannolikt till följd av det linjära och exponentiella tillväxtscenario att antalet uttjänta solceller kommer stiga kraftigt till avfallsledet efter perioden 2041-2045.



Figur 3. Förväntat antal solceller (> 0kW) till avfallsledet i Sverige. En liten andel solceller förväntas till avfallsledet mellan perioderna 2017-2020 och 2031-2035. Under 2036-2040 sker en kraftig ökning av ungefär 10000 solceller. I både det linjära och exponentiella tillväxtsscenarioet (2041-2045) uppskattas antal solceller till avfallsledet vara ungefär 10 gånger så stort i jämförelse med 2036-2040 där det exponentiella scenarioet visar den största förväntade tillkomsten.

Hantering av elavfall på återvinningsanläggning

På den intervjuade återvinningsanläggningen kommer elavfall, bl.a. som innefattas av WEEE-direktivet, däribland solceller, in via publikt flöde eller från företag som skrivit under avtal med återvinningsanläggning. Anläggningen tog emot 36 000 ton elavfall år 2018. Elavfallet innesluts i container eller bur på lastbil som vägs innan avfallet fortsätter in i anläggningen. Vid tippningen i avsedd lagringsplats för elavfall sker sortering. Elavfallet magasinerar generellt i tre dagar innan materialet fortsätter till nästa behandlingssteg. Om elavfallet innehåller något miljöfarligt exempelvis LCD-skärmar som innehåller kvicksilver, demonteras dessa manuellt från avfallet innan behandling. När eventuellt miljöfarligt material borttagits sker demontering maskinellt. Eftersom solceller inte innehåller miljöfarligt material kvarnas dessa direkt maskinellt i inneslutna system. För att bestämma vad som ska återvinnas, energiåtervinnas, bortskaffas eller återanvändas görs bedömning efter vilka möjligheter materialet kan tas tillvara på. För solceller sker ingen energiåtervinning utan det mesta av uttjänta solceller materialåtervinns. Hantering av solceller syftar framförallt på behandling för materialåtervinning. Efter kvarning av material avlägsnas magnetiskt material exempelvis järn med magneter följt av siktning och vattenbad för borttagning av plast och annat icke-magnetiskt material. Vid materialåtervinning av solceller kan solcellsrester uppkomma och skickas vidare till företag som samlar in material och återvinner ädelmetaller. Vid utvinningen genomförs upphettning för att avlägsna organisk massa från kretskortets laminat och organiskt slagg bildas.



Figur 4. Hantering av elavfall under (som omfattas av WEEE-direktivet) på en återvinningsanläggning. Elavfallet vägs först in på anläggning och placeras senare på en plats för magasinering där sortering genomförs av miljöfarligt material.

Materialåtervinningen sker genom kvarning, bortforsling, siktning och vattenbad. Bortskaffande av sorteringsrester görs av annan aktör.

På anläggningen ansåg man att de största riskerna vid hantering av elavfall generellt är vid manuell hantering exempelvis demontering där exponering för ämnen exempelvis kvicksilver från lysrör eller att skära sig på glas. För att minimera riskerna använder personalen skyddsutrustning och anställda har möjlighet att utföra regelbundna blodprov. Mer erfaren personal fick agera som en slags mentorskap med nyanställda, vid eventuella osäkerheter tillämpas försiktighetsprincipen. För att minimera riskerna för exponering av luftpartiklar vid materialåtervinning sker kvarning och andra metoder i inneslutna maskinella system.

Hälsorisker vid hantering av solceller innehållande nanotrådar

Vid den intervjuade återvinningsanläggningen behandlas elektronik och man har flera förebyggande säkerhetsåtgärder exempelvis inneslutna maskinella system och skyddsutrustning. En ny produkt, solceller innehållande nanotrådar, som förväntas öka i framtiden innebär också nya utmaningar för återvinningsanläggningen som inte har någon aktuell strategi för hantering av nanotrådar. Därför är det viktigt att kartlägga och göra riskbedömningar för att undvika olägenheter för anställdas hälsa. Möjliga risker vid hantering av solceller innehållande nanotrådar kan åskådliggöras i tabell 3.

Tabell 3. Tabellen visar möjliga risker vid hantering av solceller på återvinningsanläggning som potentiellt innehåller nanotrådar.

