stowa

ZON OP DIJKEN

VERKENNEND EN ONTWERPEND VOORONDERZOEK

RAPPORT 2018 76

ISBN 978.90.5773.836.4

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEUR Jan Maurits van Linge (Terra Incognita)
Frank Stroeken (Terra Incognita)
Jan Valk (RHDHV)
Hermine der Nederlanden (zzp-er)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Hans de Neve (SEAC)
Menno van den Donker (SEAC)
Bob Roessink (RWS)
Nienke Siekerman (RWS)
Pascal Bos (gem. Amsterdam)
Wiep Folkerts (ECN)
Teun Wendt (ws. Zuiderzeeland)
Yasmin Joenje (ws. Zuiderzeeland)
Johan Jonker (HHNK)
Bram Konneman (Waternet)
Mattijs Erberveld (RWS)
Regina Havinga (RWS)
Koos Saathof (RWS)
Harm Rinkel (RWS)
Gerard Harmsen (RWS)
Fedde Ruijl (RWS)
Yede Bruinsma (WSHD)
Jan Overweel (WSHD)
Evert Swart (Ws. Scheldestromen)
Jelle-Jan Pieterse (Ws. Scheldestromen)
Joep van Doornik (WSVV)
Ingrid van Grootveld (HH Rijnland)
Joris de Vos (HH Rijnland)
Peter Willems (Ws. Rivierenland)
Rob Vos (Ws. Rivierenland)
Bert Bulsink (Ws. Noorderzijlvest)
Louis Engelbert (prov. Zeeland)
Dirk Minnema (prov. Zeeland)
Melanie Koning (prov. Flevoland)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau
STOWA STOWA 2018-76
ISBN 978.90.5773.836.4

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

Zonne-energie op dijken kan een relevante bijdrage leveren aan de nationale energievraag. Dit rapport beschrijft onder welke voorwaarden zonne-energie op dijken opgewekt kan worden.

Nederland staat voor een grote opgave. In 2050 willen we energieneutraal zijn, de waterschappen al in 2025. Naast windenergie is ook de zon een belangrijke bron van duurzame energie. Het nadenken over meervoudig ruimtegebruik waarbij ruimtelijke kwaliteit van het landschap en een prettige leefomgeving worden behouden is kenmerkend voor deze tijd.

De energietransitie zal de leefomgeving zichtbaar beïnvloeden. In ons dichtbevolkte land betekent dit het combineren van de opwekking van zon- en windenergie met functies als wonen, werken, infrastructuur, landbouw, natuur en water.

Tegen deze achtergrond is het relevant om de mogelijkheden te verkennen om dijken te benutten voor de opwekking van zonne-energie. Dijken hebben immers in de eerste plaats als doel om ons land te beschermen tegen overstromingen. Bovendien hebben dijken vaak grote landschappelijke, cultuurhistorische en ecologische waarden. Het verantwoord omgaan met deze waarden bij het gebruiken van dijken voor zonne-energie is dan ook een grote uitdaging. Daarbij geldt een aantal principes vanuit waterveiligheid, vanuit energieopwekking en vanuit ruimtelijke kwaliteit. Deze principes worden in dit rapport uitgewerkt voor de meest kansrijke dijktypen. Om te beoordelen of installaties voor zonne-energie aan de gestelde voorwaarden voldoen zullen zij nog uitgebreid getest moeten worden.

De provincie Flevoland biedt graag ruimte voor slimme experimenten, daar zijn we trots op. De pilot met de Knardijk kan een stap vooruit betekenen. Onze dijken vormen een belangrijk kader in ons ingenieurslandschap van lange lijnen, openheid en ruimte. We koesteren het verleden en het ontwerp van ons landschap, maar staan altijd open voor nieuwe ideeën. Ook de nieuwe ‘ingenieursvragen’ zoals zonne-energie op dijken, passen bij Flevoland. Wij kijken met enthousiasme en grote aandacht naar de mogelijkheden die de markt presenteert.

Jan de Reus
Gedeputeerde Flevoland

ir. Joost Buntsma
STOWA

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de ‘kennisvragen van morgen’ – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

ZON OP DIJKEN
VERKENNEND EN ONTWERPEND VOORONDERZOEK

INHOUD

TEN GELEIDE
DE STOWA IN HET KORT

1 INLEIDING & AANLEIDING 1

2 ZONNE-ENERGIESYSTEMEN 4
2.1 De techniek voor zonne-energie winning 4
2.2 Kansrijke PV-systemen 4

3 PRINCIPES VOOR ZON OP DIJKEN 7
3.1 Principes voor waterveiligheid en dijkbeheer 7
3.1.1 De fundering van PV-systemen is erosiebestendig 8
3.1.2 PV-systemen beïnvloeden waterdoorlatendheid van de dijk niet 9
3.1.3 Bij toepassing van PV-stystemen blijft een sterke grasmat behouden tenzij het PV-systeem een robuuste vervanging is voor een sterke grasmat 10
3.1.4 PV-systemen op het buitentalud zijn golfslagbestendig en remmen bij voorkeur de golfslag 11
3.2 Principes voor Zonne-energiesystemen 12
3.3 Principes voor PV-systemen en ruimtelijke kwaliteit 13
3.4 Principes voor PV-sytemen en ecologie 15
3.5 Generieke integrale principes - 10 gouden regels voor zon op dijken 16

4 INPASSING ZON OP DIJKEN 18
4.1 Drie opgaven voor Zon op dijken 18
4.2 Kansrijke Zon-op-dijk-typen 19
4.3 Drie concepten en voorbeelden voor Zon op Dijken 23
4.3.1 Bestaande dijk en PV-systemen 24
4.3.2 Voorbeelddijk: Wakerzeedijken van Noord en Zuidwest Nederland 25
4.3.3 Mogelijkheden PV-Systemen bij dijkversterking 28
4.3.4 Voorbeelddijk: Meerdijken van het oude en het nieuwe land 30
4.3.5 Nieuwe energiedijken 33
4.3.6 Voorbeelddijk: Gesloten dammen 35

5		OPBRENGSTPOTENTIEEL ZON OP DIJKEN	39
	5.1	Fictief potentieel zon op dijken	39
	5.2	Reëel potentieel kansrijke dijken	41
	5.3	Conclusie opbrengst en vergelijking	41
6		WENSEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	45
	6.1	Onderzoeksvragen voor standaard PV-systemen: veiligheid, constructie en beheer & onderhoud	45
	6.2	Onderzoeksvragen Ruimtelijke kwaliteit	47
	6.3	Onderzoeksvragen voor innovatieve PV-systemen	48
	6.4	Vervolg in het veld	48
7		PROEFTUIN KNARDIJK	49
	7.1	Analyse Knardijk	49
	7.2	Ontwerpprincipes Pilot Knardijk met concept inpassing op bestaande dijk met huidige stand van de techniek	50
	7.3	Proeftuin	51
8		CONCLUSIES	52
BIJLAGE 1		Zonne-energiesystemen	57
BIJLAGE 2		Quickscan Zonne-energiesystemen en veiligheid per dijktype - bij de huidige stand van de techniek	62
BIJLAGE 3		Voorbeeld berekening	65
BIJLAGE 4		Verslag expertsessie 28 juni 2018	68
BIJLAGE 5		Bronnen	69

1

INLEIDING & AANLEIDING

DE GROTE VERBOUWING VOOR DE ENERGIETRANSITIE

Anno 2018 is energietransitie onontkoombaar. Om de klimaatdoelen voor duurzame opwekking van energie en CO2 reductie te halen zal Nederland alle zeilen bij moeten zetten met een ingrijpende verandering van het landschap. In het Nationaal perspectief voor energie en ruimte (Sijmons et al, 2017) wordt het al aangekondigd: ''Als we ons aan de in Parijs gemaakte afspraken houden, betekent dit dat we aan de vooravond van een grote verbouwing staan.'' Ons energiegebruik zal daardoor steeds meer zichtbaar worden en onderdeel van ons landschap vormen. Met windmolens op zee en zonnepanelen op daken komen we er niet.

Veel ruimte is nodig om hernieuwbare energie te winnen met combinaties van technieken. In het Nationaal Energieperspectief wordt gepleit voor concentratie van grootschalige wind- en zonne-oplossingen in een beperkt aantal Nationale Energielandschappen en deze eventueel te koppelen aan opgaven voor een grootschalige landschappelijke en landbouwtransitie, zodat het mogelijk blijft kwetsbare en bijzondere landschappen te ontzien. Een vergelijkbare redenering blijkt ook te gelden voor dijk. Concentratie op de (meest) geschikte dijktypologieën is wenselijk.

HET AANDEEL VAN ZONNE- ENERGIE

In Nederland loopt de ontwikkeling van zonne-energie wat achter op onze omringende landen. Duitsland en België hadden al Gigawatts aan geïnstalleerd vermogen in 2011, toen Nederland nog geen 100 MWp aan vermogen had staan. De laatste jaren maakt Nederland een flinke inhaalslag. In totaal staat er in 2018 nu meer dan 3 GWpiek aan zonne-energie vermogen geïnstalleerd met zonne-daken en -parken. Dit vermogen aan zonne-energie komt neer op zo'n 2% van het elektriciteitsverbruik in Nederland en is nog maar een beperkte hoeveelheid.
Tellen we daarbij windenergie en andere duurzame opwekking op dan komen we nu op zo'n 10% uit. Om de doelstelling van 14% duurzame energie op te wekken in 2020 is meer energie uit zon nodig.

ZON OP DIJKEN

In deze studie zoomen we in op een icoon van het Nederlandse landschap: de dijken.
In opdracht van het consortium Zon op dijken onder leiding van Stowa onderzoekt Terra Incognita in samenwerking met RHDHV en NL landschap de mogelijkheden voor zonne-energie op de dijken in Nederland. Dit past ook bij de ambities uit de Green Deal van Rijkswaterstaat en de Unie van Waterschappen over opwekking van duurzame energie en energiebesparing.

Het potentieel voor Zon op dijken is enorm met grote oppervlakten dijktaluds die op het zuiden zijn gericht. Maar dijken zijn er in de eerste plaats voor onze veiligheid bij hoog water en hun waterkerende functie mag niet worden ondermijnd. Bovendien zijn de dijken iconen

van het Nederlandse landschap, want beeldbepalend met een historische betekenis en grote landschappelijke en natuurlijke waarde. Hoe dijken kunnen worden benut voor energie is daarom de uitdaging.

> **OPGAVE 200PJ OP LAND EN BINNENWATEREN**
>
> *Op basis van het Nationaal Energieperspectief wordt tweederde van de duurzame elektriciteit die op land opgewekt dient te worden, gewonnen uit zonne-energie. Het resterende derde deel komt van wind-energie. Dit betekent dat er een opgave ligt voor de plaatsing van 200 PJ aan Photovoltaïsche panelen (PV). Het maximaal haalbaar ruimtelijk potentieel aan zonne-energie is 635 PJ. Dit is haalbaar wanneer álle geschikte daken gebruikt zouden worden; een tiende van het landbouwareaal wordt ingezet voor zonneparken (waarmee de productiegroei per hectare in de landbouw wordt afgeroomd); alle braakliggende terreinen tijdelijke zonneparken zouden krijgen; flinke delen van het open water drijvende zonneparken krijgen; enzovoorts. Dit betekent dat een oppervlakte van 3527 km2 bedekt zou worden met zonnepanelen, en komt overeen met circa 8,5% van het Nederlandse landoppervlak. Dit potentieel is dan misschien ruimtelijk haalbaar, technisch, economisch en maatschappelijk liggen er nog enorme uitdagingen. Met de vastgestelde opgave van 200 PJ moeten we dus gebruik maken van de speelruimte die er (ruimtelijk) is.*
>
> *Nationaal Energieperspectief (uit: Energie en ruimte, 2017)*

ONDERZOEKSVRAGEN

Door het consortium zijn er vier onderzoeksvragen gesteld:

1. Wat is de potentiële bijdrage van zonne-energie op dijken aan de nationale energieopgave?
2. Welke aspecten spelen een rol bij de beoordeling van de kansrijkheid en haalbaarheid van installaties voor zonne-energie op dijklichamen?
3. Welke typen systemen zouden hieraan kunnen voldoen?
4. Wat moet getest worden om te beoordelen of deze systemen voldoen?

FIGUUR 1 **ZONNEPARK HENGELO (GELDERLAND)**

In het onderzoek gaan we uit van het volgende:

- We leggen de nadruk leggen op de vraag hoe we zonne-energie op dijken kunnen realiseren. Er wordt een positieve insteek gekozen vanuit kansen en mogelijkheden in plaats van te denken in problemen en onmogelijkheden.

- Er wordt gewerkt vanuit de huidige stand van de techniek met de huidige Photo Voltaïsche systemen (PV-systemen), technieken en opbrengsten.
- Het onderzoek heeft ook tot doel om lezers te inspireren en neemt innovaties mee die nu nog niet maar in de toekomst naar verwachting wel rendabel zullen zijn. Dat vraagt een open blik van de lezer van dit rapport.
- We gaan uit van grootschalige oplossingen bij Zon op dijken om twee redenen. Allereerst vanwege de omvang van de energieopgave waardoor er vooral gezocht wordt naar het meters maken van zoveel mogelijk zonnepanelen.
  Ten tweede is grootschalige toepassing op dijken van belang opdat het beeld van de dijken niet wordt gefragmenteerd. Dijktrajecten zijn veelal meer dan tientallen kilometers lang. Bij kleinschalige toepassingen aan dijken ligt de nadruk niet zozeer op de lijn van de dijk maar op de verbinding tussen het binnendijkse gebied en de dijk. Dit kan het geval zijn bij woonwijken of bedrijventerreinen met een sterke relatie met de dijk of de rivier buitendijks.
- Het onderzoek richt zich ook op de multifunctionaliteit van de dijk en omgeving waardoor een dijk van grotere betekenis wordt naast haar hoofdfunctie als waterkering.
- Voor de indeling in dijktypologieën wordt (op verzoek van de opdrachtgever) de dijkenatlas ‘Dijken van Nederland’ (Lola Landscape Architects 2014) gebruikt.
- De aspecten opslag en transport van energie worden op verzoek van de opdrachtgever in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten en vormen onderwerp van nader onderzoek.

2

ZONNE-ENERGIESYSTEMEN

2.1 DE TECHNIEK VOOR ZONNE-ENERGIE WINNING

De technologie voor energiewinning met zonnepanelen (PV-systemen) bestaat al sinds de jaren ‘60 van de vorige eeuw. Die lange historie heeft geleid tot een veelvoud aan technologieën, technieken en systemen. Panelen in allerlei vormen en kleuren zijn beschikbaar, ook flexibele panelen of zelfs (deels) transparante zonnepanelen zijn verkrijgbaar. Daarbij onderscheiden de verschillende modellen zich wel in de kostprijs.
De hoofd- en subgroepen worden in het kort geduid in de tabel en in bijlage 1 uitgebreid beschreven.

2.2 KANSRIJKE PV-SYSTEMEN

De afweging voor de keuze van het type PV-systemen is afhankelijk veel factoren. Hierbij is een integraal afwegingsproces specifiek voor de betreffende locatie nodig. Zo is het denkbaar dat voor een systeem met een hogere opbrengst wordt gekozen om met minder panelen dezelfde opbrengst te halen en de impact op het landschap te verminderen.
Standaardpanelen zijn met de bewezen technieken en componenten economisch het meest haalbare systeem om grootschalig toe te passen. Meest gebruikt zijn zonnepanelen op rekken. De kosten voor een onderconstructie met rekken voor zonneparken bedragen zo’n 10 eurocent/Wp. Wellicht komen er voor de specifieke dijktoepassing nog zo’n 5eurocent/Wp bij. Deze kosten maken echter een relatief klein onderdeel van de totale systeemprijs uit. Voor de verkennende berekeningen is daarom van het systeem van standaardpanelen op rekken uitgegaan.
Daarbij zijn systemen met gekleurde all black panelen, glas-in-glaspanelen en/of premiumpanelen goede alternatieven voor standaard panelen op rekken. Ook verticaal geplaatste bifacial panelen worden in het onderzoek meegenomen. Trackers vallen gezien de windbelasting af voor toepassing op dijken.

Flexibele systemen die grasbekleding vervangen zijn in ontwikkeling en vormen in de nabije toekomst naar verwachting goede alternatieven. Met PV-panelen in verharding (wegen en fietspaden) wordt geëxperimenteerd. Ze zijn nog een relatief kostbaar alternatief maar zullen in de toekomst gangbaarder en goedkoper worden. In de toekomst vormen ze daarom een denkbaar alternatief voor standaardpanelen op verharde delen van de dijk. Wanneer deze systemen in de toekomst mogelijk een kleilaag op de dijk kunnen vervangen worden deze opties ook financieel aantrekkelijker.
Thermische winningsystemen (PT of PVT) is kansrijk op kleine schaal wanneer een afnemer naast de dijk beschikbaar is. Omdat in deze studie gezocht wordt naar ontwikkelingen op grote schaal wordt thermische energie zijdelings meegenomen en ligt de nadruk op PV systemen (zie ook kader).

TABEL **KOSTEN EN OPBRENGSTEN VAN ZONNE-ENERGIESYSTEMEN T.O.V. HET STANDAARD ZONNEPANEEL (INDICATIEF)**

Hoofd- en subgroepen zonne-energiesystemen	Kosten eurocent/Wp	Opbrengsten
Standaardpanelen - kristallijn silicium panelen		
• Standaardpaneel van 1,0 bij 1,7 meter	35	17%
• Standaard op rekken zoals toegepast in vele zonnevelden	+ 10 tot 15	17%
• Premiumpanelen (1,7 x 1,0 m): zoals een standaard paneel maar met een hoger rendement	80	23%
• Paneel met afwijkende maat. Panelen kunnen tegen meerprijs in elke maat gemaakt worden.	150 / 200	17%
• Gekleurd of geprint paneel, bijvoorbeeld All black. Panelen kunnen in elke kleur ontwikkeld worden	+ 3 tot 5	- 15%
• Glas in glas panelen zijn deels transparant door de glazen platen waartussen de cellen zijn verwerkt	p.m.	p.m.
• Bifacial panelen. Panelen die aan twee zijden energie opwekken. Kunnen verticaal geplaatst worden	+ 5	- 30%
• Trackers. Panelen op een voet die de rotatie van de zon volgen voor grotere opbrengst	p.m.	+ 30%
Innovatieve systemen:		
• Film-Solarmatten. Flexibele matten of films waar zonnecellen in zijn verwerkt	80 tot 100	- 10 tot 12%
• Raatcellen - SELS. Kleine cellen die flexibel geschakeld kunnen worden	p.m.	p.m.
PV in verharding: Zonnecellen worden in asfalt of beton verwerkt en afgewerkt met een beschermlaag (SolaRoad/ Solarrevetment).	500% duurder	
Thermische panelen. Gebaseerd op warmte in plaats van electriciteit		80%

AFWEGING FOTOVOLTAÏSCHE OPWEKKING (PV) VERSUS THERMISCHE WINNINGSYSTEMEN (PT)

Warmtepanelen voor thermische energiewinning kunnen met een grote efficiëntie warmte opwekken, zij het dat deze warmte laagwaardig is (temperatuur tot zo'n 80°C). Hierbij kan tot 80% van de energie van de zon worden omgezet in warm water. Dit is veel meer van de 20% die PV-panelen tegenwoordig halen, maar de waarde van elektriciteit is daarentegen weer hoger. Dit balanceert vaak uit voor situaties waar voldoende vraag is naar laagwaardige warmte (e.g. zwembaden en wellicht sauna's). Hier is vaak de financiële haalbaarheid van warmtepanelen gelijk aan die van PV panelen.

Het voordeel van PV-panelen boven PT panelen is dat elektriciteit zich gemakkelijker laat transporteren. Hierdoor is het mogelijk om op een afgelegen plek een netwerkaansluiting te realiseren en daarmee verbruikers te voeden die tientallen kilometers verderop zitten. Daarnaast kan het netwerk gebruikt worden om de energie op te vangen, ook als er momenteel geen lokale vraag naar elektriciteit is. Voor PT (of PVT) panelen is een lokale afnemer nodig. De warmte moet lokaal worden afgenomen omdat het transport van warmte via warmtenetten verliezen met zich mee brengt en erg duur is over grote afstanden. Dat betekent ook dat er een warmteopslag zal moeten worden toegevoegd om de energie op te slaan op die momenten dat de lokale vraag lager is dan de opwekking.

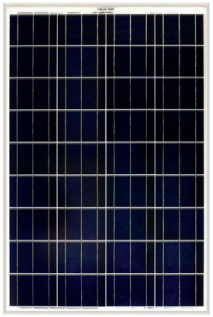
Zulke oplossingen kunnen zeer gunstig zijn in sommige gevallen, bijvoorbeeld als er al een wijk is met een warmtenet waar op kan worden aangesloten. In Denemarken zijn diverse voorbeelden van PT en zelfs van PVT zonne-velden die worden aangesloten op het toch al bestaande lokale warmtenet, iets wat veel van de dorpen in Denemarken lokaal hebben georganiseerd.

THERMISCH PANEEL MET CELLEN

PVT PANEEL

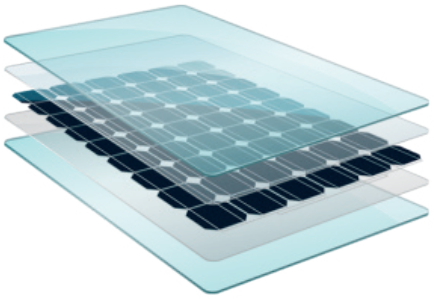
In het kader van Zon op dijken zullen we niet de nadruk leggen op PT of PVT systemen omdat we ons vooral richten op grootschalige projecten, waarbij over een grote lengte van een dijk een zonne-energie wordt toegepast. Warmte projecten passen hier niet goed bij, omdat over zo'n lengte de opgewekte warmte te groot is voor een lokaal warmtenet en omdat de warmte over een te grote afstand getransporteerd moet worden. Het neemt niet weg dat er natuurlijk lokale voorbeelden kunnen zijn waarbij dit een prima oplossing is voor een lokale duurzame warmtevraag. Ook is een combinatie mogelijk, waarbij een grootschalig PV project wordt aangevuld met een klein deel warmte-opwekking.

STANDAARD ZONNEPANEEL



PREMIUM ZONNEPANEEL

GEKLEURDE ZONNEPANELENE EN PRINTES



GLAS IN GLAS ZONNEPANEEL

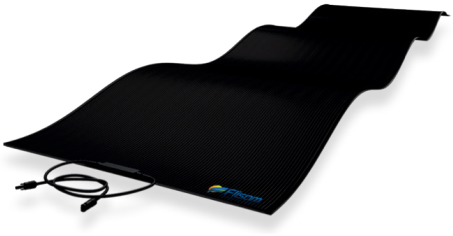
STANDAARD PANELEN OP REKKEN

VERTICALE BIFACIAL PANELEN

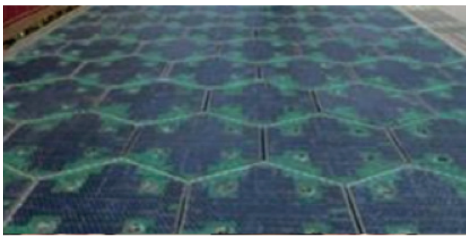
ZONVOLGSYSTEEM

SOLARMAT

SOLARMAT



SELS



SOLAROAD

SOLAROAD

3

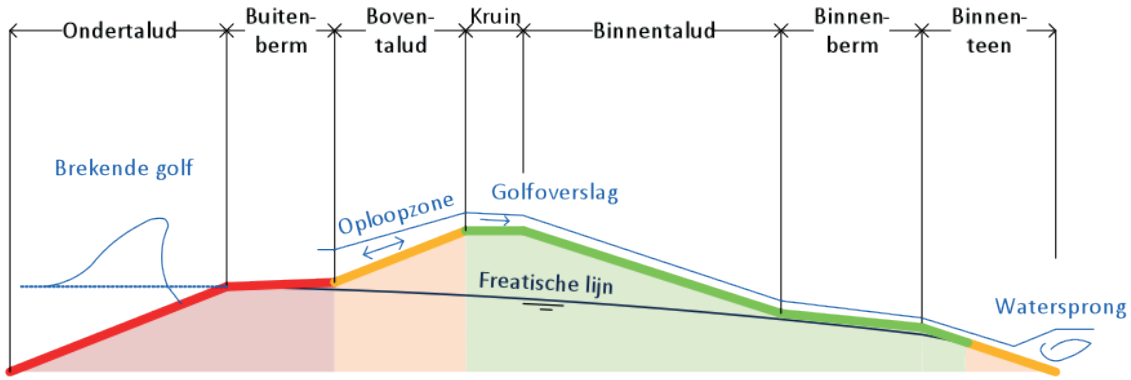
PRINCIPES VOOR ZON OP DIJKEN

3.1 PRINCIPES VOOR WATERVEILIGHEID EN DIJKBEHEER

In Nederland stellen we hoge eisen aan onze dijken, die de primaire functie hebben om het achterland te beschermen tegen overstromingen. Combinaties met energiesystemen moeten daarom voldoen aan de hoge veiligheidseisen van het dijkprofiel. De vereiste kwaliteit van onze dijken is verankerd in de Waterwet aan de hand van normen. Deze normen schrijven de jaarlijkse maximaal toegestane kans op dijkdoorbraak (van 1/300 tot 1/100.000 per jaar). Regelmatig wordt de kwaliteit van onze dijken beoordeeld en daarvoor is een wettelijk instrumentarium beschikbaar (nu: WBI2017).

