

Battery Competence Cluster - NL

Nationale Actieagenda Batterijsystemen

BOUWEN OP KRACHT,
FOCUS OP VERSNELLING

SEPTEMBER 2026

Colofon

Deze Nationale Actieagenda Batterijsystemen is opgezet door het Battery Competence Cluster – NL in nauwe samenwerking met vertegenwoordigers van de Nederlandse overheid, in het bijzonder de Ministeries van Infrastructuur en Waterstaat en Economische Zaken en Klimaat, alsmede kennisinstellingen, belangenorganisaties en bedrijfsleven.

Deelnemende organisaties:

- ACE Mobility
- Alfen
- Aquabattery
- ARN
- Back to Battery
- BOM
- Brainport Development
- DAF Trucks
- Damen Shipyards
- Elestor
- Elysian Aircraft Company
- E-magy
- ESNL
- Exergy Storage
- HysterYale
- Inner
- Invest International
- Invest-NL
- LeydenJar
- LionVolt Nobian
- Noorderpoort
- NXP
- OOST NL
- Ore Energy
- RAI Vereniging
- RWE
- Rijksuniversiteit Groningen
- RVO
- Stichting OPEN
- TNO
- TU Delft
- TU Eindhoven
- University of Twente
- VDL
- WMC Group
- Zhero Systems

Inhoudsopgave

01 Inleiding 06

1.1 Aanleiding 07
1.2 Doelstellingen en opzet van de vernieuwde Actieagenda 08
1.3 Ontwikkelingen sinds de Actieagenda uit 2022 10
1.4 Right to Play voor Nederland 15

02 Gezamenlijke koers voor versnelling 16

03 Strategische focusthema's Nederlandse batterij industrie 23

3.1 Heavy Duty & Dual-Use toepassingen 25
3.2 Stationaire toepassingen 32
3.3 (Next Generation) Componenten en Materialen 42
3.4 Productieapparatuur 46
3.5 Circulaire waardeketen: levensduurverlenging, herbestemming en recycling 51

04 Strategische overkoepelende thema's 58

4.1 Faciliteiten 59
4.2 Data, Veiligheid en Validatie 60
4.3 Digitaal Batterijpaspoort 61
4.4 Batterijcel productiebedrijf 63
4.5 Menselijk kapitaal 66
4.6 Business Intelligence 70
4.7 Europese & Internationale samenwerking 70

Bijlage 01 Batterijcel- en batterijsysteem technologie 73
Bijlage 02 Afkortingen en termen 80
Bijlage 03 Projecten en programma's 83
Bijlage 04 Lijst met verwijzingen 94

Managementsamenvatting

Sinds de eerste Actieagenda Batterijsystemen uit 2022 is het Nederlandse batterij-ecosysteem duidelijk volwassener geworden. Nieuwe bedrijven zijn toegetreden, publiek-private investeringen zijn gegroeid, pilot- en demonstratiefaciliteiten zijn ontwikkeld. Nederlandse organisaties hebben hun positie in Europese en mondiale waardeketens versterkt. Tegelijkertijd is het strategische belang van batterijen verbreed. Naast hun rol in de klimaat- en energietransitie zijn batterijen essentieel geworden voor industrieel concurrentievermogen, economische veerkracht, energiezekerheid en strategische autonomie.

De opgave is daarom niet langer om een positie in de batterijmarkt te verwerven, maar om bestaande sterktes sneller te vertalen naar industriële en economische impact. Deze vernieuwde Nationale Actieagenda Batterijsystemen markeert de overgang van een oproep tot actie naar een oproep tot versnelling. Centraal staan innovatie, industrialisatie, opschaling en toepassing van Nederlandse batterij-innovaties.

Nederland kiest daarbij niet voor deelname aan alle schakels van de mondiale waardeketen, maar voor focus op gebieden waar het een onderscheidend ‘right to play’ heeft. De Nederlandse kracht ligt in de combinatie van expertise in geavanceerde materialen, productietechnologie, systeemintegratie, circulariteit en toepassingsontwikkeling, gekoppeld aan een sterke industriële basis in zwaar transport, energiesystemen en hightech maakindustrie. Niet specifieke schaalgrootte, maar de samenhang tussen deze capaciteiten vormt de basis voor internationaal concurrerende posities.

Om deze versnelling te realiseren, richt de Actieagenda zich op zeven samenhangende actielijnen. Deze vormen gezamenlijk de route van onderzoek en innovatie naar industriële productie, markttoepassing en internationale verankering. Zij bestrijken de gehele innovatieketen en combineren technologische ontwikkeling met de randvoorwaarden die nodig zijn om Nederlandse batterijinnovaties sneller te vertalen naar maatschappelijke en economische impact.

Deze Nationale Actieagenda Batterijsystemen biedt zo een gezamenlijk kompas voor overheid, industrie en kennisinstellingen om Nederlandse batterijinnovaties sneller te vertalen naar industriële, economische en maatschappelijke impact. Daarmee maakt zij het Nederlandse batterij-ecosysteem richting 2030 en daarna concurrerender, veerkrachtiger en duurzamer.

1. Versnel markttoegang en toepassing van innovatieve batterijtechnologie door validatie, demonstratie, launching customers en regelgeving.

2. Bouw een route van innovatie naar industriële productie door batterijmaterialen, productietechnologie, productieapparatuur en flexibele batterijproductie gezamenlijk op te schalen richting industriële toepassing.

3. Ontwikkel de digitale systeemlaag met batterijmanagement, data-infrastructuren, interoperabiliteit, validatie en certificering als basis voor veilige en efficiënte batterijsystemen.

4. Ontwikkel een hoogwaardige circulaire batterijketen waarin levensduurverlenging, reparatie, remanufacturing, herbestemming en hoogwaardige materiaalterugwinning centraal staan.

5. Versterk de gedeelde infrastructuur en financiering met nationale test-, pilot- en productievoorzieningen, Business Intelligence en financieringsinstrumenten die opschaling en marktintroductie ondersteunen.

6. Versterk talent en uitvoeringscapaciteit door batterijcompetenties structureel te verankeren in onderwijs, praktijkleren en een toekomstbestendige arbeidsmarkt.

7. Veranker Nederland in Europese waardeketens door internationale samenwerking, strategische partnerschappen, gerichte investeringen en actieve deelname aan Europese innovatie- en industrialisatieprogramma’s. Succesvolle uitvoering vraagt om een meerjarige publiek-private uitvoeringsstructuur met duidelijke governance, gezamenlijke prioriteiten en continue monitoring van de voortgang richting maatschappelijke en economische impact.

STRATEGISCHE FOCUSTHEMA’S

Heavy Duty & Dual-Use toepassingen

Een sterke logistieke sector, toonaangevende OEM’s en gespecialiseerde toeleveranciers geven Nederland een sterke positie in de elektrificatie van en batterijsystemen voor Heavy Duty (wegtransport, scheepvaart, luchtvaart en off-highway).

Stationaire toepassingen

Opwekking van duurzame energie, ruime ervaring met netcongestie-oplossingen en sterke systeemintegratie geven Nederland een onderscheidende positie in de ontwikkeling en toepassing van kort- en langdurige stationaire energieopslag.

(Next-gen) Componenten en Materialen

De ruime ervaring met innovatie van materialen en productietechnologie geeft Nederland een sterke uitgangspositie in de ontwikkeling van next-gen batterijmaterialen, celcomponenten en de bijbehorende productietechnologie.

Productie-apparatuur

Haar internationaal concurrerende hightech maakindustrie biedt Nederland een sterke uitgangspositie voor batterijproductie-apparatuur en industrialisatie.

Circulaire waardeketen: levensduurverlenging, herbestemming en recycling

Als Europese koploper in circulair materiaalgebruik, combineert Nederland een gunstige geografische positie met expertise in diagnostiek, levensduurverlenging, hoogwaardige recycling en materiaalterugwinning voor een goede uitgangspositie voor batterijcirculariteit.

01

Inleiding

1.1 Aanleiding

Batterijen zijn onmisbaar voor de energietransitie. Zij maken het mogelijk om duurzaam opgewekte elektriciteit op te slaan, pieken en dalen in het energiesysteem op te vangen en mobiliteit, industrie en infrastructuur verder te elektrificeren. Daarmee zijn batterijen niet alleen een technologische sleutel voor verduurzaming, maar ook een belangrijke economische en strategische factor.

In 2022 verscheen de eerste Actieagenda Batterijsystemen[1]. Deze had als doel het samenbrengen van het batterij-ecosysteem om de Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen sterker te kunnen positioneren in de Europese en internationale batterijwaardeketen. Hiervoor zijn ambitieuze moonshots geformuleerd als wenkend perspectief voor Nederlands succes. De eerste Actieagenda heeft geleid tot het nationaal groeifondsprogramma ‘Material Independence & Circular Batteries’ waarmee substantieel in de Nederlandse waardeketen wordt geïnvesteerd. Tevens is het Battery Competence Cluster NL (BCC-NL) opgericht, welke dient als platform en facilitator van het Nederlandse ecosysteem.

In 2025 is een evaluatie uitgevoerd van de Actieagenda uit 2022[2]. Hieruit blijkt dat mede door de Actieagenda en de Batterijenstrategie van de Nederlandse overheid er een sterk fundament is gelegd[3]. Niet alle moonshots worden tijdig gerealiseerd, maar Nederland pakt positie in de internationale batterij waardeketen. De evaluatie laat zien dat het noodzakelijk is om de komende jaren in te zetten op versnelling. In deze nieuwe Actieagenda kijken we vooruit naar 2035; waar willen we dan staan en wat willen daarvoor in 2030 hebben bereikt.

De context waarin we opereren verandert snel. Batterijtechnologie ontwikkelt zich in hoog tempo, de mondiale vraag groeit sterk en geopolitieke spanningen maken duidelijk hoe kwetsbaar Europa is door zijn afhankelijkheid van niet-Europese leveranciers van grondstoffen, batterijcellen en componenten.

Die afhankelijkheid raakt inmiddels niet alleen klimaatdoelen, maar ook het Europese concurrentievermogen, de energiezekerheid en de strategische autonomie. Het Draghi-rapport[4] benadrukt het belang van sterkere Europese waardeketens, een interne markt voor recycling en passende financieringsinstrumenten voor de grondstoffenketen. De Industrial Accelerator Act[5] zet in op versnelling van Europese productiecapaciteit, vraagcreatie, kortere procedures en versterking van ‘Made in Europe’-waardeketens. In Nederland onderstreept het Wennink rapport[6] eveneens dat batterijtechnologie een belangrijke bijdrage kan leveren aan het toekomstige verdienvermogen.

Nederland beschikt over een goede uitgangspositie. Bedrijven en kennisinstellingen werken aan innovatieve batterijmaterialen, celtechnologie, batterijsystemen, productieprocessen, datasystemen en circulariteit. Daarnaast kent Nederland een sterke maakindustrie in zwaar wegtransport, bussen, maritieme toepassingen, luchtvaart en hightech productie. Die combinatie van technologische kennis, industriële toepassingen en systeemintegratie biedt kansen om een betekenisvolle bijdrage te leveren aan een innovatieve en duurzame Europese batterijwaardeketen. Door de vroege adoptie van elektrische voertuigen en e-bikes ontstaat bovendien relatief vroeg een markt voor hergebruik, reparatie, recycling en raffinage.

1.2 Doelstellingen en opzet van de vernieuwde Actieagenda

Deze vernieuwde Actieagenda is opgesteld door BCC-NL in nauwe samenwerking met stakeholders uit de sector, het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het doel hiervan was om de ontwikkeling van het Nederlandse batterij-ecosysteem sinds 2022 in kaart te brengen, belangrijke trends en ontwikkelingen te identificeren en de sterktes en uitdagingen van het ecosysteem te evalueren; dit in het licht van veranderende geopolitieke omstandigheden en opkomende strategische afhankelijkheden op Nederlands, Europees en mondiaal niveau. Stakeholders uit de sector zijn gedurende het hele proces intensief betrokken geweest.

De nieuwe versie van de Actieagenda heeft als doel de ontwikkeling van een sterk, innovatief en weerbaar Nederlands batterij-ecosysteem te versnellen. Voortbouwend op de basis die met de eerste Actieagenda is gelegd, verschuift de focus van een “call to action” naar een “call to acceleration”, gericht op het sneller realiseren van kansen richting 2030 en 2035.

De strategische doelstellingen kunnen als volgt worden samengevat:

- Versterken van het Nederlandse batterij-ecosysteem, de economische concurrentiekracht en het verdienvermogen
- Versterken van de weerbaarheid, strategische autonomie en leveringszekerheid
- Versnellen van duurzaamheid en circulariteit in de batterijwaardeketen, in lijn met de doelstellingen van het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) en met de beschikbaarheid van batterijen uit de mobiliteits- en energietransitie.

Door nauwe samenwerking tussen bedrijfsleven, kennisinstellingen en overheid wil Nederland concurrerende posities opbouwen in hoogwaardige segmenten van de batterijwaardeketen, met name op terreinen waar de Nederlandse industrie reeds over sterke competenties beschikt.

Tegelijkertijd zijn er duidelijke knelpunten:

- innovatieve materialen en technologieën vinden nog onvoldoende aansluiting op grootschalige celproductie;
- heavy-duty producenten staan onder sterke internationale prijs- en concurrentiedruk;
- door toenemende netcongestie is de uitrol van de transitie op grote schaal lastig;
- voor langdurige energieopslag ontbreken nog stabiele verdienmodellen;
- procedures, vergunningen en regelgeving vertragen pilots en commercialisering;
- er is een tekort aan elektrochemici, batterij-engineers en productiespecialisten;
- recyclingbedrijven moeten een periode overbruggen waarin nog onvoldoende afgedankte batterijen beschikbaar zijn.

De kern van de opgave is daarmee helder: Nederland heeft kennis, bedrijven, toepassingen en een groeiende infrastructuur, maar moet sneller de stap maken van innovatie naar industrialisatie en markttoepassing.

Een samenvatting van deze Actieagenda, waarin de belangrijkste prioriteiten, acties en implementatieroutes worden samengebracht, is opgenomen in hoofdstuk 2.

De strategie om deze uitdagingen aan te pakken en de gestelde doelstellingen te realiseren, wordt uitgewerkt in hoofdstuk 3, dat is opgebouwd rond de volgende focusthema’s:

- Heavy-duty- en dual-use-toepassingen;
- Stationaire toepassingen;
- Next-generation componenten en materialen;
- Productieapparatuur;
- De circulaire waardeketen, inclusief levensduurverlenging, herbestemming en recycling.

Elk focusgebied wordt geanalyseerd vanuit de perspectieven markt, technologie en circulariteit. Voor ieder domein worden de benodigde randvoorwaarden en acties geïdentificeerd om de strategische doelstellingen te realiseren. Randvoorwaarden beschrijven de externe factoren en omgevingscondities die noodzakelijk zijn voor succes, terwijl acties de maatregelen definiëren die nodig zijn om de beoogde resultaten te bereiken. De acties in deze agenda vormen de gezamenlijke publiek-private richting voor versnelling. De resultaten worden vertaald naar een reeks moonshots, die de ambitie voor 2030–2035 beschrijven.

Om de in de focusgebieden geïdentificeerde marktbehoeften te adresseren en de geformuleerde moonshots te realiseren, zijn verschillende factoren nodig die deze ontwikkeling mogelijk maken. Deze omvatten onder meer faciliteiten, human capital, internationale samenwerking, datastandaarden en datamanagement (waaronder het Digitaal Batterijpaspoort) en business intelligence. Deze overkoepelende factoren worden beschreven in hoofdstuk 4.

Gezamenlijk vormen deze hoofdstukken een strategisch kompas voor het versterken van het Nederlandse batterij-ecosysteem, het vergroten van de bijdrage aan de Europese strategische autonomie en het creëren van duurzame economische en maatschappelijke waarde.

1.3 Ontwikkelingen sinds de Actieagenda uit 2022

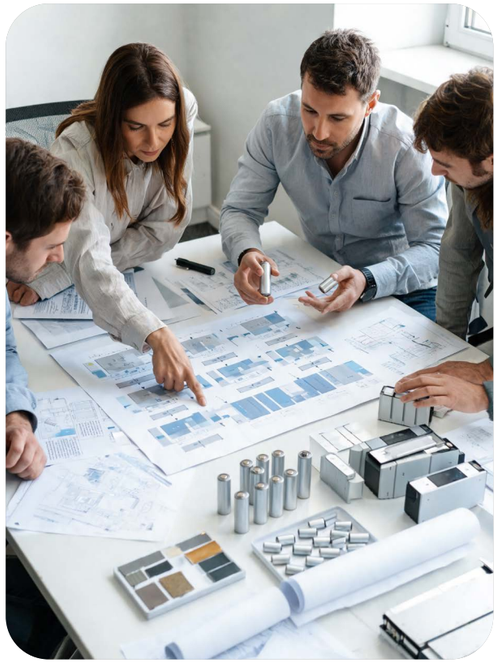
Wereldwijde ontwikkelingen in de batterijmarkt

De wereldwijde batterijmarkt ontwikkelt zich tot een strategische waardeketen voor mobiliteit, energie-infrastructuur en industriële weerbaarheid. De wereldwijde vraag naar batterijen wordt geraamd op ruim 1 TWh in 2024 en zal naar verwachting groeien naar circa 8–9 TWh in 2040, een toename met ongeveer een factor zes[7]. Tegelijkertijd zal de wereldwijde marktwaarde van batterijen en batterijsystemen naar verwachting stijgen van ongeveer EUR 200 miljard in 2024 tot circa EUR 450 miljard in 2030[8].

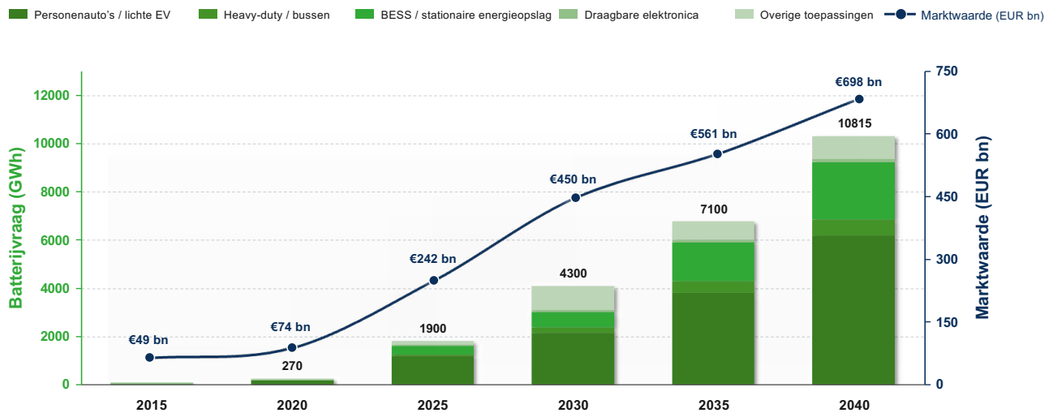
De groei wordt gedreven door de elektrificatie van voertuigen, de uitrol van batterij-energieopslagsystemen voor hernieuwbare elektriciteit en netflexibiliteit, en de toenemende behoefte aan een betrouwbare batterijvoorziening voor defensie, industrie en kritieke infrastructuur.

Ontwikkelingen in de nationale strategie

Gezien het belang van batterijen voor ons energie- en mobiliteitsysteem is in 2020 de Nederlandse overheid gestart met een interdepartementale strategische aanpak op batterijen[3]. Inmiddels zijn batterijen direct verbonden met Nederlandse industriepolitieke prioriteiten, de Nationale Technologiestrategie (NTS)[9], de Defensiestrategie voor Industrie en Innovatie 2025–2029[10], het Wennink-rapport[6], en het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE)[11].



Wereldwijde vraag naar batterijen & marktwaarde - 2015-2040



Figuur 1 De mondiale marktwaarde van batterijpacks wordt per toepassing en per jaar berekend als de batterijvraag × de gemiddelde toepassingsspecifieke packprijs (EUR/kWh). De vraag is gebaseerd op referentiewaarden uit en geëxtrapoleerd aan de hand van JRC, Clean Energy Technology Observatory: Batteries for Energy Storage in the European Union – 2025, Battery Monitor 2025 en IEA, Global EV Outlook 2026.[4]

Daardoor wordt batterijtechnologie steeds nadrukkelijker gezien als een sleuteltechnologie voor economisch verdienvermogen, strategische autonomie, defensie en veiligheid. Voor Nederland liggen er kansen voor energieopslag, innovatieve chemie, machinebouw en circulaire grondstoffenketens.

Deze sterkere beleidsmatige verankering vergroot de urgentie om deze Actieagenda niet uitsluitend te zien als een sectorspecifieke agenda, maar als een publiek-private versnellingsagenda die aansluit bij nationale prioriteiten op het gebied van economische groei, veiligheid en duurzaamheid.

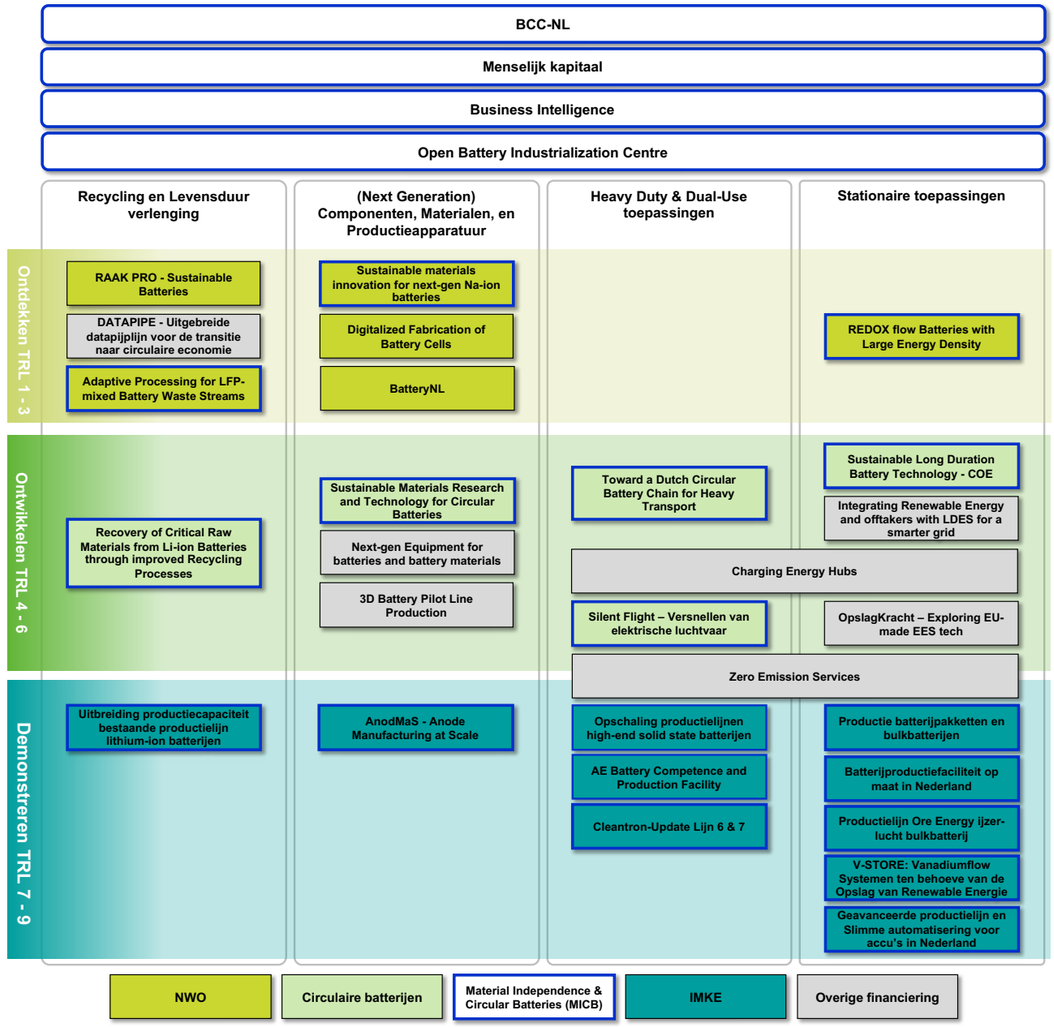
Ontwikkeling van het Nederlandse batterij-ecosysteem door publieke en private investeringsprogramma's

Twee initiatieven zijn van bijzonder belang geweest voor de ontwikkeling van het Nederlandse batterij-ecosysteem: het Nationaal Groeifondsprogramma (NGF) Materials Independence & Circular Batteries (MICB)[12] en stichting Battery Competence Cluster NL (BCC-NL). Beiden vinden hun oorsprong in de ambities die zijn geformuleerd in de eerste Actieagenda uit 2022.

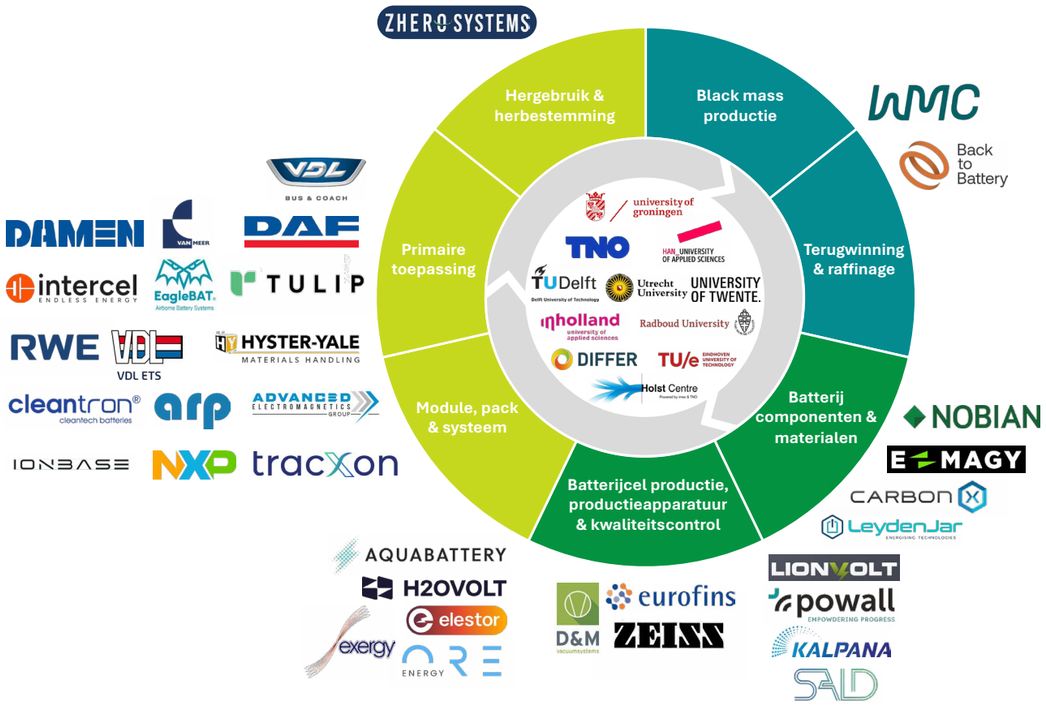
BCC-NL fungeert als het platform voor het Nederlandse batterij-ecosysteem. Het brengt partijen binnen het ecosysteem samen, versterkt de onderlinge samenwerking en vervult de rol van coördinerende organisatie voor het NGF-programma.
Naast MICB investeert de Nederlandse overheid ook in het batterij-ecosysteem via diverse andere Nationaal Groeifondsprogramma's, waaronder NXTGEN Hightech, Zero-Emission Inland Shipping en Charging Energy Hubs.

Figuur 2 geeft een overzicht van de belangrijkste programma's en projecten die bijdragen aan de ontwikkeling van het Nederlandse batterij-ecosysteem, inclusief hun beoogde voortgang langs de verschillende Technology Readiness Levels (TRL's). Projecten die deel uitmaken van het MICB-programma zijn gemarkeerd met blauwe randen. In lijn met de ambities van de eerste Actieagenda is een omvangrijke portefeuille van projecten in de TRL 1–6-fase gestart. De voortgang en resultaten van deze projecten hebben als input gediend voor de acties en prioriteiten die zijn opgenomen in deze vernieuwde Actieagenda.

Daarnaast vormen deze projecten de basis voor vervolgactiviteiten op hogere volwassenheidsniveaus (TRL 7–9) en ondersteunen zij daarmee de demonstratie, industrialisatie en commercialisering van Nederlandse batterijinnovaties. Verdere informatie over de doelstellingen, reikwijdte en looptijd van deze initiatieven, evenals over initiatieven die de energietransitie ondersteunen, is opgenomen in Bijlage 3.



Figuur 2 Overzicht van de belangrijkste Nederlandse programma's en projecten binnen het batterij-ecosysteem, inclusief hun ontwikkeling langs de verschillende Technology Readiness Levels (TRL's)



Figuur 3 De positie van de partners binnen het MICB-programma in de batterijwaardeketen

Meer dan 450 bedrijven in Nederland zijn actief in de batterijwaardeketen

Figuur 3 toont de partners die tot nu toe via het MICB-programma zijn samengebracht en laat zien welke positie zij innemen binnen de waardeketen. Verwacht wordt dat deze samenwerking verder zal groeien door de acties die in deze Actieagenda worden voorgesteld.

1.4 Right to Play voor Nederland

Nederland heeft een sterke positie opgebouwd in de batterij- en batterijsystemensector. In lijn met de eerste Actieagenda heeft Nederland er bewust voor gekozen zich te richten op hoogwaardige componenten en specifieke marktsegmenten, in plaats van op grootschalige batterijcelproductie. Hierdoor kunnen Nederlandse bedrijven kansen benutten die voor grotere marktpartijen vaak minder aantrekkelijk zijn.

Hoewel het ecosysteem nog relatief jong en beperkt van omvang is, groeit het snel. Het omvat toonaangevende bedrijven op het gebied van next-generation batterijmaterialen en -componenten, zoals LeydenJar, E-magy, LionVolt en CarbonX, evenals belangrijke spelers in stationaire energieopslag en Long Duration Energy Storage (LDES), waaronder Alfen, ORE Energy, AquaBattery, H_2Ovolt, Exergy Storage en Elestor. Ook nemen bedrijven op het gebied van levenstuurverlenging en recycling van batterijen deel, zoals Zhero Systems, Nowos, Back to Battery en WMC.

Nederland beschikt daarnaast over een sterke kennis- en innovatie-infrastructuur. Universiteiten, TNO, Holst Centre, DIFFER, test- en validatieorganisaties en de in Figuur 2 weergegeven programma's verbinden fundamenteel onderzoek met pilotfaciliteiten, testinfrastructuur, demonstratieprojecten en industrialisatieactiviteiten. Recente investeringen in productie- en opschalingsinfrastructuur helpen kritieke hiaten in de waardeketen te overbruggen en de commercialisering van batterijinnovaties te versnellen. Voorbeelden hiervan zijn de demonstratiefabriek van LeydenJar (70 MWh/jaar), pre-pilotlijnen voor batterijcelproductie bij Holst Centre en binnenkort de Universiteit Twente, het Open Battery Industrialisation Centre (OBIC), assemblagelijnen voor heavy-duty batterijpacks bij VDL en ELEO en batterijrecyclingfaciliteiten,

Nederlandse OEM's en batterijsysteemleveranciers in heavy-duty transport, maritieme toepassingen, drones, luchtvaart en dual-use markten fungeren als launching customers en medeontwikkelaars van geavanceerde batterijsystemen en vormen daarmee een sterke verbinding tussen innovatie en marktintroductie. Voorbeelden van deze bedrijven zijn VDL, DAF, Hyster-Yale, Intercel, Damen Shipyards, Tulip Tech, Deltaquad, Milrem, Elysian Aircraft en Eaglebat.

Samengevat heeft Nederland een sterke uitgangspositie in de batterijmarkt, dankzij zijn kennisbasis, innovatieve bedrijven, toepassingsdomeinen en groeiende infrastructuur. De kern van de uitdaging is echter duidelijk: Nederland moet de overgang van innovatie naar industrialisatie en grootschalige markttoepassing verder versnellen.

02

Gezamenlijke koers voor versnelling

2. Gezamenlijke koers voor versnelling

De Nationale Actieagenda Batterijsystemen heeft als doel de ontwikkeling van een sterk, innovatief en weerbaar Nederlands batterij-ecosysteem te versnellen. Een belangrijke opgave hierin is: Nederlandse batterijinnovaties sneller omzetten in toepasbare technologie, industriële capaciteit en economische waarde. Nederland kiest daarbij niet voor grootschalige productie van standaardbatterijen, maar voor onderdelen van de waardeketen waarin kennis, maatwerk, flexibiliteit en systeemcompetenties doorslaggevend zijn.

Die keuze vraagt om meer samenhang tussen de verschillende strategische markten en actielijnen. De acties in deze agenda vormen de gezamenlijke publiek-private richting voor versnelling. De concrete uitwerking van uitvoering, verantwoordelijkheden, fasering en benodigde middelen volgt via het nog te ontwikkelen Actieprogramma en de daarvoor geldende besluitvormingsprocessen. Randvoorwaarden voor het ene thema kunnen voortkomen uit acties binnen een ander thema, terwijl opschaling alleen mogelijk is wanneer technologieontwikkeling, infrastructuur, financiering, marktontwikkeling en menselijk kapitaal in samenhang worden ontwikkeld. De onderstaande zeven actielijnen geven gezamenlijk invulling aan deze integrale aanpak.



1. Versnel markttoegang en toepassing

De eerste prioriteit is het versnellen van de markttoegang en toepassing van Nederlandse batterijtechnologieën. De batterijmarkt is sterk klantgedreven: innovaties worden pas succesvol wanneer zij aansluiten op concrete toepassingsbehoeften, door eindgebruikers worden gevalideerd en commercieel worden ingepast. Hiervoor wordt, naast internationale afnemers, gekeken naar markten waarin Nederland beschikt over sterke eindgebruikers, systeemintegratoren en industriële kennis, zoals Heavy Duty (zwaar transport, binnenvaart en maritieme sector, luchtvaart en drones), stationaire energieopslag, energiehubs en gespecialiseerde industriële toepassingen.