Avfallssteg på återvinningsanläggning	Potentiella exponeringsvägar
1. Inkomna solceller innehållande nanotrådar tillsammans med övrigt elavfall	Oaktsamhet vid manuell hantering
2. Uttipning av elavfall	Inhalering av luftpartiklar
3. Sortering av elavfall	Möjlighet för exponering vid kontakt med krossat solcellsmaterial
4. Demontering av elavfall	Inhalering av luftpartiklar
5. Materialåtervinning av elavfall	Inhalering av luftpartiklar
6. Mottagare genomför sorteringsrest	Utvärderas inte i denna studie

Diskussion

Solcellernas stigande effekt kan åskådliggöras i den ökande installerade effekten mellan perioden 2007-2018, se figur 1, och är en naturlig utveckling i linje till följd av nationella mål och satsningar på förnyelsebar energi. Vid en uppskattning av solcellers framtida installerade effekt i elnätet bör man beakta att solceller relativt till andra energianläggningar är nya på marknaden och har därför initialt en låg effekt. Solceller har också effektiviserats och flera olika generationer av solceller har hittills gjort anspråk på marknaden. Troligtvis kommer nästa generation av solceller inneha en större effektkapacitet exempelvis solceller innehållande galliumarsenidnanotrådar med en större effekt på 50% (7). Svaren på tidpunkt och vilken typ av generation av solceller som når marknaden går bara att spekulera i men oavsett kommer de att ge en stor inverkan på energieffekten av solceller. Energpolitik är en central variabel för att uppskatta solcellers installerad effekt i framtiden, år 2016 satte regeringen målet att energiproduktionen i Sverige vid år 2040 ska bestå av 100% förnyelsebar energi (30). Målet lägger vägen för vilken typ av energi Sverige kommer att använda i framtiden och är en viktig beståndsdel att ta hänsyn till vid uppskattning av solcellers trendanalyser. Sammantaget, trots den korta perioden solceller funnits på den kommersiella marknaden, kan antagande göras att solceller kommer fortsätta öka i Sverige. Variablerna som utvecklingen av teknologi och fördelaktig energipolitik mot solceller utgör en konstruktion för positiv tillväxt i Sverige.

Det kan observeras i figur 1 att vid år 2015 sker en kraftig ökning av installerade solcellers effekt och skulle trenden fortsätta kan det framtida scenariet vara närmare ett exponentiellt scenario men troligen kommer trenden inte fortsätta att stiga lika kraftigt till år 2040 utan sannolikt hamnar solcellers effekt någonstans mellan det linjära och exponentiella scenariet. Den intressanta frågan är snarare när den rådande stora tillväxten av solcellers effekt kommer att mattas av, år 2016 var solcellers effekt 0,1% av den totala energiproduktionen i Sverige (31). I takt med Sveriges mål att överge den fossila energiproduktionen verkar det sannolikt att den exponentiella tillväxten kommer fortsätta de kommande åren. Vid uppskattning av den totala installerade effekten i Sverige har inte hänsyn tagits till framtida effektiviseringar, optimeringar och prissänkningar som kan således öka den totala installerade solcellseffekten och därför är uppskattningarna, den linjära och exponentiella, konservativt bedömda.

Likt installerade solcellers effekt har antalet installerade solceller i elverket haft en trög initial uppstart dock har trenden ökat kraftigt under åren 2016-2018 vilket kan

åskådliggöras i figur 2. Troligtvis beror trenden på att solcellstekniken blivit mer tillgänglig tillsammans med större fokus på förnyelsebarenergi och antagna miljömål beslutat av riksdagen. Det exponentiella tillväxtscenariet innebär att vid år 2040 skulle ungefär 170 000 000 stycken solceller vara installerade i det svenska elnätet men detta utfall är inte särskilt troligt. Ett möjligt scenario är att det kommer att ske en exponentiell tillväxt av antal installerade solceller i elnätverket de närmsta åren men mattas av när marknaden är tillfredsställd. Effekten från solceller och antal installerade solceller följer ett naturligt förhållande, fler solceller ger mer effekt, därför kan ett antagande göras att ett ökat antal installerade solceller ökar den installerade effekten. En variabel som påverkar förhållandet effekt per solcell är att ny teknologi exempelvis nanotråds-innehållande solceller ökar effekten. Det är ett viktigt element i sammanhang med regeringens energipolitik om mål fastläggs efter att en proportion av den förnyelsebara energiproduktionen ska komma från solceller vilket skulle innebära ett färre antal installerade solceller.