Het huidige wettelijk beoordelingsinstrumentarium biedt weinig ruimte voor toepassing van zonnepanelen. Slechts daar waar dijken overmatig robuust zijn, oftewel overhoogte of oversterkte hebben, worden in de huidige praktijk minder strikte eisen gesteld en kunnen zonnepanelen worden ingepast. Een voorbeeld van een dergelijke dijk is de Knardijk. Deze dijk is ooit aangelegd voor inpoldering van Oostelijk Flevoland en fungeert na de realisatie van Zuidelijk Flevoland als compartimenteringsdijk. Als compartimenteringsdijk draagt slechts het onderste deel van het grondlichaam bij aan de overstromingsveiligheid en daarom is vanuit waterveiligheid het bovenste deel geschikt voor zonnepanelen. Het aantal dijken dat overmatig robuust is en daarmee ruimte biedt voor zonnepanelen, is schaars. Voor grootschalige invulling van zonne-energie op dijken zijn daarom technische oplossingen nodig waarbij de dijk kwalitatief gelijkwaardig of beter wordt.

FIGUUR 3 HYDRAULISCHE BELASTINGEN DIJK EN POTENTIE VOOR TOEPASSING ZONNEPANELEN BIJ HUIDIGE STAND VAN DE TECHNIEK (GROEN = MEESTE POTENTIE, ROOD = MINSTE POTENTIE, ORANJE = GEMIDDELDE POTENTIE)



De mate waarin toepassing van zonnepanelen op dijken kansrijk is, hangt af van de positie en constructie van de zonnepanelen op de dijk. Het buitentalud wordt meestal belast met zware golven, drijfvuil of kruiend ijs en daar zijn maar weinig constructies tegen bestand. Zonnepanelen zouden zwaar (maar ook flexibel) uitgevoerd moeten worden en dat is kostbaar. Bovenin het buitentalud worden de hydraulische belastingen al lichter, maar blijven relatief zwaar ten opzichte van bijvoorbeeld windbelastingen die nu kritisch zijn voor het ontwerp

van zonnepanelen. Het buitentalud vraagt dus om innovatieve technieken die bestand zijn tegen deze belastingen.
In eerste instantie lijkt het binnentalud de eenvoudigste plek voor toepassing van zonnepanelen met de huidige technieken, omdat hier relatief lichte hydraulische belastingen optreden (zie figuur 3). De teen van het binnentalud vereist daarbij meer aandacht. De binnenteen is vaak een uitstroompunt voor grondwater en een locatie waar bij golfoverslag een watersprong (d.w.z. relatief zware hydraulische belasting) optreedt.
Bijlage 2 toont een compleet overzicht van de aandachtspunten per faalmechanisme en dijkonderdeel (e.g. binnentalud, kruin).

Bij plaatsing van zonnepanelen gelden vanuit waterveiligheid de onderstaande principes en uitdagingen.

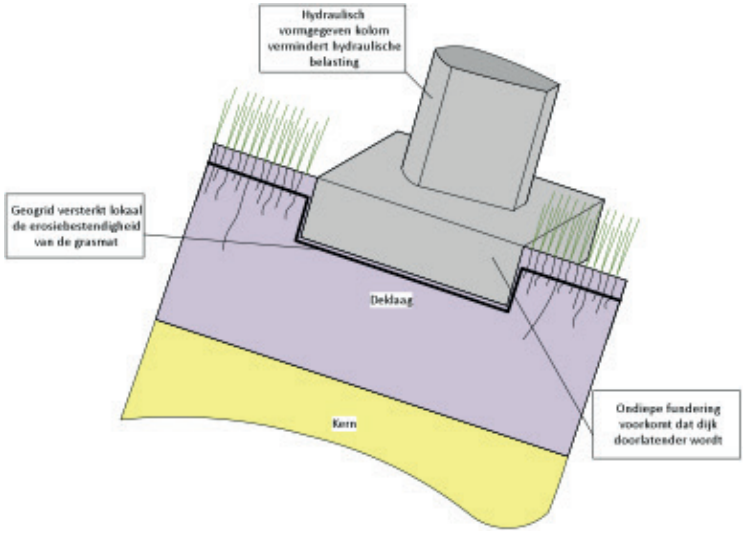
3.1.1 DE FUNDERING VAN PV-SYSTEMEN IS EROSIEBESTENDIG

De fundering van zonnepanelen kan de erosiebestendigheid van een grasmat negatief beïnvloeden. De overgang tussen de fundering van het zonnepaneel en de grasmat is relatief zwak en vaak een aangrijpingspunt voor overslaand of overstromend water [Deltares, 2013]. Figuur 5 toont waargenomen erosie bij een overslagproef bij een dijktrap.

MAATREGELEN BIJ FUNDERING:

- Keuze van PV-systemen bepaalt mede de omvang van fundering. Trackers vragen een zware fundering en zijn daarom minder geschikt dan lichte constructies en minimale impact op de wind zoals standaardpanelen op rekken. Zonnefolies vragen een minimale fundering en dragen bij aan erosiebestrijding door afwatering over de folies.
- De funderingspalen worden hydraulisch vormgeven. Een druppelvorm is daarbij ideaal omdat dan zo min mogelijk turbulentie wordt opgewekt. De ronde zijde van de druppelvorm dient in de stroomrichting geplaatst te worden.
- De funderingsvoet wordt versterkt met geogrids of andere geotextielen. Door toepassing van geotextielen wordt de grond gewapend en is deze naar verwachting veel sterker. Deze techniek is al getest, maar wordt nog niet op grote schaal toegepast voor dijken.
- Figuur 4 toont een principe voor de fundering waarbij invulling wordt gegeven aan enkele van de genoemde uitdagingen met betrekking tot waterveiligheid. De hydraulisch gevormde kolom zorgt voor minder zware belastingen op de fundering. De ondiepe fundering voorkomt dat de dijk permeabeler wordt, doordat deze nog steeds goed opgesloten is in de klei. Geogrids versterken de erosiebestendigheid van de grasmat.

FIGUUR 4 **PRINCIPE SCHETS VAN FUNDERING DIE INVULLING GEEFT AAN ENKELE AANDACHTSPUNTEN M.B.T. DIJKVEILIGHEID**



3.1.2 PV-SYSTEMEN BEÏNVLOEDEN WATERDOORLATENDHEID VAN DE DIJK NIET

De fundering van de zonnepanelen kan de doorlatendheid van de dijk vergroten, want langs de fundering kan sneller water passeren. Als dit water eenvoudiger kan passeren, kunnen ook gronddeeltjes meegenomen worden en dit proces verzwakt de dijk. Als dit proces start, kan de dijk snel doorbreken. Dit faalmechanisme van piping kan met name onderin het binnentalud optreden. Figuur 6 geeft inzicht in typische grondwaterstroming door een dijk en de invloedszone op het binnentalud. Hoger in het binnentalud speelt deze uitdaging minder een rol. Het buitentalud is, bij voorkeur, ondoorlatender dan het binnentalud. Voor het buitentalud zouden zonne-panelen zelf de ondoorlatendheid van het buitentalud kunnen invullen of verbeteren en daarmee een bijdrage leveren aan de dijkveiligheid.

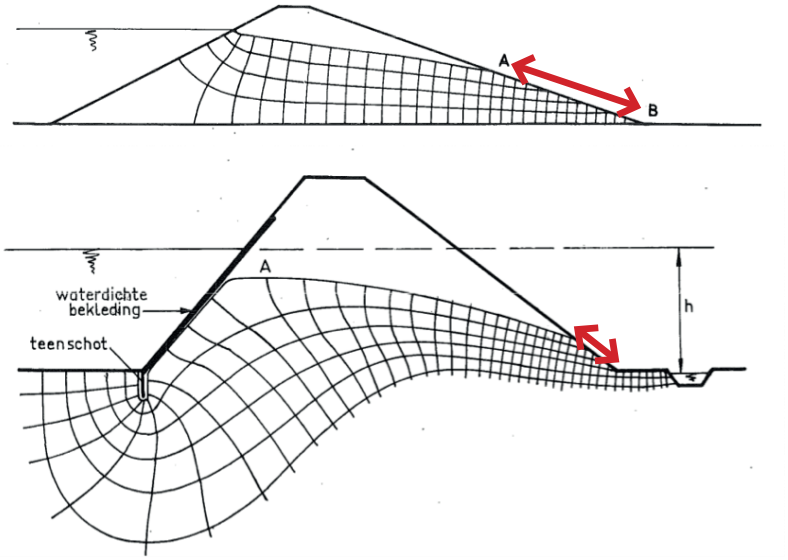
FIGUUR 5 **SCHADEBEELD BIJ DIJKOVERGANG [DELTARES, 2013]**

MAATREGELEN TEGEN WATERDOORLATENDHEID:

- De keuze van PV-systemen kan bepalend zijn voor de waterdoorlatendheid. Systemen met een lichte fundering en minimale impact op de wind verkleinen de kans op problemen. Systemen met folies dragen bij aan het verlagen van de waterdoorlatendheid wat met name interessant is op het buitentalud.
- Een lichtere en oppervlakkige fundering voorkomt dit probleem. De maatregelen voor de fundering zijn ook hier van toepassing. Oppervlakkige fundering zoals op vuilstortlocaties kan hier een oplossing bieden.
- Het aanbrengen van een extra erosiebestendige mat of grid figuur 8. (zoals hiervoor genoemd) in het zonne-energiesysteem voorkomt extra waterdoorlatendheid.

- Fundering plaatsen in klei, zwelklei of bentoniet. Op deze wijze kan voorkomen worden dat water langs de fundering gaat sijpelen.
- Overdimensionering van de dijk zoals het aanbrengen van een extra dikke teellaag (ook gebruikt om bomen buiten het profiel te plaatsen) kan er aan bijdragen dat er geen invloed op de waterdoorlatendheid optreedt.

FIGUUR 6 **GRONDWATERSTROMINGEN (VIERKANTENNETTEN) DOOR DIJKEN [TH DELFT, 1976] MET ZONES WAAR AANDACHT VOOR FUNDERING IS VEREIST M.B.T. DOORLATENDHEID FUNDERING, AANGEGEVEN MET RODE DUBBELE PIJL**



3.1.3 BIJ TOEPASSING VAN PV-STYSTEMEN BLIJFT EEN STERKE GRASMAT BEHOUDEN TENZIJ HET PV-SYSTEEM EEN ROBUUSTE VERVANGING IS VOOR EEN STERKE GRASMAT

Een dichte graszode heeft een belangrijke functie op dijken om erosie tegen te gaan. Zonnepanelen kunnen de groei (belichting en beluchting) en het beheer van de grasmat belemmeren. Wanneer onzorgvuldig zonnepanelen worden geplaatst kunnen maaimachines en/of schapen lastiger bij de grasmat komen (zie figuur 7). Tevens kunnen de zonnepanelen effect hebben op de groei en de kwaliteit van de grasmat wat van invloed is op de sterkte van de dijk. Zonne-energiesystemen kunnen het zicht op de grasmat belemmeren. Daardoor worden inspectie en beoordeling van de grasmat lastiger.

MAATREGELEN VOOR EEN STERKE GRASZODE:

- De keuze voor een andere vorm van PV-systemen kan de grasmat vervangen voor een gelijkwaardig of zelfs steviger alternatief. Panelen in een flexibel grid en/of zonnefolies maar ook PV systemen in verharding kunnen een volwaardig alternatief zijn voor waterveilige dijk.
- Bij ‘standaard’ zonnepanelen zijn er diverse relatief eenvoudige maatregelen denkbaar om het gras in stand te houden: voldoende afstand tussen rijen zodat zon en regenwater de grasmat kan bereiken, glas op glas panelen die zorgen voor meer zon onder de panelen (onderwerp van nader onderzoek), rekken op schaaphoogte (80 cm) zodat schapen onder de rekken kunnen grazen en het gras voor een maaibalk toegankelijk is, robotiseren van het maaibeheer (elektrische infrastructuur is aanwezig om gerobotiseerd maaibeheer mogelijk te maken), een voorziening die regenwater dat op het paneel valt onder het paneel brengt.

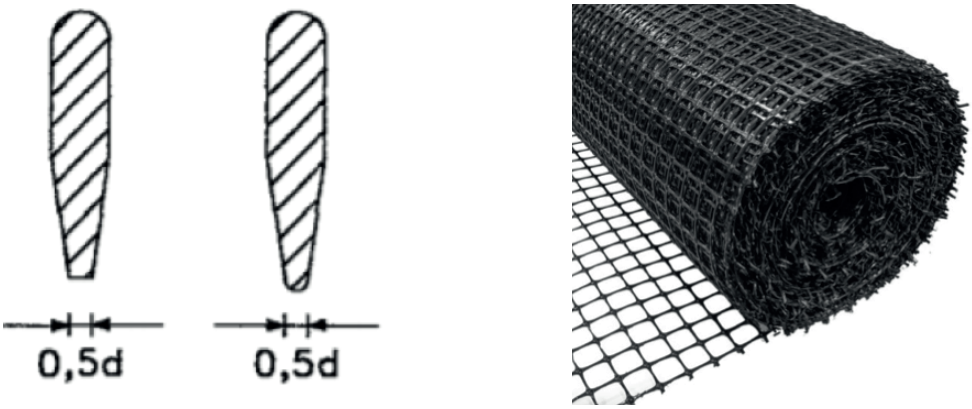
- De grasmat wordt beheerd door de zonne-energie exploitant die zorgt moet dragen voor een goede grasmat op basis van de functionele eisen op aan de pacht. Voor waterschappen is dat in elk geval een zorg minder.

FIGUUR 7 **VOORBEELD MATERIEEL VOOR MAAIEN DIJKEN (CAPRETON.NL)**

3.1.4 PV-SYSTEMEN OP HET BUITENTALUD ZIJN GOLFSLAGBESTENDIG EN REMMEN BIJ VOORKEUR DE GOLFSLAG

Op het buitentalud kunnen slechts systemen worden geplaatst die golfslag- en (zee)waterbestendig zijn. De huidige PV-systemen zijn dit nog niet. De technische ontwikkeling van de systemen gaat echter snel. Het is goed denkbaar dat PV-systemen in verharding in de toekomst kunnen worden ingezet op de verharde buitentaluds van dijken. Deze systemen kunnen zo ontwikkeld worden dat zij bovendien de golfslag remmen door ruwheid en relief dat PV systemen een bijdrage leveren aan de waterveiligheid.

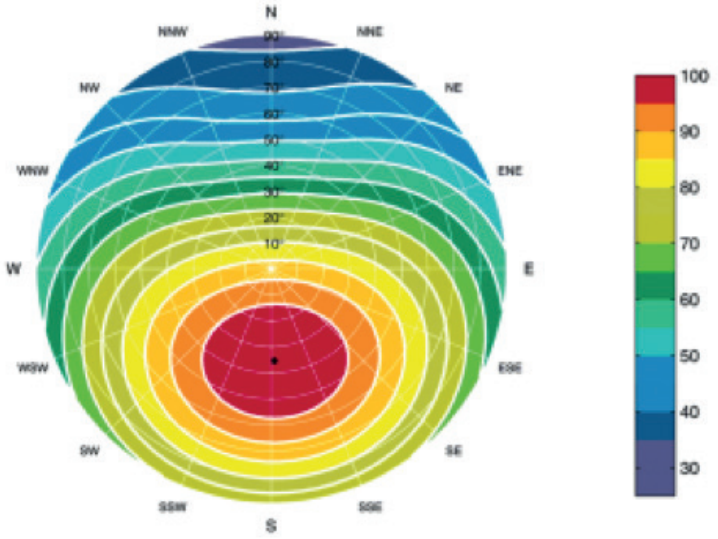
FIGUUR 8 **HYDRAULISCHE VORMGEVING FUNDERINGSPALEN (LINKS, KOLKMAN EN JONGELING 1996) EN GEOGRID (RECHTS)**



3.2 PRINCIPES VOOR ZONNE-ENERGIESYSTEMEN

Dijken benaderen de optimale hellingshoek voor zonnepanelen zonder windbelasting.
Een belangrijk voordeel van dijken bij de toepassing van PV-systemen is de gunstige helling van het dijktalud. De helling van dijken varieert tussen de 15° en de 30°. De optimale helling qua zonne-instraling is in Nederland circa 33°. Vanwege windbelasting, wordt vaak een lagere helling, circa 20°, toegepast in zonnevelden. Bij dijken zal windbelasting significant lichter zijn, al zal moeten worden uitgerekend wat de exacte windbelasting is per situatie. Ook zal er geen rij-op-rij schaduw zijn als de vorm van de dijk gevolgd wordt.

FIGUUR 9 **RELATIEVE RENDEMENT AFHANKELIJK VAN HELLINGSHOEK EN WINDSTREEK**



Figuur 9 toont de relatieve opbrengst van zonne-energie t.o.v. het optimum. De zwarte punt geeft daarbij het eerder genoemde optimum van 33 graden in het zuiden aan. Het rode vlak geeft aan voor welke positioneringen richting een windstreek en de hellingshoek nog 95% ten opzichte van het optimum opgewekt kan worden. Uit de figuur valt ook op te maken dat positionering van zonne-panelen op het oosten en westen nog een opbrengst van 80/85% van de optimale opbrengst mogelijk is bij een hellingshoek van 33 graden.

Reflectie (weerkaatsing) van zonlicht op de panelen waardoor de panelen als een spiegel werken in het landschap is tegenwoordig een minder groot probleem. Tegenwoordig zijn zonnepanelen voorzien zijn van een coating die het zonlicht verstrooid en gelijktijdig aanhechting van vuil voorkomt. Op gevoelige locaties (bijv. dicht bij woningen) kan een een oplossing zijn de panelen een aangepaste hellingshoek te geven, bijvoorbeeld plaatsen met hellingshoek van 10 graden, waardoor weerkaatsing naar omgeving kan worden voorkomen.

Vanuit de techniek van zonne-energie winning gaan we uit van de volgende principes:

- Dijken oriënteren zich tussen het Noordwesten via het Zuiden tot het Noordoosten. Noord georiënteerde dijken zijn niet geschikt.
- Lange lijnen van PV-systemen zijn het meest (kosten)efficiënt en hebben de grootste opbrengst.
- De afstand tot een 10kV station is van invloed op de haalbaarheid van de PV systemen. Het elektriciteitsnetwerk in Nederland is nog niet geschikt grote vermogens te verwerken. Koppeling met lokale energievraag is daarom kansrijk. Wanneer een grote afstand tot een 10 kV station overbrugd moet worden brengt dat hoge kosten met zich mee (onderwerp van nader onderzoek).

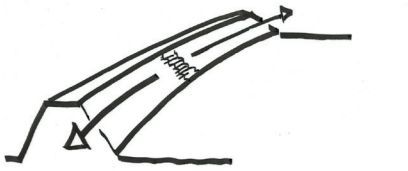
- Bundeling met andere hernieuwbare energiebronnen vergroot de haalbaarheid van PV systemen.
- PV-systemen moeten vandalisme ongevoelig en diefstal bestendig xijn (b.v. door middel van unieke moersleutel per locatie).
- PV-systemen zijn veilig. Een duidelijke afscherming met hekken en bordjes geeft aan dat de PV-systemen niet toegankelijk zijn.
- Bij plaatsing van PV-systemen dient op gevoelige locaties (nabij woningen) gekeken te worden naar het voorkomen van hinderlijke reflectie, dit is in de regel goed oplosbaar door de hellingshoek van de panelen aan te passen.
- Het onderhoud aan PV-systemen kan door gespecialiseerde partijen worden gedaan. Aanhechting van vuil is geen groot probleem.

3.3 PRINCIPES VOOR PV-SYSTEMEN EN RUIMTELIJKE KWALITEIT

'Een dijk is veel meer dan alleen een waterverdediging, het is onderdeel van onze cultuur. Nederlanders zijn bewust en onbewust aan de dijken verbonden. De dijk is ook ons wandelpad, het is ons museum, het is ons park.' (Dijken van Nederland, Lola 2014).
Dit citaat verwoordt het belang van de dijken in het Nederlandse landschap. Sommige dijken zijn te waardevol om te combineren met zonnepanelen. Maar er zijn ook dijken waarbij een combinatie van PV-systemen de kwaliteit van de dijk onderstrepen of versterken. In het volgende hoofdstuk wordt per dijktype bepaald of deze kansrijk is voor PV-systemen.

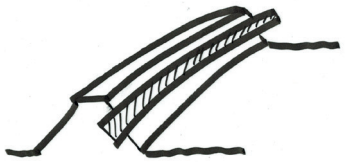
Voor ruimtelijke inpassing van zonnepanelen op dijken gaan we uit van de volgende principes:

- **Zonnepaneelreeksen kunnen de lengte van de dijk, de continuïteit en de robuuste vorm in het landschap benadrukken**
  Het lengte-ontwerp (langsprofiel) van de dijk wordt afgestemd op het omringende landschap. Groene onderbrekingen, trappen, dijkopgangen, transformatorstations bieden aanleidingen voor het lengte-ontwerp.

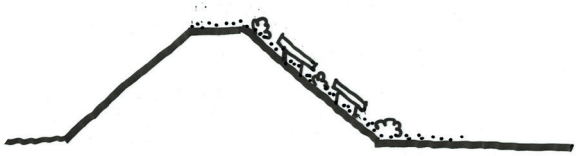


- **Zonnepanelen vormen bij voorkeur een vervangende dijkbekleding**
  Ruimtelijk ligt de nadruk op integrale inrichting van de dijk met zonnepanelen/ PV-systemen wat leidt tot een grotere eenheid van dijktalud. Geïntegreerde panelen in materiaal dat ook zorgt voor een stevig dijktalud hebben de voorkeur. Hierdoor blijft het dijkprofiel in tact.

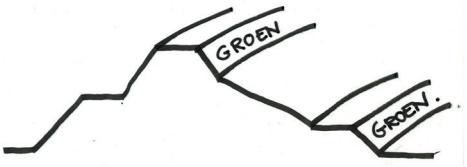
- **PV-systemen vormen een egaal geheel - een loper op de dijk**
  De PV systemen vormen een eenheid, stralen rust uit en versterken de lange lijn van de dijk als een loper. Ze geven een rustig beeld en reflecteren niet. Hoe flauwer de helling hoe minder de reflectie - bij voorkeur een hoek van 30 graden. Bij zonnepanelen hebben all black of all grey panelen de voorkeur omdat deze kleur het minst opvalt in het landschap.



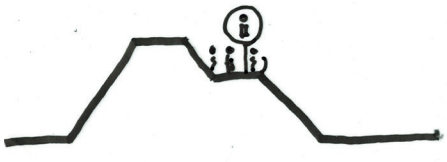
- **Panelen op rekken combineren met beweiding en een bloemrijke zode**
  Panelen op rekken vormen met de huidige stand van de techniek de meest kansrijke optie. Ruimte tussen de lijnen van de panelen is dan een vereiste zodat door middel van beweiding door schapen en bloemrijk grasland een aantrekkelijk ruimtelijk beeld ontstaat van een groene dijk 'waarboven' energie wordt opgewekt.



- **Behoud de groene kruin en groene plint van de dijk**
  Het beeld van een dijk wordt veelal bepaald door een groene 'slanke' kruin. Dijkversterkingen door de jaren heen hebben de voet van de dijk verbreed en soms verhard waardoor het ruimtelijk beeld aan kwaliteit heeft ingeboet: lomper en een minder rank en herkenbaar dijklint. Door de kruin van de dijk groen te houden blijft de dijk als verhoogde groene lijn in het landschap herkenbaar. Door ook het onderste deel van de dijk groen en vrij te houden van PV-systemen ontstaat er een groene plint die samen met de groene kruin het kader voor een loper van PV-systemen vormt.



- **PV-systemen kunnen een aanleiding zijn voor verbetering van recreatie- en educatie-(punten)**
  De ontwikkeling van PV-systemen vormen een aanleiding om recreatieve voorzieningen op een dijk verder te ontwikkelen. Onderhoudswegen zijn eenvoudig te combineren met een recreatieve routes. Op de routes kunnen educatieve rustpunten, bijvoorbeeld in de vorm van balkons, worden gecreëerd die educatie over PV-systemen, waterveiligheid, landschap en natuur combineren. De rustplekken kunnen uitgerust worden met oplaadmogelijkheden voor fietsen en telefoons en uitgevoerd worden in een solaroad constructie.



FIGUUR 10 **ROBUUSTE GRONINGSE WADDENDIJK**

3.4 PRINCIPES VOOR PV-SYTEMEN EN ECOLOGIE

Door zonnepanelen op dijken te plaatsen lijken natuurwaarden op het eerste gezicht niet direct gediend. Toch valt er ook voor natuur winst te behalen mits rekening wordt gehouden met ecologische principes. Dit kan door bij plaatsing van zonnepanelen aandacht te hebben voor een structuurrijke vegetatie en biodiversiteit. Beheer van het dijktalud is hier niet alleen een technisch aandachtspunt, maar bepaalt ook de ecologische waarde van de dijk. Veel waterschappen ontwikkelen bloemrijke dijken en beheren deze als stroomdalgrasland waardoor de biodiversiteit van de grastaluds toeneemt. De dijken ogen niet alleen aantrekkelijker door de seizoen heen maar ook de fauna zoals insecten profiteren mee.

Door het dijktalud in te zaaien met kruidenrijke grasmengsels wordt ingezet op een stevige grasmat met bloeiende kruiden. De taluds worden na de bloei en zaadzetting gemaaid. Hierna worden de taluds door schapen begraasd om een stevige erosiebestendige zode te vormen. Ook schapen zorgen voor meer diversiteit door lokale verdichting en bemesting mits niet te intensief beweid.

FIGUUR 11 **BLOEMRIJKE DIJK LANGS DE NEDERRIJN BIJ RIJSWIJK**

Doordat de panelen op rekken staan met een zekere tussenruimte kan er voldoende licht en water op de vegetatie komen. Doordat panelen het talud deels overkappen zal de standplaats meer gaan variëren in licht en vochtigheid waardoor meer diversiteit met gradiënten zowel onder als tussen de panelen ontstaat. Beheer kan worden ingezet om deze verschillen verder te versterken. Zo is het denkbaar om onder en in de directe omgeving van de panelen een minder intensief beheer te voeren, in vergelijking met de stroken daar tussen. De diversiteit in structuur die zo ontstaat, zorgt voor meer niches die bezet kunnen worden en daarmee voor een toegenomen biodiversiteit. Door de hoogte van de panelen kunnen schapen het talud begrazen en beschutting vinden. Om het bloemrijke grastalud te kunnen maaien is ook ruimte tussen de panelen nodig. Bij inzet van een robotmaaier kunnen panelen dichter op elkaar worden geplaatst mits rekening wordt gehouden met voldoende lichtinval en vocht.