Om deze marktvragen te vertalen naar commerciële toepassingen, moeten innovaties sneller kunnen doorgroeien van validatie en demonstratie naar een eerste commerciële opdracht en bredere marktintroductie. Dat vraagt om launching customer-programma's, risicodeling, passende financieringsinstrumenten en inkoop- en aanbestedingsmodellen. Deze dienen niet alleen te sturen op de aanschafprijs, maar ook op de totale maatschappelijke en economische waarde gedurende de volledige levensduur, waaronder inzetbaarheid, restwaarde en de bijdrage aan het energie- of transportsysteem.

Per strategisch focusthema verschilt de belangrijkste opgave voor markttoegang en toepassing. Bij Heavy Duty ligt de nadruk op het verlagen van de Total Cost of Ownership (TCO) en het investeringsrisico, zodat batterij-elektrische aandrijving de voorkeursinvestering wordt in relevante toepassingen. Voor stationaire energieopslag ligt de uitdaging in de toepassing van geïntegreerde opslagoplossingen, ondersteund door nationale uitroldoelstellingen en passende markt- en tariefkaders. Voor next-generation batterijcomponenten en materialen gaat het om validering van de batterijcellen, kwalificatie en acceptatie door OEM's en batterijproducenten. Voor productieapparatuur ligt de nadruk op validatie in industriële productieomgevingen en adoptie door batterijproducenten, zodat flexibele en duurzame productietechnologie van Nederlandse bedrijven onderdeel wordt van nieuwe productielijnen.

Voor recycling en levensduurverlenging gaat het om voldoende vraag naar reparatie, remanufacturing, second-life toepassingen en hoogwaardige gerecyclede batterijmaterialen, in combinatie met toegang tot feedstock en afzetmarkten voor teruggewonnen materialen.

Voor luchtvaart, LDES en andere opkomende toepassingen zijn meerjarige demonstratie-, kwalificatie- en certificeringstrajecten nodig om markttoegang te versnellen. De overheid kan deze ontwikkelingen versnellen door publieke, semipublieke en private organisaties als launching customers/ eerste opdrachtgevers te laten optreden. Daarbij kan Defensie, waar relevant, optreden als eerste gebruiker van dual-use batterijtechnologieën, zodat innovaties sneller kunnen doorstromen naar bredere civiele markten. Daarnaast kunnen vanuit de overheid de vergunningverleningen, nettarieven, certificeringsroutes en aanbestedingskaders beter worden afgestemd op de marktintroductie van innovatieve batterijtechnologieën. Hiermee winnen we sterk aan momentum.

Beoogd resultaat in 2030: Nederlandse batterijoplossingen zijn in meerdere prioritaire markten aantoonbaar toegepast en vormen de basis voor verdere Europese uitrol.

2. Bouw een route van innovatie naar industriële productie

Om Nederlandse batterijinnovaties succesvol naar de markt te brengen, moeten zij kunnen doorgroeien van onderzoek en ontwikkeling naar betrouwbare, schaalbare en concurrerende industriële productie. Een van de grootste uitdagingen voor Nederland ligt daarbij in de overgang van laboratorium- en pilotniveau naar industriële toepassing en commerciële opschaling.

Daarom is een herkenbare route van innovatie naar industriële productie nodig, een route die innovaties begeleidt van fundamenteel onderzoek via validatie en demonstratie naar industriële productie en integratie in Europese en mondiale waardeketens.

Deze route moet aansluiten op de verschillende typen innovaties binnen de Nederlandse batterijsector, die elk een eigen opschalingspad kennen. Voor next-generation batterijcomponenten en materialen vraagt dit om de ontwikkeling van materialen die niet alleen voldoen aan de prestatie-eisen van doeltoepassingen, zoals zoals energiedichtheid, levensduur en andere toepassingsspecifieke prestaties, maar die ook reproduceerbaar en kosteneffectief op industriële schaal kunnen worden geproduceerd. Dit vereist de parallelle opschaling van zowel batterijcomponenten als de productieapparatuur die nodig is om deze op industriële schaal te vervaardigen. Voor batterijproductie ligt de nadruk op flexibele high-mix, low-volume productie, applicatiegericht cel- en systeemontwerp en industriële kwalificatie. Deze wordt ondersteund door geavanceerde productietechnologieën die hogere productiviteit, een lager energieverbruik en lagere kosten van de productie mogelijk maken. Voor recyclingtechnologieën gaat het om de opschaling van hoogwaardige processen voor levensduurverlenging en materiaalterugwinning, zodat deze op industriële schaal kunnen worden toegepast.

Beoogd resultaat in 2030: meerdere Nederlandse batterijinnovaties zijn opgeschaald tot industriële productie en opgenomen in Europese of mondiale waardeketens.

3. Ontwikkel een digitale en veilige systeemlaag

Steeds meer van de economische waarde van batterijen wordt bepaald door de intelligente systemen eromheen. Battery Management Systems (BMS), Energy Management Systems (EMS), Virtual Power Plants (VPP), digital twins en levenscyclusanalyse bepalen in toenemende mate de veiligheid, prestaties, levensduur en economische waarde van batterijen gedurende hun volledige levenscyclus. Nederland beschikt over sterke competenties op het gebied van software, systeemintegratie, halfgeleiders, cybersecurity en energiemarkten, die gezamenlijk de basis vormen voor deze digitale systeemlaag.

Om deze waarde te benutten zijn interoperabele architecturen, standaarden en data-uitwisseling nodig. Batterijdata moet veilig en betrouwbaar beschikbaar zijn voor batterijmanagement, onderhoud, garantie, restwaardebepaling, toezicht, hergebruik en recycling. Het digitale batterijpaspoort vormt hiervoor een belangrijke bouwsteen, maar creëert pas waarde wanneer gegevens daadwerkelijk kunnen worden gedeeld en benut door bedrijven, overheden en andere ketenpartners.

Een intelligente systeemlaag vraagt daarnaast om een geïntegreerde aanpak van veiligheid, testen, validatie en certificering. Door testmethoden, veiligheidsprotocollen en digitale simulatiegebaseerde verificatie en validatie verder te harmoniseren, kunnen ontwikkel- en certificeringstrajecten worden versneld en wordt de betrouwbaarheid van nieuwe batterijtechnologieën vergroot.

Beoogd resultaat in 2030: Nederland is Europees herkenbaar als specialist in batterijmanagement, datagedreven systeemintegratie, veiligheid, validatie en certificering.

4. Ontwikkel een hoogwaardige circulaire batterijketen

Circulariteit vraagt om een integrale benadering van de volledige levenscyclus van batterijen. De grootste waarde wordt behouden wanneer batterijen vanaf het initiële ontwerp geschikt zijn voor onderhoud, reparatie, hergebruik, remanufacturing en uiteindelijk hoogwaardige materiaalterugwinning.

De eerste prioriteit ligt bij levensduurverlenging in de oorspronkelijke toepassing. Reparatie en remanufacturing behouden voor de batterij een hogere economische waarde dan vroegtijdige herbestemming of recycling. Second-life toepassingen zijn alleen wenselijk wanneer zij veilig, aantoonbaar duurzaam en economisch verantwoord zijn.

Daarnaast moet Nederland zich voorbereiden op de sterk groeiende stroom end-of-life batterijen na 2030. Dit vraagt om betrouwbare prognoses van beschikbare feedstock, geautomatiseerde ontlading en demontage en de verdere opschaling van hoogwaardige materiaalterugwinning.

Een kans voor Nederland ligt in energie- en grondstofefficiënte processen voor hoogwaardige terugwinning van lithium, grafiet en andere kritieke materialen. Deze moeten worden geïntegreerd met Europese raffinage- en materiaalwaardeketens zodat teruggewonnen grondstoffen opnieuw beschikbaar komen voor batterijproductie.

Beoogd resultaat in 2030: Nederland beschikt over een hoogwaardige circulaire batterijketen waarin levensduurverlenging, second-life toepassingen en hoogwaardige materiaalterugwinning zijn geïntegreerd, ondersteund door duidelijke standaarden voor veiligheid, kwaliteit en data.

5. Versterk de gedeelde infrastructuur en financiering

Veel batterijbedrijven beschikken niet over de schaal om zelfstandig te investeren in de volledige infrastructuur die nodig is voor ontwikkeling, validatie, opschaling en marktintroductie. Gedeelde voorzieningen vormen daarom een essentiële randvoorwaarde voor een concurrerend Nederlands batterij-ecosysteem.
De nationale infrastructuur moet bestaan uit:

- open R&D- en pilotlijnen;
- flexibele productievoorzieningen;
- test- en certificeringscapaciteit;
- demonstratielocaties voor mobiliteit, stationaire opslag en LDES;
- digitale sandboxes voor BMS, EMS, VPP en batterijpaspoorten;
- faciliteiten voor diagnostiek, reparatie en recycling;
- praktijkomgevingen voor opleiding en training.

Een belangrijke ontbrekende schakel is een flexibele celassemblagefaciliteit ter grootte van circa 1 GWh per jaar. Deze is niet bedoeld voor generieke massaproductie, maar voor hoogwaardige toepassingen zoals defensie, luchtvaart, drones en zwaar transport over land. Tegelijkertijd kan deze dienen als demonstratieomgeving voor Nederlandse batterijmaterialen, productietechnologie en productieapparatuur. Samen met bestaande voorzieningen, zoals het Open Battery Industrialisation Centre (OBIC), Holst Centre, Battery Test Centre-faciliteiten van TNO en de batterijtest- en onderzoeksfaciliteiten van onder meer de Universiteit Twente en andere regionale kennis- en innovatiecentra, kan deze celassemblagefaciliteit uitgroeien tot de ontbrekende schakel in de nationale batterijcelproductie infrastructuur. Bestaande faciliteiten moeten daarbij beter toegankelijk, meer zichtbaar en ook onderling verbonden worden.

Voor grootschalige demonstratie en toepassing zijn daarnaast randvoorwaarden nodig zoals voldoende energie-infrastructuur, netcapaciteit en laadinfrastructuur, zodat batterijtechnologie in de praktijk zonder infrastructurele beperkingen kan worden ontwikkeld, getest en ingezet.

Naast fysieke infrastructuur is ook een gedeelde Business Intelligence-capaciteit nodig; een gezamenlijke batterijkennisbasis met tot de bron-traceerbare data, gedeelde taxonomieën en periodieke intelligence-updates. Deze ondersteunt technologiebeoordeling, monitoring van de batterijwaardeketen, strategische foresight en onderbouwde investerings-, innovatie- en beleidsbeslissingen. Hiermee kunnen vervolgens publieke en private partijen ontbrekende schakels beter identificeren, investeringen gerichter prioriteren en de ontwikkeling van het batterij-ecosysteem gezamenlijk richting geven.

Ook de financiering moet de volledige innovatieketen ondersteunen, van onderzoek en ontwikkeling tot marktintroductie. Nederland beschikt over een sterke kennisbasis die continu nieuwe batterijinnovaties voortbrengt. Om deze innovaties daadwerkelijk tot economische waarde te laten leiden, moet de route naar validatie, demonstratie, eerste industriële toepassing en commerciële opschaling aanzienlijk worden versterkt, terwijl juist in deze fasen momenteel de grootste financieringskloof bestaat. Tegelijkertijd blijven investeringen in onderzoek en ontwikkeling essentieel om de innovatiepijplijn voor de langere termijn te blijven voeden. Hiervoor is een combinatie nodig van subsidies, leningen, garanties, publiek-private fondsen, tenders en launching customer constructies.

Nieuwe investeringen en publieke ondersteuning moeten worden gericht op ontbrekende schakels die aantoonbaar bijdragen aan technologische kwaliteit, marktpotentie, Europese opschaling en duurzame economische verankering in Nederland.

Beoogd resultaat in 2030: Nederland beschikt over een samenhangende nationale batterij-infrastructuur en financieringsketen waarmee bedrijven efficiënt kunnen doorgroeien van ontwikkeling via validatie en demonstratie naar industriële productie en marktintroductie.

6. Versterk talent en uitvoeringscapaciteit

Technologische ambities kunnen alleen worden gerealiseerd wanneer voldoende mensen beschikbaar zijn om batterijtechnologie te ontwikkelen, te produceren, te testen, te integreren, te onderhouden en veilig te verwerken. De grootste behoefte ligt daarbij niet zozeer bij onderzoekers, maar vooral bij de middenlaag van de industrialisatie, waaronder operators, batterijtechnici, proces- en kwaliteitsengineers, systeemintegratoren, onderhoudsspecialisten en veiligheidsdeskundigen.

Daarom moeten batterijcompetenties zoveel mogelijk worden geïntegreerd in bestaande technische opleidingen en leven lang ontwikkelen-programma's (LLO), ondersteund door bestaande Europese competentiekaders en flexibele leertrajecten zoals microcredentials. Nieuwe en bestaande batterijfaciliteiten kunnen daarbij fungeren als praktijkleeromgevingen waarin onderwijs, onderzoek en bedrijfsleven gezamenlijk werken aan opleiding, bijscholing en kennisoverdracht.

Een landelijke Human Capital intelligence base moet inzicht geven in de beschikbare competenties, opleidingscapaciteit en toekomstige arbeidsmarktvraag, zodat tijdig kan worden ingespeeld op tekorten. Initiatieven zoals de National Battery Challenge kunnen daarnaast bijdragen aan talentinstroom, multidisciplinaire samenwerking en een sterkere verbinding tussen onderwijs en bedrijfsleven.

Beoogd resultaat in 2030: Nederland beschikt over een praktijkgericht en datagedreven opleidings- en arbeidsmarktsysteem dat meegroeit met de ontwikkeling en industrialisatie van de batterijsector.

7. Veranker Nederland in Europese waardeketens

De Nederlandse batterijsector is sterk internationaal georiënteerd. Om innovaties succesvol op te schalen en economisch te verankeren, moeten ook Europese en internationale samenwerking vanaf het begin onderdeel zijn van onderzoek, innovatie, industrialisatie en investeringsprojecten.

Internationale samenwerking moet zich richten op complementaire kennis, industriële capaciteiten, waardeketens en afzetmarkten. Daarbij blijft het belangrijk om de strategische autonomie te versterken door bewuste keuzes te maken ten aanzien van intellectueel eigendom, cybersecurity, kritieke grondstoffen en andere strategische afhankelijkheden.

Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen moeten sterker worden verbonden met Europese innovatie-, industrialisatie- en investeringsprogramma's en actief deelnemen aan internationale ecosystemen en publiek-private samenwerkingsverbanden. BCC-NL, RVO, NFIA, regionale ontwikkelingsmaatschappijen (ROM's), ambassades, netwerken en brancheorganisaties spelen een belangrijke rol bij het verbinden van Nederlandse partijen met internationale partners, het ondersteunen van consortiumvorming, het aantrekken van investeringen en het versterken van de internationale positionering van de Nederlandse batterijsector.

Buitenlandse investeringen zijn daarbij vooral gewenst wanneer zij ontbrekende schakels in de Nederlandse en Europese batterijwaardeketen versterken en bijdragen aan duurzame economische verankering.

Beoogd resultaat in 2030: Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen zijn stevig verankerd in de Europese batterijwaardeketen en Nederland is een aantrekkelijke partner voor internationale samenwerking, innovatie en investeringen.

Uitvoering, governance en monitoring

De zeven actielijnen vragen om een samenhangende, meerjarige publiek-private uitvoeringsstructuur. Een bestuurlijke tafel stelt gezamenlijke prioriteiten, bewaakt de voortgang en adresseert strategische knelpunten. Een compacte uitvoeringsorganisatie ondersteunt de vertaling van de agenda naar projecten, consortia, financieringsvoorstellen en investeringsbesluiten.

BCC-NL kan vanuit zijn onafhankelijke publiek-private positie een initiërende, organiserende en verbindende rol vervullen tussen bedrijven, kennisinstellingen, regio's, rijksoverheid en Europese netwerken. Daarbij neemt BCC-NL verantwoordelijkheden van andere partijen niet over, maar helpt het om gezamenlijke opgaven te agenderen, partijen rond concrete prioriteiten te organiseren en samenhang aan te brengen tussen initiatieven, programma's en financieringsmogelijkheden.

Per actielijn wordt een portfolio opgesteld met:

- een verantwoordelijke trekker;
- concrete projecten en mijlpalen;
- benodigde publieke en private financiering;
- afhankelijkheden op het gebied van regelgeving, infrastructuur en talent;
- meetbare resultaten voor 2030 en 2035.

Monitoring richt zich niet primair op activiteiten of het aantal overleggen, maar op de voortgang van innovatie naar economische en maatschappelijke toepassing binnen de programma's en projecten. Relevante indicatoren zijn onder meer het aantal opgeschaalde technologieën, gerealiseerde demonstraties, commerciële referentieprojecten, gemobiliseerde publieke en private investeringen, Europese samenwerkingen, opgeleide professionals en operationele circulaire ketens. Daarmee ontstaat niet alleen zicht op de uitvoering van de agenda, maar ook op de mate waarin de Nederlandse batterijwaardeketen daadwerkelijk sterker en concurrerender wordt.

03

Strategische focusthema's Nederlandse batterij industrie

3. Strategische focusthema's Nederlandse batterij industrie

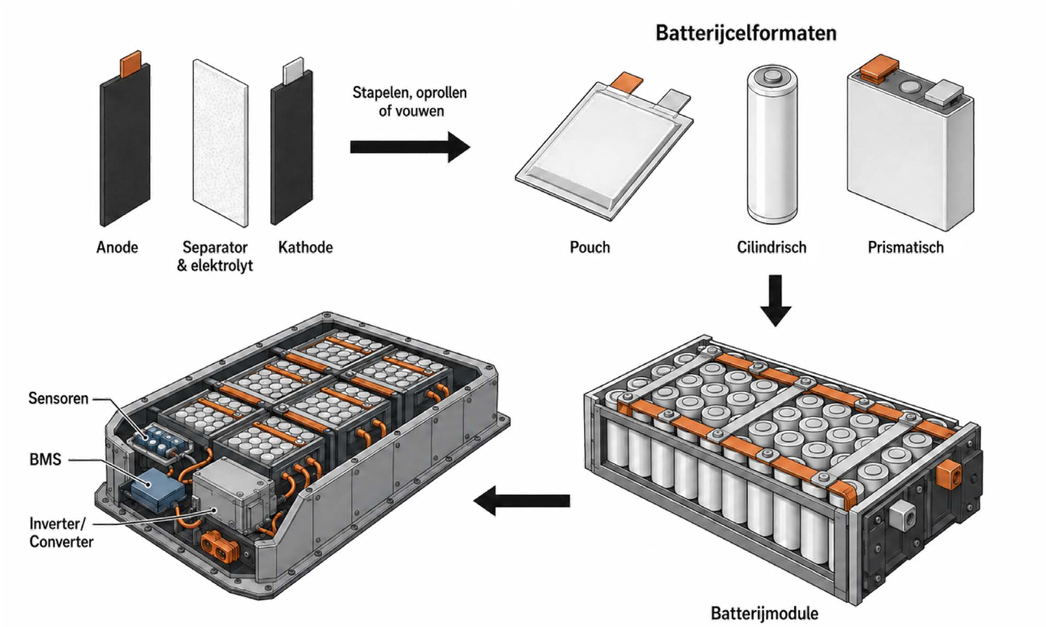
Het doel van dit hoofdstuk is om alle aspecten te belichten die relevant zijn voor de geselecteerde focusthema's waarin Nederland actief is of een sterkere marktpositie nastreeft. Het gaat daarbij in op de kenmerken van elk focusthema vanuit de perspectieven van technologie, data, veiligheid en testen en circulariteit, alsook vanuit de factoren die nodig zijn om hun verdere ontwikkeling mogelijk te maken. De beschrijving van elk thema sluit af met aanbevelingen, doelen en acties die bijdragen aan de verdere groei en versterking van het Nederlandse batterij-ecosysteem.

Gemeenschappelijke terminologie

In deze sectie worden de gemeenschappelijke begrippen en terminologie die binnen de verschillende focusthema's worden gebruikt kort toegelicht. Een meer gedetailleerd technisch overzicht van batterijcel- en packcomponenten, de werking van batterijen en de principes achter batterij- en energiemanagementsystemen is opgenomen in Bijlage 1. Schematische weergaven van de in deze sectie besproken begrippen zijn opgenomen in Figuur 4.

Een batterijcel bestaat in de basis uit een anode, kathode, elektrolyt en separator. In lithium- en natrium-ionbatterijen wordt energie opgeslagen via omkeerbare elektrochemische reacties. Het elektrolyt zorgt voor ionentransport; de separator voorkomt direct contact tussen anode en kathode.

De prestaties worden bepaald door materiaalkeuze, celontwerp en systeemintegratie. Belangrijke parameters zijn energiedichtheid, vermogen, levensduur, veiligheid en kosten. Solid-statebatterijen gebruiken een vaste ionengeleider in plaats van een vloeibaar elektrolyt en kunnen voordelen bieden voor veiligheid en energiedichtheid.



Figuur 4 Schematische weergave van batterijcomponenten, cellen, modules, accupakketten en systemen

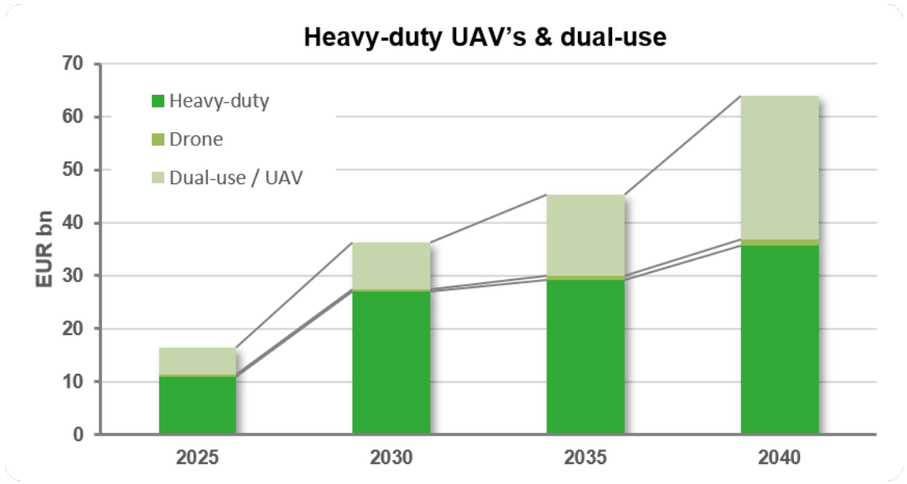
Cellen worden geproduceerd in pouch, cilindrische of prismatische vorm. Voor toepassingen worden cellen samengebouwd tot modules, packs en complete systemen met monitoring, beveiliging, thermisch beheer en vermogensaansturing. Het Battery Management System (BMS) speelt een centrale rol in de aansturing en monitoring van batterijcellen, en wordt op systeemniveau vaak aangevuld met een Energy Management System (EMS).

Andere technologieën hebben een afwijkende architectuur. Bij redox-flowbatterijen is de energie opgeslagen in vloeibare elektrolyten; in metaal-luchtbatterijen wordt zuurstof uit de omgevingslucht als reactant gebruikt.

3.1 Heavy Duty & Dual-Use toepassingen

Nederland heeft een sterke positie in zware professionele mobiliteit. Meer dan 30% van de trucks en bussen voor de Europese markt wordt in Nederland geproduceerd[13]. Ook in de binnenvaart, maritieme sector, logistiek en aanverwante industrieën beschikt Nederland over een omvangrijke maak- en kennisbasis. Daarmee heeft ons land een duidelijk 'right to play' bij de ontwikkeling en toepassing van batterijsystemen voor zware voer-, vaar- en vliegtuigen. In al deze transportsectoren vindt op dit moment de transitie plaats van fossiele brandstoffen naar elektrische aandrijving. Binnen deze Actieagenda ligt de focus op batterijsystemen als integraal onderdeel van die aandrijving.

De markten zijn kleiner in volume dan die van personenauto's of grootschalige energieopslag, maar strategisch belangrijker dan hun aandeel in de totale batterijvraag doet vermoeden. Zij zijn direct verbonden met de Nederlandse logistiek, havens, bouw, defensie en exportindustrie. Waarde wordt hier niet alleen bepaald door de prijs per kWh, maar vooral door betrouwbaarheid, veiligheid, levensduur, energiedichtheid, certificering, onderhoudbaarheid en leveringszekerheid. Voor luchtvaart, drones en dual-use toepassingen (militair/civiel) zijn daarnaast veilige Europese toeleveringsketens en hoogwaardige systeemintegratie doorslaggevend. Juist doordat deze markten uiteenlopende eisen stellen, kan Nederland zich onderscheiden met kennisintensieve systemen en flexibele productie in plaats van met generieke massaproductie.



Figuur 5 Geprojecteerde marktwaarden voor zwaartransport en UAV/dual-use[4]

3.1.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

Batterijsystemen voor Heavy Duty en dual-use moeten onder intensieve omstandigheden hoge prestaties leveren. Zij moeten betrouwbaar, veilig en kosteneffectief zijn, voldoende energie en vermogen bieden en gedurende een lange operationele levensduur beperkt degraderen. Langdurige garantieverplichtingen en hoge inzetbaarheid maken de eisen aanzienlijk zwaarder dan bij personenauto's.

Commercieel zwaar transport is een conservatieve markt, waarin weinig ruimte bestaat voor technische of financiële risico's. Fabrikanten kiezen daarom doorgaans voor bewezen celchemieën waarvan prestaties, stabiliteit en faalmechanismen goed bekend zijn. Nieuwe technologie wordt pas ingevoerd wanneer betrouwbaarheid, certificering en economische voordelen voldoende zijn aangetoond. Door deze transparantie is de markt voor module- en pakketproductie voor zwaar vervoer relatief toegankelijk.

Tegelijkertijd vragen de uiteenlopende toepassingen om modulaire en schaalbare batterijsystemen. Juist in flexibele high-mix, low-volume productie liggen kansen voor Nederland; verschillende packs en configuraties produceren met zoveel mogelijk gemeenschappelijke componenten en processen. Dit kan schaalvoordelen opleveren in markten die afzonderlijk te klein zijn voor massaproductie. Daarvoor zijn standaardisatie, automatisering en substantiële investeringen in de stap van pilotproductie naar industriële schaal nodig. De grote kostenverschillen tussen Europese en Chinese productie maken een onderscheidende systeempropositie daarbij noodzakelijk.

3.1.1.1 Road & Off-road mobility

Trucks. Nederland behoort in Europa tot de koplopers in de introductie van batterij-elektrische trucks[14]. Eind 2025 reden er circa 1.900 batterij-aangedreven trucks in Nederland. Beleidsmatig wordt er breed ingezet op de verduurzaming van deze modaliteit; om de Europese CO_2-doelen te halen, moeten vanaf 2030 naar schatting ongeveer 100.000 batterij-elektrische trucks per jaar op de Europese markt komen. Wereldwijd gezien is Europa momenteel de op één na grootste BEV truckmarkt.

De aanschafkosten liggen nog twee tot drie keer hoger dan bij conventionele trucks. Daar staan lagere operationele kosten, minder onderhoud en potentieel goedkopere energie tegenover. De commerciële doorbraak hangt daarom vooral af van voldoende oplaadcapaciteit, een voorspelbare energieprijs, beperking van investeringsrisico's en de Total Cost of Ownership (TCO) welke steeds positiever uitpakt. Ook duidelijkheid over batterijlevensduur en restwaarde is belangrijk voor financiers en transportbedrijven. Nederlandse truckproducenten en hun leveranciers kunnen hun sterke Europese positie behouden wanneer zij betaalbare, betrouwbare en onderhoudbare batterijsystemen kunnen aanbieden die aansluiten op intensieve dagelijkse inzet.

Beleidsmatig wordt er breed ingezet op de verduurzaming van deze modaliteit, door middel van beleidsmaatregelen aan vraag- en aanbodzijde op nationaal en Europees niveau. Denk aan EU CO2-Heavy Duty Vehicle normen, de vrachtwagenheffing, zero-emissiezones voor logistiek, aanschafsubsidies en subsidies voor publieke en private laadinfrastructuur (nationaal en Europees).

Busvervoer. Batterij-elektrische aandrijving is inmiddels breed toepasbaar in stedelijk en interstedelijk openbaar vervoer. Nederland loopt hierin voorop mede dankzij het bestuursakkoord Zero Emissie Busvervoer[15]. Voor touringcars voor langere afstanden ontstaat momenteel een sterk groeiende markt. De sterke positie van Nederlandse busfabrikanten biedt kansen, maar de concurrentie uit China is groot. Lagere aanschafkosten, voorspelbare energieprijzen en batterijtechnologie met voldoende actieradius en levensduur zijn noodzakelijk om het Nederlandse marktaandeel te behouden. De markt vraagt daarnaast om snelle laadmogelijkheden, beschikbaarheid en packs die gedurende een lange concessieperiode betrouwbaar blijven.

Bouwmaterieel. Elektrisch bouwmaterieel groeit door de behoefte aan emissieloze bouwplaatsen en beperking van stikstofuitstoot. Vooral kleinere graafmachines, shovels en hoogwerkers worden al elektrisch ingezet. Bij grotere machines vormen accuduur, laadtijd en het beperkte aanbod nog belemmeringen, maar we zien in Nederland wel een sterke toename in beschikbare modellen. Deze sector wordt mede aangedreven vanuit het programma Schoon en Emissieloos Bouwen waarin de Rijksoverheid, medeoverheden, marktpartijen, brancheorganisaties en kennisinstellingen samenwerken aan één aanpak om bouw-, onderhouds- en sloopprojecten schoon en stil uit te voeren. Dit programma wordt gecomplementeerd door de Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel, waarbinnen bouwbedrijven worden gestimuleerd tot de aanschaf van en de ombouw naar emissieloze (uitstootvrije) bouwwerktuigen, bouwvoertuigen en bouwvaartuigen.

Ombouw van bestaande dieselmachines naar batterij-elektrische of brandstofcelaandrijving biedt een aanvullende markt, vaak tegen lagere kosten dan volledige vervanging. Nederland kan hier waarde creëren met modulaire packs, integratiekennis en flexibele productie. Ook mobiele laadvoorzieningen, verwisselbare batterijen en koppeling met energiehubs kunnen de inzetbaarheid vergroten.

3.1.1.2 Maritieme toepassingen

De maritieme markt omvat binnenvaart, veerboten, sleepboten, short-sea shipping, zeevaart, offshore, passagiersvaart, jachten en pleziervaart. Door de uiteenlopende vaarprofielen bestaat geen uniforme batterijoplossing.

Volledig batterij-elektrische aandrijving is vooral kansrijk bij korte, voorspelbare routes en voldoende laadmogelijkheden, zoals veerboten en delen van de binnenvaart[17]. Voor langere afstanden zijn hybride systemen voorlopig realistischer.

Voor Nederland ligt een logische prioriteit bij de binnenvaart en andere planbare routes, waar laadmomenten en terugverdientijden relatief goed voorspelbaar zijn. Echter, ook in de zeevaart kunnen batterijen worden gebruikt voor elektrisch varen in en rond havens, voor peak shaving, als back-upvermogen en ondersteuning bij snelle vermogensveranderingen.

De sterke maritieme industrie en de diversiteit aan toepassingen bieden kansen voor maatwerk, modulaire systemen, energiebeheer en integratie van batterijen met andere aandrijftechnologieën. De Nederlandse meerwaarde ligt daarbij in systeemontwerp, veiligheid, certificering en integratie in complexe vaartuigen.

3.1.1.3 Luchtvaarttoepassingen en drones

De bijdrage van batterijen aan de luchtvaart varieert van volledig elektrische regionale vliegtuigen tot hybride aandrijving, eVTOL-(Electric Vertical Take-Off and Landing) toepassingen en drones.

Vooral de markt voor cargo- en defensiedrones groeit snel, hoewel de omvang van de toekomstige markt nog onzeker is.

De eisen aan energiedichtheid, gewicht en veiligheid zijn hoog[18]. Luchtvaart, eVTOL en drones zijn daarom geschikte early-adoptermarkten voor nieuwe celtechnologie. Hun hoge prestatie-eisen, relatief lage volumes en grotere bereidheid om voor betere prestaties te betalen, kunnen de kloof tussen technology push en market pull verkleinen. Technologieën kunnen hier rijpen en worden gecertificeerd voordat zij later in andere Heavy Duty markten worden toegepast.

Daarmee kan luchtvaartontwikkeling een aanjager worden voor Nederlandse celmaterialen, BMS-technologie, thermisch beheer en lichtgewicht packdesign. Deze race in de luchtvaartsector is nog niet gelopen en dit geeft Nederland een kans om hier een rol in te spelen.

3.1.1.4 Defensie en Dual-use toepassingen

Voor steeds meer defensietoepassingen zijn betrouwbare batterijen nodig, zowel voor land-, zee- als luchtplatforms, waaronder trucks, schepen en drones. Daarbij spelen prestaties en veiligheid een grote rol, maar ook de wens om afhankelijkheden van leveranciers buiten het NAVO-gebied te verminderen.

Met het oogpunt op schaalvoordelen ligt het hierbij voor de hand om civiele en militaire toepassingen vanuit een geïntegreerd dual-use ecosysteem te bedienen. Defensie kan de ontwikkeling van robuuste technologie, snelle innovatie en veilige toeleveringsketens stimuleren. Civiele toepassingen leveren vervolgens het volume dat nodig is voor kostenefficiënte productie.

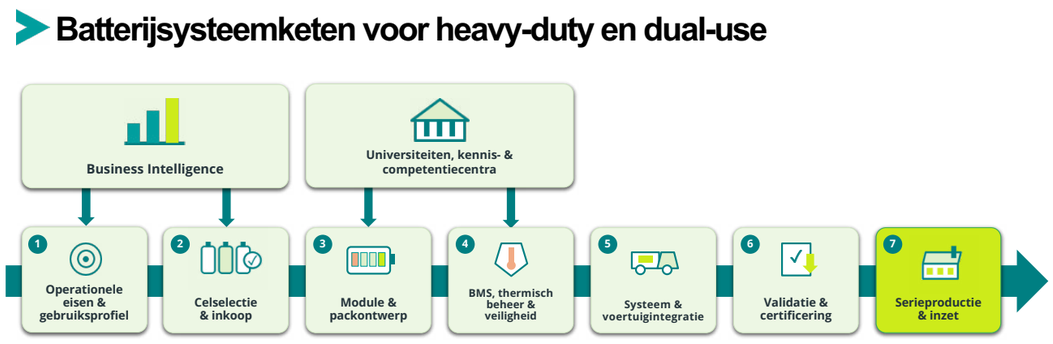
Dit vereist samenhangend beleid en gezamenlijke specificaties, certificeringsroutes en ontwikkelprogramma's, ook op NAVO-niveau. Overheden moeten daarbij zoveel mogelijk met één herkenbare vraag en koers optreden, zodat civiele en defensieprogramma's elkaar versterken in plaats van naast elkaar te bestaan.