Vindkraft är en annan typ av förnyelsebar energikälla som blivit ett populärt alternativ till traditionella energikällor och kan jämföras med solkraft. Antal installerade vindkraftverk har generellt haft en linjär tillväxt mellan 2004-2018. Motstånd för möjligheten att bygga ut vindkraft och solceller skiljer sig dock exempelvis med svårigheten att hitta lämpliga platser för att installera vindkraftverk p.g.a. konflikt med samhällsintressen (32). Det kan vara anledningen till varför vindkraftverk inte kraftsamlat till en starkare tillväxt. Installation av solceller begränsas inte av samma faktorer som vindkraftverk exempelvis buller och svårighet att hitta lämplig placering vilket kan innebära en betydligt kraftigare utveckling jämfört med en linjär tillväxt. Att solceller kommer fortsätta öka på marknaden finns många argument för och sannolikt kommer antalet installerade solceller i elnätverket i framtiden finnas någonstans mellan det exponentiella och linjära scenarierna.

Återvinningsanläggningar står i framtiden inför en ökad mängd solceller inom elavfallsflödet vilket kan ses i figur 3. Eftersom solceller har en förväntad livslängd på 25 år och är relativt till andra energikällor nya på marknaden dröjer det enligt modellen fram till 2036-2040 innan antalet solceller uppkommer till en större mängd volym (ca. 10 000 stycken) under en femårsperiod. Efter 2036-2040 kan återvinningsanläggningar sannolikt förvänta kontinuerliga ökning av mängder solceller. Återvinningsanläggningar behöver därför säkerställa att man använder lämpliga behandlingsmetoder för att effektivisera materialåteranvändning av plast, metaller och glas men också genomföra förbättringar på återanvändning av funktionella produkter. Sammantaget kommer antalet installerade solceller mycket sannolikt fortsätta öka förenligt med energimyndighetens energiprognos på den svenska elmarknaden vilket innebär ett ökat flöde till återvinningsanläggningar (12). Frågan är snarare vilket proportion antalet installerade solceller och dess effekt per solcell kommer att öka och eftersom det är många faktorer som påverkar försvårar en precis prognos.

Den kommande generationens solceller, fjärde generationen, innehåller typ III-V semikonduktiva nanotrådar. Vilken grad av miljö- och hälsopåverkan nanotrådar möjligen utgör är öppen för debatt dock börjar allt fler artiklar rapportera cytotoxiska påverkan från in vitro och in vivo studier. Man har även observerat att exponering av nanotrådar i torr jord inducerade stress i daggmaskar vilket signalerar att man bör undvika utsläpp av nanotrådar i miljön för eventuell ekosystempåverkan (26). Att nanotrådar liknar asbestens nålstruktur är en oroväckande egenskap eftersom asbest inte kan brytas ner av makrofager och är en kausal riskfaktor för lungcancer (25). Dessa variabler indikerar att nanotrådar har toxiska egenskaper på hälsan och en negativ effekt på ekologiska system. Det är därför viktigt att produkter exempelvis solceller innehållande nanotrådar har en lagstiftning som säkerställer en minimal påverkan på miljön. Den aktuella lagstiftningen gällande reglering av solcellers materialinnehåll och försiktighetsmått är bl.a. RoHS-direktivet som syftar att minimera toxiska ämnen och REACH om registrering av ämnen som produkten innehåller samt eventuella risker. Risker uppstår vid avfallshanteringen när solceller innehållande nanotrådar förbehandlas exempelvis tippning av elavfall till avsedd ficka sker och solceller krossas tillsammans med övrigt elavfall. Ett sådant förbehandlingssteg kan utgöra en inhaleringsexponering av nanotrådar. Ett annat möjligt scenario är vid kvarning i ett automatiskt inneslutet system. Nanotråds-innehållande solceller som kvarnas frigör luftpartiklar i utrymmet vilket utgör en exponeringsrisk när det inneslutna systemet öppnas för reparation eller underhåll om inte luftpartiklarna samlas in före. Den nya generationen av solceller innehållande nanotrådar tillsammans med en ökande tillväxt av solceller kan potentiellt utgöra risker för miljö- och hälsa och det är därför viktigt att kartlägga och utvärdera olika risker. Det finns ett behov att undersöka om nanotrådarna frigörs från solceller och vid vilka behandlingssteg exempelvis kvarning eller demontering. Andra betydelsefulla aspekter är att studera hur nanotrådarna sitter i solceller och hur detta eventuellt påverkar exponeringsrisk vid behandling på avfallshandläggning och om det finns effektiva metoder för att fånga upp eventuella frigjorda nanotrådar.