PV-systemen kunnen dus bijdragen aan en een aanleiding zijn voor de verbetering van de ecologische waarde van de dijken. Door de lange groene linten van de dijken in het landschap kunnen de dijken als verbindingszone van grote waarde zijn.

ZONNEPARKEN OP VUILSTORT

Zonneparken worden thans al toegepast op vuilnisbelten en deze toepassing heeft enige parallellen met toepassing bij dijken. Bij zonneparken op vuilnisbelten is de beperking dat geen diepe palen kunnen worden geslagen, omdat de hermetische afsluiting van de vuilnisbelt niet doorprikt mag worden. Ook is er een beperking aan het maximum puntbelasting (gewicht) en kan er sprake zijn van werking (inklinken) van de ondergrond. Voor deze casus zijn ook oplossingen ontwikkeld. Bijvoorbeeld bij Avri (afvalverwerking rivierenland) is gebruik gemaakt van relatief brede betonnen voeten die de belasting verdelen over een groter oppervlak. Hierbij is erosie door afwatering nog een aandachtspunt.

3.5 GENERIEKE INTEGRALE PRINCIPES - 10 GOUDEN REGELS VOOR ZON OP DIJKEN

Standaard (premium/all black) panelen op rekken zijn met de huidige stand van de techniek de meest kosteneffectieve oplossing. Innovaties in de toekomst zullen nieuwe mogelijkheden brengen. Deze innovatieve oplossingen moeten steeds meegenomen worden om de veiligheid en de ruimtelijke kwaliteit van de dijk en de efficiency van het systeem te vergroten.

Samenvattend komen we op 10 integrale principes voor Zon op dijken:

1. Behoud van een veilige waterkering die erosiebestendig is. Fundering van PV-systemen doet geen afbreuk aan de sterkte van de dijk en draagt bij voorkeur bij aan een sterkere dijk. PV-systemen hebben geen invloed op de waterdoorlatendheid of verminderen deze. De grasmat behoudt een goede zodeontwikkeling of wordt vervangen door een alternatieve bekleding.
2. De dijk blijft met PV-systemen goed beheerbaar doordat PV-systemen de dijkbekleding vervangen of doordat gras beheerbaar en inspecteerbaar blijft.
3. De dijk met PV-systemen heeft een gunstige helling en expositie (ligging ten opzichte van de

zon). Met de huidige techniek ligt de nadruk op het binnentalud. Met (toekomstige) innovatieve technieken zijn er ook in het buitentalud mogelijkheden.

4. Lange lijnen geven PV-systemen op dijken rendement met voldoende oppervlak en landschappelijke eenheid.
5. PV-systemen zijn haalbaar mits ze in de omgeving aansluiten op het energienet. Waar mogelijk vindt bundeling met andere duurzame energiebronnen plaats (met name windenergie).
6. PV-systemen op dijken zijn voldoende beschermd tegen vandalisme en veilig voor passanten.
7. PV-systemen op dijken zijn goed te inspecteren en te onderhouden.
8. PV-systemen op dijken zijn golfslagbestendig en bestand tegen (zee/meer)water. Bij voorkeur zijn PV-systemen in buitentalud golfslagremmend.
9. De dijk is de baas als de landschappelijke en cultuurhistorisch lint. PV-systemen benadrukken de lange en continue lijn van de dijk (en vormen geen incidenten). PV-systemen vormen een egale loper op de dijk, stralen rust uit en reflecteren niet. PV-systemen worden zoveel mogelijk geintegreerd in de dijkbekleding en zijn onderdeel van het dijkprofiel (innovaties noodzakelijk).
10. Meervoudig ruimtegebruik waar mogelijk onder meer combinaties van de zonnedijken met dijkveiligheid, recreatie, educatie en natuur

FIGUUR 12 **VOORBEELDEN VAN ZONNEVELDEN**

4

INPASSING ZON OP DIJKEN

4.1 DRIE OPGAVE VOOR ZON OP DIJKEN

In het onderzoek naar zonne-energie en dijken maken we onderscheid in drie opgaven voor dijken die elk andere uitdagingen kennen;

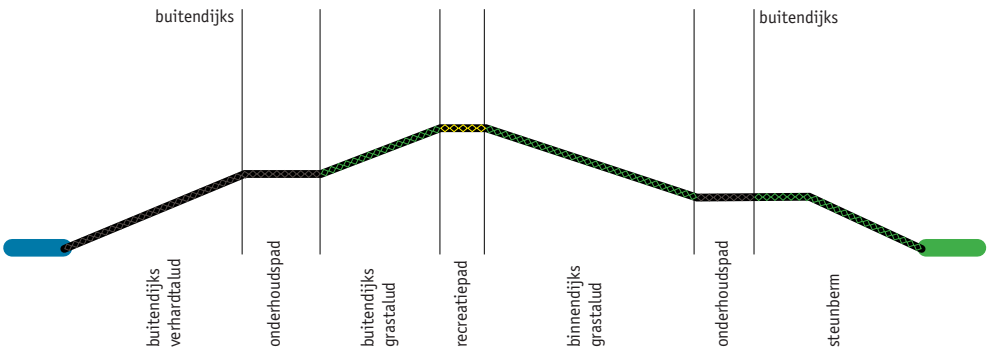
- Een bestaande dijk waarop zonne-energie wordt ontwikkeld. Hier is in de regel sprake van inpassen zodat de bestaande dijk herkenbaar blijft.
- Een dijk die niet aan de norm voldoet en moet worden verbeterd. In de opgave van versterking kan winning van zonne-energie worden meegenomen in de inrichting. Behoud van de karakteristiek dijk blijft uitgangspunt.
- Een dijk die optimaal wordt aangepast of ontwikkeld voor energieproductie: een energie producerende dijk die bovendien zorgt voor waterveiligheid. Bij deze opgave spreken we van vernieuwen waarbij meervoudig ruimtegebruik nadrukkelijk aan de orde is. De energiedijk krijgt daarbij een nieuw uiterlijk en kan gebruik maken van nieuwe materialen voor dijkbekleding.

Na beschrijving van de mogelijke PV-systemen (hoofdstuk 2) en de principes per vakgebied (hoofdstuk 3) vatten we de mogelijkheden per dijkonderdeel in de tabel samen.

TABEL **MOGELIIJKHEDEN PER DIJKONDERDEEL VOOR DRIE DIJKOPGAVEN:**

Dijkonderdeel	Bestaande dijk	Te versterken dijk	Nieuwe energiedijk
Dijkopgave	Inpassen, met de huidige stand van de techniek	Versterken, met de huidige stand van de techniek	Vernieuwen, met de innovaties van de toekomst
Buitendijks grastalud	Niet haalbaar met huidige stand van de techniek	Films/solarmatten	Films/solarmatten & nieuwe innovatieve constructies
Buitendijks verhard talud	Niet haalbaar i.v.m. golven en wateroverlast	Niet haalbaar i.v.m. golven en wateroverlast. Wanneer tot top verhard is PV denkbaar passend bij karakter vd dijk	PV in verharding (SolarRevetment) & innovatieve constructies
Binnendijks grastalud	Panelen in gras, panelen op rekken, films/solarmatten en bifacialpanelen	Panelen in gras, panelen op rekken, films/solarmatten en bifacialpanelen	Idem geoptimaliseerd 20-30° hoek talud
Steunberm	Panelen op rekken en bifacialpanelen	Panelen op rekken en bifacialpanelen	n.v.t. (dijktalud wordt optimaal ingericht)
Onderhoudspad cq recreatiepad	Niet haalbaar. Te kostbaar om bestaand pad te vervangen	PV in verharding (SolaRoad) wanneer nieuw pad wordt aangelegd	PV in verharding (SolaRoad)

FIGUUR 13 **DIJKONDELEN BIJ TABEL MOGELIIJKHEDEN PER DIJKONDERDEEL VOOR DRIE DIJKOPGAVEN**



4.2 KANSRIJKE DIJKTYPEN

Uit de principes en spelregels uit het vorige hoofdstuk kunnen we afleiden dat veel dijken niet geschikt zijn voor grootschalige PV-systemen. In dit hoofdstuk beschrijven we de drie meest kansrijke dijktypen in Nederland voor PV-systemen nadat is toegelicht hoe we tot deze drie dijktypen zijn gekomen.

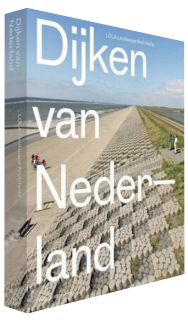
SELECTIE DIJKTYPEN

Om te onderzoeken welke dijktypen niet geschikt of juist wel kansrijk zijn hanteren we de volgende criteria die afgeleid zijn van de principes uit het vorige hoofdstuk:

- Kan de dijk zijn primaire waterkerende functie behouden met PV-systemen (zie ook principes 1 en 2 in par. xx). Dragen de PV-systemen bij aan de veiligheid (erosiebestendigheid en/of stevigheid)?
- Heeft het dijktalud een gunstige overwegend zuidelijke expositie? Volgen de PV-systemen de helling van het dijktalud (dus liever geen rekken op horizontaal deel)?
- Heeft de dijk ruimte voor grootschalige opstellingen van PV-systemen? Oftewel: waar kunnen we meters maken?
- Is er een aansluiting op het energienet (te maken)?
- Zijn de PV-systemen voldoende te beschermen, veilig voor passanten en vandalismebestendig?
- Zijn de PV-systemen bereikbaar voor inspectie en beheer?
- Zijn de PV-systemen en de dijk (op termijn) bestendig te maken tegen erosie, golfslag en evt. zout? Is de dijkbekleding erosiebestendig (zodeontwikkeling of alternatieve bekleding)? Kunnen de PV-systemen golfremmend zijn (in de toekomst)?
- Passen de PV-systemen in het landschappelijke beeld en de beleving van de dijk waarbij het gaat om:
  - Lange lege rechtstanden dijk (geen bebouwing en beplanting).
  - Robuuste maat en schaal van de dijk en het landschap zodat de dijk ‘de baas blijft als groen lint.
  - Passend bij de ecologische functie (behoud en ontwikkeling).
  - Passend bij de cultuurhistorische waarden van de dijk (behoud door ontwikkeling).
- Is er meerwaarde bij Zon op dijken voor dijkveiligheid, recreatieve en educatieve waarden?

Voor de selectie van dijktypen maken we gebruik van de dijkenatlas ‘Dijken van Nederland’ opgesteld door Lola landscape-architects (2014). Zij onderscheiden 43 dijktypen (waarbij de nooddijken buiten beschouwing worden gelaten in dit onderzoek). Verschillende dijktypen werken samen en vormen zo samen een dijksystemen. Alle dijktypen en -systemen vallen onder 8 dijkgroepen.

Op basis van bovenstaande criteria en na discussies met betrokken experts zijn de dijktypen ingedeeld in kansarm (niet geschikt), potentieel kansrijk en zeer kansrijk. Op bladzijde 18 en 19 worden alle dijktypen benoemd en wordt in kernwoorden de status toegelicht.



DIJKENATLAS

De dijkenatlas (Dijken van Nederland, Lola landschapsarchitecten, 2014) vormt een belangrijke onderzoekbasis waarop we ons in dit onderzoek op baseren. Op verzoek van de opdrachtgevers nemen we deze ruimtelijke indeling in dijkgroepen, dijksystemen en dijktypes als basis voor dit onderzoek.

DIJKTYPOLOGIEËN EN GESCHIKTHEID VOOR ZONNE-ENERGIE O.B.V. DE DIJKENATLAS DIJKEN IN NEDERLAND

ZEEDIJKEN	
Vroege Zeedijk	Verdwenen middeleeuwse dijk
Dijksysteem: Zeedijk in Noord Nederland	
Waker	Zeer kansrijk Direct waterkerend - Zee of kwelder - hoog (8) - rechtlijnig - kaal - gras - golfkerende stenen/asfalt
Slaper	Kansrijk Laag (3m) - bebouwing aan de voet - bomen - rechtlijnig
Dromer	Kansarm Te laag - bebouwing op de dijk
Opdijk	Kansarm Te laag
Dijksysteem: Zeedijken in duingebied - Kustgebied	
Stuifdijk	Kansarm Dijk onder duin. Zonnepanelen in duingebied niet wenselijk
Dijk-in-duin	Kansarm Dijk onder duin. Zonnepanelen in duingebied niet wenselijk
Dijk- in boulevard	Kansarm Zonnepanelen in intensief recreatiegebied niet wenselijk Beter op daken.
Dijksysteem: Zuidwestelijke zeekleigebied	
Waker	Zeer kansrijk Direct waterkerend - geen/weinig voorland - stenen/asfalt - gras
Inlaagdijk	Kansarm Buitenzijde ligt te dicht op onderhoudsweg derhalve niet geschikt. Binnenzijde niet geschikt ivm natuurwaarden inlaag.
Dijksysteem: Zuidwestelijke zeekleigebied	
Havenkanaaldijk	Kansrijk Hoog, gras, recht. Historische waarde? Lokale dijk. Daarom niet meegenomen in het onderzoek.
Spuikomdijk	Lokaal kansrijkheid bepalen

RIVIERDIJKEN	
Dijksysteem: Historisch dijksysteem	
Zijdewende	Kansarm Rudimenten van lage dijken met hoge historische waarden.
Wachtewende-voorwende	Idem zijdewende
Dijksysteem: Winter- zomerdijk	
Winterdijk	Neutraal Primair waterkerend. Hoog en breed. Weg op kruin, bebouwing op/aan de dijk, slingerend verloop. Binnen- zijde versterkt met steunberm. Beperking door natuur en historische waarden

RIVIERDIJKEN	
Zomerdijk	Kansarm Laag en smal tussen de rivier en uiterwaard. Beperking door natuur- en historische waarden.
Dwarsdijk	Kansarm Compartimenteringsdijk. Kaarsrecht. Bebouwing aan binnenzijde. Historische waarde.
Schaardijk	Kansarm Winterdijk direct aan de rivier. Stenen aan buitenzijde. Woningen aan binnenzijde. Veelal historisch waardvol.
Vingerling	Kansarm. Lokale dijkvorm na dijkdoorbraak. Historisch waardevol.
Dijksysteem: Overlaat - Leidijk	
Overlaat	Zeer lokale dijkvorm voor waterinlaat.
Leidijk	Kansrijk Begeleidt gereguleerd overstromen in komgebieden. Nieuwe dijken (zoals bij de bypass Kampen) zijn kansrijk. Oude dijken hebben historische waarden en zijn minder kansrijk
Limburgse Zijdewende	Kansarm. Historisch dijktype.

POLDERDIJKEN	
Dijksysteem Polderdijken van kustlandschap	
Aanwasdijk	Kansarm Lage dijken
Polderdijken van rivierenlandschap	
Kadijk	Kansarm Lage dijk met bebouwde kade
Tiendweg	Kansarm Lage historische kade
Dijksysteem Polderdijken van het veenlandschap	
Polderboezemdijk	Neutraal Dijk rond droogmakerij. Hoogteverschil aan binnen en buitenzijde. Ringvaart. Soms bomen. Soms bebouwing aan/op de dijk. Meestal een weg. Historische waarden kunnen berking vormen.
Polderringdijk	Kansarm Dijk langs boezemwater (vaak o.b.v. kreken en veenrivieren). Rechlijnig breed water. Poldermolens en dijkwoningen. Rondelopende dijk. Vaak historische waarden.
Landscheidingsdijk	Kansarm Grens tussen waterpeilen en vaak waterschappen. Historische waarden.

KANAALDIJKEN	
Dijksysteem Kanaaldijken	
Kanaaldijk	Neutraal Kaarsrecht, damwand oevers, bomenrijen. Beperkte hoogte (door gereguleerd waterpeil). Bomenrijen en vaak geringe hoogte maakt deze dijk minder geschikt.

MEERDIJKEN	
Dijksysteem Meerdijken	
Meerdijk van het nieuwe land	Zeer kansrijk Rechte kale hoge grasdijk aan nieuw land. Steenbekleding buitentalud aan water. Vergelijkbaar met zeedijken.
Compartimenteringdijk	Zeer kansrijk Verdeelt droogmakerij in delen. Grasdijk. Land aan weerzijden. VB Knardijk. Hoog en rechte lijn.
Meerdijk van het oude land	Zeer kansrijk Voormalige zeedijk (na afdamming zeearm). Buitentalud versterkt met steenbekleding. Hoge grasdijk. Lokale verschillen vraag maatwerk. Weg achter de dijk met zeedorpen.

WATERLINIEDIJKEN	
Dijksysteem Waterliniedijken: historische waarde maakt dit dijksysteem ongeschikt maar kan het dijksysteem ook een nieuwe betekenis geven.	
Hoofdweerstandsdijk	Neutraal Grasdijk in landschap aan inundatiekom, tankgracht, batterijen achter de dijk. Historische waarde.
Acces	Neutraal Grasdijk in landschap door inundatiekom.
Spoeldijk	Lokale dijk.

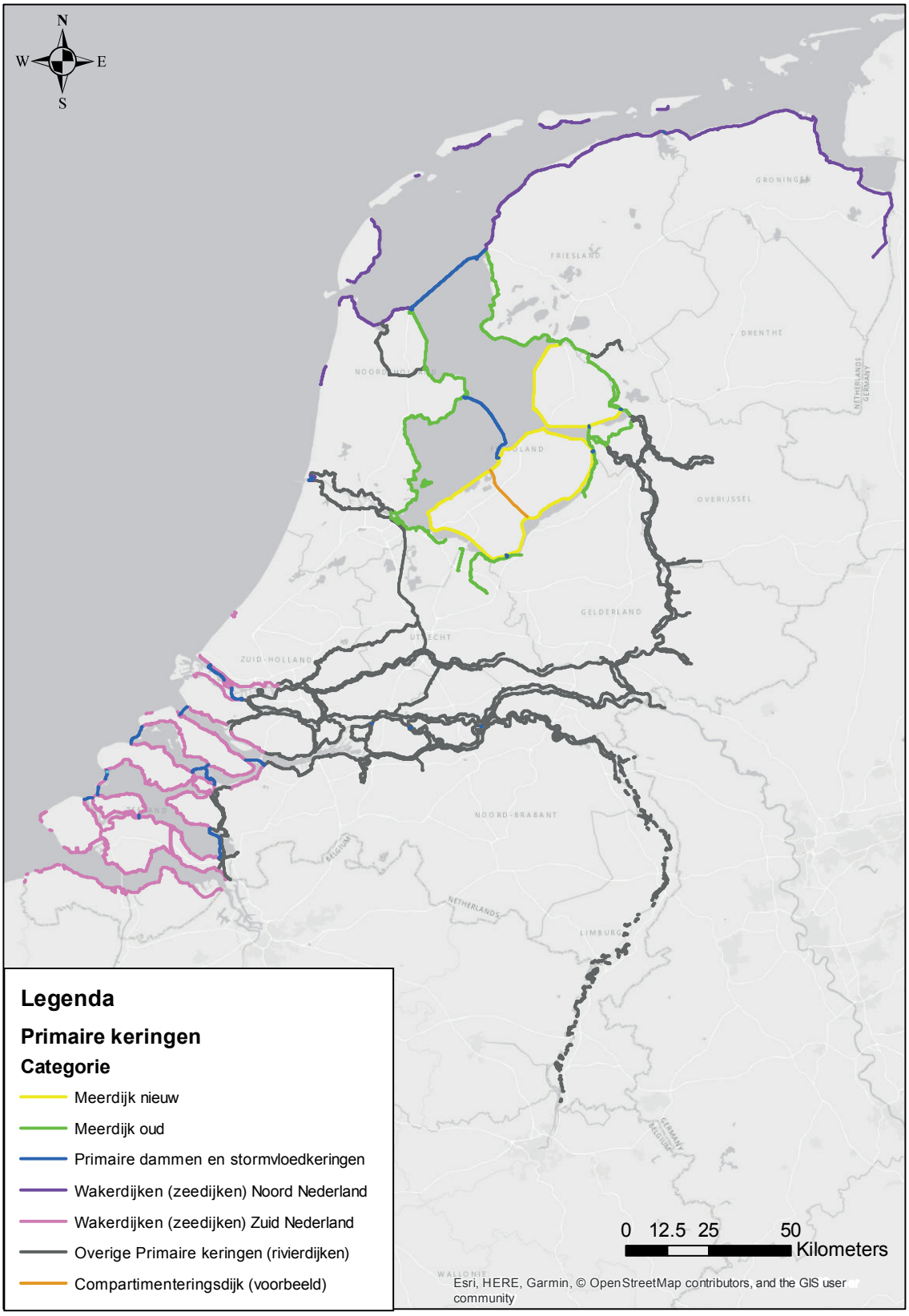
DAMMEN EN STROMVLOEDKERINGEN	
Open dam	Als gebouw te beschouwen
Doorlatende dam	Als gebouw te beschouwen
Gesloten dam	Zeer kansrijk Steenstort en asfalt aan beiden zee- en meerzijde. Tevens verbindingsweg. Hoge dijk. Vaak combinatie met gras.

NOODDIJKEN	
	Kansarm door tijdelijk karakter.

KANSRIJK DIJKTYPEN/DIJKGROEPEN
De dijktypen Wakerzeedijk Noord en Zuidwest Nederland
Het dijksysteem Meerdijken (met dijk van het oude en nieuwe land en compartimenteringsdijk)
Het dijktype gesloten dam

Dijken die niet als zeer kansrijk worden benoemd kunnen wel kansrijk zijn voor lokale initiatieven en/of kleinschalige opstellingen die buiten dit onderzoek vallen. De principes uit dit onderzoek kunnen kleinschalige opstellingen en lokale initiatieven inspireren ook ten aanzien van thermische energie. We noemen rivierwinterdijken als voorbeeld van een dijktype waar grootschalige PV-systemen niet kansrijk zijn. Echter kleinschalige opstellingen gekoppeld aan lokale (thermische) toepassingen met bijvoorbeeld een directe levering aan binnendijks gebieden zijn goed denkbaar al dan niet in combinatie met dijkversterking.

FIGUUR 14 **KANSRIJKE DIJKEN O.B.V. DIJKENATLAS**



4.3 DRIE CONCEPTEN EN VOORBEELDEN VOOR ZON OP DIJKEN

De drie opgaven en concepten zijn in een inspiratieschets uitgewerkt waarbij er vanuit gegaan is dat beiden zijden van de dijk ideaal op de zon liggen om alle mogelijkheden en kansen in beeld te brengen. In de praktijk zal uiteraard altijd maar een zijde als zonnedijk worden uitgevoerd.

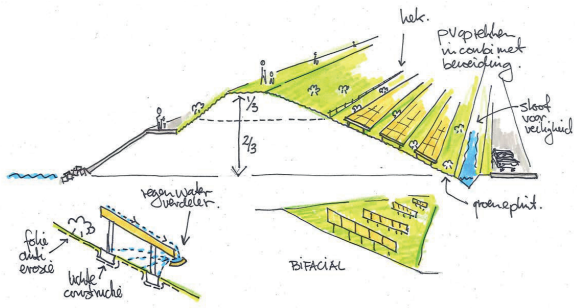
Elk concept is vervolgens uitgewerkt voor een van de kansrijke dijktypen op basis van een voorbeeldlocatie (die in de meeste gevallen is ontleend aan 'de Dijken van Nederland').

TABEL **DRIE CONCEPTEN GEKOPPELD AAN KANSRIJKE DIJKTYPEN EN VOORBEELDLOCATIES**

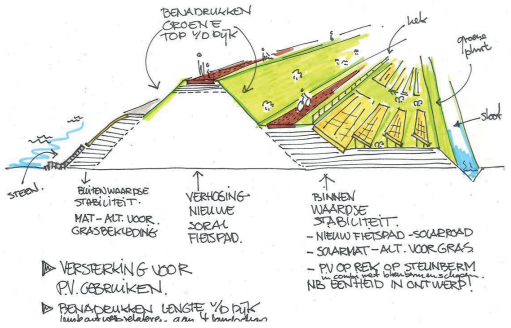
paragraaf	Concept Zon op dijken	Kansrijk dijktype/dijkgroep	Voorbeeldlocatie
4.3.1 4.3.2	Inpassen op bestaande dijk met huidige stand van de techniek	De dijktypen Wakerzeedijk Noord en Zuidwest Nederland	De Poldijk Friesland
4.3.3 4.3.4	Versteken bij veiligheids-opgave met & huidige stand van de techniek	Het dijksysteem Meerdijken (met dijk van het oude en nieuwe land en compartimen-teringsdijk)	Zuidermeerdijk op de NOpolder tussen Rampol en Urk Flevoland
4.3.5 4.3.6	Vernieuwen tot een energiedijk met innovaties van de toekomst	Het dijktype gesloten dam	Amsteldiepdijk tussen Waddenzee en Amstelmeer - Noord Holland

FIGUUR 15

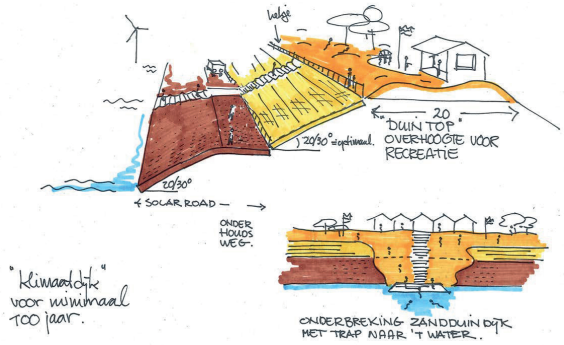
INSPIRATIESCHETS INPASSING PV-SYSTEMEN OP BESTAANDE DIJK



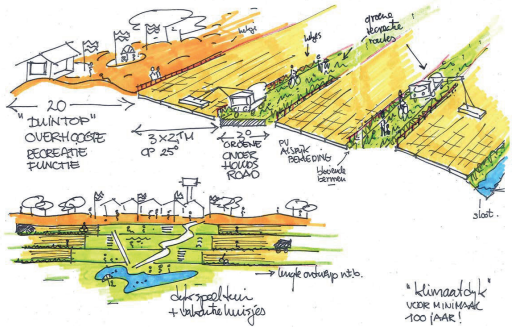
INSPIRATIESCHETS MOGELIJKHEDEN PV SYSTEMEN BIJ DIJKVERSTERKING



INSPIRATIESCHETS NIEUWE ENERGIEDIJK BUITENZIJDE



INSPIRATIESCHETS NIEUWE ENERGIEDIJK BINNENZIJDE



4.3.1 BESTAANDE DIJK EN PV-SYSTEMEN

PRINCIPE

Lange lijnen van PV-systemen op binnendijks dijktalud inpassen zodat de hoofdvorm van de bestaande dijk herkenbaar blijft. Daarom blijft de groene top, circa 33% van de dijk, herkenbaar als groene dijk.

