

Veiligheid in tweede- levenstoepassingen van energietransitie- technologieën



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteurs B. Riemersma & P. Brassier
Met medewerking van N. Rosmuller
Contactpersoon B. Riemersma

Datum 12 september 2024

Foto cover Shutterstock

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Samenvatting

Nu de energietransitie goed op weg is, krijgen we ook steeds meer te maken met technologieën die niet langer inzetbaar zijn voor hun oorspronkelijke toepassing. Ze krijgen een andere functie, en gaan zo een tweede leven in. In dit rapport staan de risico's van de tweede-levenstoepassingen van *batterijen*, *windturbines* en *zonnepanelen* centraal. Bij alle drie technologieën is gekeken naar mogelijke tweede-levenstoepassingen, en is onderscheid gemaakt tussen *hergebruik*, *herfabricage*, *herbestemming* en *recycling*. Dit rapport beschrijft relevante kenmerken van alle drie de technologieën, met de daarbij horende belangrijke veiligheidsrisico's. Denk hierbij aan brandgevaar bij batterijen, afbrekende onderdelen bij windturbines of het vrijkomen van schadelijke kleine deeltjes bij brand in een zonnepaneel. Vervolgens wordt ingegaan op de manier waarop deze en andere veiligheidsrisico's relevant zijn voor de verschillende tweede-levenstoepassingen.

Het blijkt dat er sprake is van weinig hergebruik bij zowel batterijen als windturbines en zonnepanelen. Door de snelheid van technologische ontwikkelingen kunnen technologieën die aan het einde van hun oorspronkelijke levensduur zijn zich qua efficiëntie niet meten aan de hedendaagse equivalenten. Daarom rest slechts een 'downgrade', zoals wanneer auto- of scooterbatterijen worden gebruikt als thuisbatterij of onderdelen van windturbines als bouw materiaal.

Herfabricage, of reparatie van de onderzochte technologieën gebeurt tot op zekere hoogte. Door strengere Europese wetgeving zien we dit bijvoorbeeld bij autobatterijen meer gebeuren. Voor windturbines ontstaat er een (internationale) markt waar handel wordt gedreven in onderdelen voor zowel reparatie als 'upgrade' van windturbines. Ook zonnepanelen kunnen worden gerepareerd. Toch geldt ook hier, net als voor hergebruik, dat het vaak efficiënter is om over te schakelen op de aanschaf van een nieuw exemplaar.

De onderzochte technologieën worden volop herbestemd. Met name bij batterijen gebeurt dit binnenlands. Windturbines en zonnepanelen worden ook geëxporteerd, en kennen vaker een tweede leven in het buitenland. Wanneer geen van de bovenstaande opties aan de orde is, worden materialen gerecycled. Bij alle drie behandelde technologieën wordt dit proces steeds meer gestroomlijnd, en is het ondertussen ook vaak verplicht door verschillende wet- en regelgeving.

Binnen de drie bestudeerde technologieën zien we tijdens de tweede-levenstoepassingen veiligheidsrisico's minder geborgd dan tijdens de eerste-levenstoepassing. Tot op zekere hoogte zijn veiligheidsrisico's tijdens een tweede-levenstoepassing gelijk aan veiligheidsrisico's die we ook tegenkomen tijdens een lange eerste-levenstoepassing. Gemiddeld genomen bestaat er echter een groter risico bestaan op incidenten bij technologieën in hun tweede-levenstoepassing. Certificatie van nieuwe toepassingen, en bedrijven die tweede-levens toepassingen faciliteren, kunnen deze risico's voor een groot deel borgen.

Inhoud

Samenvatting	3
Inleiding	5
1. Batterijen	7
1.1 Relevante kenmerken van de eerste-levenstoepassing	7
1.2 Veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing	8
1.3 Tweede-levenstoepassingen van batterijen	8
1.4 Risico's van tweede-levenstoepassingen	10
1.5 Beperken van risico's van tweede-levenstoepassingen	11
1.6 Conclusies	14
2. Windturbines	16
2.1. Relevante kenmerken van de eerste-levenstoepassing	16
2.2. Veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing	17
2.3. Tweede-levenstoepassingen van windturbines	18
2.4. Risico's van tweede-levenstoepassingen	20
2.5. Beperken van risico's van tweede-levenstoepassingen	20
2.6. Conclusies	22
3. Zonnepanelen	24
3.1. Relevante kenmerken van de eerste-levenstoepassing	24
3.2. Veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing	24
3.3. Tweede-levenstoepassingen van zonnepanelen	25
3.4. Risico's van tweede-levenstoepassingen	26
3.5. Beperken van risico's van tweede-levenstoepassingen	26
3.6. Conclusies	29
4. Conclusie	31
Literatuur	33
Bijlage 1 Lijst met gevoerde gesprekken	36

Inleiding

Achtergrond

Nu de energietransitie goed op weg is, krijgen we ook steeds meer te maken met technologieën die niet langer inzetbaar zijn voor hun oorspronkelijke toepassing. Ze krijgen een andere functie, en gaan zo een tweede leven in.¹ Dit kunnen bijvoorbeeld batterijen zijn uit 'afgedankte' auto's die een tweede leven krijgen als thuisbatterij, of windturbines die in Nederland worden ontmanteld en elders een tweede leven als windturbine krijgen. Beide zijn voorbeelden van 'nieuwe' onderdelen van ons energiesysteem waar we dagelijks mee te maken hebben. Deze ontwikkeling valt samen met nieuwe Europese regelgeving die reparatie en hergebruik van apparatuur bevordert.²

Dit rapport bespreekt een aantal van deze tweede-leven-toepassingen. Het laat zien welke veiligheidsrisico's gepaard gaan met tweede-levenstoepassingen, en of deze risico's vragen om nieuwe beheersmaatregelen. Met de veiligheidsrisico's van deze energietechnologieën in hun eerste-levenstoepassing hebben we inmiddels genoeg ervaring.³

Afbakening

We maken onderscheid tussen vier verschillende types tweede-levenstoepassingen voor drie verschillende technologieën. Zo vormen de toepassingen hergebruik, herfabricage, herbesteding en recycling het analysekader voor dit onderzoek. We volgen hier grotendeels de classificatie van Christensen (Office for Product Safety & Standards, 2023), met de toevoeging van recycling.

We lichten de vier types toe met behulp van de autobatterij als voorbeeld. Bij *hergebruik* wordt de batterij na toepassing in een elektrisch voertuig hergebruikt in een ander elektrisch voertuig. Bij *herfabricage* worden slechte cellen uit de afgedankte autobatterij vervangen door goede cellen, waarna de batterij terug wordt gebracht in een elektrisch voertuig. Bij *herbesteding* wordt de autobatterij in een andere toepassing, zoals een thuisbatterij, in gebruik genomen. Bij *recycling* wordt de autobatterij gedemonteerd en worden de grondstoffen waar mogelijk opnieuw gebruikt voor allerlei toepassingen.

Vraagstelling en methode

Per technologie beantwoorden we de volgende vragen:

1. Wat zijn de voor veiligheid relevante kenmerken voor de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

¹ Deze vraagstukken spelen wereldwijd, zoals besproken in een recente blog van Nils Rosmuller (2024).

² https://commission.europa.eu/law/law-topic/consumer-protection-law/consumer-contract-law/rules-promoting-repair-goods_en.

³ <https://scenarioboeken.nipv.nl/energietransitie/>.

2. Welke veiligheidsrisico's zien we tijdens de eerste-levenstoepassing van deze technologie?
3. Welke tweede-levens-toepassingen zien we binnen Nederland ontstaan?
4. Welke veiligheidsrisico's zien of verwachten we binnen de geïdentificeerde tweede-levenstoepassingen?
5. Hoe kunnen de risico's binnen tweede-levenstoepassingen effectief worden beperkt?

Dit rapport is gebaseerd op literatuurstudie en expertanalyse. Voor de literatuurstudie is gebruik gemaakt van academische artikelen en vakbladen. Voor de expertanalyse zijn interviews uitgevoerd. Interviewkandidaten zijn geselecteerd op basis van hun ervaring met tweede-levenstoepassingen. Alle respondenten zijn proactief met dit onderwerp bezig, en zijn mogelijk dus niet representatief voor de kwaliteit van de hele sector. De interviews zijn waar mogelijk en toegestaan opgenomen en getranscribeerd. De respondenten hebben na het interview nog de kans gekregen om input te leveren op de manier waarin de interviews zijn verwerkt en gebruikt.

Leeswijzer

Hoofdstuk 1 gaat in op de kenmerken van (lithium-ion)batterijen, hun tweede-levenstoepassingen, de risico's daarvan en de mogelijkheden om die risico's te beperken. Hoofdstukken 2 en 3 behandelen diezelfde thema's voor respectievelijk windturbines en zonnepanelen.

1. Batterijen

1.1 Relevante kenmerken van de eerste-levenstoepassing

Wanneer we in dit rapport spreken van batterijen, hebben we het over de zogenaamde lithium-ion batterijen. De oplaadbare lithium-ion batterij bestaat uit cellen die op hun beurt bestaan uit twee elektroden: een negatieve elektrode (anode) en een positieve elektrode (kathode). De batterij wordt opgeladen of ontladen door een elektrochemische reactie waar de lithium-ionen verschuiven van de kathode (bij een lege batterij) naar de anode (bij een volle batterij). De lithium-ionen verplaatsen zich door elektrolyt, en passeren daarbij ook een polymeren separator die de kathode en de anode van elkaar moet isoleren. De elektrolyt in een lithium-ion batterij is doorgaans een vloeibare organische oplossing van onder andere lithiumhexafluorofosfaat (LiPF_6) (Office for Product Safety & Standards, 2023). In dit rapport maken we een onderscheid tussen verschillende batterijgroottes. Op het kleinste niveau spreken we van een batterijcel die bestaat uit één anode en één kathode. Meerdere geschakelde batterijcellen vormen een batterijmodule, en meerdere geschakelde batterijmodules vormen een batterijpakket.

Vanwege de recente sterke groei in batterijproducten verwachten we een grote behoefte aan tweede-levenstoepassingen (Schröder, 2023). We verwachten dat het gros van overtollige batterijen afkomstig zal zijn uit elektrische voertuigen (EV's). Dit zijn met name auto's, maar bijvoorbeeld ook scooters en fietsen. Tegen 2030 worden wereldwijd al meer dan 100 miljoen elektrische autovoertuigen (EV's) op de weg verwacht, met daarin minstens zoveel batterijpakketten. De materialen voor deze batterijen worden nu meestal direct uit mijnen gewonnen. Echter, door materiaalschaarste, kosten- en milieuoverwegingen zullen gebruikte autobatterijen steeds vaker een tweede leven krijgen aan het einde van hun eerste-levenstoepassing. Het Chinese Btree Recycling verwacht dat hergebruiksstromen vanaf 2035 minstens zo belangrijk zullen zijn in de bevoorradingsketen als goederenstromen vanuit mijnen (Auto Recycling Nederland, 2022).

Ook in Nederland komen steeds meer batterijen aan het einde van hun eerste-levenstoepassing. Voor auto's, bijvoorbeeld, zien we nu, circa tien jaar na de introductie van de eerste (hybride) EV's, langzamerhand meer hergebruik van batterijmaterialen. In 2021 werd er 117.000 kilo aan autobatterijen verzameld. Dit zijn ongeveer 260 EV batterijen. Dit aantal staat vooralsnog in schril contrast met het totale aantal van meer dan 300.000 EV's in Nederland. Het aantal autobatterijen aan het einde van hun eerste leven zal echter snel toenemen door de groeiende markt voor elektrische auto's en de verouderende batterijen. Bovendien zien we een groeiende stroom aan batterijen uit elektrische fietsen en (deel)scooters ontstaan. Parallel met deze ontwikkelingen zullen verschillende tweede-levensstromen prominenter worden.

