

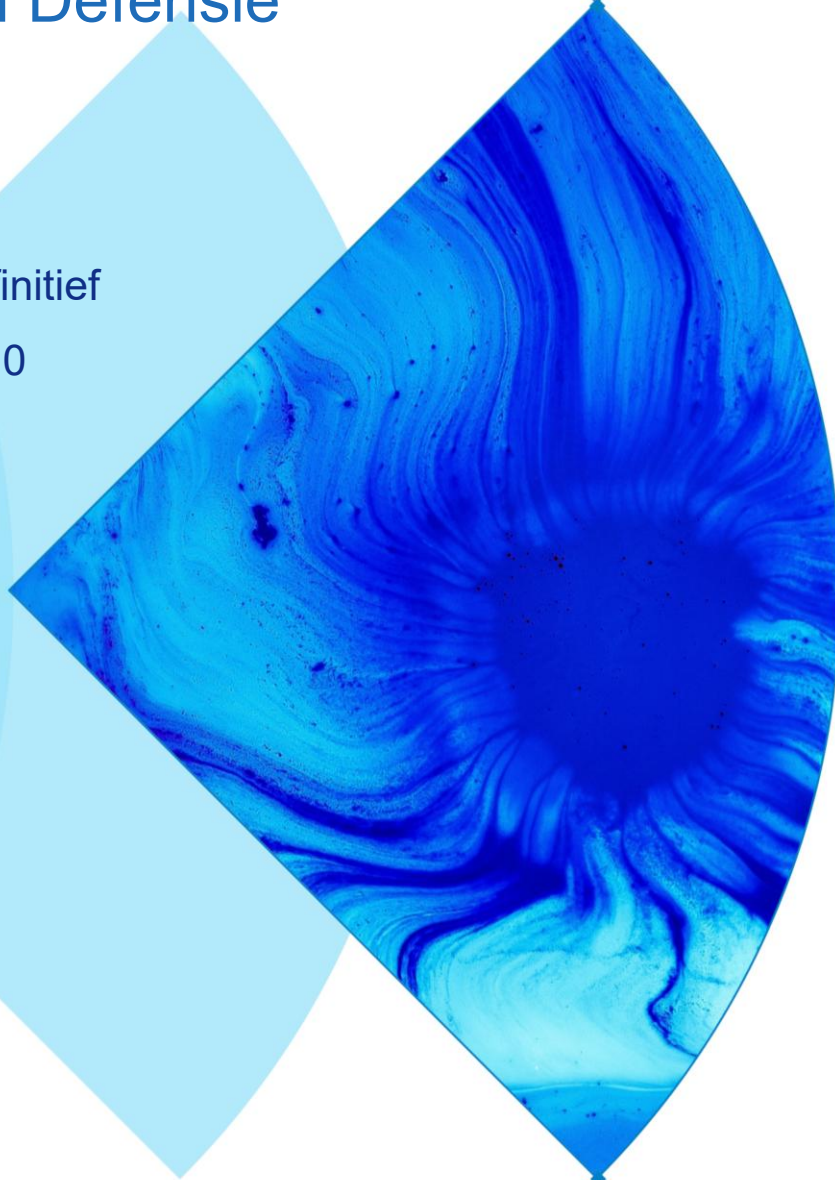
13 mei 2026

Rapport marktverkenning fossielvrije energiecentrales

RVB en Defensie

Status: Definitief

Versie: v3.0



Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van de klant. In het geval dat deze publicatie in opdracht is uitgegeven, gelden alle rechten en plichten volgens de Nederlandse DNR 2011, of, indien er een overeenkomst is tussen de betreffende partijen, is deze overeenkomst van toepassing.

13 mei 2026

Rapport marktverkenning fossielvrije energiecentrales

RVB en Defensie

Status: Definitief

Versie: v3.0

Auteur(s)	Peter Buurman <i>Strategisch adviseur</i>	13 mei 2026	PB
	Nico Vermeer <i>Strategisch adviseur</i>	13 mei 2026	NV
	Ninoska Bonilla Vasques <i>Junior Adviseur</i>	13 mei 2026	NBV

Contactpersoon

Peter Buurman
peter.buurman@deerns.com

Deerns Nederland B.V.

Den Haag, Nederland

Inhoud

1.	Inleiding.....	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Vraagstelling	4
1.3	Bedrijfszekerheid: Vergelijking met een traditionele nutsaansluiting.....	4
1.4	Cybersecurity en fossielvrije energiecentrales	5
1.5	Aanpak.....	6
2.	Beschikbare fossielvrije technologieën	7
2.1	Technologie: zonne-energie	7
2.2	Technologie: windenergie.....	8
2.3	Technologie: Duurzame bodem- en omgevingswarmte- en koudesystemen	8
2.4	Technologie: waterstof technologieën	9
2.5	Technologie: biomassa- en biofueltechnologieën	9
2.6	Technologie: energieopslag en batterijen.....	9
2.7	Overige technologieën.....	10
2	Fossielvrije energiecentrales	12
3.1	Netaansluiting en blokstroom	12
3.2	Binnenstedelijke concepten voor energiecentrales	12
3.2.1	Zonnepanelen in combinatie met short-duration BESS (Battery Energy Storage Systems) ...	13
3.2.2	Generator/WKK op biogas (inkopen).....	15
3.2.3	Brandstofcel/Aggregaat op groene waterstof (inkopen of zelf opwekken via elektrolyse)	16
3.3	Buitengebied concepten energiecentrales	17
3.3.1	Windturbines	17
3.3.2	Waterstof zelf opwekken.....	17
3.3.3	Flow batterijen	18
3.4	Uitbreidingssystemen voor energiecentrales.....	19
3.5	Ruimtebeslag	21
3	Praktijkervaringen in NL/EU	22
3.3	Succesvolle pilots met 100% fossielvrije microgrids (zonder back-up)	22
3.4	Binnenstedelijk in Nederland	22
3.5	Binnenstedelijk in Europa (buiten NL)	25
4.4	Buitengebied in Nederland	26
4.5	Buitengebied in Europa (buiten NL)	26
5	Whole Life Carbon businesscase	28
5.1	Traditionele oplossingen (diesel/gas)	28
5.2	CAPEX en OPEX batterijen.....	28
5.3	CAPEX en OPEX energieopwekking	29
5.4	Whole Life Carbon	30

5.4.1	Embodied CO2 bij CAPEX	30
5.5	Whole Life Carbon Businesscase.....	31
6	SWOT analyses	34
6.1	SWOT analyse concept zonnepanelen i.c.m. short-duration BESS, binnenstedelijk	34
6.2	Generator/WKK op biogas (inkopen), binnenstedelijk.....	35
6.3	Brandstofcel/WKK op groene waterstof (inkopen of zelf opwekken via elektrolyse), binnenstedelijk	36
6.4	SWOT analyse concept zonnepanelen met windturbines i.c.m. short-duration BESS, buitenstedelijk	36
6.5	Waterstof zelf opwekken.....	37
6.6	Flowbatterijen	38
7	Aanbevelingen 2 casussen	39
7.1	Locatie Amsterdam	39
7.2	Defensie.....	42

Versie

Versie	Datum	Auteur(s)	Beschrijving
V0.1	4 maart 2026		H1, H2, H3, H4 ingevuld
V0.2	20 maart 2026		H5, H6 ingevuld
V0.3	23 maart 2026		H5, H6 ingevuld
V1.0	2 april 2026		H3.0 toegevoegd, H7
V2.0	29 april 2026		Review RVB verwerkt
V3.0	13 mei 2026		H7 aangevuld

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

In meerdere projecten van de RVB en anders ontwikkelaars leidt de netcongestie tot fossiele noodgrepen, terwijl de maatschappelijke opgave juist vraagt om versnelling naar fossielvrij. Zowel binnenstedelijke gebiedsontwikkeling als Defensierterreinen lopen vast door onvoldoende aansluitcapaciteit. Met dit onderzoek wil de RVB onderbouwen dat een fossielvrije variant technisch én economisch haalbaar is.

1.2 Vraagstelling

Het Rijksvastgoedbedrijf (RVB) heeft de opdracht gegund aan Deerns Nederland BV voor een marktverkenning naar een fossielvrije, decentrale energiecentrales. Deze oplossingen moeten zowel tijdelijk (bijv. bouwplaatsen) als permanent (off-grid locaties) toepasbaar zijn, met een focus op betrouwbaarheid, emissievrijheid en herbruikbaarheid. Binnen de portefeuille loopt de RVB tegen een dilemma aan: enerzijds de ambitie om fossielvrij te opereren (in lijn met de doelen voor 2030/2050), anderzijds de praktische noodzaak om bij netcongestie vaak terug te vallen op fossiele back-ups (diesel/gasaggregaten). Dit conflict vraagt om innovatieve, bewezen alternatieven die:

- Betrouwbaar zijn (leveringszekerheid gelijk aan nutsvoorziening, incl. N-2 bedrijfszekerheid);
- Emissievrij functioneren (100% hernieuwbaar, zonder fossiele back-up), hierbij tekenen we aan dat een “autarkisch functioneren” een wens is en geen absolute must;
- Modulair(e) concept(en) voor enerzijds binnenstedelijke en anderzijds buitengebied die schaalbaar en verplaatsbaar zijn (voor tijdelijk én permanent gebruik, incl. verplaatsbaarheid binnen enkele dagen);
- Met de optie om off grid voor het buitengebied (Defensie) te kunnen draaien voor 72 uur met een uitbreiding naar 7 dagen. Anders met stroomaansluiting.
- Kosteneffectief zijn (businesscase over 20 jaar, vergeleken met traditionele oplossingen zoals dieselaggregaten of hybride systemen).

De marktverkenning richt zich op drie hoofdvragen:

- Hoe bedrijfszeker kan een fossielvrije voorziening opereren, zonder fossiele back-up?
- Hoe modulair kan de technologie worden opgebouwd, zodat deze verplaatsbaar en schaalbaar inzetbaar is?
- Wat zijn de kosten en milieubelasting over een levensduur van 20 jaar?

1.3 Bedrijfszekerheid: Vergelijking met een traditionele nutsaansluiting

Nederland beschikt over één van de meest betrouwbare elektriciteitsnetten ter wereld, met een leveringsbetrouwbaarheid van **99,99%**. Desondanks vormt de bedrijfszekerheid van de elektriciteitsvoorziening regelmatig een aandachtspunt bij opdrachtgevers. Daarom maken wij een duidelijke vergelijking met een conventionele netaansluiting.

Vergelijking in bedrijfszekerheid elektriciteitsnutsaansluiting:

- Een traditionele netaansluiting kent doorgaans één kwetsbaar punt: de aansluiting vanuit het openbare net naar het gebouw. Bij uitval van deze aansluiting valt de elektriciteitsvoorziening van het gehele gebouw uit. Dit wordt aangeduid als een Single Point of Failure.

- Modulaire fossielvrije energiecentrales hebben dit risico niet. Doordat het systeem uit meerdere onafhankelijke modules bestaat, is er geen enkel kritiek onderdeel waarvan de gehele elektriciteitslevering afhankelijk is. Bij uitval van één module blijven de overige modules operationeel.
- Een puur modulaire opstelling kan op zichzelf een iets lagere bedrijfszekerheid hebben. Dit wordt echter effectief opgelost door redundantie toe te passen. Met een $2 \times 50\%$ -opstelling neemt de bedrijfszekerheid significant toe. Echter bij uitval is er een afname van de beschikbare capaciteit. Bij behoefte kan dit verder worden uitgebreid naar een volledige N+1-configuratie (3x50%), waarmee de leveringsbetrouwbaarheid van de elektriciteit gelijkwaardig of hoger wordt dan bij een traditionele netaansluiting. Ook is dan geborgd dat bij onderhoud van een onderdeel 100% van de capaciteit beschikbaar blijft.
- Desgewenst kan aanvullend een noodstroomaggregaat of een tijdelijke walaansluiting worden voorzien. Zowel binnen- als buitenstedelijk kan zo'n voorziening permanent of via een vantevoren afgesloten contract met een opstarttijd van een bepaalde tijdsperiode worden gerealiseerd. Dit biedt flexibiliteit zonder afbreuk te doen aan de continuïteit van de elektriciteitsvoorziening.
- Voor **kritische toepassingen** hanteren wij dezelfde hoge standaarden als in datacenters, met een 2(N+1) of TIER 4-achtige configuratie. Dit resulteert in een niveau van bedrijfszekerheid dat vergelijkbaar is met, of hoger ligt dan, dat van een traditionele netaansluiting.

Vergelijking in bedrijfszekerheid warmtenetaansluiting:

- Een warmtenet kan een waardevolle bijdrage leveren bij netcongestie door het efficiënt benutten van restwarmte of collectieve opwekking. Het vormt echter geen echte off-grid oplossing. De warmtevoorziening blijft afhankelijk van een centrale energiecentrale die gevoelig is voor uitval door technische storingen, cyberaanvallen of andere incidenten.
- Hoewel Defensie bij eigen systemen een hoge mate van controle heeft over cybersecurity, geldt dit vaak niet voor externe warmteleveranciers. Energiecentrales en warmtenetten worden internationaal steeds vaker gezien als strategische doelwitten voor cyberaanvallen. Dit verhoogt het risico op langdurige uitval van de warmtevoorziening.
- Om deze reden is een volledig afhankelijk warmtenet niet de meest robuuste keuze wanneer hoge bedrijfszekerheid en onafhankelijkheid prioriteit hebben. In dergelijke gevallen adviseren wij om, naast een eventuele aansluiting op een warmtenet, altijd een decentrale back-upvoorziening op locatie te realiseren. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit modulaire fossielvrije energiecentrales met voldoende redundantie (N+1) of een noodstroomaggregaat.

1.4 Cybersecurity en fossielvrije energiecentrales

In een geopolitiek steeds meer gespannen wereld vormt cybersecurity een van de grootste risico's voor kritische energie-infrastructuur. Volgens recente analyses van onder meer het World Economic Forum en de Information Security Forum zal geopolitiek in 2026 het dominante cybersecurity-risico zijn, waarbij statelijke actoren kritische systemen steeds vaker als strategisch doelwit zien. Energiecentrales, warmtenetten en decentrale opwekkingssystemen behoren tot de meest kwetsbare sectoren, zoals recentelijke incidenten in Polen, Zweden en Oekraïne hebben aangetoond.

Bij de keuze voor energieconcepten voor belangrijke vastgoed speelt dit risico een cruciale rol. Systemen die sterk afhankelijk zijn van externe leveranciers of connected technologieën lopen een verhoogd risico op sabotage, spionage of langdurige uitval door cyberaanvallen. Dit geldt in het bijzonder voor systemen met componenten uit hoog risicolanden. Westerse beschikbaarheid van kritische elektronica, batterijen, zonnepanelen, inverters en andere slimme componenten is matig tot beperkt beschikbaar, met een sterke afhankelijkheid van productie in China (vaak meer dan 80% van de wereldwijde supply chain voor zonnepanelen en batterijen). Dergelijke afhankelijkheden brengen niet alleen supply chain-risico's met zich mee, maar ook potentiële verborgen kwetsbaarheden in

firmware, software en remote access-mogelijkheden. Op voorhand worden technologieën niet gelijk uitgesloten.

Voor een defensie-gerelateerd project wegen wij deze aspecten expliciet mee.

Een volledig decentraal, modulaire energievoorziening biedt in dit kader voordelen op het gebied van controle en onafhankelijkheid. Door te kiezen voor systemen met beperkte externe connectiviteit, eigen cybersecurity-protocollen en waar mogelijk westerse of gecontroleerde componenten, kan de kwetsbaarheid voor externe dreigingen significant worden verminderd. Waar externe aansluitingen (zoals warmtenetten) worden overwogen, adviseren wij altijd een robuuste lokale back-upvoorziening met voldoende redundantie.

