

# ENERGIEOPSLAG IN TUNNELS: EINDRAPPORT

HARRY VAN DER WEIJDE, PIETER VERSTRATEN, NIELS JANSEN, ARAVIND SATISH

Projectnaam: Batterijopslag in tunnels  
Projectnummer: 060.54783

Sponsor: Rijkswaterstaat  
Datum: 28 januari 2023

# › INHOUDSOPGAVE

Managementsamenvatting	p. 3
1. Introductie en scope	p. 5
2. Quick scan van alternatieven	p. 7
a) Variantenanalyse waardestromen	p. 7
b) Variantenanalyse technologieën	p. 15
c) Conclusie van quick scan	p. 18
3. Analyse van een energiearme tunnel	p. 19
a) Energieneutrale tunnel	p. 21
b) Energiearme tunnel	p. 23
c) Day-ahead sturing	p. 27
4. Vergelijking	p. 28
a) Overzicht	p. 29
b) Bijdrage aan energiesysteem	p. 30
c) Financiële analyse	p. 32
d) Bijdrage aan autonomie	p. 33
5. Kwalitatieve aspecten	p. 36
6. Conclusies en adviezen	p. 39

## › MANAGEMENTSAMENVATTING

- › TNO is door Rijkswaterstaat (RWS) gevraagd om onderzoek te doen naar de mogelijke varianten en functies van energieopslagsystemen in tunnels. In de eerste fase van dit onderzoek zijn een aantal potentiële toepassingen voor energieopslag in tunnels gedefinieerd en is de technische en economische haalbaarheid van zowel deze toepassingen als opslagtechnologieën kwalitatief geanalyseerd. Uit deze eerste fase is gebleken dat energieopslag op verschillende manieren bij kan dragen aan zowel de energievoorziening van een tunnel als het bredere Nederlandse energiesysteem. De bijdrage aan de energieneutraliteit van een tunnel is gekozen als variant om verder uit te werken in de tweede fase van het project. Hiernaast is ook gekeken naar de inzet van energieopslag om waarde toe te voegen aan het energiesysteem door pieken en dalen in hernieuwbare opwek of de elektriciteitsvraag te nivelleren.
- › Energieopslag kan in combinatie met lokale hernieuwbare opwek significant bijdragen aan de energieneutraliteit van een tunnel. Volledige energieneutraliteit, d.w.z., volledige onafhankelijkheid van de aansluiting, impliceert een energieopslag systeem dat onrealistisch groot en duur is. Met een beperkte hoeveelheid opslag kan wel een grote mate van energieneutraliteit worden bereikt; voor een typische tunnel (als casus is de Noordtunnel gebruikt) kan een combinatie van opslag en zonnepanelen in ongeveer driekwart van de energiebehoefte van de tunnel voorzien. Ook zorgt energieopslag ervoor dat een tunnel langer in dienst kan worden gehouden als de aansluiting op het elektriciteitsnet wegvalt. Voor een opslagsysteem met een realistisch vermogen kan dit, afhankelijk van de gebruikte operationele strategie en het jaargetijde, in de meeste gevallen 1-4 uur aan autonomie toevoegen. Hiermee voegt opslag een waarde toe, zowel voor korte stroomuitval (<1 uur) en bij ongevallen (4 uur). In de zomer is er gemiddeld ruim 20 uur te overbruggen door de combinatie van opslag en zonne-opwek.
- › Energieopslag kan hiernaast ook bredere baten voor het energiesysteem hebben, bijvoorbeeld door op systeemniveau pieken in hernieuwbare opwek te nivelleren. Dit impliceert wel een andere strategie dan inzet voor energieneutraliteit, vooral in de zomermaanden. Tot op zekere hoogte kunnen beide opties worden gecombineerd. Bijvoorbeeld door in de zomermaanden vooral te sturen op energieneutraliteit en in de wintermaanden, als er sowieso weinig lokale opwek is, de batterij in te zetten op energiemarkten. Een bijkomend voordeel van deze combinatie is dat de batterij ook het hele jaar door een grote bijdrage kan leveren aan de autonomie van de tunnel.
- › Er is een kwantitatieve business case met economische onderbouwing voor deze waardestromen opgesteld. Uit dit onderzoek blijkt dat de inzet van energieopslag voor de energievoorziening van tunnels vanuit een puur financieel opzicht waarschijnlijk voor de meeste tunnels niet aantrekkelijk is. Ook levert energieopslag slechts een kleine CO2-besparing op. Hierop kunnen uitzonderingen bestaan, bijvoorbeeld als de lokale elektriciteitsnetbeheerder een sterke vraag naar congestiemanagement heeft die niet door andere partijen kan worden geleverd. Ook is wel op te merken dat de in dit rapport geschetste business case geldt voor een *greenfield* setting. Als al investeringen in energieopslag voor, bijvoorbeeld, een uninterruptible power supply (UPS)-systeem zijn gepland, dan is het mogelijk dat de kosten van een tweede of groter opslagsysteem kleiner zijn en de financiële business case positiever uitpakt. Bovendien, als de eigen energieneutraliteit of autonomie van een tunnel voor RWS belangrijk is, dan kan het vanwege de relatief beperkte kosten van een opslagsysteem betekenen dat energieopslag ondanks de negatieve financiële business case wel zin heeft. Bij renovatie van tunnels, vooral als daarbij al moet worden geïnvesteerd in energieopslag in de vorm van een UPS-systeem, kan de toevoeging van opslag dus zeker nuttig zijn.

## › MANAGEMENTSAMENVATTING

- › Batterijen lijken op dit moment de beste vorm van opslag voor de meeste tunnels. Verschillende batterijtechnologieën zijn toepasbaar; de keuze voor een specifieke technologie moet worden gemaakt op basis van lokale ruimtelijke- en veiligheidsaspecten, en eventuele mogelijkheden voor kostenbesparingen door een opslagsysteem met een al gepland UPS-systeem te combineren. Voor opslagsystemen binnen een tunnel moeten de veiligheidsimplicaties van opslag goed worden onderzocht voor de specifieke situatie ter plaatse.
- › Uit de analyse volgt dat, als autonomie en energieneutraliteit voor het tunnelbedrijf belangrijk zijn, het zin heeft om vooral tijdens renovaties de voor- en nadelen van lokale energieopslag (ook i.c.m. zonnepanelen) te analyseren. Hierbij is het niet zinvol om alleen opslag 100% autonomie of energieneutraliteit na te streven, maar realistische doelen te stellen. Ook blijkt dat het belangrijk is om een goede operationele strategie voor een opslagsysteem te formuleren. Een strategie die primair de energieneutraliteit dient, maar additionele waarde toevoegt door vooral in de winter op energiemarkten actief te zijn in het nivelleren van pieken, is hierbij een optie die het overwegen waard is. Hierdoor wordt een balans gevonden tussen enerzijds de baten voor RWS en anderzijds de baten voor het energiesysteem. Een bijkomend voordeel van deze combinatie is dat de batterij ook het hele jaar door een grote bijdrage kan leveren aan de autonomie van de tunnel. Uiteraard blijft het belangrijk om, bij alle plannen die een groot effect op de netto energievraag kunnen hebben, in een vroeg stadium met lokale netbeheerders te overleggen.

# › 1. INTRODUCTIE EN SCOPE

# › INTRODUCTIE EN SCOPE

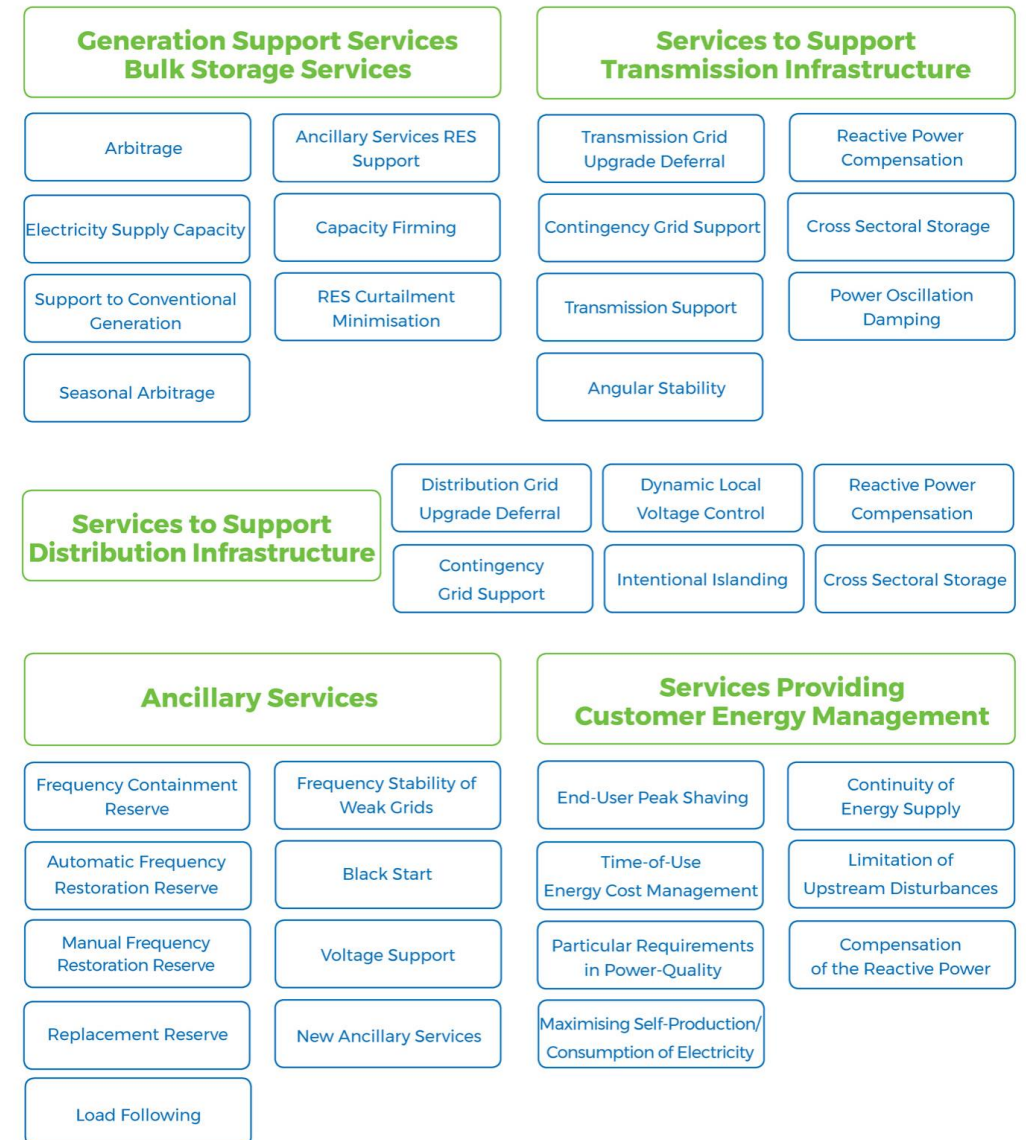
- › Rijkswaterstaat (RWS) heeft de ambitieuze klimaatdoelstelling om in 2030 klimaatneutraal te zijn. Ook wil Rijkswaterstaat positief bijdragen aan de bredere energietransitie, bijvoorbeeld door maatschappelijke waarde te creëren door verminderen van netcongestie. Energieopslag in tunnels zou in theorie aan beide doelen kunnen bijdragen. Het is echter nog onduidelijk hoe dit op de beste manier kan gebeuren, gebruik makend van welke technologie, en wat de private en maatschappelijke waarde van energieopslag is.
- › Het energiesysteem van een tunnel heeft specifieke kenmerken waardoor bestaande generieke analyses van de waarde van energieopslag niet voldoende zijn om uitspraken te kunnen doen over deze specifieke toepassing. Hiervoor is een tunnel-specifieke analyse nodig. Tunnels hebben een primaire netaansluiting welke de tunnel in normale situaties van energie voorziet. Daarnaast kent iedere tunnel een UPS-systeem (*uninterruptable power supply*) die elementaire systemen actief houdt in het geval de netaansluiting wegvalt, in de regel voor circa 1 uur. Daarnaast kennen veel tunnels een secundaire energievoorziening (noodstroomaggregaten of een tweede netaansluiting) die de gehele energievraag van de tunnel kan leveren indien de primaire voeding (te) lang wegblijft. Netaansluitingen zijn relatief groot, omdat het energiegebruik van een tunnel tijdens calamiteiten veel hoger ligt dan tijdens normale operationele omstandigheden. Energieopslag speelt al een belangrijke rol in tunnels, als onderdeel van het UPS-systeem. Een energieopslagsysteem zou daarnaast in zowel de primaire als de secundaire energievoorziening een rol kunnen spelen, in combinatie met hernieuwbare opwek.
- › TNO is door RWS gevraagd om onderzoek te doen naar de mogelijke varianten en functies van energieopslagsystemen in tunnels. Dit onderzoek heeft bestaan uit twee fases. In de eerste fase is samen met RWS een aantal potentiële toepassingen voor energieopslag in tunnels gedefinieerd, en is de technische en economische haalbaarheid van zowel deze toepassingen als opslagtechnologieën kwalitatief geanalyseerd. Hierna is een kleinere set van potentiële toepassingen geselecteerd. In de tweede fase van het project is een kwantitatieve business case met economische onderbouwing voor deze varianten opgesteld, gecombineerd met een kwalitatieve beschrijving van de maatschappelijke impact. Hierbij zijn de volgende randvoorwaarden gehanteerd:
  - › In de business case zijn de opbrengsten/kosten in een beperkt aantal markten gekwantificeerd. Er is een significantie hoeveelheid onzekerheid over veel parameters, waaronder bijvoorbeeld marktprijzen. De business case is daarom slechts indicatief.
  - › De analyse gaat uit van een relatief simpele operationele strategie voor de energieopslag. Een volledige optimalisatie van de operationele strategie is buiten scope van dit project.
  - › De business case wordt uitgevoerd voor een representatieve tunnel (de Noordtunnel), waarvoor RWS gebruiksdata heeft aangeleverd.
  - › We gaan uit van een greenfield situatie, d.w.z. een situatie waarin geen bestaande opslag aanwezig is.
- › In dit rapport worden de resultaten van beide fases beschreven.

## › 2. QUICK SCAN VAN ALTERNATIEVEN

# ENERGIEOPSLAG KAN (IN THEORIE) OP VEEL MANIEREN WAARDE CREËREN

Energieopslag kan op veel manieren waarde toevoegen aan systemen. Er bestaan verschillende taxonomieën van deze waardestromen, zoals de hier rechts getoonde taxonomie die is opgesteld door de European Association for the Storage of Energy (EASE). Niet al deze waardestromen zijn relevant voor energieopslag in tunnels. Omdat de energievraag van een tunnel vooral elektrisch is, zijn waardestromen die toepassing hebben op warmteopslag niet relevant. Ook de locaties van tunnels, hun plaats in het elektriciteitsnetwerk, en de omvang van hun energievraag maken het aanbieden van bepaalde services minder relevant. Waardestromen die, samen met RWS, geïdentificeerd zijn als mogelijk relevant voor energieopslag in tunnels zijn:

1. **Noodstroomvoorziening** als vervanging voor of aanvulling op de huidige dieselaggregaten, of als vervanging voor een tweede netaansluiting.
  2. **De energieneutrale tunnel:** minimalisatie van energieconsumptie van een enkele tunnel, in combinatie met hernieuwbare lokale opwek.
  3. **Verkleinen van onbalansen:** minimalisatie van het verschil tussen de verwachte productie of consumptie, en de werkelijke productie of consumptie, bijvoorbeeld door participatie op onbalansmarkten of inzet van opslag om de eigen onbalans te verkleinen.
  4. **Inzet bij over- of ondercapaciteit:** nivellering van pieken en dalen in de productie van (hernieuwbare) energie en/of energieconsumptie, bijvoorbeeld door participatie op day-ahead elektriciteitsmarkten of inzet van opslag om variatie in de productie van het eigen hernieuwbare portfolio te verkleinen.
  5. **Congestiemangement:** minimalisering van (lokale) congestie door het aanbieden van lokale vraagvermindering of –stijging als de netbeheerder hier een signaal voor geeft.
- Sommige van deze waardestromen kunnen worden gecombineerd, maar niet alle combinaties zijn mogelijk (inzet voor noodstroomvoorziening is bijvoorbeeld moeilijk te combineren met waardestromen die de beschikbare capaciteit verkleinen).