Het BatCelFab-project uit het rapport-Wennink is hiervan een goed voorbeeld: een flexibele productiecapaciteit voor geavanceerde batterijcellen die zowel civiele als defensietoepassingen kan bedienen. Een dergelijke low-volume, high-mix faciliteit kan kennis, validatie en productie-investeringen over meerdere markten benutten.

3.1.2 Technologie, Data en Circulariteit

3.1.2.1 Technologie

De productie van batterijpakketten en batterijsystemen voor heavy-duty- en dual-use toepassingen omvat een reeks activiteiten, zoals weergegeven in Figuur 6.



Figuur 6 Het scala aan activiteiten dat komt kijken bij het ontwerpen, integreren en opschalen van een heavy-duty en dual-use batterijsysteem: van BI en operationele eisen tot celselectie, module- en packontwerp, BMS en thermisch beheer, systeemintegratie, validatie en certificering, en uiteindelijk serieproductie en uitrol

Kostenberekening en batterijeigenschappen
De eisen van de toepassing moeten leidend zijn bij het ontwerp. Een concurrerende TCO vraagt om een goede balans tussen aanschafprijs, levensduur, energieverbruik, onderhoud, inzetbaarheid en restwaarde.

Voor zware toepassingen is een lange levensduur essentieel. Systemen moeten bij voorkeur 8.000 laadcycli kunnen doorlopen zonder sterke degradatie, zodat tussentijdse vervanging wordt voorkomen. Dit hoge aantal laadcycli is vooral ook nodig bij het bi-directioneel laden van Heavy Duty toepassingen. Het is de ambitie van Nederland om in Europa gidsland te blijven op het gebied van laadinfrastructuur en Nederland te positioneren als hét introductieland voor commerciële bi-directionele oplossingen, zoals uitgewerkt in de Nationale Routekaart Bi-directioneel Laden. Dit maakt Nederland een aantrekkelijke afzetmarkt voor internationale bedrijven, en biedt de mogelijkheid om richting te geven aan de ontwikkeling van deze techniek. Nu ligt de focus op elektrische personenvoertuigen maar in de toekomst kan dit verschuiven naar zwaar vervoer, zoals bijvoorbeeld stadbussen[19].

Modules, cellen en elektronica moeten onderhoudbaar en vervangbaar zijn zonder het volledige pack af te schrijven. Een hoge uptime en korte reparatietijden zijn essentieel in de Heavy Duty. Een lager systeemgewicht vergroot verder de nuttige last en verlaagt het energieverbruik. Gestandaardiseerde modules maken verschillende packconfiguraties mogelijk zonder telkens een volledig nieuw systeem te ontwerpen. Capaciteit kan worden uitgebreid door modules toe te voegen of strings anders te configureren. Dat verlaagt ontwikkelkosten van nieuwe batterijen.

Ook de oplaadstrategie is bepalend. Bij trucks moeten actieradius en oplaadtijd aansluiten op Europese rij- en rusttijden. Depotladen is doorgaans goedkoper, maar kan de stilstand verlengen; snelladen vergroot de inzetbaarheid. Megawattladen is voor zware toepassingen belangrijk, maar de hoge stroomsterktes kunnen degradatie versnellen en daarmee een negatieve invloed op TCO hebben. Innovaties die snel laden combineren met beperkt verlies van levensduur hebben daarom een grote economische waarde.

2035	LTO/ N(T)O	Gr/C	Gr/SiOx	Si/C (LIB/SSB)	Si (LIB)	Si (SSB)	Li (LIB)	Li (SSB)	LFP	LFMP	LM(N)O	LMR	NMC(A) (Ni≥0.8)	Na-ion	Li-S
Luchtvaart															
Drones															
eTrucks & eBussen															
Industriële offroadtoepassingen															
Maritiem – hoge energie															
Maritiem – hoog vermogen															

Verwachte commercialisering **Technologisch haalbaar** **Niet van toepassing**

Anoden
LTO – $Li_4Ti_5O_{12}$
N(T)O – Nb_2O_5 ($TiNb_xO_{2+2.5x}$)
Gr/C – grafiet/koolstof
Gr/SiO_x – grafiet-siliciumoxidecomposiet ($SiO_x \leq 10$ wt.%)
Si/C – silicium-koolstofcomposiet (Si < 80 wt.%)
Si – hoog siliciumgehalte (Si ≥ 80 wt.%) en zuivere siliciumanode
Li – metallische lithiumanode

Kathoden
LFP – $LiFePO_4$ (polyanionisch)
LFMP – $LiFe_xMn_{1-x}PO_4$ (polyanionisch)
LMO/LMNO – $LiMn_2O_4$ / $LiMn_{2-x}Ni_xO_4$ (spinel)
LMR – $Li_{1+x}Ni_{1-x-y-z}Mn_yCo_zO_2$ (gelaagd)
NMC(A) – $LiNi_xMn_yCo_zAl_aO_2$, waarbij x + y + z + a = 1 (gelaagd)
Na-ion – PBA ($Na_xM[Fe(CN)_6]$) of NVPF ($Na_3V_2(PO_4)_2F_3$) | harde koolstof

Figuur 7 Toepasbaarheid in 2035 van diverse batterij chemieën in de markt van Heavy Duty & Dual use.
Bron: BCC NL, The Dutch battery compass

Celtechnologie
Heavy Duty markten kiezen voorlopig vooral voor bewezen cellen. Nieuwe materialen en solid-stateconcepten zullen naar verwachting eerst worden toegepast in luchtvaart, eVTOL en drones, waar energiedichtheid belangrijker is en de prijsdruk lager. Deze markten kunnen als tussenstap dienen voordat nieuwe celtechnologie op grotere schaal in trucks, bussen, bouwmaterieel en scheepvaart wordt ingezet.

Batterij Management Systemen
Het BMS bewaakt veiligheid en prestaties en schat onder meer de State of Charge (SoC) en State of Health (SoH). Geavanceerde systemen beperken degradatie, optimaliseren thermisch beheer en ondersteunen voorspellend onderhoud en restwaardebepaling. Het maakt hiermee ook lichtere ontwerpen mogelijk.

Nederlandse partijen hebben behoefte aan toegankelijke kennis en ontwikkelplatforms voor de volledige BMS-stack: van chipselectie en embedded software tot robuuste elektronica voor hoge stroomsterktes en elektromagnetische belasting. Vooral bedrijven die standaardoplossingen willen vervangen door eigen systemen lopen tegen hoge ontwikkelkosten en schaarse expertise aan.

Samenwerking tussen OEM's, leveranciers en halfgeleiderbedrijven kan ontwikkeltijd en kosten verlagen, kennis herbruikbaar maken en betrouwbare, schaalbare oplossingen mogelijk maken. Gemeenschappelijke frameworks mogen daarbij ruimte laten voor toepassingsspecifieke software en algoritmen.

Pack design - Thermisch beheer, schaalbaarheid en cel compressie
Effectieve koeling en verwarming zijn bepalend voor prestaties, levensduur en snel laden. Onder meer immersion cooling en dynamische celcompressie worden onderzocht om temperatuurverschillen en celzwelling te beperken.

De grote variatie aan toepassingen vraagt om packs die zowel schaalbaar als geschikt zijn voor verschillende celchemieën. Standaardisatie van module-, interface- en productiearchitecturen maakt integratie van nieuwe technologie eenvoudiger, versnelt certificering en vergroot de mogelijkheden voor onderhoud, revisie en dual-use toepassing.

3.1.2.2 Data/Veiligheid/Testen

Data
BMS-data maakt de laadstatus, gezondheid, degradatie en prestaties van batterijen inzichtelijk voor gebruikers en fabrikanten. Betrouwbare statusinformatie ondersteunt onderhoud, garantie, restwaardebepaling en herverkoop[20]. De koppeling met het digitale batterijpaspoort biedt Nederlandse bedrijven kansen op het gebied van datamanagement, levenscyclusanalyse en levensduurverlenging.

Veiligheid en testen
Robuuste systemen vereisen een combinatie van fysieke tests, modellering en digitale validatie. Functionele veiligheid, conformiteit en systeemvalidatie vragen specialistische kennis en gedeelde referentieontwerpen, ontwikkelplatforms en best practices.

Testfaciliteiten moeten materiaal-, cel-, module-, pack- en systeemniveau afdekken. Hardware-, software- en model-in-the-loop-methoden (HIL, SIL, MIL) kunnen dynamische omstandigheden vroeg in het ontwerpproces simuleren en kostbare fysieke testcycli beperken. Daarnaast blijven tests nodig voor trillingen, impact, EMC, thermisch gedrag, elektrische prestaties, brandveiligheid en zogenoemde abuse-tests (tests onder misbruik- en foutscenario's). De testcondities moeten aansluiten op de werkelijke inzet in wegtransport, bouw, scheepvaart, luchtvaart en defensie. Productietests, zoals laskwaliteitscontrole en eindlijntesten, zijn nodig om constante kwaliteit te waarborgen. Gedeelde faciliteiten en certificeringskennis kunnen vooral voor mkb-bedrijven de drempel naar markttoelating verlagen.

3.1.2.3 Circulariteit

Met de groei van Heavy Duty elektrificatie komen op termijn grote en zware batterijpakketten beschikbaar voor reparatie, revisie, herbestemming en recycling. De huidige aantallen zijn echter nog beperkt en packs worden vaak intensief gebruikt, waardoor weinig restcapaciteit overblijft voor een rendabele tweede toepassing.

De eerste prioriteit is daarom levensduurverlenging in de oorspronkelijke toepassing. Safe and Sustainable by Design, modulaire opbouw, toegankelijke diagnostiek en design for disassembly kunnen reparatie en revisie vereenvoudigen en de TCO verlagen. Wanneer herbestemming technisch en economisch niet zinvol is, moeten materialen hoogwaardig worden teruggewonnen.

Revisie- en recyclingcapaciteit moet tijdig worden aangepast aan de afmetingen, gewichten, veiligheidsrisico's en chemieën van Heavy Duty systemen, in plaats van uitsluitend aan fiets- en personenautobatterijen. Dat vraagt ook om logistieke protocollen, gekwalificeerd personeel en betrouwbare batterijdata.

3.1.3 Randvoorwaarden

De marktontwikkeling hangt mede af van voorwaarden buiten de directe invloed van fabrikanten:

- **Laadinfrastructuur.** Voldoende oplaadpunten en netcapaciteit voor grote aantallen zware voertuigen, inclusief depot- en snellaadvoorzieningen.
- **Voorspelbare energieprijzen.** De energieprijs voor elektrisch laden dient te allen tijde voorspelbaar en competitief te zijn met een fair belastingbeleid t.o.v. fossiele energiekosten. Er moet een duidelijk TCO-berekening en een redelijke terugverdientijd mogelijk zijn.
- **Stabiel overheidsbeleid.** Transporteurs werken met kleine marges; plotselinge wijzigingen in belastingen, subsidies of regelgeving kunnen investeringen blokkeren. Een stabiel en voorspelbaar overheidsbeleid is nodig om vlootvernieuwing, laadvoorzieningen en productiecapaciteit te plannen.
- **Gefaseerde marktintroductie.** Nieuwe high-performance celtechnologie moet eerst worden gevalideerd in early-adoptermarkten zoals drones, eVTOL en regionale luchtvaart waar deze technologie kan rijpen.
- **Certificering en typegoedkeuring.** Toegankelijke testfaciliteiten en toepassing van HIL-, MIL- en SIL-methoden moeten het traject van ontwikkeling naar markt versnellen. Waar mogelijk moeten civiele en defensienormen vroegtijdig op elkaar worden afgestemd.

3.1.4 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Versnelde elektrificatie van Heavy Duty. Nederland heeft een sterke Europese positie in de ontwikkeling, productie en systeemintegratie van batterijtechnologie voor Heavy Duty toepassingen.

Er ligt een groot marktpotentieel doordat batterij-elektrisch een steeds interessantere keuze wordt bij de aanschaf van korte- en middellange afstand Heavy Duty toepassingen zoals nieuwe trucks en bussen, mede door een concurrerende TCO en lager investeringsrisico. Ook in off-road, maritieme toepassingen, drones en dual-use toepassingen versnelt de elektrificatie, terwijl luchtvaart richting commerciële toepassing beweegt.

Moonshot 2 – 2030 Door slim ontwerp en samenwerken creëert Nederland batterijen systemen met grote meerwaarde:

- **Ontwerp voor civiele en dual-use toepassingen.** Batterijoplossingen voor relevante Heavy Duty toepassingen worden ontwikkeld met aandacht voor zowel civiele als dual-use toepassingen. Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen benutten gedeelde technologie, specificaties en productiecapaciteit. Zo versterken ze de strategische en maatschappelijke weerbaarheid en leveren spin-offs in beide richtingen op.

- **Batterijen als digitaal beheerde assets.** Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen leveren toonaangevende oplossingen voor batterijmanagement, digitale monitoring en lifecycle-optimalisatie van Heavy Duty batterijsystemen. Door BMS, digital twins en data-analyse te integreren, vergroten zij de betrouwbaarheid, restwaarde en levensduur van batterijen en verlagen zij de totale levenscycluskosten.

- **Waardebehoud.** Heavy Duty en dual-use batterijen behouden hun waarde gedurende hun gehele levenscyclus door onderhoudbaarheid, revisie, hergebruik, geschikte second-life toepassingen en materiaalterugwinning. Safe and Sustainable by Design is vanuit de ontwerpfase reeds geïntegreerd.

Moonshot 3 – 2035 Een sterke Nederlandse batterijwaardeketen voor Heavy Duty.
Nederland is een toonaangevende Europese ontwikkel- en productielocatie voor batterijtechnologie en geïntegreerde energiesystemen voor Heavy Duty toepassingen. Nederlandse bedrijven vervullen sleutelposities in de waardeketen, van batterijcomponenten en -packs tot systeemintegratie, laadinfrastructuur en circulaire verwerking. Waar relevant worden technologieën ontwikkeld voor zowel civiele als dual-use toepassingen.

3.1.5 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit focusthema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Verlaag TCO en investeringsrisico.** Ontwikkel een instrument dat aanschaf- en operationele kosten verlaagt en onzekerheid over prestaties, levensduur en restwaarde vermindert.

- **Ontwikkel nationale standaarden.** Harmoniseer module-, pack-, interface- en BMS-architecturen om kosten te verlagen en interoperabiliteit, onderhoudbaarheid, circulariteit en dual-use inzet te vergroten.

- **Schaal BMS-technologie op.** Investeer in cell balancing, predictive analytics, digital twins, levenscyclusanalyse en MIL-, SIL- en HIL-methoden, gekoppeld aan test- en certificeringsfaciliteiten specifiek voor batterijtechnologie en BMS systemen.

- **Borg een circulaire waardeketen.** Zet de standaard in de industrie voor circulaire batterij waardeketens en levenscyclus-transparantie door het certificeren en borgen van het batterijpaspoort, restwaardemodellen, design for disassembly, serviceability, extended first-life & second-life toepassingen en terugwinning van kritieke grondstoffen.

- **Start een industrialisatie- en marktintroductieprogramma.** Ondersteun demonstraties, automatisering en opschaling van productie en integratie van batterij-elektrische oplossingen. Harmoniseer celeisen waar dat schaalvoordelen oplevert.

- **Valideer civiele en defensie-eisen gezamenlijk.** Ontwikkel gedeelde specificaties, certificeringsroutes en technologische roadmaps. Valideer civiele en defensie eisen voor Heavy Duty toepassingen, alsmede cell- pack-, en systeemproductie voor vliegtuigen, zowel civiel als onbemand militair.

- **Bouw een Europees dual-use batterij-ecosysteem.** Realiseer flexibele low-volume, high-mix productiecapaciteit voor geavanceerde cellen en systemen voor land-, zee- en luchttoepassingen.

- **Vergroot deelname aan Europese programma's.** Organiseer coördinatie en cofinanciering voor deelname aan onder meer Horizon Europe en het Innovation Fund.

3.2 Stationaire toepassingen

Het Nederlandse energiesysteem baseert zich steeds sterker op elektrificatie en hernieuwbare elektriciteit uit zon en wind. Daardoor nemen zowel de elektriciteitsvraag als de behoefte aan flexibiliteit toe. Tegelijkertijd vormt netcongestie een groeiende belemmering voor nieuwe productie-, opslag- en verbruikslocaties. Netverzwaring en vraagsturing blijven noodzakelijk, maar zijn niet voldoende. Elektriciteitsopslag wordt daarom een essentieel onderdeel van het toekomstige energiesysteem[21].

Gezien het belang voor ons energiesysteem wordt in de Integrale Beleidsagenda Energieopslag door netbeheerders, marktpartijen, (mede)overheden en toezichthouder een gezamenlijke visie op het belang van opslag vastgelegd. Hieraan wordt een indicatief opslagdoel verbonden en zijn knelpunten en oplossingsrichtingen geformuleerd[22].

Stationaire batterijsystemen omvatten grootschalige installaties bij zonne- en windparken, opslag bij industrie en utiliteit, energiehubs, buurt- en thuisbatterijen en mobiele of semi-mobiele systemen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen kortdurende opslag, Short Duration Energy Storage (SDES), met doorgaans een ontlaadduur van één tot vier uur, en langdurige opslag, Long Duration Energy Storage (LDES), vanaf ongeveer acht uur tot meerdere dagen. Binnen LDES wordt onderscheid gemaakt tussen intra-day LDES (circa 8-24 uur) en multi-day LDES (meerdere dagen).

SDES domineert momenteel de markt en ondersteunt onder meer energiehandel, netbalancering en peak shaving. LDES wordt strategisch belangrijker naarmate het energiesysteem afhankelijker wordt van weersafhankelijke productie en er langere perioden van overschot of tekort ontstaan.

De rol van stationaire batterijen verschuift daarmee van alleen opslag naar het leveren van bredere systeemdiensten. Afhankelijk van ontwerp en aansturing kunnen batterijen bijdragen aan congestiemanagement, frequentie- en spanningsondersteuning, lokale leveringszekerheid en herstel na storingen. Zij moeten daarom niet alleen worden beoordeeld op vermogen en opslagcapaciteit, maar ook op hun bijdrage aan systeemstabiliteit en weerbaarheid.

De economische kansen liggen niet uitsluitend in de batterijhardware. Nederland kan vooral waarde toevoegen met systeemintegratie, batterij- en energiemanagement, vermogenselektronica, software, veiligheidsengineering, netdiensten, installatie, onderhoud, testen en circulariteit. Dat sluit aan bij Nederlandse sterktes in energiesystemen, digitalisering en slimme netoplossingen.

Internationale analyses schatten de wereldwijde marktwaarde van batterijen energieopslagsystemen (BESS) rond 2030 op ongeveer EUR 110–140 miljard, afhankelijk van scope en scenario's. Een recente studie van McKinsey[23] laat bijvoorbeeld zien dat de mondiale BESS markt naar dit niveau kan doorgroeien tegen 2030.





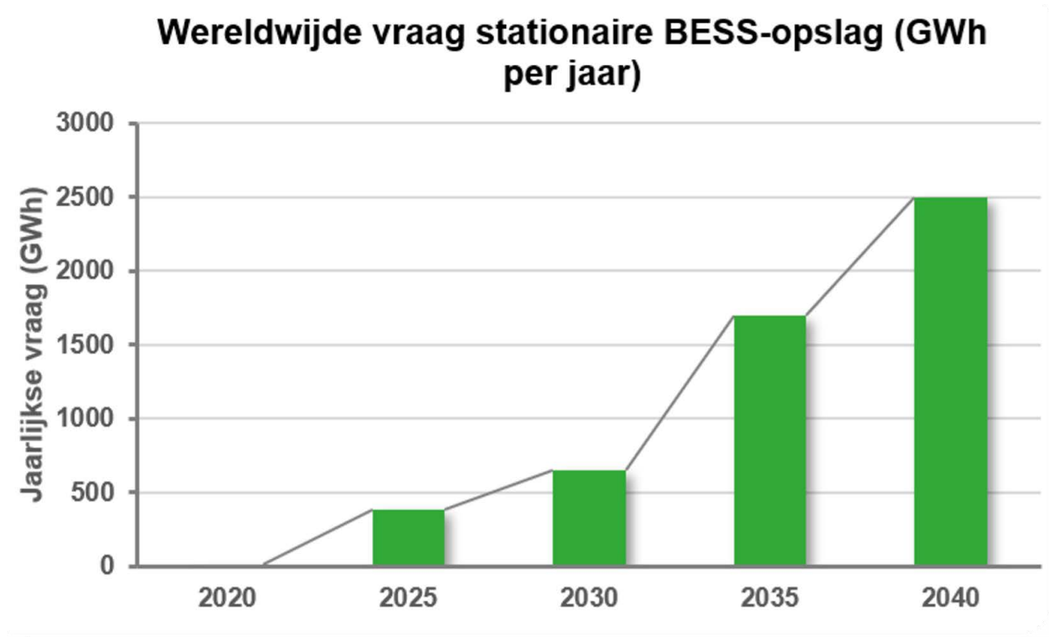
3.2.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

De markt voor stationaire opslag groeit snel. Deze groei wordt in Nederland aangejaagd door vijf ontwikkelingen:

- het toenemende aandeel weersafhankelijke elektriciteitsproductie;
- negatieve en sterk fluctuerende elektriciteitsprijzen;
- netcongestie en lange wachttijden voor aansluitingen;
- groeiende behoefte aan balancerings- en flexibiliteitsdiensten;
- elektrificatie van industrie, logistiek, mobiliteit en lokale energiehubs.

Batterijen kunnen elektriciteit verschuiven van uren met lage of negatieve prijzen naar momenten met hogere vraag. Zij kunnen ook lokaal pieken opvangen, de benutting van bestaande aansluitingen vergroten en bedrijfsprocessen ondersteunen wanneer uitbreiding van het net nog niet mogelijk is.

Tegelijkertijd worden batterijprojecten zelf gehinderd door schaarse netcapaciteit, onduidelijke marktregels en lange vergunningstrajecten. De marktbehoefte betreft daarom niet alleen technisch goed presterende systemen, maar ook voorspelbare verdienmodellen, verzekerbaarheid, heldere veiligheidskaders, betrouwbare data en goede aansluiting op net- en marktmechanismen.



Figuur 8 Wereldwijde historische en verwachte jaarlijkse batterijvraag voor BESS en stationaire batterijopslag[4]

De belangrijkste marktsegmenten richting 2030 zijn:

- **Utility-scale BESS:** grootschalige opslag voor energiehandel, balanceringsdiensten, congestieondersteuning en systeemflexibiliteit.
- **Colocatie met zon en wind:** opslag die curtailment beperkt, aansluitingen beter benut en het productieprofiel optimaliseert.
- **Industrie, logistiek en utiliteit:** systemen voor peak shaving, zelfverbruik, elektrificatie, bedrijfscontinuïteit en overbrugging van netbeperkingen.
- **Energiehubs:** opslag die wordt gecombineerd met lokale opwek, vraagsturing en laadinfrastructuur.
- **Buurt- en thuisbatterijen:** vooral relevant wanneer zij via aggregatie aantoonbare systeemdiensten leveren, eventueel in combinatie met bidirectioneel ladende voertuigen.
- **Mobiele en semi-mobiele opslag:** tijdelijke of verplaatsbare energievoorziening voor bouw, evenementen, scheepvaart en locaties met beperkte netcapaciteit.

Productspecificaties, toepassingsprofiel en TCO

De businesscase van een stationair batterijsysteem wordt bepaald door de Total Cost of Ownership (TCO), niet alleen door de aanschafprijs. Het systeem moet aansluiten op de inzetduur, het laad- en ontlaadprofiel, de beoogde markten en de systeemdiensten die worden geleverd.

Technologiekeuzes beïnvloeden de TCO via efficiency, levensduur, veiligheid, onderhoud, restwaarde en gevoeligheid voor grondstof- en ketenrisico's. De goedkoopste batterij bij aanschaf is daarom niet altijd de beste keuze over de volledige levensduur.

Belangrijke kostencomponenten zijn:

- investeringen in batterijen, vermogenselektronica, Energy Management Systemen en civiele inpassing;
- onderhoud, software, verzekering en vervanging;
- nettarieven en andere heffingen;
- vergunningen, transactiekosten en inkomstenverlies door vertraging.

Dimensie	Belangrijk nu	Richting 2030–2035
CAPEX per kWh	Lithium-IJzer-Fosfaat (LFP)-SDES is sterk in prijs gedaald en bepaalt veel huidige businesscases.	Verdere kostendaling voor LFP; LDES moet concurreren op combinatie van €/kW, levensduur en systeemwaarde.
Round-trip efficiency	Li-ion SDES circa 85–92%.	Blijft belangrijk; voor LDES mag efficiency lager zijn als het systeemprofiel dat rechtvaardigt.
Cyclische levensduur	SDES typisch 6.000–10.000 cycli.	Hogere effectieve levensduur vereist; voor LDES telt ook kalenderlevensduur zwaar.
Veiligheid	Thermal runaway, brand en gasvorming zijn belangrijke aandachtspunten.	Strengere normen en meer nadruk op een inherent veilig ontwerp.
Materialen / circulariteit	Li-ion-ketens blijven gevoelig voor afhankelijkheden.	Meer nadruk op niet-kritieke materialen, batterijpaspoorten en hoogwaardige recycling, en op Europese productie en aanvoeringsketens.
Software /data	EMS en BMS breed aanwezig.	Meer AI-ondersteunde optimalisatie, cybersecurity en geïntegreerde data waardeketens.

Veel LDES-concepten bevinden zich nog in een lagere ontwikkelingsfase. Zij kennen vaak hogere investeringskosten, lagere efficiency en minder toegang tot commerciële financiering dan lithium-ionoplossingen. Door de dalende prijs van lithium-ion zal SDES waarschijnlijk ook een deel van de markt tot ongeveer acht uur opslag bedienen.

SDES en LDES moeten daarom niet als concurrerende alternatieven worden gezien, maar als complementaire onderdelen van één flexibiliteitsstrategie.

Investeringen in LDES zijn vooral zinvol wanneer zij worden gericht op een beperkt aantal technologieën die passen bij Nederlandse systeembehoeften en perspectief hebben op Europese opschaling. Demonstratieprogramma's en marktmodellen die investeringszekerheid bieden zijn daarvoor noodzakelijk.

Strategische keuzes en Nederlandse positionering

Voor de Nederlandse strategie is het van belang scherp te kiezen waar wel en niet op wordt ingezet. Voor Nederland ligt de grootste kans niet in de massaproductie van standaard batterij hardware, zoals generieke massaproductie van standaard lithium-ionopslagsystemen, gestandaardiseerde batterijcontainers zonder onderscheidende systeemlaag, commodity hardware en bulk-celproductie voor wereldmarkten die reeds worden gedomineerd door grote Aziatische en Amerikaanse spelers.

Er liggen wél kansen op het gebied van batterijtechnologie voor nieuwe, non-lithium LDES-concepten (chemieën en technologieën) en geavanceerde systeemoplossingen. Dit laatste betreft in het bijzonder systeemintegratie, energie- en batterijmanagementsystemen, flexibiliteitsplatforms en congestie managementoplossingen, software voor dispatch en revenue stacking, safety engineering, testen, certificering, validatie en circulaire oplossingen.

De strategische prioritering van batterijsystemen voor stationaire toepassingen moet daarom niet alleen gebaseerd zijn op systeemwaarde, maar ook op de vraag in welke segmenten Nederlandse partijen een onderscheidende positie in de waardeketen kunnen opbouwen. De strategische segmenten en de bijbehorende toelichting voor stationaire toepassingen zijn als volgt:

Segment	Toelichting
Utility-scale SDES voor netondersteuning	Grote thuismarkt, directe systeemwaarde en duidelijke kansen voor Nederlandse partijen in systeemintegratie, Energy Management Systemen (EMS) en Virtuele Energie Systemen (VPP), safety engineering, testing, certificering en net-interface ontwerp.
Co-located opslag bij zon en wind	Verbetert benutting van aansluiting en opwekking, beperkt curtailment; de Nederlandse kans ligt vooral in integratie met opwekprofielen, dispatch- en EMS-software, netkoppeling, veiligheidsontwerp en projectvalidatie, minder in generieke container hardware.
Opslag voor industrie en utiliteit	Relevant voor elektrificatie, congestievermindering, peak shaving en bedrijfscontinuïteit; Nederlandse toegevoegde waarde zit vooral in maatwerk-systeemontwerp, integratie met bedrijfsprocessen, veiligheidsconcepten, data-analyse en servicegerichte exploitatiemodellen.
Energiehubs en congestiegerichte toepassingen	Hoge maatschappelijke waarde in regio's met zware netschaarste; dit segment biedt Nederland vooral kansen in multi-asset integratie, congestiesturing, interoperabiliteit, lokale marktplatforms en gebiedsgerichte systeemarchitectuur.
LDES op basis van niet-kritieke materialen	Nodig voor langdurige flexibiliteit en kansrijk voor Nederlandse technologieontwikkeling, demonstratie, validatie, systeemimpassing en gerichte opschaling van een beperkt aantal kansrijke concepten, inclusief het stimuleren van Europese supply chains.
Thuis- en buurtbatterijen	Kansen liggen vooral in aggregatie, platforms, interoperabiliteit, cybersecurity en lokale systeemintegratie, echter minder in hardware productie.
Mobiele en semi-mobiele BESS	Groeiende niche voor bouw, events en maritieme sector; Nederlandse kansen liggen in robuuste modulaire systemen, hybride integratie, veiligheidsengineering en serviceconcepten met koppeling naar andere Nederlandse eindmarkten.
EMS, VPP, design- en datatools	Hoge toegevoegde waarde, exportpotentieel en sterke aansluiting op Nederlandse competenties in software, optimalisatie, cybersecurity, interoperabiliteit en levenscyclus-data.
Generieke hoog volume celproductie en standaard BESS-hardware	Hoge kapitaalsvereisten, beperkte differentiatie en sterke internationale concurrentie; weinig kans op duurzaam Nederlands concurrentievoordeel zonder onderscheidende systeem laag of technologische niche.

De combinatie van veel hernieuwbare productie, geavanceerde energiemarkten, digitalisering en zware netcongestie maakt Nederland bovendien geschikt als proeftuin. Oplossingen kunnen hier worden ontwikkeld en gevalideerd en vervolgens in Europa worden opgeschaald. Nederland kan zo uitgroeien tot een specialist in de integratie van stationaire opslag in complexe energiesystemen.

De belangrijkste opgave is om de grote projectpijplijn om te zetten in operationele assets, met het doel om richting 2035 geselecteerde technologieën op commerciële schaal inpasbaar te maken.

Voor LDES-concepten op basis van niet-kritieke, circulaire en duurzame materialen ligt de nadruk voorlopig op innovatie en demonstratie; brede commerciële toepassing komt naar verwachting later op gang. Dit vraagt om een marktinrichting die LDES op systeemwaarde beloont en commerciële inpassing mogelijk maakt.

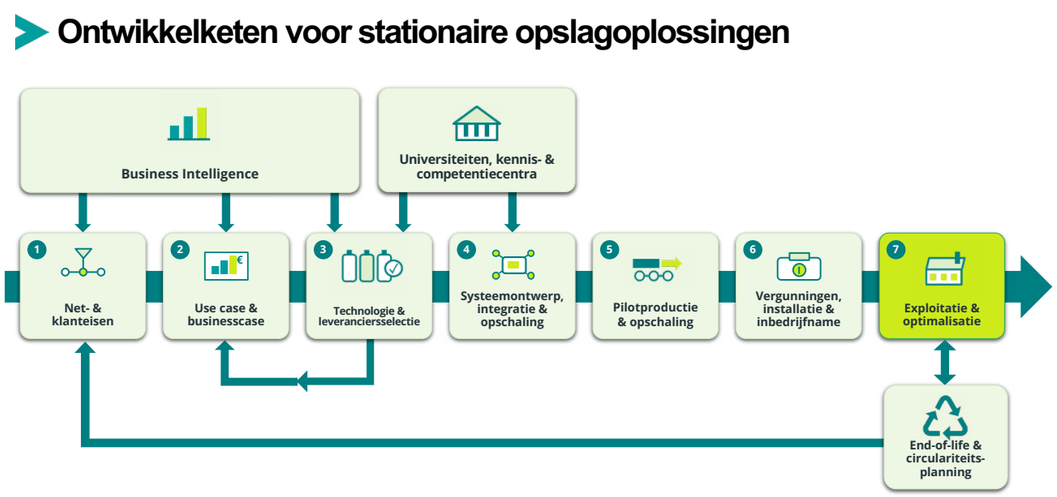
3.2.2 Technologie, Data en Circulariteit

De basis van stationaire batterijsystemen bestaat uit cel-, module- en packtechnologie, systeemontwerp en circulariteit. Aanvullend zijn netintegratie, EMS en VPP-platforms van belang. Deze systemen brengen nieuwe vraagstukken mee rond interoperabele data, cybersecurity, validatie en aansturing.

3.2.2 Technologie, Data en Circulariteit

De basis van stationaire batterijsystemen bestaat uit cel-, module- en packtechnologie, systeemontwerp en circulariteit. Aanvullend zijn netintegratie, EMS en VPP-platforms van belang. Deze systemen brengen nieuwe vraagstukken mee rond interoperabele data, cybersecurity, validatie en aansturing.

3.2.2.1 Technologie



Figuur 9 Het scala aan activiteiten in de ontwikkelketen voor stationaire batterijsystemen (stappen 1–7), overkoepelend ondersteund door Business Intelligence, Human Capital, internationalisering en kennis- en competentiecentra

De succesvolle integratie van energieopslagsystemen in het elektriciteitsnet omvat een reeks activiteiten, zoals weergegeven in Figuur 9.