1.2 Veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing

We onderscheiden vier belangrijke gevaren voor de mens bij het gebruik van batterijen (NIPV, 2023; Office for Product Safety & Standards, 2023).

Ten eerste is er het gevaar op brand. Een batterij kan een brand veroorzaken, alsook een bestaande brand versterken. Een brand met een li-ion batterij kan uitmonden in een zogenaamde 'thermal runaway'. Dit mechanisme refereert aan het fenomeen waarbij de elektrolyt in een batterijcel vlam vat, waarna de daarop resulterende verhoogde omgevingstemperatuur aangrenzende batterijcellen doet ontvlammen (NIPV, 2023). Een thermal runaway levert met name gevaren op bij geschakelde batterijcellen, zoals in batterijmodules of batterijpakketten.

Ten tweede bestaat het gevaar op het vrijkomen van toxische gassen. Bij lekkage kan elektrolyt vrijkomen. Met name LiPF_6 is toxisch, en kan leiden tot ernstige brandwonden en oogschade. Bovendien wordt er aan de elektrolyt vaak een beperkte hoeveelheid (tot 5 %) aan additieven toegevoegd, die eveneens (extreem) toxisch kunnen zijn. De precieze samenstelling van deze additieven varieert per producent, en is vaak bedrijfsgeheim (Office for Product Safety & Standards, 2023).

Ten derde kan er tijdens brand en/of het vrijkomen van (toxische) gassen een explosie ontstaan (NIPV, 2023). Het gevaar op een explosie wordt vergroot in een afgesloten ruimte, zoals in een garage of een opslagplaats.⁴

Ten slotte bestaat het gevaar op elektrocutie. Wanneer iemand tegelijkertijd in contact komt met beide elektroden van een opgeladen batterij, krijgt hij of zij een elektrische schok. De kans dat dit gevaar optreedt, is doorgaans laag, met name wanneer de batterij is geïnstalleerd door een gecertificeerd technicus (Office for Product Safety & Standards, 2023).

1.3 Tweede-levenstoepassingen van batterijen

1.3.1 Hergebruik

Hergebruik van li-ion batterijen houdt in dat batterijen na hun eerste toepassing onveranderd in een vergelijkbare toepassing worden gebruikt. Tijdens ons onderzoek zijn we geen voorbeelden tegengekomen van batterij-hergebruik. Voor de productie van elektrische fietsen, scooters, en auto's geldt de voorkeur voor het gebruik van nieuwe batterijen. In plaats van hergebruik van batterijen met een verminderde gezondheid, wordt er eerder gekozen voor een van de resterende drie tweede-levenstoepassingen. Respondenten binnen de elektrische mobiliteitsbranche (zowel scooters als auto's) zeggen dat hergebruik simpelweg niet veilig genoeg is (Interview StoredEnergy, ARN). Het is overigens wel mogelijk dat hergebruik plaats vindt bij particulieren of fabrikanten van kleinere batterijproducten (Interview Stichting OPEN).

De 'gezondheid' van een batterij wordt aangeduid met de zogenaamde 'State of Health' (SoH). Deze gezondheidsgraadmeter laat de resterende batterijcapaciteit na een oplaadbeurt zien ten opzichte van de oorspronkelijke kwaliteit, en wordt uitgedrukt in een percentage.

⁴ <https://scenarioboeken.nipv.nl/li-ion-buurtbatterij-in-kelder/>.

1.3.2 Herfabricage

Herfabricage van li-ion batterijen houdt in dat de batterijen na hun eerste toepassing worden aangepast om ze daarna weer in dezelfde toepassing te gebruiken. Het batterijpakket wordt dus gerepareerd. De nieuwe EU-batterijverordening zet verder in op reparatie en traceerbaarheid van batterijkwaliteit.⁵ De nieuwe richtlijn, ten tijde van schrijven nog niet verankerd in Nederlandse wetgeving, spreekt van 'remanufacturing' als een batterij wordt gerepareerd en daarna voor dezelfde toepassing wordt gebruikt. Bij remanufacturing blijft de de verantwoordelijkheid voor het product bij de oorspronkelijke fabrikant liggen. Wanneer de batterij voor een andere toepassing wordt gebruikt, wordt er gesproken over 'repurposing', en verschuift ook de productverantwoordelijkheid naar de partij die de herbestemming heeft uitgevoerd.

Binnen de batterijbranche wordt al volop voorgesorteerd op herfabricage. Auto Recycling Nederland (ARN) laat weten dat batterijen steeds vaker worden gerepareerd. Dit valt terug te zien in de teruglopende relatieve hoeveelheid volledige batterijpakketten die binnenkomt. ARN stelt dat waar zo'n 2 tot 3 jaar geleden nog 80 % van de binnenkomende batterijen volledig kon worden gebruikt voor een andere toepassing (herbestemming), dit anno juni 2023 nog maar zo'n 30 % is. Deze daling valt in ieder geval voor een deel toe te schrijven aan een toenemende mate van reparatie: batterijen met een klein defect worden eerder gerepareerd door de oorspronkelijke fabrikant, en komen minder snel in aanmerking voor andere toepassingen. ARN stelt dat deze daling ook valt toe te schrijven aan de snelle toename van autobatterijen die na langdurig gebruik onder de geprefereerde SoH worden aangeleverd.

1.3.3 Herbestemming

Herbestemming van li-ion batterijen houdt in dat de batterijen na hun eerste toepassing worden hergebruikt in een andere toepassing. Een nieuwe fabrikant wordt verantwoordelijk voor de veiligheid. We zien in Nederland reeds verschillende herbestemmingen voor batterijen. Zo worden autobatterijen bijvoorbeeld herbestemd als netwerkbatterij en stroomnoodvoorziening in de Johan Cruijff ArenA in Amsterdam, of ter ondersteuning van elektrische trolleybussen in Arnhem. We zien ook hergebruik van scooterbatterijen als thuisbatterij bij een proefproject van StoredEnergy in de Green Village op de TU Delft campus. In grote lijnen zien we een trend waar batterijen van een mobiele toepassing (auto, fiets, scooter) naar een meer stationaire toepassing gaan, zoals een energieopslagsysteem.

1.3.4 Recycling/demontage

Recycling of demontage van li-ion batterijen houdt in dat de nog bruikbare grondstoffen uit de batterij worden gehaald en anders kunnen worden gebruikt. Voorlopige EU-richtlijnen introduceren recyclingdoelstellingen vanaf 2024, waar de verplichte recyclinggraad stapsgewijs omhoog gaat. Zo moet 51 % van batterijmaterialen kunnen worden herwonnen in 2028, en 61 % in 2031. De focus in deze richtlijnen ligt op schaarse metalen zoals koper, kobalt, lithium, nikkel en lood (European Commission, 2022).

⁵ <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230609IPR96210/making-batteries-more-sustainable-more-durable-and-better-performing>.

In de Nederlandse regelgeving is voor deze afvalstroom producentenverantwoordelijkheid opgenomen. Producenten (onder wie ook de importeurs) en distributeurs (zoals detaillisten en garagehouders) zijn verantwoordelijk voor de inname en verwerking van batterijen wanneer deze worden afgedankt (Staatscourant, 2020). Producenten en importeurs moeten een mededeling indienen bij de minister van Infrastructuur en Waterstaat met de manier waarop zij invulling geven aan deze verplichtingen. Sectorbrede informatie wordt onder andere verzameld en gedeeld door de Stichting OPEN (voor 1 januari 2024 was dit Stichting Batterijen (Stibat)) en ARN. De producentenverantwoordelijkheid voor autobatterijen wordt voor een groot deel van de Nederlandse auto-importeurs gedelegeerd aan ARN.

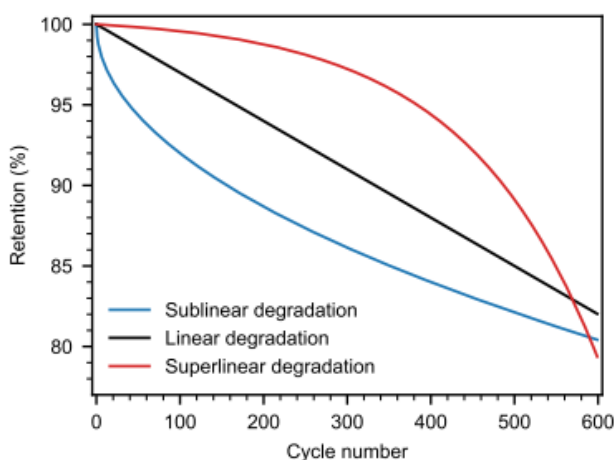
Batterijen en accu's die zijn ingebouwd in elektrische en elektronische apparatuur moeten door de eindgebruiker of door onafhankelijke gekwalificeerde vaklieden eenvoudig uit de apparatuur verwijderd kunnen worden. In de gebruiksaanwijzing moet worden opgenomen welk soort of type batterij of accu de apparatuur bevat en hoe deze uit de apparatuur gehaald kan worden.

1.4 Risico's van tweede-levenstoepassingen

Vergeleken met de eerste-levenstoepassing zijn veiligheidsrisico's voor batterijen in de tweede-levenstoepassing hoger vanwege een verhoogde kans op een ongeval, terwijl de effecten vergelijkbaar zijn (Office for Product Safety & Standards, 2023). Batterijen zullen bij aanvang van hun tweede-levenstoepassing verschillen in kwaliteit, en daarmee ook in de kans op een incident. Als vuistregel wordt gesteld dat batterijen aan het einde van hun eerste-levenstoepassing zitten wanneer ze rond de 75-80 % van hun oorspronkelijke capaciteit over hebben. De tweede-levenstoepassing houdt op rond 50-60 % van de oorspronkelijke capaciteit, waarna faalkansen drastisch toe beginnen te nemen en de batterij doorgaans wordt gedemonteerd voor materialen (Martinez-laserna et al., 2018).

Capaciteitsverlies en het kniepunt

Het capaciteitsverlies van de batterij is niet noodzakelijkerwijs lineair, wat het lastig maakt om het risicoprofiel in te schatten. In de wetenschappelijke literatuur wordt gesproken over een knievormige lijn die de degradatie van lithium-ion batterijen weergeeft (Attia et al., 2022).



Figuur 1.1 Schematische weergave van drie mogelijke degradatiepatronen in ouder wordende lithium-ion batterijen (Attia et al., 2022)

Figuur 1.1 geeft een schematische weergave van dit zogeheten ‘kniepunt’. De drie verschillende lijnen laten drie verschillende kniepunten zien. Beide assen kunnen op meerdere manieren worden geïnterpreteerd. De x-as kan staan voor het aantal laadbeurten, maar kan ook breder worden geïnterpreteerd als het verloop van tijd of de totale energiedoorgave; de y-as omschrijft de capaciteit van de batterij om energie of lading te behouden. De degradatie van een batterij gaat gepaard met meerdere risico’s. Zo kan de anode minder stabiel worden als gevolg van minder homogeen wordend lithium en een afname in grafietafscheiding. De daaruit volgende fragmentatie van de anode kan leiden tot hogere weerstand en daarmee samenhangende temperatuurstijging. Een andere oorzaak betreft het zogenaamde ‘metal plating’. Dit is een fenomeen waarbij tijdens het opladen de lithium-ionen metaalachtig lithium vormen op de anode, in plaats van dat ze worden ingebracht in de anode (doorgaans het grafiet). Deze metal plating, of beplating, kan ontstaan wanneer de doorstroom van ionen niet in overeenstemming is met de passende stroomsterkte. De doorstroom van ionen kan bijvoorbeeld worden beperkt door een lage viscositeit van de elektrolytoplossing (veroorzaakt door bijvoorbeeld een lage temperatuur), of de stroomsterkte kan te sterk zijn in het geval van snel op- en ontladen van een batterij (Attia et al., 2022; Office for Product Safety & Standards, 2023). Een te grote opbouw van lithium aan de anode kan uiteindelijk de polymerenseparator beschadigen, en verhoogt zo de kans op een thermal runaway.