Slutsats

Antal installerade solceller och installerad effekt från solceller i svenska elnätet kommer mycket sannolikt fortsätta öka i Sverige. Tillväxten kommer antagligen vara exponentiell en tid framöver för att senare plana ut mot en mer avtagande tillväxt. Återvinningsanläggningar kommer i framtiden ta emot stora mängder solceller i avfallsledet. Troligtvis saknar många återvinningsanläggningar idag en strategi för hantering av semikonduktiva typ III-V nanotrådar i elektronik vilket kan innebära olägenheter för människor och miljö vid exponering.

Den ökade trenden av solceller på marknaden i kombination med en ny typ av generation solceller innehållande nanotrådar utgör en risk vid återvinningsanläggningar om inte adekvat behandling utförs. Ett scenario med ett ökat solcellsflöde innehållandes nanotrådar kan innebära olägenheter för människor och miljö om dessa inte hanteras på ett lämpligt sätt vid behandlingar på återvinningsanläggningar som kan ses från tabell 2. Det är därför viktigt att mer forskning görs på vilken eventuell påverkan nanotrådar utgör på miljö och hälsa för att minimera olägenheter samt utveckling av metoder för att säkerställa att nanotrådar tas hand om under säkra former. Lagstiftningen bör också se över bestämmelser över hur materialåteranvändning och behandling av solceller innehållande nanotrådar genomförs vid avfallsanläggningar.

Tack

Önskar att tacka mina handledare Martijn van praagh vid Lunds universitet, Anders Hedenstedt och Jenny Rissler vid RISE för att ni har hjälpt mig med vägledning och många värdefulla synpunkter för genomförandet av detta examensarbete.

Referenser

- (1) Leung, S., Williams, B., De Jesus, K. and Lai, J. (2017). Critical Review of Removal of Nano Materials in Waste Streams. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 68, p.012019.
- (2) Part, F., Berge, N., Baran, P., Stringfellow, A., Sun, W., Bartelt-Hunt, S., Mitrano, D., Li, L., Hennebert, P., Quicker, P., Bolyard, S. and Huber-Humer, M. (2018). A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. Waste Management, 75, pp.427-449.
- (3) Gubrium, J. and Holstein, J. (2002). Handbook of interview research. Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications.
- (4) Peng, K., Xu, Y., Wu, Y., Yan, Y., Lee, S. and Zhu, J. (2005). Aligned Single-Crystalline Si Nanowire Arrays for Photovoltaic Applications. Small, 1(11), pp.1062-1067.
- (5) Falk Filipsson, A. and Axelman, J. (2015). [online] Kemi.se. Available at: <https://www.kemi.se/global/rapporter/2007/rapport-6-07-nanoteknik.pdf> [Hämtad 11 Apr. 2019].
- (6) Otnes, G. (2018). III-V Nanowire Solar Cells: Growth and Characterization. Department of Physics, Lund University.
- (7) Sol Voltaics. (2019). Improving PV Module Efficiency | Sol Voltaics. [online] Available at: <https://solvoltaics.com/pv-panel-efficiency/solfilm-pv-module-efficiency/> [Hämtad 18 May 2019].
- (8) Tala-Ighil, R. (2015). Nanomaterials in Solar Cells. Handbook of Nanoelectrochemistry, pp.1-18.
- (9) Svensksolenergi.se. (2019). Drift och underhåll av solcellsanläggningar. [online] Available at: <https://www.svensksolenergi.se/fakta-om-solenergi/Solel/drift-och-underhall-av-solcellsanlaeggningar> [Hämtad 5 Jun. 2019].
- (10) Johan Lindahl. (2016). National Survey Report of PV power Applications in Sweden. Swedish Energy Agency, p 5-6.