Celtechnologie: chemieën en positionering
LFP zal richting 2030 waarschijnlijk de dominante technologie blijven voor utility-scale, co-located en industriële SDES-toepassingen. De technologie combineert lage kosten, een hoge efficiency, een lange cyclische levensduur en een relatief gunstig veiligheidsprofiel. De Nederlandse uitrol zal daarom voorlopig vooral bestaan uit bewezen systemen met een ontlaadduur van één tot vier uur.

Voor LDES verschuift de aandacht naar alternatieve technologiepaden zoals flowbatterijen, natrium-gebaseerde concepten en metaal-lucht-systemen.

Deze technologieën zijn strategisch relevant omdat zij langere ontlaadduur kunnen bieden, deels gebruik maken van minder kritieke materialen en beter kunnen aansluiten op toekomstige systeembehoeften tijdens langdurige onbalans. Daarbij gaat het zowel om celtechnologische innovatie als om bredere stationaire systeemconcepten, met verschillende ontwikkelfasen en uiteenlopende tijdshorizonten voor marktintroductie. Deze technologieën blijven tot 2030 veelal beperkt tot pilots, demonstraties en nichetoepassingen. Toch is het belangrijk nu kennis en praktijkervaring op te bouwen, omdat de behoefte aan langdurige opslag na 2030 snel kan toenemen.

Chemie	Primair Segment	Sterktes	Belangrijkste Aandachtspunten
LFP Li-ion	SDES 1–4 uur	Lage kWh-kosten, hoge efficiency, hoge cyclische levensduur, relatief veilig (m.n. t.o.v. Li NMC (Lithium-Nikkel-Mangaan-Kobalt -ion).	Importafhankelijkheid en beperkte Nederlandse grip op de wereldwijde keten. In opkomst: LMFP (Lithium Mangaan IJzer Fosfaat)-ion; nader te positioneren binnen SDES-toepassingen op basis van kosten, veiligheid en marktvolwassenheid.
NMC Li-ion	SDES-niche	Hogere energiedichtheid.	Hogere kosten, kritieke materialen, minder gunstig veiligheidsprofiel.
Flowbatterijen	LDES 8–100 uur	Vermogen en energie apart schaalbaar, lange levensduur, geschikt voor langdurige opslag.	Lagere efficiency, hogere systeemcomplexiteit; nu in overgang naar marktvolwassenheid, met focus op demonstraties en opschaling naar eerste commerciële projecten.
Natrium-gebaseerd	SDES/LDES	Minder afhankelijk van lithium, nikkel en kobalt, potentieel lage materiaalkosten en hoge prestaties bij lage temperaturen.	Vroege opschaling, nog onzekere kosten- en supply-chain-ontwikkeling. Nota bene: aangekondigde uitrol van 5 GWh natrium (Na)-ion BESS vanaf 2027 door CATL in Nederland en West-Europa[24]
Metaal-lucht	LDES	Niet-kritieke materialen, potentieel aantrekkelijk voor zeer lange duur.	Nu in TRL 7-8 met vroege commerciële productie vanaf ca. 2027; uitdaging in opschaling, naast verdere verbetering van efficiency en levensduur.

Module- en packtechnologie
Modulaire en schaalbare systemen, gestandaardiseerde interfaces, goed thermisch beheer, onderhoudbaarheid en ontwerp voor recycling zijn essentieel. Thermisch beheer, vermogenselektronica en systeemsturing moeten daarom gezamenlijk worden ontwikkeld. Een belangrijke uitdaging is dat de prestaties van afzonderlijke cellen niet automatisch voorspellend zijn voor het gedrag van een volledig pack. Meer kennis is nodig over degradatiemechanismen en hun effecten op module- en systeemniveau. Een aanpasbaar BMS moet verschillende batterijchemieën kunnen ondersteunen. Dit maakt betrouwbare grootschalige toepassing mogelijk en vergemakkelijkt de integratie van nieuwe chemieën.

Batterij- en netsysteem management
Een stationair opslagsysteem bestaat uit meer dan batterijen. Het BMS bewaakt de cellen en modules; omvormers en andere vermogensconversiesystemen verzorgen de koppeling met het net. Het EMS stuurt het geheel aan op basis van technische omstandigheden, marktprijzen en systeemdiensten.

Gestandaardiseerde interfaces, flexibele software en interoperabele vermogenselektronica maken het mogelijk verschillende batterijen en componenten binnen één systeemarchitectuur toe te passen. Hergebruik van bewezen subsystemen uit andere markten kan ontwikkelingstijd en -kosten verlagen.

Door het groeiende aandeel omvormergebaseerde opwekking neemt de natuurlijke traagheid in het elektriciteitsnet af. Nieuwe netcodes zullen daarom strengere eisen stellen aan omvormers en opslaginstallaties. Grid-forming technologie en kunstmatige traagheid kunnen bijdragen aan frequentieondersteuning en systeemstabiliteit. Hier liggen kansen voor Nederlandse systeemintegratoren, softwarebedrijven en kennisinstellingen.

3.2.2.2 Data/Veiligheid/Testen

Systeemtechnologie vormt een belangrijk onderscheidend domein binnen stationaire batterijsysteem toepassingen. Het BMS levert data over cel- en modulegedrag, veiligheid, prestaties en levensduur. Het EMS gebruikt deze informatie om batterijen economisch en technisch aan te sturen. VPP-platforms bundelen gedistribueerde systemen, zoals thuis-, buurt- en industriële batterijen, tot één virtuele centrale die flexibiliteitsdiensten kan leveren.

De Nederlandse kans ligt vooral in interoperabele data- en sturingslagen, forecasting, cybersecurity en integratie met net- en marktplatforms. Test-, validatie- en veiligheidsinfrastructuur is nodig om systemen te kwalificeren en certificeren. Bij stationaire opslag moet naast de batterij zelf ook de volledige locatie worden beoordeeld: veiligheidsafstanden, bereikbaarheid voor hulpdiensten, brandbeheersing en interactie met de omgeving.

Kaders zoals PGS 37-1 (richtlijn voor de veilige opslag van elektriciteit in energieopslagsystemen) zijn belangrijk, maar vragen om verdere harmonisatie en praktische toepassing. Gemeenten, provincies en veiligheidsregio's hebben behoefte aan gedeelde kennis en duidelijke procedures. Nederland kan hiermee een internationaal herkenbare positie opbouwen in safety engineering, testen, certificering en vergunningsondersteuning.

3.2.2.3 Circulariteit

Hergebruik
Batterijen afkomstig uit mobiliteitstoepassingen kunnen in theorie worden herbestemd voor stationaire opslag. De businesscase is echter onzeker door de lage prijs van nieuwe systemen, garantievraagstukken en verschillen in resterende levensduur en conditie. Hergebruik en herbouw zijn alleen verantwoord wanneer uniforme protocollen bestaan voor diagnostiek, reparatie, remanufacturing en certificering. In Nederland onstaan al de eerste initiatieven voor herbouw van batterijsystemen, maar opschaling vraagt om nauwe samenwerking tussen tussen mobiliteitsproducenten, stationaire systeemleveranciers en testpartijen.
Voor Nederland ligt de kans vooral in beoordelingsmethoden, testdiensten, batterijpaspoorten en circulaire businessmodellen. Daarmee kan ons land een cross-sectorale kennispositie opbouwen, aanvullend op concrete herbouwactiviteiten.

Recycling
Batterijen die niet langer veilig of economisch inzetbaar zijn, moeten worden gerecycled. De benodigde technologieën en waardeketens worden verder behandeld in paragraaf 3.5.

3.2.3 Randvoorwaarden

Een sterke positie vraagt om:

- **Duurzame businessmodellen.** SDES kent meerdere inkomstenstromen, maar deze zijn niet altijd voorspelbaar. De systeemwaarde van LDES wordt nog onvoldoende beloond.
- **Financiering en risicodeling.** Demonstraties en first-of-a-kind projecten hebben instrumenten nodig voor de stap van validatie naar commerciële toepassing.
- **Structurele business intelligence.** Marktgroei, flexibiliteitsvraag, congestiepatronen en technologieontwikkeling binnen elektriciteitsnetten moeten systematisch worden gevolgd en gedeeld om beleid en investeringen adaptief te kunnen sturen.
- **Regie en samenwerking.** Bedrijven, netbeheerders, overheden, testfaciliteiten en kennisinstellingen moeten standaarden, marktinformatie en uitvoeringskennis beter afstemmen.

3.2.4 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Europese proeftuin voor geïntegreerde opslagoplossingen. In 2030 is Nederland de Europese proeftuin voor grootschalige demonstratie- en validatieprojecten van geïntegreerde stationaire opslag (SDES- en LDES-oplossingen, EMS en VPP-platforms) in utility-scale, co-located, C&I en congestiegerichte toepassingen. Data, software, cybersecurity, veiligheidsengineering, testen en certificeren vormen een integraal en onderscheidend onderdeel van de Nederlandse propositie voor stationaire batterijsystemen. Richting 2035 is deze propositie uitgegroeid tot structurele commerciële waardecreatie.

Moonshot 2 – 2030-2035 Koppositie in LDES-technologieën en launching market. Richting 2030 realiseert Nederland een koppositie in de voor Nederland meest kansrijke LDES-technologieën op basis van niet-kritieke en ruim beschikbare materialen. Deze LDES-concepten zijn dan doorontwikkeld van TRL 5–7 naar commercieel valideerbare systemen. Zij worden via demonstratie, praktijkvalidatie, marktvalorisatie, first commercial deployment en gerichte opschaling ingebed in geïntegreerde systeemoplossingen voor het Nederlandse en Europese energiesysteem.

Nederland fungeert als launching market voor deze LDES-concepten, ondersteund door passend marktontwerp, gerichte publiek-private samenwerking en, waar relevant, productievoorbereiding.

Moonshot 3 – 2035 Strategische control points in de opslagwaardeketen en internationale schaalproductie. In 2035 beschikt Nederland over een sterke internationale marktpositie in de voor Nederland meest kansrijke SDES- en LDES-oplossingen op basis van circulaire en duurzame materialen. Nederlandse bedrijven vervullen sleutelrollen in Europese waardeketens voor technologie, software, testen, validatie en productie. Zij exporteren geïntegreerde opslagoplossingen naar andere Europese en internationale markten. Daarmee verschuift de Nederlandse rol van vooral integratie en pilots naar structurele commerciële waardecreatie in onderscheidende opslagoplossingen en levert Nederland een aantoonbare bijdrage aan Europese strategische autonomie in energieopslag.

3.2.5 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit focusthema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Stel nationale doelen vast.** Formuleer doelen voor opslagvermogen en -capaciteit in 2030 en 2035 en leg vast hoe SDES en LDES elkaar aanvullen.
- **Verminder beleids- en tariefonzekerheid.** Beloon (langdurige) flexibiliteit, congestieverlichting, netondersteuning en leveringszekerheid beter in markt- en tariefstructuren.
- **Voorkom belemmerende dubbele nettarieven.** Zorg dat opslag die het net ondersteunt niet structureel wordt benadeeld ten opzichte van buurlanden.
- **Versnel vergunningverlening.** Harmoniseer veiligheids- en vergunningskaders en ondersteun decentrale overheden en veiligheidsregio's.
- **Ontwikkel standaarden.** Realiseer een nationale EMS/VPP-blauwdruk, interoperabiliteitsstandaarden en een structuur voor cybersecurity, validatie en certificering.
- **Creëer een launching market.** Prioriteer utility-scale, co-located en industriële opslag en ontwikkel een meerjarig demonstratieprogramma voor geselecteerde LDES-concepten.
- **Stimuleer circulariteit en second-life instrumenten.** Ontwikkel batterijpaspoorten, lifecycle-data, diagnostiek en protocollen voor herbestemming.

- **Bouw een validatie- en opschalingsecosysteem.** Creëer ruimte voor opschaling, marktvalorisatie en productie, met bijzondere aandacht voor kansrijke LDES-concepten. Verbind testfaciliteiten, demonstratielocaties en industrie.
- **Investeer in menselijk kapitaal.** Vergroot de uitvoeringscapaciteit bij bedrijven, netbeheerders, kennisinstellingen en overheden.
- **Versterk Europese samenwerking.** Positioneer Nederlandse partijen in Europese programma's, waardeketens, standaarden en regelgeving.

Deze acties moeten onderdeel vormen van één nationale ontwikkellijn voor stationaire opslag. Nationale beleidskaders bieden hiervoor een basis, maar snelle uitvoering is noodzakelijk.

3.3 (Next Generation) Componenten en Materialen

Innovaties in batterijcomponenten en -materialen zijn bepalend voor de volgende generatie batterijtechnologie. Zij richten zich op hogere energiedichtheid, langere levensduur en betere veiligheid, maar ook op lagere kosten, duurzamere productie en een geringere afhankelijkheid van kritieke grondstoffen. Verschillende technologische routes ontwikkelen zich naast elkaar. Sommige materialen staan dicht bij commerciële toepassing; andere bevinden zich nog in de onderzoeks- of pilotfase. Elke technologie volgt daarbij een eigen pad van ontwikkeling, kwalificatie en opschaling.

3.3.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

De batterijmarkt wordt in sterke mate bepaald door de eisen van eindgebruikers en OEM's, waarbij batterijen fungeren als een enabling technologie waarvan de waarde afhankelijk is van de toepassing. Naarmate elektrificatie zich uitbreidt naar meer toepassingsgebieden dan EV, nemen ook de verschillen in prestatie-eisen toe en daarbij de best te kiezen batterijchemie en technologie. Omdat geen enkele batterijtechnologie alle toepassingen optimaal bedient, ontstaat ruimte voor diversificatie van oplossingen, afgestemd op specifieke eisen zoals energiedichtheid, levensduur, laadsnelheid, veiligheid en grondstoffenbeschikbaarheid, en in mindere mate op kosten. Daarbij geldt dat actieve materialen, afhankelijk van celchemie en -ontwerp, een aanzienlijk aandeel vertegenwoordigen in zowel de kosten als de waardecreatie van batterijen; doorgaans in de orde van 30–50% van de totale celkosten, wat hun strategische belang onderstreept.

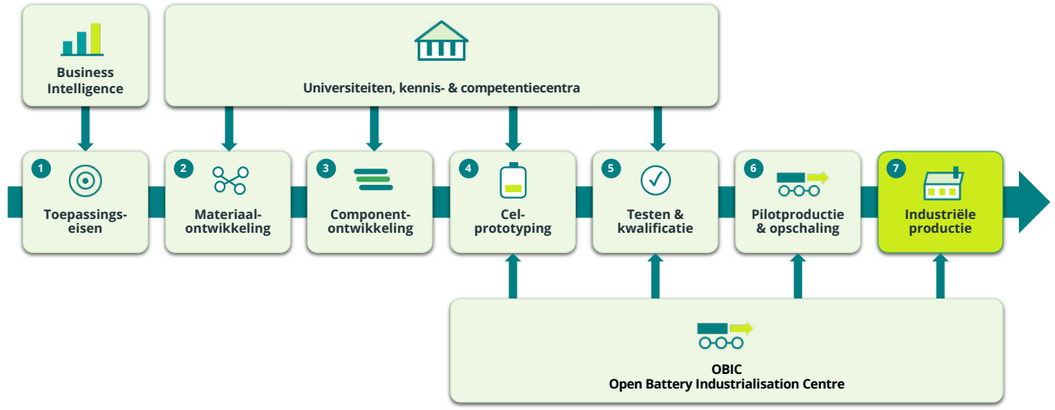
De ontwikkeling van next-generation anodematerialen illustreert duidelijk hoe innovatie in batterijcomponenten kan leiden tot substantiële economische waardecreatie. Nederlandse startups hebben op dit vlak een sterke technologische voorsprong opgebouwd en zetten inmiddels de eerste stappen richting markttoepassing. Richting 2030 wordt de markt voor pure anodematerialen geschat op circa USD 3,7 miljard[25], oplopend tot USD 17–81 miljard[26] wanneer de bredere anodewaardeketen (alleen actieve materiaal of volledige anode electrode) wordt meegenomen.

Nieuwe batterijceltechnologieën betreden de markt doorgaans gefaseerd. In eerste instantie vinden zij hun weg naar kleinere of gespecialiseerde toepassingen, zoals consumentenelektronica, drones en e-bikes, waar kortere ontwikkelcycli en een hogere bereidheid om te betalen voor prestatieverbeteringen een eerste markttoegang mogelijk maken. Per opschalingsstap neemt vervolgens de productiecapaciteit toe en ontwikkelt de technologie zich naar een gunstiger prijs-prestatieniveau.

De automotive-industrie is op korte termijn de grootste en meest richtinggevende markt. Toegang tot deze waardeketen biedt hoge volumes, langdurige industriële relaties en grote economische impact. De kwalificatie-eisen en prijsdruk zijn echter hoog. Zware mobiliteit en industriële voertuigen volgen doorgaans nadat een technologie zich in eerdere toepassingen heeft bewezen. Luchtvaart, eVTOL en drones kunnen juist optreden als aanjagers van innovaties met een hoge energiedichtheid[27]. Wanneer elektrische vliegtuigen op termijn een relevant deel van de korte-afstandsvluchten overnemen, kan hiervoor tientallen GWh aan jaarlijkse batterijproductie nodig zijn. Business intelligence is daarom essentieel om technologische roadmaps tijdig te verbinden aan marktontwikkeling, klantbehoeften en kansen in internationale waardeketens.

3.3.2 Technologie, Data & Circulariteit

Ontwikkelketen next-gen materialen en componenten



Figuur 10 De reeks activiteiten die komt kijken bij het ontwerpen en implementeren van batterijmaterialen en componenten van de volgende generatie in batterijcellen

3.3.2.1 Technologie

Het ontwerpen en implementeren van batterijmaterialen en -componenten van de volgende generatie in batterijcellen omvat een reeks activiteiten, zoals weergegeven in Figuur 10.

Energiedichtheid blijft een belangrijke drijfveer voor nieuwe materialen, maar voor brede marktadoptie zijn ook levensduur en kostprijs doorslaggevend. Richting 2030 zal de diversiteit aan batterijchemieën en celconcepten toenemen.

Lithium-iontechnologieën zoals LFP blijven voorlopig dominant in grote-volumemarkten. Daarnaast ontstaan varianten zoals LMFP, high-nickel en lithium-manganese-rich kathodes.

Bij anodematerialen verschuift de ontwikkeling van conventioneel grafiet naar alternatieve koolstoffen, siliciumcomposieten, zuiver silicium en uiteindelijk lithium-metaal.

Nederland heeft hierin internationaal onderscheidende bedrijven, zoals bijvoorbeeld:

- E-magy ontwikkelt high-silicon anodemateriaal;
- LeydenJar richt zich op zuivere siliciumanodes;
- LionVolt ontwikkelt lithium-metaalanodes;
- CarbonX en Thoriant werken aan alternatieve koolstofmaterialen.

Deze technologieën kunnen energiedichtheden van 400 Wh/kg of meer mogelijk maken. Daarnaast kunnen zij bijdragen aan strategische autonomie, materiaalbesparing en een duurzamere waardeketen.

Natrium-ionbatterijen zijn recent naar voren gekomen als een veelbelovend alternatief voor lithium-ionbatterijen voor specifieke toepassingen, met name stationaire energieopslag en lichte mobiliteit. Hoewel zij verschillende voordelen bieden, waaronder een beter behoud van prestaties bij

lage omgevingstemperaturen, zal hun lange termijn acceptatie in de markt grotendeels afhangen van hun vermogen om te concurreren met lithium-ionbatterijen op het gebied van kosten, prestaties en de totale waardepropositie.

Solid-statebatterijen zullen naar verwachting eerst worden toegepast in markten waar veiligheid en energiedichtheid zwaarder wegen dan kosten. De snelheid van invoering hangt af van productiecomplexiteit, benodigde nieuwe apparatuur en de meerprijs ten opzichte van bestaande lithium-iontechnologie. Solid-state kan bijzonder relevant zijn voor Nederlandse silicium- en lithium-metaalanodes, omdat deze technologie de prestaties en levensduur daarvan kan verbeteren.

Voor de langere termijn zal de strategische positie echter in toenemende mate afhangen van het vermogen om ook nieuwe generaties elektrolyten, membranen en binders te ontwikkelen. Alternatieve celchemieën zoals anodeloze oplossingen, lithium-zwavel-, lithium-lucht-, natrium-metaal- en natrium-zwavelconcepten zijn eveneens veelbelovend. Deze technologieën bevinden zich nog in een eerdere ontwikkelingsfase, maar bieden op termijn het potentieel om een hoge energiedichtheid te combineren met een lager gebruik van kritieke grondstoffen. De Nederlandse expertise in katalyse en dunnefilm technologie biedt hiervoor een onderscheidende uitgangspositie.

Om te voldoen aan de levensduureisen van grotere mobiliteitstoepassingen, waaronder automotive (typisch ≥1500 cycli) en de heavy duty (≥4000 cycli), is verdere ontwikkeling nodig op het gebied van materiaalcompatibiliteit tussen anode, kathode en elektrolyt, de inzet van coatings, additieven en nieuwe elektrolyten, de optimalisatie van laad- en ontlaadstrategieën en validatie op volledig celniveau (full-cell). Andere eigenschappen, zoals snelladen en veiligheid, blijven belangrijk, maar zijn vaak meer toepassing specifiek en worden steeds vaker op systeemniveau opgelost.

Productiekosten worden in belangrijke mate bepaald door procesrendement, schaal en apparatuur. Industrialiseringsstappen moeten daarom gefaseerd worden uitgevoerd. De eerste productievolumes kunnen aansluiten op nichemarkten en early adopters. Vervolgens kan worden opgeschaald naar circa 0,5 tot 1 GWh per jaar. Dat past bij de Nederlandse strategie: hoogwaardige materialen en gespecialiseerde productie ontwikkelen, in plaats van concurreren met internationale massaproductie van standaardcellen.

3.3.2.2 Circulariteit

Circulariteit en leveringszekerheid worden steeds belangrijker voor het concurrentievermogen van batterijmaterialen. Met de via Europese regelgeving opgelegde minimale eisen voor gerecycled materiaal vanaf 2031 (onder andere voor kobalt, lithium en nikkel) ontstaat zowel druk als stimulans om recyclingcapaciteit op te bouwen en alternatieve materialen te ontwikkelen. Tegelijkertijd neemt de aandacht toe voor het vermijden van het gebruik van PFAS en andere gefluoreerde stoffen, waarvoor strengere regelgeving wordt verwacht. Dit zal de transitie naar veiligere en duurzamere materiaalkeuzes versnellen.

Naast lithium-ion ontwikkelen zich ook alternatieve batterijchemieën, zoals natrium-, magnesium- en zink-ion, redox-flow en andere systemen. Deze zijn vooral interessant voor toepassingen waar kosten, veiligheid, grondstofbeschikbaarheid en ecologische impact belangrijker zijn dan maximale energiedichtheid. Daarmee dragen zij bij aan een meer gediversifieerd, duurzaam, robuust en en weerbaar Europees batterijsysteem. Techno-economische en ecologische impactstudies zijn essentieel om voor verschillende toepassingen de meest geschikte technologieën te identificeren.

Safe and Sustainable by Design en levenscyclusanalyse moeten vanaf de eerste ontwikkelingsfase worden toegepast. Ook levensduurverlenging heeft een grote invloed op de totale milieu-impact: een batterij die langer meegaat, hoeft minder snel te worden vervangen en gebruikt over de levenscyclus minder materiaal en energie.

Geharmoniseerde procedures zijn nodig voor full-cell validatie, levensduurvoorspelling en veiligheidsbeoordeling. Dit is vooral belangrijk voor markten met zware kwalificatie-eisen, zoals de automotive sector, Heavy Duty toepassingen en stationaire opslag.

3.3.3 Randvoorwaarden

Om in het internationale speelveld van batterijmaterialen een significante rol te kunnen spelen, moet worden voldaan aan een reeks van randvoorwaarden.

- **Toegang tot financiering.** Voldoende en stabiele toegang tot durfkapitaal, groeifinanciering, projectfinanciering, subsidies, Europese fondsen en IPCEI-instrumenten is noodzakelijk om de gehele innovatieroute te ondersteunen, van fundamenteel onderzoek en pilots tot industrialisatie.

- **Toegang tot gedeelde faciliteiten.** Bedrijven hebben toegang nodig tot R&D-infrastructuur, pre-pilotlijnen, pilotfaciliteiten en industriële testomgevingen. Nauwe samenwerking tussen materiaalontwikkelaars, machinebouwers en kennisinstellingen ondersteunt de ontwikkeling en opschaling van flexibele en efficiënte productieprocessen.

- **Europese ketenintegratie en marktvalidatie.** Vroege samenwerking met Europese celproducenten, OEM's en eindgebruikers is essentieel voor kwalificatie, validatie en marktadoptie van nieuwe batterijmaterialen. Europese harmonisatie van testprocedures, validatieprotocollen en dataformaten ondersteunt een snellere markttoegang en industriële opschaling.

3.3.4 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Internationaal concurrerende batterijcomponenten. Minimaal drie duurzame en internationaal concurrerende Nederlandse batterijcomponenten worden op een industriële schaal van 0,5 tot 1 GWh per jaar geproduceerd. De regie over de kerntechnologie en intellectuele eigendom blijft bij Nederlandse partijen.

Moonshot 2 – 2030 Gefaseerde marktadoptie. Nederland beschikt over een samenhangend ecosysteem waarin kennisinstellingen, equipmentleveranciers, industrie, overheid en eindgebruikers gezamenlijk batterijinnovaties naar de markt brengen. Technologieën vinden eerst toepassing in niches zoals consumentenelektronica en drones en groeien vervolgens door naar defensie, Heavy Duty, luchtvaart en automotive.

Moonshot 3 – 2035 Nederlandse batterijmaterialen voor elektrische voertuigen. Ten minste één Nederlands materiaal- of celconcept is volledig gekwalificeerd voor toepassing in elektrische voertuigen en wordt toegepast in de productie van EV-batterijen.

3.3.5 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit focusthema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Versnel R&D voor levensduurverlenging.** R&D naar huidige Nederlandse anodematerialen (lithium-ion) van ten minste 1.500 cycli, met focus op degradatie, geoptimaliseerde (ont) laadeigenschappen, materiaalcompatibiliteit en full-cell validatie met energiedichtheid van minimaal 400 Wh/kg.

- **Blijf investeren in next-generation technologie.** Ondersteun nieuwe materialen, elektrolyten en alternatieve batterijchemieën voor de lange termijn.

- **Versterk samenwerking met kennisinstellingen.** Verbind materiaal- en proceskennis, geavanceerde karakterisering en talentontwikkeling structureel met het bedrijfsleven.

- **Harmoniseer testen en validatie.** Ontwikkel gedeelde procedures, dataformaten en methoden voor benchmarking, certificering en levensduurvoorspelling.

- **Schaal materiaalproductie op.** Investeer in productie-infrastructuur zodat bedrijven kunnen doorgroeien naar productievolumes tussen de 0,5 tot 1 GWh per jaar.

- **Organiseer markttoegang.** Bouw strategische samenwerkingen met OEM's en celproducenten, en gebruik nichemarkten als opstap naar automotive en andere grote markten.

- **Vergroot circulariteit.** Stimuleer CRM-arme, PFAS-vrije en recyclebare materialen en verbind materiaalontwikkeling met recyclingtechnologie.

- **Mobiliseer financiering.** Ondersteun de hele ontwikkelketen, van R&D tot industrieel relevante schaal, en zorg voor toegankelijke publieke infrastructuur.

- **Werk aan uniforme Europese kaders.** Bevorder heldere regelgeving, standaarden en kwalificatie-eisen.

3.4 Productieapparatuur

Productieapparatuur is nodig in de gehele batterijwaardeketen; van materialen, cellen en batterijpakketten tot onderhoud, hergebruik en recycling. De wereldmarkt voor batterijproductieapparatuur groeit naar verwachting van circa USD 15,6 miljard in 2025 naar bijna USD 37 miljard in 2030[28].

De Nederlandse hightech maakindustrie beschikt over sterke competenties in precisietechnologie, mechatronica, digitalisering en geavanceerde productiesystemen, maar is nog beperkt aangesloten op de batterijmarkt. Aziatische partijen hebben in de afgelopen decennia een dominante positie opgebouwd in grootschalige, efficiënte productie van conventionele batterijcellen. Verminderen van de Europese afhankelijkheid is hier gewenst. Nederland kan die achterstand niet eenvoudig inhalen door op prijs en volume te concurreren.

Een kansrijker strategie is gericht op flexibele productieapparatuur voor huidige én next-generation batterijtechnologieën. Door productielijnen slim aanpasbaar te maken, kunnen prestaties, kwaliteit en innovatiekracht leidend worden in plaats van alleen productiekosten. Nederlandse kennis van onder meer Atomic Layer Deposition (ALD), dunnefilm technologie, Smart Industry en next-generation materialen biedt een onderscheidende uitgangspositie. Vooral in processtappen waarin precisie, flexibiliteit, kwaliteit en snelle aanpassing cruciaal zijn, liggen kansen om internationaal concurrerend te worden.

Bij modules en packs vormt de grote variatie aan ontwerpen een uitdaging. Specificaties zijn vaak toepassingsgericht, veranderen snel en volumes zijn relatief klein. Daardoor zijn standaardisatie en automatisering moeilijk. Tegelijk biedt juist deze high-mix, low-volume markt ruimte voor flexibele Nederlandse productieplatforms.

Ook in reparatie, remanufacturing en recycling ontstaan kansen. De beschikbaarheid van recyclingfeedstock is nog wisselend, waardoor grote investeringen risicovol zijn. Toch kan Nederland waarde creëren met diagnoseapparatuur, geautomatiseerde ontmanteling en apparatuur voor innovatieve recyclingprocessen.

3.4.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

Apparatuur voor productie van batterijcellen en materialen - De Europese batterijcelproductie staat onder druk. Projecten lopen vertraging op, kampen met kwaliteitsproblemen of worden financieel onzeker. Recente faillissementen tonen aan hoe moeilijk het is om op kosten en schaal te concurreren met geïntegreerde Aziatische waardeketens[29]. Dit biedt ruimte voor een andere strategie waarin Europa zich gaat onderscheiden op prestaties, innovatiekracht en toepassingsspecifieke oplossingen. Dit vereist flexibele productieplatforms, waarmee binnen dezelfde faciliteit met minimale aanpassingen uiteenlopende celchemieën, configuraties en formaten kunnen worden geproduceerd. Daarmee ontstaat niet alleen een concurrentievoordeel in huidige markten, maar ook een sterke positie voor de introductie van toekomstige batterijtechnologieën.

De Europese onderzoeksagenda ondersteunt deze koers. 'Flexible pilot lines for current and next-generation technologies' gelden als strategische prioriteit. Flexibele productiesystemen beperken de investeringen die nodig zijn om nieuwe technologie te introduceren en maken een gefaseerde route naar volume mogelijk.

Tegelijk moet de kosten van Europese productie omlaag; arbeid, energie en materialen zijn relatief duur. Apparatuurinnovaties kunnen daarom waarde toevoegen door:

- energie- en materiaalverbruik te verlagen;
- productie-uitval te beperken;
- gebruik van schadelijke stoffen en kritieke materialen terug te dringen;
- processen te digitaliseren en automatisch te optimaliseren;
- nieuwe materialen te integreren zonder volledige herbouw van de lijn.

Voorbeelden zijn lokaal gecontroleerde mini-omgevingen, dry coating, digital twinning en AI-gestuurde kwaliteitscontrole. Een latere toetreding tot de markt kan daarmee juist een voordeel zijn; Europa kan productiecapaciteit opbouwen rond efficiëntere en flexibelere technologie in plaats van verouderde installaties te kopiëren.

Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen hebben bovendien een sterke positie in siliciumanodes, lithium-metaal en andere next-generation materialen. De bijbehorende productieapparatuur kan samen met deze materialen worden ontwikkeld en via nichemarkten stapsgewijs worden opgeschaald. Zo ontstaat een route naar Europese batterijproducenten en high-performance toepassingen.

Apparatuur voor productie van batterijmodules en -packs
Europa behoudt naar verwachting een relevante positie in module- en packproductie. In de automotive sector neemt het gebruik van traditionele modules af door cell-to-packarchitecturen, maar in stationaire opslag, Heavy Duty, luchtvaart en maritieme toepassingen blijft maatwerk belangrijk. Hierop kunnen fabrikanten inspelen door te investeren in flexibele productplatformen die meerdere celformaten ondersteunen en gebruik maken van aanpasbare en zelflerende productiesystemen.

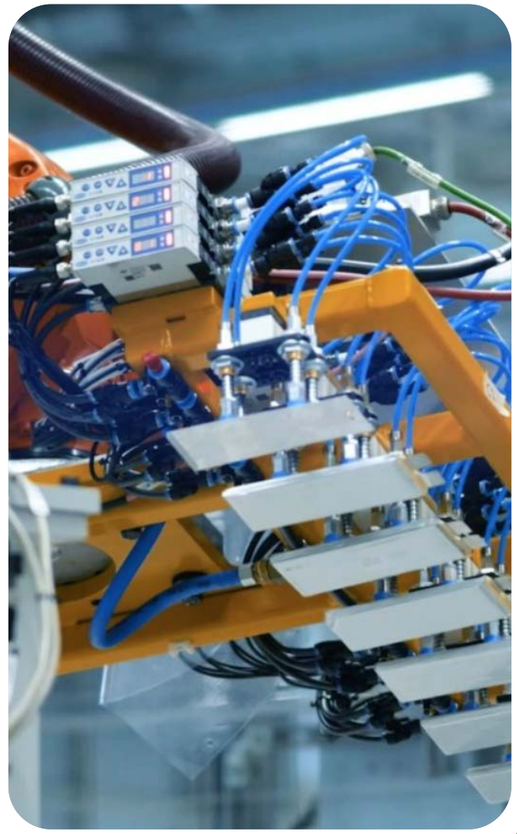
Apparatuur voor een circulaire batterijwaardeketen
De groeiende batterijvoorraad creëert een markt voor onderhoud, diagnostiek, reparatie en remanufacturing. Naarmate batterijen ouder worden, neemt de behoefte toe aan veilige hoogvoltageservice, softwarematige analyse en vervanging of revisie van onderdelen.

Nederland kan hierin een positie opbouwen met geavanceerde diagnose- en testapparatuur, kalibratie- en reparatiesystemen, remanufacturingtechnologie, datagedreven conditiebepaling, en certificering en kwaliteitsborging.