1.5 Aanpak

De aanpak om tot de gevraagde inventarisatie van technologieën, praktijkervaring, TCO/business-case, SWOT- analyse en aanbevelingen te komen is gestoeld op een brede inventarisatie op basis van onze actieve marktkennis in projecten in Nederland en Europa en actieve contacten met marktpartijen en kennisinstituten. Dit heeft als voordeel dat we binnen de planning een compleet overzicht kunnen komen met echte marktdata.

2. Beschikbare fossielvrije technologieën

Dit hoofdstuk beschrijft een brede inventarisatie van de beschikbare relevante duurzame technologieën voor betrouwbare, fossielvrije, decentrale energiecentrales als oplossing voor netcongestie.

Daarbij wordt gekeken naar de inzet op binnenstedelijke locaties met beperkte ruimte en beperkingen vanuit de omgeving, en naar buitengebieden waar vaak meer fysieke ruimte beschikbaar is. Ook wordt besproken in hoeverre systemen schaalbaar zijn in capaciteit (500 kW – 1000 kW) en vermogenslevering, en hoe flexibel ze zijn wanneer verplaatsing nodig is.

Zo ontstaat een helder beeld van welke technologieën kunnen worden uitgewerkt tot een fossielvrij energieconcept in het volgende hoofdstuk 3.

2.1 Technologie: zonne-energie

Zonne-energie zet zonlicht via fotonvoltaïsche (PV) panelen om in elektriciteit. De opgewekte gelijkstroom wordt via omvormers omgezet naar wisselstroom voor directe consumptie of teruglevering aan het net. Voor opslag zijn er verschillende batterijen technologieën (worden beschreven in hoofdstuk 3) beschikbaar die elektriciteit tijdelijk kunnen opslaan voor later gebruik. Ook kan zonne-energie via waterstofproductie (elektrolyse) of conversie naar e-fuels voor seizoensopslag worden gebruikt.

Binnen de vermogensrange is zonne-energie zeer goed schaalbaar en technisch gangbaar in Nederland, bijvoorbeeld op daken van utiliteitsgebouwen of als zonnepark. In binnenstedelijke gebieden is toepassing haalbaar mits voldoende dak- of geveloppervlak beschikbaar is; ruimtegebrek kan echter beperkend zijn. De technologie is sterk modulair opgebouwd uit panelen en omvormers, waardoor gefaseerde uitbreiding eenvoudig is. Daarmee is zonne-energie goed toepasbaar als decentrale oplossing.

Naast PV zijn er meerdere andere technologieën op dit gebied. De cursief aangegeven technologieën zien wij als meer kansrijk voor toepassing voor de RVB en Defensie.

- *Zonthermisch met vacuumcollectoren vangt zonnehitte op voor thermische energieproductie (praktisch toepasbaar).*
- *Zonnepanelen met dubbellaags perovskite-silicon tandemcellen bereiken efficiënties boven 34%, in onderzoeks of pilotfase.*
- Quantum dot zonnecellen bieden hoge efficiëntie en zijn opkomend in onderzoek. In onderzoeksfase.
- Geconcentreerde zonne-energie (CSP) focust zonlicht voor hitte en elektriciteitsopwekking met opslag. Niet toepasbaar in Nederland.

2.2 Technologie: windenergie

Windenergie kan zeker in de buitengebieden toegepast worden en levert veel opbrengst op. Binnenstedelijk loopt dit echter snel tegen beperkingen aan waardoor een efficiënte inzet minder kansrijk is. Voorbeelden van binnenstedelijke systemen zijn Pownest of Kitepower.

2.3 Technologie: Duurzame bodem- en omgevingswarmte- en koudesystemen

Hieronder verstaan we technologieën zoals warmte- en koudeopslag in de bodem (WKO), warmtepompen op lucht, aquathermie en geothermie.

Bij diepe **geothermie** wordt warmte uit diepe aardlagen onttrokken via productie- en injectieputten. Deze warmte wordt direct gebruikt voor verwarming of indirect voor elektriciteitsopwekking. Elektriciteit uit geothermie opgewekt kan tijdelijk in batterijen worden opgeslagen, maar in Nederland is geothermie interessanter voor directe warmte vanwege het lagere temperatuurniveau. Diepe geothermie is meer kansrijk in buitengebieden.

Daarnaast kan via bodemwarmte-opslag (**WKO**) warmte en koude worden opgeslagen in aquifers. WKO is zowel binnenstedelijk als in buitengebied goed toepasbaar. Bodemenergie biedt naast lage-temperatuur opslag ook de mogelijkheid om hogere-temperatuur warmte (HT/MT) op te slaan, variërend van circa 40 °C tot 80 °C. Het opslaan van hoogwaardige warmte in de bodem is een relatief nieuwe, maar veelbelovende techniek. Recent is bij de TU Delft een geothermie-installatie opgeleverd in combinatie met HT-warmteopslag. Hierbij wordt overtollige geothermische warmte opgeslagen in de bodem, zodat deze later kan worden ingezet voor piekbelasting of als backup bij warmtevraag.

Deze aanpak kan een belangrijke bijdrage leveren aan off-grid of semi-off-grid energieconcepten, met name in situaties met netcongestie. Door overtollige stroom (bijvoorbeeld uit PV-panelen of blokstroom) op gunstige momenten om te zetten in warmte met een warmtepomp en deze op te slaan in een HT-bodemenergiesysteem, ontstaat een flexibele oplossing. Op momenten van hoge warmtevraag en beperkte stroombeschikbaarheid kan de opgeslagen warmte met hoog rendement worden onttrokken. Zo wordt warmte geleverd met een relatief hoog rendement, terwijl het systeem (deels) onafhankelijk is van het elektriciteitsnet. Deze techniek lijkt met name kansrijk voor grotere projecten met een substantiële en variabele warmtevraag.

Aquathermie is een duurzame en innovatieve techniek om gebouwen te verwarmen en te koelen met thermische energie uit water. Het betreft het onttrekken van warmte of koude uit oppervlaktewater (TEO), afvalwater (TEA) of drinkwater (TED), waarna deze met behulp van warmtepompen wordt opgewaardeerd tot een bruikbare temperatuur voor verwarming of koeling.

Bovenstaande technologieën zijn minder modulair, niet verplaatsbaar dan bovengrondse installaties vanwege de vaste infrastructuur. Wij zien dit als als uitbreidingssystemen van modulaire fossielvrije energiecentrales. Een technologie die wel modulair toegepast kan worden zijn uiteraard warmtepompen op lucht. Naast diepe geothermie voor warmte en WKO zijn er meerdere andere technologieën op dit gebied. Er zijn ook heipalen met warmte/koude-uitwisseling voor seizoensenergie en gesloten bodemcollectoren, maar die zien wij als minder kansrijk en ook niet geschikt voor de gevraagde vermogensrange.

2.4 Technologie: waterstof technologieën

Waterstoftechnologie zet via elektrolyse duurzame elektriciteit om in groene waterstof, die kan worden opgeslagen en later worden gebruikt voor energieproductie via brandstofcellen of verbranding (WKK). Elektrolyser zijn modulair en schaalbaar. Binnenstedelijk ligt een toepassing minder voor de hand gezien de veiligheidsmaatregelen die nodig zijn, voor zowel productie op de locatie als aanleveren van waterstof via tankwagens en de opslag in tanks op de locatie. In buitengebieden is dit meer kansrijk.

Naast de boven beschreven technologie zijn er meerdere andere technologieën op dit gebied. De cursief aangegeven technologieën zien wij als meer kansrijk voor toepassing voor de RVB en Defensie.

- *Battolyser combineert batterijopslag met waterstofproductie voor hybride energieoplossingen.*
- *Groene ammoniakproductie dient als energiedrager voor transport en opslag van hernieuwbare energie. Gezien de giftigheid is dit geen toepassing binnenstedelijk.*
- Next Level Solid Oxide Electrolysis (SOEC) schaalte hoge-temperatuur elektrolyse op voor efficiënte H₂-productie (grootschalig, niet schaalbaar in de gewenste vermogensrange).

2.5 Technologie: biomassa- en biofueltechnologieën

Biomassa-installaties zetten organisch materiaal via verbranding, vergisting of vergassing om in warmte en/of elektriciteit. Installaties van 500–1000 kW zijn technisch gangbaar en goed regelbaar. Binnenstedelijke toepassing is echter beperkt vanwege emissies, geur, logistiek en maatschappelijke acceptatie. Modulariteit is matig; installaties zijn schaalbaar maar vereisen brandstofaanvoer en opslagruimte. In Nederland is toepassing vooral geschikt op bedrijventerreinen of afgelegen locaties.

Een andere technologie is het leveren van biogas via tankwagens naar de locatie. Dat is goed toepasbaar zowel binnenstedelijk als in buitengebieden. Op de locatie wordt kan deze ingezet worden voor generatoren, WKK, brandstofcellen. In de toekomst zal in toenemende mate biogas worden toegevoegd aan het huidige aardgasnet.

Naast de boven beschreven technologie zijn er meerdere andere technologieën op dit gebied. De cursief aangegeven technologieën zien wij als meer kansrijk voor toepassing voor de RVB en Defensie.

- *Biobrandstofcellen in Rotterdam-fabriek produceren synthetische diesel uit hernieuwbare energie.*
- *Vierde generatie biofuels gebruiken synthetische biologie voor hydrocarbonproductie uit biomassa.*
- *Vergisting van afval en mest via anaërobe processen produceert biogas en biomethaan.*
- *Geavanceerde vergassing zet biomassa om in syngas voor elektriciteit, waterstof of brandstoffen.*
- *Pyrolyse converteert biomassa naar bio-olie, biochar en syngas voor veelzijdige toepassingen.*

2.6 Technologie: energieopslag en batterijen

Er bestaan verschillende typen energieopslag die elk geschikt zijn voor specifieke toepassingen in de energietransitie, afhankelijk van het benodigde vermogen (kW), de energieduur (kWh) en de responstijd.

Vliegwielen (flywheel energy storage) zijn goed in situaties met hoog vermogen maar weinig energie: ze leveren extreem snel (milliseconden) grote pieken aan stroom (hoge C-rates, tot 10–20×), met lage verliezen en honderdduizenden cycli, maar de opgeslagen energie is beperkt (vaak seconden tot

minuten). Ideaal voor piekafvlakking, netstabiliteit en toepassingen zoals UPS'en, havens of zware machines.

Batterijen vormen een flexibele middenweg: lithium-ion of sodium-ion batterijen (zoals in BESS – Battery Energy Storage Systems) integreren grootschalige opslag voor netstabiliteit, met goede balans tussen vermogen en duur (minuten tot uren). Ze ondersteunen bijvoorbeeld EV-laden door pieken op te vangen. Voor kortdurende energielevering zijn ze snel en efficiënt; voor langdurige elektriciteitsopslag (uren tot dagen) zijn flowbatterijen (flow batteries) beter geschikt: deze scheiden vermogen en capaciteit (veel energie, lagere kW per unit), met lange levensduur en schaalbare tanks voor grid-scale toepassingen.

Daarnaast speelt opslag van warmte en koude in modulaire systemen een groeiende rol, vooral voor seizoens- of gebouwgebonden energie: denk aan thermische opslag in water, PCM-materialen (phase change materials) of zand, die overvloedige warmte/koude vasthouden voor later gebruik in verwarming, koeling of industriële processen – CO₂-vrij en kosteneffectief op grote schaal.

Naast de boven beschreven technologie zijn er meerdere technologieën op dit gebied. De cursief aangegeven technologieën zien wij als meer kansrijk voor toepassing voor de RVB en Defensie.

- Vliegwielen met QuinteQ's modulaire systemen slaat kinetische energie op voor snelle ontlasting.
- Tanks met perslucht slaan gecompriëerde lucht op voor latere energieopwekking.
- *Zoutbatterijen van AquaBattery gebruiken zoutwater voor veilige, schaalbare opslag.*
- *Flowbatterijen zoals vanadium redox bieden grootschalige opslag met lange duur.*
- IJzer-lucht batterijen voorzien in lange-duur opslag met lage kosten.
- Vaste cel batterijen zonder lithium bieden duurzame alternatieven voor energieopslag.
- Zinc-air batterijen leveren hoge energiedichtheid in studiefase voor opslag.
- Ni-H₂ gas batterijen zorgen voor betrouwbare opslag in opkomende toepassingen.
- Zn-MnO₂ batterijen dienen als kosteneffectieve lithium-alternatieven voor batterijen.
- QuinteQ ontwikkelt sodium-ion batterijen voor goedkope, duurzame opslagoplossingen.
- *Waterbuffer met sprinklertanks slaat water op voor buffering in energiesystemen.*
- *Ijsbuffer gebruikt ijsopslag voor koeling en thermische energiebeheer.*
- Zandbuffers thermisch slaan hitte op in zand voor seizoensopslag.
- Bovengrond thermisch opslaan bewaart warmte bovengronds voor efficiënt gebruik.
- *PCM thermische opslag gebruikt faseveranderingsmaterialen voor hitte/koude buffering.*

2.7 Overige technologieën

Solar Water Splitting

Het gebruik van zonne-energie om water te splitsen is een schone manier om waterstof te produceren, maar de efficiëntie is laag door de beperkte lichtopvang en de trage halfreactie van wateroxidatie. In Nederland is deze technologie minder geschikt vanwege de beperkte directe zoninstraling die hiervoor nodig is. <https://cordis.europa.eu/project/id/101070721>

Kernenergie

Kernenergie is een vorm van elektriciteitsopwekking waarbij via kernsplitsing zware atoomkernen worden gesplitst in een kernreactor, waarbij grote hoeveelheden warmte vrijkomen. Deze warmte wordt gebruikt om water te verhitten tot stoom die een turbine en generator aandrijft. Kerncentrales produceren continu grote hoeveelheden stroom met zeer lage CO₂-uitstoot tijdens bedrijf, waardoor ze

bijdragen aan leveringszekerheid en netstabiliteit. Tegelijkertijd vragen ze hoge investeringskosten, strenge veiligheidsmaatregelen en een langetermijnoplossing voor radioactief afval.

Met betrekking tot de factoren schaalbaarheid binnen- en buitenstedelijke toepasbaarheid en modulariteit is kernenergie in de vorm van **SMR's in de Nederlandse context niet geschikt ivm de maatschappelijke kosten**. Traditionele kerncentrales opereren op een schaal van honderden tot duizenden megawatts, de maatschappelijke kosten kunnen dan verdeeld worden over een grotere capaciteit. Ook vereisen ze ruime veiligheidszones, uitgebreide vergunningstrajecten en zware infrastructuur, waardoor SMR's toepassing niet realistisch is. Binnen Nederland is kernenergie daarom vooral toepasbaar als grootschalige, centrale productiebron en niet als modulaire, decentrale oplossing.

Vanuit het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025 zijn er verkenningen opgesteld voor de strategie voor kleine modulaire kernreactoren in Nederland. Het kabinet ziet kernenergie als noodzakelijke pijler van een schoon, onafhankelijk, betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem. Naast de bouw van grote kerncentrales (doel 3,5–7 GW in 2050) wil Nederland ook kleine modulaire kernreactoren (SMR's) inzetten. Volgens scenario's kan SMR-vermogen tot 14,5 GW in 2050 bijdragen, afhankelijk van kostenontwikkeling. **Nederland richt zich op Nth of a Kind (NOAK) vanuit private investeringen**. Een privaat bedrijf als Allseas (het Nederlandse-Zwitserse offshore-gigant) heeft in juni 2025 een ambitieus vijfjaarsplan gelanceerd om zelf een Small Modular Reactor (SMR) te ontwikkelen voor offshore en onshore.