Verschillende variabelen kunnen bijdragen aan het uiteindelijke verloop van de batterijcapaciteit. Attia et al. (2022) geven in een literatuuroverzicht een opsomming van deze variabelen. Zo zijn keuzes gemaakt bij het ontwerpen van de batterijcel en de manier van gebruik van grote invloed op dit punt waarop de batterij plotseling sneller capaciteit verliest. Zo kunnen coatings op de elektrodes en separators eventuele ontbranding voorkomen of uitstellen, of kan de samenstelling van de elektrolyt de kans op beplating beperken, waardoor een knievormig degradatiepatroon kan worden afgevlakt. De invloed op het degradatiepatroon van de manier waarop de batterij wordt gebruikt, is onder meer gelegen in de snelheid van opladen en ontladen. Deze is positief gecorreleerd met de snelheid waarop het kniepunt wordt bereikt en de capaciteit afneemt. Dit kan betekenen dat batterijen uit elektrische auto’s die vaak snel-laden een bepaald risiconiveau bij een lagere kilometerstand bereiken dan auto’s die gebruikmaken van laadpalen thuis, op straat of op kantoor. Dit patroon geldt ook voor andere batterijtoepassingen waar snel-laden van toepassing is, zoals bijvoorbeeld een thuisbatterij.

1.5 Beperken van risico’s van tweede-levenstoepassingen

We maken onderscheid in twee categorieën van risico verkleinende maatregelen. Eerst behandelen we maatregelen ter voorkoming van de risico’s zoals hierboven beschreven, daarna behandelen we maatregelen die effecten van mogelijke risico’s reduceren.

1.5.1 Preventief: testen van batterijen na hun eerste-levenstoepassing

De conditie van de batterij (SoH) aan het einde van de eerste-levenstoepassing bepaalt voor een groot deel de veiligheid van de tweede-levenstoepassing. Wanneer de onderhouds- en gebruiksgeschiedenis van de batterij niet bekend zijn, kan de veiligheid van batterijen in een tweede-levenstoepassing alleen geborgd worden door grondige inspectie. Deze inspectie is belangrijk wanneer een batterij volledig wordt hergebruikt, en ook wanneer onderdelen van verschillende batterijen worden geherfabriceerd tot een grotere batterij.

Er zijn twee manieren om de conditie van batterijen vast te stellen. De eerste manier behelst het uit elkaar halen van de batterijmodules om alle batterijen individueel te testen. Batterijen die niet voldoen aan de specificaties, worden vervolgens afgeschreven. De internationale Underwriters Laboratories (UL) standaard *UL 1974* beschrijft de voorgeschreven werkwijze voor deze manier van testen. De tweede manier berust op zogeheten 'type tests'. Deze tests gaan uit van representativiteit. Ze testen een willekeurig aantal cellen, en generaliseren de uitkomst over naburige cellen, modules of pakketten. Alle relevante Europese en internationale normeringen zijn hoofdzakelijk vormgegeven voor nieuwe batterijpakketten en stellen de laatstgenoemde typetests verplicht (Office for Product Safety & Standards, 2023).

Er bestaat nog geen Nederlandse of Europese norm voor het testen van batterijen voor aanvang van hun tweede-levenstoepassing. Wel stelt Europese regelgeving dat het bedrijf dat een andere toepassing aan een batterij geeft, verantwoordelijkheid draagt voor de veiligheid. In de praktijk zien we dat (professionele) bedrijven die afgedankte batterijen een tweede toepassing geven deze onderwerpen aan een typetest. Een typetest is met name van belang bij het consolideren van batterijmodules met verschillende herkomst. Wanneer een bepaalde module of cel van een herbestemde batterij een significant lagere kwaliteit heeft dan de omliggende modules of cellen, is deze eerder vatbaar voor brand of thermal runaway. In tegenstelling tot een typetest, zal een representatieve test dit niet altijd kunnen detecteren. De voor dit onderzoek bevroegde organisaties bevestigen dat grondige inspectie de norm is bij professionele producenten (Interview StoredEnergy, Interview ARN).⁶

Particulieren die batterijen hergebruiken voor nieuwe doeleinden, kennen geen verplichtingen tot preventieve maatregelen. Dit maakt dat 'hobbyisten' ongereguleerd blijven. Deze categorie, die bijvoorbeeld batterijen uit afgedankte elektrische auto's als thuisbatterij installeert, opereert buiten het zicht van de veiligheidsregio's en omgevingsdiensten.

1.5.2 Preventief: vigerende wet- en regelgeving voor installatie van (tweede-levens)batterijen

Preventieve maatregelen voor demontage van eerste-levensbatterijen en productie van tweede-levensbatterijen

Nederland kent een onafhankelijk kwaliteitssysteem voor de voertuigdemontagebranche. In deze Kwaliteitszorg Demontage (KZD) norm⁷ staan eisen voor demontage, Arbodetgeving, materiaalrecycling en kwaliteit. De norm is verplicht voor demontagebedrijven die zijn aangesloten bij ARN (auto's) en STIBA (auto's, motorfietsen, trucks en aanverwante voertuigdemontagebedrijven), maar kent geen brede verplichting in Nederland. Er is een aanvullende KZD-E-norm voor elektrische en hybride voertuigen. Deze norm is niet los te verkrijgen, en altijd gekoppeld aan een standaard of uitgebreide KZD-norm. De KZD-norm wordt getoetst door onafhankelijke certificerende instanties zoals SGS en Kiwa.

Producenten van tweede-levens-toepassingen zijn gebonden aan de vigerende wet- en regelgeving voor het opnieuw op de markt brengen van afvalproducten. De kaderrichtlijn afvalstoffen is hierbij leidend. Een afgedankte aandrijfbatterij kan opnieuw de markt in worden gebracht, en dus niet langer als afval worden beschouwd, als ze voldoet aan een

⁶ Zie ook <https://fd.nl/bedrijfsleven/1479771/techpioniers-geven-afgedankte-fietsaccu-s-een-nieuw-leven>.

⁷ <https://www.stiba.nl/over-stiba/kwaliteitszorg-demontage/>.

aantal richtlijnen zoals in de kaderrichtlijn staan beschreven in artikel 6.⁸ Twee criteria die relevant zijn voor het vaststellen van de zogeheten einde-afvalfase zijn de volgende:

- > De stof of het voorwerp voldoet aan de technische voorschriften voor de specifieke doelen en aan de voor producten geldende wetgeving en normen.
- > Het gebruik van de stof of het voorwerp heeft over het geheel genomen geen ongunstige effecten voor het milieu of de menselijke gezondheid.

De omgevingsdiensten houden toezicht op het naleven van deze richtlijn. Zij monitoren en handhaven bestaande vergunningen, en zijn betrokken bij de afgifte van een omgevingsvergunning beperkte milieutoets (OBM).

Preventieve installatiemaatregelen voor tweede-levensbatterijen

Er bestaat in Nederland geen additionele regelgeving voor de installatie van batterijen in een tweede-levenstoepassing. Uit de gevoerde interviews blijkt echter dat er wel degelijk extra maatregelen worden genomen om de veiligheid te kunnen borgen. Zo beperkt StoredEnergy het oplaadvermogens van batterijen. Dit vermogen wordt omschreven door de C-rate, waar een C-rate van 1 het nominale oplaadvermogen weergeeft. StoredEnergy brengt de C-rate terug naar 0,5C, wat meer dan een halvering van de laad- en ontlaadtoepassing betekent. Verder worden er bij de installatie van een batterij van StoredEnergy op de campus van de TU Delft meerdere temperatuursensoren en een brandblusser bij de batterij geïnstalleerd (Interview StoredEnergy).

Preventieve testmaatregelen voor tweede-levensbatterijen

Veel veiligheidsmaatregelen die zijn opgesteld voor eerste-levensbatterijen zijn ook relevant voor tweede-levensbatterijen. Maatregelen voor locatiebepaling en monitoring zijn bijvoorbeeld relevant voor beide. Relevante normeringen zijn vastgelegd in verschillende NEN-normen. NEN 62933 stelt veiligheidseisen voor Elektrische Energieopslag Systemen (EES); NEN 62619 stelt veiligheidseisen voor oplaadbare lithiumcellen en batterijen (met alkalische en andere niet-zuurhoudende elektrolyten) voor industriële toepassingen. Volgens een studie van het Britse Office for Product Safety & Standards wordt een internationale variant van NEN 62619 het meest gebruikt voor het testen van (eerste en tweede-levens)thuisbatterijen. Om de test te doorstaan, moet de batterij niet vlam vatten of ontploffen tijdens onder andere de volgende activiteiten en omstandigheden die getypeerd worden als redelijk geacht 'misbruik' ('abuse') van batterijen (NEN-EN-IEC 62619, 2022):

1. laadtest (volledig ontladen en herladen)
2. externe kortsluiting
3. blootstelling aan een vallend object van 9,1 kg
4. het laten vallen van de batterij van een hoogte afhankelijk van de zwaarte van de batterij
5. blootstelling aan hitte (tot 85 graden Celsius voor een periode van 3 uur)
6. overladen of geforceerd ontladen.

Bovendien voorziet NEN 62619 in een test voor de kans op optreden van thermal runaway. Hierbij wordt één cel middels een laser verwarmd, totdat deze zich in een staat van thermal runaway bevindt. Hierna wordt de laser verwijderd en het batterijsysteem geobserveerd gedurende 8 uur.

⁸ <https://www.afvalcirculair.nl/onderwerpen/afval/kaderrichtlijn/>.

In Duitsland gelden strengere normen voor thuisbatterijen. De VDE-AR-E 2510-50:2017 adresseert een aantal hiaten in huidige internationale standaarden. Zo wordt hier onder andere een hoorbaar alarm verplicht gesteld, alsook een sensor voor gevaarlijke stoffen. Bovendien is deze norm de enige Europese standaard die het batterijmanagementsysteem verplicht *alle* cellen te monitoren, en de batterij uit te schakelen wanneer een of meerdere cellen zich buiten hun veiligheidsparameters bevinden.

Bovenstaande normen gelden niet specifiek, of soms specifiek niet, voor tweede-levensbatterijen. In Duitsland komt er bijvoorbeeld een nieuwe standaard voor tweede-levensthuishuisbatterijen (Office for Product Safety & Standards, 2023). Internationaal wordt er ook gewerkt aan nieuwe standaarden die specifiek gelden voor tweede-levensbatterijen. IEC 63330 zal richtlijnen geven voor het vaststellen van de veiligheid van tweede-levensbatterijen; IEC 63338 zal generieke richtlijnen geven voor veilig en duurzaam hergebruik van batterijen.

Preventieve inspectiemaatregelen voor tweede-levensbatterijen

Zowel eerste als tweede-levensbatterijen behoeven periodiek onderhoud. NEN 62845-5 geeft richtlijnen voor veilig gebruik en onderhoud. Zo geeft Sectie 6 kledingvoorschriften, en duidt Sectie 7 veilige manieren van laden en ontladen (onder andere met betrekking tot temperatuur en gekozen voltage). Sectie 8 geeft voorschriften voor het mitigeren van gevaren gerelateerd aan eventueel vrijkomende chemische stoffen tijdens onvoorziene gebeurtenissen. Elke batterij moet ten minste een Safety Data Sheet (SDS) hebben waarin chemische stoffen gespecificeerd staan. Ten slotte stelt Sectie 13 voorwaarden aan inspectie. De inspectie moet plaatsvinden aan de hand van door de fabrikant gestelde richtlijnen. Signalen die een kritische veiligheidsstaat kunnen aanduiden, omvatten:

- > lekkage van elektrolyt
- > isolatieschade
- > licht gezwollen behuizing (vaak veroorzaakt door interne gasdruk, vacuümverlies of depositie van metaalachtig lithium).

