

PIO- Een dijk van een zonnepaneel

Eindverslag voortraject

Auteurs:

Gerd Van Cauteren | Verhaert Masters in Innovation

Datum: 1 juli 2026

Inhoud

1	Stakeholders	5
1.1	Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO)	5
1.2	De Vlaamse Waterweg nv	5
2	Doelstelling, probleemstelling en uitdaging.....	7
2.1	Doelstelling	7
2.2	Probleemstelling	8
2.3	Uitdaging.....	10
2.4	Vorbereiding in samenwerking met Verhaert	11
2.5	Plan van aanpak	11
3	STAND DER TECHNIEK	13
3.1	Analyse van PV-technologieën	13
3.2	Systeemarchitectuur & Elektrisch plan van het pilootproject (huidige scope) ...	17
3.2.1	Kleinschalige String-configuratie (Basis Scope)	18
3.2.2	Lokale Monitoring & Smart Grid Controller (Basis Scope)	18
3.2.3	Voorziening energieopslag (Optionele BESS)	18
3.2.4	Elektrische Veiligheid & Robuustheid (Basis Scope)	19
3.2.5	Optionele integratie energiegebruikers (Warmte & Licht).....	19
3.3	Systeemarchitectuur & Elektrisch plan van het eventuele scale-up project (eventuele toekomstige scope, dit behoort niet tot de scope van de piloot!)	20
3.3.1	Lange-traject-optimalisatie	20
3.3.2	Netkoppeling & Digitalisering.....	21
3.3.3	Opslagstrategieën (Energy Storage Systems - BESS)	21
3.3.4	Elektrische isolatie	22
3.4	Marktlandschap	23
3.5	Risicoanalyse bij installatie op taludplaten	23
3.6	Analyse van internationale referentieprojecten.....	23
3.6.1	Zon op dijken (Nederland)	23
3.6.2	SolaRoad (Krommenie, Nederland)	24
3.6.3	Wattway (Frankrijk).....	24
3.6.4	Solar Highways (Nederland)	24

3.6.5	Drijvende Zon-eilanden (Andijk) & SeaVolt (België)	24
3.6.6	Project Nexus (VS), Zwitserland & NREL	24
3.7	Conclusie stand der techniek.....	25
4	BEHOEFTEANALYSE	26
4.1	BELANGHEBBENDEN	26
4.2	SPECIFIEKE BEHOEFTEN	26
4.2.1	Behoeftes vanuit het perspectief van de eindgebruiker	27
4.2.2	Functionele Systeemvereisten.....	30
5	ZOEKTOCHT NAAR EEN GEÏNTEGREERD SYSTEEM	37
5.1	SYSTEEMKEUZE: VAN 'ADD-ON' NAAR 'INTEGRAAL'	37
5.2	MINIMALE MEET- EN STUURHARDWARE (I/O-ARCHITECTUUR).....	38
5.3	STURING & DATA-INTEGRATIE	38
5.3.1	Veiligheidssturing.....	38
5.4	PILOOTOPSTELLING & TESTDOELSTELLINGEN	38
5.4.1	Waterveiligheid & Civiele stabiliteit	39
5.4.2	Robuustheid & Materialen.....	40
5.4.3	Energie & Prestaties	41
5.4.4	Installatie & Opschaling.....	41
5.4.5	Beheer & Onderhoud (O&M).....	41
5.4.6	Veiligheid & Omgeving	42
5.4.7	Digitalisering & Cyber	42
5.5	Modulaire Functionaliteit.....	43
5.5.1	Proces & Validatie	43
5.6	CONTACTEN VOOR TOTAALSYSTEEM.....	43
6	Marktconsultatie	44
6.1	Verslag van de marktconsultatie	44
6.2	Verworven inzichten uit de marktconsultatie	45
6.2.1	Welke vooropgestelde behoeften, specificaties of eisen zijn bevestigd door de marktpartijen?.....	45
6.2.2	Welke vooropgestelde behoeften, specificaties of eisen zijn gefinetuned of herwerkt door de marktpartijen?.....	45

6.2.3	Welke vooropgestelde behoeften, specificaties of eisen zijn weerlegd door de marktpartijen als niet mee te nemen in het vervolgtraject?	46
6.2.4	Welke nieuwe, nog niet gekende inzichten heeft de marktconsultatie opgeleverd?	47
7	SAMENVATTING.....	49
7.1	NEDERLANDS	49
7.2	ENGLISH	50
8	APPENDIX.....	52
8.1	Overzicht inschrijvende partijen aan de open marktconsultatie	52
8.2	Een Dijk van een Zonnepaneel - Mentimeter resultaten	52
8.3	Een Dijk van een Zonnepaneel - Mentimeter verslag.....	52

1 Stakeholders

1.1 Vlaams Agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO)

Het Programma Innovatieve Overheidsopdrachten (PIO) van VLAIO heeft als doel de omvangrijke koopkracht van de Vlaamse publieke sector méér strategisch in te zetten voor innovatie. Hiertoe wil het PIO de Vlaamse publieke sector stimuleren en helpen om een deel van hun aankoopmiddelen te besteden aan innovatieve overheidsopdrachten, d.w.z. het laten ontwikkelen en/of valideren van innovatieve oplossingen waarmee ze hun eigen werking en/of publieke dienstverlening kunnen optimaliseren en beter kunnen inspelen op de vele maatschappelijke uitdagingen waarvoor ze staan.

Op die manier wil het PIO bijdragen tot een performantere overheid, competitievere ondernemingen en oplossingen voor uitdagingen van maatschappelijk belang (gezondheid, milieu en energie, veiligheid, ...). Het PIO biedt aan de Vlaamse publieke sector begeleiding en cofinanciering bij de ontwikkeling en validering van innovatieve oplossingen via overheidsopdrachten, voor zover voldoende innovatief en impactvol. Méér informatie over PIO is beschikbaar op [Programma Innovatieve Overheidsopdrachten - PIO | VLAIO](#).

1.2 De Vlaamse Waterweg nv

De Vlaamse Waterweg nv is een extern verzelfstandigd agentschap van de Vlaamse overheid dat verantwoordelijk is voor het beheer en de exploitatie van de bevaarbare waterwegen in Vlaanderen. Het agentschap staat in voor het onderhoud van rivieren en kanalen, de bediening van kunstwerken (sluizen, bruggen, stuwen) en het beheer van de bijbehorende oevers en dijken. Met een netwerk van meer dan 1.000 kilometer aan bevaarbare waterwegen speelt De Vlaamse Waterweg nv een cruciale rol in zowel de logistieke keten als het waterbeheer in Vlaanderen.

Veiligheid en multifunctionaliteit vormen een belangrijk aspect van de bedrijfsvoering. De Vlaamse Waterweg nv zet sterk in op innovatie om haar missie – onder meer het bevorderen van transport over water en het beschermen van Vlaanderen tegen wateroverlast en droogte – te ondersteunen. Voorbeelden zijn initiatieven rond ‘Smart Shipping’, bruggen en sluizen op afstandsbediening, remote-sensing, enz., waarbij de focus ligt op een innovatief en duurzaam gebruik van de infrastructuur. De centrale missie is om de waterwegen uit te bouwen tot een krachtig netwerk dat bijdraagt aan de economie, de welvaart en de leefbaarheid van Vlaanderen.

Het Albertkanaal vormt hierbinnen een belangrijke economische levensader van het Vlaamse waterwegennet. Het strategisch beheer van de oevers biedt unieke kansen

voor meervoudig ruimtegebruik, waarbij de primaire functie van waterkering gecombineerd kan worden met andere maatschappelijke doelen.

In lijn met de Vlaamse klimaatdoelstellingen en de Green Deal heeft De Vlaamse Waterweg nv de ambitie om haar patrimonium in te zetten voor de opwekking van hernieuwbare energie. Het doel is om de eigen infrastructuur (zoals sluizen en gebouwen) en de eigen vloot energieneutraal te maken. Een middel hiertoe is het potentieel van de oeverzones te valoriseren, zonder aldus beslag te leggen op extra open ruimte.

Een concreet voorbeeld van deze ambitie is het [PIO-project 'Een dijk van een zonnepaneel'](#) waarbij er gezocht wordt naar een integrale, innovatieve oplossing om nieuw aan te leggen betonnen taluds te voorzien van zonne-energie, gecombineerd met andere toepassingen (bv. groenbedekking, trap, ...) als onderdeel van de oeeververdediging. Het doel van dit PIO-project is om een proef- of pilootopstelling van geïntegreerde zonnepanelen - gecombineerd met andere toepassingen - in nieuw aan te leggen betonnen taludplaten, over een bepaalde lengte, op te zetten in reële omstandigheden en deze pilootopstelling gedurende een bepaalde periode te testen en te evalueren. Als locatie voor deze pilootopstelling denkt De Vlaamse Waterweg nv aan een locatie op de rechteroever opwaarts de sluis van Hasselt.

Door zonnepanelen naadloos te integreren in de oeverconstructie, zou De Vlaamse Waterweg nv groene stroom kunnen produceren. Dit project illustreert hoe de waterwegbeheerder innovatie inzet om haar assets te transformeren van passieve infrastructuur naar actieve energieleveranciers, met respect voor veiligheid en stabiliteit.

2 Doelstelling, probleemstelling en uitdaging

2.1 Doelstelling

Het doel van het project is het ontwikkelen en implementeren van een geïntegreerd oeververdedigingssysteem dat de primaire functie van waterkering combineert met zonne-energieopwekking, zonder afbreuk te doen aan de stabiliteit, de veiligheid of de scheepvaartfunctie van het Albertkanaal (hierna het “innovatieve concept”).

De kern van het innovatieve concept bestaat uit de transformatie van passieve oeverbekleding (zoals betonplaten of stortsteen) naar een actieve, modulaire 'energie-oever'. Het innovatieve concept vervangt de traditionele toplaag door betonnen elementen waarin fotonvoltaïsche (PV) technologie naadloos is verwerkt. Hierdoor wordt de beschikbare ruimte dubbel benut: als noodzakelijke bescherming tegen erosie en als energiecentrale.

De Vlaamse Waterweg nv wenst nu een pilootopstelling van zo een innovatief concept in reële omstandigheden op te zetten over een bepaalde lengte en deze proefopstelling te testen en te evalueren om zo een beter inzicht te verwerven in eisen, functionaliteiten, rendabiliteit, risico's, randvoorwaarden, toegevoegde waarde etc..

De visie reikt verder dan een pilootopstelling. Als de pilootopstelling de haalbaarheid en schaalbaarheid van het concept kan aantonen, wenst De Vlaamse Waterweg nv eventueel in de toekomst een gestandaardiseerd concept te creëren dat toepasbaar kan zijn langs de waterwegen in beheer bij de waterwegbeheerder. Op die manier zou De Vlaamse Waterweg nv substantieel kunnen bijdragen aan de Vlaamse klimaatdoelstellingen (Green Deal) en zou een significant vermogen aan hernieuwbare energie kunnen worden ontsloten, zonder extra open ruimte in te nemen.

De scope van voorliggend project beperkt zich evenwel tot een pilootopstelling langs het Albertkanaal, aan een locatie op de rechteroever opwaarts de sluis van Hasselt

Daar de waterbeheersing absolute prioriteit heeft boven energieopwekking, moet het innovatief concept voldoen aan strikte civieltechnische normen (o.a. Eurocode 7). De pilootopstelling moet robuust genoeg zijn om zowel de golfslag en de stroming van passerende scheepvaart als de impact van drijfhout te weerstaan. Bovendien moet de pilootopstelling te allen tijde inspecteerbaar blijven en makkelijk in onderhoud zijn.

De beoogde pilootopstelling zal bestaan uit drie geïntegreerde hoofdcomponenten:

- **De civiele drager:** Een modulaire, geprefabriceerde betonnen onderbouw (cassettes) die zorgt voor stabiliteit, robuustheid en erosiebescherming;

- **De energietechniek:** Robuuste PV-modules en vermogenselektronica die bestand zijn tegen maritieme condities (o.a. vocht, impact) en netdiensten kunnen leveren;
- **De digitale laag:** Sensoren en software voor real-time monitoring van zowel de energieproductie als de oeverstabiliteit.