Water- en oceaanenergie

Water- en oceaanenergie omvat technieken zoals golfenergie en stromingsenergie, waarbij bewegend waterturbines aandrijft om elektriciteit te produceren. Opslagmogelijkheden zijn beperkt; korte termijn kan via batterijen, maar lange termijn is minder praktisch vanwege locatie gebonden productie en beperkte schaal. Getijdenenergie kan via Power-to-Gas theoretisch worden opgeslagen, maar dit vereist extra infrastructuur en is nog experimenteel in Nederland.

In Nederland is het technisch potentieel beperkt tot specifieke kust- en deltaregio's. De schaal van is theoretisch haalbaar, maar sterk locatie gebonden. Binnenstedelijke toepassing is praktisch niet mogelijk vanwege de fysieke afhankelijkheid van waterstromen. Modulariteit verschilt per technologie, maar projecten zijn doorgaans infrastructureel complex. Hierdoor is brede toepassing in Nederland beperkt en geografisch specifiek. Naast de boven beschreven technologie zijn er meerdere andere technologieën. De cursief aangegeven technologieën zien wij als meer kansrijk voor toepassing voor de RVB en Defensie.

- Akoestische warmtepomp gebruikt geluidsgolven voor efficiënte verwarming en koeling.
- ORC zet lage-temperatuur hitte om in elektriciteit via organische Rankine-cyclus.
- Superkritische CO₂-cycli verbeteren energieconversie-efficiëntie in power plants.
- Osmotische drukken genereren energie uit zout-zoetwater gradiënten voor duurzame opwekking.
- Direct Air Capture met carbon utilization vangt CO₂ voor gebruik in fuels en materialen.

2 Fossielvrije energiecentrales

In dit hoofdstuk worden concrete energiecentrales uitgewerkt op basis van de eerder beschreven duurzame, fossielvrije technologieën. De nadruk ligt op het vertalen van technische mogelijkheden naar praktische en haalbare oplossingen voor verschillende situaties. Per energiecentrale wordt gekeken naar de combinatie van technieken, de ruimtelijke inpassing, de schaalbaarheid in capaciteit en vermogenslevering en de mate van flexibiliteit of verplaatsbaarheid. Zo wordt inzichtelijk hoe de afzonderlijke technologieën samen kunnen komen in realistische en toepasbare energieoplossingen.

Hierbij maken we onderscheid in fossielvrije concepten voor binnenstedelijke toepassing met beperkte ruimte, concepten voor in het buitengebied en uitbreidingssystemen.

3.1 Netaansluiting en blokstroom

Voordat we dieper ingaan op de technische concepten en oplossingen, is het belangrijk om de mogelijkheden voor aansluiting op het openbaar elektriciteitsnet in beeld te hebben. De beschikbare transportcapaciteit bepaalt namelijk in grote mate welke mogelijkheden er zijn om een gebouw of terrein energieneutraal en toekomstbestendig te maken.

Bij geen netaansluiting of mogelijkheid voor uitbreiding is het noodzakelijk om een volledige, zelfstandige energiecentrale te realiseren. Dit betekent dat het gehele energieverbruik (inclusief pieken) moet worden gedekt door een combinatie van zonnepanelen, batterijopslag en eventueel een back-upgenerator. Dit is technisch mogelijk, maar vaak kostbaar en complex.

Bij een kleinere aansluiting, zoals een 3x80A aansluiting, zijn er slimmere en meer haalbare alternatieven. Een veelgebruikte oplossing is het 's nachts opladen van een batterijopslagsysteem, zodat deze overdag het gebouw kan voorzien van stroom. Dit werkt echter alleen wanneer er in de nachtelijke uren voldoende capaciteit op het net beschikbaar is.

Om dit efficiënt en schaalbaar te maken, bieden netbeheerders met als eerste Enexis tegenwoordig **Blokstroom** aan. Dit is een flexibel transportcontract waarbij extra afnamecapaciteit beschikbaar is in het vaste nachtblok van 00:00 tot 06:00 uur. Met Blokstroom kan een batterijsysteem (bijvoorbeeld een 500 kW LFP-installatie) 's nachts tegen lagere kosten en met hoger vermogen worden geladen, om vervolgens overdag te worden ingezet voor eigen verbruik, peak shaving of het ontlasten van het net. Netbeheerders introduceren Blokstroom juist om netcongestie tegen te gaan: overdag wordt de druk op het net verminderd, terwijl 's nachts de beschikbare capaciteit beter wordt benut. Het verschuiven van verbruik naar de daluren zorgt voor een evenwichtiger netbelasting en creëert ruimte voor de verdere groei van zonne- en windenergie. Blokstroom is een puur transportproduct van de netbeheerder. Het regelt alleen het tijdstip en de hoeveelheid vermogen die mag worden afgenomen. Het is daarom een uitstekende eerste stap bij het zoeken naar oplossingen voor netcongestie.

3.2 Binnenstedelijke concepten voor energiecentrales

De volgende energiecentrales werken we in dit hoofdstuk verder uit:

1. Zonnepanelen in combinatie met short-duration BESS (Battery Energy Storage Systems). In de praktijk nu het meest gangbaar
2. Generator/WKK op biogas (inkopen)
3. Brandstofcel (generator) op groene waterstof (inkopen)

3.2.1 Zonnepanelen in combinatie met short-duration BESS (Battery Energy Storage Systems)

Beschrijving van de technologie

Dit concept beschrijft een volledig fossielvrij energiesysteem waarbij elektriciteit lokaal wordt opgewekt met zonnepanelen en tijdelijk wordt opgeslagen in een batterij. De opgewekte gelijkstroom wordt via een omvormer omgezet naar wisselstroom voor direct gebruik of opslag, terwijl overtollige energie in de batterij wordt bewaard als buffer tussen opwek en verbruik.

Schaalbaarheid in capaciteit en vermogenslevering (500 kW tot 1000 kW)

Het systeem is modulair schaalbaar van 500 kW tot 1000 kW en daarboven, waarbij de capaciteit wordt bepaald door het aantal zonnepanelen en de grootte van de batterij. Door meerdere omvormers en batterijmodules parallel te schakelen, kan zowel continu- als piekvermogen flexibel worden aangepast. Hierdoor is dit concept flexibel en schaalbaar.

Toepasbaarheid in binnenstedelijke locaties met beperkte ruimte

In binnenstedelijke gebieden met beperkte ruimte ligt de nadruk op dakgebonden PV-installaties en compacte batterijcontainers of inpandige batterijopstellingen.

Toepasbaarheid in buitengebieden

In buitengebieden biedt het concept extra flexibiliteit doordat zowel dak- als veldopstellingen van zonnepanelen mogelijk zijn. De ruimtelijke beschikbaarheid maakt grotere PV-capaciteiten haalbaar, evenals ruimere batterijopstellingen of containeroplossingen. Hierdoor kan een hogere mate van energieautonomie worden gerealiseerd.

Losmaakbaarheid en modulariteit

Het energiesysteem is opgebouwd uit afzonderlijke componenten die modulair zijn gekoppeld. Dit betekent dat onderdelen afzonderlijk vervangbaar, uitbreidbaar of verplaatsbaar zijn. Batterijcontainers kunnen prefab worden geleverd en bij capaciteitsuitbreiding eenvoudig worden bijgeplaatst.

Leveranciers

Voor zonnepanelen en omvormers zijn internationale leveranciers actief zoals Trina Solar, SMA Solar Technology, Solarwatt en SoliTek. Batterijopslagsystemen worden onder andere geleverd door Koninklijke van Twist (Solid State Zoutbatterij), Iwell (LFP batterij + EMS).

Barrières

De beschikbaarheid van grondstoffen en productiecapaciteit kan de inzet van fossielvrije technologieën beperken. Productie en inkoop binnen Europa maakt het makkelijker om minder afhankelijk te zijn van buitenlandse leveranciers en zorgt voor meer zekerheid in de levering. Daarnaast vormen de investeringskosten een belangrijke factor, zowel voor batterijen in ontwikkeling, al worden deze effecten deels verzacht door dalende technologieprijzen en subsidies.

Li-ion batterijen

De lithium-ion batterij is wereldwijd de meest toegepaste technologie voor energieopslag en biedt in een fossielvrij zonne-energiesysteem een compacte en efficiënte oplossing om opgewekte energie tijdelijk op te slaan en flexibel beschikbaar te maken. Dankzij de hoge energiedichtheid en snelle responstijd is deze batterij bijzonder geschikt voor toepassingen met beperkte ruimte of waar hoge vermogens snel geleverd moeten worden. Hoewel lithium-ion batterijen aanvullende veiligheids- en beheersystemen vereisen, zoals een batterijmanagementsysteem en thermische controle, biedt de technologie een hoge efficiëntie, brede beschikbaarheid en uitstekende prestaties bij dagelijkse opslag en piekbelasting. Hierdoor vormt zij in veel projecten de voorkeursoplossing.

Solid State Zoutbatterijen

De solid state zoutbatterij is een innovatieve en veilige technologie voor energieopslag en biedt in een fossielvrij zonne-energiesysteem een stabiele oplossing om opgewekte energie tijdelijk op te slaan en flexibel beschikbaar te maken. Doordat gebruik wordt gemaakt van een vaste elektrolyt op basis van zout, is het systeem brandveilig en minder gevoelig voor thermische risico's, waardoor uitgebreide koelings- en beveiligingssystemen beperkt nodig zijn. Hoewel de energiedichtheid doorgaans lager is dan bij lithium-ion, kenmerkt de technologie zich door een lange levensduur, betrouwbare prestaties en het gebruik van overvloedige, minder schaarse grondstoffen. Een tweetal leveranciers zijn hieronder weergegeven:

Aspect	Fortona (NaNiCl ₂ / ZEBRA)	Koninklijke Van Twist (Saltion)
Technologie	Solid-state natrium-nikkelchloride	Solid-state zoutbatterij (BESS)
Opslagduur	Middel (uren–dagen, dagelijkse cycli)	Middel–lang (uren–dagen)
Schaal	Thuis/MKB/microgrids	Microgrids/bedrijven/noodstroom
Materialen	Natrium, nikkel, keramiek (vast)	Zout-based solid electrolyte
Veiligheid	Extreem hoog (geen vloeistof/brand)	Extreem hoog (solid-state)
Temperatuur	Hoog (~300°C intern, maar geïsoleerd)	Kamertemp of laag
Kosten	Middel (hoger initieel dan Li-ion, maar lage TCO)	Middel
Status	Commercieel (thuis/MKB)	Commercieel
Primair doel	Veilige thuisopslag + PV-integratie	Veilige nood-/piekopslag

3.2.2 Generator/WKK op biogas (inkopen)

Beschrijving van de technologie

Dit fossielvrije energieconcept voedt een generator of WKK met biogas die elektriciteit levert aan de locatie wanneer extra capaciteit nodig is.

Schaalbaarheid in capaciteit en vermogenslevering (500 kW – 1000 kW range)

Het systeem is modulair schaalbaar en kan worden afgestemd op een vermogen van 500 kW tot 1000 kW of meer.

Toepasbaarheid in binnenstedelijke locaties met beperkte ruimte

Binnenstedelijke toepassingen zijn mogelijk mits rekening wordt gehouden met ruimte voor generator. Compacte biogasgeneratoren of WKK kunnen worden ingezet in bestaande technische ruimten of geluidgedempte containeropstellingen. Het systeem kan bijdragen aan lokale energielevering, piekafvlakking en het verminderen van **netbelasting**, **stikstofuitstoot**, mits geluids- en veiligheidsnormen worden gewaarborgd.

Toepasbaarheid in buitengebieden

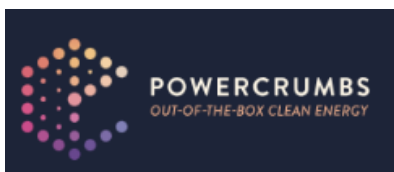
In buitengebieden biedt het systeem grotere flexibiliteit voor veldopstellingen van een generator of WKK evt. zelfs aangevuld met een eigen biomassasysteem (afval van Defensiereterrain). Het systeem kan dienen als energiehub voor meerdere gebouwen of kleine gemeenschappen, waarbij hernieuwbare opwek en stuurbare productie optimaal worden gecombineerd.

Losmaakbaarheid en modulariteit

Het concept is modulair opgebouwd, afzonderlijk vervangbaar, uitbreidbaar of verplaatsbaar. Batterijcontainers en generatoren kunnen prefab worden geleverd en eenvoudig worden geïntegreerd, waardoor onderhoud, vervanging en opschaling mogelijk zijn zonder het hele systeem te ontmantelen.

Leveranciers

Biogasgeneratoren en WKK's kunnen worden geleverd door onder andere Powercrumbs (mobiel biogas uit reststromen rioolslib, mest en afvalstromen op meer dan 250 locaties in Nederland) en Bredenoord. Biogas worden geleverd door Essent, Vattenval en Eneco. Syngas kan uit pyrolyse worden geleverd door PyroOne.



Barrières

Belangrijke barrières zijn de exploitatiekosten voor biogas inkoop.

3.2.3 Brandstofcel/Aggregaat op groene waterstof (inkopen of zelf opwekken via elektrolyse)

Beschrijving van de technologie

Dit fossielvrije energieconcept voedt een brandstofcel of aggregaat met waterstofgas die elektriciteit levert wanneer extra capaciteit nodig is.

Schaalbaarheid in capaciteit en vermogenslevering (500 kW – 1000 kW range)

Het systeem is modulair schaalbaar en kan worden afgestemd op een vermogen van 500 kW tot 1000 kW of meer.

Toepasbaarheid in binnenstedelijke locaties met beperkte ruimte

Binnenstedelijke toepassingen zijn beperkt mogelijk i.v.m. waterstofopslag en veiligheidsvoorzieningen.

Toepasbaarheid in buitengebieden

In buitengebieden biedt het systeem grotere flexibiliteit voor veldopstellingen van een generator of brandstofcel. Het systeem kan dienen als energiehub voor meerdere gebouwen of kleine gemeenschappen, waarbij hernieuwbare opwek en stuurbare productie optimaal worden gecombineerd.

Losmaakbaarheid en modulariteit

Het concept is modulair opgebouwd, afzonderlijk vervangbaar, uitbreidbaar of verplaatsbaar. Generatoren kunnen prefab worden geleverd en eenvoudig worden geïntegreerd, waardoor onderhoud, vervanging en opschaling mogelijk zijn zonder het hele systeem te ontmantelen.

Leveranciers

Waterstofaggregaten worden geleverd door onder Genpower en Hyerpower. WKK's op waterstof kan verder geleverd worden door Centrica Business Solutions.



Barrières

Belangrijke barrières zijn de exploitatiekosten voor waterstof. Logistiek en veiligheidsvoorzieningen maken het duur.

3.3 Buitengebied concepten energiecentrales

De beschreven concepten voor binnenstedelijke ontwikkeling zijn uiteraard ook toepasbaar voor in het buitengebied.

1. Zonnepanelen in combinatie met short-duration BESS (Battery Energy Storage Systems). In de praktijk nu het meest gangbaar
2. Generator/WKK op biogas (inkopen)
3. Brandstofcel (generator) op groene waterstof (inkopen)

Aangezien er meer ruimte beschikbaar is en minder beperkingen voor emissies en geluid zijn er daarnaast nog extra mogelijkheden realistisch voor buitengebieden. We denken dan aan de volgende concepten:

1. Windturbines
2. Zelf waterstof opwekken
3. Flow batterijen

Voor de buitengebieden (Defensie) is daarbij een gevraagde optie om off grid te kunnen draaien voor 72 uur met een uitbreiding naar 7 dagen. Anders met stroomaansluiting.