Het verdere gebruik van batterijen na vastgestelde schade kan leiden tot het vrijkomen van elektrolyt(gas) en thermische ontsnapping. In dergelijke gevallen stelt de richtlijn dat de batterij moet worden afgedankt, onafhankelijk van eventueel advies van de fabrikant.

1.5.3 Incidentbestrijding

De geraadpleegde experts en literatuur noemen geen wezenlijk verschillen voor een effectieve incidentbestrijding voor batterijen in verschillende levenscycli. De thermal runaway blijft ook in de tweede-levenstoepassing van een batterij het grootste risico. Bestrijding van dit fenomeen gebeurt op dezelfde wijze als bij een batterij in de eerste-levenstoepassing.

1.6 Conclusies

1. Wat zijn relevante kenmerken voor de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

We hebben geconstateerd dat het aantal batterijen in Nederland snel toeneemt. Deze batterijen zien we terug in onder meer fietsen, scooters en auto's. Het aantal batterijen in Nederland groeit al een periode vrij snel, en een verdere groei wordt verwacht. Hiermee zal ook het aantal batterijen toenemen dat zich aan het einde van hun eerste-levenstoepassing bevindt.

2. Welke veiligheidsrisico's zien we tijdens de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

We zien vier belangrijke risico's tijdens de eerste-levenstoepassing van batterijen. Dit zijn brand, toxische gassen, explosie en elektrocutie.

3. Welke tweede-levens-toepassingen zien we binnen Nederland ontstaan?

We zien dat batterijen vaker worden gerepareerd. Reparatie verlengt de oorspronkelijke eerste-levenstoepassing. Tevens zien we dat batterijen hoofdzakelijk vanuit mobiele toepassingen (fiets, scooter, auto) naar stationaire toepassingen (energieopslagsysteem) gaan. Wanneer deze opties niet beschikbaar zijn, worden de batterijen deels gerecycled.

4. Welke veiligheidsrisico's zien of verwachten we binnen de geïdentificeerde tweede-levenstoepassingen?

De veiligheidsrisico's voor tweede-levenstoepassingen in batterijen zijn vergelijkbaar met degene die we kennen bij de eerste-levenstoepassingen mits de benodigde risicobeperkende maatregelen worden genomen. De effecten en de bestrijding van mogelijke ongevallen zijn identiek. De kans op ongevallen bij tweede-levenstoepassingen kan wel toenemen ten opzichte van eerste-levenstoepassingen. Deze kans hangt nauw samen met de risicobeperkende maatregelen die worden genomen.

5. Hoe kunnen de risico's binnen tweede-levenstoepassingen effectief worden beperkt?

Preventieve maatregelen in de gereguleerde markt voor batterijhergebruik reduceren de kans op incidenten in tweede-levenscycli. Producentenverantwoordelijkheid zorgt ervoor dat de professionele markt stringente kwaliteitscontroles hanteert. Particulieren die batterijen hergebruiken voor nieuwe doeleinden, kennen geen vergelijkbare verplichtingen tot preventieve maatregelen. Een gebrek aan duidelijke richtlijnen en verantwoordelijkheden, gecombineerd met de grote variatie in herkomst van batterijen en gebrekkige deskundigheid van 'hobbyisten' maakt deze laatste groep van batterijen het meest risicovol. Deze batterijen, zoals die uit afgedankte elektrische auto's, scooters, en fietsen, verdienen de meeste aandacht.

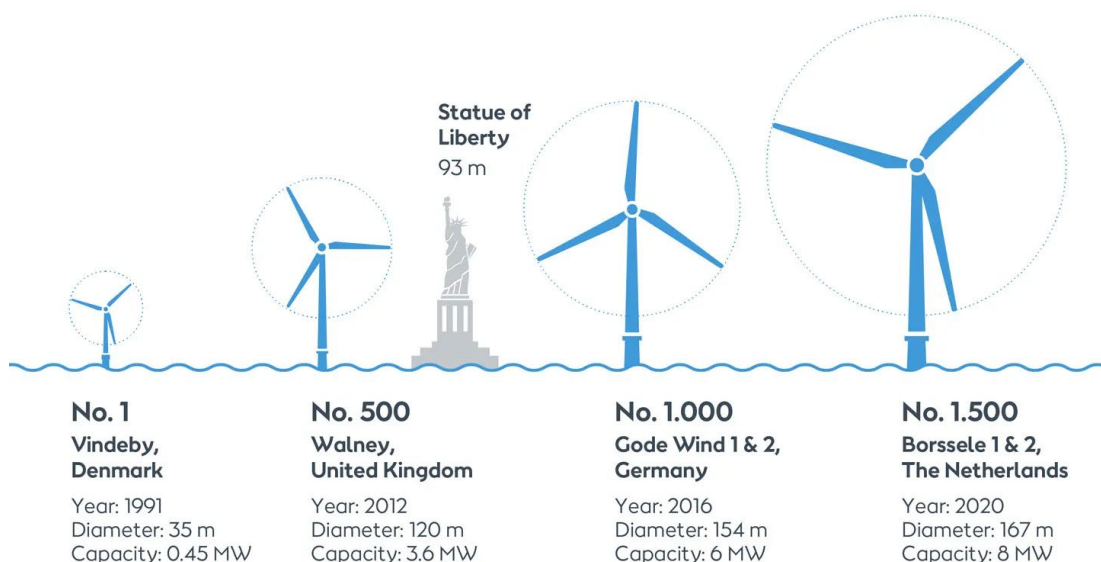
2. Windturbines

2.1. Relevante kenmerken van de eerste-levenstoepassing

2.1.1. Algemene kenmerken van windturbines

Windturbines kennen circa 25.000 individuele onderdelen die in drie categorieën kunnen worden gegroepeerd. In aflopende volgorde van totale massa zijn deze categorieën de fundering (circa 75 %), de windturbine (circa 23 %), en de bekabeling (circa 2 %). De fundering bestaat grotendeels uit gewapend beton. De windturbine bestaat uit de toren, de gondel (met daarin onder andere de rotor en de generator), en de turbinebladen. Zonder de fundering bestaan windturbines voor circa 85 % uit metaalachtig materiaal (de toren en de gondel), en voor circa 15 % uit polymeren (de turbinebladen). Een windturbine gaat circa 20 tot 25 jaar mee (NEN, 2016).

Windturbines zijn de afgelopen decennia enorm gegroeid in capaciteit en grootte. Figuur 2.1. laat zien hoe windturbines zich hebben ontwikkeld in de afgelopen dertig jaar. De maximale capaciteit wordt steeds groter: de afgebeelde turbines in Borssele 1 & 2 (anno 2020) hebben ruim zestien keer zo veel capaciteit als gangbare exemplaren in Denemarken anno 1991. Bovendien is de diameter bijna vijf keer zo groot. De laatste jaren heeft er ook een significante ontwikkeling plaatsgevonden in onder meer de samenstelling van windturbine-wieken alsook de aandrijving van de wieken. Deze twee ontwikkelingen worden hieronder apart behandeld.



Figuur 2.1 Windturbines van verschillende grootte⁹

⁹ <https://orsted.kr/en/renewable-energy-solutions/offshore-wind-power>.

2.1.2. Kenmerken van windturbinebladen

Windturbinebladen zijn gemaakt van vezel-versterkte kunststofcomposieten. De hoofdbestanddelen zijn vezels en matrices. De vezels (vaak van glas of koolstof) zorgen voor de benodigde sterkte, en worden op hun plaats gehouden door de matrices (vaak van epoxy of polyester) (Mishnaevsky et al., 2017). In dit rapport maken we een onderscheid tussen twee soorten kunststofcomposieten. Composieten met thermohardende (*thermoset*) matrices zijn na de uithardingsfase permanent solide, en zijn niet of nauwelijks weer om te smelten; composieten met thermoplastische (*thermoplastic*) matrices kunnen bij hoge temperaturen wel worden omgesmolten. Thermohardende matrices kennen enkele belangrijke voordelen ten opzichte van thermoplastische matrices, waaronder een snellere productietijd en hogere bestandheid tegen materiaalmoetheid. Daartegenover staat dat thermohardende composieten, in tegenstelling tot thermoplastische, niet eenvoudig kunnen worden gerecycled. Kortom, de optimale composietsamenstelling voor sterke en goedkope wieken staat op gespannen voet met de optimale samenstelling voor een tweede leven. Dit is ook de reden dat – in ieder geval tot voor kort – afgedankte windturbinewieken vaak bij het grofvuil belanden.¹⁰ De laatste jaren zijn er echter steeds meer mogelijkheden om windturbinebladen een tweede-levenstoepassing te geven.

Nieuwe ontwikkelingen richten zich op thermoplastische composieten, of thermohardende composieten die makkelijker zijn te recyclen (Leon, 2023). De komende decennia zal er echter nog voor veel 'oude' windturbinebladen een bestemming moeten worden gevonden. Nieuwe recycletechnologieën vormen waarschijnlijk een deel van de oplossing. Zo is in eigen land TNO bezig met het op hoge temperatuur ontbinden van thermohardende composieten.¹¹ Op deze manier kunnen de bestanddelen van wieken weer opnieuw worden omgesmolten als thermoplastische composieten voor diverse doeleinden. Deze en andere tweede-levenstoepassingen komen aan bod in paragraaf 2.3, nadat de veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing zijn besproken in paragraaf 2.2.

2.1.3. Direct-drive en versnellingsbak

Er zijn twee manieren om stroom te genereren van windenergie. Zo kan de draaiing van de as direct worden omgezet in stroom, en wordt de relatief lage rotorsnelheid (8-20 rotaties per minuut) verhoogd met behulp van magneten. Dit type windturbine heet *direct-drive*. Daarnaast kan de draaiing van de as een versnellingsbak aansturen, die de relatief lage rotorsnelheid (met een zelfde orde grootte van 15-20 rotaties per minuut) omzet tot 1800 rotaties per minuut. Dit type windturbine staat bekend als windturbine met versnellingsbak, en heeft meer schadegevoelige componenten zoals hydraulische accumulatoren.

Beide types windturbine zijn zo ontworpen dat ze worden afgeremd of stil komen te vallen bij extreme wind. Door de grote rotatiesnelheid van windturbines met versnellingsbak is het noodremsysteem hier complexer en opereert op basis van een hydraulisch druksysteem.

2.2. Veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing

Windturbines staan in heel Nederland. Ze staan los, in groepjes van twee tot drie of in complete parken; ze staan op land of op zee. Voor veel van deze samenstellingen bestaan

¹⁰ <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>.

¹¹ <https://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2022/10/tno-innovatie-biedt-afgedankte/> (laatst geraadpleegd op 12 mei 2023).

verschillende veiligheidsmaatregelen, maar de gevaren zijn vergelijkbaar. Het RIVM noemt drie mogelijke gevaren van windturbines: bladbreuk, mastbreuk, en het afvallen van gondel en rotor (RIVM, 2021). Daarnaast kunnen windturbines ijs afwerpen van de wieken, en kan de tandwielkast vlamvatten.¹²

Het afbreken van zowel mast als bladen kan direct gevaar opleveren voor mensen die zich in de omgeving van de turbines bevinden (Instituut Fysieke Veiligheid, 2021). Een ongeval in Flevoland op 4 januari 2023 illustreert hoe dit in zijn werk kan gaan. Tijdens harde wind werkte het remmechanisme niet voldoende, waardoor de rotorbladen niet in de vaanstand terechtkwamen die normaalgesproken de wieken buiten de windrichting positioneert, maar op hol sloegen. Door de hoge rotatiesnelheid brandden de generatoren door, die doorgaans ook een extra remmende werking hebben. Vervolgens brak een windturbineblad af, waarna de windturbine uit balans raakte en de mast volledig knakte (Energieia, 2023). Het afbreken van turbineonderdelen kan ook leiden tot indirecte risico's, wanneer fragmenten vallen op installaties met externe veiligheidsrisico's zoals pijpleidingen of hoogspanningskabels.