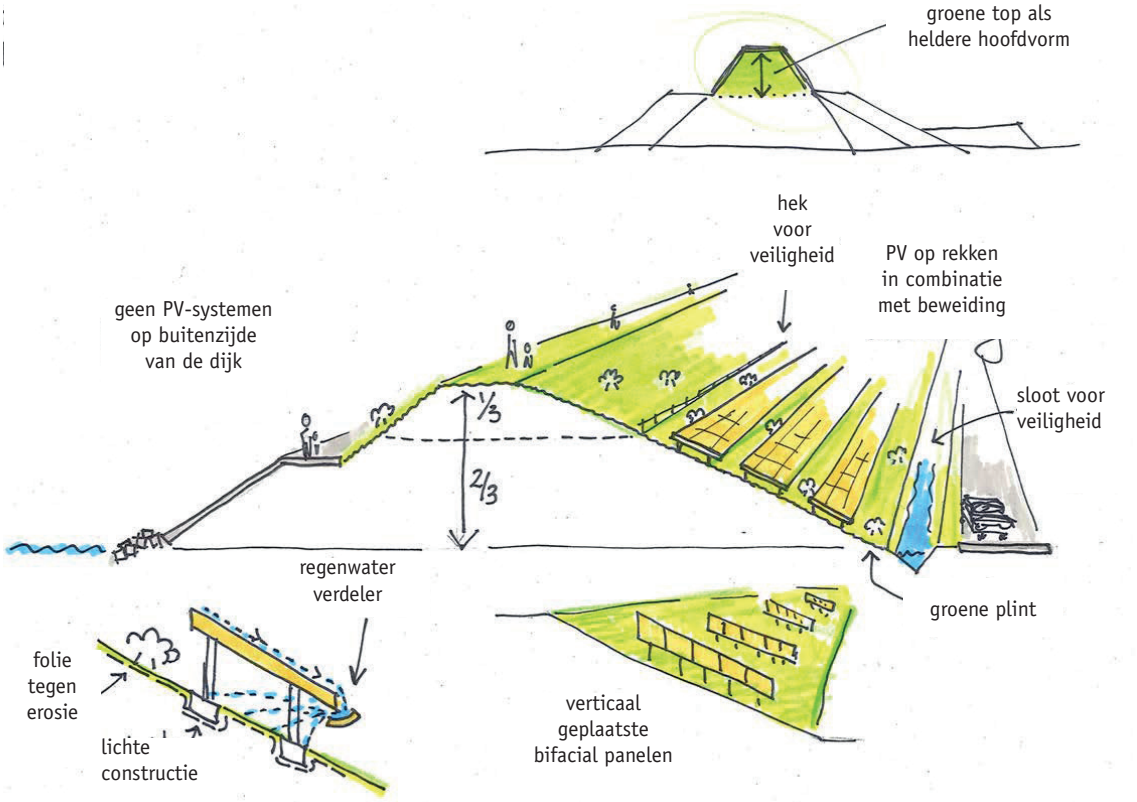
INRICHTING

- Aan de buitenzijde van dijk zijn er geen PV-systemen in te passen met de huidige stand van de techniek en zonder aanpassingen aan de dijk te doen.
- Binnenzijde van de dijk (onder eventuele onderhoudsweg) worden standaard panelen (glas in glas) op rekken geplaatst in de helling van de dijk. Deze worden gecombineerd met beweiding door schapen en bloemrijkgrasland (dubbelruimtegebruik). Rekken worden daarom met enige tussenruimte geplaatst. Een sprenkelsysteem verdeelt regenwater dat op panelen valt over het gras onder de panelen.
- Ten bate van veiligheid: hekwerk aan bovenzijde en een sloot onderzijde voorkomen dat mensen de PV-systemen betreden.

EFFECTEN

- PV-systemen benadrukken zo de lengte van de dijk. Op basis van het omringende landschap en belevingslijnen moet steeds een lengte-ontwerp gemaakt worden. Transformatorkasten kunnen daarbij zorgen voor een extra ritme van punten op de dijk. Afgewogen moet worden om deze nadrukkelijk of onopvallend vorm te geven.
- Beleving: groene top en groene plint kaderen PV-systemen in en zorgen zo veel mogelijk voor behoud van de beleving van een groene dijk. Beleving vanaf bovenzijde dijk: voorbijganger kijkt over de panelen op het landschap. Beleving onderzijde: panelen vormen een eenduidig lijn op de dijk. Beleving vanaf afstand: panelen vormen een eenduidige loper op de dijk ingekaderd door groene dijk. De hekwerken worden vormgegeven als andere hekwerken waardoor deze de beleving minimaal verstoren.
- Minimale hoogte van bruikbare dijk voor efficiënt systeem is 3 meter
- Alternatief is verticaal geplaatste bifacial panelen. Ruimtelijk belevingsonderzoek moet aantonen of deze panelen de lange lijn van de dijk ontkrachten of dat ze vanaf afstand een lange lijn kunnen vormen. Dat wordt mede bepaald door de onderlinge afstand van circa 20 maal de hoogte van de panelen waarop bi-facial panelen geplaatst kunnen worden om slagschaduw te voorkomen.
- We verwachten een ecologisch rijker milieu door grotere diversiteit in schaduwrijke en zonnige plekken op het talud. Bovendien kan overgang naar zonne-energie worden aangegrepen om het maaibeheer te exentiseren, wat de biodiversiteit in sterke mate kan verhogen (zie paragraaf 2.2.4.).

FIGUUR 16 **INSPIRATIESCHETS INPASSING PV-SYSTEMEN OP BESTAANDE DIJK**



4.3.2 VOORBEELDDIJK: WAKERZEEDIJKEN VAN NOORD EN ZUIDWEST NEDERLAND

De Wakerdijken zijn kansrijk door de basale dijkvorm, lange eenduidige lengte, grote hoogte (tot 8 meter) en het ontbreken van bebouwing en beplanting. De buitenzijde kan kansrijk zijn door combinaties te zoeken met asfalt, basalt en/of betonzuilen. De wakerzeedijken van Noord Nederland zijn geschikt door de ligging op het zuiden aan een open en eenduidig landschap. De binnenzijde van de wakerzeedijken in Zuidwest Nederland grenst soms aan de inlaag met hoge natuurwaarden die bij plaatsing PV-systemen niet mogen worden verstoord. Voor de Wakerdijken nemen we de Poldijk in Friesland als voorbeeldlocatie en gaan we uit van het concept inpassing in de bestaande dijk.

KWALITEITEN & KARAKTERISTIEKEN VAN DE POLDIJK:

- Een hoge zeedijk tot 8 meter hoogte
- Robuuste maat en schaal. Een ‘stoere’ en kale dijk.
- Markante lange lijn in weids akkerland
- Herkenbaar als onderdeel van het systeem van dijken en landwinning
- Lange eenduidige rechte lengtes - ‘snoeren in het landschap’ (Grutsk op ‘e romte)
- Heldere grootschalige landschapsopbouw met kwelders aan noordzijden en agrarische zeekleipolders aan de zuidzijde
- Eenduidige vormgeving en bekleding met gras, asfalt en betonzuilen over lange lengte
- Ritme van dijkovergangen

(mede o.b.v. ‘Dijken van Nederland’, Lola en ‘Grutsk op ‘e romte’ - provincie Fryslan)

FIGUUR 17 **IMPRESSIE VAN DE POLDIJK IN FRIESLAND**

FIGUUR 18 **FOTOMONTAGE VAN ZONNEPANELEN OP DE POLDIJK IN FRIESLAND**

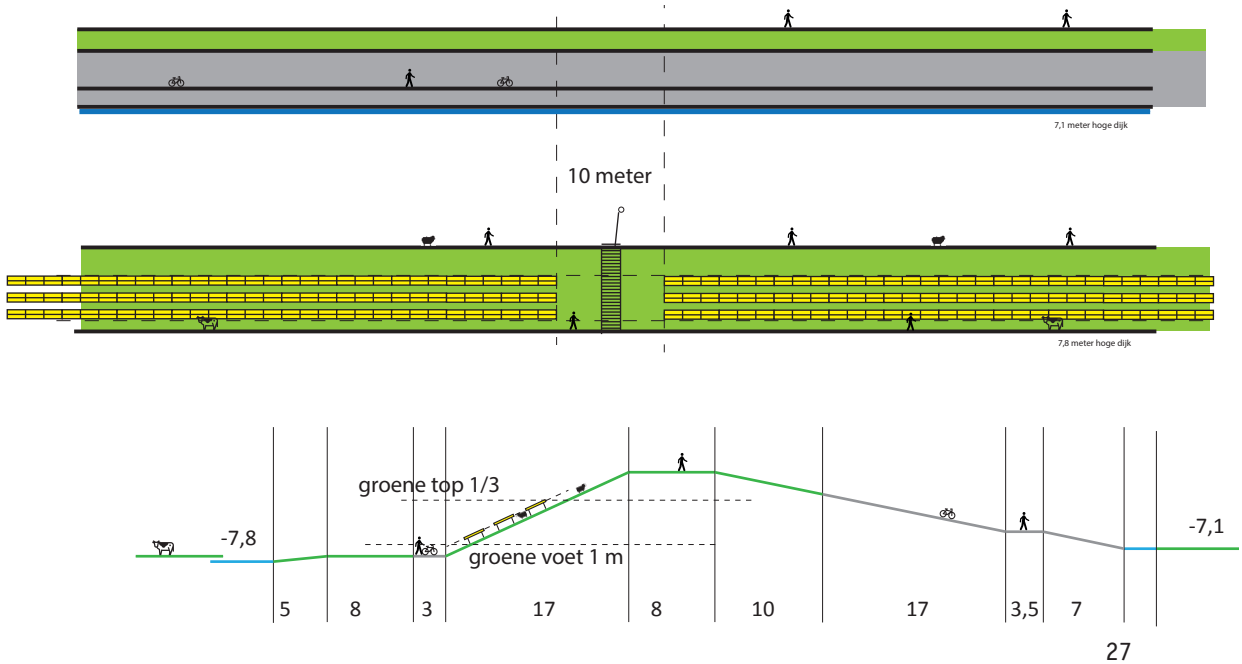
FUNCTIES EN MEDEGEBRUIK

- Direct waterkerend met schouwpad
- Beweiding met schapen
- Recreatief medegebruik als wandelpad

ONTWERPPRINCIPES VOOR 'INPASSEN' VAN PV -SYSTEMEN VOOR WAKERDIJKEN IN HET ALGEMEEN EN DE POLDIJK IN HET BIJZONDER

- Wanneer de landzijde tevens de zuidzijde is, is deze het meest geschikt voor inpassing van PV-systemen.
- Zonder aanleiding voor versterking van de dijk zijn PV-systemen aan de waterzijde met de huidige stand van de techniek niet haalbaar/betaalbaar. Ook is de expositie van de waterzijde niet gunstig bij de Poldijk. Overige principes gaan daarom over de landzijde.
- Voorkeur hebben glas in glas zonnepanelen op rekken van 80 cm hoog met oppervlakkige fundering in het gras waarmee de huidige grasbekleding van de dijk gehandhaafd kan worden (combinatie wordt in pilot nader onderzocht). Bifacial systemen zijn een alternatief maar hebben ruimtelijk niet de voorkeur door de grote hoogte van objecten die dan op de dijk geplaatst worden en het eenduidige beeld verstoren.
- Door de zonnepanelen in lange lengtes te ontwikkelen versterken de zonnepanelen de robuuste maat en schaal van de dijk. Lengteontwerp vraagt nader onderzoek.
- Lange lijnen van PV-systemen benadrukken de grote lengte van de dijk, versterken het 'snoer' in het landschap met een loper van zonnepanelen.
- De dijk behoudt met een groene plint en een groene top haar karakter als groen lint.
- De dijk wordt met zonnepanelen nadrukkelijk herkenbaar in het landschap. Vanaf grote afstand ontstaat door geleding van de loper van zonnepanelen een lengteritme in het landschap
- Gesepareerde lijnen van panelen op rekken bieden ruimte aan een gezonde en goed te beheren grasmat die ook begraasd kan worden.
- Een sloot aan de onderzijde en een hek aan de bovenzijde maken de PV-systemen onbereikbaar en zorgen voor een veilige situatie.
- Cultuurhistorische elementen, zoals gemalen, aan/op de dijk worden ingepast en vormen aanleiding voor geleding in het lengteprofiel met een groenzone van bijvoorbeeld 10 meter (ontwerpopgave).

FIGUUR 19 **PRINCIPE LENGTE- EN DWARSPROFIEL WAKERDIJK**

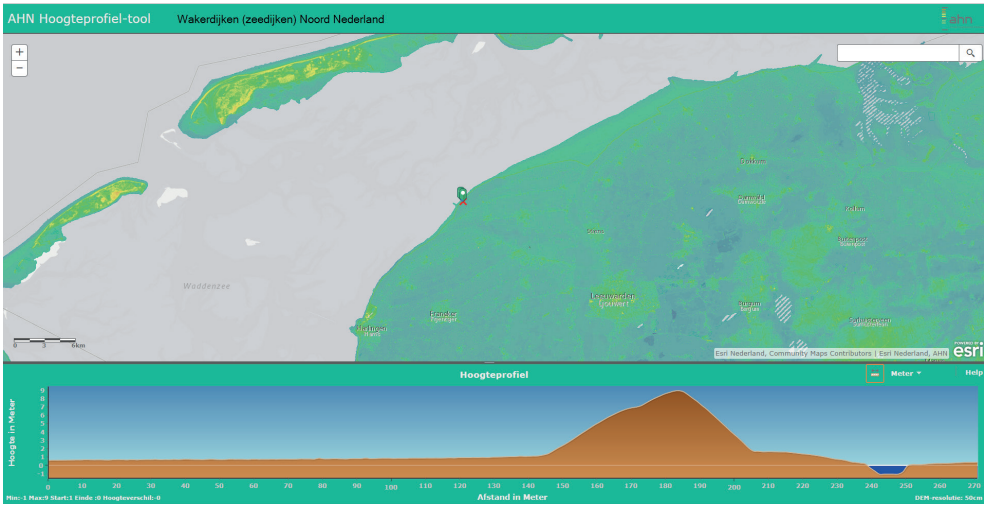


INVLOED OP GEBRUIK/FUNCTIES

- Invloed op de primaire waterkering dient neutraal te zijn. De PV-systemen hebben geen nadelige invloed op de sterkte van de dijk en de dijkbekleding.
- De secundaire functies van de dijk worden mogelijk behouden. Schapen kunnen tussen de zonnepanelen op rekken blijven grazen. Gras kan door transparante zonnepanelen blijven groeien.
- Diversiteit in zon/schaduw kan samen met beheer de ecologische waarde van de dijk vergroten.
- Met de nieuwe functie, duurzame energiewinning, wordt betekenis aan de dijk toegevoegd.
- In Zuidwest Nederland hebben zonnepanelen geen invloed op de bestaande natuur in de zogenaamde inlaaggebieden. Nader onderzoek hoe deze natuurwaarden versterkt kunnen worden.
- Tabel quickscan dijkveiligheid - zie bijlage 2

FIGUUR 20 **LUCHTFOTO POLDIJK - GOOGLE EARTH**

FIGUUR 21 **PROFIEL UIT GISSYSTEEM AHN POLDIJK**



4.3.3 MOGELIJKHEDEN PV-SYSTEMEN BIJ DIJKVERSTERKING

PRINCIPE

Te versterken delen, zo inrichten dat deze optimaal kunnen worden benut voor PV-systemen. Zodoende wordt het verschil tussen de top als groene dijk benadrukt met de versterkte delen. Groene dijktop wordt als herkenbaar archetype behouden. In het lengte profiel logische lange lijnen maken voor PV-systemen met heldere overgangen.

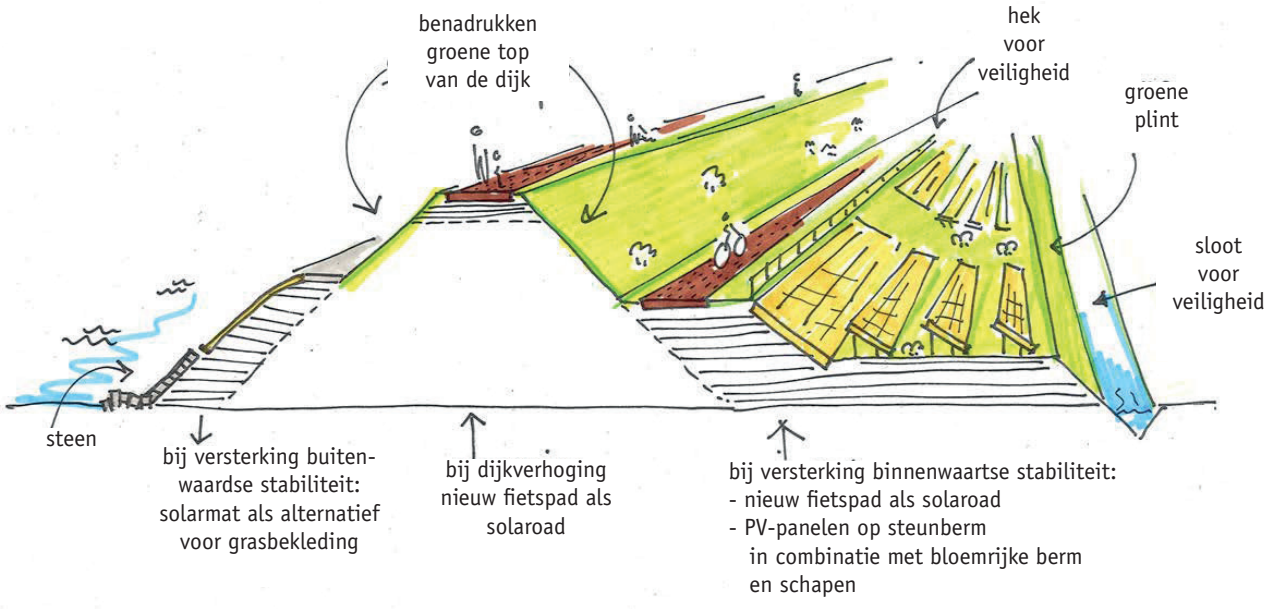
INRICHTING

Bij verbreding van de dijk tbv buitenwaartse stabiliteit de delen die normaliter in gras worden uitgevoerd aanleggen met behulp van solarmatten (die bijdrage aan erosiebestendigheid - dubbelruimte gebruik). Indien mogelijk worden de taluds onder een ideale helling aangelegd (zo mogelijk overdimensioneren). Stenen Buitendijkse taluds worden niet ingezet voor PV-systemen omdat de huidige PV-systemen niet golfslagbestendig zijn.
Wanneer de verharding tot aan de top van de dijk doorloopt kunnen PV-systemen tot aan de top van de dijk het karakter van de dijk versterken en kan afgeweken worden van het groene top principe.
Wanneer de top van de dijk wordt verhoogd kan er een schouwpad worden gelegd op de top van de dijk met PV-systemen in verharding (solaroad).
Bij verbreding tbv binnenwaartse stabiliteit worden talud en steunberm gebruikt voor PV-systemen. Het heeft de voorkeur de steunberm onder een helling aan te leggen die ideaal is voor PV-systemen (en dus iets te overdimensioneren). Op de steunberm worden solarmatten als alternatieve dijkbekleding toegepast of pv-panelen (op rekken) geplaatst en gecombineerd met beweiding en bloemrijkgras. Het talud sluit in beeld aan op de steunberm. Bifacial panelen kunnen een alternatief zijn mits zij de lange lijn van de dijk niet verstoren (zie 2.3.1.)
Wanneer sprake is van verbreding met een steunberm kan een recreatief fietspad worden gecombineerd met een solaroad.
Ten bate van de veiligheid schermen een hek en sloot de PV-systemen af.

EFFECT

- De verandering van de beleving vanaf de top van de dijk is beperkt door de PV-systemen omdat men over de panelen heen kijkt naar het landschap.
- Bij de beleving van de dijk vanuit het landschap wordt duidelijk wat oude en nieuwe delen van de dijk zijn. De groene top en de groene teen van de dijk zijn daarbij dominant. De PV-systemen vormen een loper op de dijk die de lengte benadrukt.
- De ecologische waarde van de dijk kan toenemen door grotere diversiteit in en beheer. De ecologische waarde van de dijk kan toenemen door grotere diversiteit in gradiënten (schaduw/zon standplaats) en het gelijktijdig extensiveren van maaibeheer.

FIGUUR 22 **INSPIRATIESCHETS - MOGELIJKHEDEN PV SYSTEMEN BIJ DIJKVERSTERKING**



- te versterken delen zo inrichten dat ze optimaal benut worden voor PV-systemen
- met groene top blijft dijk herkenbaar
- benadrukken van de lengte van de dijk

NB eenheid in ontwerp

4.3.4 VOORBEELDDIJK: MEERDIJKEN VAN HET OUDE EN HET NIEUWE LAND

Met de meerdijken van het oude land worden de oude zeedijken bedoeld die door afdamming van zeearmen in de Zeeland en rond de Zuiderzee meerdijken zijn geworden.
Meerdijken van het nieuwe land zijn de dijken die de nieuwe 20ste eeuwse polders, die op de zee en meren zijn gewonnen, beschermen zoals de dijken van Flevoland. Noot: de Afsluitdijk valt onder de categorie gesloten dammen.
De dijken zijn door hun verleden vergelijkbaar met de zeedijken met lange rechtstanden, een robuust profiel en weinig beplanting of bebouwing op of rond de dijk. Buitendijks is de teen van de dijk vaak verhard met betonblokken en/of betonzuilen. De top en de binnenzijde kennen vrijwel altijd een grasbekleding. Dat maakt de dijken erg geschikt voor PV-systemen.
We realiseren ons dat de meerdijken, met name die van het oude land, per locatie zeer verschillend kunnen zijn en derhalve maatwerk vragen.
Als voorbeeld nemen we de Zuidermeerdijk tussen Ramspol en Urk (Noordoostpolder) om algemene ontwerpprincipes van af te leiden. We passen het concept 'versterken' met de huidige stand van de techniek bij dijkversterking toe waarbij de realisatie van PV-systemen in sommige gevallen meegekoppeld kan worden bij dijkversterking.

FIGUUR 23 **IMPRESSIE VAN DE ZUIDERMEERDIJK - NO-POLDER**

KWALITEITEN & KARAKTERISTIEKEN VAN DE ZUIDERMEERDIJK

- Robuuste stevige hoge dijken van circa 5 meter hoog ten opzichte het water en tot 9 meter hoog ten opzichte van het nieuwe land. Dijk heeft een asymmetrisch profiel.
- Rechte kale hoge grasdijk aan het nieuwe land.
- Rechte kale hoge dijk met steenbekleding in buitentalud aan water.
- Grenzend aan open, grootschalig rationeel ingericht (orthogonaal) agrarisch polderlandschap
- Vergelijkbaar met profiel als zeedijken.

(mede o.b.v. 'Dijken van Nederland', Lola architecten, 2014)

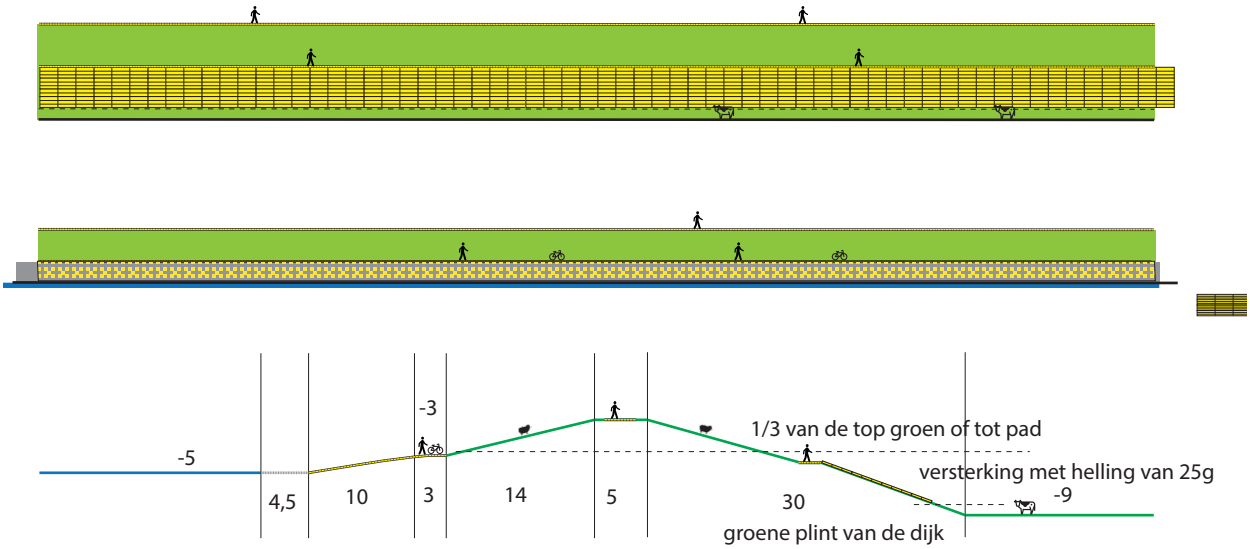
FUNCTIES EN MEDEGEBRUIK

- Primaire waterkering.
- Agrarisch medegebruik met beweiding aan binnenzijde.
- Afhankelijk van de ontsluiting hebben de dijken een recreatieve functie.
- De Zuidermeerdijk wordt gekenmerkt door lijnopstellingen van windturbines die de dijk volgen. Twee lijnen turbines staan in het IJsselmeer en een staat achter de dijk aan de landzijde (in de visualisatie staat nog het oude windpark).