3.3.1 Windturbines

Het toevoegen van windturbines combineert zonne-energie en windenergie om een stabiel en gelijkmatiger elektriciteitsprofiel te realiseren. Dit is voor buitengebieden zeker een interessante optie. Voor defensieterrainen vergt de toepassing van windturbines speciale aandacht i.v.m. aanvliegroutes en voorkomen belemmeringen. Voor windturbines kunnen kleine en middelgrote systemen van o.a. Vestas of Siemens Gamesa worden ingezet.

3.3.2 Waterstof zelf opwekken

Zelf waterstof opwekken op de schaal van richting 1000 kW (1 MW) is geen realistische oplossing voor de meeste bedrijven of semi-industriële toepassingen, vooral vanwege het extreem lage round-trip rendement van slechts 30-50% (bij het omzetten naar waterstof en weer terug naar stroom of warmte wordt meer dan de helft energie verloren).

De initiële investeringskosten liggen zeer hoog – voor een 1 MW elektrolyser-systeem reken je al snel op €1,5 tot €4 miljoen (of meer) geïnstalleerd, inclusief balans van plant, opslag, compressie en veiligheidssystemen, terwijl recente Europese schattingen voor grotere referentieprojecten (100-200 MW) uitkomen op €2.000-€3.000+ per kW en kleine schalen nog duurder zijn per eenheid. Daarnaast zijn opslag en veiligheid complex en kostbaar: waterstof is ontvlambaar en explosief, vereist speciale hoge-druktanks of caverns, ATEX-zones, uitgebreide vergunningen (PGS15, omgevingsvergunning), keuringen en extra verzekeringspremies, met hoge risico's op vertraging of afkeuring. Zonder enorme structurele overschotten aan goedkope groene stroom (bijv. >5-10 GWh/jaar), forse subsidies (zoals SDE++ of OWE) en een directe afnemer voor de geproduceerde H₂ blijft de business case in 2026 zwak, en is het vaak efficiënter om direct elektriciteit te gebruiken, te salderen of batterijen in te zetten in plaats van deze omslachtige, dure en energieverspillende omweg.

Bij eigen productie van waterstof met een elektrolyser kan de vrijkomende restwarmte (ongeveer 15% van de ingevoerde elektriciteit, bij 50-80°C) prima zelf worden benutten, bijvoorbeeld door proceswater voor te verwarmen, ruimteverwarming of tapwater in je eigen pand te verzorgen via een warmtewisselaar. Dit verhoogt het totale systeemefficiëntie aanzienlijk (tot wel 90% inclusief warmtehergebruik) en bespaart energie, omdat de warmte anders via koeling verloren gaat.

3.3.3 Flow batterijen

Dit concept beschrijft een volledig fossielvrij energiesysteem waarbij elektriciteit lokaal wordt opgewekt met zonnepanelen en wordt opgeslagen in een batterij voor middellange opslag (24 tot 100 uur). De opgewekte gelijkstroom wordt via een omvormer omgezet naar wisselstroom voor direct gebruik of opslag, terwijl overtollige energie in de batterij wordt bewaard als buffer tussen opwek en verbruik.

Een zout- of ijzerbatterij is een energieopslagsysteem dat natrium of zoutwater of ijzer/lucht/waterstof als actief medium gebruikt en binnen een fossielvrij zonne-energiesysteem functioneert als veilige en duurzame buffer voor overdag opgewekte elektriciteit. Doordat het systeem geen lithium of kobalt bevat en niet brandbaar is, biedt het een hoge veiligheid en lage milieubelasting. Hoewel de energiedichtheid lager is dan bij lithium-ion batterijen en er meer ruimte nodig is voor dezelfde capaciteit, is de batterij goed bestand tegen diepe ontlading en heeft zij een stabiele levensduur bij dagelijkse cycli. Dit maakt de technologie vooral geschikt voor toepassingen waar voldoende ruimte beschikbaar is. Het systeem is niet brandbaar en explosieveilig (energiezekerheid). Na einde levensduur alleen zout water als restproduct en recyclebare kunststof. De zoutbatterij is uitstekende inzetbaar voor een constante basislast en 24 uren bedrijf.

Schaalbaarheid in capaciteit en vermogenslevering (500 kW tot 1000 kW)

Het systeem is modulaair schaalbaar van 500 kW tot 1000 kW en daarboven, waarbij de capaciteit wordt bepaald door het aantal zonnepanelen en de grootte van de batterij. Het concept is primair bedoeld voor opslag van energie (kWh) en minder kW.

Toepasbaarheid in binnenstedelijke locaties met beperkte ruimte

Minder geschikt voor binnenstedelijke locaties ivm beperkte ruimte en de grotere volumes.

Toepasbaarheid in buitengebieden

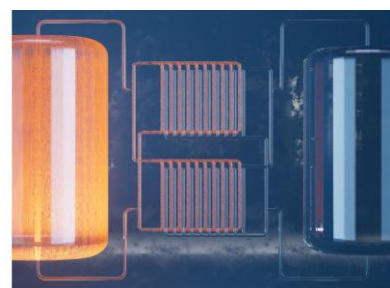
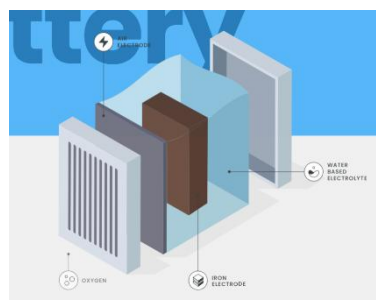
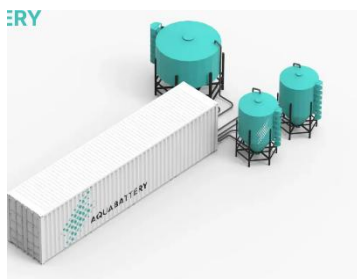
In buitengebieden zeer goed toepasbaar ivm ruimtebeslag. Daarnaast is het systeem niet brandbaar en explosieveilig (energiezekerheid).

Losmaakbaarheid en modulariteit

Het energiesysteem is opgebouwd uit afzonderlijke componenten die modulaair zijn gekoppeld. Dit betekent dat onderdelen afzonderlijk vervangbaar, uitbreidbaar of verplaatsbaar zijn. Primair wordt het systeem als stationaire installatie uitgevoerd.

Leveranciers

In Nederland Aquabattery, ORE www.oreenergy.com, Elestor <https://elestor.com/nl/>



Barrières

De beschikbaarheid van de membraamtechnonolgie is uitdagend. Nu ook in pilotfase en efficiencies behalen nog niet het beoogde rendement. In praktijk nu lager dan 40%. Target is 70% efficiency.

+ Windturbines

Het toevoegen van windturbines combineert zonne-energie en windenergie om een stabiel en gelijkmatiger elektriciteitsprofiel te realiseren. Dit is voor buitengebieden zeker een interessante optie. Voor windturbines kunnen kleine en middelgrote systemen van Vestas of Siemens Gamesa worden ingezet

3.4 Uitbreidingssystemen voor energiecentrales

Deze energiecentrales zijn uit te breiden met onderstaande systemen.

a. Warmte- en koudeopslag-systeem (WKO, waterbuffer, ijsbuffer etc) – piek elektriciteit winter dempen

Door warmte/koude op te slaan in de bodem of buffervaten is met lagere vermogens en efficiënter via warmtepompen energie te leveren naar gebouwen. Dit kan juist helpen in de periode van weinig wind/zon om met lagere vermogens deze periode te overbruggen en een hoger aandeel fossielvrij te verkrijgen.

Let op: een WKO is geen modulaire en verplaatsbare optie. Een water- en of ijsbuffer wel.

b. Warmtenet

Een warmtenet biedt een voordeel in het energiesysteem: het vermindert de elektriciteitsvraag voor verwarming, waardoor netcongestie – vooral de winterpiek – fors afneemt. Dit ontlast het net significant in de winter, stelt dure verzwaringen uit of voorkomt ze, en maakt decentrale fossielvrije elektriciteitsopwekking schaalbaar en betaalbaar, zoals blijkt uit onderzoeken van CE Delft, Netbeheer Nederland en PBL.

c. Koelmachine

Een koelmachine biedt een bijzonder voordeel in het energiesysteem door de koelingsvraag in de zomer grotendeels te koppelen aan zonnepanelen, waardoor het zelfverbruik van zonne-energie sterk stijgt en netcongestie op zonnige dagen juist wordt verminderd in plaats van verergerd. Met een efficiëntie (SEER/SCOP) van vaak 4-6 haalt het systeem 3-5 kWh koeling per kWh elektriciteit uit de buitenlucht, en omdat koeling vooral plaatsvindt op warme, zonnige dagen – precies wanneer zonnepanelen hun piekproductie leveren – kan de koeling grotendeels draaien op direct eigen opgewekte stroom, zonder het net te belasten of zelfs overtollige PV-invoeding te verminderen door curtailment te voorkomen. Dit verhoogt het zelfverbruik significant (tot 70-90% in de zomer), verlaagt de energierekening en ontlast het lokale net tijdens zomerpieken, waar traditionele koeling anders extra import zou eisen. In Nederland, waar gridcongestie door overproductie van zonne-energie in de zomer een groeiend probleem is (zoals blijkt uit rapporten van Netbeheer Nederland en praktijkervaringen met stijgende airco-installaties), fungeert de koelmachine als slimme, decentrale schakel: hij benut gratis omgevingsenergie én overschot-PV efficiënt voor koeling (en bijverwarming in de winter), zonder de complexiteit van restwarmte-infrastructuur of grote buffers, en draagt zo bij aan een flexibeler, minder congestie-gevoelig elektriciteitsnet.

d. V2G – Vehicle to Grid met laadpalen (bi-directioneel)

Vehicle-to-Grid (V2G) met bidirectionele laadpalen vormt een krachtige uitbreiding voor fossielvrije energiecentrales die draaien op zonnepanelen en Li-ion batterijen. Door elektrische voertuigen niet alleen op te laden, maar ook als flexibele mobiele batterijen te benutten, kan overtollige zonne-energie overdag worden opgeslagen in de accu's van aangesloten EV's (bijvoorbeeld thuis, op kantoor of bij laadpleinen). 's Avonds of bij piekverbruik leveren deze voertuigen dan weer stroom terug naar het net of het lokale systeem, waardoor de Li-ion thuis- of bedrijfsbatterijen langer meegaan, pieken beter worden opgevangen en de afhankelijkheid van het overbelaste net afneemt. Dit creëert een virtuele, gedistribueerde energieopslag die schaalbaar is met het aantal EV's, de zelfvoorzieningsgraad verhoogt, netcongestie vermindert en de totale kosten van het systeem drukt – allemaal terwijl de energie 100% fossielvrij blijft en de transitie naar duurzame mobiliteit en elektriciteit naadloos samengaan. In een binnenstedelijke context is dit zeker toepasbaar. In buitengebieden met operationele voertuigen is de toepassing minder waarschijnlijk.

e. EMS – Energie management Systeem (meerdere gebouwen/flexibiliteit in scenario's)

Energie Management Systemen (EMS) vormen een krachtige uitbreiding voor fossielvrije energiecentrales met zonnepanelen en Li-ion batterijen, doordat ze de gehele energiehuishouding intelligent en real-time aansturen.

Een goed EMS monitort continu de opwek van zonne-energie, de laadstatus van de batterijen, het actuele verbruik, weersvoorspellingen, dynamische energieprijzen en netcongestie, en optimaliseert daarop automatisch het laden en ontladen van de Li-ion batterijen. Het maximaliseert eigenverbruik, voorkomt onnodige teruglevering tegen lage of negatieve prijzen, benut blokstroom-nachten voor goedkoop laden, schakelt bij pieken slim tussen batterijontlading en netafname, en kan zelfs meerdere gebouwen, laadpalen of assets over verschillende locaties coördineren voor collectieve flexibiliteit.

Hierdoor stijgt de zelfvoorzieningsgraad aanzienlijk, dalen de energiekosten en netbelasting, wordt de levensduur van de batterijen verlengd door slimmere cycli, en wordt het hele systeem robuuster en toekomstbestendig – allemaal terwijl de energie 100% fossielvrij blijft en de installatie rendabeler wordt in een tijd van netcongestie en variabele prijzen.

Het Energy Management System (EMS) van een batterijopslagsysteem fungeert als centrale aansturing en regelsysteem. Dit batterij-EMS communiceert via standaardprotocollen met het gebouw-EMS (BEMS). Door real-time gegevens uit te wisselen over zonneproductie, actueel verbruik, batterijstatus en capaciteitstarieven, kunnen beide systemen naadloos samenwerken.

3.5 Ruimtebeslag

Technologie	Vermogen	Ruimtebeslag (m ²)	Opmerkingen / Vorm
LFP-batterij (LiFePO ₄)	500 kW	20 – 35 m²	Buitenopstelling, standaard 20-ft container (meest compact)
Flowbatterij (Aquabattery)	500 kW	150 – 250 m²	Buitenopstelling, power-container + grote elektrolyttanks (meestal 2–4 containers)
Solid State Zoutbatterij (Fortona)	500 kW	30 – 40 m²	Evt. binnenopstelling
Biogasgenerator (CHP / gasmotor)	500 kWe	70 – 120 m²	Generator kan evt. Binnen, overig buiten. Container + gasreiniging, demper en biogasvoorbehandeling + opslag + laden en lossen
HVO Diesel Generator	500 kWe	60 – 90 m²	Evt. Binnenopstelling. Container + brandstoftank(en) + opslag + laden en lossen
Zonnepanelen (grondopstelling)	500 kWp	4.000 – 7.000 m²	Buiten, 0,4 – 0,7 hectare inclusief rijafstand en helling
Brandstofcel + H₂-tanks (PEM of SOFC)	500 kWe	100 – 250 m²	Brandstofcel kan evt. Binnen, overig buiten. Brandstofcel zelf compact, maar H ₂ -opslag (tanks of trailers) bepaalt het grootste deel

Belangrijke opmerkingen:

- Ruimte/wegen t.b.v. laden/lossen zijn NIET inbegrepen.
- Ruimte voor redundantie zijn NIET inbegrepen
- LFP blijft een van de meest compacte opties (zoals we eerder bespraken bij de 20-ft container).
- Flowbatterij en H₂-brandstofcel hebben een veel groter ruimtebeslag doordat de opslag (elektrolyt of waterstof) relatief volumineus is.
- Zonnepanelen nemen veruit de meeste grond in beslag – ideaal als je veel ruimte hebt, maar niet geschikt voor kleine terreinen.
- Biogas- en HVO-diesel zijn redelijk compact, maar vereisen extra ruimte voor brandstofopslag en geluid-/emissiebeheersing.
- Alle waarden zijn praktische geïnstalleerde footprint (dus niet alleen de behuizing zelf). Bij gescheiden compartimenten, liquid cooling of extra brandbeveiliging neemt het ruimtebeslag eerder toe.

3 Praktijkervaringen in NL/EU

3.3 Succesvolle pilots met 100% fossielvrije microgrids (zonder back-up)

Er is een inventarisatie gemaakt voor projecten in Nederland en in Europa. Deze projecten hebben echter in veel gevallen nog een fossiele back-up aansluiting nodig, meestal via het grid.

3.4 Binnenstedelijk in Nederland

GENIUS Proeftuin (zeecontainer-batterij pilot) Locatie: TU/e-campus, Eindhoven (binnenstedelijk/universitair gebied, gebouw Disruptor aan De Rondon)

Ervaringen: De betrouwbaarheid van dit Li-ion batterijsysteem blijkt uitstekend in de praktijk, met een uptime van meer dan 98 procent en succesvolle afhandeling van hoge cycli tijdens tests op de campus. Het onderhoud blijft laag dankzij het modulaire container-ontwerp en geavanceerde remote monitoring, waardoor interventies zeldzaam zijn en efficiënt verlopen. De kosten liggen rond de 0,10 tot 0,15 euro per kWh, mede efficiënt gehouden door research-subsidies en inkomsten uit grid-balancing diensten.