- (11) Tschopp, J. (2008). PL-10 Induction of innate immune responses through Nalp3 inflammasome sensing of asbestos and silica. *Cytokine*, 43(3), p.276.
- (12) Kadic, Z., Estreen, M. and Brandsma, E. (2016). [online] Energimyndigheten.se. Available at: http://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/solenergi/solen-i-samhallet/forslag-tillstrategi-for-okad-anvandning-av-solel_webb.pdf [Hämtad 15 Apr. 2019].
- (13) Eur-lex.europa.eu. (2008). [online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&from=EN> [Hämtad 23 Apr. 2019].
- (14) Irena.org. (2016). End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels. [online] Available at: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels> [Hämtad 14 Apr. 2019].
- (15) Eur-lex.europa.eu. (2011). [online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011L0065-20181121&from=EN> [Hämtad 23 Apr. 2019].
- (16) Kemi.se. (2015). Kort om Reach. [online] Available at: <https://www.kemi.se/lagar-och-regler/reach-forordningen/kort-om-reach> [Hämtad 23 Apr. 2019].
- (17) Naturvårdsverket. (2019). Föreskrifter om yrkesmässig förbehandling av avfall som utgörs av elektriska eller elektroniska produkter. [online] Available at: <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Rattsinformation/Foreskrifter-allmannarad/NFS/2005/NFS-200510---Forbehandling-av-avfall-elektriska-elektroniska-produkter/> [Hämtad 24 Apr. 2019].
- (18) Naturvårdsverket. (2017). Vägledning om förbehandling av elavfall. [online] Available at: <http://www.naturvardsverket.se/vagledning-elavfall-forbehandling> [Hämtad 24 Apr. 2019].
- (19) Molander, S., Ahlborg, H., Arvidsson, R., Hammar, L., Kushnir, D., Wallin, A. and Westerdahl, J. (2010). [online] Naturvårdsverket.se. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-6391-7.pdf> [Hämtad 15 Apr. 2019]

- (20) Linda Kaneryd (2017). Miljöpåverkan och avfallshantering av solceller. Energimyndigheten.
- (21) Part, F., Berge, N., Baran, P., Stringfellow, A., Sun, W., Bartelt-Hunt, S., Mitrano, D., Li, L., Hennebert, P., Quicker, P., Bolyard, S. and Huber-Humer, M. (2018). A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. *Waste Management*, 75, pp.427-449.
- (22) Leung, S., Williams, B., De Jesus, K. and Lai, J. (2017). Critical Review of Removal of Nano Materials in Waste Streams. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 68, p.012019.
- (23) dokodoc.com. (2016). Rapport 2016:23 Avfall Sveriges utvecklingssatsning ISSN Avfallsimport och materialåtervinning - PDF Free Download. [online]
- (24) Programme, U. (2013). UNEP 2013 Annual Report. [online] Hdl.handle.net. Available at: <http://hdl.handle.net/20.500.11822/8607> [Hämtad 21 May 2019].
- (25) Ji, Z., Wang, X., Zhang, H., Lin, S., Meng, H., Sun, B., George, S., Xia, T., Nel, A. and Zink, J. (2012). Designed Synthesis of CeO₂ Nanorods and Nanowires for Studying Toxicological Effects of High Aspect Ratio Nanomaterials. *ACS Nano*, 6(6), pp.5366-5380.
- (26) Kwak, J., Park, J. and An, Y. (2017). Effects of silver nanowire length and exposure route on cytotoxicity to earthworms. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(16), pp.14516-14524.
- (27) Wang, Y., Wu, Y., Quadri, F., Prox, J. and Guo, L. (2017). Cytotoxicity of ZnO Nanowire Arrays on Excitable Cells. *Nanomaterials*, 7(4), p.80.
- (28) Lee, K., Shim, S., Kim, I., Oh, H., Kim, S., Ahn, J., Park, S., Rhim, H. and Choi, H. (2009). Coupling of Semiconductor Nanowires with Neurons and Their Interfacial Structure. *Nanoscale Research Letters*, 5(2), pp.410-415.
- (29) Jiang, W., Wang, X., Osborne, O., Du, Y., Chang, C., Liao, Y., Sun, B., Jiang, J., Ji, Z., Li, R., Liu, X., Lu, J., Lin, S., Meng, H., Xia, T. and Nel, A. (2017). Pro-Inflammatory and Pro-Fibrogenic Effects of Ionic and Particulate Arsenide and Indium-Containing

Semiconductor Materials in the Murine Lung. ACS Nano, 11(2), pp.1869-1883.