2.2 Probleemstelling



De Vlaamse Waterweg nv beheert een enorm areaal aan oevers die periodiek aan renovatie toe zijn. In de huidige situatie worden deze oevers versterkt met traditionele materialen, zoals beton of asfalt. Deze infrastructuur vervult weliswaar perfect de waterkerende functie, maar vertegenwoordigt qua oppervlaktegebruik een 'dode' zone die geen verdere maatschappelijke meerwaarde biedt.

Tegelijkertijd staat Vlaanderen voor een grote opgave in de energietransitie, waarbij de schaarste aan beschikbare open ruimte één van de remmende factoren is voor de bouw van nieuwe zonneparken. Het onbenut laten van kilometers zongerichte kanaaloever is in dat opzicht een gemiste kans voor meervoudig ruimtegebruik.

Hoewel er in het verleden al experimenten zijn uitgevoerd door andere organisaties met zonne-energie in infrastructuur (bv. SolaRoad fietspaden of geluidsschermen, zie 3.6), vormt de kostprijs een structureel probleem. Eerdere pilotprojecten van andere organisaties kenden installatiekosten die varieerden van € 50.000 tot recenter € 3.200 per meter. Deze bedragen zijn economisch niet rendabel voor een eventuele grootschalige uitrol van het innovatieve conceptidee in vergelijking met de huidige standaard oeverrenovatie. De huidige methoden voor de installatie van zonnepanelen zijn arbeidsintensief, niet voldoende geïndustrialiseerd en vaak niet specifiek ontworpen voor de ruwe omstandigheden langs een drukbevaren kanaal (golfslag, opspattend water, vandalisme).

2.3 Uitdaging

De ontwikkeling van een rendabele en onderhoudsvriendelijke energie-oever vormt een complexe techno-economische uitdaging. Er bestaat momenteel geen kant-en-klaar systeem op de markt dat de robuustheid van waterbouw combineert met de verfijning van zonnetechnologie tegen een concurrerende/betaalbare prijs en met garantie op een rendabele businesscase.

Het ontbreken van een standaardoplossing brengt risico's met zich mee, zowel op technisch vlak (o.a. levensduur in natte omgeving) als op financieel vlak (o.a. investeringskost, terugverdientijd en rendabiliteit). De grootste uitdaging is de ontwikkeling van een gestandaardiseerde oeververdediging die tegelijk dient als zonne-energiegenerator. Dit innovatief concept moet inzetbaar zijn bij zowel nieuwbouw als renovatie, zonder de activiteiten en noden van de kanaalgebruikers te hinderen.

Binnen dit kader zijn drie specifieke complexiteiten geïdentificeerd die gelijktijdig opgelost moeten worden:

- **Rendabiliteit, & schaalbaarheid:** om het innovatief concept eventueel over het werkingsgebied van De Vlaamse Waterweg nv te kunnen uitrollen, dient de rendabiliteit van de investering op termijn en in de vorm van energiewinsten voldoende aangetoond te worden om grootschalige investeringen te kunnen verantwoorden. Voorliggend project betreft enkel een pilootopstelling.
- **Robuustheid & Waterveiligheid:** Het systeem moet functioneren in een agressieve omgeving (C5-M corrosieklasse, IK10 impactweerstand) en mag nooit falen als waterkering (o.a. geen uitspoeling van zand, voldoende oprijfveiligheid).
- **Integratie & Omgeving:** Het innovatief concept moet esthetisch inpasbaar zijn, goed te onderhouden zijn en ruimte bieden aan nevenfuncties zoals o.a. fauna-uittreedplaatsen en groenzones, zonder het modulaire bouwprincipe te verstoren.

Om deze uitdagingen te overwinnen, wil De Vlaamse Waterweg nv een end-to-end innovatief concept ontwikkelen, testen en evalueren. Dit gebeurt via een PIO-project, gericht op het testen van zowel de techniek als de business case in een pilootopstelling in reële omstandigheden.

Noodzaak van een verbeterd systeem De geschetste doelstelling, probleemstelling en uitdagingen vormen het uitgangspunt voor de ontwikkeling van de 'Dijk van een Zonnepaneel'.

2.4 Voorbereiding in samenwerking met Verhaert

De Vlaamse Waterweg nv diende in het voorjaar van 2025 een aanvraag voor de opstart van een [PIO-traject \(Programma Innovatieve Overheidsopdrachten\)](#) getiteld “[Een dijk van een zonnepaneel”](#) in.

Na overleg met PIO werd overeengekomen om de opdracht voor de ontwikkeling en installatie van de pilootopstelling te laten voorbereiden en hiervoor externe expertise in te schakelen. In oktober 2025 hebben PIO en De Vlaamse Waterweg nv Verhaert New Products and Services NV (Verhaert) hiervoor aangesteld.

Doel van de voorbereiding door Verhaert was om (i) de behoeften van De Vlaamse Waterweg nv t.a.v. een pilootopstelling in kaart te brengen, (ii) een analyse van de stand van de techniek en de markt uit te voeren en (iii) een marktconsultatie te organiseren om de behoeften van De Vlaamse Waterweg nv aan de markt voor te leggen en ze op hun haalbaarheid, complexiteit, randvoorwaarden, enz. te laten valideren, en samen met de markt potentiële oplossingsrichtingen te definiëren.

Met de verzamelde inzichten uit dit voorbereidingstraject kan De Vlaamse Waterweg nv dan samen met het PIO een aankoopstrategie definiëren, en vervolgens vertalen naar een goed en realistisch bestek.

Dit rapport is de schriftelijke weerslag van dit voorbereidingstraject.

2.5 Plan van aanpak

Het project doorloopt een gestructureerde studie van 6 tot 9 maanden, die wordt ondersteund door 3-wekelijkse stand-up meetings met de stuurgroep en ad hoc overlegmomenten met het projectteam. Het plan van aanpak is opgedeeld in drie chronologische hoofdfasen:

- **Opstart:** Het traject begint met een plan van aanpak en een project scope en definitie, waarbij het verzamelen van beschikbare informatie en een plaatsbezoek centraal staan.
- **Definiëring & Validering van Behoeft:** In deze fase wordt uitgebreide deskresearch uitgevoerd om mogelijke technologieën (zoals kristalstructuur of dunne film), oplossingen en marktspelers te identificeren. Deze worden samengevat in de ‘Stand der techniek’ Er worden conceptdefinities en een morfologische kaart opgesteld. Aan de hand van werksessies worden de gebruikersbehoeften vertaald naar geprioriteerde user stories, functionele

vereisten en systeemvereisten. Dit resulteert in een voorlopig programma van eisen.

- **Marktconsultatie:** Deze fase start met de voorbereiding, het identificeren van marktpartijen en het versturen van uitnodigingen. Na het bepalen van het protocol vinden de effectieve marktconsultatie en één-op-één gesprekken plaats om de haalbaarheid en oplossingsrichtingen te toetsen. De input uit de markt wordt vertaald naar concrete specificaties, wat leidt tot een update van het programma van eisen.

3 STAND DER TECHNIEK

Verhaert vatte het voorbereidingstraject aan met een diepgaande analyse, in samenwerking met De Vlaamse Waterweg nv, van de beschikbare technologieën voor de integratie van fotonvoltaïsche (PV) systemen in waterbouwkundige infrastructuren en dit op basis van deskresearch over gangbare en nieuwe PV-technologieën, de bestaande infrastructuur van de oevers langsheen de waterwegen en de analyse van relevante pilootprojecten in de markt. Tevens werd een workshop georganiseerd met als doel de behoeften van alle belanghebbenden en de oplossingsrisico's in kaart te brengen. Het doel van deze analyse en van de stand der techniek is om een richtinggevend kader te schetsen waarbinnen marktpartijen hun innovatieve oplossingen kunnen positioneren.

3.1 Analyse van PV-technologieën

Uit deze deskresearch komt naar voren dat de selectie van de PV-technologie nauwkeurig moet worden afgestemd op de mechanische en ecologische condities van betonnen taluds. Hierbij zijn drie ontwerpprincipes leidend:

1. **Flexibiliteit:** De PV-panelen zijn bij voorkeur laag in gewicht en eventueel buigzaam voor naadloze integratie in betonnen taludplaten.
2. **Lichtopbrengst & Reflectie:** De PV-technologie moet optimaal presteren (ook bij diffuus licht) en kan gebruikmaken van de reflectie van het wateroppervlak (albedo-effect) om het rendement te verhogen.
3. **Robuustheid:** PV-panelen moeten bestand zijn tegen erosie, windbelasting en de mechanische krachten van golfslag door passerende schepen.

3.1.1 Vergelijking cel technologieën

In de markt worden drie dominante technologieën onderscheiden, elk met specifieke eigenschappen voor deze toepassing:

Technologie	Rendement (Comm.)	Sterkte	Zwakte
Monokristallijn (PERC/TOPCon)	20-24%	Hoogste opbrengst per m ²	Duurste optie
Polykristallijn	15-18%	Goedkoper, hittebestendig	Lager rendement, bijna uitgefaseerd

Dunne Film (CdTe / CIGS)	13 – 19%	Flexibel, lichtgewicht. Goed bij hoge temperature en diffuus licht	Lagere efficiëntie
-----------------------------	----------	---	-----------------------

3.1.2 Technische Parameters

Voor de dimensionering van een zonnepaneelinstallatie zijn de volgende parameters bepalend:

- **Piekvermogen:** Het maximale vermogen dat een PV-paneel levert onder standaard testomstandigheden (200-230 Wp/m² bij 25°C voor monokristallijne panelen)
- **Efficiëntie:** Het percentage zonlicht dat direct wordt omgezet in elektriciteit. Moderne standaard residentiële PV- panelen behalen ongeveer 20-23%.
- **Temperatuurcoëfficiënt:** Zonnepanelen verliezen rendement bij opwarming (optimaal tussen 20°C en 25°C). Aangezien cel-temperaturen in praktijk 45–70°C kunnen bereiken, heeft thermisch beheer een significante impact op het rendement. De nabijheid van water biedt hier een koelend voordeel.
- **Degradatie:** Zonnepanelen vertonen een jaarlijkse vermogensafname van gemiddeld **0,25–0,5% per jaar**, na een initiële degradatie in het eerste jaar. Typische vermogensgarantie: 80–88% na 25 jaar.

Specifieke opbrengst per jaar in België is typisch 850-1050 kWh/kWp/jaar voor een correct georiënteerde installatie.

3.1.3 Materiaalinnovaties en Robuustheid

Om de levensduur in een publieke en maritieme omgeving te garanderen, verschuift de markt naar gespecialiseerde materialen:

- **Glas-glas modules:** Door de zonnecel in te kapselen tussen twee lagen gehard glas (doorgaans 2x 2mm of 2x 2.5mm) ontstaat een extreem stijf composiet. Tests (IEC 61215) tonen aan dat deze modules puntbelastingen en hagelimpact significant beter weerstaan dan glas-folie modules. Bovendien is de vochtdoorlaatbaarheid nihil, wat delaminatie (het loslaten van elkaar van verschillende lagen) voorkomt.

- **Polymeer Toplagen:** Voor vandalismegevoelige zones zijn er PV-panelen met toplagen van hoogwaardige polymeren (ETFE of polycarbonaat-composieten). Deze bieden een slagvastheid (**IK10+**) die vele malen hoger ligt dan glas, hoewel de UV-stabiliteit op lange termijn (>25 jaar) een aandachtspunt blijft.
- **Anti-Glare Glasbewerking:** Om verblinding van schippers te voorkomen, zijn technieken uit de luchtvaart beschikbaar (diep-geëtst glas, satijnglas of textuurglas, zoals Albarino). Hierbij wordt de glasstructuur fysiek gewijzigd om licht te breken, wat een permanente matte uitstraling geeft die niet slijt.

3.1.4 Omgevings- en Installatieparameters

Bij plaatsing op oevers gelden specifieke randvoorwaarden:

- **Waterveiligheid:** De primaire functie van de oever mag nooit in het gedrang komen.
- **Oriëntatie:** Een zuidelijke oriëntatie onder een hoek van 30° tot 40°, ~35° bij zuidelijke oriëntatie is optimaal in België.
- **Schaduw:** Zelfs beperkte schaduw (bomen, schoorstenen) kan de opbrengst van een hele string panelen sterk verlagen. Micro-omvormers of optimizers kunnen dit deels mitigeren.
- **Ventilatie:** Natuurlijke luchtstroom achter de panelen is cruciaal tegen oververhitting en vermindering van het vermogen. Open onderconstructies zijn beter dan een volledig ingekapseld systeem.
- **Impact op ondergrond:** PV-panelen op palen boven gras worden afgeraden wegens erosiegevaar door lichtgebrek op de grasmat. Plaatsing op verharde vlakken (beton/asfalt) geniet de voorkeur.