Barrières: Technisch vormt de schaalbaarheid naar volledig commerciële toepassingen nog een uitdaging, omdat de setup sterk research-gericht is. Juridisch spelen campus-specifieke regelgeving en interne goedkeuringsprocedures een rol. Markterughoudendheid komt vooral voort uit de pilot-fase, met beperkt investeerdersvertrouwen zolang de commerciële businesscase niet breed bewezen is.

Fossielvrij: 100% fossielvrij – het systeem gebruikt Li-ion opslag gekoppeld aan lokale hernieuwbare bronnen (zoals zonne op campus) en grid-balancing zonder fossiele generatoren; alle energie is elektrisch en hernieuwbaar in operatie.

Volledig autarkisch: Nee – het is expliciet grid-connected (aangesloten op het publieke net), met energie uitwisseling met het net voor balancing, export van surplus en import bij tekort; het doel is netcongestie op de campus en stad te verminderen, niet volledig onafhankelijk te zijn.

LIFE Project ArenA batterij Locatie: Amsterdam Zuidoost (binnenstedelijk, rond Johan Cruijff ArenA en wijk)

Ervaringen: De betrouwbaarheid is hoog door collectief gebruik van bestaande batterijcapaciteit en slimme data, met significante piek-reductie en uptime >97 procent in stedelijke tests. Het onderhoud is laag dankzij gedeelde resources. De kosten zijn efficiënt door collectieve aanpak en besparingen op netverzwaring.

Barrières: Technisch integratie gedeelde capaciteit en data-platforms. Juridisch samenwerkingsovereenkomsten en privacy. Markterughoudendheid door complexiteit partnerships.

Fossielvrij: 100% fossielvrij – optimalisatie van batterijopslag (ArenA + wijk) op hernieuwbare input, puur elektrisch zonder fossiele elementen.

Volledig autarkisch: Nee – het is grid-connected (lokale grid in Amsterdam Zuidoost), met focus op collectieve optimalisatie en piek-reductie via ArenA-batterij (3 MW/2.8 MWh); energie uitwisseling met het net voor stabiliteit en backup.

Aquabattery Pilot (zoutwater/flow batterij LDES) Locatie: Deltares-campus, Delft (binnenstedelijk, container op campus)

Ervaringen: De betrouwbaarheid is matig tot hoog, met een stabiele werking en een uptime van ongeveer 95 procent, hoewel het systeem nog enigszins weersafhankelijk is door de focus op lange duur opslag. Het onderhoud is laag dankzij het eenvoudige ontwerp met zout en water als basis, zonder complexe corrosieproblemen. De kosten bedragen in deze pilotfase ongeveer 0,10 euro per kWh, met potentieel voor verdere daling bij opschaling.

Barrières: Technisch is opschaling naar volledige commerciële inzet nog een punt van aandacht, met name rond efficiëntie bij variabele belasting. Juridisch spelen waterrechten, milieu-certificering en locatie-specifieke vergunningen een rol. Markterughoudendheid ontstaat door de pre-commerciële status en relatief lage marktpenetratie tot nu toe.

Fossielvrij: 100% fossielvrij – zoutwater/flow batterij is puur elektrisch en chemisch gebaseerd op hernieuwbare input (geen fossiele brandstoffen); het richt zich op lange duur opslag van hernieuwbare energie.

Volledig autarkisch: Nee – het is grid-connected (achter de meter of grid-toepassing), met validatie van business cases voor zowel grid- als behind-the-meter opslag; het slaat surplus zonne-energie op van de campus (5.725 panelen) en werkt met partners voor net-integratie.

Huis voor de Provincie Utrecht, toepassing WKO, zonnepanelen en zoutbatterij (designed by Deerns)

Ervaringen: De zoutbatterij van Fortona die gepland is om binnen in het Huis voor de Provincie Utrecht te worden geïnstalleerd, biedt naar verwachting een hoge betrouwbaarheid door het solide-state ontwerp zonder vloeistoffen, met een verwachte uptime van meer dan 98 procent en minimale risico's op lekkage of brand. Het onderhoud zal zeer laag zijn omdat er geen bewegende delen zijn en het systeem onderhoudsarm functioneert, met alleen periodieke inspecties en remote monitoring. De kosten voor opslag liggen in vergelijkbare projecten rond de 0,08 tot 0,12 euro per kWh (dalend naarmate de technologie opschaalt), en in dit geval worden ze verder gunstig beïnvloed door de lange levensduur (>15-20 jaar) en hoge recyclebaarheid van de zoutbatterij. Samen met de 2.320 zonnepanelen (ongeveer 1 miljoen kWh/jaar) en slimme klimaatsystemen zal de batterij bijdragen aan een stabiele piekafvang en zelfverbruik, met een verwachte jaarlijkse energierekeningbesparing van circa €750.000.

Barrières: Technisch vraagt het temperatuurmanagement van de zoutbatterij nog aandacht om optimale prestaties te garanderen in het binnenklimaat van een gerenoveerd kantoorgebouw. Juridisch zijn de veiligheids- en certificeringsvereisten voor nieuwe batterijtechnologie in een publiek gebouw een aandachtspunt, hoewel zoutbatterijen juist minder strenge brandveiligheidseisen hebben dan lithiumsystemen. Markterughoudendheid kan ontstaan door de relatief nieuwe technologie (Fortona is nog in opschalingsfase) en de hogere initiële adoptiekosten vergeleken met conventionele lithium-ion batterijen, hoewel de recyclebaarheid en veiligheid dit deels compenseren.

Fossielvrij: 100% fossielvrij – de zoutbatterij van Fortona slaat uitsluitend hernieuwbare energie op (voornamelijk van de eigen zonnepanelen en carport), zonder enige fossiele componenten in de opslag of conversie. Het hele energiesysteem (zonne-energie, warmtepompen, WKO en slimme aansturing) is puur elektrisch en hernieuwbaar, zonder backup op gas of andere fossiele brandstoffen.

Volledig autarkisch: Nee – het Huis voor de Provincie blijft grid-connected (aangesloten op het publieke elektriciteitsnet). De zoutbatterij en zonne-installatie zijn bedoeld om zelfverbruik te maximaliseren, pieken af te vlakken en netcongestie te verminderen, maar het gebouw importeert nog

stroom bij langdurig laag rendement (bijv. wintermaanden) en exporteert surplus. Volledige autarkie is niet het doel; de focus ligt op energieneutraliteit in 2035 met een zeer hoog aandeel hernieuwbare eigen opwekking en opslag.

Rabobank (designed by Deerns)

Smart microgrid met zonnepanelen, warmtepompen, warmte- en koudeopslag en

batterijen: Daarnaast ontwerpen we een grootschalige oplossing voor de Rabobank een BESS (battery energy storage system > 5-15 MWh) oplossing i.c.m. zonnepanelen (5500 m²) en een geavanceerd EMS (energy managementsysteem) om de nieuwbouw van circa 65.000 m² te realiseren die vanwege netcongestie problematiek anders sterk vertraagd zou zijn. Het BESS zal worden gebruikt om overdag de nieuwbouw voor het grootste deel van elektriciteit te voorzien in combinatie met de PV-installatie. In de avond/nacht/weekend is er voldoende capaciteit beschikbaar vanuit het net om het BESS weer op te laden voor de volgende werkdag.

Sportstad Heerenveen (designed by Deerns)

Smart microgrid met zonnepanelen, warmtepompen, warmte- en koudeopslag, warmtekracht-koppeling en batterijen voor Sportstad Heerenveen.

Het complex beschikt over een geavanceerd en duurzaam energiesysteem met als ambitie om in 2030 energieneutraal en CO₂-neutraal te opereren, inclusief een reductie van minstens 25% in energieverbruik. Het complex wekt elektriciteit op met ruim 5.200 zonnepanelen en beschikt over vijf ondergrondse warmte-koude opslagsystemen (WKO) gecombineerd met diverse warmtepompen voor verwarming, koeling en tapwater (waaronder booster-warmtepompen en zonnecollectoren voor voorverwarming). Daarnaast is er een warmtekrachtkoppeling (WKK) voor gelijktijdige opwekking van warmte en elektriciteit, en sinds 2024 een batterijsysteem van iwell met 1 MW vermogen en 2,15 MWh capaciteit om zelfopgewekte energie op te slaan, pieken te balanceren en netstabiliteit te ondersteunen – alles gericht op maximale benutting van hernieuwbare bronnen en minimale fossiele afhankelijkheid.

Zwembad de Koerbelt (designed by Deerns)

Ervaringen: Zwembad De Koerbelt in Rijssen functioneert als een van de meest duurzame en energiepositieve zwembaden van Europa met een hoge betrouwbaarheid in het vernuftige energiesysteem, inclusief thermische zoutaccu's (20-25 grote geïsoleerde tanks in de accukelder), elektrische accu's voor stroomopslag, Heco-collectoren (heatpipe-zonnecollectoren) rond de atletiekbaan, zonnepanelen op het dak, warmtepompen en maximale warmteterugwinning, wat resulteert in stabiele watertemperaturen, douchewarm water en binnenklimaat met minimale downtime (>98 procent uptime in de eerste maanden). Het onderhoud is laag dankzij de robuuste, brandveilige zoutaccu's (geen risico op ontbranding zoals bij lithium) en geïsoleerde tanks met periodieke inspecties en slimme monitoring; het systeem minimaliseert energieverliezen door dampdichte constructie en uitstekende isolatie. De kosten zijn zeer laag door energiepositiviteit (slechts 40.000 kWh import per jaar, maar 85.000 kWh teruglevering), met significante besparingen op energierekening en een reductie van circa 570.000 kg CO₂ per jaar, waardoor het zwembad bijna gratis door de winter komt en als uniek voorbeeld geldt wereldwijd.

Barrières: Technisch vereist het complexe systeem (combinatie van thermische zoutaccu's, elektrische opslag, Heco-collectoren en warmtepompen) perfecte afstemming tussen opwekking en verbruik, met uitdagingen bij seizoensvariaties (bijv. minder zon in winter) ondanks buffers; de grote accukelder neemt ruimte in beslag in de kelder. Juridisch speelden vergunningen voor de Heco-collectoren langs de atletiekbaan en netaansluiting een rol, inclusief milieu- en veiligheidsregels voor de innovatieve opslag. Markterughoudendheid kwam aanvankelijk door de hoge investering en onzekerheid over opschaling van thermische zoutaccu's (uniek in de wereld), maar succesvolle ingebruikname in januari 2026 met wethouder en gedeputeerde toont aan dat het werkt en inspireert andere projecten.

Fossielvrij: 100% fossielvrij – het zwembad is volledig gasloos en aardgasvrij, met alle energie uit hernieuwbare bronnen (zonnepanelen op het dak, Heco-collectoren die warmte uit zonlicht én diffuus omgevingslicht halen zelfs op bewolkte dagen, warmtepompen en warmteterugwinning); thermische en elektrische zoutaccu's slaan puur hernieuwbare warmte en stroom op zonder fossiele componenten, resulterend in volledige CO₂-neutraliteit voor Scope 1 en 2 emissies en energiepositiviteit.

Volledig autarkisch: Nee – het zwembad is grid-connected (aangesloten op het publieke net), met een klein netto-import van circa 40.000 kWh per jaar (vooral in winter) en een grote teruglevering van 85.000 kWh; het systeem maximaliseert zelfverbruik en opslag via thermische zoutaccu's en elektrische accu's, maar volledige onafhankelijkheid (off-grid) is niet het doel – de focus ligt op energiepositiviteit, extreem laag verbruik en balans met het net om pieken op te vangen en duurzaam te blijven zonder fossiele backup.

3.5 Binnenstedelijk in Europa (buiten NL)

Trent Basin Community Battery Locatie: Trent Basin, Nottingham, Verenigd Koninkrijk (binnenstedelijk, woonwijk-ontwikkeling)

Ervaringen: De betrouwbaarheid is hoog als een van Europa's grootste community-batterijen met zonne-integratie, met succesvolle grid-stabilisatie en een uptime van meer dan 98 procent in operationele tests. Het onderhoud blijft laag dankzij het modulaire ontwerp en remote monitoring. De kosten dalen en liggen rond de 0,12 euro per kWh, met voordelen voor de community zoals lagere peiktarieven.

Barrières: Technisch vraagt integratie in stedelijke netten nog aandacht voor optimale piekafvang. Juridisch spelen permitting en grid-aansluitregels in het VK een rol. Markterughoudendheid komt door initiële investeringskosten en beperkte bewustzijn bij bewoners over community-voordelen.

Equinix ML5 Milaan (designed by Deerns)

Ervaringen: Waterstof/biogas en brandstofcellen: Voor een Eco Edge Prime Power – Developing a sustainable alternative power source for urban digital infrastructure (www.e2p2.eu) Proof-of-concept in Equinix ML5 datacenter in Milaan: waterstof omzetten in elektriciteit via fuel cells, met alleen water en warmte als bijproducten. Deerns is System integrator in dit EU-gefinancierde project (via Clean Hydrogen Partnership). Partners: Vertiv, Snam, Solid Power, InfraPrime, Tec4Fuels en RISE. Doel: koolstofneutrale power voor datacenters, met focus op efficiëntie en grid-ontlasting. In plaats van waterstof zou biogas ook een mogelijkheid zijn. Biogas heeft het voordeel dat het over de hele keten heen een hoger rendement heeft ivm synthetisch geproduceerde oliën op basis van H₂. Als tweede project met waterstof is te benoemen dat Deerns het ontwerp gemaakt en gerealiseerd voor ASML van het hergebruik van waterstof uit het proces (EUV-machines) via fuel cells om schone energie te genereren, zonder CO₂- of NO_x-uitstoot. Dit is onderdeel van circulaire strategieën in cleanrooms.

Een biogasinstallatie kan tijdens netcongestie bijdragen door lokaal elektriciteit en eventueel ook warmte te produceren. Waardoor minder stroom van het overbelaste elektriciteitsnet hoeft te worden afgenomen. Dit ontlast het net juist op piekmomenten en maakt het mogelijk om processen door te laten draaien zonder extra transportcapaciteit. Daarnaast levert biogasverbranding aanzienlijk lagere emissies op dan conventionele fossiele brandstoffen. Uit metingen blijkt dat een biogasgestookte generator bij hoog vermogen een zeer lage NO_x uitstoot heeft van minder dan 0,1 g/kWh, terwijl moderne dieselaggregaten rond de 0,4 g/kWh NO_x uitstoten.

4.4 Buitengebied in Nederland

Innocent fabriek Maasvlakte Rotterdam (designed by Deerns)

Ervaringen: De Innocent-fabriek 'The Blender' in Rotterdam functioneert als 's werelds eerste volledig elektrische en CO₂-neutrale sap- en smoothiefabriek met een hoge betrouwbaarheid in het slimme energiesysteem, inclusief multi-temperatuur ammoniak-warmtepompen, maximale warmteterugwinning uit koelprocessen en een groot warmtebufferreservoir, wat zorgt voor een stabiele werking met minimale downtime (>98 procent uptime in gerapporteerde prestaties). Het onderhoud is laag dankzij geavanceerde efficiëntie-maatregelen en geen noodzaak voor complexe batterijsystemen; focus ligt op direct hergebruik van afvalwarmte en extreem laag energieverbruik, met significante besparingen op operationele kosten. De kosten voor energie zijn laag door 100 procent hernieuwbare opwekking (ca. 12.000 m² zonnepanelen met ~2,6 GWh/jaar en twee windturbines met ~26,6 GWh/jaar gepland/compleet), wat leidt tot een zeer lage energierekening per liter product en een sterke ROI door vermeden fossiele brandstofkosten en hoge efficiëntie.