Daarvoor zijn toegang tot batterijdata, standaardisatie en gespecialiseerde opleidingen nodig. De businesscase blijft uitdagend door variatie in batterijconditie, onduidelijke aansprakelijkheid en concurrentie van goedkope nieuwe modules.

Bij recycling ligt veel nadruk op optimalisatie van bestaande chemische processen. Meer onderscheidende equipmentkansen liggen in flexibele ontlading, ontmanteling, sortering en materiaalvoorbehandeling.

De hoge investeringskosten en onzekere aanvoer van afgedankte batterijen beperken de inzet op grootschalige automatisering. Samenwerking tussen fabrikanten van packproductieapparatuur en ontwikkelaars van ontmantelingssystemen kan daarbij waardevol zijn. Kennis over assemblage, verbindingstechnologie en automatisering kan worden gebruikt om batterijen later efficiënter en veiliger uit elkaar te halen.



3.4.2 Technologie, Data & Circulariteit

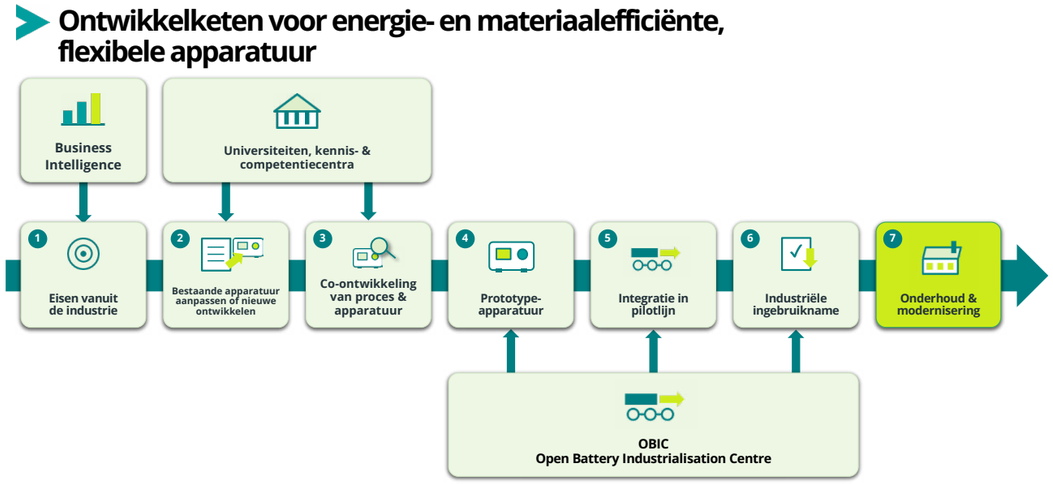
Voor apparatuur voor batterijcelproductie ligt de marktvraag vooral bij het verlagen van de Total Cost of Ownership (TCO) en het vergroten van flexibiliteit voor integratie van next-gen materialen. Deze flexibiliteit vraagt om apparatuur die productieprocessen autonoom kan aanpassen en optimaliseren, met minimale negatieve impact op de productieopbrengst.

3.4.2.1 Technologie

De ontwikkeling of aanpassing van batterijproductieapparatuur voor meer energie- en materiaalefficiënte, én flexibelere, batterijcelproductielijnen omvat een reeks activiteiten, zoals weergegeven in Figuur 11.

Centraal in de technologie staan hoogwaardige productiesystemen die nieuwe technologie en chemie toestaan. Solid-statebatterijen, siliciumanodes en nieuwe kathodematerialen stellen andere eisen aan nauwkeurigheid, atmosfeer, laagvorming en materiaalhandling. Productiesystemen moeten daarom niet alleen stabiel en precies zijn, maar ook aanpasbaar.

Nederlandse kennis van materiaalinterfaces, dunne lagen en precisieproductie biedt hiervoor een goede basis. De combinatie van materiaalonderzoek en apparatuurontwikkeling kan het aantal next-generation materialen dat industrieel kan worden verwerkt vergroten.



Figuur 11 De reeks activiteiten die betrokken zijn bij het ontwerpen en implementeren van diverse productieapparatuur in de batterij waardeketen

3.4.2.2 Data

Data spelen een belangrijke rol in geautomatiseerde productieprocesoptimalisatie. Digitale procescontrole en datagedreven kwaliteitsborging zijn essentieel om productie betrouwbaar op te schalen. Door meetgegevens en modellen te integreren in processen zoals mengen, drogen, stapelen, lassen, elektrolyt vullen en formatie kan de productieopbrengst sterk worden verbeterd.

Smart Manufacturing combineert digital twinning, in-line metingen, modelgebaseerde optimalisatie, automatische inspectie, AI-gestuurde foutdetectie en adaptieve processturing. Hierdoor kunnen afwijkingen realtime worden vastgesteld en gecorrigeerd. Dit verhoogt het rendement, verkort ontwikkelcycli en maakt het eenvoudiger nieuwe materialen in productie te nemen.

Voor packassembly ligt de nadruk op flexibele, modulaire lijnen die snel kunnen schakelen tussen ontwerpen. Cognitieve robotica kan helpen om kleine series efficiënt te produceren. Kritische processen, zoals lassen, moeten worden gecombineerd met directe kwaliteitsmeting. Volledige digitale traceerbaarheid koppelt iedere cel en processtap aan de prestaties van het eindproduct.

3.4.2.3 Circulariteit

De circulariteitsgedachte in productieapparatuur uit zich in energie- en materiaalefficiënte celproductieapparatuur. Belangrijke kostenposten in lithium-ionproductie zijn grondstoffenhandling, vacuümdroging, oplosmiddelverdamping en celconditionering. Veel processen vereisen een zeer droge omgeving. Traditionele dry rooms zijn duur in aanleg en energiegebruik. Lokaal gecontroleerde mini-omgevingen rond specifieke machines kunnen de TCO aanzienlijk verlagen[30]. De uitdaging is om ook grote processen, zoals slurryvoorbereiding en droogovens, compact en gecontroleerd uit te voeren.

Dry coating biedt een kansrijk alternatief voor natte coating[31]. Doordat geen oplosmiddel hoeft te worden verdampt, dalen energiegebruik, operationele kosten en benodigde fabrieksruimte. Dit vergemakkelijkt bovendien het gebruik van kleinere gecontroleerde omgevingen.

Een andere innovatie is het kunstmatig aanbrengen van de Solid-Electrolyte Interface, bijvoorbeeld met ALD. Daarmee kan de energie-intensieve formatiestap worden verkort[32]. Juist hier sluit batterijproductie aan op Nederlandse kennis afkomstig uit de halfgeleiderindustrie.

3.4.3 Randvoorwaarden

- **Digitale infrastructuur.** Een robuuste digitale infrastructuur is nodig om grote hoeveelheden proces- en kwaliteitsdata realtime te verzamelen en analyseren. AI ondersteunt procesoptimalisatie, voorspellend onderhoud en vroegtijdige foutdetectie.
- **Pilot- en pre-productiefaciliteiten.** Pilot- en pre-productiefaciliteiten, waaronder OBIC, zijn noodzakelijk om apparatuur onder representatieve omstandigheden te testen. Zij verkleinen technische en economische risico's en overbruggen de stap van laboratorium naar industriële productie.
- **Structurele financiële ondersteuning.** Apparatuurontwikkeling is kapitaalintensief en kent lange terugverdientijden. Structurele ondersteuning is nodig voor ontwikkeling en opschaling van geavanceerde machines, demonstratie van nieuwe productielijnen, eerste industriële toepassing en risicodeling bij implementatie op GWh-schaal.

3.4.4 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Nederlandse technologie voor flexibele Europese batterijproductie. Nederland heeft een positie opgebouwd als producent van batterijproductietechnologie, zoals:

- **Modulaire, herconfigureerbare en software gedefinieerde productiesystemen.** Met Nederlandse technologie kan bestaande Europese productiecapaciteit aangepast worden voor productie van lithium-ion, solid-state, siliciumanodes en andere nieuwe technologieën.

- **Ultra-efficiënte, AI-gedreven celproductie.** Nederlandse apparatuur maakt meer dan 50% energiebesparing en ten minste 30% TCO-reductie mogelijk.

Deze positie helpt de versnelde industrialisatie van Nederlandse batterijmaterialen en zorgt voor de opschaling van minimaal drie baanbrekende materialen naar industriële productie tienmaal sneller. Co-development tussen startups, OEM's en pilotfaciliteiten creëert een sterke positie in high-performance batterijcellen.

Moonshot 2 – 2030 Flexibele packassembly. In 2030 maken Nederlandse systemen volledig flexibele high-mix pack- en moduleproductie mogelijk. AI-gestuurde platforms schakelen tussen ontwerpen, combineren geavanceerde lastechniek met in-line controle en bieden volledige traceerbaarheid tot op celniveau.

Moonshot 3 – 2035 Nederland is één van de Europese koplopers op het gebied van productieapparatuur voor gerichte batterijproductieprocessen. Nederlandse bedrijven leveren geavanceerde productieapparatuur aan internationale batterijcelfabrikanten en hebben een sterke positie in de ontwikkeling van energie- en materiaalefficiënte productietechnologieën.

3.4.5 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit focusthema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Versterk marktafstemming.** Breng systematisch in kaart welke productieproblemen Europese celproducenten en afnemers van high-performance batterijen het meest urgent vinden.

- **Versnel nationale samenwerking.** Verbind kennisinstellingen, materiaalproducenten, celontwikkelaars en equipmentfabrikanten in gezamenlijke ontwikkelprogramma's.

- **Schaal internationaal op.** Organiseer Europese en mondiale samenwerking om Nederlandse apparatuur sneller te valideren en verkopen.

- **Ontwerp flexibele productie-infrastructuur.** Richt pilot- en industrieel relevante schaal productielijnen zo in dat zij meerdere chemieën, materialen en celformaten kunnen ondersteunen.

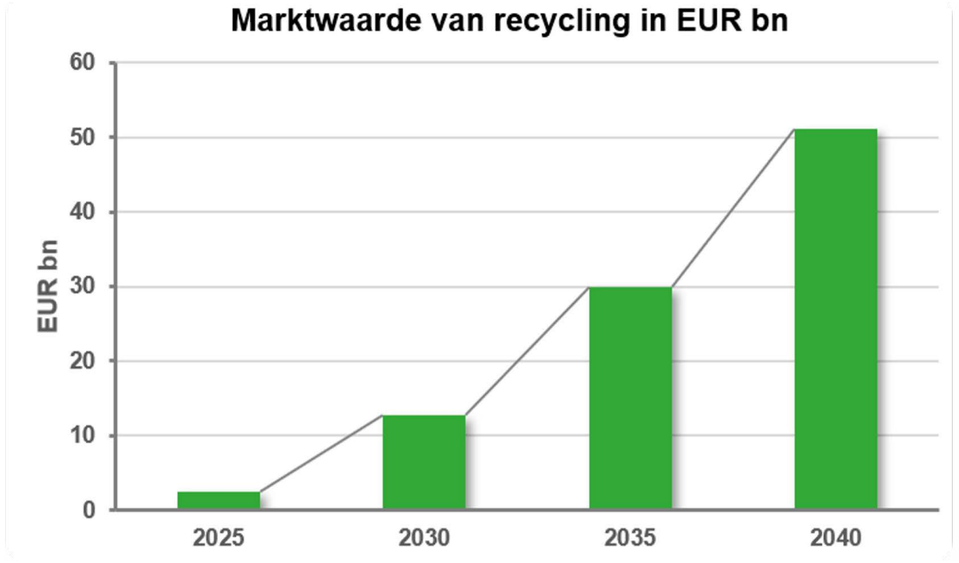
- **Ontwikkel ultra-efficiënte productieapparatuur.** Investeer in de ontwikkeling en industrialisatie van apparatuur die energieverbruik, kosten en materiaalgebruik verlaagt, onder meer door dry coating, mini-dry rooms, kunstmatige SEI en AI-gestuurde proces- en kwaliteitscontrole.

- **Ontwikkel flexibele productie- en assemblyoplossingen.** Investeer in modulaire productie- en assemblysystemen met AI-gestuurde platforms, geavanceerde lastechnologie (laser/ultrasoon), in-line kwaliteitscontrole en volledige traceability tot op celniveau, en ondersteun de industriële opschaling via langjarige publiek-private programma's.

3.5 Circulaire waardeketen: levensduurverlenging, herbestemming en recycling

De groei van batterijtoepassingen in mobiliteit, energiesystemen, industrie en consumentenproducten leidt tot een sterk toenemende vraag naar lithium, nikkel, kobalt, koper, grafiet en andere grondstoffen. Tegelijkertijd zal ook het aantal batterijen dat onderhouden, hergebruikt, herbestemd of uiteindelijk gerecycled moet worden sterk toenemen. Levensduurverlenging en hoogwaardige materiaalterugwinning zijn daarom essentieel om materialen langer in de keten te houden, de leveringszekerheid te vergroten en de afhankelijkheid van primaire grondstoffen te verminderen.

Nederland heeft inmiddels de eerste stappen gezet op het gebied van diagnostiek, reparatie, second-life toepassingen en recyclingtechnologie. Verdere opschaling vraagt om investeringen in technologie, en het ontwikkelen van standaarden, veiligheidsprotocollen, logistieke systemen en nieuwe businessmodellen. Daarbij liggen kansen voor Nederland in hoogwaardige, duurzame, veilige en energie-efficiënte verwerkingstechnologieën, levensduurverlenging van batterijsystemen en datagedreven ketenoptimalisatie.



Figuur 12 Geprojecteerde marktwaarden voor recycling. BCC-NL Market Intelligence-modellering[4]

De economische waarde van deze circulariteitsketen groeit naar verwachting sterk mee met de opschaling van de batterijmarkt. In de huidige marktinschatting neemt de wereldwijde recyclingomzet toe van circa EUR 2,4 miljard in 2025 naar ongeveer EUR 12,8 miljard in 2030, EUR 30 miljard in 2035 en mogelijk meer dan EUR 50 miljard richting 2040. Deze groei komt met vertraging op gang, omdat batterijen pas na jaren gebruik terugkeren in de keten. Vanaf 2030 wordt recycling echter steeds relevanter als bron van secundaire grondstoffen en als strategisch instrument voor Europese leveringszekerheid. Voor Nederland betekent dit dat recycling niet alleen als afvalverwerking moet worden gezien, maar als een toekomstige markt voor materiaalterugwinning, industriële waardecreatie en strategische autonomie binnen de batterijwaardeketen.

3.5.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

De circulaire batterijmarkt bevindt zich nog in een vroege fase, maar groeit onder invloed van elektrificatie, de Europese Batterijenverordening[33], de Critical Raw Materials Act[34] en de behoefte aan strategische autonomie.

Levensduurverlenging
De hoogste vorm van circulariteit is een batterij zo lang mogelijk veilig te gebruiken in haar oorspronkelijke toepassing. Door de langere levensduur van batterijen[35], betere mogelijkheden voor reparatie en remanufacturing en dalende prijzen van nieuwe batterijen is second life niet vanzelfsprekend de meest aantrekkelijke route. De prioriteit ligt daarom bij het identificeren van niches waarin herbestemming aantoonbaar economische waarde toevoegt. Voor marktontwikkeling moeten veiligheid, aansprakelijkheid, garanties en producentenverantwoordelijkheid juridisch goed zijn geborgd bij het opnieuw op de markt brengen van gebruikte batterijsystemen. Alleen met een robuuste businesscase en een professioneel regelgevend kader kan een schaalbare second-life markt ontstaan, waarbij overheden als launching customer de eerste toepassing kunnen ondersteunen.

Recycling
De businesscase voor terugwinning van kritieke materialen wordt op termijn vooral gedragen door de hoge intrinsieke waarde van materialen als nikkel, kobalt, lithium, koper en grafiet, waardoor bij voldoende volume hoogwaardige recycling economisch aantrekkelijk kan zijn. Het marktpotentieel is aanzienlijk: inmiddels zijn naar schatting alleen al in Nederland al meer dan 300 miljoen kilogram lithiumbatterijen in omloop binnen mobiliteit, energiesystemen, industrie en consumentenproducten. Batterijen voor elektrische voertuigen vertegenwoordigen naar schatting meer dan 80% van het totale volume aan lithiumbatterijen in de Nederlandse economie. Door de vroege adoptie van elektrische voertuigen en een zeer hoge dichtheid aan elektrische fietsen (in 2025 was circa de helft van alle nieuw verkochte fietsen elektrisch, ruim 390.000 e-bikes in dat jaar alleen) bouwt zich hier een aanzienlijke batterijvoorraad op. Nederland krijgt de eerste golf aan afgedankte batterijen daarmee eerder dan de meeste EU-landen en zal hierdoor relatief vroeg beschikken over substantiële volumes voor hoogwaardige recycling.

De beschikbaarheid van feedstock voor recycling groeit echter langzamer dan verwacht. Batterijen gaan in de praktijk langer mee dan aanvankelijk werd aangenomen, mede dankzij gunstigere degradatie en de toenemende mogelijkheden voor diagnose, reparatie en refurbishing. Hierdoor verschuift een groot deel van de end-of-life batterijstromen naar de periode na 2030. Samen met de technologische uitdagingen rondom hoogwaardige materiaalterugwinning leidt dit ertoe dat de opschaling van recycling- en raffinagecapaciteit in Europa achterblijft bij de oorspronkelijke verwachtingen. Veel aangekondigde projecten bevinden zich nog in ontwikkeling, zijn uitgesteld of tijdelijk stilgelegd.

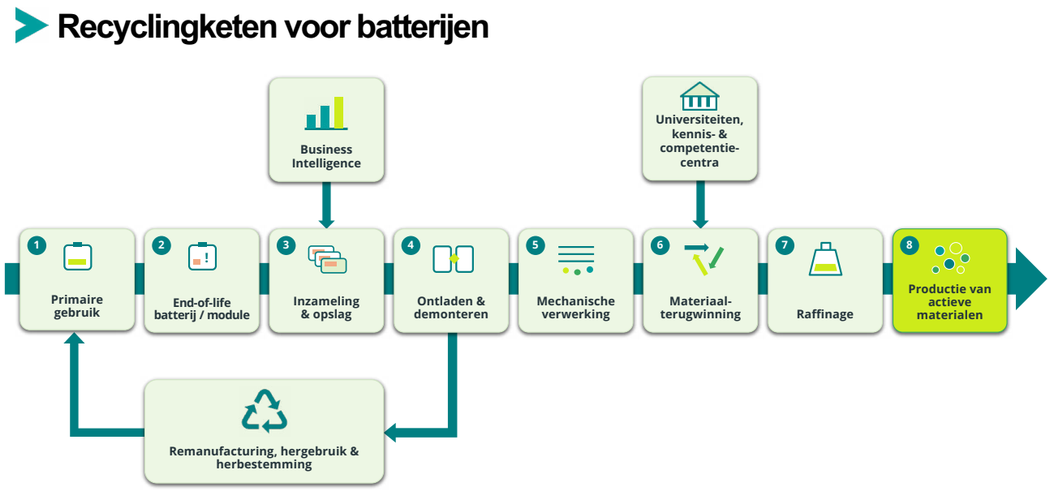
De beperkte beschikbaarheid van feedstock, gecombineerd met de bestaande overcapaciteit voor materiaalterugwinning uit black mass in Azië, maakt verwerking aldaar momenteel economisch aantrekkelijker dan in Europa. Europa is daardoor op dit moment netto-exporteur van black mass. Een sterke prikkel om de Europese recycling- en materiaalterugwinning capaciteit tóch uit te breiden ontstaat door veranderende regelgeving in Europa. Vanaf eind 2026 mogen als gevaarlijk afval geclassificeerde afgedankte lithium batterijen en black mass daaruit niet meer naar niet-OESO-landen worden geëxporteerd.

Naast batterijen ontstaat ook een groeiende secundaire grondstoffenstroom uit afgedankte fotovoltaïsche (PV-) zonnepanelen. Hoogwaardige terugwinning van silicium uit deze panelen kan op termijn een duurzame en strategische bron vormen voor de productie van siliciumanodes.

3.5.2 Technologie, Data en Circulariteit

3.5.2.1 Technologie

De circulaire waardeketen omvat opeenvolgende stappen van inname en diagnostiek tot reparatie, herbestemming, demontage, materiaalterugwinning en raffinage. Iedere stap beïnvloedt de veiligheid, economische haalbaarheid en uiteindelijke materiaalwaarde. De technische stappen voor de circulariteitsketen staan weergegeven in Figuur 13 en eigenlijk gaat hieraan nog een stap vooraf, zijnde het circulair ontwerpen van batterijcellen en batterijsystemen.



Figuur 13 Geprojecteerde marktwaarden voor recycling. BCC-NL Market Intelligence-modellering[4]

Circular design
Voor batterijsystemen moet circulariteit niet pas aan het einde van de levensduur worden georganiseerd, maar al vanaf ontwerp en eerste productie worden ingebouwd. Dat betekent ontwerp voor demontage, hergebruik, reparatie, second life en hoogwaardige recycling, gecombineerd met materiaalkeuzes die minder afhankelijk zijn van kritieke grondstoffen en beter aansluiten op toekomstige Europese eisen[37]. Dat vraagt om circulaire ontwerpprincipes voor cellen, modules en packs, ondersteund door het batterijpaspoort en ontwikkeld in nauwe samenwerking tussen batterij- en componentfabrikanten, integratoren en recyclingpartijen. Nederland kan deze principes vertalen naar praktische ontwerptools, validatiemethoden en digitale diensten, en daarmee een onderscheidende positie opbouwen in circulaire batterijsystemen.

Ontlading, demontage en voorbewerking
Door de toenemende batterijvolumes en groeiende complexiteit van batterijontwerpen neemt de behoefte aan geautomatiseerde en gerobotiseerde systemen voor veilige ontlading, demontage en (mechanische) verwerking toe. De procescondities tijdens deze stappen bepalen bovendien in belangrijke mate de veiligheid, materiaalkwaliteit en efficiëntie van de verdere circulariteitsketen.

Levensduurverlenging en herbestemming
Batterijen en componenten kunnen worden hergebruikt wanneer zij na inspectie, reparatie of remanufacturing opnieuw veilig en economisch inzetbaar zijn. Dat kan in de oorspronkelijke toepassing of, waar verantwoord, in een second-life toepassing. Naarmate batterijchemieën, -formaten en toepassingsgebieden verder diversifiëren, groeit de behoefte aan geavanceerde technologieën om de technische conditie van batterijen betrouwbaar en efficiënt vast te stellen. Diagnostiek, batterijpaspoorten, reparatie, remanufacturing en waar passend second-life kwalificatie worden daarbij steeds belangrijker om voor iedere batterij de meest waardevolle circulaire route te bepalen. Dit vraagt om geautomatiseerde diagnostiek, AI-ondersteunde gezondheidsvoorspelling, niet-destructieve testen, demontagemethoden en gestandaardiseerde beoordelingsprotocollen.

De economische kansen voor Nederland liggen hierbij in de ontwikkeling van diagnostische tools, validatiemethoden, data-infrastructuren[38], inspectie en diagnoseoplossingen en engineeringdiensten die producenten en andere ketenpartijen ondersteunen bij reparatie, remanufacturing, herbestemming en recycling.

Sortering en black mass productie
Als levensduurverlenging en herbestemming technisch of economisch niet mogelijk is, volgt de stap naar het volledig ontmantelen, ontladen, verkleinen en separeren van niet-batterijmaterialen (aluminium, koper, kunststof). Het resultaat hiervan is een ongezuiverd materiaal, de black mass. De kwaliteit van black mass bepaalt in belangrijke mate de efficiëntie van de verdere verwerking en efficiëntie van terugwinning van materiaal. De opkomst van LFP-batterijen vergroot de behoefte aan chemie-adaptieve sorteer- en scheidingstechnologieën.

Terugwinning en raffinage
Pyrometallurgische processen vormen nog steeds een belangrijke industriële referentie voor batterijrecycling vanwege hun robuustheid en vermogen om heterogene batterijstromen te verwerken. Echter, pyrometallurgische verwerking is niet toekomstbestendig (Li recovery <80%, grafiet (CRM) verbrandt wat leidt tot een aanzienlijke directe CO2 uitstoot).

Hydrometallurgische en hybride pyrohydrometallurgische processen vormen momenteel de belangrijkste routes voor hoogwaardige materiaalterugwinning en de productie van batterijwaardige materialen. De eerste generatie processen gebruikt veel water en chemicaliën. Nieuwe Nederlandse concepten richten zich op lager energie- en reagentia-verbruik, hergebruik van water en chemicaliën en verwerking van uiteenlopende batterijchemieën. Daarnaast ontstaan kansen voor hybride processen, elektrochemische extractie, directe recycling of regeneratie en andere op lithium gerichte terugwinningtechnologieën.

De diverse recovery- en raffinageroutes verschillen sterk in volwassenheid, terugwinningsrendement, milieu-impact en geschiktheid voor toekomstige batterijchemieën. In onderstaande tabel is een overzicht opgenomen van de huidige technologieën met hun sterktes, beperkingen en strategische relevantie.

Technologie	Sterktes	Beperkingen	Strategische relevantie
Pyrometallurgie	Robuust, industrieel bewezen technologie, bestand tegen vervuilde en gemengde inputstromen.	Hoge energiekosten, hoge milieu-impact o.a. directe CO2-uitstoot, beperkte terugwinning van lithium, aanvullende hydrometallurgische refining nodig.	Geschikt voor de terugwinning van overgangsmetalen op grote schaal en de verwerking van heterogene afvalstromen.
Hydrometallurgie	Hoog terugwinningsrendement, mogelijkheid tot terugwinning van lithium en grafiet, geschikt voor de productie van batterijmaterialen.	1e generatie: chemie- en waterintensief, gevoelig voor verontreinigingen, afvalwaterbeheer vereist. 2e generatie (NGF MICB): minder energie intensief, minder gebruik van reagentia en water en mogelijkheid tot hergebruik ervan in processen, geschikt voor alle batterijchemieën.	Belangrijke technologische route voor geavanceerde Europese raffinage en terugwinning van CRM.
Elektrochemische recycling	Hoge selectiviteit en lager chemicaliëngebruik door hergebruik van chemicaliën en gesloten kringloopsystemen. Hoog terugwinningsrendement, mogelijkheid tot terugwinning van lithium en grafiet .	Technologie nog in ontwikkeling, toepasbaar op middellange termijn. Opschaling moet nog bewezen worden.	Een nieuwe strategische aanpak voor selectieve en kosten efficiënte lithiumterugwinning en toekomstige recycling van LFP-batterijen.
Direct recycling / regeneratie	Behoudt de structuur en de materiaalwaarde van de kathode en het grafiet; lager verbruik van reagentia.	Vereist zeer zuivere en goed gekarakteriseerde materiaalstroom, die gevoelig is voor verontreiniging. Met deze technologie kan men niet inspelen op de veranderende batterijchemie.	Van belang voor productieafval en toekomstige batterijsystemen met gesloten kringloop.

Technologische trends en volgende generatie recyclingtechnologieën
Veel bestaande processen zijn ontwikkeld voor NMC- en NCA-batterijen met relatief veel nikkel en kobalt. De groei van LFP verandert de businesscase, omdat deze batterijen minder waardevolle metalen bevatten. Hierdoor neemt het belang toe van selectieve lithiumterugwinning, efficiënter waardebehoud van materialen en meer geïntegreerde, chemie-adaptieve recyclingsystemen waarin voorbewerking, black mass productie, raffinage en materiaalregeneratie beter op elkaar aansluiten. Innovaties zoals directe regeneratie van kathodematerialen, grafietterugwinning en elektrochemische recycling richten zich op maximaal waardebehoud en een lager energie- en chemicaliëngebruik.

Voor Nederland liggen de grootste kansen niet in grootschalige bulkrecycling, maar in hoogwaardige chemie-adaptieve verwerkingstechnologieën, automatisering, diagnostiek en systeemintegratie.

3.5.2.2 Data/Veiligheid/Testen

Data, diagnostiek, testen en veiligheid vormen essentiële randvoorwaarden voor een circulaire batterijketen. Betrouwbare informatie over batterijchemie, conditie, veiligheid en gebruiksgeschiedenis is noodzakelijk voor circulaire strategieën. Het batterijpaspoort wordt een belangrijke bouwsteen daarvoor, die toegang tot gestandaardiseerde gegevens over batterijchemie, herkomst, gebruiksgeschiedenis en batterijgezondheid moet bieden.

Voor hoogwaardige materiaalterugwinning is een consistente en goed gekarakteriseerde black mass essentieel. Dit vraagt om gestandaardiseerde analysemethoden, bemonsteringsprotocollen en transparante data-uitwisseling over samenstelling en kwaliteit.

Veiligheid blijft gedurende de gehele levenscyclus een belangrijk aandachtspunt. Naarmate meer batterijen worden gerepareerd, herbestemd of gerecycled, nemen ook de eisen aan veilig beheer, productaansprakelijkheid, garanties en producentenverantwoordelijkheid toe. Geautomatiseerde ontlaadsystemen, monitoring, brandveiligheid en certificering van professionele verwerkers zijn daarbij essentieel voor verdere opschaling. Nederland heeft hiervoor een sterke uitgangspositie dankzij bestaande expertise op het gebied van data-infrastructuur, AI, testfaciliteiten, logistiek en hightech systemen.

3.5.2.3 Circulariteit

De focus verschuift naar maximale materiaalterugwinning bij een zo laag mogelijke milieu-impact. Bestaande processen kunnen hoge rendementen behalen, maar gebruiken vaak veel energie, water en chemicaliën en veroorzaken reststromen en emissies. Nieuwe Nederlandse recyclingprocessen richten zich daarom op lagere procestemperaturen, hergebruik van reagentia, selectieve extractietechnologieën, elektrificatie van processtappen en maximale terugwinning van naast kobalt, nikkel, mangaan ook lithium, grafiet, koper en andere materialen.

Voor Nederland vormt de ontwikkeling van energie-efficiënte en emissiearme recovery- en raffinageprocessen een belangrijke kans om zich binnen Europa te onderscheiden.

3.5.3 Randvoorwaarden

De belangrijkste randvoorwaarden zijn:

- **Beschikbaarheid van batterijdata en batterijpaspoort.** Toegang tot betrouwbare batterijdata is essentieel voor een circulaire waardeketen.
- **Gestandaardiseerde diagnostiek, testen en certificering.** Geharmoniseerde test-, diagnose- en certificeringsmethoden zijn nodig om veiligheid, kwaliteit en vertrouwen in circulaire toepassingen te waarborgen.
- **Toegang tot voldoende recyclebare feedstock.** Een rendabele circulaire keten vraagt om voldoende volumes end-of-life batterijen en black mass, ondersteund door efficiënte inzameling en logistiek.
- **Marktontwikkeling voor circulaire toepassingen.** Voldoende vraag naar reparatie, remanufacturing, second-life batterijen en gerecyclede materialen is noodzakelijk om circulaire businessmodellen rendabel te maken.
- **Europese ketenintegratie en standaardisatie.** Europese samenwerking en geharmoniseerde standaarden zijn essentieel voor voldoende schaal, markttoegang en hoogwaardige materiaalstromen.
- **Vergunningen, ruimte en energievoorzieningen.** Snelle vergunningverlening, voldoende ruimte en energie-infrastructuur zijn nodig om circulaire activiteiten tot industriële schaal op te schalen.

3.5.4 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Hoogwaardige circulaire recyclingcapaciteit. In Nederland is er een circulaire hub voor verwerking van end-of-life batterijen en efficiënte terugwinning van lithium, nikkel, kobalt, koper en grafiet uit black mass. Nederlandse processen gebruiken minder energie en chemicaliën, hebben sterke posities in diagnostiek en zijn geïntegreerd met Europese raffinage-, materiaal- en batterijproductieketens.

Moonshot 2 – 2030 Levensduurverlenging als hoogste vorm van circulariteit. Nederland heeft een infrastructuur voor inspectie, diagnostiek, reparatie, remanufacturing en herbestemming opgebouwd, waardoor batterijen zo lang mogelijk inzetbaar blijven in hun oorspronkelijke toepassing en er voor geselecteerde toepassingen een economisch haalbare en breed geaccepteerde markt bestaat voor herbestemde batterijen.

Moonshot 3 – 2035 Hoogwaardige batterijrecycling en materiaalterugwinning. Nederland heeft een internationaal erkende positie opgebouwd op het gebied van batterijrecycling en hoogwaardige terugwinning van kritieke grondstoffen, en levert daarmee een belangrijke bijdrage aan de Europese voorziening van batterijwaardige grondstoffen.

3.5.5 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit focusthema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Automatiseer veilige voorbewerking.** Ontwikkel geautomatiseerde systemen en uniforme veiligheidsprotocollen voor veilige ontlading, demontage, voorbewerking en beoordeling van beschadigde of instabiele batterijen.
- **Stimuleer circulaire businesscases.** Identificeer kansrijke toepassingen en verdienmodellen voor reparatie, remanufacturing en second-life batterijen.
- **Harmoniseer diagnostiek en certificering.** Ontwikkel betrouwbare diagnose-, test- en beoordelingsmethoden en bouw voort op EN 18061 voor kwaliteitsborging en certificering van reparatie, remanufacturing en second-life toepassingen.
- **Verbeter inzicht in feedstock.** Bouw een nationaal overzicht van toekomstige end-of-life batterijstromen ter ondersteuning van investerings- en capaciteitsplanning.
- **Verzeker toegang tot batterijstromen.** Bevorder het behoud van Nederlandse end-of-life batterijen en toegang tot Europese feedstock.
- **Versnel hoogwaardige materiaalterugwinning.** Ontwikkel en valideer circulaire verwerkingsroutes voor efficiënte terugwinning van lithium, grafiet en andere kritieke materialen die aansluiten op Europese batterijwaardeketens.
- **Ondersteun vroege opschaling.** Faciliteer demonstratie-installaties om circulaire bedrijven de periode tot de beschikbaarheid van voldoende feedstock te laten overbruggen.