3.2 Integratie & Robuustheid

De integratie van PV-techniek in de waterbouwkundige constructie vereist specifieke beschermingsmaatregelen die verder gaan dan standaard toepassingen.

3.2.1 Waterdichtheid (IP-Rating)

De IP-classificatie (Ingress Protection) volgens IEC 60529 is cruciaal. Het eerste cijfer staat voor vaste stoffen (max 6), het tweede voor water (max 9).

Aspect	Zonnepanelen op Boten	Zonnepanelen op Taluds
--------	-----------------------	------------------------

Blootstelling	Zoutnevel, trillingen, incidentele golven.	Constance vochtigheid, erosie, directe golfslag, langdurige onderdompeling.
IP-Rating	Vaak IP65/IP66; IP67 voor kritieke systemen.	Minimaal IP67, IP68+ vereist bij risico op langdurige onderdompeling
Grootste risico	Corrosie en mechanische stress.	Isolatiefouten in natte betonomgeving (lekstromen).

Richtlijnen

IP67

Bescherming tegen tijdelijke onderdompeling (1 m gedurende 30 minuten). Geschikt voor situaties met incidentele overstroming.

IP68

Geschikt voor langdurige onderdompeling. Diepte en duur worden door de fabrikant gespecificeerd.

IP69K

Bescherming tegen hogedrukreiniging met heet water (voornamelijk relevant voor technische installaties of reinigbare componenten).

3.2.2 Verankeringsmethoden

Er worden vier primaire methoden onderscheiden om PV-panelen te bevestigen:

1. **Ingestorte bevestigingspunten (Prefab):** RVS-schroefhulzen of ankerrails worden tijdens de productie in het beton gegoten. Dit is de meest robuuste methode ('purpose-build') omdat de waterdichtheid van het beton behouden blijft en boren achteraf overbodig is.
2. **Chemische/Mechanische verankering:** Bij montage platen. Chemische ankers (hars) bieden hoge stabiliteit en waterdichtheid. Mechanische ankers (spreidbouten) zijn goedkoper maar verhogen het risico op microscheurtjes. *Let op:* In eerdere proefprojecten leidde boorwerk vaak tot isolatieproblemen.
3. **Structurele verlijming:** Innovatieve toepassing (cf. Wattway) waarbij panelen direct op het beton worden gelijmd. Dit elimineert perforatie en verdeelt de belasting, maar vereist een extreem schone ondergrond om delaminatie door temperatuurschommelingen te voorkomen.

3.2.1 Kleinschalige String-configuratie (Basis Scope)

Gezien de beperkte omvang van de pilootopstelling, is een complexe hoogspanningsarchitectuur nog niet noodzakelijk, maar wordt de basis wel gelegd voor schaalbaarheid.

- **Korte DC-Strings (Tot 1000V):** De modules worden in serie geschakeld tot Strings. Hoewel de totale spanning in deze pilootopstelling relatief laag blijft, worden componenten (kabels, connectoren, schakelaars) gekozen die geschikt zijn voor 1000V DC om representatief te zijn voor de eventuele latere opschaling.
- **Centrale Omvormer:** De DC-strings worden samengebracht in een centrale elektriciteitskast op de kruin van de oever. Hier vindt de omzetting naar AC plaats via een string-omvormer. Dit centraliseert de meet- en beveiligingsapparatuur op een toegankelijke plaats.

3.2.2 Lokale Monitoring & Smart Grid Controller (Basis Scope)

De integratie richt zich in deze fase op lokale data-acquisitie en sturing van de kernactiviteit (PV).

- **Smart Grid Controller (Lokale EMS):** De kern van de installatie is een lokale controller (PLC of industriële PC) in de elektriciteitskast. Deze fungeert als het 'brein' en beheert de basis PV-productie. De controller wordt echter zo gekozen dat deze softwarematig kan worden uitgebreid voor het aansturen van optionele componenten (bv. batterij, warmtepomp) indien deze later worden toegevoegd.
- **Data-logging:** Alle relevante parameters (spanning, stroom, temperatuur, irradiatie) worden lokaal gelogd met een hoge resolutie om gedetailleerde prestatieanalyses te kunnen uitvoeren.
- **4G/IoT-Gateway:** De connectie met de buitenwereld verloopt via een beveiligde 4G-router, waarmee data periodiek naar een centraal platform van De Vlaamse Waterweg nv kan worden gestuurd voor visualisatie.

3.2.3 Voorziening energieopslag (Optionele BESS)

De basis-scope voorziet in de *voorbereiding* op opslag, maar niet noodzakelijk in de fysieke plaatsing ervan in de pilootopstelling.

- **Aansluitvoorbereiding:** De centrale elektriciteitskast wordt voorzien van de nodige ruimte en aansluitpunten (AC- of DC-gekoppeld) om in een later stadium snel een 'Battery Energy Storage System' (BESS) te kunnen integreren.
- **Demonstratie-optie (Mobiele Unit):** Indien gekozen wordt voor het effectief plaatsen van opslag, zal gebruik gemaakt worden van een gestandaardiseerde,

mobiele batterijcontainer. Dit vermijdt civiele funderingen en behoudt flexibiliteit.

- **Toepassing (Indien geplaatst):** Bij effectieve plaatsing kan de batterij ingezet worden voor het bufferen van zonne-energie ('Peak Shaving')

3.2.4 Elektrische Veiligheid & Robuustheid (Basis Scope)

Gezien de ligging in de 'splash zone' (vocht, opspattend water) ligt de nadruk op het bewijzen van de robuustheid van de componenten. Dit is een essentieel onderdeel van de basis-scope.

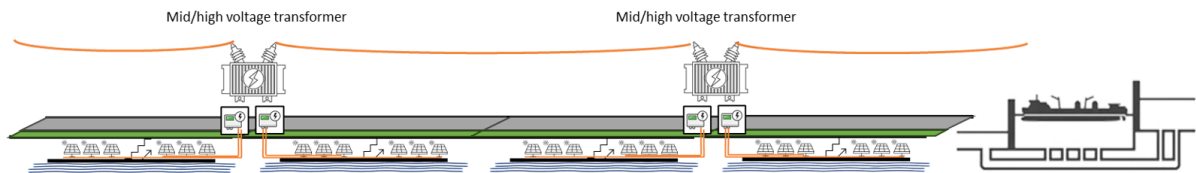
- **Aarding & Potentiaalvereffening:** Het correct aarden van de metalen montageframes en de betonnen dragers is cruciaal om stapspanningen te voorkomen, zeker in een publiek toegankelijke zone (jaagpad).
- **Vochtbestendige Componenten (IP67/IP68):** Alle connectoren, junction boxes en bekabeling die in of nabij het oeverlichaam worden verwerkt, moeten voldoen aan hoge beschermingsgraden tegen vocht en stof (minimaal IP67) en bestand zijn tegen een maritiem milieu (C4/C5-corrosieklasse).

3.2.5 Optionele integratie energiegebruikers (Warmte & Licht)

De fysieke koppeling met andere energieverbruikers wordt gezien als een potentiële uitbreiding om de meerwaarde van de oever te tonen. De piloot bereidt de interfaces voor.

- **Vorbereiding Warmtenet (Optie):** Het ontwerp van de betonnen dragers en de positionering van de PV-panelen houdt rekening met de mogelijke toevoeging van een buizenregister aan de achterzijde (voor 'de-icing' van het fietspad en PV-koeling). De effectieve installatie van pompen en leidingwerk onder het fietspad is een optionele module.
- **Aansluiting Verlichting (Optie):** In de centrale kast wordt een afgaande groep gereserveerd voor de voeding van lokale LED-verlichting. De daadwerkelijke plaatsing van armaturen en het koppelen aan het micro-grid is een optionele uitbreiding om de zelfvoorziening te demonstreren. De aansluiting kan gebeuren op een bestaand verlichtingsnet met bestaande of nieuwe lichtarmaturen, maar kan desgewenst ook gebeuren door een nieuwe applicatie van een LED-lichtlijn te voorzien in het fietspad op het jaagpad.

3.3 Systeemarchitectuur & Elektrisch plan van het eventuele scale-up project (eventuele toekomstige scope, dit behoort niet tot de scope van de piloot!)



3.3.1 Lange-traject-optimalisatie

Voor kilometerslange trajecten is transport op lage AC-spanning (bv. 400 V) economisch inefficiënt wegens aanzienlijke spanningsval en koperverliezen.

De optimalisatiestrategie omvat:

Hoogspannings-DC strings (1000–1500 V DC)

- 1000V is standaard voor residentiële/commerciële toepassingen, 1500V is standaard voor utility-scale toepassingen.
 - Door de DC-stringspanning te verhogen (tot 1000 V of 1500 V), daalt de stroomsterkte bij gelijk vermogen: $I = \frac{P}{U}$.
- Aangezien kabelverliezen proportioneel zijn aan $I^2 R$, nemen de verliezen kwadratisch af met toenemende spanning.
- Bij verdubbeling van de spanning reduceren de ohmse verliezen met een factor vier, wat transport over grotere afstanden mogelijk maakt met kleinere kabeldoorsneden.

Gedecentraliseerde omvormerarchitectuur

String- of clusteromvormers worden strategisch verdeeld over het traject om:

- DC-afstanden te beperken
- Spanningsval te minimaliseren
- Onderhoud te vereenvoudigen
- Redundantie te verhogen

Na omzetting naar AC kan het vermogen via een middenspanningsnet (bv. 15 kV of hoger) verzameld worden voor transport of netinjectie. Hierbij dient een afweging en optimalisatie gemaakt te worden tussen afstand, kabeldiameters aantal omvormers etc.

3.3.2 Netkoppeling & Digitalisering

De integratie met De Vlaamse Waterweg nv omvat:

- **Smart Grid Controller & VPP:** Een centraal systeem dat De Vlaamse Waterweg nv laat fungeren als een Virtual Power Plant, waarbij energieoverschotten slim kunnen worden ingezet.
- **Industrial IoT & Edge computing:** Verschuiving naar intelligente PLC's die lokaal beslissingen kunnen nemen.
- **Cybersecurity (IEC 62443):** Hardware moet 'Secure by Design' zijn (PKI-certificaten, TPM-chips) om te voldoen aan eisen voor kritieke infrastructuur.

3.3.3 Opslagstrategieën (Energy Storage Systems - BESS)

Opslag kan economisch en operationeel interessant zijn voor toepassingen met hoge vermogenspieken (bv. sluisbediening) of beperkte netcapaciteit, evenals voor buffering van walstroomvoorzieningen.

Technologie

De markt verschuift van NMC naar LFP (Lithium-IJzerfosfaat) voor stationaire toepassingen vanwege:

- Hogere thermische stabiliteit
- Lagere kans op thermische runaway
- Lange cyclische levensduur (>4000–8000 cycli bij 80% DoD)
- Afwezigheid van kobalt
- De lagere energiedichtheid is bij stationaire systemen doorgaans geen beperkende factor.

Koeling

Bij grotere systemen (≥ 500 kWh) wordt vloeistofkoeling steeds vaker toegepast.

Voordelen:

- Homogene temperatuurverdeling
- Hogere efficiëntie
- Compactere opbouw
- Mogelijkheid tot hermetische afsluiting tegen zoutnevel

Voor kleinere systemen kan luchtkoeling nog volstaan.

Veiligheid

Moderne BESS-integratie omvat:

- Gasdetectie (off-gassing monitoring)
- Compartimentering per batterijcluster
- Geïntegreerde aerosol- of clean-agent blussystemen

Deze maatregelen verhogen de bedrijfszekerheid in publieke infrastructuur.

Toepassing

- Lokale buffering van hoge vermogenspieken bij sluisbediening
- Ondersteuning van walstroom (elektrische binnenvaart)
- Peak shaving bij beperkte netaansluiting

3.3.4 Elektrische isolatie

Isolatieproblemen zijn de grootste technische barrière in natte omgevingen.