Barrières: Technisch is het ontbreken van batterijopslag een bewuste keuze, maar het vereist perfecte afstemming tussen opwekking (zonne/wind) en verbruik om pieken op te vangen via warmtebuffers en slimme aansturing; seizoensvariaties in wind/zon kunnen uitdagingen opleveren zonder elektrische buffer. Juridisch spelen vergunningen voor de twee windturbines (2x8 MW) en integratie in het havengebied een rol, inclusief milieu- en netaansluitregels. Markterughoudendheid komt vooral door de hoge initiële investering (ca. €225 miljoen totaal) en de complexiteit van het bouwen van een volledig fossielvrije fabriek, hoewel dit inmiddels bewezen succesvol is en als voorbeeld dient voor de sector.

Fossielvrij: 100% fossielvrij – de fabriek draait volledig op hernieuwbare energie uit eigen zonnepanelen (ca. 12.000 m²) en twee windturbines (2x8 MW), gecombineerd met ammoniak-warmtepompen en warmteterugwinning; er is geen gebruik van fossiele brandstoffen, gas of andere niet-hernieuwbare bronnen, wat resulteert in volledige CO₂-neutraliteit voor Scope 1 en 2 emissies.

Volledig autarkisch: Nee – de fabriek is grid-connected (aangesloten op het publieke net), met energie uit eigen opwekking (zonne en wind) die het grootste deel dekt, maar import/export met het net voor balans bij variabele productie of piekverbruik; het systeem maximaliseert zelfverbruik en efficiëntie, maar volledige onafhankelijkheid (off-grid) is niet het doel – de focus ligt op CO₂-neutraliteit en extreem laag energieverbruik door directe hergebruik en buffers in plaats van opslag.

Saltion Solid-State Zoutbatterij Pilots Locatie: Barneveld, Nederland (Gildeweg 31, industrieel buitengebied)

Ervaringen: De betrouwbaarheid is hoog dankzij het solid-state ontwerp zonder vloeistoffen, met een uptime van circa 99 procent en geen risico op lekkage of brand. Het onderhoud is zeer laag omdat er geen bewegende delen zijn en het systeem onderhoudsarm functioneert. De kosten dalen gestaag en liggen nu rond de 0,08 tot 0,12 euro per kWh, afhankelijk van de configuratie.

Barrières: Technisch vraagt temperatuurmanagement nog aandacht om optimale prestaties te garanderen. Juridisch zijn veiligheids- en certificeringsvereisten (zoals voor nieuwe batterijtechnologie) een hindernis. Markterughoudendheid komt door de relatief nieuwe technologie en hogere initiële adoptiekosten vergeleken met conventionele Li-ion systemen.

4.5 Buitengebied in Europa (buiten NL)

Kvosted Solar + BESS Park**Locatie: Kvosted, Denemarken (buitengebied, ruraal Noord-Europa)**

Ervaringen: De betrouwbaarheid is uitstekend als grootste gecombineerde solar-batterijpark in Noord-Europa, met hoge uptime (>97 procent) en effectieve grid-support bij congestie. Onderhoud is laag door geavanceerde monitoring en modulaire units. Kosten zijn efficiënt (~0,10-0,15 euro per kWh) dankzij schaal en renewables matching.

Barrières: Technisch is grid-connectie in ruraal gebied een aandachtspunt voor maximale efficiëntie. Juridisch gelden strenge Deense permitting voor grote renewables. Markterughoudendheid bestaat door afhankelijkheid van ancillary services en fluctuerende energieprijzen.

Invinity Energy Systems Flow Battery Project**Locatie: Schotland, Verenigd Koninkrijk (buitengebied, grid-support site)**

Ervaringen: De betrouwbaarheid is hoog met vanadium redox flow (50 MWh schaal, modulaire units), uptime >98 procent voor frequency regulation. Onderhoud laag door container-design. Kosten ~0,10-0,15 euro per kWh via grid services.

Barrières: Technisch integratie met renewables. Juridisch UK permitting delays. Markterughoudendheid door initiële Capex en marktvolatiliteit.

Solvay Solid-State Battery Pilot Unit**Locatie: La Rochelle, Frankrijk (industriële buitengebied, Solvay plant)**

Ervaringen: De betrouwbaarheid is hoog in de pilot met geavanceerde solid-state materialen, uptime >97 procent in tests voor grid-toepassingen. Onderhoud laag door innovatief ontwerp. Kosten dalend met potentieel <0,10 euro per kWh bij grotere systemen.

Barrières: Technisch temperatuur- en schaalbeheer. Juridisch certificering voor nieuwe batterijtech. Markterughoudendheid door transitie van lab naar commercieel en concurrentie met Li-ion.

5 Whole Life Carbon businesscase

We berekenen de Total Cost of Ownership (TCO) over een periode van 20 jaar. Aan de hand van kengetallen en realistische inschattingen brengen we de verwachte besparingen in beeld, zodat we een eenvoudige terugverdientijd (ETVT) kunnen bepalen. Op deze manier worden de verschillende concepten onderling goed vergelijkbaar en krijgt u een helder inzicht in de economische meerwaarde op de lange termijn.

5.1 Traditionele oplossingen (diesel/gas)

Technologie	Leverancier	Richtprijzen CAPEX Euro/kW Excl BTW, excl voorzieningen etc	Richtprijzen OPEX Euro/kWhe Excl BTW	Opmerkingen (prijspeil/indexatie)
Gasgenerator	Caterpillar, Jenbacher etc	600 euro/kWe	0,10 euro per geproduceerde kWhe	Elektrisch rendement van ~38-42%
Generator op HVO-diesel	Cummins, Perkins, etc	600 euro/kWe	0,70 euro per kWhe	

	Euro per kWth	Euro per eenheid
Aardgas	0,08	1,20– 1,45 euro per m ³
Diesel	0,15	1,5 euro / liter
HVO diesel	0,14	1,2- 1,5 euro / liter
Elektriciteit	0,12	Op basis van traditionele oplossing met efficiency van 40% voor een generator

5.2 CAPEX en OPEX batterijen

Technologie	Leverancier	Richtprijzen CAPEX Euro/kWh Excl BTW, excl voorzieningen etc	Richtprijzen OPEX Euro/jaar Excl BTW	Opmerkingen (prijspeil/indexatie)
LFP batterij	Iwell, Dynopods, Big Ass battery	€ 200 euro per kWh batterijcapaciteit	15 euro per kW batterijvermogen	Lithium-ion batterij met vloeistofkoeling. Zeer veilig en thermisch stabiel, met een laag brandrisico en hoge betrouwbaarheid. Lange levensduur (10 jaar garantie) van meer dan 8000 cycli bij minimale degradatie. Hoge efficiëntie (±89%) en geschikt voor intensief

				gebruik zoals peak shaving, back-up en energie-optimalisatie. Modulair opgebouwd, schaalbaar en robuust uitgevoerd (IP55/IP65), waardoor eenvoudig uit te breiden en breed inzetbaar in industriële toepassingen.
Flow batterij	Elestor	80 euro per kWh batterijcapaciteit 500 kWe met 10 uur opslag = 5 MWh berekend op basis van: $\text{€}400/\text{kW} + \text{€}40/\text{kWh}$ $= 400 \cdot 500 + 40 \cdot 5000 = 400.000$ euro	10 euro per kW batterijvermogen	Levensduur 25 jaar Energie opslag (MWh) is erg goedkoop, en bestaat uit ijzer en sulfaat. Dat is veilig, verandert niet van samenstelling, heeft een stabiele prijs (meest een van de meest verhandelde commodity) en komt van onze buurlanden. Geen zelfontlading over de tijd (loopt niet leeg als je hem niet gebruikt --> back-up). Geen capaciteitsafname over tijd (25 jaar lang zelfde energie beschikbaar). Modulair, makkelijk uit te breiden en repareren.
Zoutbatterij	Fortona, Salt-ion	€800 per kWh	Weinig tot geen	Modules: Titan 100 kW met batterijcapaciteit 360 kWh. Volledig veilig en onbrandbaar. Duurzaam en zeer goed recyclebaar. Lange levensduur en lage degradatie. Technische levensduur van 20 jaar en meer dan 4.500 cycli bij 80% DoD, met minimale degradatie in floating-gebruik of opslag. Europese productie en hoogwaardige componenten. Batterijen worden in Zwitserland geproduceerd en de omvormer in Italië. TITAN container ~ 300 kW / 1 MWh
Hybride super condensatoren	Fortona FOR-E	€3.000-10.000 per kWh 500 kWe -> 15 minuten opslag. 125 kWh	10 euro per kW batterijvermogen	Hybride supercondensator. Het overbruggt de kloof tussen traditionele (vaak op lithium gebaseerde) supercondensatoren en lithium-ion batterijcellen, maar gebruikt geactiveerde koolstof (grafeen) als actief bestanddeel. Zeer lange levensduur, gegarandeerd tot 15 jaar en 20.000 cycli (80 %), beduidend hoger dan standaard LFP-systemen. Hoge laad- en ontlaadsnelheid (1C) – geschikt voor intensief gebruik zoals piekshaving en energie-arbitrage.

Richtprijzen zijn excl. BTW, excl. installatie (range ca 30-40%, tenzij in kolom opmerkingen anders vermeld), excl. bouwkundige voorzieningen, exclusief EMS systeem.

5.3 CAPEX en OPEX energieopwekking

	Euro per kWh	Euro per eenheid
Biogas	0,20-0,30	1,0 – 1,5 euro per m ³
Groene waterstof	0,17-0,33	12 – 14 euro per kg

Technologie	Leverancier	Richtprijzen CAPEX Euro/kW Excl BTW, excl voorzieningen etc	Richtprijzen OPEX Euro/kWh/jaar Excl BTW	Opmerkingen (prijsspeil/indexatie)
Waterstof brandstofcel	Genpower	€2.300 - €2.700/kW	€0,02 - €0,03	Kosten H2 zijn bepalend voor Opex. Opex is excl. kosten H2; kosten H2 €0,17 - €0,33 /kWh (factor 10x). Rendement brandstofcel 45%
Waterstof aggregaat	Genpower	€1.500 - €1.800/kW	€0,008 - €0,015	Kosten H2 zijn bepalend voor Opex. Opex is excl. kosten H2; kosten H2 €0,17 - €0,33 /kWh (factor 10x). Rendement aggregaat 35%
Windturbine	Vestas	€1.000 - €1.200/kW	€0,015 - €0,023	Prijs is alleen "kale" windturbine. Hierbij komen nog kosten fundatie, wegen, elektrische inpassing in net. Deze aanvullende kosten bedragen ca. 70% van de totale investering.
Warmtenet	Vattenfall/En eco	€250 /kW	€ 0,15	De CAPEX heeft betrekking op de aansluitkosten en kosten inkoopset (TSA, energiemeter). OPEX is excl. vastrechtkosten.
Koudenet	Vattenfall/En eco	€200 /kW	€0,05 - €0,10	De CAPEX heeft betrekking op de aansluitkosten en kosten inkoopset (TSA, energiemeter). OPEX is excl. vastrechtkosten.
Solar PV	Deerns kengetallen	€700 /kWp		45% Panels, 15% Inverter, 40% balance of plant, Installation
Gas WKK	Deerns kengetallen	€500 - €600 /kW	€4.000,- voor 500 kVA en €7.000,- voor 1000 kVA	Biogas. OPEX is "kaal" onderhoud en excl. kosten biogas.

Richtprijzen zijn excl. BTW, excl. installatie (range ca 30-40%, tenzij in kolom opmerkingen anders vermeld), excl. bouwkundige voorzieningen, exclusief EMS systeem.

5.4 Whole Life Carbon

5.4.1 Embodied CO2 bij CAPEX

	Embodied (gemiddeld)	Embodied per 500 kW module met 0,5 C ton CO2e	Opmerkingen
Li - Ion	140 kg CO2e per kWh	140	1000 kWh batterij (0,5C)
Solid State Zoutbatterij	85 kg CO2e / kWh	85	1000 kWh batterij (0,5C)
Flow batterij	30 kg CO2e / kWh	30	1000 kWh batterij (0,5C)

Zonnepanelen	500 kg CO ₂ e / kWp	250	
Brandstofcel	1500 kg CO ₂ e / kW _e	750	
Windturbine	400 kg CO ₂ e / kW _e	200	
Generator	300 kg CO ₂ e / kW _e	150	
Elektrolyser	10 kg CO ₂ e / kW _e	5	
WKK	300 kg CO ₂ e / kW _e	150	

5.4.2 Operationele CO₂ bij OPEX

	Operationele CO ₂ [kg/ kWh]	Opmerkingen
Biodiesel HVO	0.046	De gepresenteerde emissiefactor geldt alleen voor HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) geproduceerd op basis van duurzame grondstoffen, dit is met name UCO (Used Cooking Oils). De CO ₂ -emissie van HVO gemaakt uit niet duurzame grondstoffen ligt veel hoger.
Aardgas	0.243	
Biogas	0.035	
H ₂	0.033	
Elektriciteit van het grid	0.244	
Zon	0	
Wind	0	
Warmtenet	0,17 warmte	Vattenfall Adam
Koudenet	0,035 koude	Vattenfall Adam

5.5 Whole Life Carbon Businesscase

De berekening van de Netto Contante Waarde (NCW) is indicatief en gebaseerd op een module met een nominaal vermogen van 500 kW_e. De analyse richt zich op een periode van 20 jaar, conform gangbare TCO-benaderingen voor energieopslagsystemen. De NCW berekening is uitgebreid tot een Whole Life Carbon Businesscase. Hierbij is de carbon beprijzing van zowel embodied carbon voor de materialen als de operationele carbon voor energiegebruik netto contant gemaakt middels de CO₂-beprijzing. Dit is in zijn geheel vervolgens doorgerekend met de CAPEX en OPEX getallen voor de investeringen en energiekosten. Dit noemen wij: **Whole Life Carbon Businesscase**.

Belangrijke uitgangspunten zijn:

- Disconteringsvoet (discontrate): 4% (reëel).
- Indexatie energie op 4%.
- Indexatie op service 3%.
- Vermogen van 500 kW met 1500 vollasturen per jaar.
- Marktgedreven prijsontwikkeling CO₂-prijs 4% indexatie.
- Levensduur van de systemen: 20 jaar (met inachtneming van degradatie).
- Capex en Opex: Indicatief gebaseerd op richtprijzen in de vorige paragrafen.
- Carbon beprijzing is Netto Contact gemaakt en verdisconteerd in zowel de CAPEX als de OPEX

- De NCW berekening
- Overige: Geen subsidies (zoals SDE++) meegenomen in deze eerste indicatie. Richtprijzen zijn gehanteerd zonder installatie- en bouwkundige kosten.

De eerste NCW-waarden geven een indicatief inzicht in de economische haalbaarheid en dienen met name om de ranking aan te geven tussen de verschillende systemen en niet als absolute getallen. In een vervolgfase kan hiervan een separate tool ontwikkeld worden voor meer nauwkeurigheid.