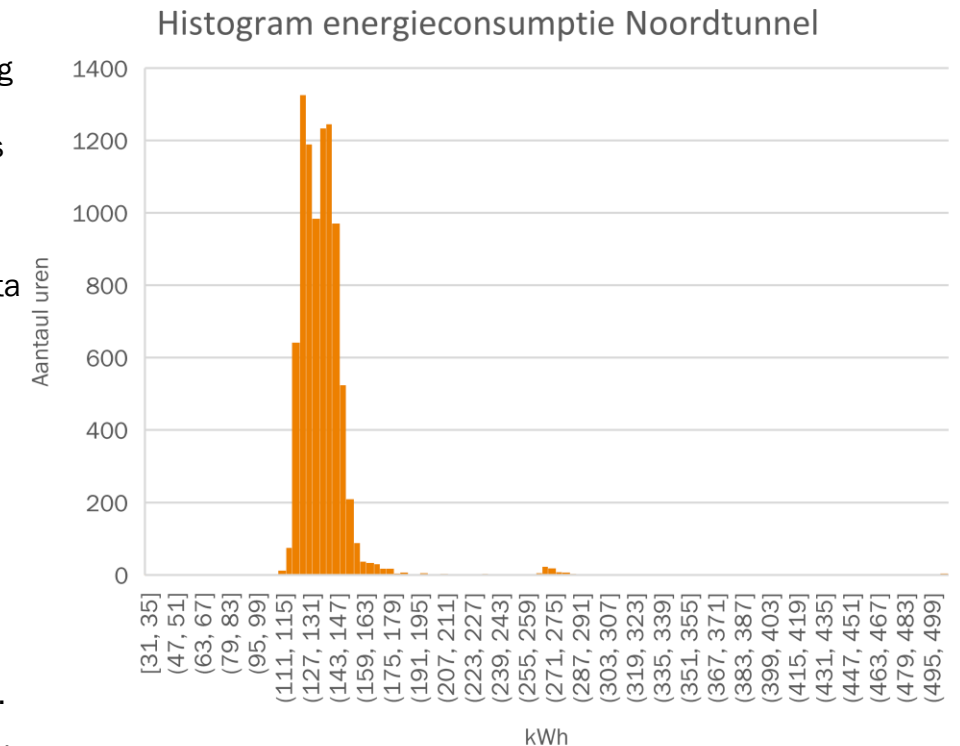
Figuur 1: Taxonomieën van waardestromen voor energieopslag (Bron: EASE) **TNO** innovation for life 8



# › VARIANT NOODSTROOMVOORZIENING

## MOGELIJK MAAR IN ISOLATIE ECONOMISCH ONAANTREKKELIJK

- › Analyse van gebruiksdata van de Noordtunnel laat zien dat er slechts een zeer klein aantal uren met hoge energieconsumptie (i.v.m. incidenten) zijn. De energieconsumptie van de tunnel was in 2019 bijvoorbeeld slechts 4 uur hoger dan 500kW, en 11 uur/jaar hoger dan 400kW, terwijl deze in verreweg de meeste uren tussen de 111 en 179kW varieerde. Piekgebruik in 2019 was ongeveer 700kW. Dit impliceert dat een relatief grote hoeveelheid opslag nodig is om volledig als secundaire voorziening te kunnen functioneren. Niet alleen zal deze capaciteit zelden worden ingezet, ze zal nog veel minder vaak op de volledige capaciteit worden ingezet. Omdat de volledige opslagcapaciteit beschikbaar moet blijven, kan deze niet op een andere manier worden ingezet. De opslag wordt dus zeer inefficiënt gebruikt.
- › Weliswaar zorgt gebruik van energieopslag ten opzichte van het gebruik van dieselaggregaten voor minder uitstoot van CO<sub>2</sub>, maar deze vermindering is klein. Op basis van door RWS aangeleverde data over de hoeveelheid diesel die in de Noordtunnel wordt gebruikt (25,000 liter op jaarbasis), kunnen we uitrekenen dat, als de dieselaggregaten niet meer worden gebruikt, dit ongeveer 80 ton CO<sub>2</sub> per jaar zou schelen. Dit is gelijk aan de jaarlijkse uitstoot van 62 auto's, en bijvoorbeeld te compenseren met 180MWh productie van groene stroom.
- › Opslagssystemen hebben ook een potentieel hogere betrouwbaarheid. Waar dieselaggregaten regelmatig getest moeten worden en pas tijdens de test duidelijk wordt of het aggregaat nog functioneert, kunnen bijvoorbeeld batterijsystemen uitgerust worden met real-time monitoring systemen. Ook de lokale veiligheid kan omhoog gaan, omdat bijvoorbeeld geen CO productie meer plaatsvindt. Hiernaast produceren opslagsystemen minder geluid, vibratie, en aantasting van de lokale luchtkwaliteit. Afhankelijk van de locatie van een tunnel kunnen dit belangrijke voordelen zijn.
- › Opslagssystemen hebben over het algemeen minder onderhoudskosten dan dieselaggregaten, en ook lagere gebruikskosten. Ook kunnen ze andere baten hebben, bijvoorbeeld door een bijdrage aan de kwaliteit van de spanning in een tunnel te verbeteren. Aanschafkosten zijn echter significant hoger. Vanwege het zeer lage gebruik van een noodstroomvoorziening is deze optie op zichzelf dus economisch gezien relatief onaantrekkelijk.



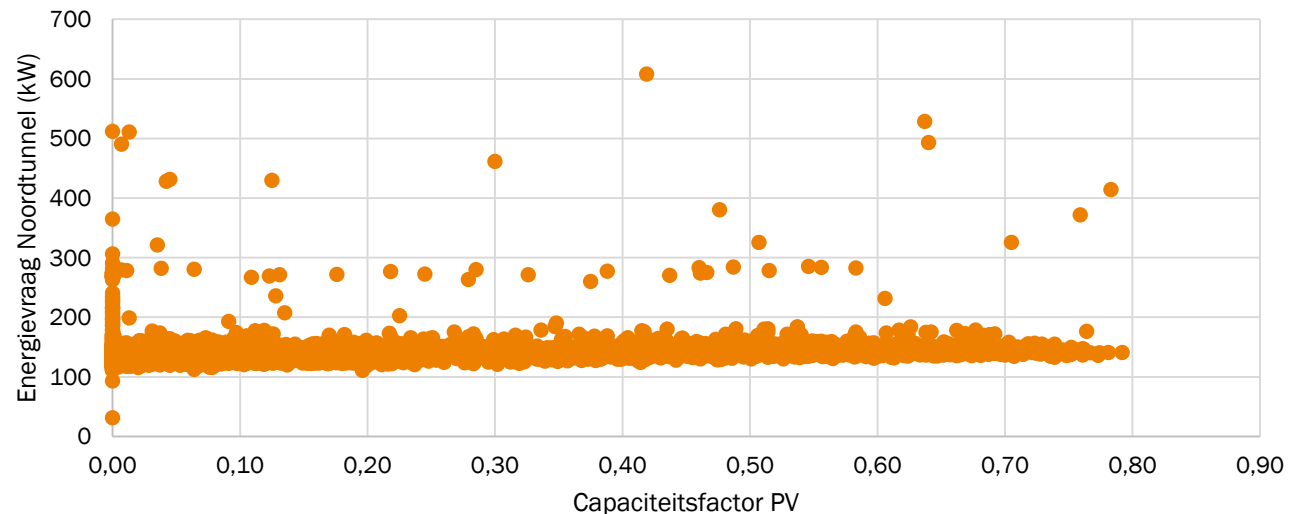
Figuur 2: Energieconsumptie Noordtunnel 2019  
Bron: Energievraag Noordtunnel 2019 (digitale-energie.nl)

# › VARIANT ENERGIENEUTRALE TUNNEL

## INTERESSANT, MAAR 100% ENERGIENEUTRAAL ONREALISTISCH

- › Analyse van gebruiksdata van de Noordtunnel in combinatie met data over hernieuwbare opwek met PV-panelen laat zien dat de energievraag van tunnel en PV opwek correleert, maar niet erg sterk (in 2019 was de correlatie 23%). Op jaarbasis kan een tunnel vrij eenvoudig energieneutraal zijn zonder opslag (voor de Noordtunnel zou 800kWp-1MWp PV voldoende zijn) mits teruglevering mogelijk en gewenst is. Dit past binnen de aansluiting, en benut die intensiever. Opslag is zinvol als energieneutraliteit op korte termijn (bijvoorbeeld van dag tot dag of uur tot uur) gewenst is.
- › 1MWp PV vermindert de piekvraag maar met 15% (i.v.m incidenten 's nachts). Voor zelfvoorzienendheid is dus minimaal 85% van de piek nodig (~500kW), met daarbovenop mogelijk nog een risico-opslag. Om volledig zelfvoorzienend te zijn is opslag voor een groot aantal uren nodig, dus op (grote) MWh-schaal. Voor volledige energieneutraliteit op uurbasis is een onrealistisch dure en grote installatie nodig, maar het is wel mogelijk om een eind richting zelfvoorzienendheid te komen. Dit is in fase 2 van dit project onderzocht.

PV en energievraag



Figuur 3: Correlatie zonopwek en energievraag Noordtunnel. De 8760 punten in de grafiek geven voor elk uur de gemodelleerde capaciteitsfactor (opwek als fractie van de maximale capaciteit) en energievraag van de tunnel weer.

Bron: Energievraag Noordtunnel 2019 (digitale-energie.nl), MERRA2 reanalysedata voor PV opwek op locatie Noordtunnel in 2019 (renewables.ninja)



Figuur 4: 10 MWh Opslag (bron: Greenchoice)

## › **VARIANT VERKLEINEN ONBALANS** **KAN WAARDE TOEVOEGEN AAN ANDERE VARIANTEN**

- › Energieopslag kan worden gebruikt voor het verkleinen van onbalans. In de Nederlandse markt mogen aanbieders van energieopslag aan alle relevante markten meedoen (FCR, aFFR, mFFR, etc.). Ook voor een eigen (wind)portfolio kan energieopslag worden ingezet om onbalans te verminderen; de waarde is dan in de meeste gevallen wel kleiner dan als de capaciteit op markten wordt ingezet.
- › Vanwege de gemiddeld relatief korte opslagtermijn die op onbalansmarkten de meeste waarde kan toevoegen (rond 1 uur), en de relatief hoge prijzen voor het beschikbaar houden van capaciteit (20 EUR/MW/uur voor FCR<sup>1</sup>, 9-10 EUR/MW/uur voor aFFR) is het inzetten van opslagcapaciteit op opbalansmarkten relatief lucratief. De business case voor het installeren van opslagcapaciteit specifiek om op onbalansmarkten geld te verdienen is alsnog onwaarschijnlijk; hiervoor zijn de opbrengsten te laag in verhouding tot de investeringskosten. Deze variant is mogelijk te combineren met andere varianten, zoals de energieneutrale tunnel. Dit zal wel ten koste gaan van een gedeelte van de energieneutraliteit.
- › Het participeren op onbalansmarkten kan wel een lokaal congestieprobleem vergroten, omdat onbalans op nationale schaal en de hoeveelheid opwek en vraag op lokaal niveau zeker niet perfect correleren. Deze variant kan lokaal dus ook nadelen hebben.

<sup>1</sup><https://www.next-kraftwerke.nl/producten/balanceringsenergie>

## › VARIANT PIEKEN NIVELLEREN

# KAN WAARDE TOEVOEGEN AAN ANDERE VARIANTEN

- › Ook het nivelleren van pieken is mogelijk; dit kan door participatie op verschillende markten. Dit kan bijvoorbeeld door participatie op de day-ahead markt, waar fluctuaties in hernieuwbare opwek het meest zichtbaar worden. In vergelijking met de onbalansvariant is hier meer opslagcapaciteit nodig om waarde toe te voegen; voor de grootste waarde is minimaal 3-4 uur opslagcapaciteit nodig. Ook zijn opbrengsten relatief klein in normaal functionerende energiemarkten, en is competitie groter omdat meer partijen vergelijkbare services kunnen leveren.
- › In plaats van participatie op day-ahead markten kan uiteraard ook worden gekozen voor het nivelleren van pieken in de eigen lokale opwek, of in de netto vraag van een breder eigen portfolio aan objecten en opweklocaties. In vergelijking met participatie op markten zal dit een lagere economische waarde hebben.
- › Ook hier geldt dus dat een investering met deze variant als specifiek doel geen goede business case zal hebben. Wel kan deze variant makkelijker dan de onbalansvariant worden gecombineerd met andere varianten. Waar de inzet van opslagcapaciteit voor het minimaliseren van onbalans gebaseerd is op contracten waarbij beschikbaarheid moet worden gegarandeerd, zijn day-ahead markten flexibeler. Als dit economisch wenselijk is kan bijvoorbeeld elektriciteit worden teruggekocht, eventueel zelfs nog intra-day.
- › Ook voor deze variant geldt dat inzet van opslagcapaciteit lokaal congestie kan vermeederen; hier omdat er grote verschillen kunnen zijn in lokale en nationale pieken.

# › VARIANT CONGESTIEMANAGEMENT

## LOKALE MOGELIJKHEDEN

- › Opslag kan worden ingezet voor congestiemanagement. In deze variant moet direct bilateraal met de netbeheerder worden gecoördineerd (bijvoorbeeld via het GOPACS platform). Er zijn grote lokale verschillen in de vraag naar congestiemanagement. Zoals de tabel met GOPACS-uitkomsten hieronder laat zien zijn de prijzen die voor congestiemanagement worden betaald in sommige netten zeer hoog, en op andere locaties 0. Deze tabel is al geaggregeerd; binnen de verschillende netten bestaat nog meer variatie. Dat geldt uiteraard vooral voor het transmissienetwerk van TenneT.
- › In de afgelopen jaren is de netcongestie sterk gestegen. Ook in de komende jaren zal congestieproblematiek belangrijk blijven, omdat door o.a. elektrificatie van vervoer en warmte meer netverzwaring nodig is dan op korte termijn gerealiseerd kan worden. Dit biedt mogelijkheden voor energieopslag in tunnels om veel waarde toe te voegen. Dit moet echter lokaal worden onderzocht; generieke conclusies zijn niet te trekken. Voor de Noordtunnel zijn de mogelijkheden bijvoorbeeld beperkt. Ook kan de markt snel veranderen door investeringen van netbeheerders. Het is onwaarschijnlijk dat op een specifieke locatie voor meer dan 10-20 jaar een vraag naar congestiemanagement zal blijven bestaan, omdat netverzwaring dan uiteindelijk een efficiëntere oplossing is.

### Costs for using IDCONS for redispatch

Expenses						
Month	Stedin	TenneT	Liander	Westland Infra	Enexis	Enduris
2022 October	EUR 0	EUR 421035.94 609.4 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 2235.33 2.9 MWh	EUR 0
2022 September	EUR 0	EUR 498308 751.4 MWh	EUR 230 0.8 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 0
2022 August	EUR 0	EUR 336091.31 449 MWh	EUR 223.16 0.8 MWh	EUR 0	EUR 4615 6.2 MWh	EUR 0
2022 July	EUR 0	EUR 1745687.6 2937.3 MWh	EUR 120.3 0.4 MWh	EUR 0	EUR 1107.01 1.3 MWh	EUR 0
2022 June	EUR 0	EUR 115429.75 181.5 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 0	EUR 0
2022 April	EUR 0	EUR 1507983.43 4728.6 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 0	EUR 0
2022 March	EUR 0	EUR 850954.93 2782.8 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 0	EUR 0
2022 February	EUR 0	EUR 2475545.8 8483.9 MWh	EUR 4881.43 5.4 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 0
2022 January	EUR 0	EUR 27495903.63 104422 MWh	EUR 0	EUR 0	EUR 0	EUR 0