Oplossingsrichtingen zijn:

- **Galvanische scheiding:** Transformatoren om te voorkomen dat fouten in het talud overslaan naar kritieke sluis-infrastructuur.
- **Continue isolatiewaking (IMD):** Real-time monitoring van de weerstand naar aarde.
- **IP68/IP69K Junction boxes:** Gebruik van connectoren uit de offshore-industrie (bestand tegen ammoniak/zoutnevel C5-M).

3.4 Marktlandschap

Er is een divers ecosysteem van specialisten beschikbaar voor dit integrale vraagstuk:

Categorie	Expertise	Relevante Bronnen / Voorbeelden
PV-Integratie	Integratie in bouwmaterialen	Soltech, Ebema, Novotegra, Solarix, NPSP
Onderzoek & Normering	Waterbeheer en dijkstabiliteit	TNO, STOWA (Zon op Dijken), Deltares, EnergyVille, VITO, Jan de Nul, KBIN (Seavolt)
High-Tech Materialen	Weersbestendige materialen	ESA Technology Transfer, IMEC, Fraunhofer Institute
Energiebeheer	Slimme opslag en hubs	ENGIE Laborelec, Phoenix Contact, AxFlow, Croonwolter&dros
Systeemintegratie	Waterbouw & Elektro	Partners uit de bouw- en energiesector

3.5 Risicoanalyse bij installatie op taludplaten

1. **Primaire functie (waterveiligheid):** De waterveiligheid is leidend. Verharde hellingen zijn veiliger voor PV dan grashellingen, omdat lichtgebrek de grasmat doodt en erosie veroorzaakt.
2. **Technische kwetsbaarheden:** Lessen uit 'zonnewegen' (Wattway) tonen aan dat onderschatting van mechanische belasting en vocht leidt tot falen. Elektrische isolatie in nat beton is kritiek.
3. **Economische realiteit:** De businesscase is uitdagender dan bij zonneparken door hogere installatiekosten (factor 3 tot 5) en een mismatch in levensduur tussen beton (>50j) en PV (20j).
4. **Omgeving:** Risico's op vervuiling, geluidsoverlast (windruis) en vandalisme vereisen specifieke ontwerpkeuzes.

3.6 Analyse van internationale referentieprojecten

Onderstaande proefprojecten leveren data over prestaties en valkuilen:

3.6.1 Zon op dijken (Nederland)

- **Resultaat:** Systemen op grashellingen faalden; verharde dijkoppervlakken bleken succesvol.
- **Potentieel:** Elektrisch functioneren was uitstekend; geschat potentieel van 3 GW in Nederland.

- **ROI:** Commerciële systemen claimen een ROI van 8-12% met 15 jaar garantie. Het 'Zon op Dijken' project heeft een lagere ROI omwille van hogere installatiekosten en complexer onderhoud

3.6.2 SolaRoad (Krommenie, Nederland)

- **Resultaat:** Technisch werkend (150.000 fietsers), maar problemen met delaminatie (loslating van lagen) door temperatuur.
- **Opbrengst:** ca. 70–78 kWh/m²/jaar (50% lager dan dak).
- **Les:** Zwaar vrachtverkeer stelt extreme eisen aan de toplaag.

3.6.3 Wattway (Frankrijk)

- **Resultaat:** Beschouwd als mislukking door schade door zwaar verkeer en geluidshinder.
- **Kosten:** €5 miljoen voor 1 km (2800m²). Kosten per Wp bedroegen €17 (factor 13 hoger dan dak).

3.6.4 Solar Highways (Nederland)

- **Resultaat:** Geluidsscherm met bi-faciale modules. Technisch haalbaar en zelfreinigend door regen.
- **Opbrengst:** 325,5 MWh over 18 maanden (ca. 220 MWh/jaar).

3.6.5 Drijvende Zon-eilanden (Andijk) & SeaVolt (België)

- **Andijk:** Zonvolgende eilanden met 22 MWp. Hogere opbrengst door waterkoeling.
- **SeaVolt (Jan De Nul/Tractebel/DEME):** Testen met lichtgewicht platformen van glasvezelversterkt kunststof in de Noordzee. Synergie met windparken en bewijs dat corrosiebestendigheid cruciaal is.

3.6.6 Project Nexus (VS), Zwitserland & NREL

- **Project Nexus (Californië):** Overkapping van kanalen levert een dubbele winst: 13 GW energie én besparing van **63 miljard gallon water** (minder verdamping).
- **Zwitserland (PVSITES):** Gebruik van flexibele, lichtgewicht materialen in publieke infra (parkeergarages) om gebouwen 'energie-plus' te maken.
- **VS Reservoirs (NREL):** Bevestigt dat het **koeleffect** van water de efficiëntie van panelen met **5% tot 15%** verhoogt. Potentieel: 1.476 TWh.

3.7 Conclusie stand der techniek

Op basis van de uitgevoerde deskresearch, de workshops en risicoanalyse kan er worden besloten dat de technologische bouwstenen voor een 'Dijk van een Zonnepaneel' vandaag beschikbaar en volwassen zijn. Zowel de PV-technologie (met name glas-glas en flexibele dunne film), de omvormertechniek (met vlamboogdetectie en Rapid Shutdown) als de betontechnologie voldoen aan de individuele kwaliteitseisen.

De innovatie-uitdaging situeert zich bijgevolg niet in de fundamentele R&D van componenten, maar in de **integrale systeemarchitectuur** en rendabiliteit.

Uit de analyse van internationale referentieprojecten (zoals *Zon op Dijken*, *SolaRoad* en *Wattway*) kunnen drie cruciale succesfactoren worden gedestilleerd voor eventuele opschaling:

1. **Industrialisatie als hefboom voor kostenreductie:** Eerdere pilootprojecten vertoonden een kostprijs tot € 50.000 per meter (handwerk/maatwerk). Recente projecten tonen een daling naar ca. € 3.200 per meter. Opdat het concept schaalbaar en aldus haalbaar zou zijn, wenst de De Vlaamse Waterweg nv deze kostprijs verder te laten dalen. Hiervoor is een fundamentele verschuiving noodzakelijk van manuele installatie naar een geautomatiseerd, machinaal proces (prefab-cassettes of machinale plaatsing).
2. **Primaire functie blijft leidend:** De waterveiligheid mag nooit gecompromitteerd worden. Enkel oplossingen op verharde taluds (beton) worden meegenomen in dit project.
3. **Robuustheid door integratie:** Het falen van eerdere 'zonnewegen' was vaak te wijten aan vochtproblemen en mechanische belasting. Een duurzame oplossing vereist een ontwerp waarbij de PV-module verzonken ligt ('flush') en elektrisch volledig is afgeschermd van de natte omgeving (IP68), met specifieke aandacht voor galvanische scheiding van het energienet.

Samenvattend lijkt op basis van de uitgevoerde stand der techniek, dat de markt rijp is voor een integrale oplossing die waterbouw en energietechniek versmelt, mits de focus ligt op schaalbaarheid, betaalbaarheid, rendabiliteit, onderhoudsvriendelijkheid en op robuuste eenvoud in plaats van complexe, unieke prototypes.

4 BEHOEFTEANALYSE

Op basis van twee workshops, tweewekelijkse online meetings en een behoefteanalyse door Verhaert zijn de noden van de verschillende stakeholders binnen De Vlaamse Waterweg nv in kaart gebracht. Hierbij waren waterbouwkundig ingenieurs, de onderhoudsdienst, inspecteurs, facilitair managers en communicatieverantwoordelijken nauw betrokken. Dit hoofdstuk vertaalt deze behoeften naar concrete functionele en technische systeemeisen voor het pilootproject.

4.1 BELANGHEBBENDEN

De succesvolle integratie van zonnepanelen in een waterkerende oever raakt diverse disciplines. De volgende interne en externe stakeholders zijn geïdentificeerd als cruciale belanghebbenden bij de definitie van de vereisten:

- **Waterbouwkundig Ingenieur:** Verantwoordelijk voor de integriteit van de oever, stabiliteit en waterveiligheid.
- **Facilitair/ Asset Manager:** Verantwoordelijk voor energiebeheer, verduurzaming van de infrastructuur en het beheer van de assets.
- **Onderhoudsdienst & Inspecteurs:** De operationele medewerkers die instaan voor groenbeheer, reiniging en inspectie van de oevers.
- **Financieel Directeur (CFO):** Bewaker van de economische haalbaarheid (Business Case, LCOE).
- **CISO & Data Analyst:** Verantwoordelijk voor cybersecurity (NIS2) en data-integratie.
- **Ecologen & Omgevingsambtenaren:** Bewakers van de biodiversiteit, de waterkwaliteit en de vergunningsvoorwaarden.
- **De Scheepvaart (schippers):** Gebruikers van waterwegen die geen hinder (verblinding) mogen ondervinden.

4.2 SPECIFIEKE BEHOEFTE

De behoeften - of meer specifiek wat het systeem binnen het toepassingsgebied en de randvoorwaarden geacht wordt te doen vanuit het perspectief van de eindgebruiker - werden (niet-exhaustief) vastgelegd in de vorm van een narratief (user stories) met bijhorende systeemvereisten. Beide zijn als volgt opgebouwd:

- 1) **Narratief (User Story):** Algemene behoefte vanuit het perspectief van de eindgebruiker

- **Als:** de gebruiker met specifieke verwachtingen, vanuit wiens perspectief de use case is ontworpen.
- **Wil ik:** de job-to-be-done, wat de gebruiker wenst te bereiken.
- **Zodat:** de beschrijving van het voordeel dat getracht behaald te worden

Tegenover deze algemene behoeften werd beschreven hoe het overkoepelend concept of deelconcept, binnen de gestelde randvoorwaarden, functioneel (en waar nodig technisch) kan voldoen aan de gebruikersbehoeften. Dit omvat de specifieke functionaliteiten en criteria die noodzakelijk zijn om elke user story 'fit for purpose' te realiseren.

- 2) **Systeemvereiste:** beschrijft wat het systeem concreet geacht wordt te doen om aan die behoefte te voldoen - dus welke functionaliteiten, prestaties of regelprincipes noodzakelijk zijn om de user story 'fit for purpose' te realiseren.

4.2.1 Behoeftes vanuit het perspectief van de eindgebruiker

Binnen het toepassingsgebied van dit project draait de behoeftebepaling in essentie rond één centrale doelstelling: het **valoriseren van het onbenutte areaal (de taluds)** door middel van energieopwekking, zonder in te boeten aan **waterkerende betrouwbaarheid** en **nautische veiligheid**. Het beoogde energie-oeverstelsel moet deze dubbelfunctie realiseren zonder de stabiliteit van de oever of de vlotte doorvaart van de scheepvaart te beïnvloeden.

Concreet betekent dit dat het nieuwe systeem, net als de huidige passieve oeververdediging, in eerste instantie twee fundamentele functies moet blijven verzekeren, en daarbovenop een derde functie toevoegt: energieproductie. Deze drie pijlers vormen samen de basis voor de verdere uitwerking van de user stories en de afgeleide systeemvereisten.

1. **Waterveiligheid – stabiliteit van de kering:** De primaire functie van de oever moet te allen tijde behouden blijven om het achterland te beschermen tegen overstromingen. Het nieuwe systeem mag de integriteit van het oeverlichaam niet aantasten. Dit betekent concreet dat de bekleding **erosiebestendig** moet zijn (zanddicht), voldoende eigen gewicht moet hebben om niet op te drijven bij hoogwater, en **inspecteerbaar** moet blijven voor de gebiedsverantwoordelijke, onderdeel van de onderhoudsdienst & inspecteurs.
2. **Omgevingsveiligheid – nautisch en operationeel:** De installatie moet veilig zijn voor de omgeving. Voor de scheepvaart betekent dit dat er **geen hinderlijke reflectie** (verblinding) mag optreden. Voor het beheer betekent dit dat de oever veilig toegankelijk blijft voor onderhoud en dat de constructie bestand is tegen de impact van golfslag en drijf hout.
3. **Energieterugwinning – valorisatie van de oppervlakte:** De installatie moet het invallende zonlicht maximaal omzetten in bruikbare elektriciteit. Hierbij wordt

gestreefd naar een systeem dat niet enkel energie levert, maar ook net ondersteunende diensten (zoals FCR¹) kan bieden aan de eigen infrastructuur van De Vlaamse Waterweg nv.