04

Strategische overkoepelende thema’s

4 Strategische overkoepelende thema’s

De ontwikkeling van een sterk batterij-ecosysteem vraagt naast strategische focusgebieden ook om een aantal overkoepelende thema’s die het gehele ecosysteem versterken. In dit hoofdstuk geven we hier invulling aan met ecosysteembrede moonshots en acties die de ontwikkeling van alle schakels van de batterijwaardeketen ondersteunen en de samenwerking tussen bedrijven, kennisinstellingen en overheden versterken. Door te investeren in menselijk kapitaal, demonstratie- en opschaal- en productiecapaciteit, data, veiligheid en testen, het batterijpaspoort, Europese en internationale samenwerking en tenslotte Business Intelligence, ontstaat een sterk fundament waarop het Nederlandse batterij-ecosysteem kan groeien en floreren. Dit terwijl innovatie, industrialisatie en markttoepassing over de volle breedte worden versneld.

4.1 Faciliteiten

Een samenhangende infrastructuur voor onderzoek, testen, demonstratie, validatie en opschaling is essentieel om batterij-innovaties sneller van laboratorium naar markt te brengen. Test-, demonstratie- en opschaalfaciliteiten verkorten de ontwikkeltijd, verlagen investeringsrisico’s en maken het mogelijk nieuwe technologieën, producten en systemen onder realistische omstandigheden te valideren voordat zij op industriële schaal worden toegepast. Gedeelde faciliteiten dragen bovendien bij aan kennisontwikkeling, samenwerking binnen de waardeketen en een efficiëntere benutting van publieke en private investeringen.

Nederland beschikt al over relevante kennisinstellingen en publieke en commerciële testfaciliteiten. De belangrijkste opgave ligt in betere afstemming, toegankelijkheid en specialisatie van deze infrastructuur, zodat bedrijven, kennisinstellingen en overheden efficiënter kunnen samenwerken en innovaties sneller kunnen opschalen.

Bijvoorbeeld voor **stationaire energieopslag** zijn vier typen faciliteiten van strategisch belang:

- test- en veiligheidsfaciliteiten voor cellen, modules, packs en complete systemen;
- demonstratie- en validatielocaties voor utility-scale BESS, industriële opslag, energiehubs en LDES[39];
- digitale testomgevingen voor EMS, VPP, interoperabiliteit, forecasting en dispatch;
- faciliteiten voor systeemintegratie en praktijkvalidatie van geïntegreerde energieoplossingen.

Voor LDES zijn daarnaast meerjarige demonstratielocaties nodig waar technologieontwikkeling, systeemintegratie en praktijkvalidatie samenkomen. Zonder dergelijke voorzieningen blijven concepten te lang steken tussen pilot en commerciële toepassing.

Voor **levensduurverlenging, herbestemming en recycling** zijn de volgende faciliteiten van strategisch belang:

- faciliteiten voor diagnostiek, reparatie, remanufacturing en herbestemming van batterijen;
- proef- en demonstratiefaciliteiten voor de opschaling van nieuwe recycling- en hoogwaardige materiaalterugwinning technologieën van laboratoriumschaal naar commerciële toepassing;
- test- en validatiefaciliteiten voor veilige circulaire verwerking en hoogwaardige materiaalterugwinning.

Hierbij is ook aandacht nodig voor gecoördineerde en voorspoedige vergunningverlening en toegang tot betaalbare energie.

4.2 Data, Veiligheid en Validatie

Batterijen worden steeds meer digitaal beheerde assets. Hun waarde hangt mede af van inzicht in chemie, herkomst, productiecondities, gebruik, degradatie, veiligheid, restcapaciteit en restwaarde. Deze gegevens zijn nodig voor ontwerp, onderhoud, garanties, verzekerbaarheid, regelgeving, second-life beoordeling en recycling. Data moet betrouwbaar, herleidbaar, vergelijkbaar en bruikbaar zijn voor meerdere partijen. Dat vraagt om afspraken over kwaliteit, semantiek, toegang, vertrouwelijkheid, cybersecurity en verantwoordelijkheden. Zonder geharmoniseerde formaten en duidelijke governance ontstaan datasilo's en onzekerheid over aansprakelijkheid.

Batterijsystemen brengen risico's mee op het gebied van elektrische energie, thermisch gedrag, gasvorming, brand, mechanische belasting, softwaresturing en menselijk handelen. De precieze risico's verschillen per toepassing, maar de basisprincipes zijn vergelijkbaar. Veiligheid dient vanaf het eerste ontwerp van de batterij te worden meegenomen en getest en daarna gedurende de levenscyclus actief te worden beheerd. Belangrijke bouwstenen zijn Safe and Sustainable by Design, robuuste systeemarchitecturen, fail-safe functies, thermisch management, detectie, noodprocedures, tijdige signalering en voorspelbaarheid van faalmechanismen en heldere verantwoordelijkheden. Batterij-innovaties kunnen pas worden opgeschaald wanneer prestaties, levensduur, veiligheid en betrouwbaarheid onder representatieve omstandigheden zijn aangetoond. Het gaat niet alleen om cellen en systemen, maar ook om materialen, modules, packs, BMS, EMS, vermogenselektronica, software, cybersecurity en interfaces.

Fysieke testen blijven noodzakelijk voor elektrische prestaties, levensduur, thermisch gedrag, abuse testen, trillingen, elektromagnetische compatibiliteit en brandveiligheid. Daarnaast groeit het belang van modelgebaseerde validatie, waaronder digital twins. Daarmee kunnen ontwikkelcycli worden verkort en moeilijk of risicovol te testen scenario's worden onderzocht.

Nederland beschikt al over een sterk netwerk van organisaties en faciliteiten. Daarmee heeft het een solide basis om een sterke positie verder uit te bouwen op het gebied van datamanagement, safety engineering, testen, validatie, certificering, procesoptimalisatie en circulariteitsbeoordeling van batterijsystemen.

Een samenhangende infrastructuur die testorganisaties, kennisinstellingen, certificeringspartijen en pilotfaciliteiten verbindt – waaronder DNV/KEMA Labs, TNO, Twente Safety Campus, DEKRA, KIWA, RDW (EURO Loop), mLabs, Connectr en het JRC in Petten, evenals de pilotfaciliteiten van TNO Holst Centre, de Universiteit Twente en OBIC – kan kwalificatierisico's verlagen en marktintroductie versnellen. Hiervoor zijn geharmoniseerde testmethoden, validatieprotocollen en datastandaarden nodig, evenals sterkere verbindingen tussen R&D en eindgebruikers en voldoende test- en digitale validatiecapaciteit op alle systeemniveaus.

4.3 Digitaal Batterijpaspoort

4.3.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

Vanaf 18 februari 2027 is het Digitaal Batterijpaspoort (DBP) verplicht[33] voor alle EV-batterijen en LMT-batterijen, en voor industriële batterijen groter dan 2 kWh, die op de EU-markt worden gebracht. De drempel van 2 kWh geldt uitsluitend voor industriële batterijen. Zonder geldig paspoort mag een batterij vanaf die datum niet op de EU-markt worden gebracht of in gebruik worden genomen. Hiermee verandert de manier waarop batterijdata binnen internationale waardeketens wordt beheerd, gedeeld en gebruikt ingrijpend. Nederlandse bedrijven moeten vanaf dat moment voldoen aan de wettelijke vereisten, terwijl bevoegde autoriteiten batterijpaspoortdata moeten kunnen raadplegen en benutten voor toezicht en handhaving. Aanvullend gelden vanaf 18 augustus 2027 de due-diligenceverplichtingen uit dezelfde verordening; een deel van de daarvoor benodigde ketengegevens wordt via het paspoort ontsloten.

Het batterijpaspoort moet niet uitsluitend worden gezien als een instrument voor naleving van de Europese Batterijverordening. Bij een goede implementatie biedt het ook kansen voor grondstoffenmonitoring, datagedreven toezicht, reparatie, hergebruik, herbestemming en efficiëntere recycling. Recyclingbedrijven kunnen processen beter afstemmen op specifieke batterijchemieën en -modellen, terwijl administratieve processen deels kunnen worden geautomatiseerd. Voor eigenaren en tweedehands afnemers maakt betrouwbare state-of-health data bovendien een objectieve restwaardebepaling mogelijk, wat second-life toepassingen financierbaar en verzekerbaar maakt. Voor fabrikanten verlaagt eenduidige traceerbaarheid de kosten en de reikwijdte van veiligheidsincidenten en terugroepacties. De invoering van het batterijpaspoort biedt Nederland daarmee de mogelijkheid om batterijdata niet alleen voor compliance, maar ook voor circulariteit, innovatie en samenwerking binnen het Nederlandse batterij-ecosysteem te benutten.

Deze kansen worden momenteel nog beperkt benut door de complexiteit van internationale interoperabiliteit en de technologische, semantische, governance- en juridische vraagstukken die daarmee samenhangen.

Concreet gaat het om vier knelpunten:

- het ontbreken van een gedeeld semantisch datamodel tussen ketenpartijen,
- onduidelijkheid over eigenaarschap van en toegangsrechten tot data, mede in relatie tot de Data Act[40] en bedrijfsvertrouwelijke informatie,
- het ontbreken van een werkend identificatie- en authenticatiemechanisme voor bevoegde autoriteiten en marktdeelnemers, en
- de beperkte digitale volwassenheid van het mkb in de keten.

Tegelijkertijd beschikt Nederland over een sterke uitgangspositie dankzij deelname aan Europese initiatieven zoals CIRPASS, CIRPASS-2, DATAPIPE en DPP4EU, actieve bijdragen aan standaardisatie, een goed verbonden nationaal ecosysteem en het werk van BCC-NL. Hierop kan worden voortgebouwd met de expertise en bestaande initiatieven van Nederlandse kennisinstellingen, bedrijven en brancheorganisaties, waaronder TNO, TU Delft, CoE-DPP (Centre of Excellence for Digital Product Passports), Nationaal Materialen Observatorium (NMO), TU Twente, FME, VNO-NCW, BCC-NL en ARN.

4.3.2 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Datagedreven batterijketen en batterijpaspoort. Nederland beschikt in 2030 over een datagedreven en circulaire batterijketen waarin het batterijpaspoort de Europese Batterijverordening ondersteunt én economische en circulaire waarde creëert. Alle paspoortplichtige batterijen die in Nederland op de markt worden gebracht beschikken over een machineleesbaar batterijpaspoort dat voldoet aan de Europese vereisten.

Moonshot 2 – 2035 Nederland behoort tot de Europese voorlopers op het gebied van grensoverschrijdende paspoortinteroperabiliteit. In 2030 is de Nederlandse batterijpaspoortinfrastructuur aantoonbaar interoperabel met ten minste drie andere EU-lidstaten en met de bredere Digital Product Passport-architectuur onder de Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)[41]. De voor de batterijketen ontwikkelde bouwstenen, waaronder datamodellen, identificatie en toegangsbeheer, worden hergebruikt in ten minste twee andere productgroepen.

4.3.3 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit thema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Praktijkgerichte implementatie en pilots.** Versnel de implementatie van het Europese batterijpaspoort via praktijkgerichte pilots en demonstrators voor bedrijven, overheden en andere ketenpartijen. Deel de resultaten actief om kennisverspreiding en opschaling te bevorderen, met bijzondere aandacht voor het mkb.

- **Interoperabele infrastructuur en standaardisatie.** Ontwikkel interoperabele batterijdata-infrastructuren en praktische batterijpaspoort-oplossingen voor diagnostiek, traceerbaarheid en circulariteit, in lijn met Europese standaarden, dataformaten en de Digital Product Passport-architectuur onder de Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR). Versterk de Nederlandse deelname aan relevante CEN/CENELEC- en ISO-werkgroepen, zodat praktijkervaring doorwerkt in toekomstige normen en grensoverschrijdende gegevensuitwisseling ondersteunt.

- **Nationale strategie, coördinatie en financiering.** Ontwikkel een nationale publiek-private strategie voor de implementatie en benutting van het batterijpaspoort, met een heldere rolverdeling en meerjarige financiering. Verbind bestaande pilots en programma's op het gebied van materiaaldata, traceerbaarheid en circulariteit met Europese en internationale DPP-initiatieven en benut de opgedane kennis voor toekomstige Digital Product Passport-sectoren.

- **Versterk toezicht en datatoegang.** Richt de digitale infrastructuur zodanig in dat bevoegde autoriteiten batterijpaspoortdata veilig, betrouwbaar en geautomatiseerd kunnen raadplegen voor toezicht en handhaving.

- **Ondersteun implementatie door het mkb.** Ontwikkel praktische handreikingen, referentieoplossingen en laagdrempelige ondersteuning waarmee mkb-bedrijven het batterijpaspoort betaalbaar kunnen implementeren.

4.4 Batterijcel productiebedrijf

4.4.1 Markt en toepassingsgebieden, marktbehoeften en kansen

Naarmate elektrificatie doordringt in sectoren als defensie, luchtvaart, maritieme toepassingen en heavy-duty landmobiliteit, neemt de behoefte toe aan batterijcellen die zijn geoptimaliseerd voor uiteenlopende prestatie-, veiligheids- en gebruikseisen. Er bestaat immers niet één batterijtechnologie die optimaal is voor alle toepassingen. Tegelijkertijd is de mondiale batterij-industrie vooral ingericht op grootschalige productie van gestandaardiseerde batterijcellen, waarbij schaalgrootte en kostenefficiëntie centraal staan. Dit model is zeer geschikt voor grote consumenten- en automobielmarkten, maar biedt minder ruimte voor de snelle introductie van nieuwe technologieën en de productie van applicatiespecifieke batterijen in kleinere volumes.

Concurrentiekracht in (deze) toepassingsgebieden wordt daardoor steeds meer bepaald door de beschikbaarheid van maatwerkoplossingen en het vermogen om nieuwe batterij-innovaties snel te vertalen naar producten met maximale prestaties. Met een eigen batterijcelproductie kan Nederland zijn weerbaarheid en concurrentiekracht versterken.

Nederland beschikt over een unieke uitgangspositie om deze kloof te overbruggen. De combinatie van expertise in next-generation batterijmaterialen, producenten van geavanceerde productiesystemen en innovatieve OEM's in onder meer defensie, luchtvaart, de maritieme sector en heavy-duty landmobiliteit creëert een sterk ecosysteem voor batterij-innovatie. De kracht van een Nederlands batterijcelproductiebedrijf met een capaciteit van circa 1 GWh per jaar ligt niet in kostprijsleiderschap, maar in flexibiliteit: het snel implementeren van nieuwe materialen, celontwerpen en productieprocessen en deze vertalen naar hoogwaardige batterijcellen voor specifieke toepassingen. Dit versterkt de concurrentiepositie van Nederlandse eindgebruikers, vermindert de afhankelijkheid van buitenlandse toeleveranciers en creëert een sterke basis voor innovatie, verdienvermogen en strategische autonomie.

Een capaciteit van circa 1 GWh per jaar sluit goed aan bij de markten waarop Nederland zich kan onderscheiden. Hoe specialistischer de toepassing, des te kleiner de benodigde productieseries en des te groter het belang van maatwerk, prestaties en snelle innovatie. Door te focussen op celassemblage blijft de benodigde investering beperkt tot ongeveer een kwart van die van een volledig geïntegreerde batterijfabriek. Tegelijkertijd kan worden aangesloten op bestaande internationale waardeketens, terwijl de toelevering van componenten en materialen stapsgewijs verschuift naar Europese en Nederlandse leveranciers. Zo gaan economische haalbaarheid, Europese inbedding en versterking van de strategische autonomie hand in hand.

Het marktontwikkelpad kan meebewegen met de verbreding van batterijtoepassingen. De eerste focus ligt op drones en defensietoepassingen, waar hoge eisen worden gesteld aan prestaties, betrouwbaarheid, energiedichtheid en herkomst. Ontwikkelde technologieën en productieprocessen kunnen vervolgens doorstromen naar civiele drones, maritieme systemen, heavy-duty mobiliteit, bouwmaterieel en op termijn elektrische luchtvaart. Zo ontstaat een sterk dual-use ecosysteem waarin innovaties hun weg vinden naar meerdere markten.

De gecombineerde vraag vanuit deze markten biedt voldoende volume voor een gespecialiseerde Nederlandse batterijcelindustrie. De Europese markt voor militaire dronebatterijen groeit naar verwachting van circa USD 0,8 miljard in 2025 naar USD 2 miljard in 2032[42]. Daarnaast biedt elektrische luchtvaart een aantrekkelijk langetermijnperspectief.

Volgens de huidige prognoses van Elysian groeit de batterijvraag voor een elektrisch aangedreven vliegtuig voor 90 passagiers van enkele batterijpakketten per jaar rond 2030 naar circa 10 GWh per jaar in 2040[42]. De Nederlandse fabricage-, test- en kwalificatie-infrastructuur kan hierbij een sleutelrol vervullen in certificeringstrajecten en de eerste marktintroducties van nieuwe batterijtechnologieën.

Wanneer de vraag naar een specifiek batterijontwerp of technologie de capaciteit van circa 1 GWh per jaar overstijgt, kan de productie via Europese samenwerking worden overgedragen aan grotere productiefaciliteiten. De Nederlandse faciliteit richt zich vervolgens op nieuwe batterijontwerpen, technologieën en toepassingen. Zo ontstaat een duurzaam model waarin Nederland zich positioneert als leverancier van specialistische high-performance batterijcellen, terwijl succesvolle producten via Europese partners grootschalig verder worden opgeschaald. Tegelijkertijd krijgen Nederlandse ontwikkelaars van next-generation batterijmaterialen en batterijtechnologieën een stapgewijze opschalingsroute van innovatie in OBIC naar marktintroductie en internationale opschaling.

4.4.2 Technologie

Een flexibele high-mix, low-volume celproductie-infrastructuur moet snel kunnen schakelen tussen celontwerpen, materialen en toepassingen. Veranderingen in ontwerp of chemie hebben invloed op meerdere opeenvolgende processtappen en kunnen de productieopbrengst sterk verlagen.

De assemblageapparatuur moet modulair zijn en meerdere celtypen en componenten ondersteunen. Daarbij moet rekening worden gehouden met Nederlandse next-generation materialen die binnen enkele jaren beschikbaar komen en met het gebruik van gerecyclede grondstoffen van verschillende kwaliteit. Een hoge automatiseringsgraad is noodzakelijk voor kwaliteit, reproduceerbaarheid en kostenefficiëntie. Digital twinning, procesmodellen en AI-ondersteunde procescontrole zijn daarom nodig om productielijnen snel opnieuw te configureren en een opbrengst van minimaal 70% te bereiken.

Ook het ontwerpen van toepassingsspecifieke cellen vraagt versterking. Door elektrochemische, mechanische en thermische materiaalkennis te combineren met celarchitectuur kunnen energiedichtheid, vermogen, veiligheid, levensduur en warmtehuishouding worden afgestemd op het gebruiksprofiel. Design for recycling moet daarbij vanaf het begin worden meegenomen.

Tegelijk moet Nederland productiekennis en menselijk kapitaal opbouwen. Samenwerking met internationale partijen, praktijkervaring binnen OBIC en gerichte opleiding van operators en procesengineers zijn daarvoor essentieel.

4.4.3 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Europa's eerste flexibele batterijcelproductie in Nederland. In 2030 beschikt Nederland over een operationele celassemblagefaciliteit van circa 1 GWh per jaar. Deze kan snel wisselen tussen materialen, chemieën en ontwerpen en levert maatwerkcellen voor defensie, luchtvaart en andere Heavy Duty toepassingen. Nederland concurreert daarmee op prestaties en flexibiliteit in plaats van op kostprijs.

Moonshot 2 – 2030 Design for Purpose. Nederland ontwikkelt een geïntegreerde ontwerpketen van materiaal tot cel en batterijsysteem, ondersteund door digitale engineering voor elektrochemie, thermisch gedrag en mechanica. Design for recycling wordt standaard. Minimaal één Nederlands batterijconcept met een capaciteit van meer dan 400 Wh/kg wordt toegepast in luchtvaart, drones of zware mobiliteit.

Moonshot 3 – 2035 Nederland als route-to-volume-powerhouse. In 2035 ontstaat één geïntegreerde opschalingsketen van onderzoek op kWh-schaal via pilotproductie van enkele MWh naar industriële productie op GWh-schaal. Nieuwe technologieën bereiken daardoor de markt in jaren in plaats van in decennia.

4.4.4 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit thema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Onderzoek behoefte en haalbaarheid.** Onderzoek samen met Defensie en andere relevante stakeholders de strategische behoefte aan toegang tot batterijcelproductie vanuit het oogpunt van de inzetgereedheid en het voortzettingsvermogen van de krijgsmacht. Beoordeel in samenhang daarmee de markt voor dual-use en civiele toepassingen, technologie, schaal, businesscase en economische en de strategische meerwaarde van productie in Nederland.
- **Werk bij voldoende perspectief scenario's voor realisatie uit.** Ontwikkel, zodra voldoende perspectief op realisatie bestaat, samen met publieke en private partijen realisatiescenario's voor schaalgrootte, fasering, consortiumvorming, financiering, governance en risicodeling. Betrek hierin zowel de investeringsfase (CAPEX) als de eerste exploitatiejaren (OPEX), inclusief het doorlopen van de leercurve. Het eindresultaat is een route naar de oprichting van een uitvoerende commerciële entiteit.
- **Breng Nederlandse en internationale industrie, kennisinstellingen en overheden bijeen.** Internationale samenwerking is essentieel om ontbrekende productiekennis en toeleveringsketens versneld op te bouwen, toegang te krijgen tot de nieuwste innovaties en internationale waardeketens te versterken. Daarnaast stelt zij Nederland in staat richting te geven aan de ontwikkeling van de nationale kennisbasis, infrastructuur, de R&D-agenda en toekomstige technologische ontwikkelingen.



4.5 Menselijk kapitaal

4.5.1 Inzicht in de behoeften van verschillende markten op Menselijk kapitaal

Voor de batterijsector is menselijk kapitaal één van de strategische overkoepelende thema's die essentieel zijn voor de ontwikkeling van alle schakels van de batterijwaardeketen. Een strategisch programma voor menselijk kapitaal moet daarom de volledige batterijwaardeketen ondersteunen; van materialen, componenten en celproductie tot batterijsystemen, toepassingen, onderhoud, hergebruik en recycling. Zonder structurele investering bestaat het risico dat technologische kennis en intellectueel eigendom wel in Nederland ontstaan, maar dat de capaciteit ontbreekt om deze economisch te benutten. De opgave is groot: richting 2050 is op grote schaal arbeidskracht met batterijcompetenties nodig om de energietransitie succesvol te realiseren. Dit vraagt om een sectoroverstijgende aanpak en de verkenning van bijhorende ontwerpkansen waarin onderwijs, bedrijfsleven, kennisinstellingen en overheid gezamenlijk anticiperen op toekomstige competenties en arbeidsmarktbehoefte. Een systeembenadering is daarbij essentieel[44].

Deze opgave sluit aan bij de Nationale Talentstrategie[45]. Die benadrukt dat de toekomstige welvaart van Nederland mede afhankelijk is van het gericht opleiden, aantrekken, ontwikkelen en behouden van talent voor strategische economische domeinen, waaronder energie- en klimaattechnologie. Samenwerking tussen onderwijs, bedrijfsleven en overheid en een sterke inzet op Leven Lang Ontwikkelen (LLO) zijn daarbij essentieel.

Daarnaast sluit deze aanpak aan bij de Productiviteitsagenda[46] van de Nederlandse overheid, waarin het versterken van arbeidsproductiviteit centraal staat als voorwaarde voor toekomstig verdienvermogen. Voor de batterijsector betekent dit dat investeringen in menselijk kapitaal niet alleen nodig zijn om voldoende personeel beschikbaar te maken, maar ook om nieuwe technologieën, digitalisering, automatisering en efficiëntere productieprocessen succesvol te ontwikkelen en toe te passen, en daarmee de concurrentiekracht van de sector te versterken.

De grootste uitdaging ligt in de middenlaag van de industrialisatie

Nederland beschikt over sterke universiteiten, kennisinstellingen en innovatieve bedrijven. De competentieprognose van Dialogic en SEO bevat een overzicht van onderwijsinstellingen met voor de batterijsector relevante opleidingen[47]. Voor deze Actieagenda zijn de instellingen gesorteerd en gekoppeld aan de verschillende schakels van de batterijwaardeketen. Het resultaat is te zien in Figuur 14. Deze inventarisatie is niet uitputtend en kan in een volgende fase verder worden aangevuld.



Figuur 14 Koppeling van opleidingsinstellingen in Nederland aan de verschillende schakels van de batterijwaardeketen

Het huidige Nederlandse onderwijsaanbod voor batterijtechnologie is echter nog versnipperd en sluit onvoldoende aan op de behoeften van grootschalige industrialisatie. Veel aandacht gaat uit naar onderzoekers, wetenschappers en gespecialiseerde engineers, terwijl de grootste toekomstige arbeidsmarktvraag juist ontstaat in de middenlaag van de industrialisatie: vakmensen die productieprocessen opzetten, bedienen, onderhouden, controleren, verbeteren en opschalen. Arbeidsmarktgegevens onderstrepen dit belang: in 2025 richtte ruim 70% van de onderzochte vacatures in de batterijwaardeketen zich op mbo- en hbo-profielen. Naast specialistische kennis is daarom behoefte aan gecombineerde technische profielen en sterke doorstroommogelijkheden tussen mbo, hbo en wo. De ervaring uit Aziatische batterijregio's laat zien dat industriële koplopers niet alleen bouwen op technologische kennis, maar ook op jarenlange investeringen in brede manufacturing skills en praktijkgerichte expertise.

Ook Europees groeit het besef dat menselijk kapitaal en manufacturing skills essentieel zijn voor industriële concurrentiekracht en strategische autonomie. Het European Electrification Action Plan[48] (2026) van de Europese Commissie benadrukt het belang van onderwijs, talentontwikkeling en leven lang ontwikkelen (LLO), terwijl organisaties zoals BEPA (Battery European Partnership Association) bijdragen aan Europese afstemming van vaardigheden en opleidingen voor een toekomstbestendige batterijwaardeketen.

Praktijkgericht leren als sleutel tot opschaling
Batterijen vragen om een multidisciplinaire aanpak waarin technische domeinen zoals elektrochemie, materiaalkunde, elektrotechniek, werktuigbouwkunde, automatisering, veiligheid en data-analyse samenkomen. De arbeidsmarkt vraagt daarom niet zozeer om volledig nieuwe batterijopleidingen, maar vooral om praktijkgerichte batterijmodules en aanvullende competenties binnen bestaande technische opleidingen. Professionals hebben behoefte aan batterijkennis die aansluit bij hun vakgebied, zoals basiskennis van batterijchemie en veiligheid voor procesoperators of kennis van thermisch beheer, packdesign en hoogvoltsystemen voor werktuigbouwkundigen en elektrotechnici.

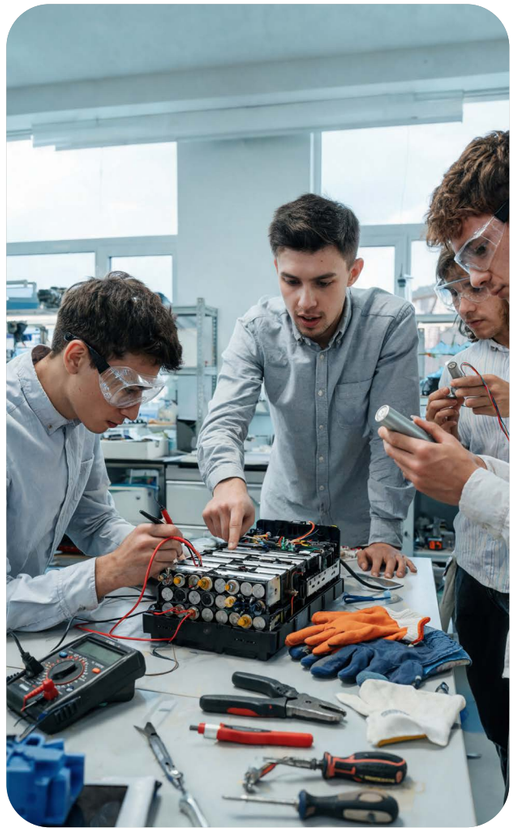
Omdat veel batterijcompetenties alleen in de praktijk kunnen worden ontwikkeld, zijn industriële leeromgevingen, hybride leertrajecten, pilotlijnen en demonstratiefaciliteiten essentieel. Een samenhangende opleidingsstructuur, met praktijkgerichte leeromgevingen, is noodzakelijk om pilotlijnen, fabrieken en demonstratiefaciliteiten succesvol op te schalen. Deze uitdaging geldt breder voor transities zoals waterstof, halfgeleiders en andere energie- en klimaat-technologieën, waardoor een systeembenadering nodig is waarbij kennis, infrastructuur en leeromgevingen worden gedeeld.

Bedrijven in de batterijwaardeketen vervullen daarmee niet alleen een economische rol, maar ook een belangrijke functie als opleidings- en innovatieomgeving. Nieuwe leertechnologieën, zoals XR en responsieve leeromgevingen, kunnen praktijkleren versterken door complexe, kostbare of risicovolle werksituaties veilig te simuleren. Daarnaast is het belangrijk om jongeren al vroeg te enthousiasmeren door batterijtechnologie en energieopslag te verbinden aan bestaande leerdoelen in het primair en voortgezet onderwijs. Nationale programma's zoals Techkwadraat[49] en Sterk Techniekonderwijs[50] versterken deze ontwikkeling door samenwerking tussen onderwijs en bedrijfsleven te stimuleren en jongeren vroegtijdig kennis te laten maken met technologie en toekomstige beroepen binnen de energietransitie en batterijsector.

4.5.2 Moonshots

Moonshot 1 – 2030 Talent voor een groeiende batterijsector. In 2030 sluiten onderwijs, instroom en Leven Lang Ontwikkelen aantoonbaar aan op de groeiende competentie- en talentbehoefte van de Nederlandse batterijsector, van onderzoek en engineering tot industrialisatie en productie.

Moonshot 2 – 2035 Onderscheidend batterijonderwijs. In 2035 heeft Nederland een internationaal sterke positie in innovatief batterijonderwijs, waarin onderwijs, praktijk, onderzoek en industrie structureel zijn verbonden en bijdragen aan het Nederlandse innovatie- en concurrentievermogen.



4.5.3 Acties

Om de ontwikkeling binnen dit thema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Realiseer de National Battery Challenge als nationaal talent- en innovatieprogramma.** Ontwikkel de National Battery Challenge tot het jaarlijkse nationale vlaggenschipprogramma voor talentontwikkeling, innovatie en samenwerking tussen onderwijs, onderzoek en bedrijfsleven. Verbind mbo-, hbo- en wo-studenten structureel aan bedrijven, kennisinstellingen, fieldlabs, pilotfaciliteiten, stages, traineeships en LLO-initiatieven, zodat talent direct bijdraagt aan de innovatie- en industrialisatieopgaven van de Nederlandse batterijsector.

- **Implementeer één landelijke standaard voor batterijcompetenties.** Implementeer een nationale competentiestandaard voor de batterijwaardeketen, gebaseerd op Europese batterijcompetentiestandaarden zoals ALBATTS (Alliance for Batteries Technology, Training and Skills) en gekoppeld aan standaarden zoals ESCO (European Skills, Competences, Qualifications and Occupations). Gebruik deze standaard als gemeenschappelijke basis voor de ontwikkeling van opleidingen, beroepsprofielen, functies, certificeringen, microcredentials en LLO-trajecten. Hiermee ontstaat één internationaal vergelijkbare taal voor batterijcompetenties, die arbeidsmobiliteit versterkt, curriculumontwikkeling versnelt en de samenwerking tussen onderwijs, onderzoek en bedrijfsleven structureel ondersteunt.

- **Ontwikkel een landelijk modulair batterijonderwijs- en LLO-ecosysteem.** Versterk batterijkennis binnen bestaande technische opleidingen en ontwikkel, daar waar aantoonbaar behoefte bestaat, flexibele onderwijsmodules, microcredentials en LLO-programma's. Maak het volledige landelijke onderwijs- en LLO-aanbod digitaal toegankelijk via één nationaal platform, gekoppeld aan competenties, beroepsprofielen en loopbaanontwikkeling, zodat instroom, bijscholing en omscholing gericht kunnen worden ondersteund.

- **Bouw een nationale praktijkinfrastructuur voor batterij-industrialisatie.** Ontwikkel een landelijk open-access netwerk waarin onderwijs, kennisinstellingen en industrie samenwerken aan batterij-industrialisatie, productie, testen, validatie en training. Verbind bestaande faciliteiten, waaronder OBIC, SLD BATT – Centre of Expertise (CoE), TNO/Holst Centre, TU Delft, TU Eindhoven, Universiteit Twente, Rijksuniversiteit Groningen en andere complementaire infrastructuren, zodat technologieontwikkeling, praktijkleren en manufacturing skills integraal worden versterkt.

- **Ontwikkel een nationale Menselijk Kapitaal informatie-infrastructuur voor de batterijsector.** Ontwikkel een landelijke informatie-infrastructuur die arbeidsmarktinformatie, competenties, onderwijsaanbod, vacatures en technologische ontwikkelingen samenbrengt. Deze infrastructuur geeft structureel inzicht in instroom, uitstroom, arbeidsmobiliteit, toekomstige competentiebehoeften en mogelijke arbeidsbesparende maatregelen door digitalisering, automatisering en nieuwe productietechnologieën. Verbind deze inzichten met een nationale 'learning community' en Europese databronnen om lacunes in kennis en kunde tijdig te signaleren en gerichte interventies mogelijk te maken. Hiermee ontstaat een lerend ecosysteem waarin onderwijs, bedrijfsleven en overheid gezamenlijk kunnen sturen op talentontwikkeling, duurzame inzetbaarheid en de toekomstige personeelsbehoefte van de batterijsector.

4.6 Business Intelligence

Structurele Business Intelligence is nodig om Nederland wendbaar en concurrerend te houden in een snel veranderende mondiale batterijmarkt. Hierdoor worden de markt, de technologie, de waardeketen en het inzicht in de concurrentie op de markt beter afgestemd op het Nederlandse ecosysteem en op de behoeften van bedrijven, kennisinstellingen en overheidsinstanties.

Voor ecosysteem-stakeholders ondersteunt betrouwbare markt- en concurrentie-informatie het signaleren van kansen, datagedreven strategische besluitvorming en een sterkere internationale concurrentiepositie. Het stelt daarnaast beleidsmakers in staat om beter onderbouwde keuzes te maken over prioritaire technologieën, markten, R&D-richtingen en schakels in de waardeketen.