Tabel 1: Totale kosten voor inzet flexibiliteit via het GOPACS platform

Bron: GOPACS ([www.gopacs.eu](http://www.gopacs.eu)),

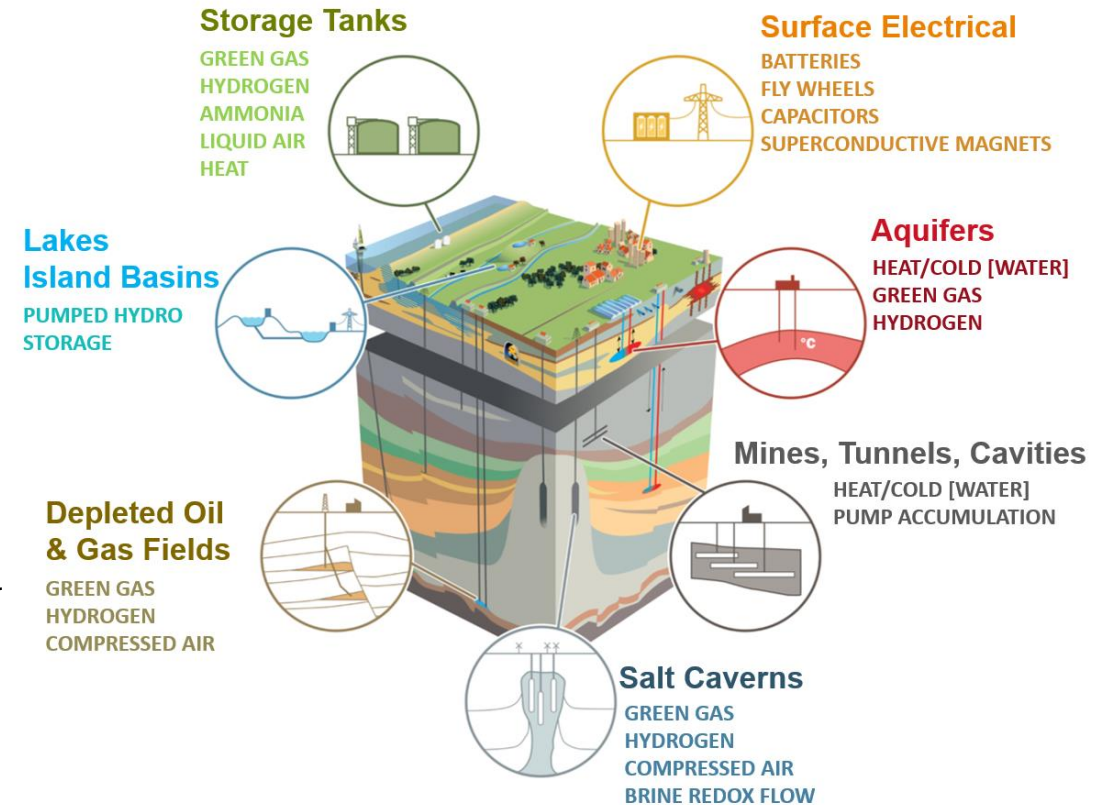
# SAMENVATTING VARIANTENANALYSE WAARDESTROMEN

	Noodstroom	Energie-neutrale tunnel	Onbalans	Pleken nivelleren	Congestie-management
Technisch	Mogelijk, veel ruimte nodig voor volledige vervanging.	Mogelijk, vereist alleen EMS voor lokale aansturing.	Mogelijk, b2b vereist aansturing door zelfde BRP als hernieuwbare capaciteit	Mogelijk, vereist aansturing door derde partij	Mogelijk, vereist aansturing door DNO. Bijv. via GOPACS
Economische baten	Geen/klein	Geen	1h opslagcapaciteit nodig op aFRR. Opbrengsten (aFRR) in 2018 significant hoger dan DA.	3-4h opslagcapaciteit nodig op DA. Opbrengsten (DA) in 2018 significant lager dan onbalans.	8-18h opslagcapaciteit nodig voor 80-100% van de congestievragen op GOPACS Hoge prijzen, kleine markt
Emissies	Minder emissies door testen van aggregaten	Geen (geen scope 2 emissies verondersteld)	Geen (op korte termijn)	Efficiënter gebruik van hernieuwbare energie	Mogelijk efficiënter gebruik van hernieuwbare energie
Congestie	Geen	Lagere vraag	Activiteit op onbalansmarkten kan lokaal congestie verhogen	Landelijke pieken nivelleren kan lokaal congestie verhogen	Actieve bijdrage aan congestiemanagement
Regulering	Privaat	Privaat	Energieopslag mag in NL meedoen in alle markten (FCR, aFRR, mFRR, etc.)	Energieopslag kan op day-ahead/intra-day markten actie zijn.	Tot nu toe alleen bilateraal met DNO (bijv via GOPACS).
Veiligheid	Mogelijke toename; technologie-afhankelijk	Potentieel hogere betrouwbaarheid als islanding mogelijk is	Geen (m.u.v. fysieke opslag)	Geen (m.u.v. fysieke opslag)	Geen (m.u.v. fysieke opslag)

Tabel 2: Overzicht van variantenanalyse op verschillende indicatoren. Investeringskosten zijn niet meegenomen; die worden voor de geselecteerde variant in de volgende sectie uitgewerkt. Varianten staan op zichzelf; combinaties zijn hier niet in beeld gebracht.

# › VEEL TECHNOLOGIEËN ZIJN MOGELIJK VEILIGHEID IS EEN BELANGRIJK ASPECT

- › Energieopslag is een breed begrip. De meeste technologieën zijn voor het huidige onderzoek niet relevant. Daarom hebben we alleen gekeken naar technologieën die:
1. de juiste schaal hebben (minuten-uren, kWh-MWh). Hieronder vallen verschillende batterijtechnologieën, persluchtopslag (Compressed Air Energy Storage, CAES), waterkracht, en power-to-gas waterstofsysteemen.
  2. een acceptabele efficiëntie en energiedichtheid hebben. P2G-waterstofsysteemen hebben een efficiëntie van 25-45%; batterijen/waterkracht 70-90%, CAES >40%. Waterkrachtsysteemen hebben een dichtheid van 0.2-2 Wh/L dus vereisen te veel volume voor opslag op kWh-MWh schaal.
  3. op dit moment commercieel beschikbaar zijn. Zo zijn bijvoorbeeld Zn-Br en Zn-Fe redox flow batterijen nog niet breed commercieel beschikbaar, zijn metaal-sulfur batterijen, Metal Air batterijen en lithium-metal-polymer batterijen nog in R&D fases, en heeft Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) nog onopgeloste technische problemen. Het is altijd mogelijk dat in de toekomst nieuwe technologieën beschikbaar worden, dus deze lijst moet voor toekomstige investeringen regelmatig opnieuw worden geëvalueerd.
- › Alleen batterijen en CAES blijven na deze selectie over, waarbij CAES slechts op een aantal locaties een optie zal zijn vanwege de specifieke vereisten aan de ondergrond (bijv. de aanwezigheid van geschikte cavernes). Voor deze opties hebben we (kwalitatief) de huidige technologische haalbaarheid, economische haalbaarheid, veiligheid, en match met use cases bekeken.



Figuur 5: Overzicht van opslagtechnologieën (TNO)

# › VEEL TECHNOLOGIEËN ZIJN MOGELIJK

## VEILIGHEID IS EEN BELANGRIJK ASPECT

› Op basis van de bestaande literatuur zijn de overgebleven technologieën gescoord op basis van de huidige stand van zaken. De resultaten zijn zichtbaar in Tabel 2.

Technologie	CAPEX kW	CAPEX kWh	Emissie reductie	Congestie lokaal	Veiligheid
VRF	Green	Red	Green	Red	Green
LIB-energie klein	Yellow	Yellow	Red	Green	Yellow
LIB-energie groot	Green	Yellow	Red	Green	Green
NaS	Yellow	Green	Yellow	Green	Green
NaNiCl	Yellow	Green	Yellow	Green	Green
PbA	Yellow	Yellow	Green	Green	Red
NiMH	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green
D-CAES	Red	Green	n.a.	Green	Red

Technologie	Noodstroom	Energie neutrale tunnel	Onbalans	Pieken nivelleren	Congestie management
VRF	Red	Green	Yellow	Green	Yellow
LIB-energie klein	Green	Red	Red	Red	Red
LIB-energie groot	Green	Yellow	Green	Yellow	Green
NaS	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
NaNiCl	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
PbA	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
NiMH	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
D-CAES	Red	Green	Green	Green	Green

Tabel 3: Overzicht van technologieanalyse op verschillende indicatoren.



# › VEEL TECHNOLOGIEËN ZIJN MOGELIJK

## VEILIGHEID IS EEN BELANGRIJK ASPECT

- › Voor gebruik in of naast tunnels is veiligheid een belangrijk aspect. Alle opslagtechnologieën hebben veiligheidsimplicaties, net als dieselgeneratoren. Goede plaatsing, onderhoud en monitoring is altijd nodig en kan de meeste problemen mitigeren.
- › Specifieker geldt dat alle technologieën die geanalyseerd zijn brandveiligheidsimplicaties hebben, opnieuw net als dieselgeneratoren. Branden met emissies van giftige gassen en/of explosiegevaar zijn als ernstiger ingeschat; hierdoor vallen sommige technologieën af.
  - › **Vanadium Redox Flow:** hebben geen thermal runaway; het electrolyet is 50% water en dus minder brandbaar. Brandbaar waterstofgas kan ontstaan bij elektrodes dus goede ventilatie is wel cruciaal.
  - › **Li-Ion batterijen:** kans op thermal runaway (exotherme chemische reactie); in het ergste geval zijn explosies mogelijk. In moderne batterijen is dit risico lager, o.a. door betere separatie tussen cellen. Voor LFP-batterijen is het risico zelfs minimaal, maar niet geheel geëlimineerd, omdat nog steeds een (beperkte) thermal runaway bestaat.
  - › **Na-S** batterijen hebben explosiegevaar, maar moderne cellen zijn over het algemeen betrouwbaar.
  - › **NaNiCl** batterijen zijn veiliger dan Sodium Sulfur batterijen; ze hebben geen thermal runaway of giftige bijproducten.
  - › **Pb A** batterijen hebben een kans op thermal runaways, en bij brand komen mogelijk giftige gassen vrij. In veel toepassingen dal grootschalige toepassing daardoor te grote veiligheidsimplicaties hebben.
  - › **NiMH batterijen** hebben theoretisch een brandgevaar en giftige gassen kunnen vrijkomen; de behuizing is meestal robust genoeg. In de praktijk zijn weinig ongevallen bekend.
  - › **CAES** is mechanische opslag dus is weinig brandgevaarlijk; ondergrondse aanwezigheid van koolstofhoudende stoffen kan explosiegevaar opleveren.

# › CONCLUSIE VAN QUICKSCAN

## ENERGIEARME TUNNEL+ VERDER UITWERKEN

- › Op basis van de bovenstaande analyse is samen met RWS besloten om de variant ‘energieneutrale tunnel’ verder uit te werken. Omdat een volledig energieneutrale tunnel, die op elk moment van het jaar volledig in de eigen energiebehoefte kan voorzien, zowel technisch als economisch onrealistisch lijkt, is daardoor vooral gekeken naar een ‘energiearme tunnel’. Hiervoor is eerst onderzocht welke mate van energieneutraliteit haalbaar is. Op basis van de hoeveelheid opslag die hiermee consistent is, is vervolgens gekeken naar meerdere vormen van operationale inzet van die opslagcapaciteit:
  1. Inzet puur voor maximale energieneutraliteit. In deze strategie wordt de opslagcapaciteit alleen gebruikt om de tunnel zoveel mogelijk zelfvoorzienend te laten zijn. Deze zelfvoorzienendheid zal, omdat de hoeveelheid opslag is bepaald op basis van wat technisch en economisch realistisch is, nooit 100% bereiken.
  2. Inzet voor het actief inspelen op (day-ahead) uurprijzen om de match tussen vraag en aanbod van energie op systeemniveau te verbeteren.
- › Tussenoplossingen, waarbij bijvoorbeeld in de zomer de eerste strategie wordt gevolgd, en in de winter de tweede, zijn voorstelbaar. Deze tussenoplossingen worden in dit document niet kwantitatief geanalyseerd.
- › Op deze manier zijn meerdere varianten gecombineerd – we analyseren dus een ‘energiearme tunnel+’: een tunnel met een hoeveelheid opslag die is bepaald op basis van de wens om zo veel mogelijk energieneutraal te zijn, gegeven technische en economische restricties, maar die vervolgens in de praktijk ook voor het actief gebruik op elektriciteitsmarkten kan worden gebruikt. In de volgende secties bespreken we de resultaten van deze analyse.
- › De keuze voor een technologie is afhankelijk van de specifieke details van een tunnel (hoe ver in de toekomst vindt de investering plaats; is er ruimte naast of alleen in de tunnel; is een beproefde oplossing gewenst of is een meer experimentele toepassing van nieuwe technologie ook mogelijk; etc.). Voor berekening van de kosten gaan we uit van een generieke batterij, met de karakteristieken van een Li-Ion batterij.

### › 3. ANALYSE VAN EEN ENERGIEARME TUNNEL

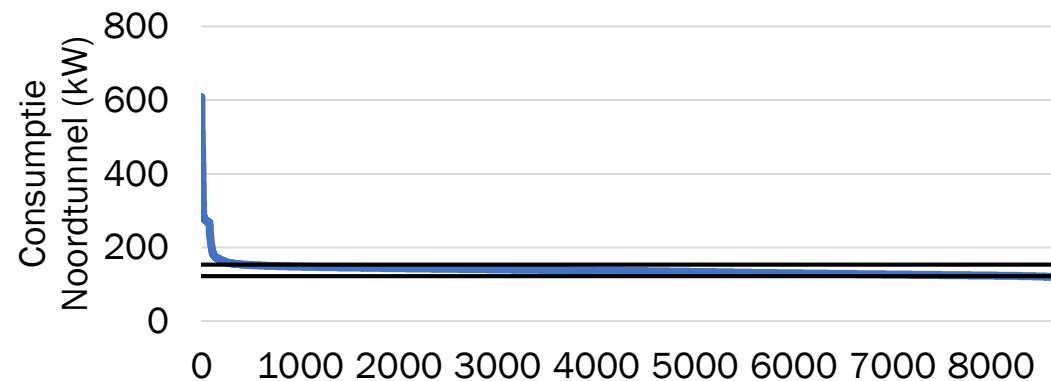


## INPUT DATA VOOR DE ANALYSE

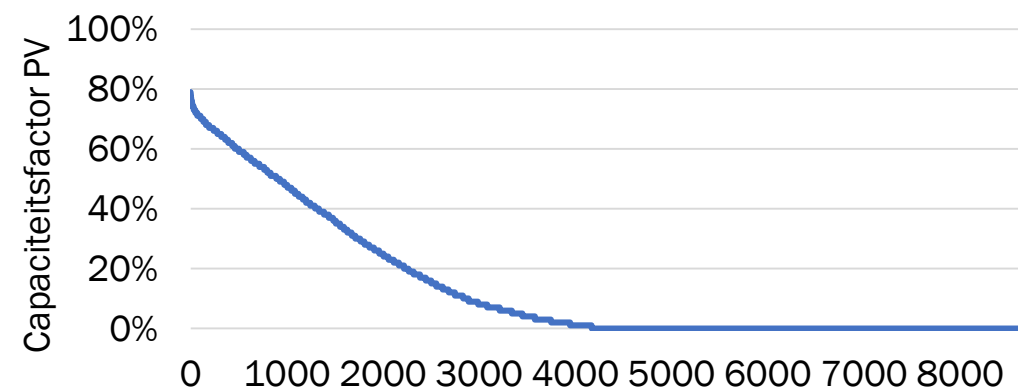
- › De analyse van de energiearme tunnel is gebaseerd op het uurverbruik van de Noordtunnel<sup>1</sup> inclusief een profiel van zon opwek<sup>2</sup> en de capaciteit van de netaansluiting<sup>1</sup>. Voor de analyse op de day-ahead markt is gebruik gemaakt van het prijsprofiel uit 2021<sup>3</sup>.
- › De bovenste figuur toont een Load Duration Curve (LDC) van het uurverbruik van de Noordtunnel. Een LDC toont het verbruik gesorteerd van hoog naar laag. 90% van het verbruik ligt tussen de twee zwarte lijnen: 122–153 kW. Links is een hoge piek waarin het verbruik stijgt naar ruim 600 kW.
- › De middelste figuur toont de LDC van de zonne-opwek. Ruim 4000 uur per jaar is er een zonne-opwek. Het aantal vollasturen is gelijk aan 1162. Dit is een profiel van zonne-opwek nabij de Noordtunnel voor het jaar 2019.
- › De karakteristieken van de day ahead markt zijn weergegeven in de onderste figuur en in tabel 4.
- › Prijzen in 2022 zijn significant hoger als gevolg van de verminderde beschikbaarheid van energie import uit Rusland. De meeste projecties (waaronder ook de doorrekening van de klimaat- en energieverkenning door PBL, de II3050-scenarios van de netbeheerders) gaan er echter van uit dat deze extreme situatie tijdelijk is, en dat prijzen uiteindelijk op een lager niveau dan nu, maar hoger niveau dan de afgelopen 10 jaar zullen stabiliseren. We gebruiken daarom de prijzen uit 2021, het laatste volledig afgeronde jaar.

Tabel 4: Karakteristieken day ahead markt 2021

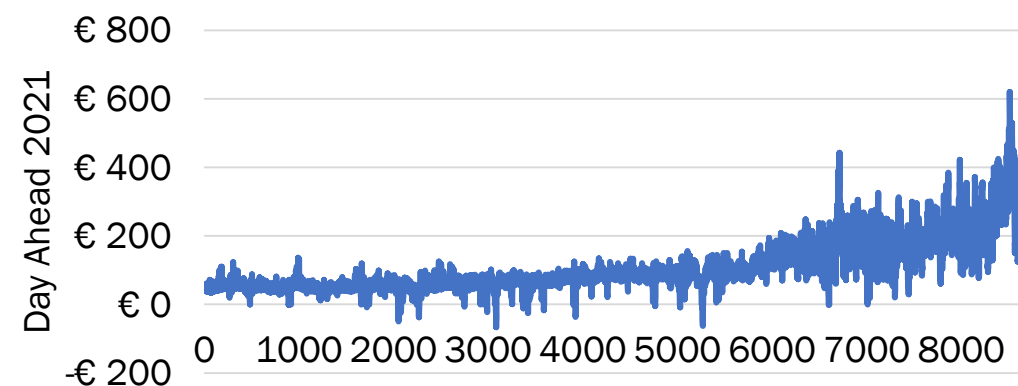
<b>Gemiddelde prijs (€/MWh)</b>	<b>103</b>
Minimum prijs (€/MWh)	-66
Maximum prijs (€/MWh)	620



Figuur 6: Load Duration Curve van het uurverbruik van de Noordtunnel.



Figuur 7: Load Duration Curve van de zonne-opwek.