Binnen deze civieltechnische randvoorwaarden kunnen vervolgens twee mogelijke oplossingsrichtingen worden onderscheiden voor de integratie van zonnepanelen op de oever. Elke configuratie bepaalt in welke mate de zonnepanelen de functie van de huidige toplaag (beton/stortsteen) overnemen.

Deze twee configuraties – een **Opbouw-opstelling** en een **Integrale-opstelling** – vormen samen het hoog-niveau kader waarbinnen de specifieke functionele behoeften verder worden uitgewerkt.

De *Opbouw-opstelling* richt zich op energieopwekking boven op de bestaande oever, terwijl de *Integrale-opstelling* streeft naar een volledige functionele vervanging van de toplaag, met maximale synergie tussen waterbouw en techniek.

1. Opbouw-opstelling – aanvullende laag (Add-on)

In dit scenario worden de zonnepanelen via een frameconstructie **boven op** de bestaande oeverbekleding geplaatst.

De bestaande oeverbekleding blijft daarbij zijn oorspronkelijke waterkerende functie vervullen. De zonnepanelen worden hieraan verankerd en vormen een extra ‘schil’. De voordelen van deze configuratie zijn de ogenschijnlijke eenvoud en de onafhankelijkheid van de waterkering. Het nadeel is echter dat deze constructies vaak kwetsbaarder zijn voor windbelasting en vandalisme.

2. Integrale-opstelling – volledige functionele overname (In-roof)

In de Integrale-opstelling worden de zonnepanelen in een **‘flush’ configuratie** geïntegreerd in of op een betonnen plaat, waarbij ze de klassieke taludbekleding (betonplaten) fysiek vervangen.

De zonnepaneel-elementen in of op de betonnen plaat vormen hierbij zelf de oeververdediging. In deze configuratie neemt het innovatief concept de volledige civiele functie van de oever over: het moet de erosie weren, de grondkerende druk weerstaan en tegelijk energie opwekken. Met andere woorden: de cassette van betonnen plaat met zonnepanelen vervangt de betonnen taludplaten als beschermend schild. Waar de

¹ Automatische reserves zijn nodig om de frequentie van het net te stabiliseren en om black-outs te voorkomen in het geval van een frequentie-afwijking. De **frequentiebegrenzingsreserve (Frequency Containment Reserves - FCR)** reageert automatisch om frequentieafwijkingen te compenseren en de frequentie te stabiliseren op een stationaire waarde. Met behulp van aFRR en mFRR zal de frequentie daarna terug tot de oorspronkelijke waarde worden hersteld.

huidige betonnen platen enkel een passieve bescherming bieden, benut de nieuwe bekleding de blootstelling aan zonlicht actief.

De zonnepaneel-cassette vervult in dit scenario een dubbele rol:

- **Civiel:** ze moet dezelfde robuustheid (IK10), erosiedichtheid en levensduur (>50 jaar voor de drager) bieden als klassiek stortsteen of beton.
- **Energetisch:** ze zet zonlicht om in elektriciteit, waarbij de nabijheid van het water (koeling) wordt benut voor een hoger rendement.

Door deze functies te combineren ontstaat een **integraal energie-oeverstelsel** dat niet enkel de waterveiligheid garandeert, maar ook de 'dead asset' van de oever transformeert tot een duurzame energiecentrale.

Rekening houdend met de duurzaamheidsambities, de algemene verwachte esthetische eisen (integratie met de omgeving) en de lessen uit eerdere erosie-problemen bij opbouwsystemen, kiest De Vlaamse Waterweg nv voor de **integrale oplossing**. Deze configuratie maakt het mogelijk om een robuuste, vandalismebestendige oever te bouwen die industrieel schaalbaar is. Om de civiele betrouwbaarheid te waarborgen, worden strikte eisen gesteld aan de betonnen drager en de verankering, zodat de waterkering gegarandeerd blijft, zelfs als de energietechniek zou falen.

Binnen de integrale oplossingsrichting kunnen twee implementatie-varianten worden onderscheiden, afhankelijk van de gewenste mate van uniformiteit en modulariteit. Beide varianten zijn ontworpen om te voldoen aan de fundamentele eisen van stabiliteit en installatiesnelheid.

Het verschil tussen de twee opties ligt voornamelijk in:

- De **flexibiliteit** om met obstakels en bochten om te gaan
- De integratie van **nevenfuncties** (bv. ecologie, trappen)
- De **standaardisatie** van het productieproces.

Optie 1 – Maatwerk integratie – maximale energieoppervlakte

In deze configuratie wordt gestreefd naar een maximale bedekkingsgraad met actieve zonnecellen. De elementen worden op maat gemaakt om de volledige taludvorm te volgen.

- **Werkingswijze:** Elk betonelement bevat PV-cellen. Afwijkende vormen (in bochten of bij trappen) vereisen specifieke, unieke zonnepanelen ('specials').
- **Voordelen:** Maximale energieopbrengst per strekkende meter.

- **Nadelen:** Hoge productiekosten door gebrek aan standaardisatie, zeer complex vervangingsproces bij defecten, en lastige integratie van bv. fauna-uittreedplaatsen.

Optie 2 – Modulair Grid (MOSA) – het 'Lego-principe'

Deze optie gaat uit van een gestandaardiseerd raster met uitwisselbare cassettes.

Het systeem bestaat uit een uniforme betonnen dragerstructuur (het raster) waarin verschillende functies als 'blokjes' kunnen worden geklikt.

- **Werking:** De basis bestaat uit standaard PV-cassettes. Waar nodig (bijv. voor fauna, trappen, of in schaduwzones) worden deze vervangen door functionele 'dummy-cassettes' (bijv. groen-cassettes, betonnen treden of ruwe antislip elementen).
- **Voordelen:** Hoge graad van industrialisatie (massaproductie van standaardmaten), eenvoudige vervanging bij defecten (< 30 min), en naadloze integratie van ecologische en recreatieve functies zonder het bouwsysteem te onderbreken.
- **Nadelen:** Iets lagere energiedichtheid doordat sommige zones voor nevenfuncties worden gebruikt.

Voorkeur: Gezien de eis voor schaalbaarheid en de noodzaak voor een haalbare investering, geniet **optie 2 (Modulair Grid)** de sterke voorkeur. Dit laat toe om de 'beton-trein' industrieel te laten werken, terwijl lokaal flexibel wordt omgegaan met de specifieke behoeften van mens en dier.

4.2.2 Functionele Systeemvereisten

Nu de integrale configuratie (flush-integratie) en de operationele doelstellingen vanuit het perspectief van de eindgebruiker vastliggen, kunnen we de systeemcomponenten uitwerken in (functionele) systeemvereisten. In het bijzonder wordt de component '**Systeemintegratie**' – verantwoordelijk voor de fysieke versmelting van de waterkerende toplaag en de energietechniek – vertaald naar concrete eisen die beschrijven wat het totaalsysteem moet kunnen om waterveiligheid, robuustheid en energiewaardering te borgen.

De integrale component moet daarbij zowel **civiele stabiliteit** (erosiebestendigheid, gewicht, grondkering) als **energetische optimalisatie** (maximaal rendement, koelingseffect) realiseren, en in noodsituaties (zoals aanvaring of storm) veilig blijven functioneren als primaire waterkering zonder risico op elektrocutie of uitspoeling.

1. Waterveiligheid & Stabiliteit

Gebruikersbehoefte

Als **Waterbouwkundig Ingenieur** wil ik dat de oplossing bestand is tegen de krachten van het water en erosie voorkomt, zodat de primaire functie van de oever (waterkering) nooit in gevaar komt.

Functionele eisen

- Het systeem moet functioneren als een volwaardige oeeververdediging die het achterliggende oeverlichaam afschermt van uitspoeling door regenwater, golfslag en stroming.
- De constructie moet voldoende massa bezitten om weerstand te bieden tegen opdrijven bij hoogwaterstanden.

Prestatie-eisen

- **Levensduur:** De constructieve drager (beton) moet een levensduur hebben van > 50 jaar.
- **Stabiliteit:** De zetting van de constructie mag na 6 maanden niet meer bedragen dan < 10 mm.
- **Zanddichtheid:** Geen uitspoeling van bodemmateriaal via de voegen toegestaan (infiltratiegraad 0%).

Technische eisen

- **Normering:** Het ontwerp moet voldoen aan Eurocode 7 (Geotechniek) en NBN B 15-001.
 - **Betonkwaliteit:** Milieuklasse EE4 (bestand tegen vorst, dooi en dooizouten).
 - **Massa:** Volumieke massa van het beton $\geq 2400 \text{ kg/m}^3$.
-

2. Inspecteerbaarheid

Gebruikersbehoefte

Als **Dijkinspecteur** wil ik dat de oever onder de panelen controleerbaar blijft (visueel of via sensoren), zodat ik inzicht behoud in de staat van de ondergrond en tijdig kan ingrijpen bij verzakking.

Functionele eisen

- Het systeem moet inspectie van de ondergrond mogelijk maken zonder dat demontage van het volledige talud noodzakelijk is.

- Eventuele holtes of verzakkingen onder de bekleding moeten detecteerbaar zijn.

Prestatie-eisen

- **Toegankelijkheid:** Inspectiesystemen of sensoren moeten aanwezig zijn (in overeenstemming met inspectieprotocol van De Vlaamse Waterweg nv).
- **Detectie:** Holtes groter dan 10 cm diepte moeten gedetecteerd worden.

Technische eisen

- **Monitoring:** Integratie van (tilt-)sensoren (hellingsmeters) in de cassettes, eventueel gekoppeld aan andere monitoringsystemen zoals bijvoorbeeld drones.
 - **Data-ontsluiting:** Koppeling van sensordata
-

3. Energieopwekking

Gebruikersbehoefte

*Als **Facilitair Manager** wil ik eigen, duurzame energie opwekken op onze onbenutte taluds, zodat we bijdragen aan de klimaatdoelstellingen en energiekosten besparen.*

Functionele eisen

- Het systeem moet invallend zonlicht omzetten in elektriciteit in een maritieme buitenomgeving, rekening houdend met de oriëntatie van de oever.
- Het systeem moet blijven functioneren bij gedeeltelijke schaduw (bv. door begroeiing of schepen).

Prestatie-eisen

- **Specifieke opbrengst:** Target van 800 kWh/kWp per jaar.
- **Degradatie:** Maximaal 0,5% vermogensverlies per jaar (lineaire garantie).

Technische eisen

- **Technologie:** Glas/Glas - preferentieel monokristallijn N-type/TOPCon of CIGS/Dunne film technologie voor hoge efficiëntie.
- **Spanning:** Hoogspanning DC (1000V of 1500V) om transportverliezen over lange afstanden te minimaliseren. (Niet relevant voor pilootproject, enkel in functie van eventuele opschaling)
- **Koeling:** Geen specifieke eisen, bij integratie in het talud zal aandacht besteed moeten worden aan de koeling. (Normaal is ventilatie aan de achterzijde aan te raden om het vermogensverlies bij opwarming te beperken)

4. Netstabiliteit & Elektrische Veiligheid (enkel in functie van eventuele opschaling)

Gebruikersbehoefte

*Als **Netbeheerder/Asset Manager** wil ik dat het systeem de netfrequentie actief kan ondersteunen (FCR), zodat het net stabiel blijft en we extra inkomsten genereren uit flexibiliteit. Deze behoefte is niet relevant voor het pilootproject.*

Functionele eisen

- Het systeem moet bidirectioneel kunnen communiceren met het net voor balanceren (Frequency Containment Reserve).
- Bij calamiteiten (bv. kabelbreuk of brand) moet het systeem zichzelf onmiddellijk in een veilige modus schakelen.

Prestatie-eisen

- **Reactietijd:** FCR-sturing moet reageren binnen < 200 ms.
- **Afschakeltijd:** Rapid Shutdown moet de spanning reduceren binnen < 30 seconden.

Technische eisen

- **Omvormers:** Geschikt voor ancillary services (netondersteuning) en voorzien van vlamboogdetectie (AFCI).