Tegelijkertijd worden kansen, afhankelijkheden, concurrentiële hiaten en ontbrekende capaciteiten eerder zichtbaar.

Gedeelde taxonomieën, herleidbare bronnen en regelmatige actualisaties helpen bovendien om Nederlandse capaciteiten beter te positioneren voor Europese programma's, subsidieoproepen, industriële allianties en grensoverschrijdende samenwerkingen.

Business Intelligence vormt daarmee de basis voor versnelling; van versnipperde informatie naar gedeelde prioriteiten, gerichte investeringen en een sterkere Nederlandse positie in de Europese batterijwaardeketen.

4.7 Europese & Internationale samenwerking

4.7.1 Europese & Internationale marktbehoeften en kansen

De mondiale batterijsector ontwikkelt zich snel onder invloed van geopolitieke spanningen, de beschikbaarheid van kritieke grondstoffen, en de behoefte aan strategische autonomie en weerbare waardeketens. Voor Europa gaat de batterijopgave daarom niet alleen over verduurzaming, maar ook over concurrentievermogen, leveringszekerheid en het behoud van industriële capaciteit.

Internationale samenwerking is daarbij noodzakelijk. Geen enkel Europees land beschikt zelfstandig over alle grondstoffen, technologieën, productiefaciliteiten, kennis en afzetmarkten die nodig zijn voor een complete batterijwaardeketen.

Door internationale samenwerking tussen bedrijven, kennisinstellingen en overheden kunnen innovatie, industrialisatie en marktintroductie worden versneld.

Nederland heeft onderscheidende competenties in batterijmaterialen, batterijsystemen, productieapparatuur, data, testen, veiligheid, circulariteit en systeemintegratie. Internationale samenwerking geeft Nederlandse partijen toegang tot aanvullende technologie, productiekennis, kapitaal en afzetmarkten. Tegelijk kan Nederland met zijn gespecialiseerde kennis bijdragen aan sterkere Europese en internationale waardeketens.

Gerichte internationale samenwerking met ruimte voor nieuwe kansen

Om internationale kansen effectief te benutten, brengt Nederland focus aan in de samenwerking met landen die beschikken over complementaire industriële, technologische en marktposities. Duitsland, Frankrijk, Zuid-Korea en China vormen daarbij vier prioritaire landen waarmee Nederland inzet op duurzame en verdiepende relaties, gericht op kennisuitwisseling, concrete projecten, gezamenlijke technologieontwikkeling, markttoegang en versterking van waardeketens.

Duitsland biedt sterke aansluiting op de automotive sector, batterijproductie en machinebouw, met kansen in productieapparatuur, Heavy Duty toepassingen, stationaire opslag, testen, en recycling. Frankrijk brengt belangrijke competenties in batterijcelproductie, luchtvaart, defensie en energie-infrastructuur, waardoor samenwerking kansrijk is rond next-generation technologie, dual-use toepassingen en stationaire energieopslag. Zuid-Korea beschikt over hoogwaardige kennis en schaal in batterijcellen, materialen en productieprocessen, waarbij Nederlandse partijen kunnen bijdragen met onder meer apparatuur, systeemintegratie, analytische technologie, kwaliteitscontrole en recyclingtechnologie. China beschikt over brede industriële schaal en een sterke positie in vrijwel alle delen van de mondiale batterijwaardeketen.

Kennisuitwisseling en selectieve samenwerking kunnen bijdragen aan inzicht in technologische ontwikkelingen, marktdynamiek en opschaling, waarbij Europese weerbaarheid, kennisveiligheid en de Nederlandse strategische positie leidend zijn. De vier focuslanden vormen geen rangorde, maar een gerichte keuze voor verschillende vormen van complementariteit en verdieping. Deze focus sluit samenwerking met andere landen nadrukkelijk niet uit. Nederland blijft openstaan voor kansrijke internationale partnerschappen die het Nederlandse ecosysteem aanvullen en bijdragen aan innovatie, kennisontwikkeling, markttoegang en sterkere Europese waardeketens.

Rollen binnen de internationale samenwerking

De uitvoering van de internationale batterijstrategie vraagt om een goede samenwerking tussen overheid, uitvoeringsorganisaties, regionale partners en het batterij-ecosysteem. Verschillende organisaties vervullen hierbij een complementaire rol in het verbinden van Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen met Europese programma's, internationale partners en mondiale markten.

BCC-NL vormt de verbindende schakel tussen het Nederlandse batterij-ecosysteem en Europese programma's, netwerken en beleidsinitiatieven. Het cluster ondersteunt bedrijven, kennisinstellingen en overheden bij het identificeren van financieringsmogelijkheden, het vinden van partners en het ontwikkelen van internationale projecten. Daarnaast consulteert BCC-NL het Nederlandse ecosysteem en brengt signalen uit de praktijk in bij Europese partners en beleidsmakers, zodat regelgeving en programma's beter aansluiten bij de behoeften van innovatie en industrialisatie.

Naast BCC-NL vervullen organisaties zoals RVO, NFIA, regionale ontwikkelingsmaatschappijen (ROMs), topsectoren, ministeries en ambassades een belangrijke rol. Zij ondersteunen onder meer internationale marktontwikkeling, handels- en innovatiemissies, Europese samenwerking en de positionering van Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen in internationale waardeketens. Samen met de Netherlands Foreign Investment Agency (NFIA) en de regionale acquisitiepartners wordt bovendien ingezet op het aantrekken van buitenlandse investeringen die ontbrekende technologie, kennis en productiecapaciteit aan de Nederlandse en Europese batterijwaardeketen toevoegen.

4.7.2 Acties

Internationale samenwerking is geen doel op zich, maar een belangrijke versneller voor het realiseren van de ambities en moonshots in deze agenda. Zij versterkt de positie van Nederlandse bedrijven, kennisinstellingen en technologieën in Europese en mondiale waardeketens, vergroot de toegang tot kennis, technologie en markten en draagt bij aan een concurrerende en weerbare Europese batterijsector.

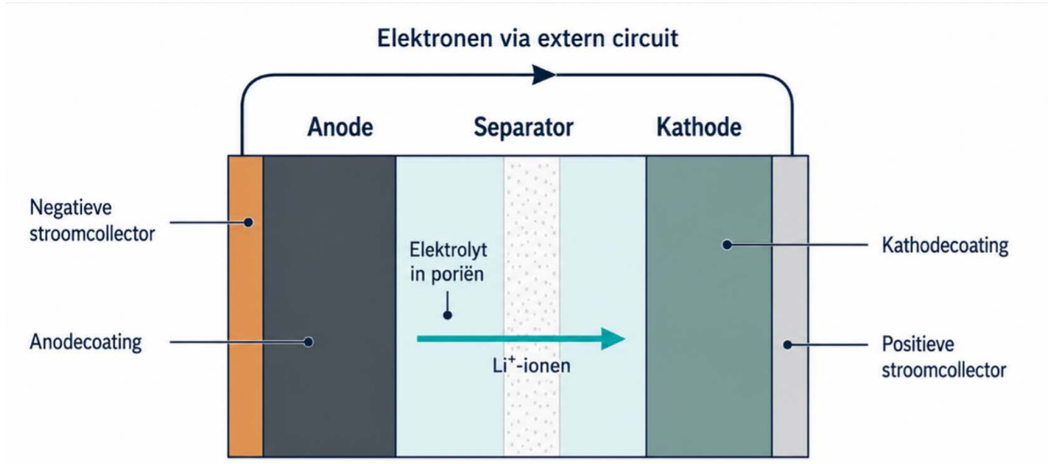
Om de ontwikkeling binnen dit focusthema te versnellen, zijn door de sector de volgende acties geïdentificeerd:

- **Ontwikkel een gezamenlijke internationale batterijstrategie.** Ontwikkel een meerjarige internationale batterijstrategie waarin overheid, BCC-NL, RVO, regio's en het bedrijfsleven vanuit gezamenlijke prioriteiten opereren. Strategische autonomie en kennisveiligheid vormen daarbij het toetsingskader voor internationale samenwerking.
- **Voer meerjarige actieplannen uit voor strategische focuslanden.** Voor Duitsland, Frankrijk, Zuid-Korea en China worden concrete meerjarige actieplannen uitgevoerd, gericht op Nederlandse technologieproposities, strategische partners, markttoegang, gezamenlijke innovatieprojecten en investeringen.
- **Zorg voor structurele nationale cofinanciering van Europese programma's.** Ontwikkel structurele nationale cofinanciering waarmee Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen succesvol kunnen deelnemen aan Europese onderzoeks-, demonstratie- en industrialisatieprogramma's.
- **Ontwikkel een Europese projectpipeline.** BCC-NL bouwt samen met RVO en het ecosysteem een structurele pipeline van projecten en consortia voor Europese programma's. Hiermee verschuift de aanpak van reageren op calls naar het vroegtijdig ontwikkelen, positioneren en begeleiden van kansrijke Nederlandse projecten en internationale samenwerkingen.
- **Versterk de Nederlandse invloed in Europa.** Versterk de Nederlandse positie binnen Europese batterijprogramma's, platforms en beleidsprocessen door gezamenlijke prioriteiten te formuleren en Nederlandse partijen structureel te vertegenwoordigen.
- **Versnel bilaterale innovatie en industrialisatie.** Bouw instrumenten zoals TechBridge[51] verder uit om Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen rechtstreeks te verbinden met internationale partners voor gezamenlijke ontwikkeling, demonstratie en marktintroductie.
- **Strategische Foreign Direct Investment aantrekken.** NFIA, regionale partners en BCC-NL ontwikkelen een gezamenlijke acquisitieagenda gericht op buitenlandse investeringen die ontbrekende technologie, kennis en productiecapaciteit aan het Nederlandse en Europese batterij-ecosysteem toevoegen.
- **Zet internationale missies om in concrete projecten.** Koppel internationale missies en marktontwikkelingsprogramma's aan gerichte business development en opvolging, zodat zij leiden tot nieuwe consortia, innovatieprojecten, investeringen, contracten en markttoegang.

Bijlage 1 Batterijcel- en batterijsysteem technologie

B1.1 Batterijcel technologie

Een lithium-ionbatterijcel bestaat uit een negatieve elektrode, de anode, en een positieve elektrode, de kathode. De anode bestaat meestal uit grafiet, silicium of lithium; voor de kathode worden onder meer lithium-ijzerfosfaat (LFP) en nikkel-mangaan-kobalt (NMC) gebruikt. Tussen de elektroden bevinden zich een ionengeleidend elektrolyt en een separator die direct elektrisch contact en daarmee kortsluiting voorkomt. Energie wordt opgeslagen en vrijgegeven via omkeerbare elektrochemische reacties aan de grensvlakken tussen elektroden en elektrolyt. De elektrode-opbouw kan worden gestapeld of opgerold.



Figuur B1.1 Schematische doorsnede van een lithium-ioncel: de separator is een poreuze isolerende laag tussen anode en kathode. Hij voorkomt direct elektrisch contact tussen beide elektroden, terwijl Li+-ionen via de elektrolyt door de poriën kunnen bewegen.

De materiaalkeuze bepaalt in belangrijke mate de energiedichtheid, vermogensdichtheid, spanning, levensduur, veiligheid en kosten. LFP-kathodes in combinatie met grafietanodes zijn geschikt voor toepassingen waarin veiligheid, levensduur en lage kosten zwaarder wegen dan maximale energiedichtheid. NMC-kathodes en silicium- of lithiumgebaseerde anodes bieden hogere prestaties, maar stellen vaak hogere eisen aan veiligheid en thermisch beheer.

Bij solid-statebatterijen wordt het vloeibare elektrolyt vervangen door een vaste ionengeleider. Deze technologie kan de veiligheid en energiedichtheid verbeteren, maar bevindt zich nog in ontwikkeling. Belangrijke uitdagingen zijn productiekosten, levensduur, materiaalinterfaces en de mechanische druk die nodig is om goed contact tussen de verschillende lagen te behouden.

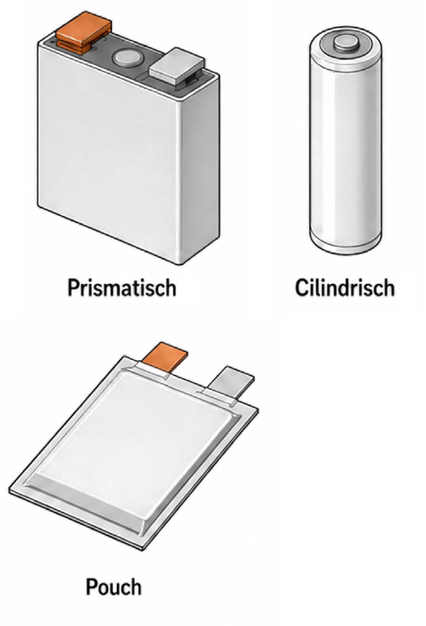
Lithium-ioncellen worden in verschillende formaten geproduceerd:

- **Pouchcellen** bestaan uit gestapelde elektrodelagen in een flexibele folieverpakking. Zij bieden een hoge verpakkings- en energiedichtheid, maar vragen om goede mechanische ondersteuning en drukbeheersing.

- **Cilindrische cellen** hebben een metalen behuizing, zijn mechanisch robuust en relatief eenvoudig op grote schaal te produceren en combineren.

- **Prismatische cellen** hebben een rechthoekige behuizing en kunnen efficiënt in grotere modules en packs worden geïntegreerd.

De keuze voor een celformaat hangt samen met de toepassing, het mechanisch ontwerp, het thermisch beheer en de gewenste schaalbaarheid van het batterijsysteem.

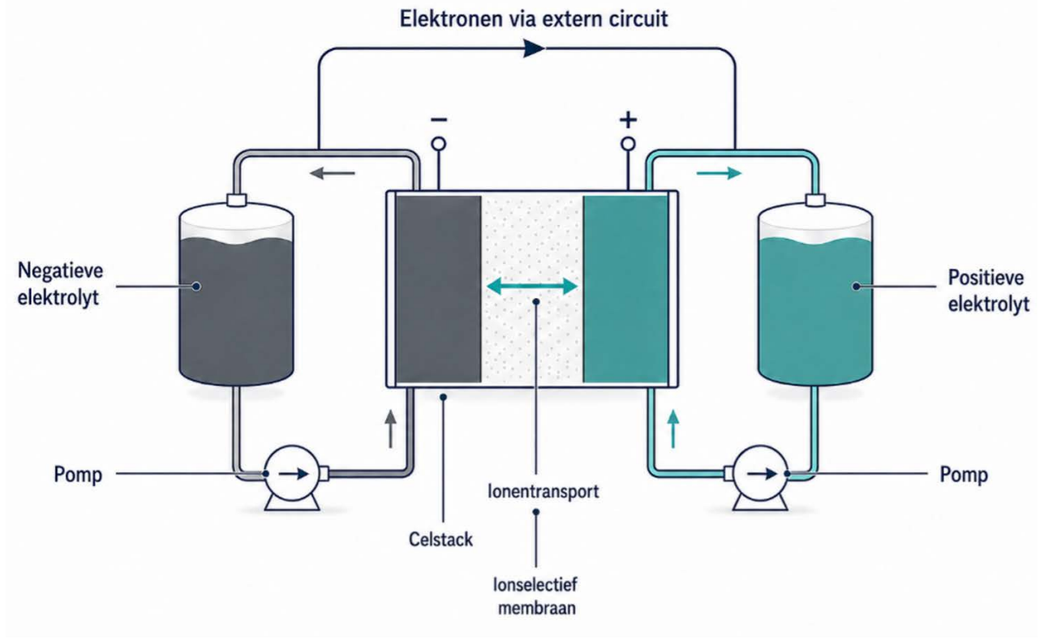


Figuur B1.2 Batterijcel formaten



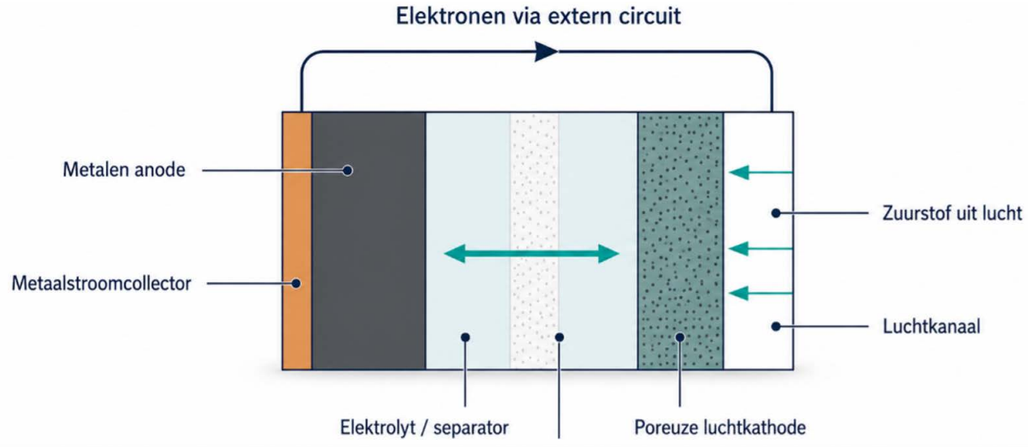
B1.2 Alternatieve batterijtypen

Een redox-flowbatterij werkt anders dan een lithium-ioncel. De elektrochemisch actieve materialen bevinden zich in vloeibare elektrolyten die in externe tanks worden opgeslagen en door de cel worden gepompt. Het vermogen wordt vooral bepaald door de grootte van de elektrochemische cel, terwijl de energiecapaciteit afhankelijk is van het tankvolume. Daardoor kunnen vermogen en opslagcapaciteit grotendeels onafhankelijk van elkaar worden opgeschaald. Flowbatterijen zijn vooral geschikt voor stationaire energieopslag, netbalancering en langdurige opslag van zonne- en windenergie.



Figuur B1.3 Principe van een flowcelbatterij met externe elektrolyttanks, pompen en een elektrochemische celfiguur

Een metaal-luchtbatterij gebruikt een metaal als negatieve elektrode en zuurstof uit de omgevingslucht als reactant aan de positieve zijde. Omdat de zuurstof niet in de batterij hoeft te worden opgeslagen, kan de theoretische energiedichtheid hoog zijn. Bij oplaadbare systemen vormen de laadefficiëntie, levensduur van de luchtkathode, corrosie, passivering en dendrietvorming nog belangrijke ontwikkelpunten.



Figuur B1.4 Principe van een metaal-luchtbatterij, waarbij reversibele oxidatie van de poreuze luchtkathode een onderdeel is van de batterijwerking

B1.3 Degradatie

Batterijdegradatie uit zich in capaciteitsverlies, een hogere interne weerstand, extra warmteontwikkeling en een afname van het beschikbare vermogen. De belangrijkste oorzaken zijn:

- hoge of lage temperaturen;
- diepe ontlading;
- langdurige opslag bij volledige lading;
- hoge laad- en ontlaadsnelheden;
- een groot aantal laadcycli;
- ongelijke belasting van cellen binnen een pack.

In Nederland wordt onderzoek gedaan naar materialen, elektrolyten, coatings, celontwerpen en regelsystemen die energiedichtheid, veiligheid, levensduur en circulariteit verbeteren.

B1.4 Batterijmodule/-packagestechnologie

In praktische toepassingen worden meerdere cellen gecombineerd tot modules en vervolgens tot complete packs of batterijsystemen. Door cellen in serie te schakelen neemt de spanning toe; parallelschakeling verhoogt de capaciteit en de maximaal leverbare stroom. Zo kunnen batterijsystemen worden ontworpen voor toepassingen die uiteenlopen van een e-bike tot een elektrisch voertuig of grootschalig opslagsysteem.

Een centrale rol wordt vervuld door het Battery Management System (BMS). Dit elektronische systeem meet onder meer:

- cel- en packspanningen;
- laad- en ontlaadstromen;
- cel- en moduletemperaturen;
- isolatieweerstand;
- contactor- en foutstatus;
- waar relevant druk, gasvorming en vocht.

Op basis hiervan berekent het BMS de laadtoestand (State of Charge, SoC), de gezondheidstoestand (State of Health, SoH), het beschikbare vermogen en de resterende gebruiksduur. Het systeem voorkomt overladen, diepontladen, te hoge temperaturen, kortsluiting en te grote stromen. Ook ondersteunt het snelladen, thermisch beheer en het beperken van degradatie.

Omdat cellen nooit volledig identiek zijn, bewaakt het BMS verschillen in spanning en capaciteit. Met passieve of actieve celbalancering worden deze verschillen verkleind. Actieve balancering kan energie tussen cellen verplaatsen en daarmee de bruikbare capaciteit en levensduur van het pack vergroten, maar de economische meerwaarde verschilt per toepassing.

Een modulaire systeemarchitectuur verbetert de onderhoudbaarheid. Modules, elektronica en waar mogelijk afzonderlijke cellen kunnen worden vervangen zonder het volledige pack af te schrijven. Dit ondersteunt reparatie, remanufacturing en waardebehoud.

Nieuwe meetmethoden, waaronder elektrochemische impedantiespectroscopie, kunnen veranderingen in celchemie, interne defecten en veroudering vroegtijdig detecteren. Geavanceerde hardware en software maken nauwkeuriger voorspellingen mogelijk en beperken risico's zoals thermische propagatie.

Samenwerking tussen OEM's, leveranciers, softwareontwikkelaars en halfgeleiderbedrijven kan de ontwikkeling van betrouwbare BMS-oplossingen versnellen. Gemeenschappelijke ontwikkelplatforms en referentiearchitecturen kunnen vooral voor kleinere bedrijven de ontwikkelkosten en technische risico's verlagen.

B1.5 Het batterijontwerpproces

De ontwikkeling van een batterijsysteem is iteratief. Verschillende onderdelen worden parallel ontworpen en regelmatig op elkaar afgestemd. Het vaststellen en verfijnen van de basissysteemvereisten duurt doorgaans zes maanden tot een jaar. Daarbij worden gebruiksprofiel, energie- en vermogensbehoefte, veiligheid, regelgeving, levensduur en kosten vastgelegd.

Vervolgens wordt meestal een bestaande, bewezen cel geselecteerd. De eerste karakterisering duurt één tot twee maanden, terwijl levensduurtests zes maanden tot meerdere jaren kunnen doorlopen. Parallel worden modules, koeling, behuizing, vermogenselektronica en BMS ontwikkeld.

Het moduleontwerp kan één tot twee jaar vergen. Integratie van bestaande modules in een pack duurt doorgaans enkele maanden tot een jaar. De integratie in het voertuig, vaartuig, vliegtuig of energiesysteem vraagt vervolgens opnieuw enkele maanden tot een jaar. Voor mobiele toepassingen kan het aantonen van functionele veiligheid van het BMS één tot twee jaar duren. Door digitalisering, gedeelde testmethoden en modulaire ontwerpen kan deze totale ontwikkeltijd worden verkort.

B1.6 Batterijcel en batterijsysteem ontwerptools

Bij het ontwerpen van een batterijsysteem komen meerdere vakgebieden samen. Elektrisch moeten onder meer spanning, capaciteit, piekvermogen, bekabeling, zekeringen en contactoren worden bepaald. Thermisch moet warmte worden afgevoerd met lucht-, vloeistof- of materiaalgebaseerde koeling. Mechanisch moet het systeem bestand zijn tegen trillingen, schokken, vocht, druk en vervorming.

Gespecialiseerde simulatie- en ontwerptools maken het mogelijk deze aspecten al vroeg in samenhang te beoordelen. Op celniveau worden elektrochemische modellen gebruikt voor het voorspellen van spanning, capaciteit, warmteontwikkeling en degradatie. Op module- en packniveau worden elektrische, thermische en mechanische modellen gecombineerd voor analyses van stroomverdeling, temperatuurverschillen, koeling, constructie en veiligheidsmarges.

Modelgebaseerde BMS-ontwikkeling maakt het mogelijk algoritmen voor laadtoestand, celbalancering, foutdetectie en vermogensbegrenzing virtueel te testen voordat fysieke hardware beschikbaar is. Hierdoor zijn minder prototypes nodig en worden risico's eerder zichtbaar.

Veel gebruikte omgevingen zijn onder meer:

- COMSOL Multiphysics met de Battery Design Module;
- Siemens Simcenter Battery Design Studio;
- Ansys voor gekoppelde elektrochemische, thermische en mechanische simulaties;
- MATLAB/Simulink en Simscape Battery voor systeem- en BMS-modellen;
- PyBaMM en GT-AutoLion voor elektrochemische celmodellering;
- GT-SUITE en AVL CRUISE M voor voertuig- en systeemsimulaties.

De keuze hangt af van de ontwerpvraag. Celchemie en degradatie vragen andere modellen dan packlay-out, koeling of embedded BMS-software.

Toekomstige ontwerpsystemen moeten elektrische, thermische, mechanische en elektrochemische modellen beter binnen één raamwerk verbinden. Gedetailleerde celmodellen moeten kunnen worden vertaald naar vereenvoudigde modellen die geschikt zijn voor realtime simulatie en embedded toepassingen. Daarmee kunnen besturingsalgoritmen stapsgewijs worden gevalideerd met model-in-the-loop (MIL), software-in-the-loop (SIL) en hardware-in-the-loop (HIL). Deze aanpak verlaagt ontwikkelrisico's en verkort validatiecycli. Modulaire referentieontwerpen en gedeelde best practices kunnen de toepassing verder versnellen.

Metingen aan echte cellen en modules blijven nodig om modellen te kalibreren. Simulaties vervangen fysieke tests dus niet, maar maken het ontwikkelproces gerichter, sneller en veiliger.

B1.7 Testen, veiligheidssystemen en BMS-data

Testen is noodzakelijk om prestaties, betrouwbaarheid, levensduur en veiligheid aan te tonen. Op celniveau worden capaciteit, interne weerstand, laadcycli, temperatuurgedrag en degradatie gemeten. Op module- en packniveau worden daarnaast stroomverdeling, celbalancering, isolatie, kortsluitgedrag, koeling, trillingen, vocht en mechanische belasting getest.

Veiligheidstests onderzoeken het gedrag bij overladen, diepontladen, hoge stromen, temperatuurgrenzen, impact en andere foutcondities. Normen en toepassingsspecifieke testreeksen zijn belangrijk voor transport, voertuigen, industrie, stationaire opslag, scheepvaart en luchtvaart.

Het BMS vormt de eerste actieve veiligheidslaag. Bij overschrijding van grenswaarden kan het:

- laad- of ontlaadvermogen beperken;
- laden of ontladen stoppen;
- contactoren openen;
- zekeringen of pyro-fuses activeren;
- koeling of verwarming aansturen;
- fouten melden aan andere systemen.

Aanvullende veiligheidsvoorzieningen zijn temperatuursensoren, isolatiebewaking, gas- en drukdetectie, veiligheidskleppen, brandwerende behuizingen en thermische barrières.

Historische data over laadcycli, ontladingsdiepte, temperaturen, piekstromen en foutmeldingen ondersteunt voorspellingen van slijtage en risico's. Een digital twin kan actuele meetgegevens combineren met een virtueel model van de batterij. Daarmee kunnen prestaties en degradatie continu worden gevolgd en kan het BMS eerder en nauwkeuriger ingrijpen.

Door het digitale batterijpaspoort en nieuwe verplichtingen voor datamanagement wordt deze informatiefunctie steeds belangrijker. Daar liggen kansen voor Nederlandse bedrijven die BMS, technieken voor levenscyclusanalyse, dataplatforms en digitale batterijmodellen ontwikkelen.



Bijlage 2 Afkortingen en termen

GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-uur
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-uur
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve
ALBATTS	Alliance for Batteries Technology, Training and Skills
ALD	Atomic Layer Deposition
BCC-NL	Battery Competence Cluster Nederland
BESS	Battery Energy Storage Systems
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
C&I	Commercial and Industry
CAGR	Samengestelde jaarlijkse groei
CAPEX	Kapitaal uitgave
CETO	Clean Energy Technology Observatory
COE	Centre of Expertise
CRM	Critical Raw Materials
CRMA	Critical Raw Materials Act
DPP	Digitaal Product Paspoort
EBA	European Battery Alliance
EMC	Elektromagnetische Compatibiliteit
EMS	Energy Management System
ESCO	European Skills, Competences, Qualifications and Occupations
EUR	Euro
EV	Electric Vehicle
eVTOL	Elektrisch Vertical Take-off and Landing vliegtuig
FCR	Frequency Containment Reserve
FPV	Frist Person View
HBO	Hoger Beroepsonderwijs
HIL	Hardware In the Loop
IAA	Industrial Accelerator Act
IEA	International Energy Agency
IPCEI	Important Project of Common European Interest
KPI	Key Performance Indicator
LCA	Levenscyclusanalyse
LDES	Long Duration Energy Storage
LEV	Lichte Elektrische Voertuigen
LFP Li-ion	Lithium IJzer Fosfaat Li-Ion batterij
LLO	Leven Lang Ontwikkelen
LMFP Li-ion	Lithium Mangaan IJzer Fosfaat Li-Ion batterij
LMT	Lichte Transportmiddelen
MBO	Middelbaar Beroepsonderwijs
MICB	Material Independence and Circular Batteries
MIL	Model In the Loop
NFIA	Netherlands Foreign Investment Agency
NGF	Nationaal Groeifonds
NMC Li-ion	Nikkel Mangaan Kobalt Li-Ion batterij

NMO	Nationaal Materialen Observatorium
NWO	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
OBIC	Open Battery Industrialisation Centre
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPEX	Operationele Expenditure/operationele kosten
PFAS	Poly- en perfluoralkylstoffen
RDW	Rijksdienst voor het Wegverkeer
ROM	Regionale ontwikkelingsmaatschappij
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
SDES	Short Duration Energy Storage
SEI	Solid-Electrolyte Interface
SIL	Software In the Loop
SMM	Strategische Meerjarige Marktbewerkingsprogramma's
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SSbD	Safe and Sustainable by Design
TCO	Total Cost of Ownership, Totale Eigendomskosten
TRL	Technology Readiness Level
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
USD	US-dollar
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery
VPP	Virtual Power Plant
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
WO	Wetenschappelijk Onderwijs

Bijlage 3 Projecten en programma's

Tabel B3.1: Verdere informatie over de doelstellingen, reikwijdte en looptijd van projecten en programma's die de energietransitie ondersteunen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO)		
Battery-NL (2022 - 2030)	Het project ontwikkelt veiligere batterijen van de volgende generatie met een hogere energiedichtheid en een langere (cyclus)levensduur. Het richt zich op het begrijpen en verbeteren van de elektrode-elektrolytinterface (een belangrijke factor voor batterijprestaties) met behulp van schaalbare interfacetechnologieën. Het project beoordeelt ook de maatschappelijke en economische impact samen met belangrijke stakeholders, en brengt academische experts, hightech startups, multinationals en maatschappelijke partners samen.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur
RAAK PRO - Sustainable Batteries (2023 - 2027)	Dit project ontwikkelt praktische methoden om de gezondheid en resterende levensduur van gebruikte lithium-ionbatterijen te beoordelen. Het richt zich op het verbeteren van rekenmodellen, het bouwen van nieuwe testopstellingen en het definiëren van veilige reparatie- en refurbishment methoden. Het project ondersteunt beslissingen over de vraag of batterijen in hun eerste toepassing kunnen blijven, kunnen worden hergebruikt in second-life toepassingen of naar recycling moeten gaan, en beoordeelt ook de economische haalbaarheid van levensduurverlenging.	Recycling en Levensduur verlenging
DIGICELLFAB (NXTGEN Hightech) (2026 - 2031)	Dit project ontwikkelt slimme cyber-fysieke systemen met realtime data en digital twins om batterijproductieprocessen te verbeteren. Het richt zich op geavanceerde technieken zoals dunnefilm coatings en flexibele celassemblage om de batterijkwaliteit en productiesnelheid te verhogen, terwijl afval, kosten en opschalingstijd worden verminderd. Het project ondersteunt Nederlandse bedrijven bij het versterken van hun positie in de wereldwijde batterijwaardeketen.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuu

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
NANEXBAT - Sustainable materials innovation for next-generation sodium-ion batteries (MICB) (2026 - 2031)	Natrium-ionbatterijen bieden een veelbelovende route om de afhankelijkheid van kritieke materialen te verminderen en de circulariteit van batterijen te verbeteren. Dit project onderzoekt veelbelovende natrium-ionbatterijmaterialen via experimentele en computationele studies, met focus op structuur-eigenschapsrelaties en materiaalinteracties onder operationele omstandigheden. Ook worden duurzaamheid, materiaalbeschikbaarheid en techno-economische aspecten beoordeeld ter ondersteuning van commercieel haalbare, maatschappelijk geaccepteerde en circulaire batterijtechnologieën van de volgende generatie.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur
ADAPT-BATT - Adaptive Processing for LFP-mixed Battery Waste Streams (MICB) (2026 - 2030)	ADAPT-BATT ontwikkelt duurzame elektrochemische recyclingmethoden om zeer zuivere metalen terug te winnen uit gemengd batterijafval, met een focus op LFP-batterijen die momenteel economisch minder aantrekkelijk zijn om te recyclen. Het project wil kosten verlagen, afval minimaliseren en waardevolle materialen in omloop houden, ter ondersteuning van een circulaire batterijwaardeketen in Nederland en in lijn met EU-batterijregelgeving.	Recycling en Levensduur verlenging
Redox BLEND - REDOX flow Batteries with Large Energy Density (MICB) (2026 - 2031)	Dit project ontwikkelt nieuwe organische elektrolytchemie en next-gen Redox-flowbatterij componenten met niet-brandbare, niet-toxische en vrij van kritieke grondstoffen zijnde materialen, als basis voor veilige en duurzame LDES-toepassingen.	Stationaire toepassingen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
NXTGEN Hightech (Nationaal Groeifonds)		
3D Battery Pilot Line Production (2023 - 2030)	Ontwikkeling van een nieuwe generatie veilige, lichte en hoog-capacitaire 3D-solid-statebatterijen en de realisatie van een unieke sheet-to-sheet R&D-pilotproductielijn voor de verdere ontwikkeling en optimalisatie van deze technologie, met een beoogde pilotcapaciteit van circa 10–20 MWh per jaar.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur
Next-gen Equipment for batteries and battery materials (2023 - 2030)	Ontwikkeling en validatie van batterijtechnologieën op basis van siliciumanodematerialen en zowel vloeibare als vaste elektrolyten. De ontwikkeling is gericht op batterijen met hogere capaciteit, langere levensduur, snellere laadtijden, lagere kosten en verbeterde veiligheid. De ontwikkelde materialen en processen worden op pilotschaal getest om toepassing in geavanceerde batterijsystemen en productieapparatuur mogelijk te maken.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Circulaire batterijen - onderdeel van Material Independence & Circular Batteries (MICB)		
CRM Lion - Recovery of Critical Raw Materials from Li-ion Batteries through Improved Recycling Processes (2025 - 2029)	CRM Lion ontwikkelt duurzame recyclingtechnologieën voor lithium-ionbatterijen door elektrochemische en hydrometallurgische methoden te combineren in modulaire, schaalbare faciliteiten. Het project wil kritieke grondstoffen efficiënter en schoner terugwinnen en ondersteunt daarmee de Europese circulaire economie en zelfvoorziening in een circulair batterij-ecosysteem.	Recycling en Levensduur verlenging
SMART-CBAT - Sustainable Materials Research and Technology for Circular Batteries (2025 - 2028)	SMART-CBAT ontwikkelt schaalbare en duurzame batterijcomponenten, productietechnologieën, apparatuur en processen voor batterijen van de volgende generatie. Het project wil batterijprestaties, veiligheid, energiedichtheid, levensduur en laadsnelheid verbeteren, terwijl de afhankelijkheid van schaarse materialen en de milieu-impact wordt verminderd. Het ondersteunt Nederlandse technologische onafhankelijkheid, energiezekerheid en de ontwikkeling van circulaire batterijtechnologieën.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur
CIMBATT - Toward a Dutch Circular Battery Chain for Heavy Transport (2025 - 2029)	CIMBATT ontwikkelt circulaire batterijpacks door de volledige waardeketen te integreren, van ontwerp tot hergebruik. Het project wil kosten verlagen en tegelijk kwaliteit, duurzaamheid en circulariteit verbeteren. Het ondersteunt Nederlandse strategische onafhankelijkheid, materiaalzekerheid, voorbereiding op regelgeving en de ontwikkeling van een sterke circulaire batterijeconomie.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
SiLENT FLIGHT (2025 - 2029)	SiLENT FLIGHT ontwikkelt een certificeerbaar, modulair lithium-ionbatterijsysteem voor de luchtvaart, waarbij silicium gebaseerde technologie wordt gebruikt om een groter vliegbereik en langdurig piekvermogen mogelijk te maken. Het project richt zich op veiligheid, circulariteit, repareerbaar packontwerp en mogelijke dragende batterijstructuren om gewicht te verminderen. Door EagleBAT's batterij-expertise te combineren met Inhollands kennis van systeemintegratie en certificering ondersteunt het project praktische luchtvaarttoepassingen en draagt het bij aan CO_2- en geluidsreductie.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
SLD BATT (Sustainable Long Duration Battery Technology) & COE (2025 - 2028)	SLDBatt ontwikkelt duurzame lange-duur batterijopslagsystemen die hernieuwbare energie 8 tot 100 uur kunnen opslaan. Het project adresseert de behoefte aan betrouwbare en betaalbare elektriciteit wanneer wind- en zonne-energie niet beschikbaar zijn. Door universiteiten, instituten voor toegepast onderzoek, technologiebedrijven en energie- en chemiepartners samen te brengen, ondersteunt SLDBatt Nederlandse materiaalonafhankelijkheid, circulaire batterijontwikkeling en de energietransitie. Het expertisecentrum binnen SLDBatt ontwikkelt en deelt kennis, techno-economische en beleidsmatige analyse, standaarden en opleidingen voor long-duration batterijopslagsystemen (LDES) in stationaire toepassingen.	Stationaire toepassingen
Open Battery Industrialisation Centre (2025 - 2029)	De eerste Nederlandse faciliteit voor het testen en opschalen van batterijtechnologie richting industriële productie. TNO/Holst Centre, VDL-ETS, RVO en de provincie Noord-Brabant: gevestigd op de Automotive Campus in Helmond.	Alle



Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
	Investeringssubsidie Maakindustrie Klimaatneutrale Economie (IMKE) - onderdeel van MICB	
Uitbreiding productiecapaciteit bestaande productielijn lithium-ion batterijen (2025 - 2028)[52]	Dit project **(Zhero Systems**, voorheen **Refurb Battery Productions B.V.)** schaalt de productiecapaciteit van lithium-ionmodules binnen vijf jaar op door uit te breiden van één naar vijf productielijnen in september 2029 en over te stappen van handmatige naar semiautomatische productie. De geplande investeringen verhogen de capaciteit van 600 naar 6.000 lithium-ioncellen per uur en ondersteunen grootschaligere productie van batterijmodules.	Levensduur verlenging & herbestemming
AnodMaS - Anode Manufacturing at Scale (2025 - 2028)	Het AnodMaS-project **(LionVolt)** ontwikkelt een productielijn voor innovatieve 3D-anodes op de Brainport Industries Campus in Eindhoven, waarmee de productiecapaciteit wordt opgeschaald naar 20 MWh per jaar. Voortbouwend op de bestaande pilotlijn voor 3D-anodes ondersteunt het project industriële productie van belangrijke batterijcomponenten voor duurzamere batterijen. Het draagt bij aan Nederlandse en Europese batterijproductiecapaciteit, verbetert de concurrentiepositie ten opzichte van Aziatische batterijproducenten en creëert regionale werkgelegenheid.	(Next-gen) Componenten, Materialen, en Productieapparatuur
Productie batterijpakketten en bulkbatterijen (2025 - 2028)	Het project wil een productiefaciliteit van **A.R.P engineering B.V.** in Ter Aar realiseren voor de seriële productie van batterijpacks voor zware mobiele machines en modulaire bulkbatterijen met geïntegreerde laadsystemen en bijbehorende besturings- en veiligheidssystemen. Het project richt zich op kosteneffectieve batterijoplossingen met hoog vermogen voor de bouw- en infrastructuursector, inclusief thermisch management en mobiele laadoplossingen voor locaties met beperkte netcapaciteit.	Stationaire toepassingen en Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
Cleantron - Update Lijn 6 (2025 - 2028)	Dit project moderniseert **Cleantron's** bestaande productielijn 6 om grotere lithium-ionbatterijen op basis van prismatische LFP-cellen te produceren. De modernisering verhoogt productiecapaciteit, efficiëntie en productkwaliteit, waardoor Cleantron kan voldoen aan de groeiende vraag naar betrouwbare energieopslagsystemen in mobiliteits- en industriële toepassingen en tegelijk haar strategische en duurzaamheidsdoelen ondersteunt.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
AE Battery Competence and Production Facility (2025 - 2029)	Dit project realiseert een geavanceerde productiefaciliteit in Waalwijk voor de ontwikkeling en productie van duurzame batterijsystemen. De faciliteit van **Advanced Electromagnetics B.V.** levert hoogwaardige batterijoplossingen voor mobiliteit, maritieme toepassingen en grootschalige energieopslag, terwijl de Nederlandse maakindustrie wordt versterkt, CO_2-emissies worden verminderd en strategische onafhankelijkheid in batterijtechnologie wordt vergroot.	Stationaire toepassingen en Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
Cleantron - Lijn 7 (2025 - 2028)	Dit project bouwt **Cleantron's** nieuwe geautomatiseerde productielijn 7, uitgerust met een laserlasstation en brandveilige bufferopslag. De lijn is ontworpen voor batterijmodules met enkelzijdige lassen en aluminium busbars, en vergroot de productiecapaciteit, verlaagt kosten en verbetert de veiligheid van modules. Het project ondersteunt de groeiende vraag naar batterijen voor LEV's, bouwmachines en maritieme toepassingen.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
Opschaling productielijnen high-end solid state batterijen (2025 - 2028)	**Tulip Tech B.V.** realiseert in Nederland productielijnen voor high-end solid-statebatterijen om de productiecapaciteit op te schalen. Tijdens de verslagperiode richtte het project zich op de voorbereiding van productie-infrastructuur, aanschaf en installatie van apparatuur, inrichting van test- en kwaliteitscontrolevoorzieningen en voorbereiding van integratie en commissioning. Het werk ondersteunt de gecontroleerde opstart van industriële batterijproductiecapaciteit in Nederland, in lijn met de doelstellingen van de IMKE-regeling.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
Batterij-productiefaciliteit op maat in Nederland (2025 - 2028)	Dit project **(Intercel Energy Solutions B.V.)** ontwikkelt een nieuw productiecomplex voor maatwerkbatterijsystemen in Nederland. De faciliteit zal meerdere productielijnen huisvesten, waardoor de productiecapaciteit aanzienlijk toeneemt en elektrificatie in verschillende sectoren wordt ondersteund. Het project richt zich op veilige productie en opslag volgens PGS 37-2-normen, creëert duurzame banen, versterkt de Nederlandse maakindustrie en vermindert het risico dat batterijproductie buiten de Europese Economische Ruimte verdwijnt.	Stationaire toepassingen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Productielijn Ore Energy ijzer-lucht bulkbatterij (2025 - 2028)	Dit project realiseert een productielijn voor de commerciële productie van **Ore Energy's** innovatieve ijzer-lucht bulkbatterijen. Het project maakt grootschalige productie van duurzame lange-duur energieopslag mogelijk en ondersteunt netstabiliteit en de energietransitie. Het versterkt ook de Europese strategische autonomie door productie binnen de EER te vestigen en draagt bij aan Nederlandse en Europese ambities voor duurzame batterijproductie en energieopslag.	Stationaire toepassingen
V-STORE: Vanadiumflow Systemen ten behoeve van de Opslag van Renewable Energie (2025 - 2028)	H2OVOLT **(Peeters Energy Solutions)**, investeert in een productiefaciliteit in Reusel voor de seriële productie van Vanadium Redox Flow Battery-modules. Het project ondersteunt schaalbare, langlevende en recyclebare energieopslagoplossingen met stabiele laadprestaties en zonder risico op thermal runaway. Door productie van VRFB-modules mogelijk te maken, draagt het bij aan duurzame energieopslag, netstabiliteit en de energietransitie.	Stationaire toepassingen
Geavanceerde productielijn en Slimme automatisering voor accu's in Nederland (2025 - 2028)	**Ionbase** investeert in een nieuwe geautomatiseerde productielijn voor lithium-ijzerfosfaatbatterijen. De lijn verhoogt de productiecapaciteit, vermindert handmatige arbeid en verlaagt productiekosten. De batterijen zijn geschikt voor elektrische voertuigen, vaartuigen, energieopslagsystemen en industriële toepassingen, en ondersteunen verdere opschaling van bewezen LFP-batterijtechnologie.	Stationaire toepassingen, Heavy Duty & Dual-Use toepassingen en Productieapparatuur

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Andere Nationaal Groeifonds projecten		
Charging Energy Hubs (2024 - 2027)	Charging Energy Hubs versnelt de uitrol van laadinfrastructuur voor de logistieke sector. Het project integreert batterijopslag, hernieuwbare energie, slimme planning en technologische innovaties in bestaande elektriciteitsnetten om netdruk te verminderen en elektrische logistiek te ondersteunen. Innovaties worden getest op drie use-caselocaties als pilots voor nationale en internationale opschaling.	Stationaire toepassingen en Heavy Duty & Dual-Use toepassingen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Zero Emission Services (2022 - 2026)	ZES ontwikkelt modulaire batterij-energiecontainers en een robuust laadnetwerk om volledig elektrische, emissievrije binnenvaart mogelijk te maken. Het project richt zich op schepen die varen tussen laadstations nabij containerterminals langs belangrijke Nederlandse binnenvaartroutes. Het ondersteunt de opschaling van elektrische binnenvaartschepen en laadinfrastructuur en draagt bij aan nationale en internationale duurzaamheidsdoelen voor de binnenvaart.	Stationaire toepassingen en Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
Luchtvaart in Transitie (2022 - 2030)	LiT wil Nederland positioneren als Europese koploper in duurzame luchtvaartinnovaties en internationale marktintroductie ondersteunen. Het programma omvat projecten op het gebied van geavanceerde hoogvermogen elektrische bekabeling voor hybride-elektrische vliegtuigen en waterstof-brandstofcelsystemen, lichtgewicht composietstructuren en human capital-ontwikkeling om voldoende geschoold personeel voor de transitie te waarborgen.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Holland High Tech		
FRISBI (2025-2027)	FRISBI ontwikkelt een industrieel schaalbaar roll-to-roll Atomic Layer Deposition (ALD)-systeem voor de productie van hoogwaardige siliciumanodes met een verbeterde levensduur en energieprestatie. Het project combineert innovatieve coatingtechnologieën met geavanceerde productieapparatuur om een robuust en energie-efficiënt productieproces voor lithium-ionbatterijen te realiseren. Onder leiding van **Kalpana Systems** en **TU Delft** richt het project zich op de demonstratie van deze technologie op industriële schaal.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
IMBATT (2025-2027)	IMBATT ontwikkelt geavanceerde elektrokatalysatoren voor ijzer-luchtbatterijen om de reactie-efficiëntie te verhogen en energieverliezen te verminderen. Het project optimaliseert nikkel-ijzer- en mangaanoxide-katalysatoren om de round-trip efficiëntie, vermogensdichtheid en levensduur van ijzer-luchtbatterijen te verbeteren. Onder leiding van **Ore Energy** en **TNO** richt het project zich op de demonstratie van efficiëntere en commercieel haalbare ijzer-luchtbatterijen voor langdurige energieopslag.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Stationaire toepassingen
BIGCM (2026-2029)	BIGCM ontwikkelt strategieën voor de integratie van tweedehands EV-batterijen in hoogvermogen-laadinfrastructuur om netcongestie te verminderen en de levensduur van batterijen te verlengen. Het project combineert modellering, vermogenselektronica en systeemontwerp om veilige, gestandaardiseerde en schaalbare batterij-integratie mogelijk te maken. Onder leiding van **TU Delft** en **ABB E-mobility** richt het project zich op de demonstratie van circulaire batterijoplossingen voor slimme en flexibele laadinfrastructuur.	Levensduur verlenging & herbestemming
AEROCELL (2026 - 2028)	**AEROCELL** ontwikkelt batterijcellen van de volgende generatie voor defensie-UAV's met energiedichtheden boven 550 Wh/kg, prestatieniveaus die commercieel nog niet beschikbaar zijn. Het project combineert droge elektrodeverwerking en lithiummetaalintegratie om hoge prestaties te bereiken voor eenmalige defensiemissies. Onder leiding van **TNO** en **Tulip Tech** richt het project zich op demonstratie van deze prestatieniveaus voor defensietoepassingen.	(Next-gen) Componenten & Materialen, Productieapparatuur en Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
DRYSHIELD	DryShield ontwikkelt een roll-to-roll machine voor droge-elektrodecoating met lokale atmosfeercontrole en een geclusterde airlock-architectuur. Het project wil de noodzaak van volledige dryroom-infrastructuur in batterijelektrodeproductie wegnemen, waardoor kosten en energiegebruik dalen en verwerking van solid-statebatterijen mogelijk wordt. Onder leiding van **D&M Vacuumsystemen** en **TNO** ondersteunt het efficiënte en schaalbare productie van batterijen van de volgende generatie.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur

Programma / project	Scope	Relevant onderdeel van de waardeketen
Andere nationale en regionale programma's, subsidieregelingen en investeringen		
Routekaart Circulaire en Weerbare Batterijen (2025 - 2030/2035)	De Circular and Resilient Batteries Roadmap beschrijft een plan voor 5–7 jaar om circulaire batterij waardeketens in Nederland te versterken, afgestemd op EU-regelgeving en bestaande nationale initiatieven. De roadmap richt zich op drie actielijnen: duurzame batterijchemie, Nederlandse recyclingfaciliteiten voor terugwinning van kritieke materialen en levensduurverlenging via refurbishment. De roadmap benoemt ook belangrijke randvoorwaarden, zoals snellere vergunningverlening, betaalbare energie, een sterk investeringsklimaat en ontwikkeling van geschoold personeel.	Recycling en Levensduur verlenging
Actieagenda Energy Materials (2025-2035)	De Actieagenda Energy Materials beschrijft de nationale innovatieagenda voor batterijcel- en waterstof elektrolysetechnologie binnen de Kennis- en Innovatieagenda Sleuteltechnologieën. Voor batterijen zijn vier innovatieprogramma's uitgewerkt: equipment-industrialisatie, digitale optimalisatie van batterijproductie, flexibele celproductie-infrastructuur en versterking van de strategische innovatieketen voor Nederlandse startups en scale-ups.	(Next-gen) Componenten & Materialen en Productieapparatuur
Condor Zero Emission Inland Shipping	Dit project richt zich op de tank-to-wake fase van scheepsaandrijving, waarbij wordt gekeken naar de energie die aan boord beschikbaar is en hoe deze wordt gebruikt. Het omvat energiedragers zoals waterstof, batterijen en alternatieve brandstoffen, evenals conversietechnologieën zoals brandstofcellen, batterijen en elektromotoren.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
Aanschafsubsidie Zero-Emissie Trucks (AanZET) (2026 - 2030)	De Aanschafsubsidie Zero-Emissie Trucks, AanZET, is bedoeld voor ondernemers en non-profitorganisaties die een nieuwe, volledig emissievrije vrachtwagen willen kopen of financieel leasen.	Heavy Duty & Dual-Use toepassingen
RenewaFLEXNL – Integrating Renewable Energy and Offtakers with Long-Duration Energy Storage (LDES) for a Smarter Grid MOOI	RenewaFLEXNL versnelt Nederlandse lange-duur energieopslagtechnologieën om de integratie van hernieuwbare energie te ondersteunen, netcongestie te verminderen en de betrouwbaarheid van energievoorziening te verbeteren. Het project ontwikkelt en valideert drie LDES-oplossingen, zowel elektrisch als thermisch, samen met een open Energy Management System-blauwdruk voor geoptimaliseerde colocatie en operationele aansturing. Via technische validatie, economische modellering en regelgevende en milieukundige beoordeling ondersteunt het schaalbare en duurzame LDES-uitrol in het Nederlandse energiesysteem.	Stationaire toepassingen
OpslagKracht (2025 - 2029) IMPULS-Gelderland	OpslagKracht onderzoekt hoe alternatieve energieopslagtechnologieën kunnen helpen om netcongestie in Nederland te verminderen. Het programma scant, test, modelleert en vergelijkt opslagoplossingen zoals flowbatterijen, zoutbatterijen, thermische opslag en vliegwielen in concrete congestiecases. Het ontwikkelt beoordelingskaders, opensource modellen, haalbaarheidsstudies en pilotprotocollen om bedrijven, netbeheerders en beleidsmakers te ondersteunen bij het kiezen van geschikte opslagoplossingen. Het project wil Europese opslagtechnologieën versnellen, afhankelijkheid van buitenlandse batterijproductie verminderen en een flexibeler en toekomstbestendig energiesysteem ondersteunen.	Stationaire toepassingen
EU Technical Support Instrument (TSI)		
DATAPIPE (2022 - 2024)	De Green Deal, het Circular Economy Action Plan en nationale beleidsdoelen zijn gericht op waardebehoud van producten, vermindering van het gebruik van primaire materialen en het voorkomen van afval. Het monitoren van de praktische uitvoering van circulaire-economiebeleid en instrumenten zal uitdagend zijn, en bij grensoverschrijdende stromen blijft de douane een sleutelrol spelen. Traceerbaarheid van producten en hun materiaalsamenstelling is essentieel voor handel, om hoogwaardige secundaire materialen terug te winnen en bedrijven in staat te stellen naleving aan te tonen. Die traceerbaarheid is moeilijk te realiseren, omdat informatie verspreid is over meerdere actoren in complexe toeleveringsketens.	Recycling en Levensduur verlenging

Bijlage 4 Lijst met verwijzingen

[1] Holland High Tech, *Actieagenda Batterijsystemen*, 23 september 2022

[2] Haskoning & BCI Global, *Evaluatie Actieagenda Batterijsystemen*, 27 februari 2026 (nog te publiceren)

[3] Rijksoverheid, *Nederlandse interdepartementale strategische aanpak batterijen*, 19 december 2025

[4] The Draghi report, *The future of European competitiveness*, 16 september 2025

[5] Europese Commissie, *Industrial Accelerator Act*, 4 maart 2026

[6] Rapport Wennink: *De route naar toekomstige welvaart*, 12 december 2025

[7] BCC-NL Market Intelligence-modellering, gebaseerd op IEA Global EV Outlook 2026, JRC Battery Technology in the European Union

Aannames voor BESS, recycling, componenten, apparatuur en UAV/dual-use zijn getoetst aan Rho Motion, McKinsey en MarketsandMarkets. Waarden zijn indicatief en kunnen grenzen combineren tussen pack-, systeem-, component- en totale value-pool-niveaus.

Roland Berger, *Battery Monitor 2024/2025: A turbulent year and outlook for value chain players*, 6 februari 2025

Argus Latest Market News, *Global battery demand rises close to 1TWh in 2024: IEA*, 15 mei 2025

[8] Consultancy.nl, *Snelgroeiende Europese batterijmarkt in het vizier van investeerders*, 13 april 2026.

[9] Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, *De Nationale Technologiestrategie | Bouwstenen voor strategisch technologiebeleid*, januari 2024

[10] Ministerie van Defensie, *Defensie Strategie voor Industrie en Innovatie 2025-2029*, 4 april 2025

[11] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Nationaal Programma Circulaire Economie 2025*, 13 oktober 2025

[12] Nationaal Groeifonds, *Material Independence & Circular Batteries*

[13] McKinsey, *How batteries will drive the zero-emission truck transition*, 18 september 2024.

Voor Heavy Duty toepassingen lijkt module- en packproductie zich sterker te lenen voor gestandaardiseerde, repeteerbare packplatformen dan bij passenger EV's. McKinsey stelt dat standaardisatie van truckbatterijen productie-efficiëntie kan verhogen, servicebaarheid verbetert en second-life/recycling aantrekkelijker maakt. Daardoor kunnen leveranciers beter inspelen op de markt door te focussen op efficiënte productie, betrouwbaarheid, onderhoudbaarheid en levenscyclus-kosten, in plaats van voortdurend mee te bewegen met veranderende EV-packarchitecturen en celchemieën.

RAI, *Automotive roadmap 2025* - 2035, 2025

[14] ACEA: Trucks and buses, *EU agrees on most ambitious CO2-reduction targets globally*, 18 januari 2024;

Industry News #5, *ACEA projects the need for 50,000 charging stations by 2030 to reach climate target*;

ICCT, *Race to zero: European heavy-duty vehicle market development quarterly (January–December 2025), 11 maart 2026*,

ACEA, *Fact sheet: trucks*, 1 juni 2026

De verwachting van ACEA is dat "…..By 2030, it is projected that there will be 330,000 battery-electric trucks (BEVs) and 70,000 hydrogen-powered trucks on the road. ….." Dus: om de EU doelstellingen te behalen verwacht ACEA dat de vloot battery-electric trucks (BEVs) een omvang moet hebben van 330k in 2030.

[15] Sustainable Bus, *Zero-emission buses reach 60% of EU city bus market in 2025*, 23 februari 2026.

Kennisplatform CROW, *Monitor zero-emissie bussen*, 1 april 2026.

Zero Emissie Bus, Bestuursakkoord Zero Emissie Busvervoer

[16] ElaadNL: Bouwen & Laden; *Outlook Bouw Update 2024*, juli 2024

Nederland behoort, samen met Noorwegen en Zweden, tot de koplopers op het gebied van emissieloos bouwen. Deze positie wordt ondersteund door nationale beleidsinstrumenten zoals de Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen en de SSEB-subsidieregeling.

Dit segment wordt mede aangedreven vanuit het programma Schoon en Emissieloos Bouwen waarin de Rijksoverheid, medeoverheden, marktpartijen, brancheorganisaties en kennisinstellingen samenwerken aan één aanpak om bouw-, onderhouds- en sloopprojecten schoner uit te voeren. Dit programma wordt gecomplementeerd door de *Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel*, voor de aanschaf van en de ombouw naar emissieloze (uitstootvrije) bouwwerktuigen en bouwvaartuigen door bouwbedrijven. Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel (SSEB) | RVO.nl

[17] Topsector Logistiek, *Hybridiseren van de kleine binnenvaart*
en *Vergroeningskansen binnenvaart (CEMT I-III) door meeliften op ZE-trucks*

[18] BusinessWire: *Connected Commercial Drones Report 2025 - The Number of Connected Commercial Drones Reached 2.8 Million Units Worldwide in 2024 and is Set to Reach 4.5 Million Units by 2029 - ResearchAndMarkets.com*, 25 april 2025,

EASA, *Drones & Air Mobility*

[19] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Nationale Routekaart Bidirectioneel Laden*, juni 2026

[20] Roland Berger: *Electric and hybrid systems in commercial and off-highway vehicles*, 3 juni 2025

Door de diversiteit aan Heavy Duty toepassingen blijft de behoefte aan batterijoplossingen gevarieerd. Er wordt benadrukt dat elektrificatie in commercial en off-highway voertuigen afhankelijk is van verschillen in productprestaties, infrastructuur en TCO, waardoor meerdere aandrijftechnologieën voorlopig naast elkaar zullen blijven bestaan.

[21] Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, *Routekaart Energieopslag 2023*, voorjaar 2023

Netbeheer Nederland, *Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025*, 14 mei 2025

ACM, *ACM ziet grond voor verlaagd transporttarief voor batterijen*, 5 oktober 2023

IEA, *Batteries and Secure Energy Transitions*, 25 april 2024

ROM Nederland, *Trots op het Regionaal Versterkingsplan NTS – samen verder bouwen aan sterke waardeketens*, 14 september 2025

[22] Rijksoverheid, *Integrale Beleidsagenda Energieopslag,* 2025

[23] McKinsey & Company, *Enabling renewable energy with battery energy storage systems*, 2 augustus 2023

[24] Alfen, *Alfen and CATL Reach 5 GWh Sodium-Ion Battery Storage Partnership in Europe*, 16 juli 2026

[25] Grand View Research, *Battery Anode Materials Market Size Report 2024-2030*, 2024.

[26] MarketsandMarkets, *Lithium-Ion Battery Anode Market by Material, Battery Product, End-use, Production Technology, and Region - Global Forecast to 2030*, juli 2025

[27] Elysian Aircraft/BCC-NL: *Position Paper: "Een Nieuwe Fase in High-end Batterijontwikkeling Biedt Kansen voor de Nederlandse Maakindustrie".*

[28] MarketsandMarkets: *Battery Manufacturing Equipment Companies*

[29] Battery Atlas 2026, *Mapping the European Li-ion battery industry*, 3rd edition

[30] COTES: *maximising energy efficiency in battery dry rooms*

[31] PR Newswire and AM Batteries, *AM Batteries Launches First Interactive Savings Calculator to Quantify Cost and Performance Gains from Dry Electrode Manufacturing*, 26 augustus 2025

[32] World Electric Vehicle Journal: *Optimizing the Cell Finishing Process: An Overview of Steps, Technologies, and Trends*; Kampker, A.; Heimes, H.; Offermanns, C.; Wennemar, S.; Robben, T.; Lackner, N., World Electr. Veh. J. 2023

[33] Europese Commissie, *VERORDENING (EU) 2023/1542 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD (Europese Batterijverordening)*, 12 juli 2023

[34] Europese Commissie, *European Critical Raw Materials Act; Sustainable supply of raw materials*, 16 maart 2023

[35] Stanford Report: *Existing EV batteries may last up to 40% longer than expected*, 9 december 2024

[36] *ARN, Resultaten Batterijrecycling 2025*

[37] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, *Safe and Sustainable by Design (SSbD)*, concept.

[38] het NWO-project DigiCellFab.

Dit project heeft het als doel een data-infrastructuur voor batterijproductie te ontwikkelen.

[39] Energy Storage NL: *Ore Energy Completes EU-Funded Multi-Day Energy Storage Pilot at EDF in France*, 10 februari 2026

[40] Europese Commissie, *VERORDENING (EU) 2023/2854 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD (Data Act)*, 13 december 2023

[41] Europese Commissie, *VERORDENING (EU) 2024/1781 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD (Ecodesign for Sustainable Products Regulation)*, 13 juni 2024

[42] Inkwood Research, *Europe UAV Battery Market Forecast 2025-2032*

[43] Elysian Aircraft/BCC-NL, *Position Paper: "Een Nieuwe Fase in High-end Batterijontwikkeling Biedt Kansen voor de Nederlandse Maakindustrie"*.

[44] Energy Innovation NL, *Arbeidsmarkt als onderdeel van systemisch ontwerp energiesysteem*: Rapportage 4, Van der Vlies, C., Teulings, B., Valkenier, C., & Bos, D., mei 2026

[45] Rijksoverheid, *Kabinet lanceert Talentstrategie voor toekomstige welvaart*, 10 juli 2026

[46] Rijksoverheid, *Productiviteitsagenda*, 8 september 2025

[47] Dialogic & SEO, Competentieprognose Human Capital Agenda Nationaal Groeifondsproject Material Independence & Circular Batteries, 2026

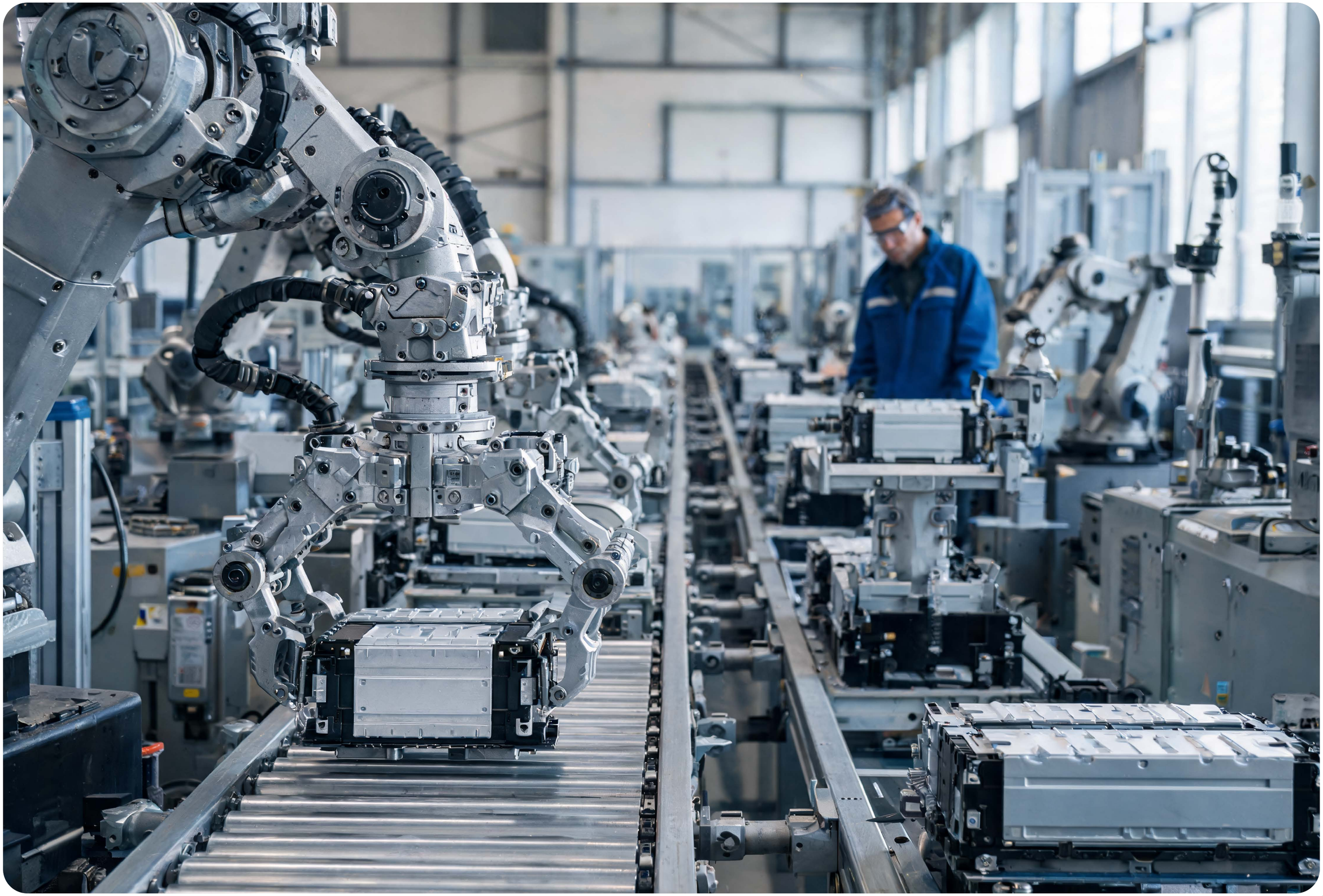
[48] Europese Commissie, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Electrification Action Plan*, 17 juli 2026

[49] Ministerie van Onderwijs, *Cultuur en Wetenschap, Subsidieregeling Techkwadraat 2025–2028, Vastgesteld 19 november 2024*; inwerkingtreding 27 november 2024

[50] 50 Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap, *Subsidieregeling Sterk Techniekonderwijs 2025–2028*, Vastgesteld 27 maart 2024; inwerkingtreding 3 april 2024

[51] RVO, *TechBridge: subsidie voor sleuteltechnologieontwikkeling*

[52] RVO, *Productielijn Ore Energy ijzer-lucht bulkbatterij | Projecten Database NL*, 23 april 2025





Automotive Campus 30
5708 JZ Helmond
The Netherlands

© 2026 BCC-NL The photographs included in this publication are protected by copyright. They may not be copied, reproduced, distributed, published, or used in any form without the prior written permission of BCC-NL and/or the respective copyright holders.

Bij de redactie van de teksten in dit document is gebruikgemaakt van kunstmatige intelligentie (AI). De inhoud is vervolgens door de auteurs gecontroleerd, beoordeeld en waar nodig aangepast.

Battery Competence Cluster - NL

Government of the Netherlands
Supported by the
National Growth Fund

© 2026 BCC-NL. All rights reserved. No part of this publication may be copied, stored, or made public in any form whatsoever without prior written permission from BCC-NL.