Figuur 8: Prijsprefiel Day Ahead markt (op uurbasis)

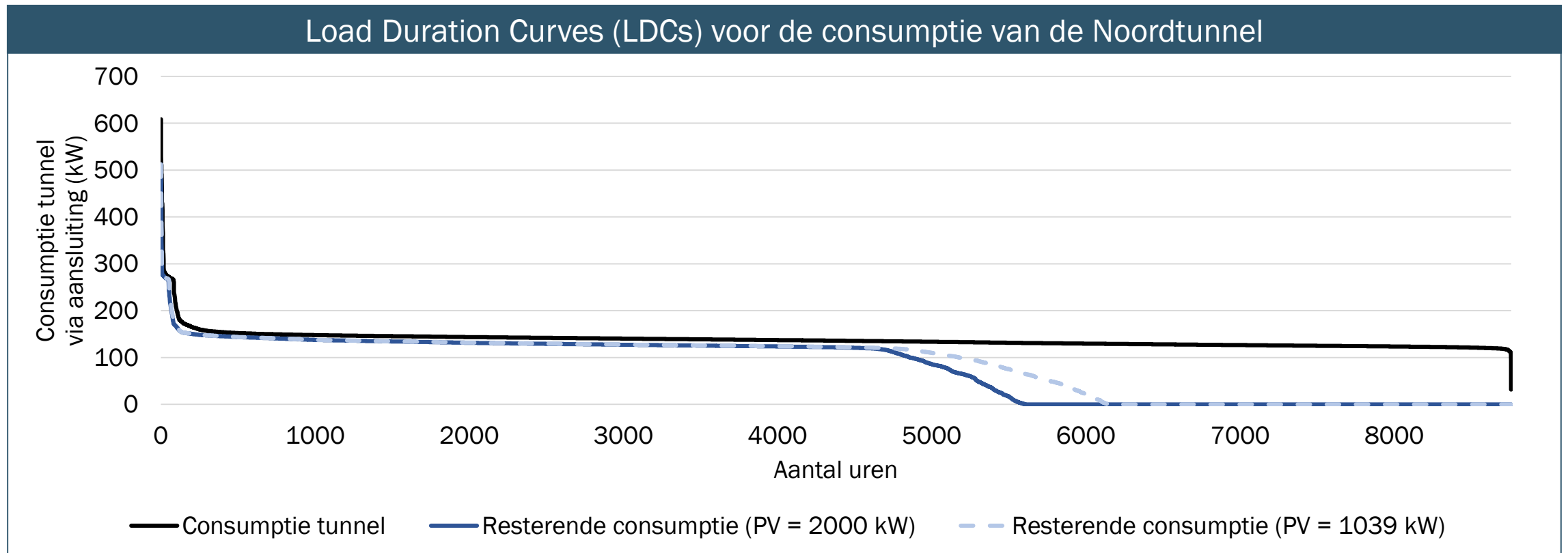
<sup>1</sup> Bron: Energievraag Noordtunnel 2019 (digitale-energie.nl)

<sup>2</sup> Bron: Renewables.ninja ([Renewables.ninja](https://renewables.ninja))

<sup>3</sup> Bron: Transparancy Database ENTSO-E ([ENTSO-E Transparency Platform \(entsoe.eu\)](https://entsoe.eu))

# HOE PV HET VERBRUIK VAN EEN TUNNEL KAN REDUCEREN

- Door het installeren van hernieuwbare energie (zon en/of wind) kan het energieverbruik van een tunnel via een aansluiting afnemen. Hieronder is te zien hoe zonnepanelen (PV) het verbruik kan reduceren. Dit wordt getoond voor twee geïnstalleerde vermogens: 1039 kW en 2000 kW. 1039 kW is de capaciteit waarmee er op jaarbasis precies evenveel energie wordt opgewekt, als dat er door de Noordtunnel wordt gebruikt. Alle resterende zonne-energie zal ofwel over de aansluiting richting het Nederlandse energiesysteem moeten gaan, ofwel de productie zal tijdelijk moeten worden ingeperkt.
- Verder valt op dat een toename in geïnstalleerd vermogen van 1039 naar 2000 kW, bijna een verdubbeling, nauwelijks zorgt voor een afname in consumptie van de tunnel. Bij 1039 kW is er een reductie van 39% ten opzichte van de situatie zonder PV. De reductie is 43% bij een PV capaciteit van 2000 kW, omdat de additionele opslagcapaciteit altijd minder vaak en lang wordt gebruikt.



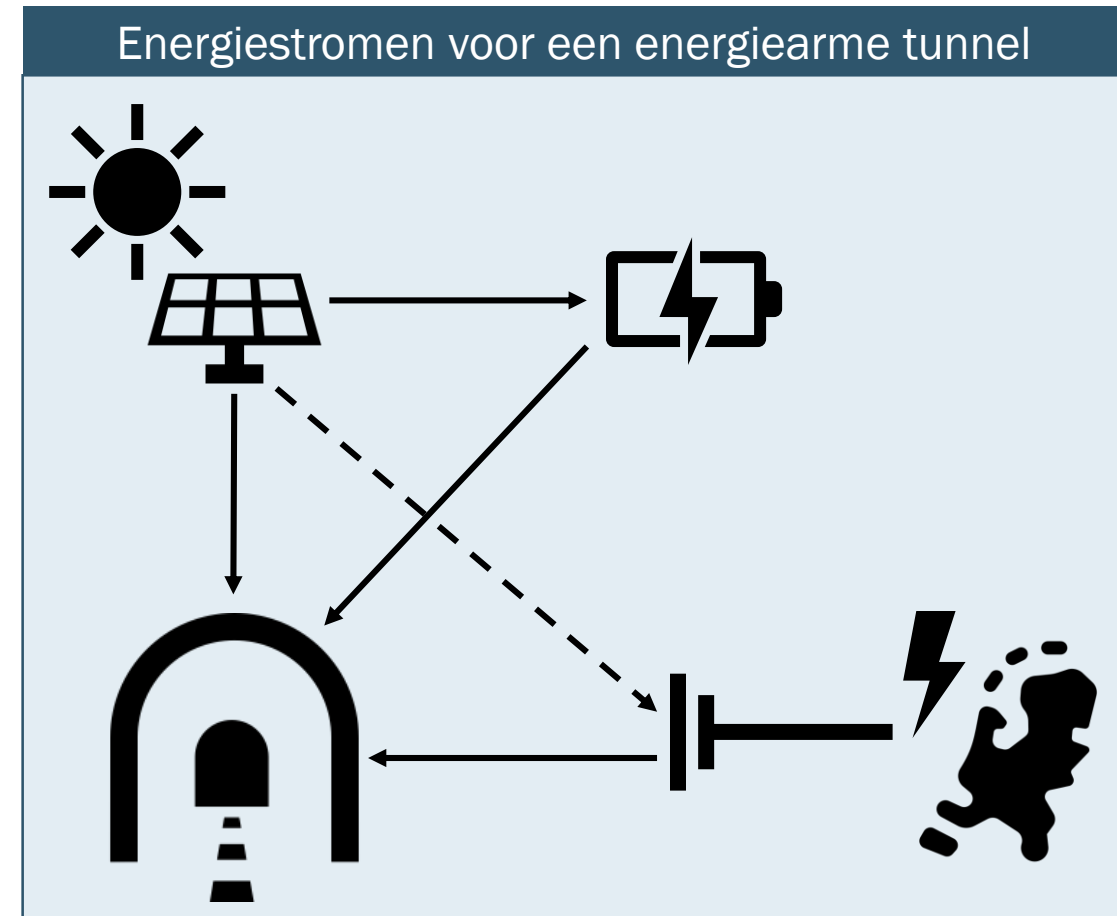
Figuur 9: Load Duration Curves voor de consumptie van de Noordtunnel.

## HET CONCEPT VAN EEN ENERGIEARME TUNNEL

- › Een energiearme tunnel is een tunnel die zoveel mogelijk zelfvoorzienend is. Een energieneutrale tunnel is 100% zelfvoorzienend. In de vorige sectie is vastgesteld dat een energieneutrale tunnel technisch en economisch niet haalbaar is. Voor een energieneutrale tunnel is bij een PV capaciteit van 1039 kW een batterij nodig met een oplaad- en ontlaadsnelheid van 680 kW en een capaciteit van 280 MWh.
- › Rechts is een overzicht te zien van de energiestromen voor een energiearme tunnel. Het grote verschil met een energieneutrale tunnel is het feit dat er elektriciteit van het Nederlandse net richting de tunnel kan en zal gaan. Verder is het mogelijk om de pieken van de zonne-opwek, die niet door de tunnel kunnen worden benut, richting het Nederlandse net kunnen.
- › De mate van zelfvoorzienendheid wordt als volgt berekend. Er is een totale consumptie van de tunnel (1207 MWh voor de Noordtunnel). Verder is er na het inzetten van PV en de batterij een nog resterende consumptie via de aansluiting. De zelfvoorzienendheid is gelijk aan:

$$\text{Zelfvoorzienendheid} = 100\% - \frac{\text{Consumptie via aansluiting}}{\text{Totale consumptie}}$$

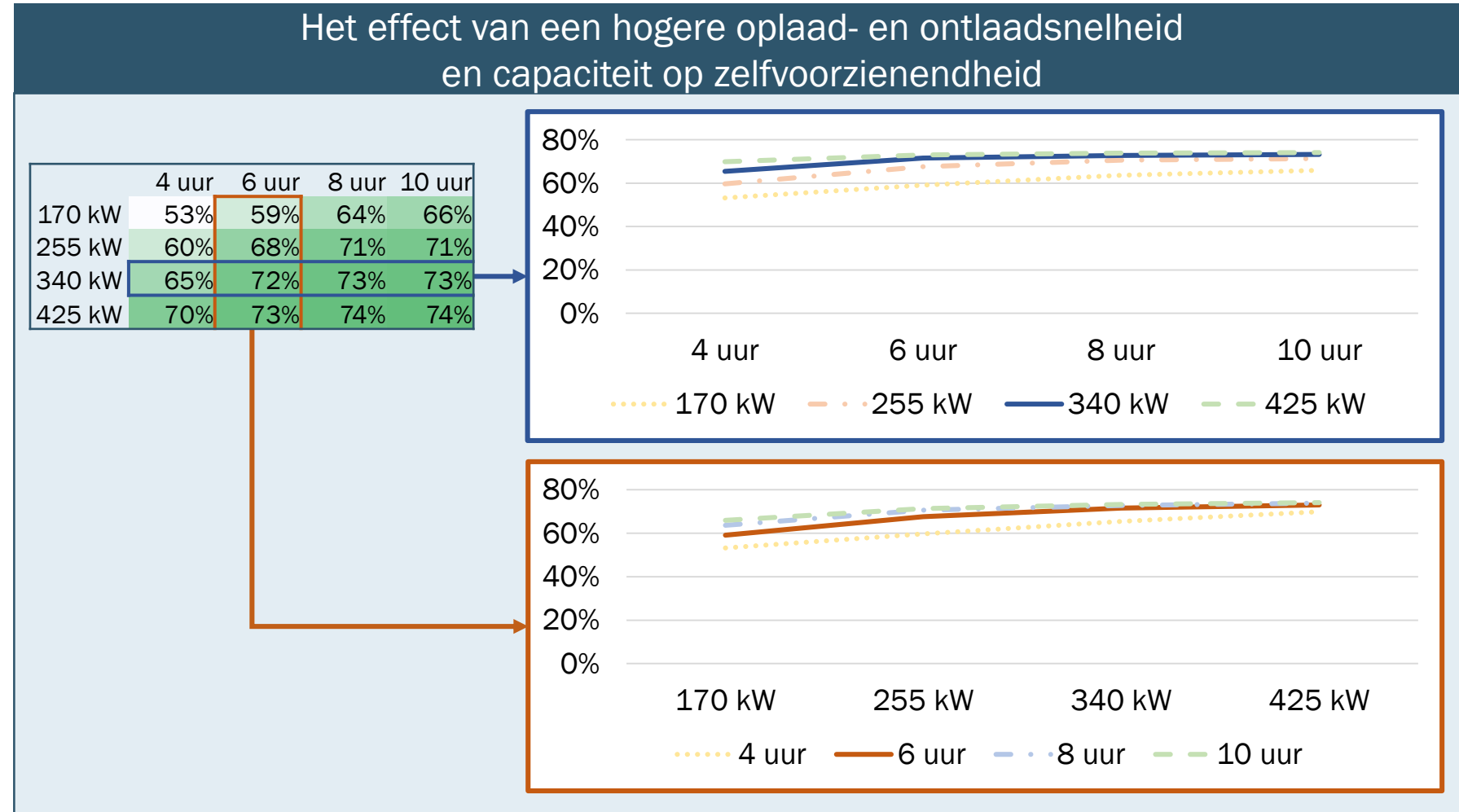
- › Momenteel verloopt de consumptie volledig over de aansluiting en is de mate van zelfvoorzienendheid gelijk aan 0%. Bij een energieneutrale tunnel verloopt er geen consumptie via de aansluiting en is de zelfvoorzienendheid 100%. Een energiearme tunnel zal hier tussen liggen, maar zo dicht mogelijk bij 100%.
- › Lokale opwek van windenergie kan waarschijnlijk tot een hogere mate van zelfvoorzienendheid leiden. Dit voegt een dimensie toe die in deze analyse niet is meegenomen.



Figuur 10: Schematische weergave van energiestromen voor een energiearme tunnel

# WELKE CAPACITEIT VOOR EEN ENERGIEARME TUNNEL?

- In de figuur rechts is te zien hoe een hogere oplaad- en ontlaadsnelheid en capaciteit voor een hogere zelfvoorzienendheid zorgen. Er is voor gekozen om dit te splitsen in snelheden (kW) en aantal uren opslagcapaciteit. Per snelheid is de capaciteit (kWh) te berekenen. Een batterij met een oplaadsnelheid van 340 kW en een opslagcapaciteit van 6 uur zal 2040 kWh kunnen opslaan.
- Het valt op dat de zelfvoorzienendheid toename snel afvlakt. Een batterij van 340 kW en 2040 kWh zit met 72% al dicht tegen de hoogste waarde aan (74%). Deze capaciteit is daardoor een realistische keuze om tot vrijwel de hoogst mogelijke mate van energieneutraliteit te komen. In de rest van de analyse wordt deze capaciteit aangenomen voor de batterij.



Figuur 11: Impact van batterijkeuze op de zelfvoorzienendheid

## › HET GEDRAG VAN EEN ENERGIEARME TUNNEL

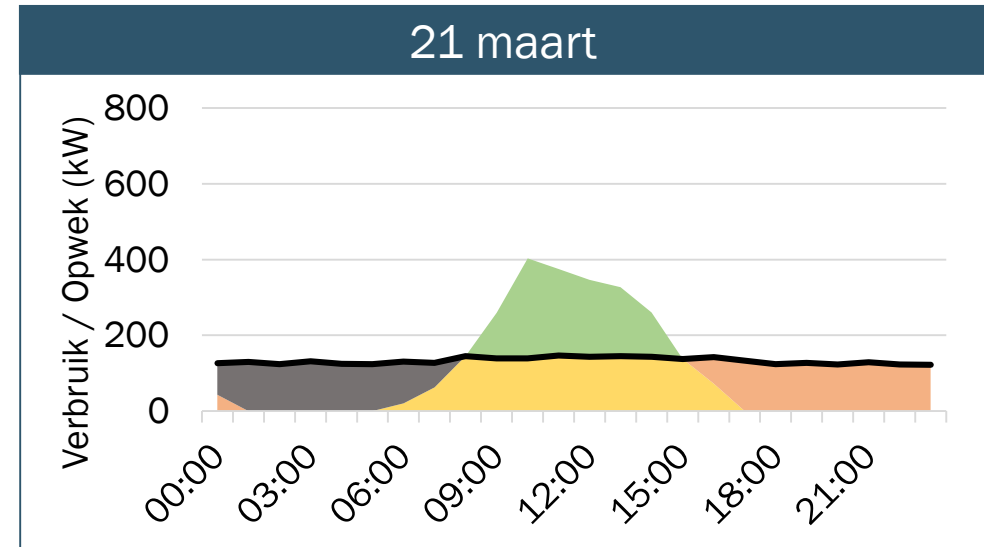
› Op de volgende pagina wordt het gedrag van een energiearme tunnel getoond voor 4 dagen: 21 maart, 21 juni, 21 september en 21 december. Het gedrag bestaat uit verschillende delen:

- › PV richting tunnel: de zonne-opwek wordt direct benut voor de consumptie van de tunnel;
- › Batterij richting tunnel: de batterij wordt ingezet voor de consumptie van de tunnel;
- › Consumptie via aansluiting: de consumptie van de tunnel wordt voorzien via de aansluiting;
- › PV richting batterij: de zonne-opwek wordt ingezet om de batterij op te laden;
- › PV over aansluiting: de zonne-opwek wordt via de aansluiting weggezet.
- › Consumptie tunnel: de totale consumptie van de tunnel.

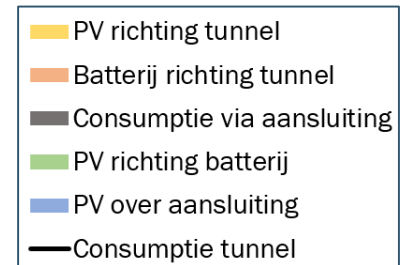
› In de figuren wordt alles onder de lijn “Consumptie tunnel” benut om de consumptie van de tunnel te voorzien. Dit kan vanuit zonne-opwek, batterij of de aansluiting gebeuren. Alles boven de lijn “Consumptie tunnel” is zonne-opwek die wordt gebruikt om ofwel de batterij op te laden, ofwel over de aansluiting wordt weggezet.