ONTWERPPRINCIPES VOOR PV-SYSTEMEN BIJ DIJKVERSTERKING VAN MEERDIJKEN IN HET ALGEMEEN EN DE ZUIDERMEERDIJK IN HET BIJZONDER

- De Zuidermeerdijk tussen Ramspol en Urk ligt met haar waterzijde georiënteerd op het zuiden. Daardoor is de waterzijde de ideale locatie voor PV-systemen die benut kan worden bij dijkversterking.
- Karakteristiek van de groene top van de dijk wordt behouden voor minimaal 33% van de dijkhoogte. De versterkte delen van de dijk worden ingezet voor PV-systemen zodat de groene top van de dijk als archetype herkenbaar blijft. In dit voorbeeld betekent dit dat de top van de dijk boven het onderhoudspad niet wordt gebruikt voor zonne-energie.
- De kenmerkende verharde voet van de dijk wordt versterkt en behoudt zijn verharde karakter en wordt vervangen door Solaroad en/of SolarRevetment systemen die zo ontwikkeld worden dat ze ook golfremmend werken en bestand zijn tegen kruiend ijs.
- Wanneer de landzijden van meerdijken, die op het zuiden georiënteerd zijn, worden versterkt dan wordt het versterkte deel onder een ideale hoek aangelegd voor zonne-energie en voorzien van solarmatten of panelen in het gras.
- Bifacial panelen en panelen op rekken hebben niet de eerste voorkeur omdat deze het typische ruimtelijk profiel van de dijk kunnen verstoren wat andere PV-systemen niet doen. Met ontwerpend onderzoek kunnen wel mogelijk ruimtelijke concepten worden ontwikkeld.
- Voor zowel de land- als waterzijde geldt dat de lange loper van PV-systemen de lange lijn van de dijk versterken.
- Het lengteprofiel is een ontwerpopgave waarin de lengtes van de zonneloper worden bepaald. In het landschap worden daarvoor ruimtelijke aanleidingen opgepakt zoals de bijvoorbeeld de (historische) verkaveling of waterbouwkundige werken als sluizen en gemalen.
- Met name de landzijde van de dijk wordt met zonnepanelen nadrukkelijk herkenbaar in het landschap. Vanaf grote afstand ontstaat een lengte ritme in het landschap door geleding van de zonneloper en is de dijk duidelijker herkenbaar dan voorheen.
- Aan de landzijde zorgt een sloot aan de onderzijde en een hek aan de bovenzijde voor een veilige situatie. Aan de waterzijde zijn veiligheidsvoorzieningen niet nodig.
- Cultuurhistorische elementen aan/op de dijk worden ingepast en vormen aanleiding voor variatie in het lengteprofiel.

FIGUUR 24 **PRINCIPE LENGTE- EN DWARSPROFIEL MEERDIJK**



FIGUUR 25 **FOTOMONTAGE VAN PV-SYSTEMEN OP DE ZUIDEMEERDIJK IN DE NOORDOOSTPOLDER**

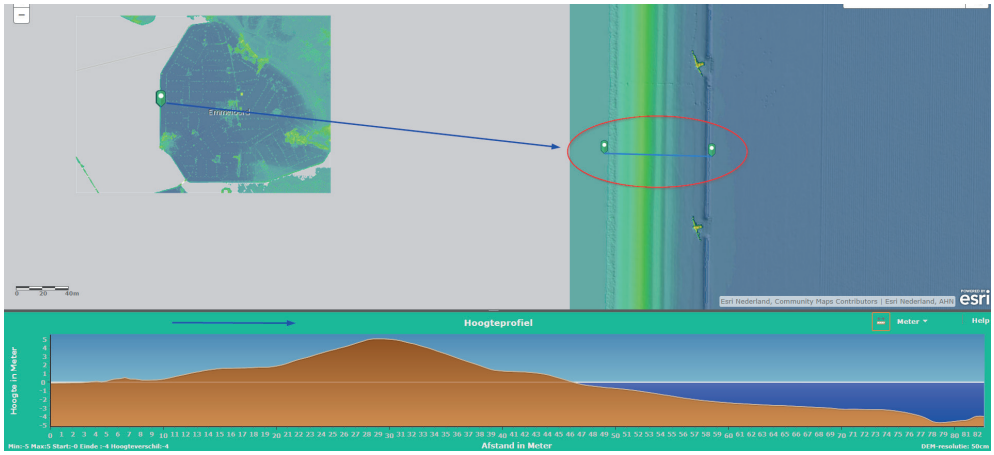
INVLOED OP GEBRUIK/FUNCTIES

- De invloed op de primaire waterkering dient neutraal te zijn. Zonne-energiesystemen kunnen ook bijdragen aan de stevigheid en/of het waterkerend vermogen. Zo kunnen Solarmatten de stevigheid van de dijkvergroten, erosie voorkomen en verlagen ze de waterdoorlatendheid.
- Aan de waterzijde blijft ruimte voor recreatieve fietsers en wandelaars.
- Recreatieve waarden worden versterkt met voorlichting, uitzichtpunt van zonnepanelen (solarroadbalkon) en oplaadmogelijkheid voor telefoon en fiets.
- Op de overgang van de versterkte voet aan de landzijde en de 'oude' groene dijktop is ruimte voor een nieuw recreatief wandel- en eventueel fietspad tevens onderhoudpad.
- De dijk ontwikkelt met een groene plint aan de landzijde meerwaarde voor ecologie. Een zijde, die niet ingezet wordt voor zonne-energie, behoudt haar bestaande ecologische waarde. De combinatie met zonne-energie en ecologie op de andere zijde vraagt nader onderzoek.

- Begrazing van de dijk is mogelijk op de groene top (oppervlak voor begrazing neemt af).
- In combinatie met andere duurzame energiebronnen (o.a. windturbines) kunnen beide systemen elkaar versterken.
- Tabel quickscan dijkveiligheid - zie bijlage 2.

FIGUUR 26 **LUCHTFOTO ZUIDERMEERDIJK - GOOGLE EARTH**

FIGUUR 27 **PROFIEL ZUIDERMEERDIJK (UIT: AHN GIS SYSTEEM)**



4.3.5 NIEUWE ENERGIEDIJKEN

PRINCIPE

Een andere benadering is een nieuwe dijk te ontwikkelen die optimaal kan worden ingericht voor energiewinning en waterveiligheid: een nieuwe energiedijk. Dat vraagt om ons huidige beeld van een dijk los te kunnen laten. De dijk richt zich daarbij ook op koppeling aan andere nieuwe functies en landschapsvormende processen.

INRICHTING

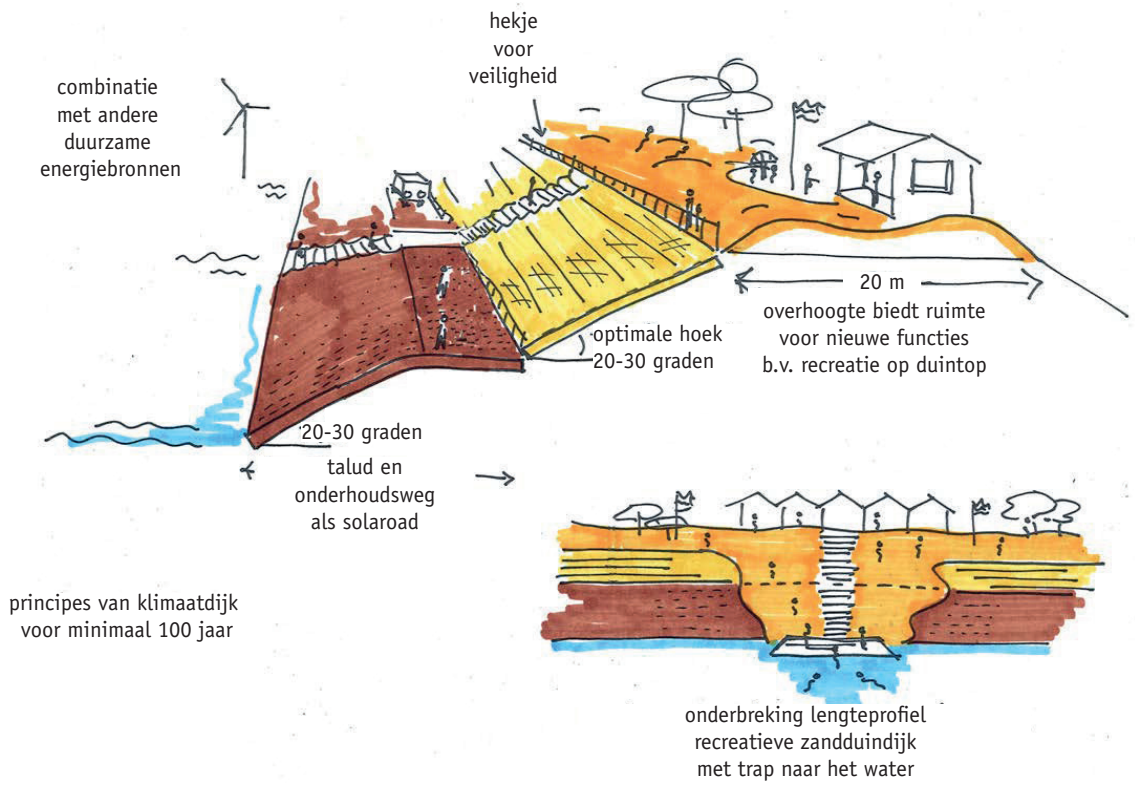
- Taluds van de nieuwe energiedijk hebben de optimale helling tussen de 20 en 30 graden voor PV-systemen. De dijk krijgt daarmee de breedte van een klimaatdijk wat mogelijkheden biedt om de top van de dijk (lokaal/kleinschalig) anders in te richten met recreatieve functies met groots uitzicht en georiënteerd op de zuiden. Ook andere functies zoals woonfuncties zijn op de top van een klimaatdijk mogelijk. De invulling kan aansluiten bij het aanliggende landschap: bijvoorbeeld een duintop bij een zeedijk en een weidetop bij een meerdijk. Dit is mogelijk door de overmaat die de dijk biedt. De top van de dijk kan ook ruimte bieden aan een nieuw ecosysteem.

- De dijken worden conform het principe van de klimaatdijken voor minimaal 100 jaar aangelegd.
- De dijk kan worden gecombineerd met windturbines mogelijk op de top waarvan de fundering een bijdrage levert aan de stevigheid van de dijk en mogelijk als kwelscherm kan worden ingezet. Zon en wind maken efficiënt gebruik van hetzelfde elektriciteitsnetwerk.

BUITENZIJDE

- De delen van de dijk die voor de golfslag verhard moeten zijn worden uitgevoerd in een innovatief systeem van PV in verharding (SolarRevetment) dat bestand is tegen wind en water. Dit systeem wordt ook gebruikt voor de onderhoudsweg, waarmee beiden naadloos in elkaar over gaan in een flauwe ronding. Het materiaal wordt zo ontwikkeld en/of gelegd dat de ruwheid ook golfremmend werkt.
- Het lengteontwerp wordt afgeleid van het omliggende landschap. Op diverse plekken worden de PV-systemen onderbroken door dijkovergangen. Zo wordt de recreatieve verbinding met het water gemaakt. De inrichting van de top van de dijk (die is afgeleid van het omringende landschap) vormt inspiratie voor de inrichting van deze onderbrekingen. Bij een duintop kan de onderbreking bijvoorbeeld worden vormgegeven met zand waardoor duinvorming ontstaat wat recreatieve en ecologische kansen oplevert.

FIGUUR 28 **INSPIRATIESCHETS - NIEUWE ENERGIEDIJK BUITENZIJDE**



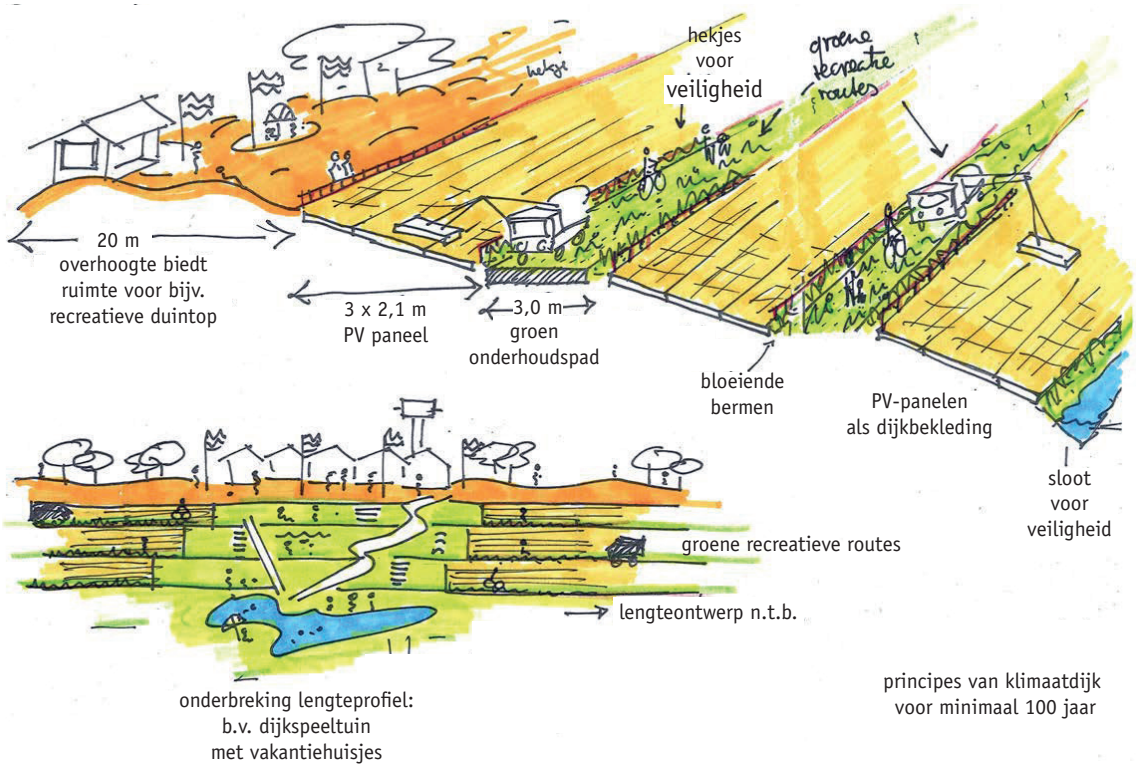
BINNENZIJDE

- De binnenzijde van de dijk wordt onder een ideale helling van 20 a 30 graden geheel bekleed met PV-systemen. Onderhoudswegen verdelen de dijk in een getrapt systeem. Vanaf deze wegen worden de panelen schoongehouden. Een dijk van 8 meter hoog kan onderverdeeld worden in drie taluds van 6,30 lengte (waarin drie systemen van 2,1 meter (drie panelen) passen).
- De onderhoudswegen worden in halfverharding aangelegd met groene bermen waardoor

deze stroken ruimte bieden aan natuurwaarden en een ecologische verbinding vormen. Recreatief medegebruik van deze onderhoudswegen voegt een nieuwe beleving aan het landschap toe.

- Onderhoudswegen kunnen ook ontwikkeld worden als solaroads. De groene bermen van de wegen zorgen dan voor groene geleding.
- Het lengteontwerp wordt afgeleid van verkaveling en historisch landschappelijk aanleidingen in het aangrenzende landschap. Net als aan de buitenzijde worden de PV-systemen aan de binnenzijde onderbroken met dijkovergangen. Het dijktalud is daarbij een ideale speeltuin en recreatieruimte op de zuidzijde die aansluit op de top.

FIGUUR 29 **INSPIRATIESCHETS - NIEUWE ENERGIEDIJK BINNENZIJDE**



4.3.6 VOORBEELDDIJK: GESLOTEN DAMMEN

Gesloten dammen sluiten de zeearmen van Nederland af. De bekendste zijn de dammen van de Delta- en Zuiderzeewerken. De dammen zijn geschikt voor zonne-energie door de grote hoogte, robuustheid en bekleding met asfalt en steen. Daarbij zijn dammen een staaltje van ingenieurskunst die goed te combineren zijn met nieuwe functies en innovaties. We nemen de Amsteldiepdijk (tussen Waddenzee en Amstelmeer in de kop van Noord Holland) als voorbeeld en beschouwen beide zijden van de dijk alsof deze op het zuiden gelegen zijn om het verschil tussen zee en meerzijde in beeld te brengen. We gaan uit van het concept vernieuwing tot 'energiedijk' met innovaties van de toekomst.

KWALITEITEN & KARAKTERISTIEKEN VAN DE AMSTELDIEPDIJK

- Robuuste hoge dijk/dam circa 8 tot 10 meter hoog
- Hoogstaande ingenieurskunde (de Amsteldiepdijk vormde indertijd de pilot voor de later aan te leggen Afsluitdijk)
- Steenstort en asfalt aan beiden zee- en meerzijden
- Tevens verbindingsweg op 'steunberm' van de dam
- Vaak combinatie met gras op de top van de dam

- Recreatieve routes met grootse uitzichten
- Eb en vloedwerking zorgt voor kwelder natuur

(mede o.b.v. 'Dijken van Nederland', Lola, 2014)

Medegebruik/functies:

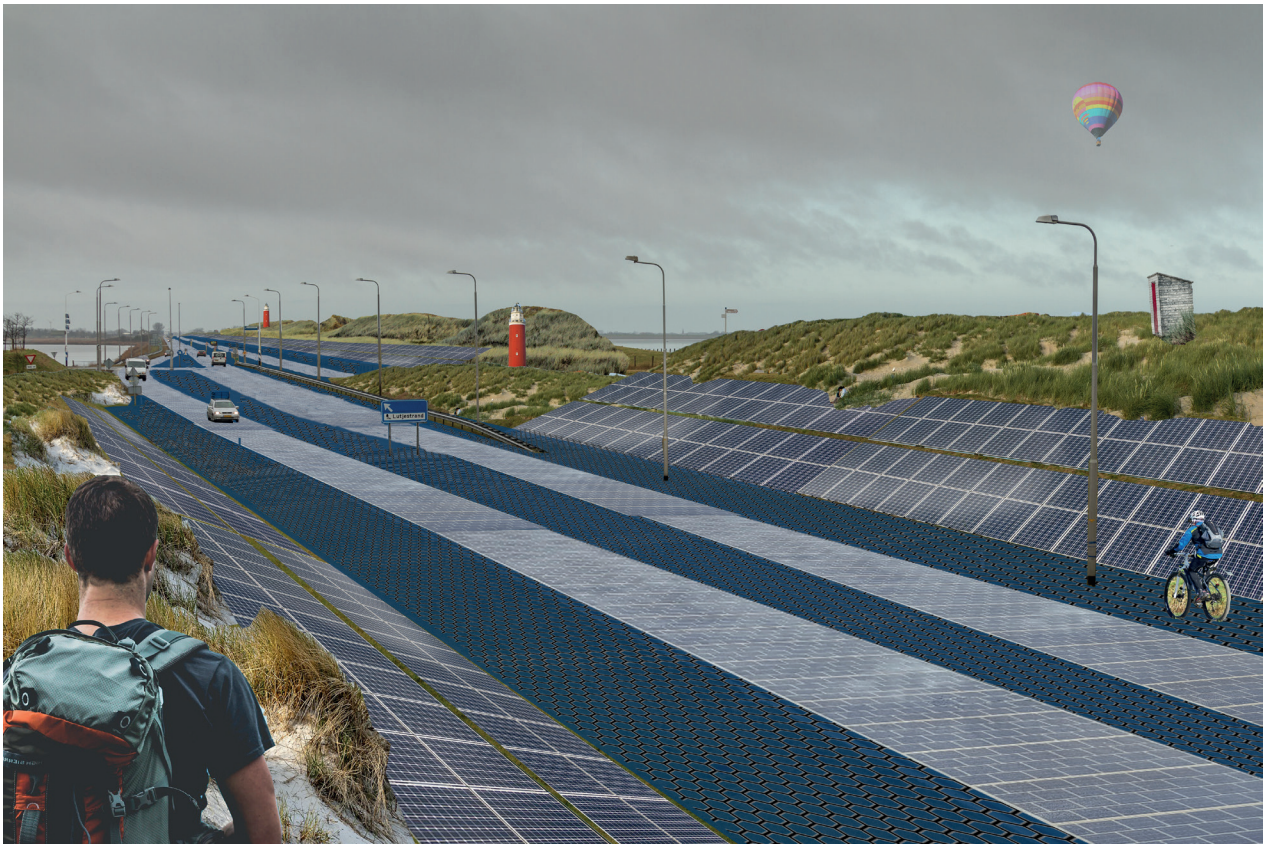
- Primaire waterkering
- Primaire verbindingsweg
- Recreatieve (fiets)verbindingen
- Ecologische waarde aan eb en vloedzijde

FIGUUR 31 **IMPRESSIE VAN DE AMSTELDIEPDIJK - NOORD-HOLLAND**

FIGUUR 30 **FOTOMONTAGE VAN PV-SYSTEMEN MET PRINT**

FIGUUR 32 **LUCHTFOTO AMSTELDIEPDIJK - GOOGLE EARTH**

FIGUUR 33 **FOTOMONTAGE: IMPRESSIE VAN PV-SYSTEMEN OP EEN 'GESLOTEN DAM**



ONTWERPPRINCIPES BIJ VERNIEUWING VAN GESLOTEN DAMMEN TOT ENERGIEDAMMEN

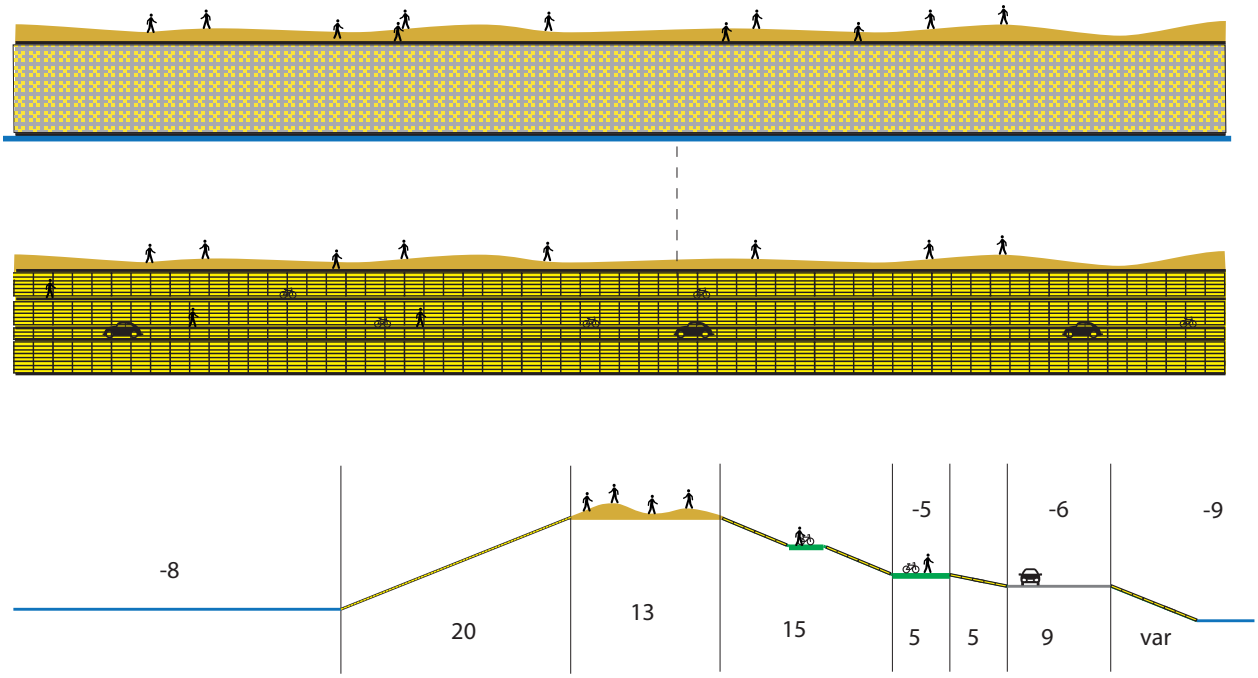
- Het 'hoogstaand staaltje van ingenieurskunst' van de vorige eeuw mag zich transformeren tot een stoere en eigenzinnige energiedam en maakt daarmee een statement voor duurzame energie en wordt het toonbeeld van innovatie in Nederland.
- Dam is als zelfstandige eenheid in het landschap herkenbaar met een begin en een eindpunt.
- Bij ontwikkeling worden de taluds aangepast met een optimale helling voor zonne-energie van 20-30 graden.
- De dam krijgt in zijn geheel een nieuwe huid: Zonnepanelen in flexibel grid die de bekleding van de dam in zijn geheel vervangt. Vandalisme en verkeersveiligheid zijn aandachtspunten.
- Uitzondering hierop vormen de delen die dagelijks golfbestendig moeten zijn, deze worden uitgevoerd in innovatieve Zonne-energiesystemen in verharding (SolarRevetment) die bestand zijn tegen golven en zout en bovendien golfremmend werken.
- De meerzijde wordt ontwikkeld in een getrapt systeem dat geschikt is voor optimaal onderhoud van de PV-systemen.
- Onderhoudswegen in halfverharding zorgen voor een groene geleding van de dijk.
- Door overbreedte van de dam, functioneert deze als klimaatdijk. De top van de dam kan daardoor ingericht worden nieuwe functies. Voor de Amsteldiepdijk bestaat er grote potentie voor een recreatief landschap op de top van de dam dat refereert aan de duinen.