Windturbines zijn betrekkelijk vaak betrokken bij ongevallen (Sovacool et al., 2016). Zo hebben Sovacool et al. berekend dat windturbines per opgewekt TWh vaker betrokken zijn bij ongevallen dan technologieën die energie opwekken uit zon of biomassa. Bovendien zijn er bij ongevallen met windturbines ook, weer per opgewekt TWh, meer dodelijke slachtoffers gevallen dan bij ongevallen met technologieën die energie opwekken uit zon of biomassa.¹³ Ook in Nederland zijn er een aantal ernstige ongevallen geweest. Naast het hierboven beschreven incident in Flevoland waarbij geen slachtoffers vielen, waren tien jaar eerder twee monteurs om het leven gekomen bij een brand in een windturbine in Ooltgensplaat (Zuid-Holland). Een recent door het RIVM uitgevoerde studie schat de kans op een ongeluk¹⁴ met een windturbine in Nederland in op eens per jaar voor de circa 2000 windturbines op land (RIVM, 2021).

2.3. Tweede-levenstoepassingen van windturbines

2.3.1. Hergebruik

Een windturbine kan worden ontmanteld om later ergens anders weer opgebouwd te worden. In Nederland is er wel sprake van het ontmantelen van windturbines voor dit doeleinde, maar is er (vooralsnog) geen sprake van het opnieuw opbouwen van eerder gebruikte windturbines in Nederland (Interviews Business in Wind en ECH). Ontmantelde Nederlandse windturbines zijn niet alleen in naburige landen, maar over de hele wereld terug te vinden.¹⁵

¹² <https://nipv.nl/windturbines/>.

¹³ Sovacool et al. tellen wereldwijd 335 ongevallen met windturbines in de periode van 1950 tot 2014, met totaal 126 dodelijke slachtoffers. Dit komt neer op 0,035 dodelijke slachtoffers per TWh geproduceerde energie. Ter vergelijking, dezelfde nummers voor zonne-energie zijn respectievelijk 7, 13, en 0,019, en voor waterkracht respectievelijk 25, 177.665, en 0,0235. Ongevallen met waterkracht zijn doorgaans doorbroken stuwdammen, waar veel slachtoffers mee gemoeid gaan. Zo omvat het totaal getelde aantal dodelijke slachtoffers 171.000 slachtoffers van de doorbraak van de Shimantan Dam in China (1975). Waterkracht heeft in de afgelopen zeven decennia veel meer TWh opgewekt dan andere hernieuwbare bronnen. Dit verklaart waarom het totaal aantal slachtoffers per opgewekte TWh lager uitvalt dan bijvoorbeeld bij windturbines.

¹⁴ Het RIVM heeft hierbij de volgende scenario's meegenomen: bladbreuk, mastbreuk en het afvallen van gondel en rotor.

¹⁵ Met name in West Europese landen als Groot Britannië, Zweden en Italië maar ook in Kazachstan, Alaska en het vulkanische eiland Ascension voor de kust van Afrika (Interview Business in Wind).

Het feit dat er in Nederland nog geen (of weinig) tweede-levens windturbines zijn te vinden, heeft met name economische redenen. Locaties waar nieuwe windturbines kunnen worden gerealiseerd zijn vaak windrijk, en lenen zich beter voor eerste-levens windturbines met een grotere capaciteit. Het installeren van tweede-levens windturbines ligt meer voor de hand op locaties waar er beperkte vraag is aan capaciteit (bijvoorbeeld op een klein eiland), of waar hoogterestricties gelden (en de daarbij horende capaciteitsrestricties).

2.3.2. Herfabricage

Bij herfabricage worden onderdelen van windturbines vervangen. Het gaat om onderdelen die door slijtage of anderszins niet langer veilig zijn, of om vervanging om de efficiëntie en het vermogen te verhogen. Er bestaat reeds een handel in tweedehands windturbineonderdelen (Interview Business in Wind).

2.3.3. Herbestemming

Wanneer windturbineonderdelen niet opnieuw kunnen worden ingezet voor hun oorspronkelijke toepassing, bestaan er ook alternatieven. Herbestemming is met name aan de orde voor windturbinewieken, omdat deze zich niet goed lenen voor recycling. Windturbinewieken zijn bijvoorbeeld toegepast in de openbare ruimte als speelpark of recreatievoorziening (Medici & Dobbelsteen, 2020; Mishnaevsky, 2021).



Figuur 2.2 Onderdelen van een windturbine zijn verwerkt tot een speeltuin in Rotterdam (bron: Archello.com)

2.3.4. Recycling en demontage

Wanneer alle bovenstaande tweede-levenscycli niet interessant zijn, worden materialen gerecycled. Het gros van de materialen in windturbines (beton en staal) komt in bekende recyclingstromen. Deze materialen zijn, na recycling, vaak nog goed te gebruiken (Interview Business in Wind).

2.4. Risico's van tweede-levenstoepassingen

De risico's zoals we die kennen voor windturbines in hun eerste-levenstoepassing gelden ook voor hergebruikte en geherfabriceerde windturbines. Een risico specifiek voor deze twee tweede-levenscycli is het ontbreken van de benodigde documentatie om de leeftijd en het aantal draaiuren van de windturbine (of onderdelen daarvan) te bepalen.

De gevaren van herbestemde (onderdelen van) windturbines zijn tweeledig. Ten eerste kan het niet goed documenteren van de conditie en draaiuren van deze onderdelen ervoor zorgen dat onveilige onderdelen terug worden geplaatst in windturbines, met alle veiligheidsgevolgen van dien. Ten tweede kunnen bepaalde chemische materialen loskomen van de oppervlakte van wieken, en negatieve gezondheidsconsequenties hebben (Medici & Dobbelsteen, 2020). Bovendien kunnen er glasvezels vrijkomen bij het breken of verkleinen van windturbinebladen (Interview Business in Wind). Het moet dus altijd duidelijk zijn welke materialen zijn gebruikt voor de wieken.

2.5. Beperken van risico's van tweede-levenstoepassingen

2.5.1. Preventie

Een breed pakket aan wetten en maatregelen is gericht op het voorkomen van risico's met windturbines. We delen deze hier op in twee categorieën: maatregelen die worden genomen tijdens de eerste-levenstoepassing en maatregelen die worden genomen voor de tweede-levenstoepassingen.

Maatregelen die worden genomen tijdens de eerste-levenstoepassing

Bij de plaatsing van een windturbine in Nederland wordt rekening gehouden met de omgeving. De eisen staan geformuleerd in het Activiteitenbesluit en de Activiteitenregeling. Het *Handboek Risicozonering Windturbines* (HRW) helpt bij het bepalen van de risico-contouren. Het is vervolgens aan het lokaal bevoegd gezag om windturbines zo te plaatsen dat er aan twee risico-contouren wordt voldaan. Binnen de 10-6 contour, waar de kans op overlijden een op een miljoen jaar is, zijn geen kwetsbare gebouwen en locaties toegestaan; binnen de 10-5 contour, waar de kans op overlijden een op de honderdduizend jaar is, zijn geen kwetsbare gebouwen en locaties, noch beperkt kwetsbare gebouwen en locaties toegestaan. Het falen van windturbines kan ook domino-effecten met zich meebrengen. Het kan er bijvoorbeeld toe leiden dat de risicocontour van een nabijgelegen risicobron, zoals een opslag voor gevaarlijke stoffen, toeneemt. De eerder genoemde HRW stelt ook hoe het lokaal bevoegd gezag een afweging moet maken voor het toelaten van windturbines nabij risicobronnen (Rijkswaterstaat, 2020).

De windturbine dient bij ingebruikneming aan Europees geformuleerde eisen te voldoen. De veiligheidseisen zijn opgenomen in de drieledige NEN-EN-IEC 61400-norm. Delen 1, 2, en 3 stellen respectievelijk de ontwerp-eisen voor windturbines, kleine windturbines en offshore windturbines. Deze norm legt onder andere de voorschriften vast voor inspectie en onderhoud, en stelt bijvoorbeeld dat naast een foutenlogboek onder meer de volgende zaken moeten worden bijgehouden: geproduceerde energie, draaiuren, datum en tijdstip van service- of reparatiebeurten, en vervangen onderdelen (NEN-EN-IEC 61400-1). Deze informatie is van belang bij het herbestemmen van een windturbine voor een tweede leven.

Zo kan het aantal draaiuren een beter beeld geven van de resterende veilige levensduur dan de leeftijd van een windturbine.

Naast de bovengenoemde NEN-keuring gelden er additionele eisen voor windturbines met accumulatoren (dus met een versnellingsbak). De Europese richtlijn drukapparatuur (PED 2014/68/EU) is van toepassing op windturbines met categorie 3 en 4 drukvaten. De PED is in Nederland doorgevoerd in regelgeving binnen het Warenwetbesluit drukapparatuur (WBDA), en verplicht tot zowel een ingebruiknemingskeuring als periodieke herkeuringen van de drukapparatuur. Een zevental keuringsinstanties (geaccrediteerd door het ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid) controleert de drukapparatuur, en let onder andere op de handleiding, conditie, plaats van opstelling en beveiliging. Afhankelijk van de product-specificaties kan dit elke 4, of 6 jaar zijn. Dergelijke voorgeschreven (her)keuringen worden echter niet consequent gehouden, en er bestaat weinig toezicht op het keuren van drukapparatuur (interview ECH). Het toezicht valt onder de verantwoordelijkheid van de Nederlandse Arbeidsinspectie (NLA).

Maatregelen die worden genomen voor de tweede-levenstoepassingen

De NEN-EN-IEC 61400-norm verplicht exploitanten van windturbines een continu geüpdatet dossier te hebben met daarin relevante informatie over de veiligheid. Wanneer een windturbine wordt hergebruikt of geherfabriceerd (geüpgraded), geeft het bestaande dossier een inzicht in de resterende levensduur van een volledige windturbine, of van losse onderdelen daarvan. De praktijk laat zien dat deze verplichting echter lang niet altijd consequent wordt nageleefd. Benodigde keuringen worden niet altijd uitgevoerd (Interview ECH), en wanneer ze wel uitgevoerd worden, varieert de kwaliteit (Interview Business in Wind).

Handelaren in windturbines en windturbineonderdelen kunnen ervoor kiezen om een technische inspectie uit te voeren voordat zij een windturbine demonteren. Zo kiest Business in Wind, een grote Nederlandse handelaar in windturbines, voor het inhuren van een onafhankelijk inspectiebedrijf dat de conditie van een windturbine vaststelt op basis van een technische analyse. Een dergelijke inspectie kan bijvoorbeeld de resterende duur van een tweede leven vaststellen, hetzij voor de volledige turbine, hetzij voor specifieke componenten daarvan (Interview Business in Wind).

Er zijn in Nederland tot op heden nog geen tweede-levens windturbines geïnstalleerd (Interview Business in Wind). Bij installatie moeten tweede-levens windturbines aan dezelfde eisen voldoen als die voor eerste-levens windturbines gelden. Dat wil zeggen: de eigenaar moet de documentatie kunnen overleggen die vereist wordt in de oorspronkelijke NEN-norm, alsook de documentatie die volgt uit de keuring voor ingebruikname en de herkeuringen die volgen uit het WBDA wanneer het een turbine betreft met accumulatoren.

2.5.2. Incidentbestrijding

Windturbines of windturbineonderdelen die zich in een tweede-levenstoepassing bevinden, kennen dezelfde risico's als nieuwe windturbines. Risico's die worden versterkt door ouderdom, veel draaiuren of beide, zullen vergelijkbaar zijn voor windturbines die ver in hun eerste-levenstoepassing zijn of die aan het begin van een tweede-levenstoepassing staan. Beide soorten turbines hebben dezelfde toelatings- en keuringscriteria gekend, en zouden over documentatie moeten beschikken die een goed beeld geeft van de betrouwbaarheid en veiligheid van de turbine. In het kader van incidentbestrijding zijn er dus geen nieuwe handelingen nodig die specifiek gericht zijn op tweede-levens-toepassingen.