› Het gedrag van een energiearme tunnel:

- › 21 maart: Overdag voorziet de zonne-opwek de volledige vraag. Wat er nog resteert aan zonne-energie gaat richting de batterij, die daarmee zoveel mogelijk wordt opgeladen. Wanneer de zonne-opwek stopt, dan voorziet de batterij in de vraag. Er is echter niet genoeg energie in de batterij om de vraag te overbruggen, dus aan het einde van de nacht wordt de vraag voorzien via de aansluiting.
- › 21 juni: Overdag voorziet de zonne-opwek de volledige vraag. De batterij kan overdag volledig worden opgeladen. Verder is de nacht korter dan op 21-03-2019, waardoor het mogelijk is om de volledige nacht te overbruggen met de batterij. In het model wordt nu de batterij zo snel mogelijk opgeladen, er is ruimte om hier van af te wijken. Er kan dan aan het einde van de middag worden opgeladen in plaats van in de ochtend.
- › 21 september: Hier zien we kwalitatief hetzelfde gedrag als op 21-06-2019. Doordat er minder zon opwek is overdag, is er ook minder spelingsruimte om de batterij op te laden. Dit komt doordat er in totaal minder zonne-opwek is en in minder uren, dan op 21 juni.
- › 21 december: Er is maar weinig zonne-opwek. Alle zonne-energie gaat direct naar de vraag en de batterij wordt niet meer benut.

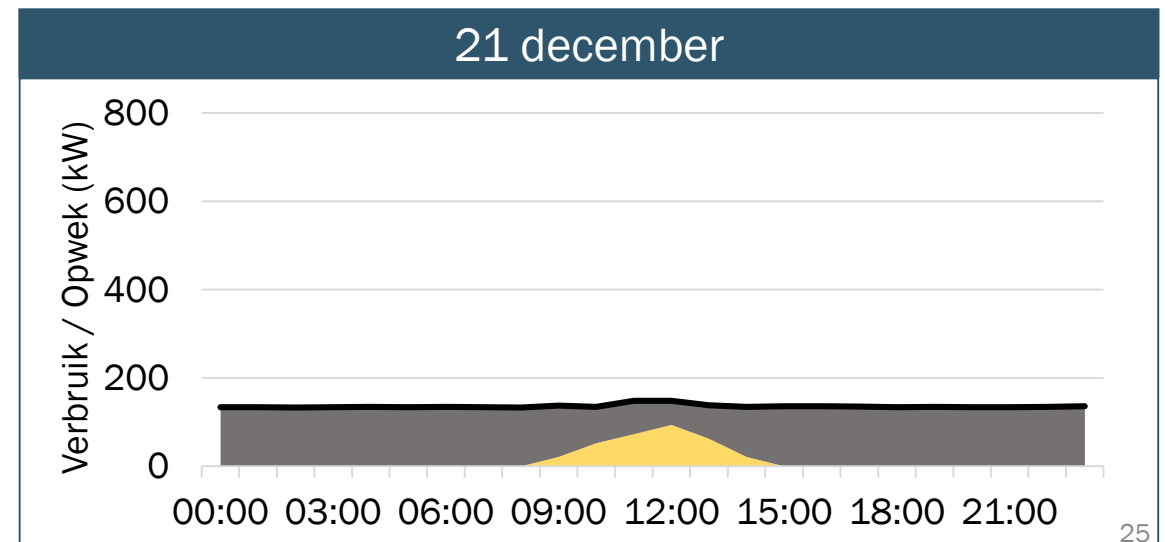
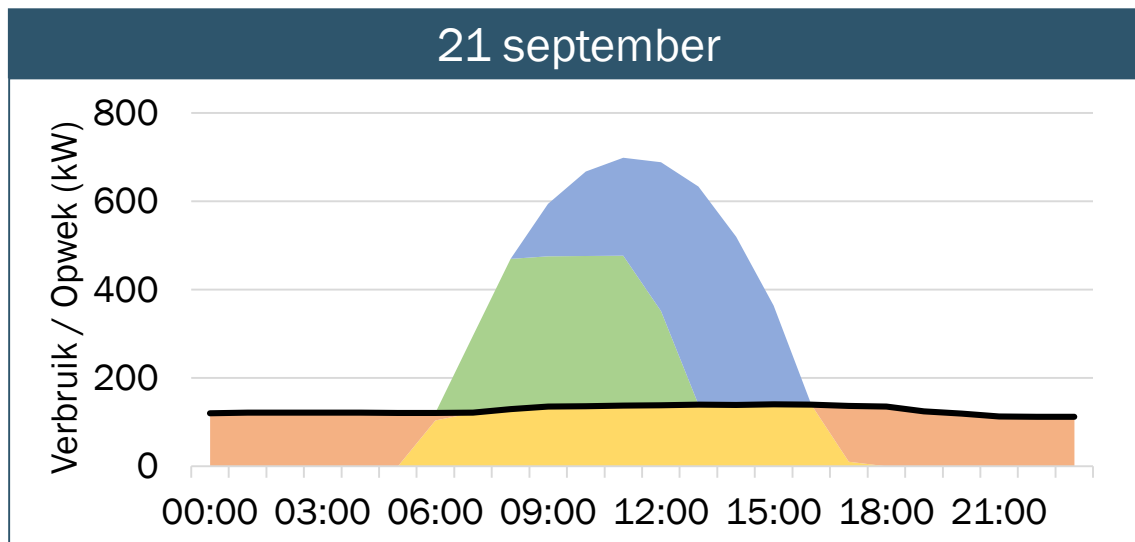
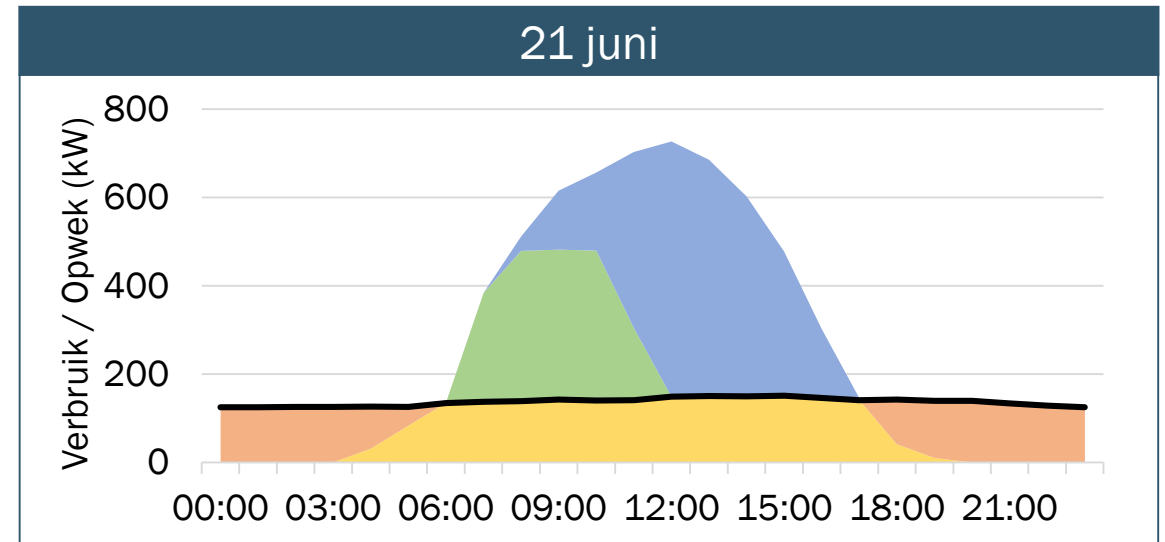
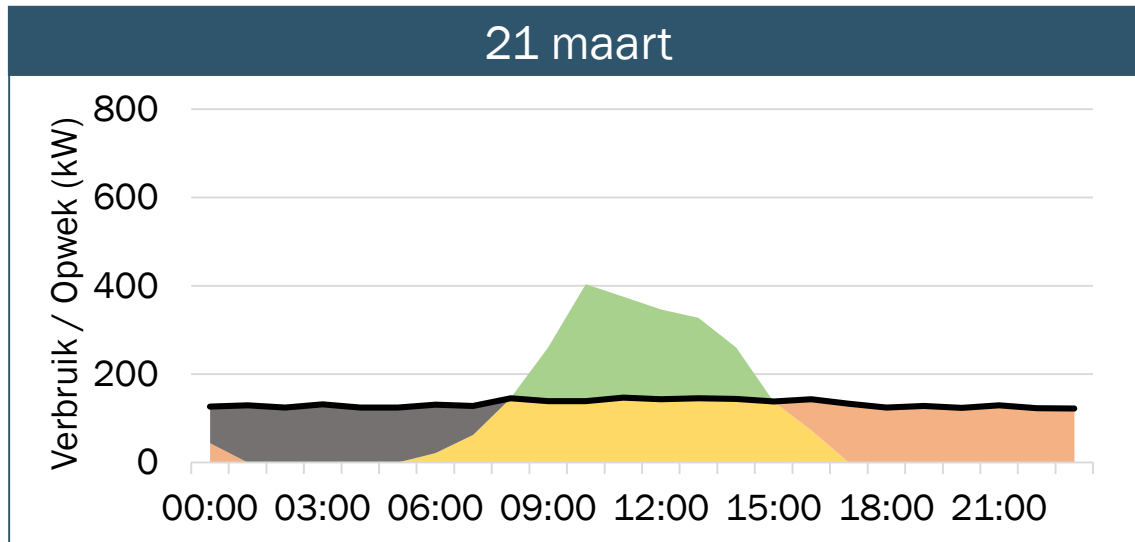


Figuur 12: Gedrag van energiearme tunnel





# HET GEDRAG VAN EEN ENERGIEARME TUNNEL

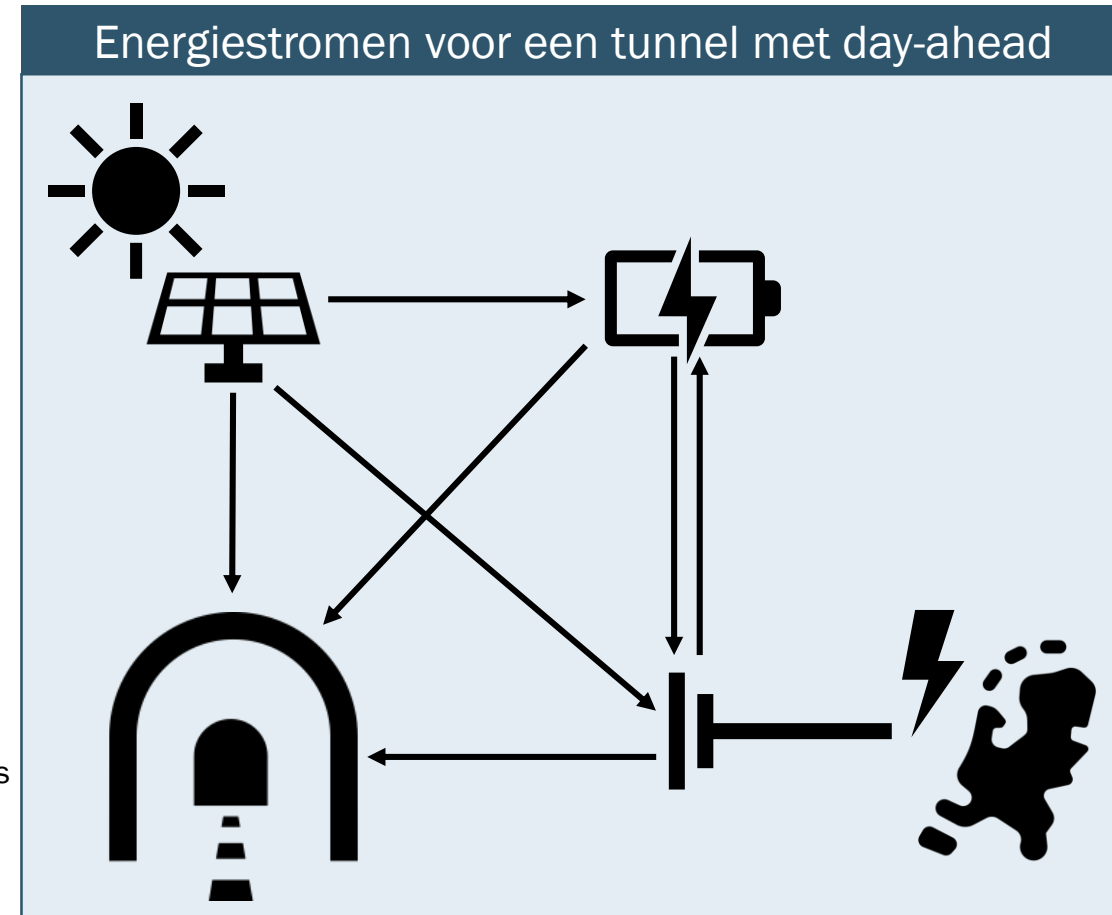


Figuur 13: Gedrag van energiearme tunnel op verschillende dagen (21 maart, juni, september en december)

## HOE HET BIEDGEDRAG VERANDERT MET DAY-AHEAD STURING

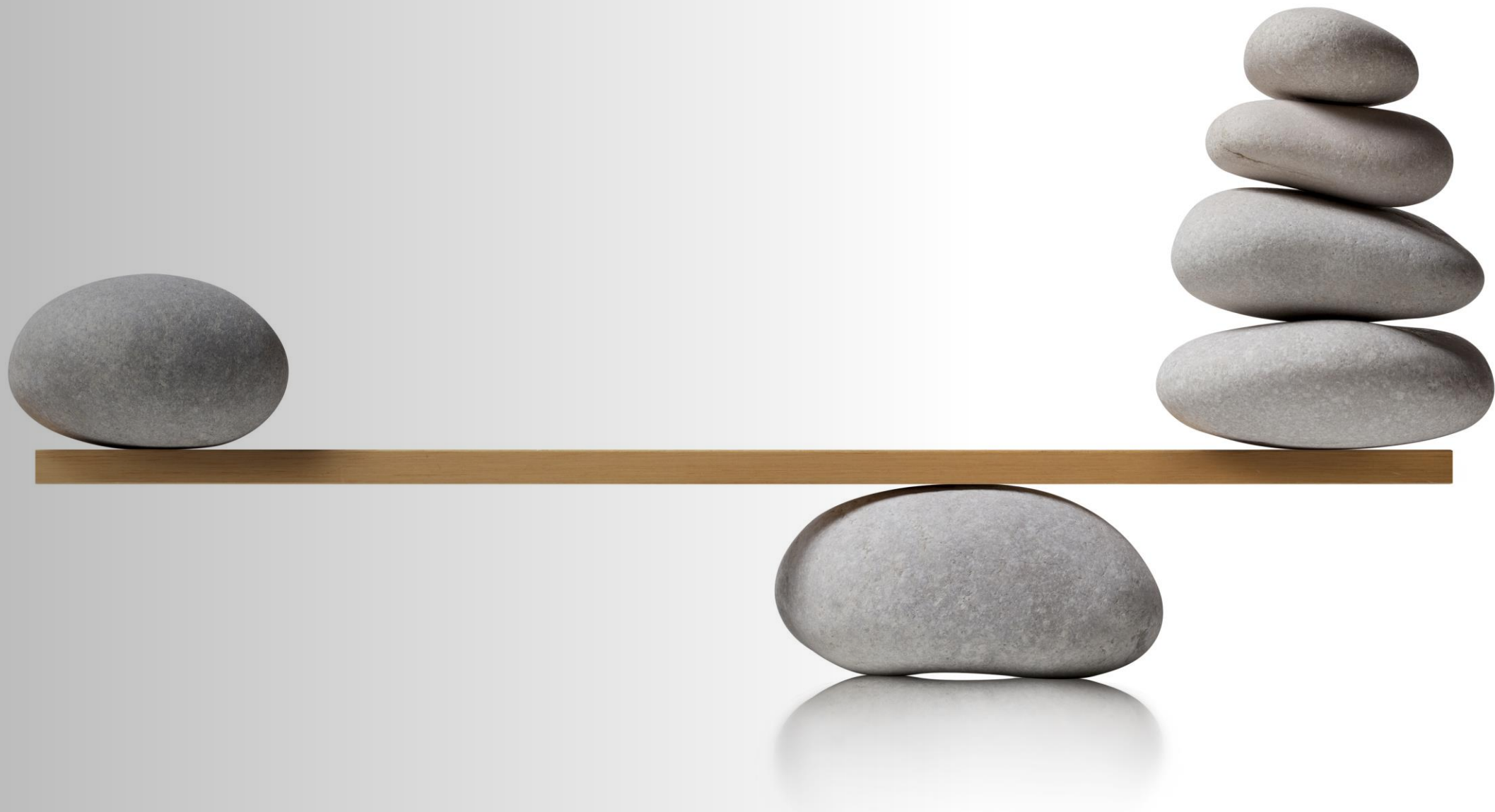
- › Een batterij die primair voor het bereiken van een energiearme tunnel is geplaatst zou alsnog ook gebruikt kunnen worden om op energiemarkten pieken te nivelleren. Dit modelleren we ook.
- › De marktprijs, het verbruik en de zon opwek worden in het dispatch model<sup>1</sup> gebruikt om het gedrag van de opslag te simuleren. Deze simulatie is uitgevoerd door inkoop en verkoop prijzen voor de opslag te bepalen voor het hele jaar. Deze set-prijzen zijn bepaald op basis van de marktprijs door het jaar heen en nemen daarom aan dat de opslag voorkennis had. De opslag zal opladen als de marktprijs lager is dan de inkoopprijs en ontladen als de marktprijs hoger is dan de verkoopprijs.
- › De set-prijzen worden bepaald door de **laagste** verkoopprijs en de **hoogste** inkoopprijs te selecteren waarmee de opslag nog financieel winst maakt. Dit betekent dat energieverlies meegenomen wordt in het bepalen van deze prijzen. Vanwege de grote variatie tussen prijzen in het begin van 2021 en het einde van 2021 is het prijsprofiel waarop een beslissing genomen wordt genormaliseerd.
- › In het dispatch model zal de opslag:
  - › **Opladen** als: de elektriciteitsprijs lager is dan de inkoopprijs **en** er voldoende ruimte is op de netaansluiting **en** de opslag voldoende capaciteit over heeft.
  - › **Ontladen** als: de elektriciteitsprijs hoger is dan de verkoopprijs **en** er voldoende ruimte is op de netaansluiting **en** er voldoende elektriciteit in de opslag zit.
- › De opslag zal de simulatie volledig gevuld starten. Op het einde van de simulatie wordt bepaald hoeveel elektriciteit ingekocht moet worden om weer volledig gevuld te zijn. Deze elektriciteit wordt ingekocht tegen de gemiddelde prijs.
- › Het verdienpotentieel is berekend op basis van de inkoopkosten van elektriciteit en de opbrengsten om elektriciteit te verkopen. Voor deze analyse worden de daadwerkelijke prijzen op de Day-Ahead markt gebruikt

<sup>1</sup> Het dispatch model berekent op basis van prijzen de energiestromen tussen PV, batterij, tunnel en aansluiting.