INVLOED OP GEBRUIK/FUNCTIES

- Primaire waterkering wordt versterkt door overmaat en golfremmend vermogen van de PV-systemen. Geogrids (zie 2.1)onder de PV-systemen versterken de dijk en voorkomen erosie.

- Geen invloed op de ecologische waarden. Behoud kweldernatuur. Nieuwe kansen voor natuur op half verharde onderhoudspaden.
- Bijdrage aan toeristische waarden door middel van bijvoorbeeld prints op panelen, lichtkunstwerk of abstract lijnen patroon. De kunstwerken van Daan Roosegaarde in het kader van het project 'icoon afsluitdijk' (2016-2017) kunnen daarbij een inspiratiebron zijn. Dit kan gecombineerd worden met educatie.
- Nieuwe recreatieve gebruiksmogelijkheden door medegebruik onderhoudspaden (struinpaden, ATB routes) en de recreatieve invulling van de top van de dam.
- Combinaties mogelijk met andere duurzame energiebronnen: wind, warmte-koude opslag, waterkracht, zoetzoutenergie.
- Versterking van de cultuurhistorie met nieuwe betekenis en respect voor historie.

FIGUUR 33 **PRINCIPE LENGTE- EN DWARSPROFIEL ENERGIEDIJK**



5

OPBRENGSTPOTENTIEEL ZON OP DIJKEN

Nu de kansrijke dijken voor zonne-energie geselecteerd zijn en we weten hoe de PV-systemen kunnen worden ingepast kunnen we inschatten hoeveel rendement dat kan opleveren. En willen we bepalen of dit een substantiële bijdrage kan leveren aan onze energiebehoefte. We gebruiken daarbij de huidige stand van de techniek als uitgangspunt en passen geen innovaties toe in de berekeningen.

5.1 FICTIEF POTENTIEEL ZON OP DIJKEN

Het beschikbare oppervlak zonnepanelen op kansrijke dijken is berekend per dijktype op basis van de lengte maal de gemiddelde breedte van het dijktalud. Voor de lengte zijn gegevens uit de Dijkenatlas benut, de breedte is steekproefsgewijs met behulp van het hoogtebestand (AHN) bepaald.

Het totale oppervlak van dijken dat fictief potentieel beschikbaar kan zijn voor toepassing van zonne-energie is geschat op 75.000 hectare (zie Tabel 1). Uitgaande van een efficiëntie (energieomzetting) van de panelen van 20% bij maximale instraling (1000 Wp/m^2) is het vermogen per vierkante meter 200 Wp/m^2 (realistische bij de huidige stand van de techniek). Verder wordt er vanuit gegaan dat 75% van de taluds bruikbaar zijn, omdat taluds gericht op het noorden minder opbrengen (0,75 * 75.000 =56.000). Met 56.000 hectare[1] zou dan 112 GWp aan vermogen geïnstalleerd kunnen worden

TABEL 1 **POTENTIEEL BESCHIKBAAR DIJKOPPERVLAK**

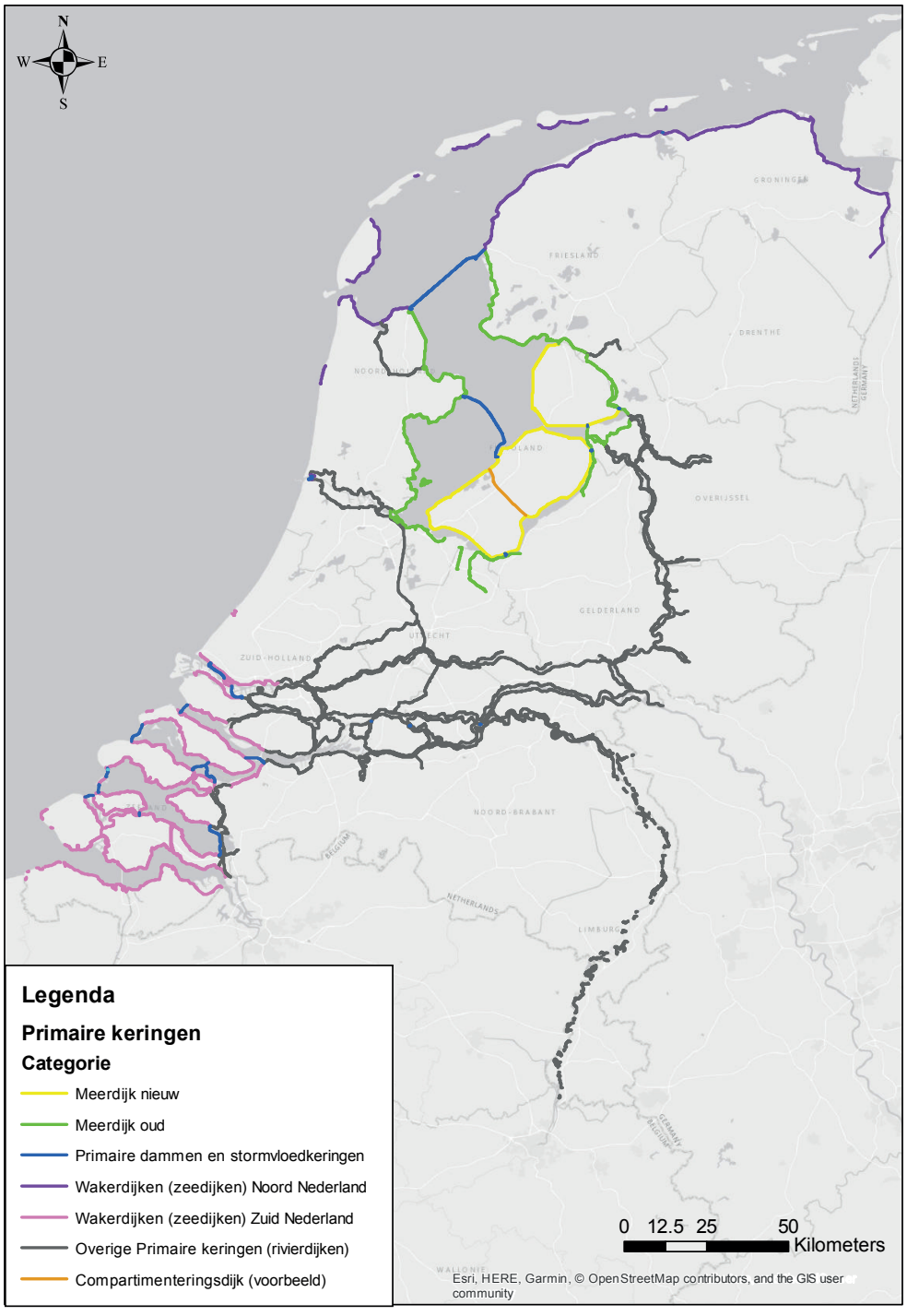
Categorie	Lengte [km]	Gemiddelde breedte [m]	Oppervlak [ha]
Compartimenteringsdijk (voorbeeld)	18	70	128
Meerdijk nieuw	197	70	1.380
Meerdijk oud	371	60	2.225
Overige Primaire keringen (rivierdijken)	1906	40	7.624
Primaire dammen en stormvloedkeringen	128	100	1.282
Wakerdijken (zeedijken) Noord Nederland	294	90	2.648
Wakerdijken (zeedijken) Zuid Nederland	619	70	4.332
Overige keringen (polderdijken)	18.466	30	55.399
Potentieel oppervlak (ha)			75.018

Voor de opwekking gaan we uit van een gemiddelde van 850 kWh/kWp/jaar (3060 MJ/kWp/jaar). Een opbrengst van 960 kWh/kWp/jaar voor een gemiddeld jaar is mogelijk als de panelen zuid gericht staan onder een hoek van 35 graden zonder vervuiling. Omdat dijken niet allemaal zuidelijk georiënteerd zijn maar ook van oost tot west gericht, wordt de opbrengst ook

1 De panelen liggen onder een hoek van 20-30°. Dit betekent dat het oppervlak op het hellende vlak 1/cos(25°) =1,1, dus 10% groter is. Het gehele oppervlak kan nooit gebruikt er is een bepaalde afstand tussen de panelen nodig, hekwerk rondom en plaats voor omvormers e.d. Hier gaat weer 10% verloren. Netto vallen deze twee effecten tegen elkaar weg.

minder. Westelijk of oostelijk georiënteerde panelen leveren ca. 800 kWh/kWp/jaar op. Zuid georiënteerde panelen met optimale hellingshoek ca. 920 kWh/kWp/jaar. Een gemiddelde van 850 is daar van afgeleid. De totale energieopbrengst van het potentiële geïnstalleerde vermogen van 112 GWp is dan 95 TWh/jaar.

FIGUUR 34 **KANSRIJKE DIJKEN IN NEDERLAND**



5.2 REËEL POTENTIEEL KANSRIJKE DIJKEN

Bovenstaande kentallen (112 GWp, 95 TWh/jaar) gelden wanneer alle bestaande dijken van Nederland als Energiedijken ingericht zouden worden. Niet alle dijken zijn echter kansrijk. Bovendien is het huidige elektriciteitsnet nog niet geschikt om dergelijke vermogens op te nemen. Deze beperking is niet verdisconteerd.

Het potentieel voor de bestaande kansrijke dijken is daarom ook berekend om een reëel beeld te scheppen wat in de nabije toekomst haalbaar zou kunnen zijn. De berekening is als volgt opgebouwd:

1. Slechts het binnentalud is meegenomen voor het kansrijk potentieel. Dit is wederom steekproefsgewijs bepaald.
2. Alleen de kansrijke dijktypes zijn geselecteerd (wakerdijken, meerdijken, compartimenteringsdijken, dammen, zie hoofdstuk 4.2).
3. 2/3e van dijktalud (groene dijktop en -voet) beschikbaar voor PV-systemen: correctiefactor 0,67
4. Voor ander gebruik van het binnentalud (bijv. dijkovergangen, bewoning) wordt 10% van het totale oppervlak afgetrokken.
5. Wederom wordt 75% van de taluds niet meegenomen om rekening te houden met binnentaluds op het noorden. De gezamenlijke correctiefactor is dan (0,67 * 0,9 * 0,75 = 0,45).

TABEL 2 **POTENTIEEL BESTAANDE KANSRIJKE DIJKEN**

Categorie	Lengte [km]	Gemiddelde breedte binnentalud [m]	Correctie factor 45%	Oppervlak [ha]
Compartimenteringsdijk (voorbeeld)	18	20	X 0,45	17
Meerdijk nieuw	197	21	X 0,45	186
Meerdijk oud	371	16	X 0,45	267
Primaire dammen en stormvloedkeringen	128	29	X 0,45	169
Wakerdijken (zeedijken) Noord Nederland	294	17	X 0,45	222
Wakerdijken (zeedijken) Zuid Nederland	619	22	X 0,45	613
TOTALEN				**1.473**

Tabel 2 toont het potentieel voor de bestaande kansrijke dijken. Een oppervlak van 1500 hectare wordt gevonden voor de kansrijke dijken. Dit leidt tot een potentieel vermogen van 2,9 GWp en een potentiele opbrengst van 2,5 TWh/jaar (9,0 PJ/jaar) met de huidige stand van de techniek.

5.3 CONCLUSIE OPBRENGST EN VERGELIJKING

Om de berekende potentiëlen in een kader te plaatsen is gekeken naar het geïnstalleerde vermogen en de energieopwekking van Nederland. Daarvoor is op basis van beschikbaarheid van gegevens gekozen voor het jaar 2015. Om de geïnstalleerde vermogens te relateren aan de energieopbrengsten is in tabel 3 de capaciteitsfactor geïntroduceerd. De capaciteitsfactor is de werkelijke elektriciteitsproductie gedeeld door de maximaal mogelijke opbrengst in dezelfde periode. Kolen- en kernenergie hebben een relatief hoge capaciteitsfactor. Windenergie heeft een capaciteitsfactor van ca. 24%, vanwege de variabele windkracht, waarbij wind op zee hogere capaciteitsfactoren heeft dan wind op land. Zonne-energie heeft een relatief lage capaciteitsfactor van ca 8% omdat de instraling variabel is.

Ter vergelijking van de verschillende vormen van energiewinning zijn de berekende potentiëlen nu in een kader te plaatsen. Het berekende fictieve potentieel, wanneer alle dijken als nieuwe energiedijk ontwikkeld worden, kan tot 86% van de elektriciteitsbehoefte dekken.

Echter omdat diverse dijken niet geschikt zijn voor PV-systemen is dit geen realistisch getal. Het berekende potentieel voor de bestaande kansrijke dijken is in staat om 2,3% van de elektriciteitsbehoefte in te vullen bij de huidige stand van de techniek.

TABEL 3 **POTENTIEEL ZON OP DIJKEN T.O.V. VERMOGEN EN ENERGIEOPWEKKING 2015**

Bron (jaar 2015)	Energie [TWh/jaar]	Energie [PJ/jaar]	Relatief	Vermogen [GW]	Capaciteitsfactor
Gas	49	176	45%	21	27% (3)
Kolen	38	137	35%	6	72%
Kern	3,0	11	3%	0,5	71%
Wind	7	25	6%	3,4	24%
Zon (2)	1,1	4,0	1%	1,5	8,3%
Overig (e.g. biomassa)	11,9	43	11%		
Totaal	**110**	**396**			
Bestaande kansrijke dijken - Zon op dijken	2,5	9	2,3%	2,9	9,7%(1)
FIctief: alle dijken als Nieuwe Energiedijk	95	342	86%	112	9,7%(1)

Opmerkingen bij tabel 3:

(1) Op basis van eerdere berekening (zie boven) en huidige stand van moderne techniek. 850/8766 uur per jaar. Aansluiting zodanig ontwerpen dat dit altijd het net ingevoerd kan worden. Het elektriciteitsnetwerk in Nederland is nog niet geschikt dergelijke vermogens te verwerken. Koppeling met lokale energievraag is daarom kansrijk.

(2) In 2017 is al bijna het dubbele aan elektriciteit opgewekt met zonne-energie ten opzichte van 2015.

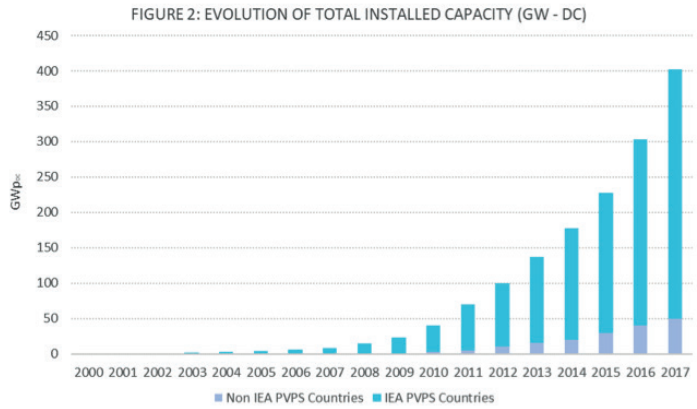
(3) Gas is in staat om flexibel in te springen op vraag en aanbod en heeft daarom normaliter een capaciteitsfactor van ca. 50%. In 2015 waren echter tijdelijk enkele gascentrales gesloten.

Met 1TWh kunnen circa 280.000 huishoudens een jaar lang van elektriciteit worden voorzien. Het fictieve potentieel van de dijken is veel groter dan het 7,8 miljoen huishoudens in Nederland (2017) waarbij opgemerkt moet worden dat ook de industrie veel elektriciteit gebruikt. Met inpassing op de kansrijke bestaande dijken kunnen 700.000 huishoudens worden voorzien.

CONCURRENTIEKRACHT EN MARKTMECHANISMEN

De concurrentiekracht van zonne-energie ten opzichte van andere energiebronnen is gelijktijdig ook een valkuil, zeker als we kijken naar het huidige marktmechanisme. Als dubbel landgebruik niet lonend is ten opzichte van het huidige marktmechanisme, zal uitkopen van andere functies de aantrekkelijke methode zijn om snel extra oppervlak te creëren en in aanmerking te komen voor subsidiestromen. Voor de lange termijn kan dit echter botsen met de bestaande (economische) verdeling van het grondgebruik in Nederland, met name de regionaal beschikbare grond voor de landbouw. Dit kan het maatschappelijk draagvlak in de toekomst ondermijnen, in diverse Europese landen zijn er voorbeelden waarbij grootschalige zonne-energie hierdoor veel draagvlak heeft verloren bij het grote publiek. Het zal daarom van belang zijn om vooral in te zetten op dubbel landgebruik, zoals zonne-energie op daken, (spoor)wegen en andere infrastructuur. Daarnaast is behoud of versterking van landschappelijke waarde belangrijk. Ook dijken lijken een belangrijke optie voor de toepassing van zonne-energie. Dit onderstreept het belang om te bezien of een zorgvuldige inpassing van zonne-energie op dijken in Nederland mogelijk is en wat hiervan het potentieel is ten opzichte van de totale Nederlandse energiebehoefte.

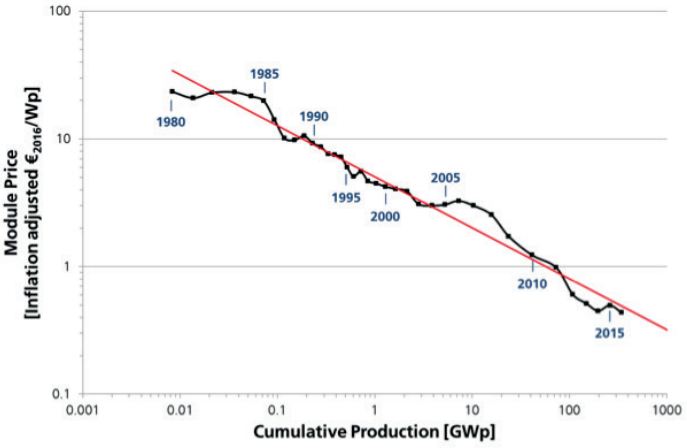
FIGUUR 1 **HET TOTAAL GEÏNSTALLEERD VERMOGEN VAN ZONNE-ENERGIE WERELDWIJD (BRON: IEA PVPS SNAPSHOT 2018)**



HUIDIG MARKTMECHANISME ZONNE-ENERGIE IN NEDERLAND

De afgelopen jaren heeft Nederland een inhaalslag gemaakt op de toepassing van zonne-energie. Dit is vooral toe te schrijven aan de opkomst van zonne-parken. Hoewel ook de markt van zonne-energie op daken gestaag blijft stijgen, leveren de parken van enkele tot tientallen MWp per stuk door hun schaal de grootste bijdrage aan de markt. Deze parken worden gerealiseerd met het SDE+ stimuleringsmechanisme, een subsidiemaatregel van de Nederlandse overheid. Deze maatregel wordt gefinancierd door een extra belasting op energie: de Opslag Duurzame Energie (ODE),.

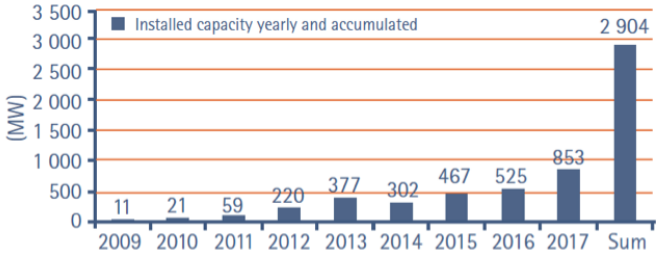
FIGUUR 2 **LEERCURVE VAN DE PRIJS VAN ZONNE-ENERGIE: 24% KOSTENDALING PER VERDUBBELING IN GEÏNSTALLEERD VERMOGEN**



SDE+ is een productiesubsidie; in plaats van een investeringssubsidie, wordt deze subsidie uitgekeerd over elke kWh die wordt opgewekt door de installatie. In het geval van zonne-energie geldt een subsidieduur van 15 jaar. Elk jaar (sinds 2017 twee keer per jaar) wordt een bedrag beschikbaar gesteld aan projectontwikkelaars en allerlei duurzame energietechnologieën. De regeling werkt volgens een omgekeerd veiling mechanisme. Dit betekent dat de goedkopere energietechnieken als eerste aan de beurt komen en duurdere projecten buiten de boot vallen. Voor het eerst in 2014 en daarna vanaf 2016 is zonne-energie succesvol gebleken in het aanvragen van deze subsidie. In totaal is nu 4 GWp aan zonne-energie beschikt.
Het maximum bedrag dat voor zonne-energie kan worden gevraagd per KWh daalt elk jaar, naar aanleiding van een berekening van ECN. In de afgelopen jaren kon nog een maximum van 12.5ct/kWh worden gehaald in 2018 gaat het maximum naar 10.5 cent/kWh. In het verleden lagen de werkelijke aanvragen altijd lager dan het maximum, vanwege de concurrentiewerking van het omgekeerde veiling mechanisme, maar de verwachting is dat naar

2018 het maximum bedrag al zo laag ligt dat weinig ontwikkelaars hieronder kunnen bieden. Voor dit onderzoek houden we voorlopig 10.5cent/kWh aan als referentiebedrag voor de waarde van de opgewekte zonne-energie.

FIGUUR 3 **DE MARKTONTWIKKELING VAN ZONNE-ENERGIE IN NEDERLAND (BRON: IEA PVPS ANNUAL REPORT 2017)**



6

WENSEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

In deze studie zijn generieke spelregels over toepassing van Zon op dijken verkregen op basis van uitgangspunten voor waterveiligheid, zonne-energie systemen en ruimtelijke kwaliteit. Door nader onderzoek kunnen deze uitgangspunten worden uitgetest en ontworpen. Naast de toepassing van beschikbare PV-systemen op het binnendijks talud is ontwikkeling van nieuwe geïntegreerde materialen en bestendige PV-systemen voor het buitendijkse talud onderwerp van nader onderzoek.

In hoofdstuk 7 wordt een voorstel gedaan voor de inrichting van de pilot Knardijk om de onderzoeksvragen in de praktijk te testen. Hieronder volgen de belangrijkste onderzoeksvragen per thema voor standaard systemen en innovatief te ontwikkelen systemen zodat deze kunnen worden benut op bestaande, te versterken en nieuwe energiedijken.

Toetsingscriteria zijn:
- Veiligheid waterkering, stevigheid en erosiegevoeligheid van de graszode en ander dijkbekleding
- Haalbaarheid (kosten / opbrengst / rentabiliteit)
- Beheerbaarheid
- Ecologische kwaliteit
- Landschappelijk effect opstelling vanuit verschillend perspectief

6.1 ONDERZOEKSVRAGEN VOOR STANDAARD PV-SYSTEMEN: VEILIGHEID, CONSTRUCTIE EN BEHEER & ONDERHOUD

- Hoe gras zich, in verband met de stevigheid en erosiegevoeligheid van de dijk, ontwikkelt onder een zonne-panelen op rekken is een belangrijke onderzoeksvraag bij Zon op dijken. Daarbij dient nagegaan te worden hoe gras zich zal gedragen onder panelen (minder zonlicht, minder regen en minder ventilatie). Variabelen zijn:
  - Hoogteverschil rek: 80 cm (schaaphoogte zodat eronder kan worden begraasd), 30 cm waaronder robotmaaier past (ook van belang voor test windgevoeligheid).
  - Type paneel: transparant (glas-glas) of gekleurd.
  - Ook verschillende grasmengsels voor sterkte zode en ecologische waarde.
  - Verschillende wateropvang en verdeelsystemen.
  - Verschillende opstellingen om eisen toegankelijkheid beheer en inspectie te testen (rijen aaneengesloten, diverse maten of met groene tussenstrook).
- Hoe ontwikkelt de stevigheid en erosiegevoeligheid van de dijk zich wanneer gras wordt vervangen door een alternatieve dijkbekleding? Kunnen PV-systemen een positieve bijdrage leveren aan de stevigheid en erosiegevoeligheid? Soorten dijkbekleding die dan getest moet worden zijn:
  - Panelen in een flexibel grid voorzien van geotextiel
  - Zonnefolies en/of zonnematten

  - Solaroad systemen
  - Innovatieve materialen als Raatcellen of SELS
  - Verharing (beton/asfalt) onder zonnepanelen op rekken
- Het effect van funderingen op de sterkte en erosie van dijktaluds moet onderzocht. Gezien de gevoeligheid en relatieve onbekendheid met funderingen in waterkeringen zal het funderingsontwerp getoetst moeten worden door de ENW (Expertise Netwerk Waterkeringen). Naast variabele dieptes van funderingen zijn ook combinaties met verschillende overgangen tussen de grasbekleding en de fundering mogelijk (bv geotextiel). Variabelen zijn:
  - Type en diepte funderingen
  - Zwaarte constructies en windgevoeligheid
  - Dikte afdeklaag (is ook kostenpost)
  - Overgangen met textiel, klei, bentoniet
  - Hydraulisch vormgegeven of standaard vormgegeven paal

AANDACHTSPUNTEN T.A.V. TECHNIEK

- Aansluitingen op 10 kV stations: *'Naast de ruimtelijke inpassing zijn de aansluitkosten bepalend voor het maken van een businesscase. Kleine oppervlakten kunnen direct op het net aangesloten worden (via de huisaansluiting), maar grote arealen hebben een eigen voorziening nodig die in de miljoenen loopt' (Citaat Nationaal energieperspectief blz. 87).*
- Opslag energie
- Transformatorkastjes (hoeveel nodig en hoe in te passen)
- Bestendigheid tegen kruiend ijs, golfslag, overstroming, algen, zout etc.
- Onderhoud panelen (voor behoud rendement)
- Circulariteit van zonnepanelen

AANDACHTSPUNTEN T.A.V. HAALBAARHEID

- Voldoende maat en schaal mogelijk voor sluitende businesscase
- Rendement
- Eigendom
- Pacht
- Juridische zaken

NB De ultieme test is om een binnentalud bekleed met zonnepanelen te testen met een golfoverslagsimulator (zie Figuur 1). Verder dient de invloed van de fundering op het geohydrologisch gedrag (piping) onderzocht te worden.