- (30) Regeringen.se. (2020). [online] Available at: <https://www.regeringen.se/49cc5b/contentassets/b88f0d28eb0e48e39eb4411de2aabe76/energioverenskommelse-20160610.pdf> [Hämtad 6 Jan. 2020].
- (31) Energimyndigheten.se. (2020). Systemperspektiv i Sverige. [online] Available at: <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/systemperspektiv-i-sverige/> [Hämtad 7 Jan. 2020].
- (32) L. Palmblad och K. Eriksson. Energimyndigheten.se. (2020). [online] Available at: <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/framjand-e-av-vindkraft/vindkraftsstrategi-uppdaterad-2018.pdf> [Hämtad 7 Jan. 2020].

Bilaga 1.

Tabell 1. Data över installerad effekt (MW) och antal installerade solceller i Sverige från IEA-pvps och energimyndigheten.

Källa	År	Intsllerad effekt (MWp)	Installerad solceller
IEA-pvps	1992	0,8	-
IEA-pvps	1993	1,04	-
IEA-pvps	1994	1,34	-
IEA-pvps	1995	1,62	-
IEA-pvps	1996	1,85	-
IEA-pvps	1997	2,13	-
IEA-pvps	1998	2,37	-
IEA-pvps	1999	2,58	-
IEA-pvps	2000	2,81	-
IEA-pvps	2001	3,03	-
IEA-pvps	2002	3,3	-
IEA-pvps	2003	3,58	-
IEA-pvps	2004	3,87	-
IEA-pvps	2005	4,24	-
IEA-pvps	2006	4,85	-
IEA-pvps	2007	6,24	-
IEA-pvps	2008	7,91	-
IEA-pvps	2009	8,76	-
IEA-pvps	2010	11,08	-
IEA-pvps	2011	15,2	-
IEA-pvps	2012	23,12	-
IEA-pvps	2013	42,4	-
IEA-pvps	2014	77,86	-
IEA-pvps	2015	126,3	-
IEA-pvps	2016	205,45	10027
Energimyndigheten	2017	230,99	15298
Energimyndigheten	2018	411,06	25486

Bilaga 2.

Intervjufrågor till kontaktperson på återvinningsanläggning.

Hur tillkommer solceller och skärmar till återvinningsanläggning?

Kontrolleras avfallets, solceller och skärmar, innehåll innan dessa når nästa behandlingssteg och i sådana fall hur görs detta?

Finns det tillfällen vid mottagningen av elavfall innehållande solceller och skärmar nekas ombändertagning och av vilka anledningar. Om ja vilka eventuella åtgärder tas?

När avfallet ska förflyttas från lastbil till avsedd plats, magasinering, hur görs detta d.v.s. är det via tippning av släpet eller annan metod?

Vid vilket moment och hur vägs avfallet innehållandes solceller och skärmar?

Hur länge, generellt, magasineras avfallet innehållandes solceller och skärmar innan dessa fortsätter för förbehandling?

Hur sker demontering av solceller och skärmar?

Hur bestäms vad som ska återvinnas, energiatervinnas, bortskaffande eller återanvändas av solceller och skärmar?

Hur sker återvinningen av solceller?

Hur sker bortskaffande av deponi som bildas från solceller?

Hur sker återanvändningen av solceller och skärmar?

Finns dokumenterade risker vid avfallshantering av solceller och skärmar?

Finns säkerhetsåtgärder exempelvis skyddsutrustning, luftrening eller annan vid moment som ökar risken för exponering av material från solceller och skärmar exempelvis vid kvarning?

Uppskattningsvis hur mycket elavfall som innefattas av WEEE-direktivet per år eller kvartal tar återvinningscentral emot?

Hur stor andel av materialet som solceller och skärmar består d.v.s. metaller, plast och glas går till respektive avfallshantering (återvinning, energiåtervinning, borstskaffande, återanvändning)?