Figuur 14: Schematische weergave van energiestromen voor een tunnel met day ahead sturing

## › 4. VERGELIJKING



## › AANSTURING OP MARKTPRIKKELS LEVERT EEN BETERE FINANCIËLE PERFORMANCE OP, MAAR MINDER ZELFVOORZIENING

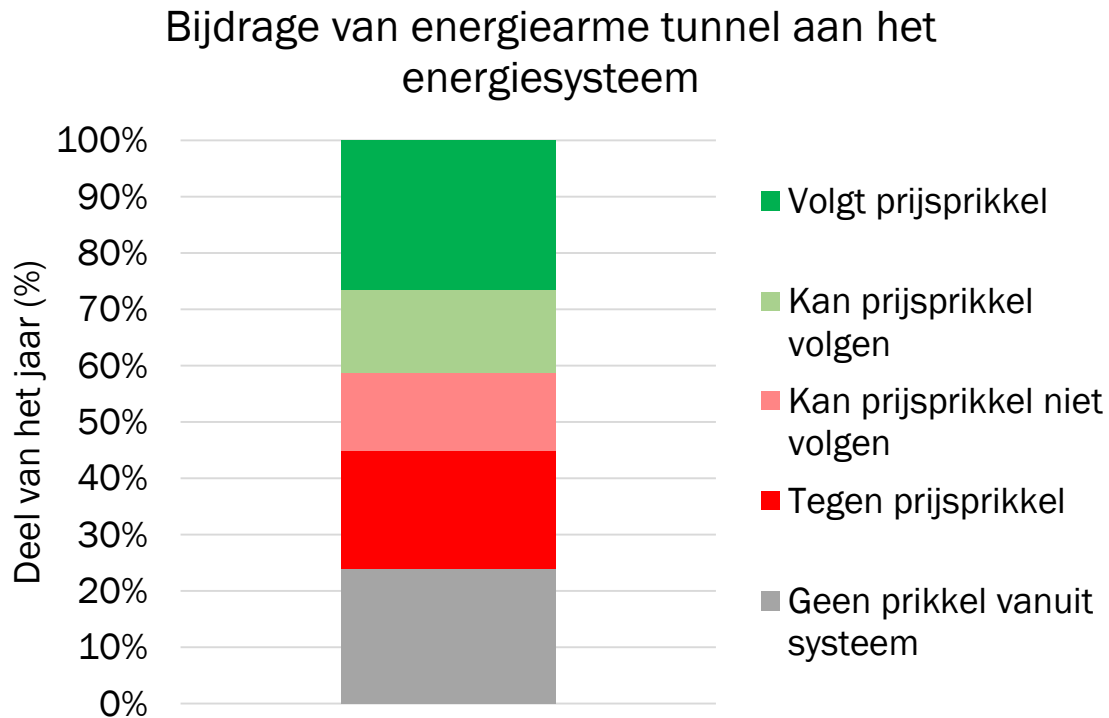
› De energiearme tunnel levert een hoge mate van zelfvoorziening tegen hogere kosten. Day ahead sturing volgt vaker de marktprikkel, welke een indicatie is voor tekorten en overschotten in het energiesysteem. De resultaten van de analyse van de energiearme tunnel en day ahead sturing zijn weergegeven in Tabel 5. De varianten zijn geanalyseerd op de volgende KPI's:

1. Zelfvoorzienend
  2. Bijdrage/tegenwerking van de marktprikkel
  3. Financiële waarde
  4. Bijdrage aan autonomie van de tunnel
  5. Ruimtegebruik.
- › De energiearme tunnel zorgt voor zelfvoorziening van het energieverbruik: 72% van het energieverbruik wordt voorzien vanuit de zonnepanelen (zie pagina 22). Bij day ahead sturing is dit 47%.
- › De day ahead gestuurde batterij draagt 3242 uur (37%) van het jaar bij aan het energiesysteem. De batterij draagt in een energiearme situatie voor 27% van de tijd bij, maar gaat 21% van de tijd tegen de marktwerking in.
- › Uit de financiële analyse blijkt dat het plaatsen van zon PV en opslag de energiekosten verlaagt ten opzichte van Business as Usual. Deze besparing is op dit moment niet voldoende om de investering in opslag en zon PV terug te verdienen. De day ahead sturing leidt tot een betere financiële prestatie dan de energiearme tunnel.
- › Beide sturingsmechanismes kunnen de autonomie van een tunnel in de zomer verhogen, doordat bij het uitvallen van de netaansluiting de batterij tijdelijk in de vraag van de tunnel kan voorzien. Day ahead sturing kan dit ook in de winter.
- › Het ruimtegebruik is hetzelfde voor een energiearme tunnel en day ahead sturing. 1039 kW aan zonnepanelen heeft een ruimtegebruik van circa 5700 m<sup>2</sup>. Een batterij van 340 kW en 2040 kWh heeft een ruimtegebruik van circa 160 m<sup>2</sup>. De zonne-opwek domineert het ruimtegebruik.

KPI	Energiearme Tunnel	Day ahead
Zelfvoorzienend (%)	72%	47 %
Bijdrage aan marktprikkel (% van jaar)	27%	37%
Tegenwerking van marktprikkel (% van jaar)	21%	0%
Netto Contante waarde t.o.v. Business as Usual	- 9 M€	- 6 M€
Autonomie (gemiddeld aantal uren autonome operatie bovenop UPS-systeem)	0 (winter) – 9 (zomer)	4 (zomer) – 8 (winter)
Ruimte	Zonnepanelen	5700 m <sup>2</sup>
	Batterij	160 m <sup>2</sup>

Tabel 5: Resultaten vergelijking batterijconcepten

## › DE ENERGIEARME TUNNEL KAN REGELMATIG BIJDAGEN AAN HET ENERGIESYSTEEM

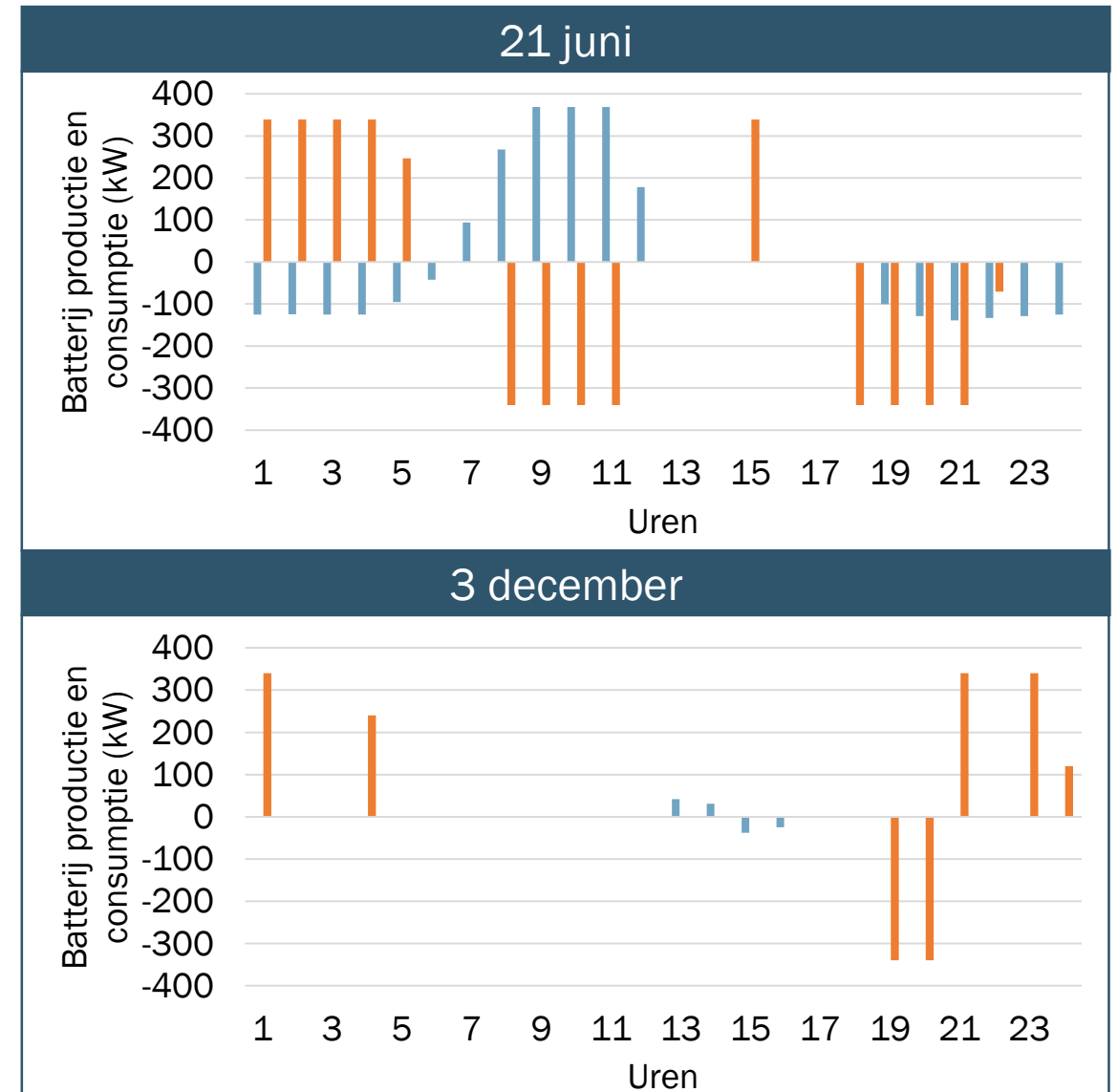
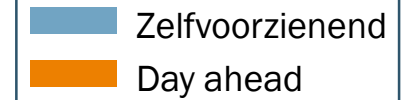


Figuur 15: Bijdrage van een energiearme tunnel aan het energiesysteem, bepaald aan de hand van de day ahead prijzen

- › In deze analyse wordt de prijsprikkel vanuit de day ahead markt als uitgangspunt genomen om te bepalen of de batterij van de tunnel kan bijdragen aan het energiesysteem. Bij hoge prijzen is er een tekort aan energie en bij lage prijzen een overschot in het energiesysteem. Deze dynamiek werkt door middel van de elektriciteitsprijzen door als prikkel voor de opslag.
- › De **day ahead** gestuurde batterij volgt 3242 uur (37%) de marktprikkel. De rest van de tijd is de batterij niet in gebruik. Dit komt doordat de prijsprikkel te laag is of dat de capaciteit van de batterij of aansluiting onvoldoende is.
- › Als de batterij **energiearm** wordt gestuurd, dan:
  - › Draagt de batterij 27% van de tijd bij aan de markt én werkt de batterij 21% van de tijd tegen de marktwerking in.
  - › Zou de batterij 15% van de tijd bij **kunnen** dragen aan de markt, maar doet dat in de zelfvoorzienende casus niet.
  - › Zou de batterij in 14% van de tijd bij **mogen** dragen aan de markt, maar is de capaciteit ontoereikend door zelfvoorzienend laden.
  - › Is er voor 23% van de tijd geen prikkel vanuit het systeem.
- › De batterij volgt in een energiearme situatie voor 27% van de prijsprikkel, maar gaat 21% van de tijd tegen de prijsprikkel in.
- › Op pagina 29 is de inzet van de **zelfvoorzienende** en **day-ahead** strategie is vergeleken voor een aantal dagen in het jaar.

## IN DE WINTER KAN DE BATTERIJ ZOWEL ZELFVOORZIENEND ALS MARKTGESTUURD ACTEREN

- › De zelfvoorzienende strategie en day ahead strategie vertonen een verschillend gedrag. In de figuren is het laad en ontlad profiel van de batterij over een dag weergegeven. De zelfvoorzienende strategie is hierin **blauw** en de day ahead strategie is **oranje** aangegeven. Bij een positieve waarde laadt de batterij op, bij een negatieve waarde wordt de batterij ontladen.
- › Het volgende gedrag is te observeren:
  - › 21 juni: De day ahead en zelfvoorzienende strategie laten grotendeels **tegengesteld** gedrag zien. In de zelfvoorzienende strategie wordt overdag de batterij opgeladen en 's nachts wordt de batterij ontladen. Bij day ahead sturing is dit juist andersom: 's nachts is er behoefte aan extra energie op het net terwijl in de ochtend een overschot is
  - › 3 december: Er is maar weinig zonne-opwek. Alle zonne-energie gaat direct naar de vraag en de batterij wordt niet meer benut in de zelfvoorzienende strategie. Op de **day ahead** markt zijn door de dag heen fluctuaties waar de batterij op kan worden ingezet. Omdat er weinig zonne-opwek is heeft de batterij in de **zelfvoorzienende** variant ook capaciteit over om daarop te reageren.
- › Voornamelijk in de zomerperiode wordt de batterij veel gebruikt in de zelfvoorzienende situatie. In deze periode heeft de batterij weinig ruimte om toegepast te worden op de day-ahead markt. De batterij zal de marktprikkel volgen of tegenwerken naar gelang te productie van zonne-energie. Wel is er de mogelijkheid om de batterij niet 's ochtends op te laden, maar dit pas 's middags te doen.
- › In de winterperiode wordt de batterij weinig gebruikt voor de zelfvoorzienende strategie. In deze periode heeft de batterij ruimte om toegepast te worden op de day-ahead markt. Er is de mogelijkheid om de batterij de marktprikkel te laten volgen.



Figuur 16: Gedrag van de batterij voor de energiearme en de day ahead sturing op twee dagen (21 juni en 3 december)

## ADDITIONELE BATEN ZIJN NODIG OM DE INVESTERING TERUG TE VERDIENEN

- › De financiële analyse is uitgevoerd voor de configuratie waar bij de Noordtunnel een lithium-ion batterij van 340 kW en 2040 kWh wordt geplaatst en 1039 kW zonnepanelen. Ook is, zoals eerder genoemd, aangenomen dat het hier een *greenfield* situatie is, waar geen bestaand opslagsysteem aanwezig is. De aangenomen CAPEX en OPEX zijn weergegeven in Tabel 6.
- › De financiële analyse is uitgevoerd voor drie varianten:
  1. Business as Usual: energieverbruik zonder opslag en zon PV
  2. Energiearme tunnel
  3. Day-ahead sturing
- › In de financiële analyse is de Netto Contante Waarde (NCW) na **15 jaar** berekend met een WACC van **4%**. Deze berekening omvat de investeringskosten (CAPEX), operationele kosten (OPEX) en opbrengsten uit energiehandel. De opbrengsten uit energiehandel zijn bepaald door middel van de day ahead elektriciteitsprijzen uit 2021.
- › Uit de financiële analyse blijkt dat de energiearme tunnel en de day-ahead tunnel een besparing op de energiekosten oplevert ten opzichte van Business as Usual. Deze besparing is op dit moment niet voldoende om de investering in opslag en zon PV terug te verdienen.
- › Het inzetten van de opslag op onbalansmarkten kan additionele inkomsten genereren. Een opbrengst van **20 €/MW/uur**<sup>3</sup> aan opbrengsten op de onbalansmarkten leidt bij 100% beschikbaarheid tot een verbetering van € 5 miljoen op de netto contante waarde na 15 jaar.
- › RWS investeert al in opslagcapaciteit voor noodstroomvoorziening. Synergie met deze investering kan tot additionele baten of lagere kosten leiden.