FIGUUR 35 **GOLFOVERSLAGSIMULATOR IN WERKING [DELTARES, 2013]**

6.2 ONDERZOEKSVRAGEN RUIMTELIJKE KWALITEIT

- Er zijn verschillende manieren om standaardpanelen als een lange zonneloper in te passen die het waard zijn om in de praktijk te bouwen en te testen zowel van dichtbij als veraf in het landschap. Variabelen zijn:
  - Type panelen (standaard, all black of grey, transparant (glas op glas)
  - Spiegeleffect bij verschillende hoeken panelen
  - Aaneengesloten rijen (2 of 3 rijen dik) staand of liggend
  - Open rijen (met 1 tot 3 meter afstand)
- Een groene dijktop en dijkvoet zijn principes om de dijk als lange lijn in het landschap in tact te laten en herkenbaar te houden. De uitkomst uit dit onderzoek is dat circa eenderde van de dijk groen moet blijven om dit bereiken. Variabelen om te onderzoeken wat de minimum vereisten zijn:
  - Breedte dijktop variërend van 2 tot 5 meter
  - Breedte dijkvoet variërend van 1 tot 3 meter

  N.B. Bij het concept energiedijk geldt dit principe niet omdat in dit concept de dijk een geheel nieuwe uiterlijk kan krijgen.
- Er zijn verschillende opstellingen voor bifacialpanelen denkbaar die aan de criteria kunnen worden getoetst. Het effect op de groei van de grasmat zal minimaal zijn. De ruimtelijke verstoring van het dijkprofiel is het belangrijkste onderwerp voor ontwerpend onderzoek. Variabelen zijn:
  - Orientatie haaks op de dijk of parallel aan de dijktop.
  - Hoogte boven maaiveld, lengte van de poten onder de panelen
  - Onderlinge afstand van de panelen (5-10-20-30m)
  - Lengte variabel zie groene dijktop en dijkvoet
- De ecologische ontwikkeling van de dijk wordt bepaald door de inrichting en het beheer. Onderzoekvraag is hoe de dijk kan bijdragen aan ecologische verbindingen. Algemene onderzoeken worden heden uitgevoerd door de universiteiten van Wageningen en Nijmgen. Variabelen zijn bij Zon op dijken zijn:
  - Inrichting met natte dijkteen (kan tevens natuurlijke afscheiding vormen langs pad)
  - Grastypen, voor rijke bermen is mengsel met stroomdalgraslandsoorten van belang als ook ecologisch beheer (maai- en begrazingsbeheer en combinaties), zie ook vragen bij veiligheid.
  - Ontwikkeling van mini biotopen door verschillen in zon/schaduw standplaats en beheer rond zonnepanelen. Vormt dit een bijdrage aan de ecologische diversiteit?
- De dijk en het landschap kunnen op verschillende manieren worden beleefd. Variabelen zijn:
  - Dijk van dichtbij: met pad op kruin van de dijk, in het talud of aan voet van de dijk. Dijk van veraf in het landschap (100-500m), passend bij landschapstype
  - Type hekwerken (hoogte 120, hout met schapengaas)
  - Positie hekwerk tov panelen en onderhoudspad, bij voorkeur op natuurlijke knik.

AANDACHTSPUNTEN T.A.V. RUIMTELIJKE KWALITEIT

- Ruimtelijke kwaliteit - bijdrage aan kernkwaliteiten van het landschap en de dijk (NB voor vele dijken zijn kwaliteitskaders gemaakt die kwaliteiten beschrijven)
- Maatschappelijk draagvlak
- Passend cultuurhistorisch verhaal (behoud en ontwikkeling)
- Invulling aan regionale energie- en klimaatstrategie
- Meervoudig ruimtegebruik
- Educatie
- Ecologie

6.3 ONDERZOEKSVRAGEN VOOR INNOVATIEVE PV-SYSTEMEN

De ontwikkeling van zonne-energie systemen staat niet stil en biedt ook mogelijkheden voor meer geïntegreerde oplossingen waarbij de PV-cellen zijn verwerkt in materiaal dat functioneel is voor de dijkbekleding, mogelijk zelfs voor het meer kwetsbare buitentalud. Dit zou betekenen dat de buitendijkse taluds van rivier- en wakerdijken ook kansrijk worden voor Zon op dijken. De innovatieve oplossingen zijn vooral bruikbaar bij te versterken dijken als ook nieuwe energiedijken.

ZONNECELLEN IN VERHARDING

Betonverharding voor fiets- en onderhoudpaden waarin zonnecellen zijn verwerkt zijn al in ontwikkeling (SolaRoad). Onderzocht kan worden of dit materiaal geschikt is als taludbekleding (revetment). Voor gebruik in het buitentalud (oploopzone) is onderzoek naar golf- en erosiebestendigheid van deze PV-systemen van belang.

SOLARMATTEN

Flexibele kunststofmatten met zonnecellen kunnen zowel de dijkbekleding versterken als een alternatief zijn voor panelen in gras en op het dijktalud worden bevestigd. Onderzocht kan worden of dit materiaal de veiligheid versterkt. Onderzoek naar bestendigheid van het materiaal en de constructie tegen golfslag en erosie is nodig voor toepassing op het buitendijks talud.
Variabele: strook solarmat ipv standaardpanelen in zonneloper (zie ruimtelijke kwaliteit 6.2)

6.4 VERVOLG IN HET VELD

Dit onderzoek is een vooronderzoek voor het veldonderzoek dat aansluitend wordt uitgevoerd. Het vervolgonderzoek wordt uitgevoerd in opdracht van het consortium Zon op dijken bestaande uit: Rijkswaterstaat, de Waterschappen/Hoogheemraadschappen Zuiderzeeland, Hollands Noorderkwartier, Hollandse Delta, Scheldestromen, Rijnland, Rivierenland, Noorderzijlvest, Waternet, de Provincies Flevoland en Zeeland, de gemeente Amsterdam, SEAC en ECN onder aanvoering van Stowa. De onderlinge rolverdeling wordt door het consortium bepaald.

Voor het veldonderzoek zijn er drie potentiele proeflocaties:

1. Dijk nabij Geersdijk (tot voor kort een primaire waterkering) aan het Veerse Meer
2. Spuikomdijk bij Ritthem (onderdeel van de primaire waterkering) aan de Westerschelde
3. De Knardijk in Flevoland, de compartimenteringsdijk tussen Oost en Zuid Flevoland.
   Mogelijk is er een vierde proeflocatie in Groningen denkbaar.

7

PROEFTUIN KNARDIJK

7.1 ANALYSE KNARDIJK

De Knardijk in Flevoland is een pilotlocatie voor een eerste proefopstelling voor Zon op dijken. De Knardijk is een voorbeeld van een compartimenteringsdijk.
Een compartimenteringsdijk verdeelt een droogmakerij in delen. De dijk heeft geen directe waterkerende functie maar voorkomt bij een dijkdoorbraak dat een hele polder onder loopt. De compartimenteringsdijk maakt onderdeel uit van de dijkgroep Meerdijken.
Als onderdeel van Oostelijk Flevoland was de Knardijk een primaire waterkering. Na aanleg van Zuidelijk Flevoland werd de dijk een grens die twee polders scheidt in twee compartimenten. De focus ligt op de dijk in het agrarisch landschap en niet op het deel van de dijk dat aan de rand van de Oostvaardersplassen ligt.

KWALITEITEN & KARAKTERISTIEKEN: KNARDIJK

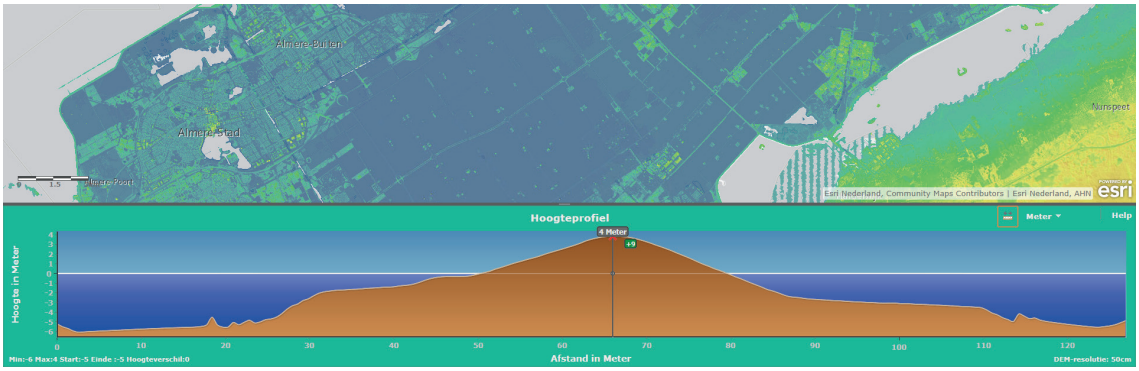
- Een hoge (circa 7 meter) en rechte lijn in het landschap.
- Grasdijk met getailleerd talud, flauwe voet en scherpe top
- Karakteristiek orthogonaal polderlandschap aan weerszijden met windturbines
- Verdeelt droogmakerij in delen
- Waterwerken die herinneren aan de drooglegging vormen cultuurhistorisch erfgoed
- Onderdeel van NNN

(o.a. ‘Dijken van Nederland’, Lola & ‘nut en noodzaak van de Knardijk’ (2015)

FIGUUR 36 **IMPRESSIE KNARDIJK - FLEVOLAND**

FIGUUR 36 **LUCHTFOTO POLDIJK - GOOGLE EARTH**

FIGUUR 37 **PROFIEL UIT GISSYSTEEM AHN KNARDIJK**



MEDEGEBRUIK/FUNCTIES

- Noodwaterkering
- Recreatie en onderhoudspad op de top
- Agrarische functie - beweiding
- in studie ‘nut en noodzaak van de Knardijk’ (2015) wordt een breder palet aan mogelijke functies in de toekomst geschetst.

FIGUUR 38 **FOTOMONTAGE VAN PV-SYSTEMEN OP DE KNARDIJK**

7.2 ONTWERPPRINCIPES PILOT KNARDIJK MET CONCEPT INPASSING OP BESTAANDE DIJK MET HUIDIGE STAND VAN DE TECHNIEK

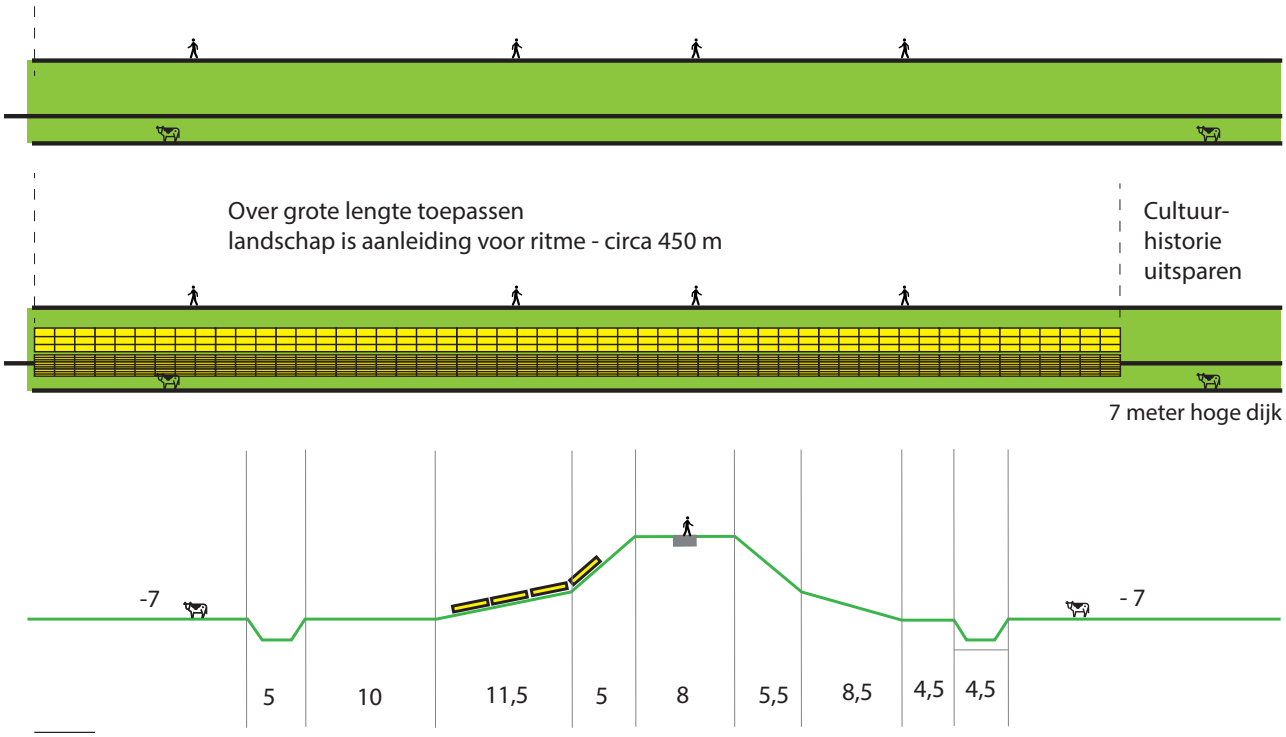
- Een compartimenteringdijk heeft geen directe functie. Zonne-energie geeft de dijk een nieuwe identiteit, de energiedijk.
- Met een groene voet en een groene top behoudt de dijk een groen kader.
- Het tussenliggende talud wordt optimaal benut voor zonne-energie.
- Lange lijnen benadrukken de lengte van de dijk. Circa 450 meter lengte.

- Het lengte-ontwerp moet nader uitgewerkt worden. Het ritme van zonnepanelen oftewel het ritme van de groene vlakken tussen de lijnen van zonnepanelen kan bijvoorbeeld worden afgeleid van de verkaveling van het landschap. Zo wordt de kenmerkende twee dimensionale orthogonale of blokverkaveling zichtbaar in de derde dimensie van de dijk.
- Cultuurhistorische waterbouwkundige elementen worden ruim uitgespaard in de lijnen van de zonnepanelen zodat de cultuurhistorische context behouden blijft.

7.3 PROEFTUIN

Naast de gewenste PV-opstelling bij compartimenteringsdijken is de Knardijk proeftuin voor toepassing op dijken in het algemeen. De onderzoeksvragen uit hoofdstuk 6 kunnen vrijwel allemaal worden onderzocht op de Knardijk. Diverse PV-systemen kunnen naast elkaar worden getest op de meer dan 10 kilometer lange dijk. Bij inrichting van de dijk moet rekening gehouden worden met de cultuurhistorische waarde van de dijk.
Technische aspecten kunnen relatief veilig worden onderzocht aangezien de dijk geen direct waterkerende functie (meer) heeft. Met een 'golfoverslagsimulator' kan een de invloed op erosie en stevigheid worden onderzocht hetgeen bruikbaar is voor andere dijktypen.
Monitoring op langere termijn geeft inzicht in ontwikkeling van de graszode en de invloed op ecologie.
Overwogen kan worden om recreaten en passanten te enquêteren over hun beleving bij de verschillende proefopstellingen. Daarbij moet dit belevingsonderzoek op verschillende momenten plaatsvinden om te onderzoeken of 'gewenning' optreedt en er sprake is van maatschappelijke acceptatie. De 'glazen dijk' kan een toeristische attractie worden met educatieve waarde.

FIGUUR 39 **PRINCIPE LENGTE- EN DWARSPROFIEL KNARDIJK**



8

CONCLUSIES

Het consortium heeft vier hoofdvragen gesteld waarop in het vooronderzoek en het veldonderzoek (dat volgt op deze studie) antwoord gevonden moet worden. Per onderzoekvraag vatten we de onderzoeksresultaten samen en verwijzen we naar de inhoud van dit rapport.

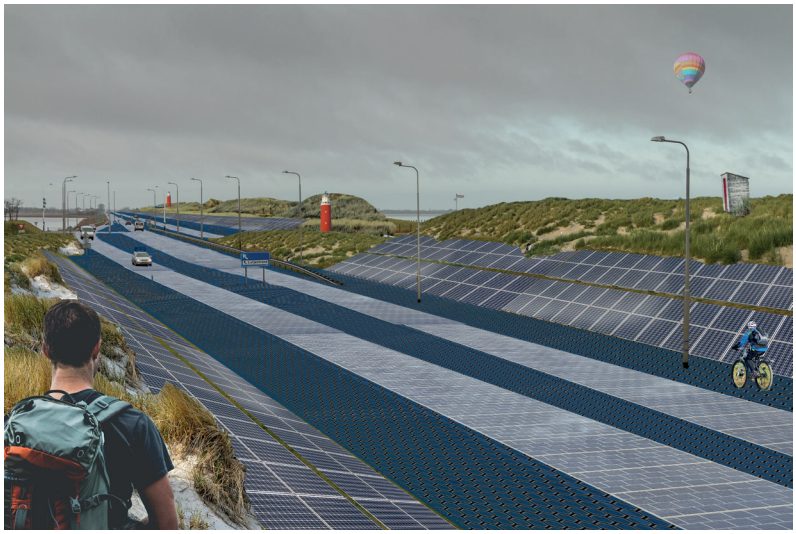
1. WAT IS DE POTENTIËLE BIJDRAGE VAN ZONNE-ENERGIE OP DIJKEN AAN DE NATIONALE ENERGIEOPGAVE?

Wanneer alle dijken van Nederland optimaal ingericht worden voor zonne-energie is de opbrengst enorm tot wel 150 GWp en 128 TWh/jaar waarmee alle huishoudens van Nederland ruim van elektriciteit kunnen worden voorzien. Het onderzoek toont echter aan dat slechts enkele dijktypen geschikt voor grootschalige benutting van zonne-energie en ruimtelijk moeten worden ingepast. Wanneer de drie meest kansrijke dijken op dit moment worden ingericht (met de huidige stand van de techniek) voor PV-systemen is de geschatte opbrengst 2,9 GWp en 2,5 TWh/jaar. Dat staat gelijk aan het elektriciteitsverbruik van 700.000 huishoudens. Deze geschatte maximale opbrengst is substantieel bij voldoende ambitie van waterbeheerders. Geconcludeerd kan worden dat de opbrengst substantieel is, mits aansluitbaar op het energienet. Deze bijdrage kan nog toenemen als kansen voor lokale PV-systemen worden bijgeteld.

40 **FOTOMONTAGE VAN PV-SYSTEMEN OP EEN WAKERDIJK**

41 **FOTOMONTAGE VAN PV-SYSTEMEN OP MEERDIJK**

42 **IMPRESSIE VAN PV-SYSTEMEN OP EEN 'GESLOTEN DAM'**



2. WELKE ASPECTEN SPELEN EEN ROL BIJ DE BEOORDELING VAN DE KANSRIJKHEID EN HAALBAARHEID VAN INSTALLATIES VOOR ZONNE-ENERGIE OP DIJKLICHAMEN?

Op basis van onderzoek naar principes vanuit waterveiligheid, dijkbeheer, zonne-energiesystemen, ruimtelijke kwaliteit en ecologie zijn er 10 integrale principes voor Zon op dijken geformuleerd:

1. Behoud van een veilige waterkering die erosiebestendig is. Fundering van PV-systemen doet geen afbreuk aan de sterkte van de dijk en draagt bij voorkeur bij aan een sterkere dijk. PV-systemen hebben geen invloed op de waterdoorlatendheid of verminderen deze. De grasmat behoudt een goede zodeontwikkeling of wordt vervangen door een alternatieve bekleding;
2. De dijk blijft met PV-systemen goed beheerbaar doordat PV-systemen de dijkbekleding vervangen of doordat gras beheerbaar en inspecteerbaar blijft.
3. De dijk met PV-systemen heeft een gunstige helling en expositie (ligging ten opzichte van de zon). Met de huidige techniek ligt de nadruk op het binnentalud. Met (toekomstige) innovatieve technieken zijn er ook in het buitentalud mogelijkheden.
4. Lange lijnen geven PV-systemen op dijken rendement met voldoende oppervlak en landschappelijke eenheid.
5. PV-systemen zijn haalbaar mits ze in de omgeving aansluiten op het energienet. Waar mogelijk vindt bundeling met andere duurzame energiebronnen plaats (met name windenergie).
6. PV-systemen op dijken zijn voldoende beschermd tegen vandalisme en veilig voor passanten;
7. PV-systemen op dijken zijn goed te inspecteren en te onderhouden.
8. PV-systemen op dijken zijn golfslagbestendig en bestand tegen (zee/meer)water. Bij voorkeur zijn PV-systemen in buitentalud golfslagremmend.
9. De dijk is de baas als de landschappelijke en cultuurhistorisch lint. PV-systemen benadrukken de lange en continue lijn van de dijk (en vormen geen incidenten). PV-systemen vormen een egale loper op de dijk, stralen rust uit en reflecteren niet. PV-systemen worden zoveel mogelijk geintegreerd in de dijkbekleding en zijn onderdeel van het dijkprofiel (innovaties noodzakelijk).
10. Meervoudig ruimtegebruik waar mogelijk onder meer combinaties van de zonnedijken met dijkveiligheid, recreatie, educatie en natuur.

43 **FOTOMONTAGE VAN PV-SYSTEMEN OP DE KNARDIJK**

Hieruit zijn de volgende beoordelingaspecten afgeleid ten aanzien van de kansrijkheid van PV-systemen op dijken:

- Kan de dijk zijn primaire waterkerende functie behouden met PV-systemen (zie ook principes 1 en 2)? Dragen de PV-systemen bij aan de veiligheid (erosiebestendigheid en/of stevigheid)?
- Heeft het dijktalud een gunstige overwegend zuidelijke expositie? Volgen de PV-systemen de helling van het dijktalud (dus liever geen rekken op horizontaal deel)?
- Heeft de dijk ruimte voor grootschalige opstellingen van PV-systemen? Oftewel: waar kunnen we meters maken?
- Is er een aansluiting op het energienet (te maken)?
- Zijn de PV-systemen voldoende te beschermen, veilig voor passanten en vandalismebestendig?
- Zijn de PV-systemen bereikbaar voor inspectie en beheer?
- Zijn de PV-systemen en de dijk (op termijn) bestendig te maken tegen erosie, golfslag en evt. zout? Is de dijkbekleding erosiebestendig (zodeontwikkeling of alternatieve bekleding)? Kunnen de PV-systemen golfremmend zijn (in de toekomst)?
- Passen de PV-systemen in het landschappelijke beeld en de beleving van de dijk waarbij het gaat om:
  - Lange lege rechtstanden dijk (geen bebouwing en beplanting)
  - Robuuste maat en schaal van de dijk en het landschap zodat de dijk ‘de baas blijft als groen lint
  - Passend bij de ecologische functie (behoud en ontwikkeling)
  - Passend bij de cultuurhistorische waarden van de dijk (behoud door ontwikkeling)
- Is er meerwaarde bij Zon op dijken voor dijkveiligheid, recreatieve en educatieve waarden?

De meest kansrijke dijktypen in Nederland voor grootschalige ontwikkeling van PV-systemen zijn:

- Wakerzeedijken van Noord Nederland
- Wakerzeedijken van het Zuidwestelijke Zeekleigebied
- Alle dijken van het dijksysteem Meerdijken: Meerdijken van het nieuwe land, Meerdijken van het oude land en Compartimenteringsdijken
- Gesloten dammen

3. WELKE TYPEN SYSTEMEN ZOUDEN HIERAAN KUNNEN VOLDOEN?

Om te bepalen welke PV-systemen kansrijk zijn voor toepassing op dijken hebben we de opgave in drie concepten onderverdeeld:

INPASSING VAN ZONNE-ENERGIE OP BESTAANDE DIJKEN

- Met de huidige stand van de techniek zijn zonnepanelen op rekken in de huidige situatie op de landzijde het meest haalbaar. Bifacial panelen zijn ook denkbaar hoewel nader (veld)onderzoek de ruimtelijke impact nader in beeld moet brengen.

BIJ EEN DIJKVERSTERKINGOPGAVEN KAN ZONNE-ENERGIE DE DIJK IN SOMMIGE GEVALLEN VERSTERKEN

- Wanneer innovatieve technieken in de nabije toekomst (financieel) haalbaar worden zijn solarfilms en solarmatten een goede vervanging van grasbekleding op de taluds aan de waterzijde. Ook op landzijde zijn deze denkbaar net als panelen die in een flexibel grid direct op de dijk liggen. Panelen op rekken en bifacials hebben alleen op een steunberm de voorkeur in de toekomst omdat deze elders het profiel van de dijk verstoren en er

betere alternatieven voor handen zijn. Wanneer nieuwe onderhoudswegen worden aangelegd wordt de aanleg van een Solaroad aanbevolen.

VERNIEUWING WAARBIJ DIJKEN WORDEN GEOPTIMALISEERD VOOR ZONNE-ENERGIE

- Bij dit concept wordt uitgegaan van innovaties waardoor, aanvullend op bovenstaande concept, ook op het verharde buitentalud PV-systemen mogelijk zijn in de vorm van films en solarmatten die bestand zijn tegen water, golven en zout.