Systeem	NCW (miljoen euro)	Ranking	NCW (miljoen euro)	Ranking
	CO ₂ -prijs 0 euro	CO ₂ -prijs 0 euro	CO ₂ -prijs/ton 875 euro	CO ₂ -prijs/ton 875 euro
Gasgenerator	- 3	4	-7	5
Generator op HVO	-11	6	-12	6
Brandstofcel op H₂	-31	7	-33	7
Biogas generator	-4	5	-5	4
PV+LFP+biogas	-1	2	-2	1
PV+Solid State Zout+Biogas	-2	3	-3	1
PV+Flow+biogas	-1	1	-2	1

Uit de bovenstaande berekeningen en getallen kunnen enkele duidelijke conclusies worden getrokken:

- **Lokale opwekking** met zonnepanelen in combinatie met batterijopslag en een piekvoorziening (bijvoorbeeld een generator of blokstroom netaansluiting) blijkt over een horizon van 20 jaar financieel het meest aantrekkelijk. Daarnaast hebben deze systemen een veel lagere onderhoudsfrequentie en -intensiteit waardoor er vanuit RVB **minder beheer** noodzakelijk is.
- Systemen die afhankelijk zijn van het transport van brandstoffen zoals waterstof (H₂) of HVO over grotere afstanden, worden significant duurder door de bijkomende **transport- en logistieke kosten**. Dit resulteert in een duidelijk minder gunstige businesscase op de lange termijn.
- Er is een duidelijke trend zichtbaar dat bij een langere afschrijvingstermijn een **verschuiving plaatsvindt van OPEX (operationele kosten) naar CAPEX (investeringskosten)**. Systemen met een hoger initieel investeringsbedrag, maar lagere doorlopende kosten, worden op termijn steeds aantrekkelijker.

Over een horizon van 20 jaar is geen/beperkte herinvestering nodig onder de volgende voorwaarden:

- Systemen zoals batterijopslagsystemen (op basis van LiFePO₄-technologie) en piekvoorzieningen in de vorm van generatoren vereisen binnen een levensduur van 20 jaar doorgaans geen volledige herinvestering in de kerncomponenten. Moderne LFP-batterijen kunnen bij een realistisch gebruikspatroon (bijvoorbeeld één dagelijkse cyclus met beperkte diepte van ontlading) gemakkelijk 6.000 tot meer dan 10.000 laadcycli doorstaan, wat overeenkomt met 15 tot 25+ jaar operationele levensduur voordat de capaciteit significant onder de 80% daalt. Daarnaast biedt de robuuste constructie van industriële containerbatterijen, gecombineerd met geavanceerd thermisch beheer en een intelligent EMS, een kalenderlevensduur die ruim boven de 20 jaar ligt.

- Diesel- of HVO-generatoren die als piek- of back-upvoorziening fungeren, hebben bij beperkt draaiuren (stand-by of enkele honderden uren per jaar) een verwachte levensduur van 20.000 tot 30.000+ draaiuren, wat bij normaal gebruik eveneens 20 tot 25 jaar overschrijdt. Met regulier preventief onderhoud (olie, filters, loadbank-tests) blijft de generator technisch betrouwbaar zonder dat de motor of alternator vervangen hoeft te worden.

Doordat beide componenten over de volledige analyseperiode meekunnen zonder kapitaalintensieve vervanging, verschuift de focus in de businesscase van herinvesteringen naar lagere operationele kosten en een stabielere Total Cost of Ownership.

6 SWOT analyses

Wij hebben onderstaand “high level” SWOT-analyses uitgevoerd op de voorgestelde Energiecentrales. We identificeren de sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen. We hebben de SWOT-analyses opgesteld via een klassieke 2x2 matrix per Energiecentrale concept en splitsen het voor per opgave in op de geschiktheid/haalbaarheid van de technologie voor een fossielvrije energiecentrale:

Sterktes (Strengths)	: Wat kan er met deze Energiecentrale beter/snelser in vergelijking met anderen?
Zwaktes (Weaknesses)	: Wat zijn de risico's of wat maakt het minder sterk?
Kansen (Opportunities)	: Welke externe ontwikkelingen kunnen we benutten? (trends, beleid, subsidies, netcongestie-problematiek)
Bedreigingen (Threats)	: Wat kan de technologie dwarszitten? (concurrentie, regelgeving, leveringsproblemen, kostenstijging)

Met deze SWOT-matrix gaan we vervolgens een stap verder om hieruit strategische richtingen te bepalen door SW te spiegelen met RvB. Een voorbeeld vraag is dan: Hoe kan onze sterkte X ons helpen om kans Y te pakken? Hieruit destilleren we 2-3 belangrijke inzichten.

6.1 SWOT analyse concept zonnepanelen i.c.m. short-duration BESS, binnenstedelijk

Voor de omschrijving van het concept zie artikel 3.1.1.

	Positief/Gunstig	Negatief/ongunstig
	Sterkte (Strengths)	Zwaktes (Weaknesses)
Intern (Technologie/Systeem)	- Kosteneffectieve energieopwekking en opslag; - Hoge betrouwbaarheid; - Schaalbaarheid: Modulair ontwerp zonnepanelen en batterijen dat uitbreiding zeer goed toestaat; - Technisch “beproefd” concept; - Geïntegreerde optimalisatie;	- Hoge initiële CAPEX; - Langere periodes met weinig zon; - Conventionele back-up nodig, bijv. net; - Geen oneindige opslag in batterijen; - Veroudering batterijen; - Milieubelasting batterijen (Li) en PV
	Kansen (Opportunities)	Bedreigingen (Threats)
Extern (Markt/Omgeving)	- Ook geschikt voor netcongestie-oplossingen; - Subsidies en beleid: EU/NL-doelen; - Marktprijzen batterijen en PV dalen; - Batterijen later uit te wisselen door meer efficiënte types; - Innovaties mogelijk: nieuwe combi's zoals Battolyser (batterij + H₂) of ultra lage-temp WP;	- Regelgeving barrières: Juridische procedures bij plaatsen PV park (verblinding aanvliegroutes, vertraging); - Concurrentie: Traditionele diesel/gas oplossingen blijven goedkoper op korte termijn.

Uit deze SWOT-analyse halen we de volgende conclusies/inzichten:

1. **Sterktes benutten:**
 - a. Maak het concept zo modulair en schaalbaar mogelijk, vanuit het beheer kan dan zowel de opwekking als de opslag later vergroot worden of vervangen worden door beter presterende onderdelen;
 - b. Combinatie van reeds bekende technieken;
2. **Zwaktes verbeteren of compenseren:**
 - a. Sterk variërende productie (zon): combineren met batterijopslag, en/of netkoppeling;
 - b. Goede monitoring/beheer zodat veroudering PV en batterijen bewaakt wordt;
3. **Kansen uitnutten:**
 - a. Modulair ontwerp: snel aan te passen aan veranderende techniek en prijzen;
4. **Bedreigingen verminderen:**
 - a. Procedures Omgevingswet goed onderbouwen en vroeg genoeg starten;

6.2 Generator/WKK op biogas (inkopen), binnenstedelijk

Voor de omschrijving van het concept zie artikel 3.1.2.

	Positief/Gunstig	Negatief/ongunstig
	Sterkte (Strengths)	Zwaktes (Weaknesses)
Intern (Technologie/Systeem)	- Kosteneffectieve energieopwekking; - Hoge betrouwbaarheid; - Technisch "beproefd" concept; - Geïntegreerde optimalisatie; - Lage NOx uitstoot;	- Hoge initiële CAPEX; - Beperking opgestelde capaciteit; - Minder schaalbaar/modulair; - Beschikbaarheid en transport biogas; - Rendement van de installatie; - Uitstoot rookgassen;
	Kansen (Opportunities)	Bedreigingen (Threats)
Extern (Markt/Omgeving)	- Ook geschikt voor netcongestie-oplossingen; - Subsidies en beleid: EU/NL-doelen; - Zeer lage MKI;	- Concurrentie: Traditionele diesel/gas oplossingen blijven goedkoper op korte termijn.

Uit deze SWOT-analyse halen we de volgende conclusies/inzichten:

1. **Sterktes benutten:**
 - a. Maak het concept zo modulair en schaalbaar mogelijk, de voorkeur bestaat om meerdere kleinere units te plaatsen;
2. **Zwaktes verbeteren of compenseren:**
 - b. Marktverkenning rendementen generator/WKK;
 - c. Reinigen rookgassen/efficiënte verbranding;
 - d. Lange termijncontracten inkoop biogas afsluiten;
3. **Kansen uitnutten:**
 - e. Juist geschikt voor binnenstedelijke locaties;
4. **Bedreigingen verminderen:**
 - f. Lange termijncontracten biogas afsluiten om prijsrisico te verminderen;

6.3 Brandstofcel/WKK op groene waterstof (inkopen of zelf opwekken via elektrolyse), binnenstedelijk

Voor de omschrijving van het concept zie artikel 3.1.3.

	Positief/Gunstig	Negatief/ongunstig
	Sterkte (Strengths)	Zwaktes (Weaknesses)
Intern (Technologie/Systeem)	- Hoge betrouwbaarheid; - Schaalbaarheid: Modulair ontwerp brandstofcellen dat uitbreiding zeer goed toestaat; - Technisch "beproefd" concept, waterstof is wel nieuw; - Geen uitstoot CO₂; - Geïntegreerde optimalisatie;	- Hoge initiële CAPEX: - Logistiek (transport) en opslag waterstof - Nu nog hoge prijs H₂; - Waterstof is nog in opkomst; - Veiligheidsvoorzieningen; - Lage energieinhoud waterstof en waterstof maken kost relatief veel energie;
	Kansen (Opportunities)	Bedreigingen (Threats)
Extern (Markt/Omgeving)	- Ook geschikt voor netcongestie-oplossingen; - Subsidies en beleid: EU/NL-doelen; - Marktprijzen brandstofcellen gaan in de toekomst dalen; - Innovaties mogelijk: Nieuwe combi's zoals Battolyser (batterij + H₂) of ultra lage-temp WP;	- Regelgeving veiligheid: Opslag waterstof; - Concurrentie: Traditionele diesel/gas oplossingen blijven goedkoper op korte termijn.

Uit deze SWOT-analyse halen we de volgende conclusies/inzichten:

1. **Sterktes benutten:**
 - a. Maak het concept zo modulair en schaalbaar mogelijk, vanuit het beheer kan dan zowel de opwekking als de opslag later vergroot worden of vervangen worden door beter presterende onderdelen;
2. **Zwaktes verbeteren of compenseren:**
 - a. Lange termijncontracten inkoop H₂ afsluiten;
3. **Kansen uitnutten:**
 - a. Modulair ontwerp: snel aan te passen aan veranderende techniek en prijzen;
4. **Bedreigingen verminderen:**
 - a. Vroegtijdig overleg gemeente m.b.t. veilige opslag H₂;

6.4 SWOT analyse concept zonnepanelen met windturbines i.c.m. short-duration BESS, buitenstedelijk

Als 6.1 met toevoeging van een windturbine.

Voor de omschrijving van het concept zie artikel 3.2.1.

	Positief/Gunstig	Negatief/ongunstig
	Sterkte (Strengths)	Zwaktes (Weaknesses)
	- Opwekking vanuit 2 bronnen; - Hoge betrouwbaarheid;	- Hoge initiële CAPEX: - Afhankelijkheid van weervariabelen;

Intern (Technologie/Systeem)	- Schaalbaarheid: Modulair ontwerp zonnepanelen en batterijen dat uitbreiding zeer goed toestaat; - Technisch "beproefd" concept; - Geïntegreerde optimalisatie;	- Langere periodes windstil en weinig zon; - Conventionele back-up nodig, bijv. net; - Geen oneindige opslag in batterijen; - Veroudering batterijen;
	Kansen (Opportunities)	Bedreigingen (Threats)
Extern (Markt/Omgeving)	- Ook geschikt voor netcongestie-oplossingen; - Subsidies en beleid: EU/NL-doelen; - Marktprijzen batterijen en PV dalen; - Batterijen later uit te wisselen door meer efficiënte types; - Innovaties mogelijk: Nieuwe combi's zoals Battolyser (batterij + H2) of ultra lage-temp WP;	- Regelgeving barrières: Juridische procedures bij opstellen windturbines (vertraging); - Concurrentie: Traditionele diesel/gas oplossingen blijven goedkoper op korte termijn.

Uit deze SWOT-analyse halen we de volgende conclusies/inzichten:

1. Sterktes benutten:

- Maak het concept zo modulair en schaalbaar mogelijk, vanuit het beheer kan dan zowel de opwekking als de opslag later vergroot worden of vervangen worden door beter presterende onderdelen;
- Combinatie van reeds bekende technieken;

2. Zwaktes verbeteren of compenseren:

- Sterk variërende productie (zon/wind): combineren met batterijopslag, en/of netkoppeling;
- Goede monitoring/beheer zodat veroudering PV en batterijen bewaakt wordt;

3. Kansen uitnutten:

- Modulair ontwerp: snel aan te passen aan veranderende techniek en prijzen;

4. Bedreigingen verminderen:

- Procedures Omgevingswet goed onderbouwen en vroeg genoeg starten;
- In ontwerp meenemen dat windturbine later geplaatst wordt;

6.5 Waterstof zelf opwekken

Voor de omschrijving van het concept zie artikel 3.2.2.

	Positief/Gunstig	Negatief/ongunstig
	Sterkte (Strengths)	Zwaktes (Weaknesses)
Intern (Technologie/Systeem)	- Hoge betrouwbaarheid; - Lage NOx uitstoot;	- Zeer hoge CAPEX: - Veiligheidsvoorzieningen opslag Kleinschalig is nog duurder - Laag rendement van de installatie;
	Kansen (Opportunities)	Bedreigingen (Threats)
Extern (Markt/Omgeving)	- Benutten restwarmte - Subsidies en beleid: EU/NL-doelen;	- Concurrentie: Traditionele diesel/gas oplossingen blijven goedkoper op korte termijn.

		- Noodzaak periodieke keuringen;
--	--	----------------------------------

6.6 Flowbatterijen

Voor de omschrijving van het concept zie artikel 3.2.3.

	Positief/Gunstig	Negatief/ongunstig
	Sterkte (Strengths)	Zwaktes (Weaknesses)
Intern (Technologie/Systeem)	- Kosteneffectieve energieopwekking en opslag; - Basislast voor langere duur; - Hoge betrouwbaarheid; - Schaalbaarheid: Modulair ontwerp zonnepanelen en batterijen dat uitbreiding zeer goed toestaat; - Minder milieubelasting; - Hogere veiligheid; - Hogere levensduur; - Geen zelfontlading in de tijd; - Geïntegreerde optimalisatie;	- Hoge initiële CAPEX: - Moet gecombineerd worden met energieopwekking; - Efficiency is laag (<50%); - Geen oneindige opslag in batterijen; - Ruimtebehoefte is groter van flowbatterijen; - Milieubelasting PV
	Kansen (Opportunities)	Bedreigingen (Threats)
Extern (Markt/Omgeving)	- Ook geschikt voor netcongestie-oplossingen; - Subsidies en beleid: EU/NL-doelen; - Marktprijzen flowbatterijen en PV dalen; - Batterijen later uit te wisselen door meer efficiënte types	- Regelgeving barrières: Juridische procedures bij plaatsen PV park (verblinding aanvliegroutes, vertraging); - Concurrentie: Traditionele diesel/gas oplossingen blijven goedkoper op korte termijn.

Uit deze SWOT-analyse halen we de volgende conclusies/inzichten:

1. Sterktes benutten:

- Maak het concept zo modulair en schaalbaar mogelijk, vanuit het beheer kan dan zowel de opwekking als de opslag later vergroot worden of vervangen worden door beter presterende onderdelen;
- Goede toepasbaar als brandrisico zo veel mogelijk beperkt moet worden;

2. Zwaktes verbeteren of compenseren:

- Sterk variërende productie (zon): combineren met batterijopslag, en/of netkoppeling;
- Goed nadenken m.b.t. fysieke inpassing batterijen;

3. Kansen uitnutten:

- Modulair ontwerp: snel aan te passen aan veranderende techniek en prijzen;

4. Bedreigingen verminderen:

- Procedures Omgevingswet goed onderbouwen en vroeg genoeg starten;

7 Aanbevelingen 2 casussen

Voor 2 casussen geven we aanbevelingen door op de volgende vragen antwoord te geven:

1. Welke beschikbare technologieën uit stap 1 zijn toepasbaar en geschikt voor toepassing? Waarom zijn geschikt? Of waarom niet?
2. Hoe vertaal je de SWOT-matrix zich naar de casus? Wat zijn de specifieke sterkte, zwakten, opportunity's en threats voor de casus?
3. Wat zijn de belangrijkste inzichten en aanbevelingen?