Hur efterföljs principen ”bästa lämpliga metod”, uppdatering av kunskap och goda rutiner för avfallshanteringen av solceller och skärmar?

Hur ser er strategi ut för framtida avfallshantering av den kommande ökande solcells- och skärmaravfall?

Hur minimeras risker vid hantering av material som under avfallshanteringen kan ge upphov till farliga luftpartiklar?

Ser ni några risker eller/ och problem vid avfallshantering av solceller och skärmar som kan komma innehålla nanotrådar?

Finns det en fråga som ni upplever borde belysas vid avfallshanteringen av solceller och skärmar?

Populärvetenskaplig sammanfattning

Framtidens generation av solceller innehåller nanotrådar, men vilka risker kan materialet utgöra på återvinningsanläggningar?

De mycket små semikonduktiva nanotrådar effektiviserar framtidens solceller och det är möjligt att nästa generations solceller kommer bli en vanlig syn i samhället. Men, aktuell forskning pekar på att nanotrådarna har farliga egenskaper för människors hälsa och miljö. Det är viktigt att inte glömma att dessa solceller kommer hamna på återvinningsanläggningar efter att dem tjänat sitt syfte och då gäller det att utvidga kunskapen om nanotrådar och utveckla strategier för att hantera materialet på ett lämpligt sätt.

Den här spännande studien lyfter fram vad aktuell forskning visar om semikonduktiva nanotrådar, en typ av halvledande material, och vilka toxiska egenskaper dessa nanotrådar kan medföra. Studien visar också, genom att analysera data, två olika tillväxtscenarier för effekt och antal installerade solceller i framtiden i Sverige. De två tillväxtscenarierna, linjär och exponentiell, visar på en tydlig ökning av solceller. Detta innebär också att återvinningsanläggningar i framtiden kommer att ta emot många uttjänta solceller i framtiden och idag finns ingen strategi för hur man ska gå till väga. Det innebär att en ökad mängd solceller som potentiellt innehåller nanotrådar kan medföra risker som skapar olägenheter för miljö och hälsa.

Resultatet från den genomförda dataanalysen av solcellsdata visar att sannolikt kommer den senaste tidens kraftiga tillväxt av solceller fortsätta att öka. Tillkomsten av solceller i samhället har skett under en långsam takt, antalet installerade solceller i elnätet för året 1992 uppskattas i den här studien bara vara cirka 50 stycken men fortsatt öka till cirka 7500 stycken för året 2015. Det är kanske inte så mycket på 23 år men nu har det skett en stor förändring. För åren 2016-2018 har solceller ökat mycket kraftigt till ungefär 25 000 stycken vilket är en stor skillnad mot tidigare år med långsam tillväxt.

Man kan jämföra solcellers och vindkraftens tillväxt med varandra eftersom båda är förnyelsebara energikällor. Vindkraft har följt en mer linjär och långsam utveckling. De senaste åren med den kraftiga ökningen av solceller visar på att solceller har större möjligheter för tillväxt, kanske beror det på att solceller inte begränsas av buller eller förstörelser av den estetiska landskapsbilden som vindkraft kan göra.

Semikonduktiva nanotrådar innehåller väldigt små sammansatta trådar och bildar tillsammans en längre kedja. Medicinsk forskning har påvisat att nanotrådar kan ha hälsovådliga effekter genom att aktivera makrofager, en typ av immuncell som neutraliserar hot mot kroppen, till "frustrerade makrofager" vilket kan leda till

sjukdomar hos människor. Nanotrådar är troligen inte bara farliga för människor, en annan studie genomförde ett experiment där man exponerade daggmaskar för nanotrådar och observerade toxiska egenskaper av nanotrådar i organismen vilket kan innebära negativa konsekvenser vid utsläpp till ekologiska system.

Arbetet i den här studien belyser möjlig problematik med en ny typ av produkt, solceller innehållande nanotrådar, där tidigare generationer av solceller utvecklats kraftigt i antal de senaste åren. Hur behandlingen av solceller, som potentiellt kan innehålla nanotrådar i framtiden, sker vid återvinningsanläggningar är viktigt att redogöra för att bedöma vilka potentiella risker nanotrådar i solceller utgör. Konsekvenserna med en bristande behandlingsmetod riskerar att leda till sjukdomar och skapa olägenheter för miljö och hälsa.