Incidentbestrijders en handhavers kunnen niet in een oogopslag zien of windturbines voldoen aan de benodigde keuringen. Het keuringsbewijs, wanneer dat er is, ligt bij de eigenaar van de windturbine. Het introduceren van een stickerkeurmerk of een vergelijkbaar medium met relevante informatie over de keuringsgeschiedenis, zou incidentbestrijders van belangrijke informatie kunnen voorzien over de staat van de turbine. Verder zou een stickerkeurmerk fabrikanten kunnen aansporen tot het vaker periodiek keuren van hun windturbines.

2.6. Conclusies

1. Wat zijn relevante kenmerken voor de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

We hebben geconstateerd dat windturbines in Nederland de laatste jaren aan verandering onderhevig zijn. Ze worden groter, de aandrijving wordt steeds efficiënter, en het materiaal waarvan windturbinebladen worden gemaakt, verandert. Hierdoor groeit het vermogen per windturbine, en zien we dat het aantrekkelijk kan zijn om oude windturbines (die vaak opgesteld staan in windrijke locaties) te vervangen door nieuwere varianten.

2. Welke veiligheidsrisico's zien we tijdens de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

We onderscheiden de volgende drie risico's: bladbreuk, mastbreuk en het afvallen van gondel en rotor.

3. Welke tweede-levens-toepassingen zien we binnen Nederland ontstaan?

We zien dat er in Nederland veel windturbines worden ontmanteld. Deze windturbines worden buiten Nederland opnieuw geïnstalleerd (hergebruik), of hun onderdelen worden binnen Nederland gebruikt voor andere toepassingen. Windturbineonderdelen worden bijvoorbeeld verhandeld en gebruikt voor onderhoud van bestaande windturbines (herfabricage), of ze worden gebruikt voor andere doeleinden (herbestemming). Zowel herfabricage als herbestemming gebeurt (nog) niet op grote schaal. Wanneer er geen hoogwaardige tweede-levenstoepassing is, kunnen onder andere de metalen onderdelen (circa 85 % van de turbine) worden gerecycled.

4. Welke veiligheidsrisico's zien of verwachten we binnen de geïdentificeerde tweede-levenstoepassingen?

We verwachten tijdens tweede-levenstoepassingen geen nieuwe veiligheidsrisico's ten opzichte van de risico's bij eerste-levenstoepassingen. Wel schuilt er bij tweede-levenstoepassing het gevaar dat de ouderdom en onderhoudsgeschiedenis van windturbines en hun onderdelen niet volledig worden gedocumenteerd. Onvolledige informatie kan gevolgen hebben voor de betrouwbaarheid van windturbines. Zo kunnen aanvragen voor herbestemde windturbines niet volledig gekeurd worden, en is er geen zicht op de veilige levensduur van windturbines met niet-originele onderdelen.

5. Hoe kunnen de risico's binnen tweede-levenstoepassingen effectief worden beperkt?

Het keuren van (onderdelen van) windturbines is van groot belang. Dit geldt voor het periodiek keuren van windturbines in zowel eerste- als tweede-levenstoepassingen, alsook het keuren bij ingebruikname van herbestemde windturbines. Het resultaat van deze keuringen is een dossier met daarin de onderhoudsgeschiedenis van de turbine. Deze informatie is van belang bij het bepalen van een geschikte en veilige tweede-levenstoepassing.

3. Zonnepanelen

3.1. Relevante kenmerken van de eerste-levenstoepassing

Een zonnepaneel is een paneel dat doorgaans is gemaakt van silicium, en dat zonlicht omzet in elektriciteit.¹⁶ Het silicium bevat elektronen die in beweging raken wanneer ze in aanraking komen met zonne-energie. Deze beweging resulteert in elektrische stroom die we kennen als zonnestroom. Samen met een omvormer, connectoren en kabels refereren we aan zonnepanelen als een 'photo voltaic'- of PV-systeem.

Het volume van afgedankte zonnepanelen zal naar verwachting toenemen.¹⁷ Dit brengt kansen voor waardecreatie door recycling of hergebruik met zich mee. Zonnepanelen bevatten namelijk waardevolle grondstoffen en componenten: silicium, metalen als zilver en koper, zeldzame metalen zoals gallium en indium, maar ook glas en kunststoffen (Chowdhury et al., 2020), (Irena & Iea-pvps, 2016).

3.2. Veiligheidsrisico's tijdens de eerste-levenstoepassing

Brand is het grootste veiligheidsrisico bij zonnepanelen. De belangrijkste factoren die het risico op brand van zonnepanelen verhogen zijn:

1. **Ontwerpfouten:** Ontwerpfouten zoals onvoldoende isolatie, onjuiste elektrische bedrading of onvoldoende ventilatie, kunnen leiden tot oververhitting en brandrisico (Goodman, 2022), (Anker, 2023).
2. **Milieufactoren:** Extreme hitte, hagelstormen, blikseminslagen of nabijgelegen branden kunnen het risico op brand bij zonnepanelen verhogen (Anker, 2023), (Okorieimoh et al., 2020). Verder kunnen door extreme wind panelen loswaaien, wat losse kabels en een risico op brand door kortsluiting tot gevolg heeft.
3. **Installatieproblemen:** Foutieve installatie van zonnepanelen kan leiden tot kortsluitingenomgekeerde stromen en aardingsfouten die brand kunnen veroorzaken (Lu et al., 2018), (Mutuli, 2024), (Camarota, 2016). De *Kennisbundel zonnepanelen* geeft een aantal voorbeelden van foutieve installatie van zonnepanelen, die op hun beurt kunnen leiden tot brand of problemen bij de bestrijding daarvan (Instituut Fysieke Veiligheid, 2021):
 - > *connectoren die niet op elkaar aansluiten*
 - > *onvoldoende afstand tussen zonnepanelen*
 - > *onvoldoende afstand tussen de zonnepanelen en het dak*
 - > *onvoldoende afstand tussen de zonnepanelen en de dakrand.*
 - > *geen rekening houden met de bereikbaarheid van zonnepanelen en met de draagkracht van het dak.*

¹⁶ <https://nipv.nl/onderwerp/zonnepanelen/>.

¹⁷ <https://www.stichting-open.org/2021/12/03/stichting-open-voorsorteren-op-de-verwerking-van-steeeds-meer-zonnepanelen/>.

4. **Schade aan modules:** Beschadiging van de zonnemodules, zoals microscheurtjes of delaminatie van de achterkant van de module, kan leiden tot hotspots in een cel die vervolgens brand kunnen veroorzaken. Schade aan modules kan worden veroorzaakt door onjuiste behandeling tijdens het transport (GSES, 2022).

Het risico op brand beperkt zich niet tot branden die ontstaan in of rondom zonnepanelen. Zonnepanelen kunnen namelijk ook risico verhogend werken bij woningbranden die elders ontstaan. Zonnepanelen blijven namelijk als het licht is elektriciteit genereren tijdens een brand. Dit kan het risico op elektrische schokken verhogen en de toegang tot bepaalde delen van een gebouw belemmeren. Bij een brand van zonnepanelen kunnen er gevaarlijke stoffen en kleine deeltjes vrijkomen. Deze kunnen bestaan uit giftige chemicaliën zoals zware metalen (bijvoorbeeld lood en cadmium), die de lucht, bodem en waterbronnen kunnen vervuilen, alsook uit kleine scherpe siliciumdeeltjes (depositie). Deze vrijgekomen stoffen kunnen negatieve gevolgen hebben voor het milieu en de volksgezondheid (Instituut Fysieke Veiligheid, 2021).

3.3. Tweede-levenstoepassingen van zonnepanelen

Het tweede leven van zonnepanelen verwijst naar hun potentieel voor hergebruik, herfabricage, herbestemming en recycling (Curtis et al., 2021). Naast gegevens afkomstig uit de literatuur staat informatie verkregen uit een interview met een vertegenwoordiger van de stichting OPEN centraal (Interview Stichting Open). De stichting OPEN is verantwoordelijk voor het afvoeren van zonnepanelen die hun eerste-levenstoepassing hebben voltooid.

3.3.1. Hergebruik

Ondanks verminderde efficiëntie (Muteri et al., 2020) kunnen oudere zonnepanelen vaak nog steeds worden gebruikt voor minder veeleisende energieopwekking. Dit kan bijvoorbeeld gaan om hergebruik voor de basisenergiebehoefte op afgelegen locaties, zoals in schuilhutten of kleine off-grid systemen (Irena & Iea-pvps, 2016). Bovendien kunnen zonnepanelen worden gedoneerd aan non-profitorganisaties die de panelen installeren in ontwikkelingslanden.

3.3.2. Herfabricage

Bij oude zonnepanelen kunnen sommige individuele zonnecellen beschadigd zijn. In principe kunnen deze cellen vervangen worden door onbeschadigde zonnecellen. Ook het frame en het glas kunnen beschadigd zijn en kunnen in dat geval vervangen worden. De stichting OPEN heeft aangegeven aan herfabricage echter niet als reële optie te zien, aangezien dit erg arbeidsintensief is. Particuliere kopers krijgen te maken met veel extra kosten boven op de aanschaf van de panelen, bijvoorbeeld voor de installatie of de aanschaf van een omvormer. Omdat de huidige zonnepanelen vaak een twee keer zo hoog rendement hebben als die van tien jaar geleden, loont het niet voor particulieren om oude zonnepanelen aan te schaffen. Zonnepanelen afkomstig van zonneparken zouden nog wel enige tweedehandse waarde hebben, maar ook hier zijn de eerder genoemde nadelen vaak groter dan de voordelen. Vaak verdwijnen die panelen naar het buitenland (Interview Stichting Open; Rosmuller, 2024).

3.3.3. Herbestemming

Zonnepanelen kunnen ook een volledig nieuwe toepassing krijgen als een tweede-levensbestemming. Zo kunnen ze worden gebruikt als zonnewering of dakpannen. Zonnepanelen aan het einde van hun eerste-levenstoepassing kunnen ook worden omgevormd tot kunstwerken, of gebruikt worden in andere creatieve constructies. Tot slot kunnen ze ook worden gebruikt voor onderwijsdoeleinden. Scholen of universiteiten kunnen panelen gebruiken voor praktijklessen over hernieuwbare energie of ze gebruiken voor onderzoek naar nieuwe fotovoltaïsche celtechnologieën

3.3.4. Recycling

Wanneer er geen hoogwaardige tweede-levenstoepassingen mogelijk zijn, rest recycling. Veel onderdelen van zonnepanelen kunnen worden gerecycled, zoals glas, metaal en sommige halfgeleiders. Er zijn gespecialiseerde bedrijven die zonnepanelen ontmantelen en de herbruikbare materialen terugwinnen. Denk aan glas, aluminium frames en siliciumcellen (Pavlopoulos et al., 2023). Deze materialen kunnen worden hergebruikt in nieuwe producten (Irena & Iea-pvps, 2016). In Nederland zijn bedrijven zoals First Solar en Veolia gespecialiseerd in het recyclen van zonnepanelen, waarbij ze tot 90 % van de materialen herwinnen.

De vier tweede-levenstoepassingen kunnen allemaal helpen om de levenstoepassing van zonnepanelen te verlengen en hun impact op het milieu te minimaliseren. Verder wordt onderzocht of zonnepanelen op zo'n manier gemaakt kunnen worden dat hun recyclebaarheid toeneemt. Hierbij gaat het om een optimale materiaalkeuze, opstelling en constructiemethoden (Cali et al., 2022). Een modulaire benadering van het ontwerp van zonnepanelen maakt gemakkelijke toegang tot individuele componenten mogelijk, wat reparaties en upgrades vergemakkelijkt. Bovendien kan het recyclen van zonnepanelen aan het einde van hun levensduur natuurlijke hulpbronnen en productiekosten besparen. Volgens het International Renewable Energy Agency zal de cumulatieve waarde van terugwinbare grondstoffen uit afgedankte panelen wereldwijd rond 2030 ongeveer \$ 450 miljoen bedragen (EPA (United States Environmental Protection Agency), 2024b).