5. Veiligheid Landzijde

Gebruikersbehoefte

*Als **Onderhoudsman** wil ik dat de veiligheid aan landzijde gewaarborgd blijft (geen struikelgevaar), zodat ik mijn werkzaamheden veilig kan uitvoeren zonder risico op letsel.*

Functionele eisen

- De overgang van het jaagpad naar de energie-oever moet vlak en obstakelvrij zijn.
- Er mogen geen uitstekende kabels, beugels of randen zijn waarover men kan struikelen of waaraan maaimachines blijven haken.

Prestatie-eisen

- **Niveaueverschil:** Maximale tolerantie < 10 mm tussen jaagpad en eerste paneelrij.

- **Obstakels:** Geen delen > 10 mm boven maaiveld.

Technische eisen

- **Ontwerp:** 'Flush' design (verzonken montage).
 - **Randafwerking:** Naadloze betonnen pas-stukken of verzonken kabelgoten met beloopbare deksels.
-

6. Onderhoud & Modulariteit

Gebruikersbehoefte

Als **Asset Manager** wil ik dat defecte onderdelen snel en eenvoudig vervangbaar zijn ('Lego-principe'), zodat de operationele kosten (OPEX) laag blijven en de downtime minimaal is.

Functionele eisen

- Het systeem moet modulair opgebouwd zijn, waarbij individuele defecte cassettes vervangen kunnen worden zonder de stabiliteit van de oever aan te tasten.
- Vervanging moet mogelijk zijn met licht materieel (geen zware kranen nodig).

Prestatie-eisen

- **Vervangingstijd:** Een module moet door 2 personen binnen < 30 minuten vervangen kunnen worden (MTTR).
- **Kosten:** De jaarlijkse onderhoudskosten (O&M) moeten in verhouding blijven met de investeringskost (CAPEX).

Technische eisen

- **Interface:** Gestandaardiseerde mechanische (klik/schroef) en elektrische (plug & play) connecties.
 - **Gewicht:** Hanteerbaar gewicht per module of voorzien van hijsogen voor lichte tilhulp.
-

7. Robuustheid & Vandalisme

Gebruikersbehoefte

Als **Beheerder** wil ik dat het systeem bestand is tegen vandalisme en impact van drijfhout, zodat we geen frequente schadeherstellingen hoeven uit te voeren.

Functionele eisen

- De toplaag van de modules moet bestand zijn tegen harde slagen (bv. hamer, steenworp) en botsingen van drijvend puin.
- Alle componenten moeten bestand zijn tegen een agressief, zout en vochtig milieu ('Splash zone').

Prestatie-eisen

- **Impact:** Geen glasbreuk of functioneel falen bij impact in overeenstemming met de norm.
- **Levensduur:** Geen corrosie op vitale delen gedurende 25 jaar.

Technische eisen

- **Impactweerstand:** Minimaal IK10 in overeenstemming met IEC 62262.
 - **Corrosie:** Alle metalen delen (RVS) en connectoren in overeenstemming met klasse C5-M (Marine).
 - **Glas:** Gebruik van gehard glas (glas-glas modules) of hoogwaardige polymeren.
-

8. Omgeving & Nautische Veiligheid

Gebruikersbehoefte

*Als **Schipper** wil ik geen hinderlijke reflectie ervaren tijdens het varen, zodat de nautische veiligheid op de waterweg gegarandeerd blijft.*

Functionele eisen

- Het oppervlak van de zonnepanelen moet licht absorberen of diffuus verstrooien om verblinding van scheepvaartverkeer te voorkomen.

Prestatie-eisen

- **Glansgraad:** Reflectiewaarde < 30 GU (Gloss Units), vergelijkbaar met water of mat beton.

Technische eisen

- **Toplaag:** Verplicht gebruik van textuurglas, satijnglas of "Deep Black" technieken met anti-reflectiecoating (ARC).
-

9. Ecologie & Passeerbaarheid

Gebruikersbehoefte

*Als **Ecoloog** wil ik dat de oever toegankelijk blijft voor fauna (uitstapplaatsen), zodat dieren niet verdrinken en de ecologische barrièrewerking geminimaliseerd wordt.*

Functionele eisen

- De oever mag geen gladde glijbaan vormen; dieren en mensen moeten eruit kunnen klimmen.
- Er moeten specifieke zones zijn met ruwe structuur of treden.

Prestatie-eisen

- **Frequentie:** Minimaal 1 uitstapplaats per 250 meter (of in overeenstemming met lokale eis).
- **Opstaphoogte:** Treden/ribbels met hoogte < 20 cm.

Technische eisen

- **Stroefheid:** Loopvlakken en uitstapplaatsen in overeenstemming met klasse R11 of SRV > 45 in natte toestand.
- **Materiaal:** Gebruik van PFAS-vrije en chemisch inerte materialen (geen uitloging).

5 ZOEKTOCHT NAAR EEN GEÏNTEGREERD SYSTEEM

Om te komen tot een schaalbare oplossing naar het waterwegennetwerk van De Vlaamse Waterweg nv, volstaat het niet om standaard zonnepanelen op een oever te monteren. Er moet gezocht worden naar een systeemarchitectuur die de strikte waterbouwkundige eisen (Eurocode) integreert met energietechniek en industriële opschaling.

In dit hoofdstuk beschrijven we de vooropgestelde fundamentele systeemkeuzes, de vereiste hard- en software-architectuur en het gedetailleerde validatieplan voor de piloot. Deze aannames en keuzes dienen gevalideerd te worden aan de hand van de marktconsultatie.

5.1 SYSTEEMKEUZE: VAN 'ADD-ON' NAAR 'INTEGRAAL'

Uit de analyse van de stand der techniek en de lessen uit eerdere projecten (zoals *SolaRoad* en *Zon op Dijken*) blijkt dat een klassieke 'opbouw'-methode (panelen op frames boven de dijk) te veel risico's met zich meebrengt qua erosie (afsterven gras door schaduw) en windbelasting.

De Vlaamse Waterweg nv kiest daarom voor een **integraal prefab-concept ('Flush'-integratie)**. Dit houdt in dat de energie-elementen de fysieke toplaag van de oever vormen en niet achteraf worden toegevoegd.

De keuze voor dit integrale systeem wordt gedreven door vier strategische pijlers:

1. **Industrialisatie & Kostenreductie:** Handmatige installatie op een talud kan economisch onhaalbaar blijken. Door te kiezen voor geprefabriceerde 'energie-cassettes' kan de plaatsing (semi-)machinaal gebeuren (het principe van de 'beton-trein'). Dit is de voorkeursroute om de kostprijs significant te doen dalen.
2. **Hydraulische veiligheid:** Een verzonken systeem verstoort de stroming niet en biedt geen aangrijpingspunt voor golven of drijfhout. Het voorkomt turbulenties die de onderliggende zandlaag kunnen uitspoelen.
3. **Robuustheid & Vochttopsluiting:** Kwetsbare elektronica wordt ingekapseld in de betonnen drager of beschermd door robuust glas-glas laminaat. De piloot moet specifiek aantonen of het systeem 'ademend' moet zijn of volledig waterdicht ('potted') om delaminatie te voorkomen.
4. **Esthetiek & Draagvlak:** Een vlakke integratie oogt rustiger en voorkomt visuele onrust van het landschap.

5.2 MINIMALE MEET- EN STUURHARDWARE (I/O-ARCHITECTUUR)

Om het systeem niet alleen fysiek, maar ook digitaal te integreren in het asset management van De Vlaamse Waterweg nv, is een specifieke I/O-architectuur vereist. De installatie fungeert als een ‘Smart Asset’.

De minimale hardware-opzet voor de piloot omvat:

- **Monitoring:** Realtime meting van spanning (V), stroom (A) en vermogen (W). Doorgaans wordt deze info door een standaard inverter voorzien.
- **Edge Controller:** Een lokale industriële controller die de data verzamelt, buffert bij netwerkuitval en via een beveiligde verbinding doorstuurt.

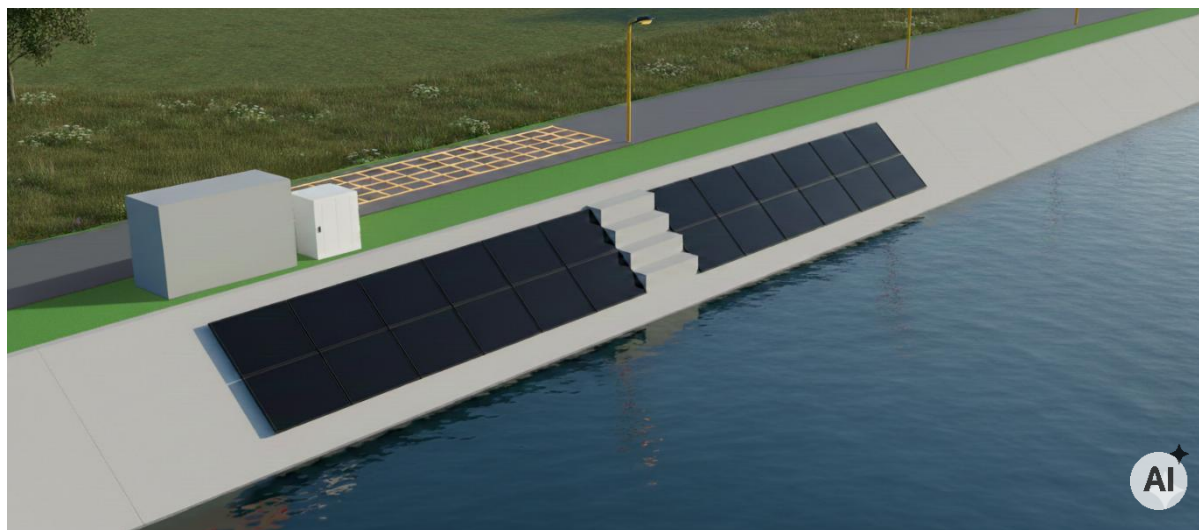
5.3 STURING & DATA-INTEGRATIE

De besturing van het systeem is ontworpen rondom autonome veiligheid en centrale monitoring.

5.3.1 Veiligheidssturing

De veiligheidslogica is fail-safe. Bij detectie van een kritieke fout (bijv. isolatiefout door waterindringing of kabelbreuk) schakelt het systeem zichzelf galvanisch los van het net. Er is geen menselijke tussenkomst nodig om de veilige toestand te bereiken.

5.4 PILOOTOPSTELLING & TESTDOELSTELLINGEN



Door AI gegenereerde illustratie – louter illustratief

Het pilootproject dient als validatiefase om technische en financiële risico's voor eventuele opschaling weg te nemen. Op basis van de risicoanalyse zijn volgende testdomeinen met concrete KPI's gedefinieerd.

5.4.1 Waterveiligheid & Civiele stabiliteit

Het garanderen dat de primaire functie van de oever nooit in het gedrang komt.

- **Erosiebestendigheid:** Uitvoeren van een **infiltratietest** (simulatie zware regen/golfslag) om te bewijzen dat er geen zand uitspoelt via de voegen.
 - Doel: Bewijzen dat afstromend water via de voegen de oever niet aantast.
 - Test: Infiltratietest (simulatie van zware regenval en golfoverslag op de voegen).
 - KPI: Geen uitspoeling van zand of grondlichaam onder de constructie.
- **Stabiliteit:** Monitoring van zettingen gedurende 6 maanden. **Target:** Zetting < 10mm.
 - Doel: Bewijzen dat de constructie niet afschuift en zwaar genoeg is om niet op te drijven.
 - Test: Stabiliteitsmeting (bijvoorbeeld monitoring van zettingen via tilt-sensoren of landmeetkunde).
 - KPI: Zetting < 10mm na 6 maanden; Volumieke massa beton $\geq 2400 \text{ kg/m}^3$.
- **Inspecteerbaarheid:** Validatie via sensoren zonder demontage.
 - Doel: Bewijzen dat de oever onder de panelen controleerbaar blijft.
 - Test: Inspectieproef (visuele controle zonder demontage).
 - KPI: De staat van de ondergrond moet zichtbaar en beoordeelbaar zijn voor de dijkinspecteur.
- **Levensduur Drager**
 - Doel: Bewijzen dat de betonnen constructie langer meegaat dan de zonnepanelen.
 - Test: Review Materiaalkeuze (validatie betonmengsel o.b.v. versnelde verouderingstests).
 - KPI: Theoretische levensduur > 50 jaar onderbouwd (in overeenstemming met Milieuklasse EE4).