<sup>1</sup> [Lithium-ion Battery \(LFP and NMC\) | PNNL](#), 1 MW, 6 hr opslag

<sup>2</sup> SDE++

<sup>3</sup> <https://www.next-kraftwerke.nl/producten/balanceringsenergie>

	Opslag <sup>1</sup>	Zon PV <sup>2</sup>
CAPEX	400 €/kWh	540 €/kW
OPEX	6,6 €/kW-jaar	10,8 €/kW-jaar

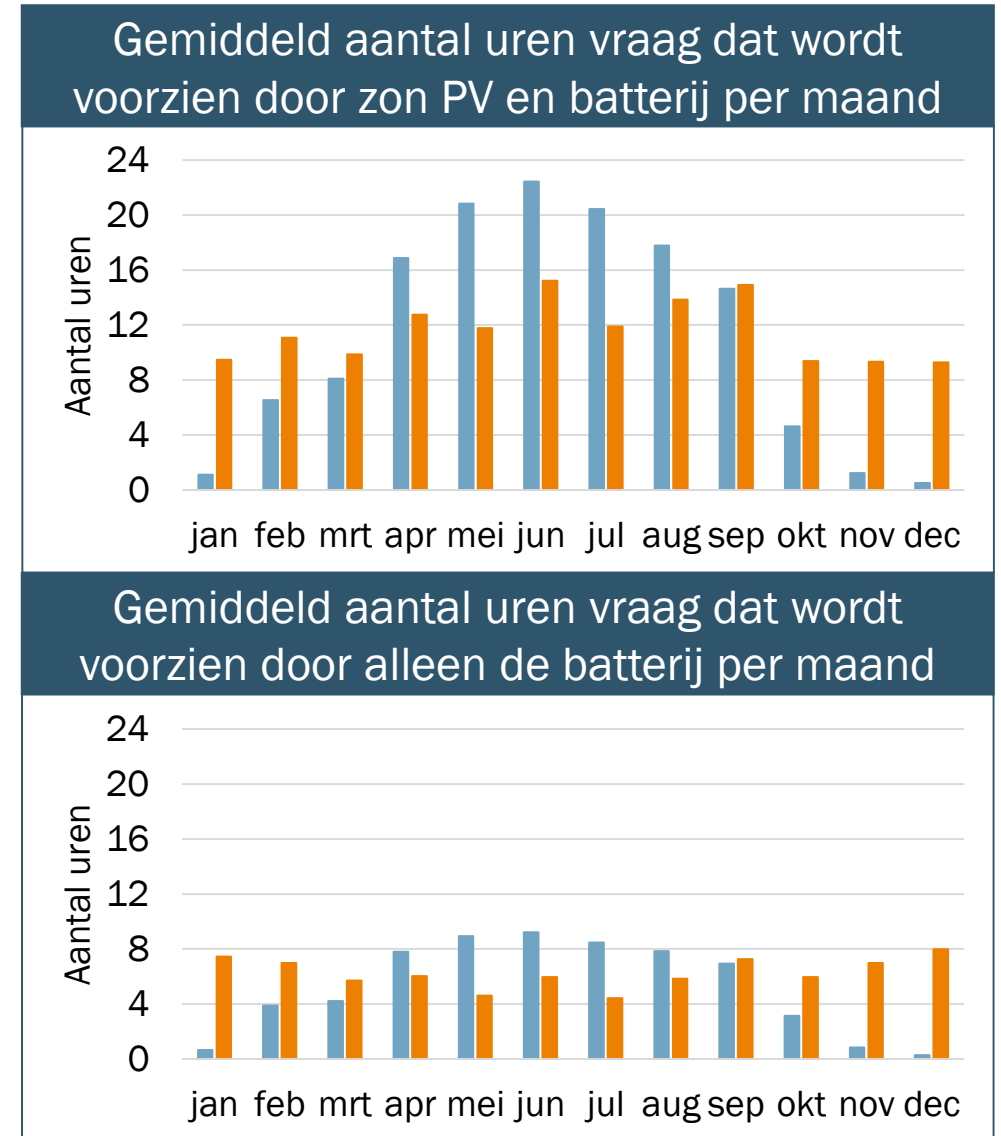
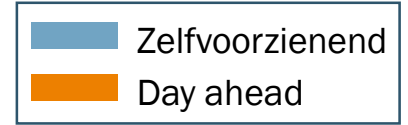
Tabel 6: aannames over CAPEX en OPEX van opslag en zon PV.

	Business as Usual	Energiearme Tunnel	Day Ahead sturing
CAPEX Opslag (€)	-	- € 821.000	
CAPEX ZonPV (€)	-	- € 561.000	
OPEX Opslag (€/jr)	-	- € 2.000	
OPEX ZonPV (€/jr)	-	- € 5.000	
Energiehandel (€/jr)	- € 123.634	- € 28.200	€11.000
NCW	-10 M€	-19 M€	€ -16 M€

Tabel 7: resultaten financiële analyse.

## OPSLAG KAN BIJDRAGEN AAN AUTONOMIE

- Door het installeren van opslag en zonne-opwek zal de aansluiting minder benut worden om te voldoen aan de vraag van de tunnel. Dit vergroot ook de autonomie van de tunnel; de tunnel kan langer in dienst blijven als de aansluiting wegvalt. Deze autonomie is deels al gekwantificeerd op jaarbasis door de zelfvoorzienendheidspercentages te berekenen. In Figuur 17 wordt daarnaast per maand getoond hoeveel uur de batterij én zonnepanelen (boven) of alleen de batterij (onder) de tunnel gemiddeld kunnen voorzien van stroom. De zelfvoorzienende strategie is hierin **blauw** en de day ahead strategie is **oranje** aangegeven.
- Duidelijk valt op dat de zelfvoorzienende strategie een hoge mate van autonomie bereikt in de zomer, en een lage mate in de winter. De day ahead strategie is hierin constanter door het jaar heen. De bijdrage van de batterij wordt in het onderste figuur getoond. Kwalitatief is het hetzelfde gedrag, met een lagere mate van autonomie dan met zonne-opwek.
- Op de volgende pagina wordt het percentage van de tijd getoond per maand dat de batterij én zonnepanelen of alleen de batterij een vraag kan voorzien van 1 uur en 4 uur (Figuur 18). Hetzelfde type gedrag valt op als in Figuur 18 is te zien. Verder valt op dat de combinatie van batterij en zonnepanelen in de zomer ruim 90% van de tijd zowel een vraag van de komende 1 als 4 uur kan voorzien.
- Hoewel de batterij de autonomie van de tunnel dus significant verhoogt, zal hiernaast een UPS-systeem nodig blijven. De in de figuren op deze en de volgende pagina getoonde aantal uren zijn immers gemiddelden. Een batterij die wordt gebruikt voor het verhogen van de energieneutraliteit of voor een bijdrage aan energiemarkten heeft niet in alle uren genoeg opgeslagen energie om een UPS-functie te vervullen. Als het bestaande UPS-systeem de tunnel gedurende een uur in de energiebehoefte kan voorzien, verhoogt de batterij dit dus met de in de figuren aangegeven hoeveelheid uren, d.w.z. in de meeste gevallen een additionele 1-4 uur autonoom tunnelbedrijf.
- Vanuit een autonomie perspectief zal de zelfvoorzienende sturing in de zomer (apr-sep) worden toegepast en de day ahead sturing in de winter (okt-mrt). Dit sluit aan bij eerdere conclusies waarbij werd opgemerkt dat in de zomer de batterij volledig kan worden ingezet op basis van de zelfvoorzienende sturing, terwijl er in de winter ruimte is om het op basis van de day ahead sturing in te zetten.

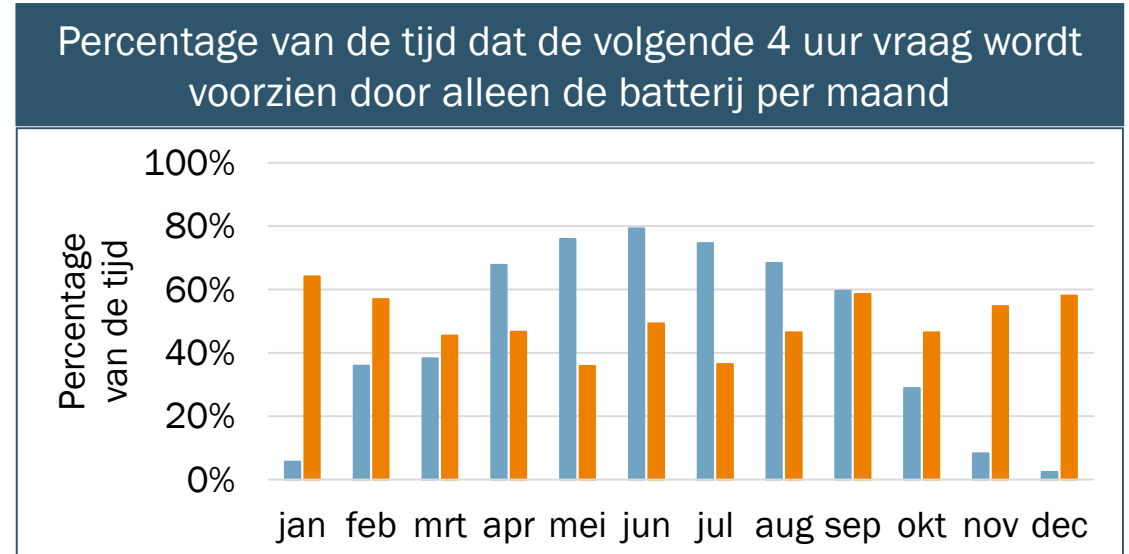
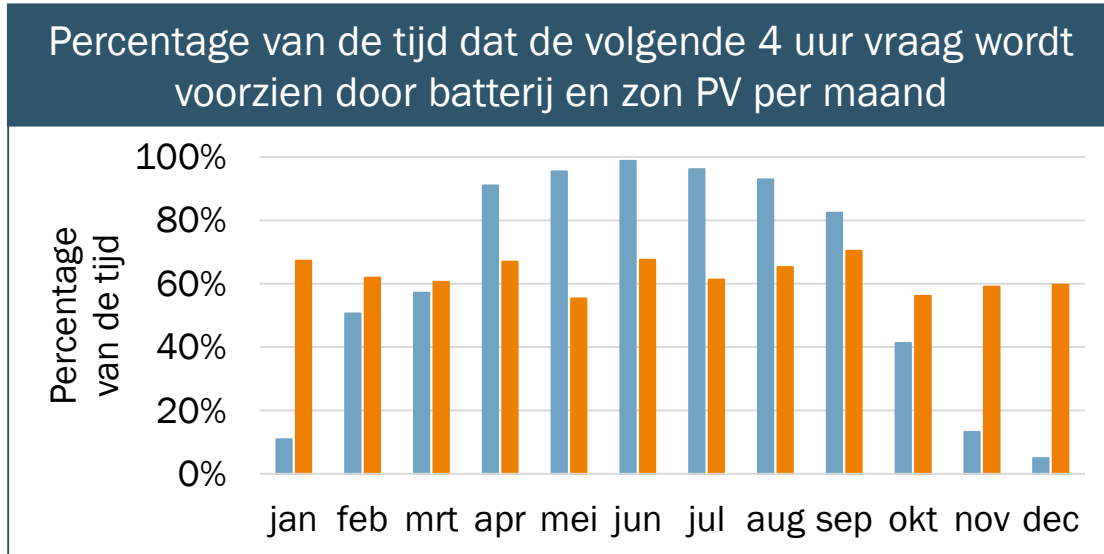
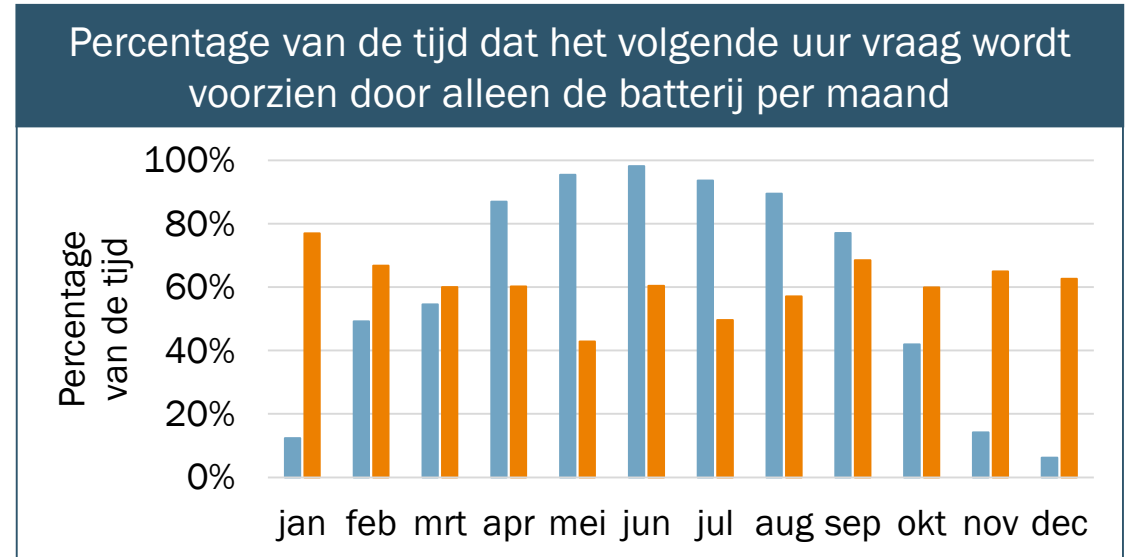
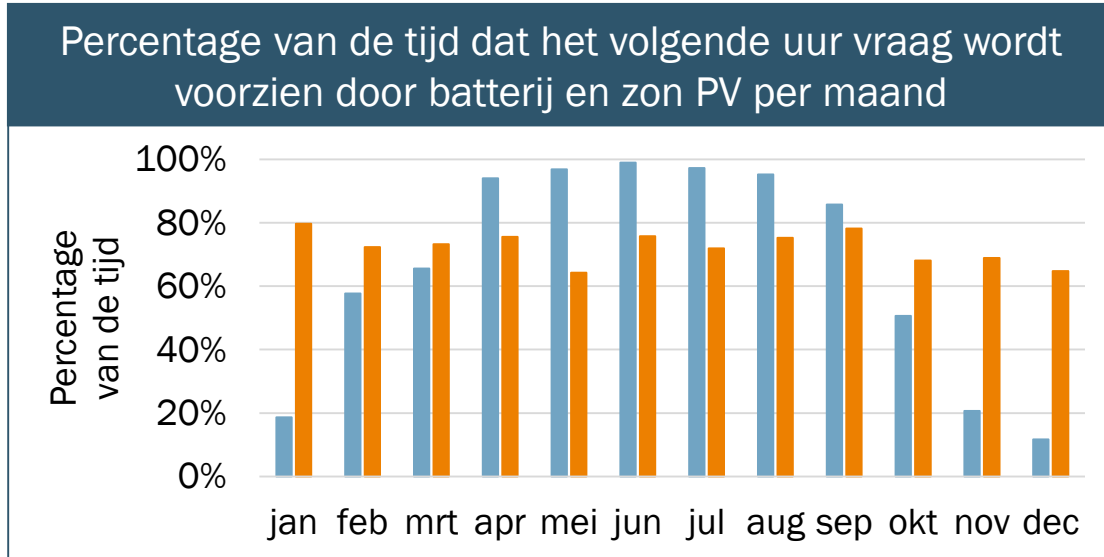


Figuur 17: Autonomie van de tunnel door opslag en zonnepanelen.



# OPSLAG KAN BIJDAGEN AAN AUTONOMIE

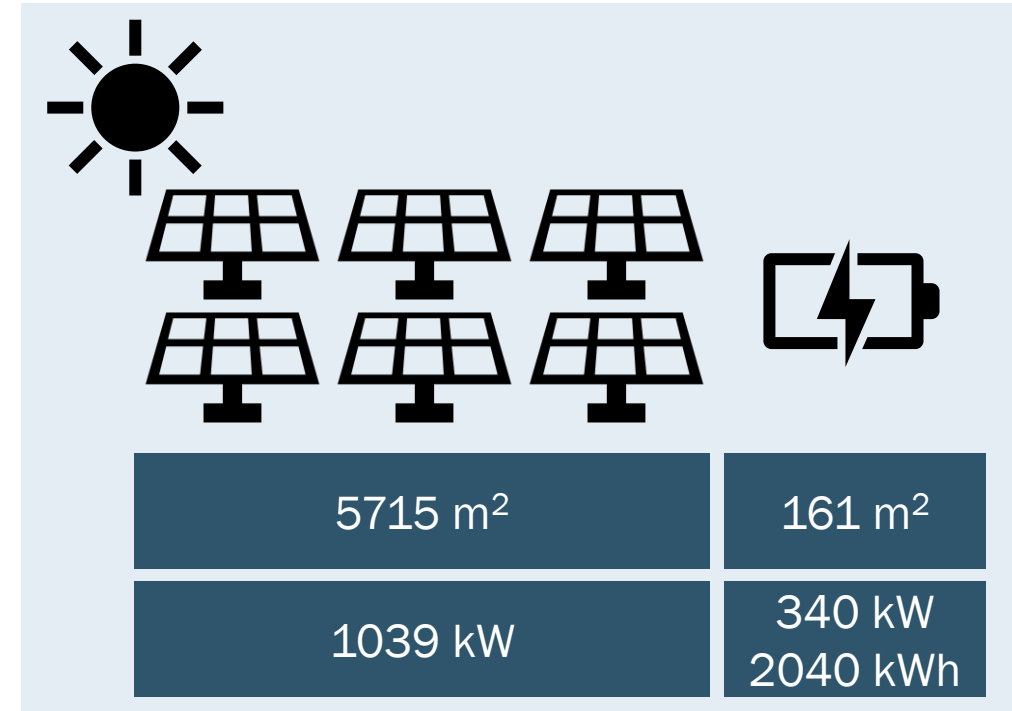
Zelfvoorzienend  
Day ahead



Figuur 18: Autonomie van de tunnel door opslag en zon PV voor 4 uur vraag en 8 uur vraag.