3.4. Risico's van tweede-levenstoepassingen

Brandgevaar blijft ook in de tweede-levenstoepassing het belangrijkste risico. Zonnepanelen kunnen ouderdomsverschijnselen vertonen zoals gebarsten cellen en verbindingssfalen waardoor het risico op brand toeneemt (Chowdhury et al., 2020), (Wu et al., 2020), (Rahman et al., 2023). Bij herfabricage van zonnepanelen bestaat bovendien het risico dat niet alle beschadigde delen worden vervangen. Dit zou ertoe kunnen leiden dat een zonnepaneel in een tweede-levenstoepassing minder veilig is dan wordt verondersteld. Wanneer zonnepanelen bij herbestemming uit elkaar worden gehaald, moet er rekening mee worden gehouden dat er giftige stoffen zoals lood en cadmium vrij kunnen komen (Chowdhury et al., 2020).

3.5. Beperken van risico's van tweede-levenstoepassingen

Tijdens dit onderzoek hebben we geen additionele maatregelen geïdentificeerd die kunnen bijdragen aan het beter bestrijden van incidenten met zonnepanelen in hun tweede-

levenstoepassing. We beperken ons hier dus tot incidentpreventie, en maken een onderscheid tussen het testen van zonnepanelen voor hun tweede-levenstoepassing (3.5.1.) en wetgeving op het gebied van tweede-levenstoepassingen (3.5.2.).

3.5.1. Preventief: testen van zonnepanelen na hun eerste-levenstoepassing

Er bestaan verschillende soorten tests voor het toetsen van de kwaliteit van zonnepanelen na hun eerste-levenstoepassing. We kennen onder andere de efficiency- of rendementstest en de flashtest (Interview Stichting Open):

1. Efficiencytest
Deze test kan de energieopbrengst van de zonnepanelen analyseren, en zien of het rendement van het betreffende paneel nog steeds voldoende is voor hergebruik.
2. Flashtest
Deze test onderzoekt of er microcracks in de zonnepanelen zitten. Door microcracks zal het paneel lokaal warmer kunnen worden, wat brandgevaar met zich meebrengt. Microcracks kunnen in de loop van de tijd ontstaan door bijvoorbeeld een hagelbui.

Op dit moment is het voor zowel bedrijven als particulieren mogelijk om zonnepanelen onderhands te verkopen aan anderen (bijvoorbeeld via Marktplaats). Er is geen zicht op de mate waarin deze transacties gepaard gaan met controletests. Ditzelfde geldt voor bedrijven die oude panelen opkopen en weer gebruiksklaar maken. Door een mogelijk lagere kwaliteit van die panelen, vormen ze dus een groter brandgevaar dan nieuwe zonnepanelen. Stichting OPEN heeft aangegeven voorstander te zijn van een kwaliteitskeurmerk voor bedrijven die refurbishment van zonnepanelen doen (Interview Stichting Open). Een dergelijk keurmerk zou de consument in staat stellen om met meer zekerheid nog goed functionerende zonnepalen aan te schaffen die zich aan het einde van hun eerste-levenstoepassing bevinden.

3.5.2. Preventief: vigerende wet- en regelgeving

Wet- en regelgeving buiten Nederland

Enkele belangrijke algemene (internationale) richtlijnen zijn:

Europese Unie (EU)

- > De EU-richtlijn voor afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA) reguleert de inzameling en recycling van elektronische apparaten, inclusief zonnepanelen (EUR-LEX, 2012).
- > Fabrikanten zijn verplicht om de recycling van hun producten te financieren.

Verenigde Staten

- > Er is geen federale wetgeving specifiek gericht op de recycling van zonnepanelen, maar sommige staten (zoals Californië) hebben specifieke voorschriften ontwikkeld. Zo worden zonnepanelen in Californië gezien als gevaarlijke stoffen, tenzij ze een specifieke screening hebben ondergaan. Zolang de panelen worden gezien als gevaarlijke stoffen, mogen ze niet via reguliere afvalstromen worden verwerkt.
- > De Environmental Protection Agency (EPA) reguleert de afvoer van gevaarlijke afvalstoffen, wat relevant kan zijn voor sommige soorten zonnepanelen (EPA (United States Environmental Protection Agency), 2024a), (EPA (United States Environmental Protection Agency), 2024b).

Andere landen

- > Japan en Zuid-Korea hebben specifieke regelgeving voor de recycling van zonnepanelen. Hierbij ligt de focus vooral op het niet laten vrijkomen van schadelijke stoffen uit afgedankte panelen.
- > In Australië en Canada is de regelgeving voor recycling van zonnepanelen nog in ontwikkeling.

Producentenverantwoordelijkheid

- > Veel landen hanteren het principe van uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (EPR), waarbij producenten van zonnepanelen verantwoordelijk zijn voor de inzameling en recycling aan het einde van de levensduur.

Lokale voorschriften

- > Naast nationale wetten kunnen er ook lokale of regionale voorschriften zijn, die van invloed zijn op de afvoer van zonnepanelen.

Wet- en regelgeving in Nederland

In Nederland valt de afvoer en recycling van zonnepanelen onder verschillende wet- en regelgevingen.

Regeling Afgedankte Elektrische en Elektronische Apparatuur (AEEA)

- > Zonnepanelen worden beschouwd als elektronische apparatuur en vallen daarmee onder de Europese WEEE-richtlijn (Waste of Electrical and Electronic Equipment), die in Nederland is geïmplementeerd (EUR-LEX, 2012).
- > De WEEE-richtlijn vereist dat fabrikanten en importeurs van elektronische apparatuur, waaronder zonnepanelen, verantwoordelijk zijn voor de inzameling en recycling van hun producten aan het einde van de levensduur.

Uitgebreide Producentenverantwoordelijkheid (UPV)

- > In het kader van de UPV zijn producenten verplicht om systemen op te zetten voor de inzameling en recycling van afgedankte zonnepanelen (Dimitropoulos et al., 2021).
- > De kosten voor de recycling worden vaak doorberekend aan de consument bij de aankoop van nieuwe panelen.

Regelgeving omtrent Afvalstoffen

- > Zonnepanelen kunnen bepaalde materialen bevatten die als gevaarlijk afval worden beschouwd, zoals lood of cadmium. De afvoer van dergelijk afval is strikt gereguleerd.

Lokale overheden en afvalverwerking

- > Particulieren kunnen vaak gebruikmaken van gemeentelijke milieustraten voor de afvoer van kleine aantallen afgedankte zonnepanelen.

Certificering en normen

- > Er zijn certificeringsprogramma's en normen die de kwaliteit en veiligheid van het recyclingproces van zonnepanelen waarborgen. Deze normen gelden alleen vanaf het moment dat de panelen een afvalstatus hebben gekregen. Ze gelden dus niet voor hergebruik, herfabricage, en herbestemming.

Lidmaatschap Stichting OPEN

- > In Nederland is het vanaf 1 maart 2021 verplicht voor alle producenten en importeurs van zonnepanelen om lid te worden van de Stichting OPEN. Deze stichting is

verantwoordelijk voor de inzameling en recycling van zonnepanelen en alle bijbehorende activiteiten.

- > De Stichting Zonne-energie Recycling Nederland (ZRN) vertegenwoordigt de belangen van producenten en importeurs binnen de Stichting OPEN.
- > De kosten voor recycling worden doorberekend via een recyclingbijdrage die importeurs van zonnepanelen moeten betalen.

NEN-normen

De relevante NEN-normen voor de inzameling en recycling van zonnepanelen zijn:

- > *WEEELABEX/CENELEC-normen*: Deze normen zijn belangrijk voor het creëren van een gelijk speelveld voor de verwerking van e-waste in Europa, inclusief zonnepanelen. Ze stellen hoge eisen aan de milieuveilige verwerking van afgedankte elektronische apparaten en zonnepanelen (WEEELABEX, 2024).
- > *NEN-EN 50625-2-4:2017*: Deze norm is getiteld 'Inzameling, logistiek en verwerkingseisen voor WEEE – Deel 2-4: Verwerkingseisen voor zonnepanelen' (Inzameling, Logistiek En Verwerkingseisen Voor WEEE - Deel 2-4: Verwerkingseisen Voor Zonnepanelen, 2017).
- > *NVN-CLC/TS 50625-3-5:2017*: Deze technische specificatie heet 'Inzameling, logistiek en verwerkingseisen voor WEEE - Deel 3-5: Specificatie voor het verwijderen van afvalstoffen – Zonnepanelen' en is specifiek gericht op zonnepanelen binnen de CENELEC - EN 50625-serie voor de verwerking van e-waste in het algemeen (Inzameling, Logistiek En Verwerkingseisen Voor WEEE - Deel 3-5: Specificatie Voor Het Verwijderen van Afvalstoffen - Zonnepanelen, 2017).

Deze normen zijn essentieel voor het waarborgen van een verantwoorde, veilige en milieuvriendelijke inzameling en recycling van zonnepanelen.

3.6. Conclusies

1. Wat zijn relevante kenmerken voor de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

Een zonnepaneel zet (zon)licht om in elektriciteit. De panelen zijn doorgaans gemaakt van silicium, en zijn ondertussen wijdverspreid in Nederland. De gemiddelde leeftijd van deze zonnepanelen groeit, en door de snelle technologische ontwikkelingen krijgen moderne zonnepanelen steeds meer capaciteit. Beide factoren maken dat het aantal zonnepanelen dat aan het einde van hun eerste-levenstoepassing komt snel toeneemt.

2. Welke veiligheidsrisico's zien we tijdens de eerste-levenstoepassing van deze technologie?

Brand is het grootste risico bij zonnepanelen. Belangrijke oorzaken voor brand zijn ontwerpfouten, installatieproblemen, milieufactoren en schade aan modules. Behalve het risico op brand in of rondom zonnepanelen, kunnen zonnepanelen ook het blussen van bijvoorbeeld een woningbrand belemmeren.

3. Welke tweede-levens-toepassingen zien we binnen Nederland ontstaan?

Binnen Nederland zien we weinig tweede-levenstoepassingen voor zonnepanelen. Vanwege de snelle technologische ontwikkelingen is het voor consumenten vaak voor de hand

liggender om nieuwe panelen aan te schaffen met een hoger rendement. Daarom worden zonnepanelen binnen Nederland weinig hergebruikt, herbestemd, of geherfabriceerd. Wanneer er sprake is van hergebruik, gaat dit vaak over de export van zonnepanelen naar het buitenland. Wanneer er geen hoogwaardige tweede-levenstoepassingen bestaan, worden de zonnepanelen gerecycled.

4. Welke veiligheidsrisico's zien of verwachten we binnen de geïdentificeerde tweede-levenstoepassingen?

Brandgevaar blijft het belangrijkste risico voor zonnepanelen in hun tweede-levenstoepassing. Zonnepanelen in hun tweede-levenstoepassing hebben een grotere kans een incident te veroorzaken dan zonnepanelen in hun eerste-levenstoepassing. Zo kunnen ze ouderdomsverschijnselen vertonen zoals gebarsten cellen of verbindingssfalen. Bovendien kunnen bij herbestemming of recycling van zonnepanelen mogelijk gevaarlijke stoffen vrijkomen.