- **Opdrijfveiligheid:** Verificatie van de volumieke massa ($\geq 2400 \text{ kg/m}^3$) om weerstand tegen opwaartse waterdruk te garanderen.

5.4.2 Robuustheid & Materialen

Het bewijzen dat materialen bestand zijn tegen de agressieve 'natte' omgeving.

- **Impactweerstand:** Uitvoeren van een **IK10** valproef (stalen bal/hamer) om weerstand tegen vandalisme en drijfhout aan te tonen.
 - Doel: Bewijzen dat het systeem 'vandalismeproof' is en bestand tegen drijfhout.
 - Test: IK10 Impacttest (fysieke valproef met stalen bal/hamer).
 - KPI: Geen glasbreuk of functioneel falen (microcracks toegestaan mits $<5\%$ power loss).
- **Corrosiebestendigheid:** Meting van de isolatieweerstand (**Riso** $> 40 \text{ M}\Omega$) in het natte seizoen om waterdichtheid van connectoren te bewijzen.
 - Doel: Bewijzen dat elektrische verbindingen het maritieme milieu overleven.
 - Test: Isolatiweerstandsmeting (Riso) (continue monitoring in nat seizoen).
 - KPI: Isolatiweerstand blijft stabiel $> 40 \text{ M}\Omega$ (geen vochtindringing).
- **Bio-fouling:** Meten van transmissieverlies door algen/aanslag na 6 maanden.
Target: $< 5\%$ verlies zonder poetsen.
 - Doel: Meten van de impact van de 'natte kant' op lichtdoorlaat.
 - Test: Aangroei-analyse (vergelijking gecoat vs. ongecoat glas na 6 maanden).
 - KPI: Transmissieverlies door vervuiling $< 5\%$ per jaar (zonder poetsen).
- **Diefstalbeveiliging:** 'Red Teaming' test waarbij getracht wordt een module te demonteren met handgereedschap. **Target:** Onmogelijk of $> 30 \text{ min/module}$.
 - Doel: Bewijzen dat panelen niet met standaard gereedschap te stelen zijn.
 - Test: Red Teaming (poging tot demontage met handgereedschap).
 - KPI: Demontage onmogelijk zonder uniek gereedschap OF tijdsduur $> 30 \text{ min/module}$.

5.4.3 Energie & Prestaties

Het valideren van de energieopbrengst in de specifieke context.

- **Yield Validatie:**
 - Doel: Bewijzen dat de oever even goed presteert in vergelijking met een zonnepark. (wenselijk)
 - Test: Continue meting van opbrengst
 - KPI: Specifieke rendement 800 kWh/kWp/jaar.
- **Batterij (Optioneel):** als batterij in scope is: validatie van thermisch beheer in buitenklimaat (RTE > 95%).
 - Doel: Werking in buitenklimaat valideren.
 - Test: Thermische Monitoring (temperatuur en efficiëntie).
 - KPI: Round-trip efficiency > 95%; geen veiligheidsstops.

5.4.4 Installatie & Opschaling

Het bewijzen van de economische haalbaarheid bij eventuele opschaling.

- **Installatiesnelheid:** tijdmeting per strekkende meter tijdens de piloot.
 - Doel: Bewijzen dat industriële plaatsing (prefab) mogelijk is.
 - Test: Tijdmeting (installatietijd per meter tijdens de bouw).
 - KPI: Extrapolatie moet aantonen dat > xx m/dag haalbaar is.
- **Kostprijsvalidatie:** aanleveren van een calculatie voor eventuele opschaling.
Target: onderbouwd pad naar **kostprijs per meter**.
 - Doel: Bewijzen de prijs haalbaar is.
 - Test: Calculatie (analyse kosten 'at scale').
 - KPI: Onderbouwd pad naar een haalbare prijs per meter.

5.4.5 Beheer & Onderhoud (O&M)

- **Vervangbaarheid:** Testen van het 'Lego-principe'. **Target:** Vervanging van 1 module door 2 personen in < **30 minuten**.
 - Doel: Bewijzen dat het 'Lego-principe' werkt.
 - Test: Vervangingstest (willekeurige module wisselen met 2 monteurs).
 - KPI: Doorlooptijd < 30 minuten; geen hak/breekwerk.

- **Veiligheid Personeel**

- Doel: Voorkomen van uitglijden.
- Test: Stroefheidsmeting (natte/ toestand of met aangroeiing van algen).
- KPI: Stroefheidswaarde (SRV) > 45 of R11 klasse.

5.4.6 Veiligheid & Omgeving

- **Elektrische Veiligheid:** Rapid Shutdown test.
 - Doel: Voorkomen van elektrocutie bij calamiteiten.
 - Test: Rapid Shutdown Test (noodstop activeren).
- **Nautische Hinder:** Praktijktest reflectie vanaf het water.
 - Doel: Voorkomen van verblinding schippers.
 - Test: Reflectiemeting (praktijktest vanaf het water).
 - KPI: Geen hinderlijke schittering (Glansgraad < 30 GU).
- **Ecologie:** Cameraval-monitoring van fauna-uittreedplaatsen om gebruik door dieren aan te tonen.
 - Doel: Functionaliteit voor dieren.
 - Test: Cameraval Monitoring (fauna-uittreedplaatsen).
 - KPI: Waargenomen gebruik door amfibieën/klein wild.

5.4.7 Digitalisering & Cyber

- **Smart Monitoring:** Validatie van foutmeldingen.
 - Doel: Integratie in beheersystemen.
 - Test: Data-link Test (foutmelding simuleren).
 - KPI: Foutmelding verschijnt correct.
- **Cybersecurity:** Security audit van de architectuur in overeenstemming met **NIS2** en industriële cybersecurity standaarden
 - Doel: Weerbaarheid tegen hacks (NIS2).
 - Test: Security Audit van systeemarchitectuur en netwerkconfiguratie.
 - KPI: NIS2 conforme cybersecuritymaatregelen

5.5 Modulaire Functionaliteit

- **Nevenfuncties:** Fysieke belastingstest op niet-PV modules (uitstapplaatsen/groendelen/trappen). **Target:** Draagkracht ≥ 2 kN.

5.5.1 Proces & Validatie

- **Vergunbaarheid:** Door De Vlaamse Waterweg nv. Het samenstellen en proef-indienen van een omgevingsvergunningsdossier ('Learning by doing') om juridische hiaten te identificeren.
 - Doel: Testen of het systeem juridisch vergunbaar is.
 - Test: omgevingsvergunning.
 - KPI: Dossier ontvankelijk en volledig verklaard; hiaten geïdentificeerd.

5.6 CONTACTEN VOOR TOTAALSYSTEEM

De realisatie van dit integrale systeem vereist een multidisciplinaire aanpak. De marktconsultatie richt zich daarom op verschillende benodigde disciplines en op de brug slaan tussen deze disciplines:

1. **Waterbouwers/Betonfabrikanten:** Voor de stabiliteit, prefab-productie en plaatsing.
2. **PV-Technologiepartners:** Voor de integratie van robuuste zonnecellen, coatings en elektronica.
3. **Systeemintegratoren:** Voor de elektrische koppeling, monitoring en data-integratie.

6 Marktconsultatie

6.1 Verslag van de marktconsultatie

Op 22 april 2026 werd in Hasselt een open marktconsultatie georganiseerd door De Vlaamse Waterweg nv, VLAIO en Verhaert. Deze bijeenkomst was gericht op het valideren van concepten en het capteren van innovaties voor het PIO-project 'Een dijk van een zonnepaneel'. De uitnodiging voor deze marktconsultatie vind je via [deze link](#).

Voor deze marktconsultatie schreven **24 organisaties** zich in, wat resulteerde in een brede, multidisciplinaire vertegenwoordiging van de volledige waardeketen. Aanwezig waren onder meer civiel- en waterbouwbedrijven (aannemers oeververdediging), betonfabrikanten, PV-specialisten en systeemintegratoren, alsook ingenieurbureaus en kennisinstellingen.

Het programma begon met een plenaire sessie waarin De Vlaamse Waterweg nv en VLAIO de context en de visie toelichtten. Vervolgens presenteerde Verhaert in detail de vijf kernuitdagingen van het project (civiele techniek, PV-robuustheid, smart monitoring, veiligheid en business case).

De marktpartijen werden interactief bevraagd door middel van de tool **Mentimeter** tijdens de plenaire sessie, wat directe kwantitatieve en kwalitatieve data opleverde over de haalbaarheid van de eisen. Daarnaast vonden er **plenaire en thematische groepsdiscussies** plaats, gevolgd door **optionele 1-op-1 gesprekken** om dieper op specifieke oplossingsrichtingen in te gaan.

Er werden uiteenlopende soorten vragen gesteld, waaronder:

- Hoe beoordeelt u de technische haalbaarheid van civieltechnische eisen zoals 50 jaar levensduur, maximale zetting en 100% zanddichtheid?
- Wat is de beste aanpak voor de Return on Investment (ROI) bij het verschil in levensduur tussen beton en PV-panelen?
- Welke prestatie-eisen (bijv. 1000 kWh/kWp, degradatie, koeling) zijn realistisch in een maritieme, niet-geventileerde 'flush' omgeving?
- Wat is de meest rendabele risicostrategie tegen vandalisme en de impact van drijfhout?
- Wat zijn de geschatte financiële meerkosten (in %) van maritieme PV-hardware en modulaire prefabbeton ten opzichte van traditionele systemen?

6.2 Verworven inzichten uit de marktconsultatie

6.2.1 Welke vooropgestelde behoeften, specificaties of eisen zijn bevestigd door de marktpartijen?

- **Levensduur en betonkwaliteit:** Er is een zeer sterke consensus in de markt dat een levensduur van meer dan 50 jaar voor de betonnen drager zeer goed haalbaar is. Ook de strenge vereisten rond een betonmassa van minimaal 2400 kg/m³ en milieuklasse EE4 (vorst/dooizouten) worden unaniem gesteund.
- **Modulariteit (MOSA) & Lego-principe:** De markt kiest resoluut voor een Modulaire Open Systeemarchitectuur waarbij de civiele betonnen drager en de energietechniek (zonnepanelen) fysiek gescheiden blijven. Dit vergemakkelijkt periodiek onderhoud en vervanging.
- **Waterdichtheid kabels:** Een waterdichte en onzichtbare integratie (IP68) van DC-kabels, connectoren en goten in de drager wordt als zeer realistisch en haalbaar beoordeeld.
- **Behoud van waterkerende stabiliteit:** Er is een massale consensus dat bij het verwijderen van een paneelmodule voor onderhoud of vervanging, de primaire waterveiligheid van de oever volledig gegarandeerd blijft.

6.2.2 Welke vooropgestelde behoeften, specificaties of eisen zijn gefinetuned of herwerkt door de marktpartijen?

- **Zetting en Infiltratie:** De strikte absolute eis van een maximale zetting van minder dan 5 mm na 6 maanden zorgt voor twijfel. Men stelt voor dit eerder functioneel te formuleren en actief te monitoren. Tevens wordt voor de 100% zanddichtheid geadviseerd om deze te valideren via een fysiek testprotocol met golfslagsimulaties.
- **Energieopbrengst (Target):** De vooropgestelde energieopbrengst van 1000 kWh/kWp is te ambitieus voor een parallelle montage op een talud. De specificatie wordt door de markt bijgesteld naar een **realistischer richtgetal van maximaal 800 kWh/kWp**.
- **Tolerantie 'Flush' design:** Een vlakke integratie met een niveauverschil van maximaal 10 mm is lokaal (tussen aanpalende cassettes) prima haalbaar, maar de eis om dit over het volledige, kilometerslange traject te garanderen is volgens de markt onrealistisch door zettingen over tijd.
- **Vandalismebestrijding:** In plaats van te investeren in extreem dure onbreekbare materialen (preventie), wordt de eis gefinetuned naar een **'herstel-strategie'**

(veerkracht). Men accepteert incidentele breuk door steenworp en focust zich op snelle en goedkope vervanging.