7.1 Locatie Amsterdam

Uitgangspunten:

- 65 appartementen van 55 m²/stuk;
- 10 appartementen van 145 m²/stuk;
- Kantoren 6.475 m² bvo incl. parkeergarage;
- Totaal ca. 11.000 m² bvo;

Beschikbaar elektrisch vermogen nuts : 3 x 80 Amp, dit komt overeen met ca. 55 kW elektrisch vermogen.

In de ter beschikking gesteld info heeft Alliander een inschatting gemaakt van de benodigde elektrisch vermogensvraag van het complex, uitgaande van 2 situaties:

1. Aansluiten op stadsverwarming/WKO/WP totaal 624 kW + 64 kVA laadpalen, PV is max 38 kWp;
2. Aansluiten op individuele warmtepompen totaal 848 kW (wij gaan er van uit dat de elektrische vermogens t.b.v. de warmtepompen voorzien zijn in het opgegeven vermogen van 848 kW) en 64 kW laadpalen, PV is max 38 kWp

Piekvermogens en jaarverbruik locatie Adam situatie 1 en 2

De ontvangen berekening van Alliander gaat uit van een gelijktijdig verbruik van de 46 laadpalen van 64 kVA, (uitgaande van een gelijktijdigheid 0,2 en een piekvermogen per laadpaal van 7 kW). Deze waarde lijkt ons erg laag. Wij denken met het oog op meer elektrisch rijden in de toekomst eerder aan een gelijktijdigheid van 0,4 en een piekvermogen van 10 kW/laadpaal. Dit zou dan resulteren in ca. 200 kW en daardoor een veel hoger piekvermogen.

Een evt. verdere groei naar 100 stuks laadpalen zoals Alliander stelt (is dat realistisch voor 75 appartementen?) is hierin niet inbegrepen.

Deze vermogensvraag voor de laadpalen kan beperkt worden door slimme sturingen (load balancing).

Te denken valt aan:

- Auto's lang genoeg staan (typisch kantoor + bewoners);
- Nachtladen woningen;
- Niet "iedereen tegelijk vol in 2 uur";
- Vermogen per paal begrenzen (bijv. max 7 kW);
- Dynamisch per auto sturen;
- Optionele batterijen voor peak shaving;

Wij verwachten dat met gebruikmaking van slimme technieken het piekvermogen tussen 750 en 900 kVA zal gaan uitkomen.

Als wij dit omzetten naar een schatting van het jaarverbruik, resulteert dit in onderstaande tabel. Wij gaan daarbij uit van:

- 1,5 laadsessie/dag;

- 25 kWh per sessie;
- 300 dagen/jaar;
- Niet iedere laad paal is continu bezet;
- Niet elke auto komt “leeg” aan;
- Niet iedereen laadt maximaal;

Voor de berekening van de energieverbruik gaan we uit van een zeer goed thermisch geïsoleerd gebouw en energiezuinige installaties. De warmtepompen worden lucht/water uitgevoerd.

Categorie	Aantal / Oppervlak	E-verbruik kengetal (kWh/jaar)	Totaal E-verbruik (kWh/jaar)	Aandeel (%)
Kleine appartementen	65 stuks	2.000	130.000	9%
Grote appartementen	10 stuks	3.500	35.000	3%
Totaal appartementen	75 stuks	—	165.000	12%
Kantoren	6.475 m ²	120 kW/m ²	777.000	55%
Laadpalen	46 stuks	10.000	460.000	33%
TOTAAL verbruik bruto	—	—	1.402.000	100%
Opbrengst PV	Opgesteld 38 kWp		34.000	-2,5%
TOTAAL VERBRUIK netto			1.368.000	

Tabel 1 Situatie stadsverwarming

Categorie	Aantal / Oppervlak	E-verbruik kengetal (kWh/jaar)	E-verbruik warmtepomp (kWh/jaar)	Totaal E-verbruik (kWh/jaar)	Aandeel (%)
Kleine appartementen	65 stuks	2.000	1.500	227.500	14%
Grote appartementen	10 stuks	3.500	3.000	65.000	4%
Totaal appartementen	75 stuks	—		292.500	18%
Kantoren	6.475 m ²	120 kW/m ²	110.000	887.000	54%
Laadpalen	46 stuks	10.000		460.000	28%
TOTAAL verbruik bruto	—	—		1.639.500	100%
Opbrengst PV	Opgesteld 38 kWp			34.000	-2,0%
TOTAAL VERBRUIK netto				1.605.500	

Tabel 2 Situatie eigen warmtepompen

Profiel woningen

- Nacht (00:00–06:00): laagste verbruik, *baseload* ca. 10–25% van dagpiek.
- Ochtendpiek (07:00–09:00): oplopen door douchen, koken, verlichting.

- Avondpiek (17:00–21:00): grootste piek van de dag door koken, apparaten, verlichting.
- Overdag-midden (10:00–16:00): relatief laag, zeker bij werkende huishoudens.

Profiel kantoren

- Overdag (08:00–18:00): hoogste vraag door HVAC, IT-apparatuur, verlichting, typisch 80–90% van totale dagelijkse vraag
- Nacht: sterke daling, maar er blijft een constante baseload door servers, beveiliging, ventilatie op laagstand en restverlichting. Meestal 10–20% van dagverbruik

Samenvattend

Gebouwtype	Nachtverbruik t.o.v. dag	Bronnen
Woningen	20–30% van dagverbruik*	Standaardprofielen netbeheerders (Enexis/Liander/Stedin)+ gemiddeld dagverbruik huishoudens
Kantoren	10–20% van dagverbruik	TNO-onderzoek over kantoorgebouwen (energieverbruik en functies)

- Het elektrisch laden kan van invloed zijn op dit percentage.

Eerste impressie

1. Het beschikbare nutsvermogen is verre van toereikend voor de vraag. Zelfs als we ervanuit zouden gaan dat de vraag tussen 22.00 en 6.00 uur zou afnemen tot ca. 10-25% is het nutsvermogen ontoereikend. Omdat er naar verwachting nooit capaciteit overblijft, is het dus met dit vermogen niet mogelijk om batterijen te laden.
2. Er wordt 38,25 kWp geplaatst aan PV panelen van 450 Wp/stuk. Dit komt overeen met 65 panelen. Dit lijkt erg weinig (ca. 100 m²). Afhankelijk van het beschikbaar dakoppervlak en de beschaduwing van de daken is onze aanbeveling de oppervlakte PV te maximaliseren. Naar verwachting kan het extra opgewekte vermogen (inschatting tot ca. 150 kW) altijd binnen het complex verbruikt worden, ook in het weekend.
3. Van de twee mogelijkheden die Alliander aanbiedt, lijkt het meest voordelige om gebruik te maken stadsverwarming, mits deze fossielvrij is. De maximale elektriciteitsvraag wordt daardoor beperkt.

Aanbevelingen

Wij zien een aantal mogelijkheden om het complex van fossielvrije energie te voorzien:

1. Toepassen blokstroom met inkoop van groene stroom (zodra dit ook in Amsterdam beschikbaar komt) in combinatie met zout batterijen (i.v.m. lagere risico brand in een complex met woningen). De blokstroom komt beschikbaar tijdens de nachtelijke uren tussen 0.00 en 6.00 uur, het niet gebruikte deel wordt dan gebruikt om batterijen te laden.
2. Maximaliseren oppervlakte PV, het nu voorziene oppervlakte lijkt erg laag, de energie wordt altijd in complex verbruikt!
3. Toepassen biogas generator voor maximale elektriciteitsvraag.
4. Toepassen van kleinere biogasgenerator in combinatie met batterijen.
5. Hybride oplossing. Gebouw voorbeiden op blokstroom en zolang blokstroom nog niet beschikbaar is het toepassen (tijdelijke) kleinere biogasgenerator in combinatie met tijdelijke batterijen. Na het beschikbaar komen blokstroom kan de biogasgenerator/batterijen elders worden benut.
6. Brandstofcel op waterstof is niet meegenomen gezien de zeer hoge OPEX (kosten waterstof).

	Mogelijkheid 1	Mogelijkheid 2	Mogelijkheid 3	Mogelijkheid 4
	Toepassen blokstroom i.c.m. batterijen	Biogas generator	Biogas generator i.c.m. batterijen	Voorbereiden op blokstroom met tijdelijke generator/batterijen
CAPEX	Alleen investering batterijen en aansluitkosten nuts	Dimensioneren op piekvraag maakt deze duur	Dimensioneren biogas generator op lager gemiddeld vermogen	Generator/batterijen kunnen na beschikbaar komen blokstroom hergebruikt worden.
OPEX	Gebruik maken van goedkoop stroom aanbod tijdens de nacht	Kosten biogas is ca. 25% hoger dan aardgas, idem hoge servicekosten	Kosten biogas ca. 25% hoger dan aardgas. Overtollige PV vermogen kan benut worden.	Op termijn goedkope stroom
Risico	Blokstroom moet in Adam nog beschikbaar komen	Opslag biogas nabij gebouw	Opslag biogas nabij gebouw, voorkeur geen brandbare Li batterijen gebruiken	Tijdelijke opslag biogas
Ruimte behoefte	Opstelplaats batterijen	Generator en opslag	Generator, opslag en batterijen	Ruimte generator/batterijen komt later beschikbaar
Betrouwbaarheid	Betrouwbaar nuts en batterijen is hoog	Redundant uitvoeren? i.c.m. walaansluiting	Redundant uitvoeren? i.c.m. walaansluiting	Redundant uitvoeren? i.c.m. walaansluiting

7.2 Defensie

Uitgangspunten:

- Email Wilbert van den Boom 5 maart 2026 met uitgangspunten;
- 4 gecombineerde kazernes (op één locatie);
- Piekvermogens elektra 3.100 – 3.600 kW;
- Inschatting jaarverbruik: 10.000.000 – 11.000.000 kWh
- Oppervlakten:
 - huidige m2 BVO: 156.000 m2
 - beoogd toekomstig: 261.421 m2
 - buitenterrein: 338.476 m2
- Bedrijfszekerheid:
 - vanuit *Energiezekerheid Defensie* komt de wens om minimaal 72 uur voor kritieke processen aan redundante energievoorziening te hebben.
 - uit te breiden naar 7 dagen; de omvang van de kritieke processen is nog vast te stellen.
 - schaalbare voorstellen PGI-onderzoek hierop afstemmen.
- Technische randvoorwaarden:
 - Kernenergie: zie site van Nuclear | Allseas, eerder bericht van staatssecretaris Gijs Tuinman
 - Beperkingen voor windenergie (bv. nabijheid vliegroutes, radarstoringen). Windenergie kan op beperkte schaal, meer zinvol in windgebied 1.
 - Bezwaren tegen zonneparken (bv. schaduwwerping, landschappelijke inpassing).

Het accent ligt op Zon op Dak (PV/PVT). Het ruimtebeslag van een zonnepark kan belemmerend zijn voor de uitvoering van hoofdtaken.

- d. Restricties voor batterijopslag (bv. veiligheidszones, brandrisico's) of warmtenetten (bv. afstand tot afnemers). Voorkeur is er voor buitenopstelling en voldoen aan PGS 37.1. Het RVB ontwikkelt een Technisch Kader Li-ion batterijen (EOS) met aanvullende eisen, later dit jaar beschikbaar.
- e. Landschappelijke inpassing: denk aan Ecologische Hoofdstructuur (EHS), zie Kaarten | Atlas Leefomgeving

Probleemstelling:

- Congestie, onvoldoende aansluitvermogen beschikbaar;
- In principe fossielvrij, tenzij in een crisissituatie;

Verbruiksprofiel gebouwen

- Overdag (08:00–18:00): hoogste vraag door HVAC, IT-apparatuur, verlichting, typisch 80–90% van totale dagelijkse vraag;
- Nacht: sterke daling, maar er blijft een constante baseload door servers, beveiliging, ventilatie op laagstand en restverlichting. Meestal 10–20% van dagverbruik;
- Weekend, bezetting zal lager maar kazernes blijven wel actief, inschatting verbruik bedraagt 25% van maximale vraag.

Eerste impressie

- Het beschikbare buitenterrein, met zeker parkeerterreinen biedt mogelijkheden om zeer veel PV panelen te plaatsen;
- Windturbine zijn beperkt op bepaalde locaties mogelijk;
- Opslag gas kan veilig in het buitenterrein;
- Geluidsproductie is eenvoudig te mittigeren;
- Differentiatie energieopwekking is noodzakelijk gezien de kwetsbaarheid PV en windturbines in crisissituaties (drones).

Aanbevelingen

Wij zien een aantal mogelijkheden om het complex van fossielvrije energie te voorzien:

1. Toepassen blokstroom met inkoop van groene stroom (zodra dit beschikbaar komt) in combinatie met flow of Li batterijen. De blokstroom komt beschikbaar tijdens de nachtelijke uren tussen 0.00 en 6.00 uur, het niet gebruikte deel wordt dan gebruikt om batterijen te laden. *Tijdens crisis situaties krijgen de kazernes wel onbeperkt electriciteit.*
2. Plaatsing PV, gezien de vraag denken wij aan ca. 15.000 m² PV (max. opbrengst 3.300 kW).
3. Plaatsing kleine windturbines in buitenterrein, uitgangspunt max tiphoogte 25 m om obstructies t.b.v. vliegend materiaal te vermijden. Een windturbine met een tiphoogte van ca. 25 m wekt ca. 25 – 50 kW op. De noodzakelijke tussenafstanden bedragen 100 – 200 m. Bij plaatsing van 10 stuks kan het nachtverbruik worden geleverd.
4. Plaatsing flow batterijen om overschot PV- en windenergie te bufferen, alsmede blokstroom.
5. Toepassen biogas generator voor maximale elektriciteitsvraag, levering biogas via pijpleiding onderzoeken uit nabij gelegen agrarische bedrijven.
6. Brandstofcel op waterstof is wederom niet meegenomen gezien de zeer hoge OPEX (kosten waterstof).

	Mogelijkheid 1	Mogelijkheid 2	Mogelijkheid 3	Mogelijkheid 4
	Toepassen blokstroom i.c.m. flow of Li - batterijen	Biogas generator	Biogas generator i.c.m. flow of Li-batterijen	PV en wind icm flow of Li-batterijen en biogas
CAPEX	Alleen investering batterijen en aansluitkosten nuts	Dimensioneren op piekvraag maakt deze duur	Dimensioneren biogas generator op lager gemiddeld vermogen	Hogere investering
OPEX	Gebruik maken van goedkoop stroom aanbod tijdens de nacht	Kosten biogas is ca. 25% hoger dan aardgas, idem hoge servicekosten	Kosten biogas ca. 25% hoger dan aardgas. Overtollige PV vermogen kan benut worden.	Groene goedkope en eigen opwekking lokaal
Risico	Blokstroom moet beschikbaar zijn	Opslag biogas op terrein	Opslag biogas nabij gebouw	Windturbines en PV drones en sabotage
Ruimte behoefte	Opstelplaats batterijen	Generator en opslag	Generator, opslag en batterijen	Ruimte op terrein kan beperkend zijn voor de operaties
Betrouwbaarheid	Betrouwbaar nuts en batterijen is hoog	Redundant uitvoeren? i.c.m. walaansluiting	Redundant uitvoeren? i.c.m. walaansluiting	Betrouwbaar systeem met eigen opwekking

Deerns Nederland B.V.
Anna van Buerenplein 21F
2595 DA Den Haag
Nederland
+31 88 374 0000
www.deerns.nl