# RUIMTEGEBRUIK DOOR ZONNEPANELEN EN BATTERIJ

- › Tot nu toe is er gerekend met kilowatts en kilowatturen. In deze analyse gaan we in op de ruimtelijke component: het aantal benodigde vierkante meters (m<sup>2</sup>).
- › Een zonnepaneel van 330 Wp (watt piek) neemt 1,65 m<sup>2</sup> in.<sup>1</sup> Een opgestelde capaciteit van 1039 kW beslaat een oppervlakte van 5715 m<sup>2</sup>.
- › De ruimtelijke inname van een batterij hangt af van de gekozen technologie. Verder wordt het bepaald door de oplaad- en ontlaadsnelheid en capaciteit. In Tabel 8 wordt voor een redox flow<sup>2</sup> en een lithium-ion<sup>3</sup> batterij getoond wat het ruimtegebruik betreft voor een batterij van 340 kW en 2040 kWh. Hiervoor wordt zowel het oppervlakte berekend gegeven de oplaad- en ontlaadsnelheid (340 kW) en de capaciteit (2040 kWh). Van de twee resulterende waarden wordt het maximum gebruikt. Voor beide technologieën wordt het maximum bepaald door de waarde gebaseerd op capaciteit. De waarden voor een redox flow en lithium-ion batterij verschillen weinig.
- › Het ruimtegebruik voor de energieopwekking is ruim 35 maal zo groot als het ruimtegebruik voor de batterij. Daarmee zal de batterij niet de limiterende factor zijn wat betreft het ruimtegebruik. Mocht er meer opwek nodig zijn dan 1039 kW, dan zal het ruimtegebruik toenemen. Zo neemt 2000 kW zonne-opwek 11.000 m<sup>2</sup> in.



Figuur 19: Ruimtegebruik van opslag en zonne-opwek.

	Oppervlakte (m <sup>2</sup> ) per MW	Oppervlakte (m <sup>2</sup> ) per MWh	Oppervlakte gebaseerd op oplaad- en ontlaadsnelheid	Oppervlakte gebaseerd op capaciteit	Oppervlakte (m <sup>2</sup> )
Redox flow – Vanadium	300	75	102	153	153
Lithium-ion	100	79	34	161	161

Tabel 8: Ruimtegebruik van een redox flow en een lithium-ion batterij

<sup>1</sup> Bron: Energy Sage

<sup>2</sup> Bron: Lund University <https://www.svk.se/siteassets/5.jobba-har/dokument-exjobb/battery-energy-storage-systems.pdf>

<sup>3</sup> Bron: Ronke Power <http://en.rongkepower.com/?case/50.html>

## › 5. KWALITATIEVE ASPECTEN

# › KWALITATIEVE ASPECTEN (1/2)

## MAATSCHAPPELIJKE WAARDE ZIT VOORNAMELIJK IN INTEGRATIE HERNIEUWBARE OPWEK

- › Rijkswaterstaat is niet alleen geïnteresseerd in de business case van energieopslag in tunnels, maar ook in de bredere maatschappelijke impact. Hiervoor zijn verschillende aspecten van belang:
1. De hierboven genoemde additionele waarestromen (onbalans, pieken nivelleren day-ahead) kunnen ook door andere (commerciële) partijen worden gerealiseerd. Het aantal aanvragen van batterij-exploitanten is het afgelopen jaar toegenomen tot aanvragen voor meer dan 20 GW aan capaciteit<sup>1</sup>. Naast batterijen kan ook demand response worden ingezet op deze waarestromen. Zowel maatschappelijk als kostentechnisch komt dat vaak positiever uit, en het Nederlandse potentieel voor demand response is groot; een recente studie noemt 20TWh in 2030<sup>2</sup>. Het is dus onduidelijk wat de additionele waarde van een investering door RWS is, want in veel gevallen zou een 'crowding-out' effect optreden: door op onbalans- of day-ahead markten actief te zijn dalen daar respectievelijk prijzen en prijsverschillen, wat investeringen door andere partijen minder aantrekkelijk maakt. Dit crowding-out effect is te zien in analyses van de toekomstige day ahead markt, waar bijvoorbeeld bij een verdubbeling van elektrische boilers in het systeem de waarestroom voor deze boilers met 28% daalt<sup>3</sup>.
  2. De energiearme tunnel heeft maatschappelijke waarde vooral door de toevoeging van hernieuwbare opwek aan het systeem. De plaatsing van zonnepanelen heeft op dit moment landelijk hinder van een tekort aan aansluitcapaciteit. Het realiseren van extra hernieuwbare opwek achter een bestaande meter, die deels wordt opgevangen met bestaande vraag kan daardoor bijdragen aan de toename van hernieuwbare opwek in Nederland. De additionele systeemwaarde van het opslagsysteem op zichzelf is moeilijk te bepalen zonder een gedetailleerde systeemintegratie-studie. Een kleinere en vlakker energievraag zorgt, in het algemeen, wel voor een reductie in de benodigde infrastructuur op de langere termijn. Er bestaat nu geen mechanisme voor netbeheerders om deze baten te verrekenen, maar dat betekent niet dat ze insignificant zijn.
  3. In aanvulling hierop kunnen, omdat in Nederland elektriciteitsprijzen niet op lokaal niveau worden gedifferentieerd, deze additionele waarestromen zorgen voor een verhoging van de lokale congestie. Dit is een externaliteit, die de maatschappelijke waarde van de investering vermindert. Om te zorgen dat opslag een bijdrage levert aan transportschaarste, en deze niet tegenwerken stellen de netbeheerders een inpassingskader voor rondom grootschalige energieopslag<sup>4</sup>. Er wordt door beleidsmakers wel steeds vaker gespeculeerd over de mogelijke instelling van prijszones in de Nederlandse markt, wat deze externaliteit zou verminderen. Het is echter onwaarschijnlijk dat dit op distributieniveau zal worden doorgevoerd, zeker niet op de korte termijn. Vroege coördinatie met de netbeheerder om de omvang van de negatieve externe effecten in beeld te brengen blijft dus belangrijk.

<sup>1</sup> Bron: Analyse flexibiliteitsmarkt (TNO, <https://energy.nl/publications/analyse-flexibiliteitsmarkt/>)

<sup>2</sup> Bron: The role of demand response in the power system of the Netherlands, 2030-2050 (TNO, <https://publications.tno.nl/publication/34639481/emVYyq/TNO-2022-P10131.pdf>)

<sup>3</sup> Bron: Netbeheer Nederland (<https://www.netbeheernederland.nl/nieuws/nieuw-inpassingskader-voor-grote-batterijen-moet-netcongestie-verminderen-1596>)

## › KWALITATIEVE ASPECTEN (2/2)

### UNIEKE ASPECTEN VAN RIJKSWATERSTAAT LEIDT TOT KANSEN VOOR HERNIEUWBARE OPWEK

› Rijkswaterstaat kan in de casus van batterijopslag inspelen op enkele unieke aspecten:

4. Uniek voor RWS is de relatief grote hoeveelheid beschikbare ruimte. Ruimte is in Nederland schaars, en dit is nu al een knelpunt in de energietransitie. Gebruik van energieopslag en –opwek op RWS terrein kan daardoor een additionele maatschappelijke waarde hebben die commerciële partijen niet kunnen realiseren. Het blijft wel de vraag of opslag lokaal het meest efficiënte gebruik van ruimte is; RWS zou breder moeten kijken naar hoe ruimte kan worden ingezet.
5. Ook uniek voor RWS zijn de relatief grote netaansluitingen, die over het algemeen niet worden gebruikt. Op veel plaatsen zijn nieuwe aansluiting moeilijk te realiseren; dit zorgt o.a. voor veel vertraging als bijvoorbeeld nieuwe elektriciteitsgebruikers een aansluiting aanvragen, of bestaande gebruikers hun aansluiting willen opschalen om te kunnen decarboniseren. Het vrijmaken van capaciteit zou op de korte termijn een van de grootste bronnen van maatschappelijk nut kunnen zijn. De hierboven beschreven alternatieven zorgen niet op zichzelf voor een verkleining in de benodigde netaansluiting, omdat ook in de winter een hoge piek i.v.m. een calamiteit nog steeds volledig moet kunnen worden opgevangen. Bij een herevaluatie van de benodigde betrouwbaarheid, zou dit kunnen veranderen.

## > 6. CONCLUSIES EN ADVIEZEN



## › CONCLUSIES

- › Energieopslag, in combinatie met lokale hernieuwbare opwek, kan significant bijdragen aan de energieneutraliteit van een tunnel. Volledige energieneutraliteit op uurbasis, dat wil zeggen, volledige onafhankelijkheid van de aansluiting, impliceert een energieopslag systeem dat zeer groot en duur is. Veel van die opslagcapaciteit zal maar zeer zelden worden gebruikt. Dit is zowel technisch als economisch niet realistisch. Met een beperkte hoeveelheid opslag kan wel een grote mate van energieneutraliteit worden bereikt. Voor de Noordtunnel ligt dit rond de 72%. Een operationele strategie die gericht is op energieneutraliteit wijkt wel regelmatig af van wat de markt wil; in 21% van de uren wordt de opslag ingezet op een manier die vanuit systeemperspectief niet optimaal is. Vanwege de relatief kleine omvang van de opslag is het onwaarschijnlijk dat grote problemen veroorzaakt; het zorgt vooral voor minder inkomsten.
- › De inzet van energieopslag voor de primaire of secundaire voorziening van tunnels is, vanuit een puur financieel opzicht, waarschijnlijk voor de meeste tunnels niet aantrekkelijk. Hierop kunnen uitzonderingen bestaan, bijvoorbeeld als lokaal een grote en naar verwachting langdurige lokale vraag naar congestiemanagement bestaat, waar andere partijen niet aan kunnen voldoen. Ook levert energieopslag slechts een kleine (scope 1) CO2-besparing op.
- › De benodigde investeringen zijn, zeker in vergelijking met de totale kosten van de renovatie van een tunnel wel relatief beperkt. Hierbij is wel op te merken dat de in dit rapport geschetste business case geldt voor een *greenfield* setting. Als al investeringen in energieopslag voor, bijvoorbeeld, een UPS-systeem zijn gepland, is het mogelijk dat de kosten van een tweede of groter opslagsysteem kleiner zijn. Hier komt bovenop dat het UPS-systeem en de additionele batterij nooit tegelijk zullen worden gebruikt, en dat dus het totale vermogen van de combinatie niet hoger hoeft te zijn dan het vermogen van het UPS-systeem. De besparing is daardoor sterk afhankelijk van de gekozen technologie. Bij gebruik van Li-ion batterijen zal de besparing bijvoorbeeld minder groot zijn dan bij gebruik van Redox Flow batterijen. Of deze besparing kan worden gerealiseerd hangt verder af van de eisen aan het UPS-systeem (bijvoorbeeld: als dit een afgesloten stand-alone systeem is, inclusief het proprietair Battery Management System (BMS), waarvan de beschikbaarheid door de leverancier wordt gegarandeerd, is het minder waarschijnlijk dat kostenbesparingen kunnen worden gerealiseerd.
- › Energieopslag kan wel bredere baten voor het energiesysteem hebben, bijvoorbeeld door op systeemniveau pieken in hernieuwbare opwek te nivelleren. Dit impliceert dus wel een andere strategie dan inzet voor energieneutraliteit, vooral in de zomermaanden. Hiermee verbetert de business case van de energieopslag sterk, omdat geld kan worden verdiend op energiemarkten, maar neemt ook de energieneutraliteit sterk af. Tot op zekere hoogte kunnen beide opties worden gecombineerd, bijvoorbeeld door in de zomermaanden vooral te sturen op energieneutraliteit, en in de wintermaanden, als er sowieso weinig lokale opwek is, de batterij in te zetten op energiemarkten.

## › CONCLUSIES

- › Ook de autonomie van een tunnel kan met opslag (bovenop bestaande UPS-systemen) significant worden verhoogd. Bestaande UPS-systemen en secundaire aansluitingen moeten wel blijven bestaan, want een batterij die voor energieneutraliteit of participatie op markten wordt ingezet is per definitie niet altijd vol genoeg om de benodigde hoeveelheid energie voor de noodstroomvoorziening te leveren. Een opslagsysteem dat primair op een realistische mate van energieneutraliteit is geschaald (340 kW/2040 kWh) kan, afhankelijk van welke operationele strategie wordt gevolgd, in de zomermaanden gemiddeld 5-8 uur de volledige energievraag van de tunnel bedienen. Als de PV-installatie wordt meegeteld is dat nog hoger. Een strategie gericht op het gebruik van de batterij voor participatie op day-ahead markten kan dit tijdens de wintermaanden ook.
- › Er zijn veel bestaande opslagtechnologieën die in of bij een tunnel zouden kunnen worden toegepast. Welke technologie het beste past hangt af van de specifieke omstandigheden in en bij de tunnel. Rekening houdend met de hoeveelheid opslag, de ruimte die daarvoor beschikbaar is, en de huidige technologische stand van zaken zijn vooral batterijen interessant. In zeer beperkte gevallen zou perslucht opslag onderzocht kunnen worden als de ondergrond daarvoor mogelijkheden biedt. Alle opslagtechnologieën hebben veiligheidsimplicaties, net als de huidige dieselgeneratoren en tweede netaansluitingen. Redox Flow batterijen zijn interessant als de batterijen in de tunnel zelf geplaatst moeten worden, in verband met de relatief kleine veiligheidsrisico's. Voor opslag buiten de tunnel kunnen ook Li-Ion batterijen interessant zijn.



## › ADVIEZEN

1. Bij renovatie van tunnels, vooral als daarbij al moet worden geïnvesteerd in energieopslag in de vorm van een UPS-systeem, heeft het zin om de voor-en nadelen van verdere lokale energieopslag (ook i.c.m. zonnepanelen) te analyseren als een grotere mate van energieneutraliteit en/of autonomie gewenst is. Verdere energieopslag verdient zichzelf niet financieel terug, ook niet via gereduceerde CO2-emissies, maar kan wel een belangrijke bijdrage aan energieneutraliteit en autonomie leveren.
2. Streef hierbij niet met alleen opslag 100% autonomie na, maar stel realistische doelen.
3. Energieopslag kan ook worden ingezet op onbalans- en/of day-ahead markten. De financiële business case van energieopslag verbetert hierdoor, al wordt deze alsnog niet positief. Ook draagt energieopslag op deze manier bij aan het energiesysteem. Het is echter niet logisch voor RWS om alleen om deze reden in energieopslag te investeren. Niet alleen omdat de business case niet positief is, maar ook omdat hierdoor met belastinggeld andere partijen uit de markt worden verdrongen.
4. Het is echter niet onlogisch om opslag die primair is bedoeld om de energieneutraliteit en autonomie van de tunnel te verhogen, vooral in de winter ook in te zetten op energiemarkten. Gedurende de winter is de lokale hernieuwbare opwek met PV-panelen laag, en wordt de opslag dus weinig gebruikt. In samenwerking met marktpartijen die expertise hebben in de praktische uitwerking van aansturingsstrategieën voor PV zou een strategie kunnen worden bedacht die primair de energieneutraliteit dient, maar additionele waarde toevoegt door op onbalans- of day-ahead markten actief te zijn. Dit betekent dat in de zomer vooral op energieneutraliteit wordt gestuurd, en in de winter op prijssignalen. Een bijkomend voordeel van deze combinatie is dat de batterij ook het hele jaar door een grote bijdrage kan leveren aan de autonomie van de tunnel.
5. Het is hiernaast belangrijk om, vooral voor tunnels met een grote energievraag, regelmatig in gesprek te gaan met de lokale netbeheerder. Benut lokale kansen, bijvoorbeeld voor congestievermindering.
6. Als het opslagsysteem buiten de tunnel wordt geplaatst, is een grote bandbreedte aan technologieën toepasbaar. Het gaat hier vrijwel uitsluitend om batterijen, waaronder Li-Ion batterijen en Redox Flow Batterijen. Voor opslagsystemen binnen een tunnel moeten de veiligheidsimplicaties van opslag goed worden onderzocht voor de specifieke situatie ter plaatse.

An aerial photograph of a coastal landscape. The image shows a mix of dark blue water, light brown sand, and green vegetation. The water is in the foreground and middle ground, with sandy areas and green patches interspersed. The background shows more water and some distant landmasses. The overall scene is a natural, coastal environment.

› **VOOR MEER INFORMATIE**  
**HARRY.VANDERWEIJDE@TNO.NL**

**TNO** innovation  
for life