- **Vervanging (O&M):** Een hersteltijd (MTTR) van minder dan 30 minuten per module met twee personen wordt haalbaar geacht, maar het zonder kranen (met licht handgereedschap of zuignappen) manipuleren van modules is in de praktijk afhankelijk van de integratiemethode en modulegewichten (ca. 30 kg).
- **Kopbalk-integratie:** Het ontwerp van de cassettes is zodanig gefinetuned dat de taludplaten onafhankelijk van de kopbalken behandeld of vervangen moeten kunnen worden.
- **Kabelmanagement in beton:** In plaats van standaard bekabeling is extra aandacht vereist voor het kabelmanagement. Kabels moeten specifiek beschermd worden tegen degradatie door langdurig vocht en de mechanische belasting *binnenin* de betonnen drager.
- **Verschuiving naar Life Cycle Cost (LCC):** Terwijl initieel sterk naar de investeringskosten (CAPEX) werd gekeken, is de eis gefinetuned naar de totale levenscyclus. De geschatte meerkost van prefabbeton (ca. 32%) moet door marktpartijen verantwoord worden via een lagere *Life Cycle Cost* dankzij lagere operationele kosten (OPEX), een snellere installatie en hogere energiebaten

6.2.3 Welke vooropgestelde behoeften, specificaties of eisen zijn weerlegd door de marktpartijen als niet mee te nemen in het vervolgtraject?

- **Ingebouwde sensoren en realtime-monitoring:** Sensoren en realtime-monitoring (in iedere paneelmodule) zijn **niet wenselijk voor de marktpartijen omwille van de complexiteit in uitvoering en de te hoge investering**. Men geeft sterk de voorkeur aan goedkopere, externe detectietechnologieën (zoals drones of radar) of slechts steekproefsgewijze sensoren in plaats van dure, complexe plaatsing op paneelniveau.
- **Actieve koeling en open onderconstructies:** De stelling dat '**open onderconstructies beter zijn dan een volledig ingekapseld systeem**', is weerlegd. Zonnepanelen hoeven niet via luchtopeningen geventileerd te worden, maar kunnen evengoed direct op de betonnen dragers gemonteerd worden. Het **beton functioneert namelijk 's nachts als passieve warmtebuffer** en zorgt op die manier voor voldoende koeling van de zonnepanelen.
- **Extra energieopbrengst door waterreflectie:** De aanname dat men substantieel kan gebruikmaken van reflectie van het wateroppervlak (het Albedo-effect), wordt weerlegd. **Water reflecteert te weinig**, waardoor er geen noemenswaardige extra energieopbrengst door reflectie behaald zal worden.

- **Fysieke, manuele inspectieluiken:** Het bouwen van fysieke inspectieluiken om holtes in de dijk te monitoren wordt volledig weerlegd; de markt waarschuwt dat dergelijke luiken de oeverstructuur te veel verzwakken.
- **Dure gespecialiseerde cellen of snel-sluitingen:** Op maat gemaakte, dure dunne-film (CIGS) of lichtgewicht elementen met high-end plug-and-play connectoren zijn verworpen voor dit traject. Men kiest volop voor **standaard Tier-1 panelen** bevestigd met **standaard RVS-bouten** om de opstartkosten rendabel te houden.
- **De term 'Lichtgewicht':** Marktpartijen adviseren expliciet om de term 'lichtgewicht' volledig uit de specificaties te schrappen, aangezien dit direct botst met de massa-eis van minimaal 2400 kg/m³ en de noodzakelijke civiele stabiliteit.
- **Batterijopslag (BESS) voor de piloot:** Hoewel energieopslag technisch interessant is, blijkt uit de financiële analyse dat dit de terugverdientijd te sterk verzwakt (> 20 jaar). Een batterijsysteem is daarom afgeraden als kernonderdeel en mag hooguit als een *strikt optionele* module behandeld worden om de initiële business case niet in gevaar te brengen

6.2.4 Welke nieuwe, nog niet gekende inzichten heeft de marktconsultatie opgeleverd?

- **'Glint & Glare test' voor nautische veiligheid:** Om hinderlijke reflectie vanop het water exact te meten en de veiligheid van schippers te borgen, wordt in de marktconsultatie verwezen naar de uitvoering van een 'Glint & Glare test' (in de verslagen omschreven als *glare-studies*).
- **Value Stacking is vereist:** Het pure opwekken van elektriciteit is financieel niet toereikend om de zware bouwkosten (TVT < 15 jaar) te dekken. De markt introduceerde het inzicht van "value stacking": het systeem moet andere (piek)belastingen opvangen. Een voorbeeld hiervan is een oost-west oriëntatie om stroom te leveren exact op het moment dat een nabijgelegen sluis piekstroom vraagt.
- **Schaalbaarheidshefboom voor de kosten:** De maritieme PV-hardware vormt een meerkost van ca. 220% ten opzichte van traditionele parken, en prefab oeverbekleding kost ca. 32% extra door de vereiste maatvastheid. De absolute voorwaarde om dit systeem op schaal rendabel te krijgen, ligt bij **mallenoptimalisatie** (het inzetten van slechts één basismal voor de grootste plaat) en de industriële 'beton-trein' installatiesnelheid op de werf.
- **Zelfreinigend & 'Low-profile' hoek:** Een hellingshoek van 30 tot 45 graden brengt twee ongekende voordelen met zich mee. Ten eerste zorgt het ervoor dat

de panelen grotendeels **zelfreinigend** worden door regenwater, waardoor dure vuilafstotende coatings vaak overbodig worden. Ten tweede zijn de panelen onder deze hoek optisch veel minder zichtbaar vanaf het jaagpad, wat de psychologische prikkel tot vandalisme organisch verlaagt.

- **Noodzaak van een voorafgaande prototype-testfase:** Een nieuw inzicht voor de projectaanpak is dat, vóór men overgaat tot een grootschalige piloot of implementatie, er specifieke *versnelde verouderingstesten* en *windlasttesten* op een representatief prototype moeten gebeuren. Dit is cruciaal om onvoorziene economische risico's op vroege reparaties af te dekken

7 SAMENVATTING

7.1 NEDERLANDS

Het project 'Een dijk van een zonnepaneel' heeft als doel de transformatie van passieve oeververdediging naar actieve, modulaire 'energie-oever'. De Vlaamse Waterweg nv ambieert hiermee hernieuwbare energie op te wekken op haar eigen patrimonium zonder extra open ruimte in te nemen. De kern van de innovatie ligt in een integraal prefab-concept waarbij zonnepanelen naadloos verwerkt zijn in betonnen taludplaten.

Uit de behoefteanalyse en de uitgebreide marktconsultatie zijn de volgende kerneisen en actuele marktinzichten gedestilleerd:

- **Waterveiligheid als prioriteit:** Het systeem moet functioneren als volwaardige oeververdediging en voldoen aan Eurocode 7 en strikte normen voor zanddichtheid, waarbij de primaire functie van de kering nooit in het gedrang mag komen.
- **Modulaire architectuur (MOSA):** Er is een sterke voorkeur voor een 'Lego-principe' waarbij de PV-modules en de civiele betonnen drager fysiek ontkoppeld zijn voor eenvoudig onderhoud en vervanging binnen 30 minuten.
- **Robuustheid in maritiem milieu:** De installatie moet bestand zijn tegen extreme condities, met onder meer een corrosieklasse C5-M en een beschermingsgraad van IP68 voor bekabeling. Tegen vandalisme (IK10 impact) adviseert de markt een kostenefficiënte herstelstrategie in plaats van investeringen in extreem dure, onbreekbare materialen.
- **Realistische Technologie- en Prestatiekeuzes:** De markt kiest voluit voor rendabele standaard topklasse (Tier-1) PV-componenten, en passieve koeling via de betonnen dragers, in plaats van zwaar maatwerk. Het beoogde opbrengstrendement is bijgesteld naar een realistischer target van maximaal **800 kWh/kWp per jaar**, mede door het ontbreken van wezenlijke extra reflectie (Albedo) via het water.
- **Slimme, Externe Monitoring:** In plaats van dure, complexe sensoren in iedere paneelmodule te integreren, gaat de voorkeur uit naar externe detectietechnologieën (zoals drones of radar) of steekproefsgewijze sensoren. Voor de elektrische veiligheid is de integratie van vlamboogdetectie (AFCl) en een Rapid Shutdown-functionaliteit verplicht.
- **Nautische en omgevingsveiligheid:** Om verblinding van schippers en recreanten op het jaagpad absoluut te voorkomen, is een verplichte 'Glint & Glare test' vereist die een maximale glansgraad van minder dan 30 GU aantoonst.
- **Economische haalbaarheid en Value Stacking:** Om op schaal rendabel te zijn, verschuift de focus van louter investeringskosten (CAPEX) naar de totale

levenscycluskosten (**Life Cycle Cost**). Mallenoptimalisatie en 'beton-trein' industrialisatie zijn absolute vereisten. Daarnaast is **Value Stacking** noodzakelijk (bijv. stroomafname afstemmen op piekbelastingen van sluizen), terwijl batterijopslag (BESS) als een strikt optionele module wordt beschouwd om een terugverdientijd van minder dan 20 jaar te kunnen waarborgen.

7.2 ENGLISH

The 'Een dijk van een zonnepaneel' project aims to transform passive bank protection into active, modular 'energy banks'. De Vlaamse Waterweg nv intends to use its assets for renewable energy generation without consuming additional open space. The core innovation lies in an integrated prefab concept where solar panels are seamlessly incorporated into concrete slope plates.

The following key requirements and actual market insights were established following the needs analysis and market consultation:

- **Water Safety Priority:** The system must function as a full-fledged bank defense compliant with Eurocode 7 and strict sand-tightness criteria, ensuring the primary flood defense function is never compromised.
- **Modular Architecture (MOSA):** There is a clear preference for a 'Lego principle' where PV modules and the civil carrier are physically decoupled to allow for easy maintenance and replacement within 30 minutes.
- **Robustness in Maritime Environments:** The installation must withstand extreme conditions, including a C5-M corrosion class and an IP68 protection rating for all electrical components. Regarding vandalism (IK10 impact), the market advises a cost-effective resilient repair strategy over investing in extremely expensive unbreakable materials.
- **Realistic Technology and Performance Choices:** The market favors cost-effective, standard top-tier (Tier-1) PV components and passive cooling through the concrete carriers, rather than heavy custom-made solutions. The expected energy yield target is adjusted to a more realistic maximum of **800 kWh/kWp per year**, partly because the water surface does not provide substantial extra reflection (Albedo).
- **Smart, External Monitoring:** Instead of integrating expensive and complex sensors into every panel module, the preference shifts towards external detection technologies (such as drones or radar) or sample-based sensors. For electrical safety, the integration of arc fault circuit interrupters (AFCI) and Rapid Shutdown functionality is mandatory.

- **Nautical and Environmental Safety:** To prevent the blinding of skippers and recreational users on the towpath, a mandatory 'Glint & Glare test' proving a maximum gloss level of less than 30 GU is required.
- **Economic Viability and Value Stacking:** To be profitable at scale, the focus shifts from capital expenditure (CAPEX) to **Life Cycle Cost (LCC)**. Mold optimization and 'concrete-train' industrialization are absolute prerequisites. Furthermore, **Value Stacking** is required (e.g., aligning power generation with lock peak loads), while battery storage (BESS) is treated as a strictly optional module to ensure the payback period remains under 20 years.

8 APPENDIX

8.1 Overzicht inschrijvende partijen aan de open marktconsultatie

Volgende organisaties hebben zich ingeschreven voor de open marktconsultatie dd. 22 april 2026:

EIFFAGE ENERGIE SYSTEMES - INFRA
Algemene Ondernemingen Soetaert
Artes Prefab *
Artes Roegiers *
Belga Solar *
BETONFABRIEK DE BONTE EN VAN HECKE
BOSKALIS NEDERLAND *
CimPro *
Connectum *
DEME Dredging
Ebema *
Eco-Beton *
Extra-Power *
EXTRA-VOLT *
Haedes
Herbosch-Kiere
Insaver *
Marten Groep *
Perpetum Energy
S.B.E. *
Solora *
Soltech *
UHasselt - Instituut voor Materiaalonderzoek

De organisaties aangeduid met een * hebben eveneens deelgenomen aan de optionele één-op-één gesprekken.

8.2 Een Dijk van een Zonnepaneel - Mentimeter resultaten

8.3 Een Dijk van een Zonnepaneel - Mentimeter verslag