5. Hoe kunnen de risico's binnen tweede-levenstoepassingen effectief worden beperkt?

De risicoreducerende maatregelen die we hebben geïdentificeerd in dit rapport beperken zich tot preventieve maatregelen. Het testen van zonnepanelen na hun eerste-levenstoepassing geldt als een belangrijke preventieve maatregel: het geeft namelijk meer vertrouwen in de kwaliteit en de conditie van de panelen aan het begin van de tweede-levenstoepassing. Een kwaliteitskeurmerk voor partijen die zonnepanelen aan het einde van de eerste-levenstoepassing verwerken zou een testregime verplicht kunnen stellen. Dit zou op zijn beurt het risico op de herintroductie van foutieve en dus gevaarlijke zonnepanelen verminderen.

4. Conclusie

Het blijkt dat er sprake is van weinig hergebruik bij zowel batterijen als windturbines en zonnepanelen. Door de snelheid van technologische ontwikkelingen kunnen technologieën die aan het einde van hun oorspronkelijke levensduur zijn zich qua efficiëntie niet meten aan de hedendaagse equivalenten. Daarom rest slechts een 'downgrade', zoals wanneer auto- of scooterbatterijen worden gebruikt als thuisbatterij of onderdelen van windturbines als bouw materiaal.

Herfabricage, of reparatie van de onderzochte technologieën gebeurt tot op zekere hoogte. Door strengere Europese wetgeving zien we dit bijvoorbeeld bij autobatterijen meer gebeuren. Voor windturbines ontstaat er een (internationale) markt waar handel wordt gedreven in onderdelen voor zowel reparatie als 'upgrade' van windturbines. Ook zonnepanelen kunnen worden gerepareerd. Toch geldt ook hier, net als voor hergebruik, dat het vaak efficiënter is om over te schakelen op de aanschaf van een nieuw exemplaar.

De onderzochte technologieën worden volop herbestemd. Met name bij batterijen gebeurt dit binnenlands. Windturbines en zonnepanelen worden ook geëxporteerd, en kennen vaker een tweede leven in het buitenland. Wanneer geen van de bovenstaande opties aan de orde is, worden materialen gerecycled. Bij alle drie behandelde technologieën wordt dit proces steeds meer gestroomlijnd, en is het ondertussen ook vaak verplicht door verschillende wet- en regelgeving.

Binnen de drie bestudeerde technologieën zien we veiligheidsrisico's voor tweede-levenstoepassingen die vergelijkbaar zijn met degene die we kennen bij de eerste-levenstoepassingen mits de benodigde risicobeperkende maatregelen worden genomen. De effecten van risico's bij tweede-levenstoepassingen van deze technologieën zijn gelijk aan veiligheidsrisico's die we ook tegenkomen tijdens een lange eerste-levenstoepassing. Gemiddeld genomen zal er echter een groter kans op incidenten bestaan bij technologieën in hun tweede-levenstoepassing.

In dit onderzoek observeren we een aantal mogelijkheden om veiligheidsrisico's bij tweede-levensenergietransitietechnologieën te beperken. We doen tevens een aantal observaties wat betreft bestaande richtlijnen en de navolging hiervan.

- > Het opnieuw in de markt brengen van energietransitie-technologieën na hun eerste-levenstoepassing biedt een waardevolle mogelijkheid om de kwaliteit van een product te testen. Certificatie kan een instrument zijn om deze kwaliteitscontrole kenbaar te maken.
- > Producentenverantwoordelijkheid neemt een belangrijke rol in bij het beperken van risico's bij tweede-levenstoepassingen. Bij hergebruik blijft de fabrikant namelijk vaak (deels) verantwoordelijk voor de veiligheid van het product. Bij herbestemming wordt de producentenverantwoordelijkheid overgedragen op nieuwe producent. Deze nieuwe verantwoordelijkheid gaat idealiter gepaard met een kwaliteitstest.
- > Het gebruik van kwaliteitstesten bij de overgang van eerste- naar tweede-levenstoepassing komt niet altijd overeen met de bestaande wetgeving. Zo blijkt uit onze analyse

dat oude batterijen uit fietsen en scooters soms uitvoerig worden getest door gespecialiseerde bedrijven voordat zij een nieuwe toepassing krijgen – terwijl hier geen officiële richtlijnen voor bestaan; bestaande richtlijnen voor het keuren en periodiek herkeuren van windturbines worden – ook bij herinstallatie en herbestemming – niet consequent uitgevoerd.

- > Er is geen toezicht op het hergebruik van energietransitietechnologieën door particulieren. Met name bij batterijen en zonnepanelen kan dit zorgen voor ongewenste situaties. De installatie en het onderhoud van beide vergt technische kennis, en batterijen in het bijzonder kunnen bij een onbekende gebruikersgeschiedenis of nalatig onderhoud grote veiligheidsrisico's met zich meebrengen.

Literatuur

- Akerboom, S., & Scholten, D. (2014). Legal restrictions and solutions for local solar pv markets in the Netherlands. *7th Conference on Competition and Regulation in Network Industries*.
- Anker. (2023, July 31). *Solar Panel Fires: How Common They Are & How to Prevent Them*. <https://www.anker.com/blogs/solar/solar-panel-fires>
- Attia, P. M., Bills, A., Planella, F. B., Dechent, P., Reis, G., Dubarry, M., Gasper, P., & Gilchrist, R. (2022). Review—"Knees" in Lithium-Ion Battery Aging Trajectories Review. *Journal of the Electrochemical Society*, 169. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6d13>
- Auto Recycling Nederland. (2022). *Recycling EV batteries: the 5 biggest opportunities and challenges*. IARC 2022.
- Cali, M., Hajji, B., Nitto, G., & Acri, A. (2022). The Design Value for Recycling End-of-Life Photovoltaic Panels. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/app12189092>
- Camarota, J. (2016, June 3). *Investigating Fires in Solar Photovoltaic Systems*. <https://www.firehouse.com/community-risk/article/12216062/fire-investigation-solar-photovoltaic-system-investigation-techniques>
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., Tiong, S. K., Sopian, K., & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
- Curtis, T., Heath, G., Walker, A., Desai, J., Settle, E., & Barbosa, C. (2021). *Best Practices at the End of the Photovoltaic System Performance Period*. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78678.pdf>
- Dimitropoulos, A., Tijm, J., & In 't Veld, D. (2021). *Extended producer responsibility: Design, functioning and effects*. www.cpb.nl/en.
- Energieia. (2023). *Een onderhoudsfout in combinatie met harde wind oorzaak afbreken windturbine Flevoland*.
- Energy5. (2023, November 7). *The Impact of Solar Panel Fires on the Environment*. <https://energy5.com/the-impact-of-solar-panel-fires-on-the-environment>
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2024a). *End-of-Life Solar Panels: Regulations and Management*. <https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management>
- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2024b). *Solar Panel Recycling*. <https://www.epa.gov/hw/solar-panel-recycling>
- EUR-LEX. (2012). *Richtlijn 2012/19/EU van het Europees Parlement en de Raad van 4 juli 2012 betreffende afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA) Voor de EER relevante tekst*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32012L0019>

- European Commission. (2022). *Green Deal: EU agrees new law on more sustainable and circular batteries to support EU's energy transition and competitive industry* (Issue December 2022).
- Goodman, J. (2022, May 5). *Solar panel fires: How common are they, how you can prevent them*. <https://www.kiro7.com/news/trending/solar-panel-fires-how-common-are-they-how-you-can-prevent-them/MJBGZKC2QRE2JDWIS4LXP44KOY/>
- GSES. (2022, May 26). *What Causes Solar PV Fires and How to Prevent Them*. <https://www.gses.com.au/what-causes-solar-pv-fires-and-how-to-prevent-them/>
- Instituut Fysieke Veiligheid. (2021). *Kennisbundel Windturbines*.
- Inzameling, Logistiek En Verwerkingseisen Voor WEEE - Deel 2-4: Verwerkingseisen Voor Zonnepanelen, Pub. L. No. NEN-EN 50625-2-4 (2017).
- Inzameling, Logistiek En Verwerkingseisen Voor WEEE - Deel 3-5: Specificatie Voor Het Verwijderen van Afvalstoffen - Zonnepanelen, Pub. L. No. NVN-CLC/TS 50625-3-5 (2017).
- Irena, & Iea-pvps. (2016). *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. www.irena.org
- Leon, M. J. (2023). Recycling of wind turbine blades: Recent developments. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 39, 100746. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100746>
- Lu, S., Phung, B. T., & Zhang, D. (2018). A comprehensive review on DC arc faults and their diagnosis methods in photovoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 89, pp. 88–98). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.010>
- Martinez-laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-zabala, E., Badedo, J., & Stroe, D. (2018). Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(June), 701–718. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035>
- Medici, P., & Dobbelsteen, A. Van Den. (2020). Safety and Health Concerns for the Users of a Playground , Built with Reused Rotor Blades from a Dismantled Wind Turbine. *Sustainability*, 12(3626), 1–25.
- Mishnaevsky, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, 14(5), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ma14051124>
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, 10(11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. In *Energies*, 13(1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13010252>
- Mutuli, I. (2024, February 4). *Can Solar Panels Cause Fires? Guide To Solar Systems Fire Safety*. <https://www.archute.com/can-solar-panels-cause-fires/>
- NEN. (2016). *NPR 8400: Principes en technische handleiding voor Voortgezet bedrijf van windturbines op het land* (Vol. 8400).
- NEN-EN-IEC 62619 (2022).
- NIPV. (2023). *Brand in opslag van Li-ion accu's*. Scenarioboek. <https://scenarioboeken.nipv.nl/brand-in-opslag-van-li-ion-accus/>
- Office for Product Safety & Standards. (2023). *A Study on the Safety of Second-life Batteries in Battery Energy Storage Systems* (Issue January).
- Okorieimoh, C. C., Norton, B., & Conlon, M. (2020). Long-Term Durability of Solar Photovoltaic Modules. In *Sustainable Ecological Engineering Design* (pp. 317–325). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44381-8_24

- Pavlopoulos, C., Christoula, A., Patsidis, A. C., Semitekolos, D., Papadopoulou, K., Psarras, G. C., Zoumpoulakis, L., & Lyberatos, G. (2023). Epoxy-Silicon Composite Materials from End-of-Life Photovoltaic Panels. *Waste and Biomass Valorization*, *14*(10), 3391–3400. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02135-2>
- Rahman, T., Mansur, A. Al, Hossain Lipu, M. S., Rahman, M. S., Ashique, R. H., Houran, M. A., Elavarasan, R. M., & Hossain, E. (2023). Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management. In *Energies*, *16*(9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16093706>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2017, June 23). *Wetgeving zonne-energie*. <https://www.rvo.nl/Onderwerpen/Zonne-Energie/Wetgeving>
- Rijkswaterstaat. (2020). *Handreiking Risicozonering Windturbines (HRW2020)*.
- RVO. (2021). *Actualisatie Faalfrequenties Windturbines*.
- Sovacool, B. K., Andersen, R., Sorensen, S., Sorensen, K., Tienda, V., Vainorius, A., Schirach, O. M., & Bjørn-Thygesen, F. (2016). Balancing safety with sustainability: Assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 3952–3965. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.059>
- Staatscourant. (2020). *Circulaire risicobeheersing lithium-ion energiedragers* (Issue 34193).
- WEEELABEX. (2024). *WEEELABEX ORGANISATION*. <https://www.weelabex.org>
- Wu, Z., Hu, Y., Wen, J. X., Zhou, F., & Ye, X. (2020). A Review for Solar Panel Fire Accident Prevention in Large-Scale PV Applications. In *IEEE Access* (Vol. 8, pp. 132466–132480). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010212>

Bijlage 1 Lijst met gevoerde gesprekken

Datum	Organisatie	Functierol
13-04-2023	StoredEnergy	Mede-eigenaar
06-06-2023	Auto Recycling Nederland (2 personen)	Manager en accountmanager
25-10-2023	Energie Consult Holland	Directeur
8-11-2023	Business-in-Wind	Directeur
22-01-2024	Stichting Open	Strategy Advisor