SAMENGEVAT IS DE VOORKEUR VOOR PV-SYSTEMEN IN DE VERSCHILLENDE SITUATIES ALS VOLGT:

Dijkonderdeel	Bestaande dijk	Te versterken dijk	Nieuwe energiedijk
Dijkopgave/concept	Inpassen, met de huidige stand van de techniek	Versterken, met de huidige stand van de techniek	Vernieuwen, met de innovaties van de toekomst
Buitendijks grastalud	Niet haalbaar met huidige stand van de techniek	Films/solarmatten	Films/solarmatten & nieuwe innovatieve constructies
Buitendijks verhard talud	Niet haalbaar i.v.m. golven en wateroverlast	Niet haalbaar i.v.m. golven en wateroverlast. Wanneer tot top verhard is PV denkbaar passend bij karakter vd dijk	PV in verharding (SolarRevetment) & innovatieve constructies
Binnendijks grastalud	Panelen in gras, panelen op rekken, films/solarmatten en bifacialpanelen	Panelen in gras, panelen op rekken, films/solarmatten en bifacialpanelen	Idem geoptimaliseerd 20-30° hoek talud
Steunberm	Panelen op rekken en bifacialpanelen	Panelen op rekken en bifacialpanelen	n.v.t. (dijktalud wordt optimaal ingericht)
Onderhoudspad cq recreatiepad	Niet haalbaar. Te kostbaar om bestaand pad te vervangen	PV in verharding (SolaRoad) wanneer nieuw pad wordt aangelegd	PV in verharding (SolaRoad)

4. WAT MOET GETEST WORDEN OM TE BEOORDELEN OF DEZE SYSTEMEN VOLDOEN?

In hoofdstuk 6 wordt uitgebreid beschreven wat in de testfase aan de orde moet komen. Op hoofdlijnen gaat het om:

- Hoe de stevigheid en erosiebestendigheid zich ontwikkelen PV systemen op gras en bij alternatieve dijkbekleding.
- Hoe de graszode zich ontwikkelt onder een zonnepaneel.
- Het effect van fundering op erosie en sterkte van de dijk.
- Het ruimtelijk effect en beleving van verschillende typen panelen, systemen en opstellingen (dit kan ook in een 3D rendering model worden voorbereid).
- Invloed op ecologische kwaliteiten.

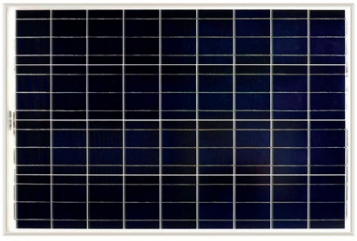
BIJLAGE 1

ZONNE-ENERGIESYSTEMEN

STANDAARDPANELEN

Zonne-energie heeft afgelopen jaren een enorm marktvolume bereikt en is wereldwijd nu de snelst groeiende vorm van opwekking van elektriciteit. De wereldmarkt heeft sinds 2018 het volume van 100GWp doorbroken. Dit succes heeft het voor een belangrijk deel te danken aan de kostendaling van standaardpanelen tot wel 35 eurocent/Wp. De zonnepanelenmarkt heeft zich ontwikkeld tot een homogene markt waarin kristallijn silicium panelen, rigide panelen van een vaste afmeting (1,7x1,0 m2), 95% van het marktaandeel uitmaakt. Hierbij zijn enorme schaalvoordelen ontstaan. Afwijkingen van deze technologie brengen vaak een enorm prijsverschil met zich mee. Als bijvoorbeeld een afwijkende maat gewenst wordt, kan zo'n paneel makkelijk het vijfvoudige kosten van een standaard maat (150-200 eurocent/Wp).

STANDAARD PANELEN OP REKKEN



PREMIUM PANELEN

Binnen de markt van standaard kristallijn silicium panelen proberen veel producten zich toch wel te onderscheiden. Zo zijn de panelen verkrijgbaar in verschillende efficiënties, variërend van basis efficienties rond de 17% (~80% van de markt) tot premium panelen met een rendement van 23%. De kosten van een premium paneel liggen ook hoger, zo rond de 80 eurocent/Wp.

PREMIUM ZONNE PANEEL

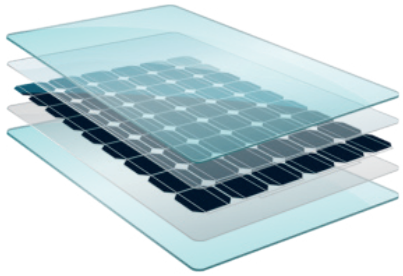
VARIATIES: KLEUR, GLAS-GLAS EN PRINT

Er zijn tevens variaties beschikbaar die het uiterlijk van standaard zonnepanelen proberen te verbeteren. Zo zijn er all-black panelen, panelen die een rustiger uiterlijk hebben met bijvoorbeeld donkere achtergrond, donkere frames en donkere cellen. Deze panelen komen tegen een meerprijs van ~3-5 eurocent/Wp.

Ook zijn er glas-in-glas panelen, zonder frame en gekleurde panelen beschikbaar of zelfs geprinte met een bepaald motief. Hiermee kunnen zonnepanelen worden geïntegreerd in de architectuur. Het opbrengstverlies van gekleurde panelen is beperkt tot maximaal zo'n 15%.

GEKLEURDE PANELEN EN PRINTS

STANDAARD GLAS IN GLAS PANEEL



BIFACIAL PANELEN

Een nieuwe trend is dat kristallijn silicium panelen ook bi-facial worden uitgevoerd tegen geringe meerkosten (~5 eurocent/Wp). Dat betekent dat ze ook licht aan de achterkant opvangen. Afhankelijk boven welk oppervlak ze hangen kan dit ~7% (gras eronder) tot ~20% (witte gravel) extra energieopbrengst leveren. Het is ook denkbaar de bifacial panelen rechtop te plaatsen als een soort hek. Dit is een mogelijkheid, en verdeelt de energieopbrengst over de dag. Het nadeel is dat deze oplossing gemiddeld 30% minder opbrengt dan een standaard systeem. Daarnaast moeten de rijen vrij ver uit elkaar gezet worden om onderlinge schaduw tegen te gaan.

VERTICALE BIFACIAL PANELEN

TRACKERS - ZON-VOLG SYSTEMEN

Een ander alternatief is zon-volg systemen. Die bestaan er in diverse soorten, e.g. met 1 of met 2 assen waarover de zon gevolgd wordt en ook de keuze van de assen kan op verschillende manieren. Het nadeel van zon-volgsystemen is dat deze altijd zwaarder gefundeerd moeten worden. Daarnaast is het huidige SDE+ systeem niet geschikt voor het vergoed krijgen van de extra energieopbrengst van een zonvolg systeem. Een 2-assig zonvolg systeem levert in Nederland zo'n 30% extra energieopbrengst, terwijl een 1-assig volgsysteem zo'n 10-15% extra opbrengst genereert. De additionele kosten voor het zon-volg systeem, zijn op dit moment van dezelfde orde. Daardoor loont het niet om dit toe te passen.

ZONVOLGSYSTEEM

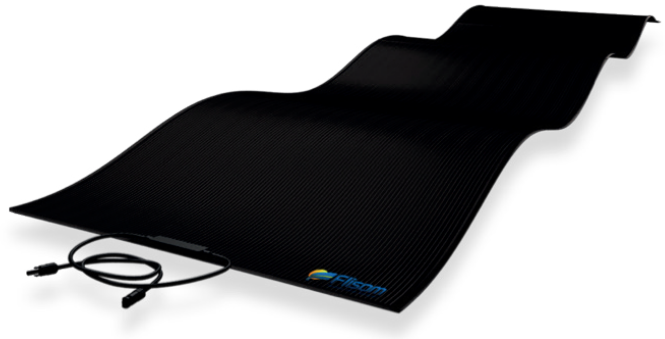
INNOVATIEVE SYSTEMEN: FILM TECHNOLOGIE /ZONNEFOLIES

Naast de kristallijn silicium panelen zijn ook andere technologieën beschikbaar, waarvan de voornaamste categorie dunne film technologie is. Dit is een verzamelnaam voor een verscheidenheid aan technologieën. Dunne film panelen kunnen ook rigide vlakke platen zijn, alhoewel de afmeting vaak afwijkend is van de standaard panelen. Daarnaast ligt de efficiëntie doorgaans een paar procent lager. Het is echter ook mogelijk om dunne film technologie toe te passen op een flexibele drager. Hierdoor wordt een zonne-folie gerealiseerd, wat flexibel is en licht van gewicht.

Dit vormt een alternatief voor de gras of verharde bekleding van de dijk. Hierbij worden zonnepanelen direct op het oppervlak van de dijk geplaatst. De vaste rigide panelen in een (flexibel) raamwerk worden gehecht aan het dijkoppervlak. Flexibele zonne-folies worden gespannen over het dijkoppervlak. De panelen zullen de functie van gras moeten vervangen en erosie tegen gaan. Deze laag zal dus waterdicht moeten zijn.

Zulke zonne-folies komen tegen een prijs van ~80-100eurocent/Wp en hebben een lagere efficiëntie van ~10-12%.

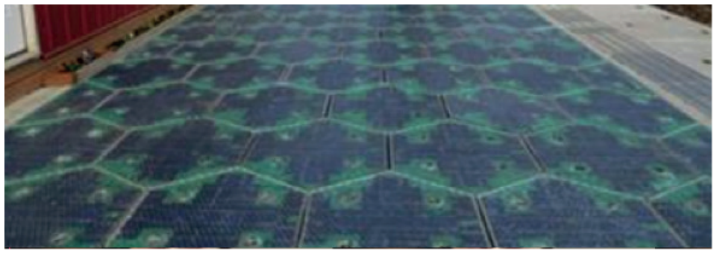
SOLARMAT

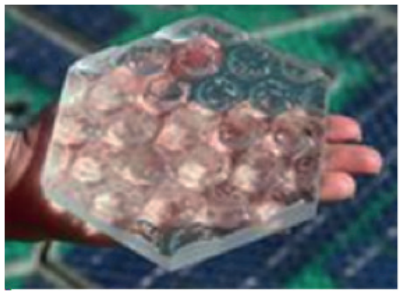


INNOVATIEVE SYSTEMEN: SELS

Royal HaskoningDHV heeft een oplossing ontwikkeld voor zonne-energie op vuilnisbelten, genaamd SELS (zie Figuur 4), die hiervoor ook van toepassing zou kunnen zijn. Enkele relevante kenmerken van deze oplossing zijn dat de zonnepanelen ook fungeren als afdichting, dat ze bestand zijn tegen zettingsverschillen en dat er nauwelijks windbelasting is. Belangrijk is dat dit systeem dan ook functioneert als dijkbekleding.

SELS





PV IN VERHARDING: SOLAROAD

Op wegen en paden is het solar-road concept een mogelijk materiaal voor Zon op dijken (zie Figuur 9). De solarroad bestaat uit betonnen wegdelen met zonne-energie (vaak dunne film) geïntegreerd in het oppervlak. Dit kan worden toegepast in plaats van een weg of fietspad op een dijk maar mogelijk ook op andere plekken waar een dijk verhard is. De solarroads zijn op dit moment nog erg duur (~10x duurder dan normale panelen), maar net als voor andere technologieën geldt dat dit in de toekomst kan veranderen indien voldoende schaalgrootte kan worden bereikt.

SOLAROAD

THERMISCHE ENERGIE TECHNIEKEN

Energie van de zon kan op verschillende manieren worden omgezet in nuttige energie. In dit document gaan we hoofdzakelijk in op de PV panelen, zonne-energiepanelen die zonne-energie direct omzetten in elektriciteit (middels het fotovoltaïsch effect). De zon kan natuurlijk ook gebruikt worden om warmte te genereren. Dit kan door middel van zonne-thermische panelen (PT panelen). Er bestaat ook nog een variant die zowel elektriciteit als warmte genereert, de zogenaamde PVT panelen. Binnen de PT panelen zijn er twee typen: de vacuümbuizen en de vlakke plaat-panelen.

De vacuümbuizen werken doordat ze zonne-energie opvangen op een metalen (koperen) buis die zich in een vacuüm buis bevindt. Aan de bovenkant van het paneel loopt een buis met water. De koperen buis is verbonden met die buis en geeft zijn warmte daar af aan het water. De vlakke plaat panelen zijn vaak panelen waar het water zich als een warmtewisselaar door de gehele plaat kronkelt en daarbij zijn warmte opneemt. De vacuümbuizen hebben vaak iets hogere efficiëntie dan vlakke plaat panelen, vanwege het geringe verlies aan warmte, maar vangen minder op vanwege het kleinere effectieve oppervlak.

THERMISCH PANEEL MET BUIZEN

THERMISCH PANEEL MET CELLEN

PVT PANEEL

BIJLAGE 2

QUICKSCAN ZONNE-ENERGIESYSTEMEN EN VEILIGHEID PER DIJKTYPE - BIJ DE HUIDIGE STAND VAN DE TECHNIEK

Bijlage 2: Quick scan effecten/aandachtspunten voor hoogwaterveiligheid bij toepassing zonne-energie op waterkeringen

Specifieke aandachtspunten zonne-energie gerealteerd aan dijktype, positie in de dijk, faalmechanisme en type techniek

Dijktype (uit dijkatlas): Zee- en meerdijken (Wakerdijken en Meerdijken)
Variant constructietype: **Dijkpaneel, alternatieve bekleding**

	Positie in de dijk:					
Criteria / faalmechanisme:	**buitentalud golfslagzone (verhard)**	**evt. buitenberm (verhard)**	**buitentalud golfoploop zone (onverhard)**	**kruin**	**binnentalud**	**evt. binnenberm**
Hoogte (HT); golfslag, overloop en overslag	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan. Daamaast hebben zonnepanelen door gladde oppervlak weinig golfremming	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan. Daarnaast hebben zonnepanelen door gladde oppervlak weinig golfremming	Zonnepanelen hebben door gladde oppervlak weinig golfremming. Hierdoor kan golfoploop toenemen en dus hoogteopgave kruin.	bij goede inpassing / aansluiting met grasbekleding met bijv. scherm, folieaansluiting en kleikoffer beperkt risico. Positief als vervangende bekleding (gesloten constructie)	bij goede inpassing / aansluiting met grasbekleding met bijv. scherm, folieaansluiting en kleikoffer beperkt risico. Positief als vervangende bekleding (gesloten constructie)	bij goede inpassing / aansluiting met grasbekleding met bijv. scherm, folieaansluiting en kleikoffer beperkt risico. Positief als vervangende bekleding (gesloten constructie)
Instabiliteit door infiltratie en overslag bekleding, instabiliteit bekleding buitentalud, micro instabiliteit (STBK, STMI)	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan. Daamaast hebben zonnepanelen door gladde oppervlak weinig golfremming	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan. Daarnaast hebben zonnepanelen door gladde oppervlak weinig golfremming	Aandachtspunt is opdrukken bekleding; uit te voeren als open constructie vraagt complex ontwerp	bij goede inpassing / aansluiting met grasbekleding met bijv. scherm, folieaansluiting en kleikoffer beperkt risico/ positief. Wel aandacht hebben voor ontwatering dijklichaam (freatisch grondwater)	bij goede inpassing / aansluiting met grasbekleding met bijv. scherm, folieaansluiting en kleikoffer beperkt risico/ positief. Wel aandacht hebben voor ontwatering dijklichaam (freatisch grondwater)	bij goede inpassing / aansluiting met grasbekleding met bijv. scherm, folieaansluiting en kleikoffer beperkt risico/ positief. Wel aandacht hebben voor ontwatering dijklichaam (freatisch grondwater)
Piping en Heave (STPH)	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)				Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen positieve bijdrage (minder verweking). Wel aandacht hebben voor ontwatering dijklichaam (freatisch grondwater)	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen positieve bijdrage (minder verweking). Wel aandacht hebben voor ontwatering dijklichaam (freatisch grondwater)	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen positieve bijdrage (minder verweking). Wel aandacht hebben voor ontwatering dijklichaam (freatisch grondwater)
Macrostabiliteit buitenwaarts, instabiliteit voorland (STBU, STVL)	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico		
Beheer en onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt, wegvallen onderhoud grasbekleding	aansluitingen blijvend inspectiepunt, wegvallen onderhoud grasbekleding.	aansluitingen blijvend inspectiepunt, wegvallen onderhoud grasbekleding	aansluitingen blijvend inspectiepunt, wegvallen onderhoud grasbekleding
Toegankelijkheid en inspecteerbaarheid	kan concurreren met betreding/toegang buitenwater/voorland	kan concurreren met rijroute onderhoud en/of recreatief medegebruik	waarschijnlijk beperkt	Aandachtspunt is dat dijk toegankelijk blijft voor bijv. inspectie	waarschijnlijk beperkt	kan concurreren met rijroute onderhoud en/of recreatief medegebruik

- Met juist ontwerp een positief effect
- neutraal effect / compensatie mogelijk
- Afhankelijk van situatie aandachtspunt/negatief
- Negatief

Dijktype (uit dijkatlas): Zee- en meerdijken (Wakerdijken en Meerdijken)
Variant constructietype: **Glaspaneel op constructie**

	Positie in de dijk:					
Criteria / faalmechanisme:	**buitentalud golfslagzone (verhard)**	**evt. buitenberm (verhard)**	**buitentalud golfoploop zone (bij onverhard)**	**kruin**	**binnentalud**	**evt. binnenberm**
Hoogte (HT); golfslag, overloop en overslag	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan. Daarnaast hebben zonnepanelen door gladde oppervlak weinig golfremming	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan. Daarnaast hebben zonnepanelen door gladde oppervlak weinig golfremming	Op moment de hoogwatergolven onder constructie door kunnen speelt afhankelijk van situatie het risico van stukslaan in mindere mate. Aandachtspunt is erosie rondom de aansluitingen constructie/bekleding. Mogelijk is volledig bekleden buitenkruin noodzakelijk om dit te voorkomen. Hierbij is eventuele extra golfoploop ten opzichte van grasbekleding ook een aandachtspunt	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico
Instabiliteit door infiltratie en overslag bekleding, instabiliteit bekleding buitentalud, micro instabiliteit (STBK, STMI)	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan.	Gelet op de meestal forse golven / kruiend ijs speelt het risico van stukslaan.	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico	risico van spoelen rondom constructie; aansluiting op bekleding risico
Piping en Heave (STPH)	voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen is een aandachtspunt, ook ivm benodigde (hoge en zware) fundering ivm voorkomen golfbelasting	voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen is een aandachtspunt, ook ivm benodigde (hoge en zware) fundering ivm voorkomen golfbelasting	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico
Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)				Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico
Macrostabiliteit buitenwaarts, instabiliteit voorland (STBU, STVL)	voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen is een aandachtspunt, ook ivm benodigde (zware) fundering	voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen is een aandachtspunt, ook ivm benodigde (zware) fundering	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico	Bij voorkomen interactie met grondwater/relevante grondlagen geen risico		
Beheer en onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk maaiwerk/onderhoud	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk maaiwerk/onderhoud. Mogelijk oplosbaar met maairobot in combinatie met frequenter inspecteren. Afwatering panelen vraagt aandacht	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk maaiwerk/onderhoud. Mogelijk oplosbaar met maairobot in combinatie met frequenter inspecteren. Afwatering panelen vraagt aandacht	aansluitingen blijvend inspectiepunt en maatwerk maaiwerk/onderhoud. Mogelijk oplosbaar met maairobot in combinatie met frequenter inspecteren. Afwatering panelen vraagt aandacht
Toegankelijkheid en inspecteerbaarheid	waarschijnlijk beperkt	kan concurreren met rijroute onderhoud en/of recreatief medegebruik	waarschijnlijk beperkt	kan concurreren met rijroute onderhoud en/of recreatief medegebruik	waarschijnlijk beperkt	kan concurreren met rijroute onderhoud en/of recreatief medegebruik

Met juist ontwerp een positief effect
neutraal effect / compensatie mogelijk
Afhankelijk van situatie aandachtspunt/negatief
Negatief

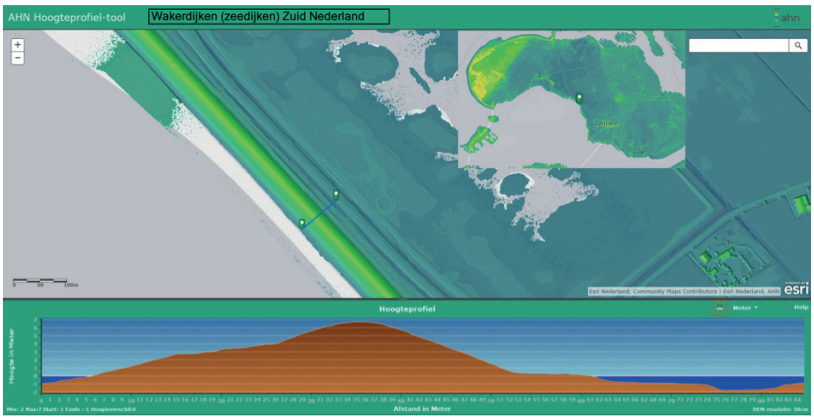
BIJLAGE 3

VOORBEELD BEREKENING

Voorbeeld berekening potentieel zonne-energie voor 100 meter Zeedijk (buitenzijde Wakerdijk Zuid Nederland)

Diverse maatwerkoplossingen worden straks opgesteld aan de hand van de diverse klassen van dijken. Deze maatwerkoplossingen zullen straks dienen als referentiecasus voor de inschatting van het potentieel van het totale areaal aan dijken.
In deze paragraaf werken we vooruitlopend een voorbeeld zonnedijk uit en berekenen de opbrengst ervan voor een glas-glas solar oplossing.
Dit voorbeeld genomen op basis van de onderstaande locatie in Zeeland, nabij Zierikzee.

FIGUUR 1 **AFMETINGEN ZEEDIJKEN BIJ ZIERIKZEE (VOORBEELD WAKERDIJK ZUID NEDERLAND)**

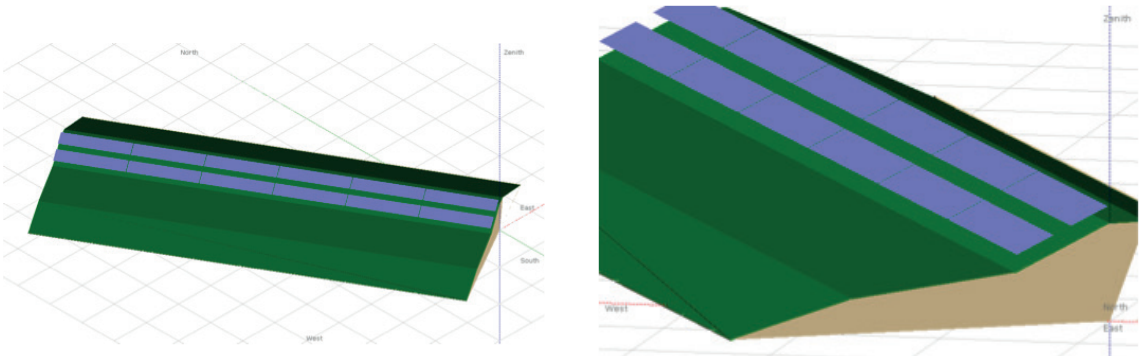


In dit geval betreft het een zeedijk. De zeekant van de dijk is naar het Zuiden gericht. Dit betekent dat (voor een goede opbrengst) deze kant voorzien kan worden van zonnepanelen. De noordkant zou meer oppervlakte gegeven, gezien het profiel van deze dijk, maar de opbrengst is daar zodanig lager dat dit geen gunstige business case zou opleveren. Voor het zuidgerichte deel (echte oriëntatie: 240°) is een concept ontwerp gemaakt. In dit geval betreft het normale paalfundatie, op 1,20 meter hoogte. De panelen zijn geplaatst op een rek van 16,50-3 meter. Hierop passen per rek 10x3 standaard formaat PV panelen. In dit voorbeeld zijn we uitgegaan van 60 cells panelen met een totaal vermogen van 285 Wp van het merk Jinko, met afmetingen 1,65x0,99x0,04 m. Dit type paneel is echter representatief en nagenoeg uitwisselbaar met panelen van andere top 5 merken, zoals Canadian Solar, Trina Solar, JA solar of Hanwa QCells. Dit type paneel en het vermogen zijn op dit moment het meest courant in de markt. Dit betekent dat voor hiervoor de laagste prijs per kWh te behalen valt. Het bereik van paneelvermogens in de markt rijkt van 260Wp tot 320 Wp per (60 cells) paneel, maar hogere paneelvermogens komen tegen een meerprijs (gerekend per Wp). De verwachting naar de toekomst toe is dat paneelvermogens blijven stijgen, met ruwweg 10Wp per jaar.

We hebben een dijkprofiel gesimuleerd van 100 m. Aan de buitenzijde van deze dijk kunnen op het hoge deel (golfoploopzone) 2 rijen van de rekken worden geplaatst. Normaal gezien worden de rekken gefundeerd door 4 palen te heien. Wanneer dit vanwege de dijktechniek

niet te realiseren valt, zijn oplossingen als schroefpalen of fundering door middel van voeten van beton mogelijke alternatieven. Over een lengte van 100 meter kunnen ruwweg 6 rekken geplaatst worden. In totaal betreft het dus 60 rekken met elk 30 panel van 285 Wp. Dit komt overeen met 103 kWp per 100 m. De rij-op-rij verspringing bedraagt 4 meter (op het horizontale vlak). Hierdoor ontstaat er een loopruimte van ruim een meter tussen de rekken. Onder de rekken en tussen de rekken kan gras blijven groeien. Aandachtspunten ten aanzien van hoogwaterveiligheid kunnen mogelijk ondervangen worden met een nader te detailleren maatwerkoplossing (zie de toelichting in de notitie).

FIGUUR 2+3 **WAKERDIJK PROFIEL 100 METER LENGTE MET ZONNEPANELEN AAN DE BUITENZIJDE (GOLFOPLOOP ZONE), VOORAANZICHT EN DWARSDOORSNEDE**



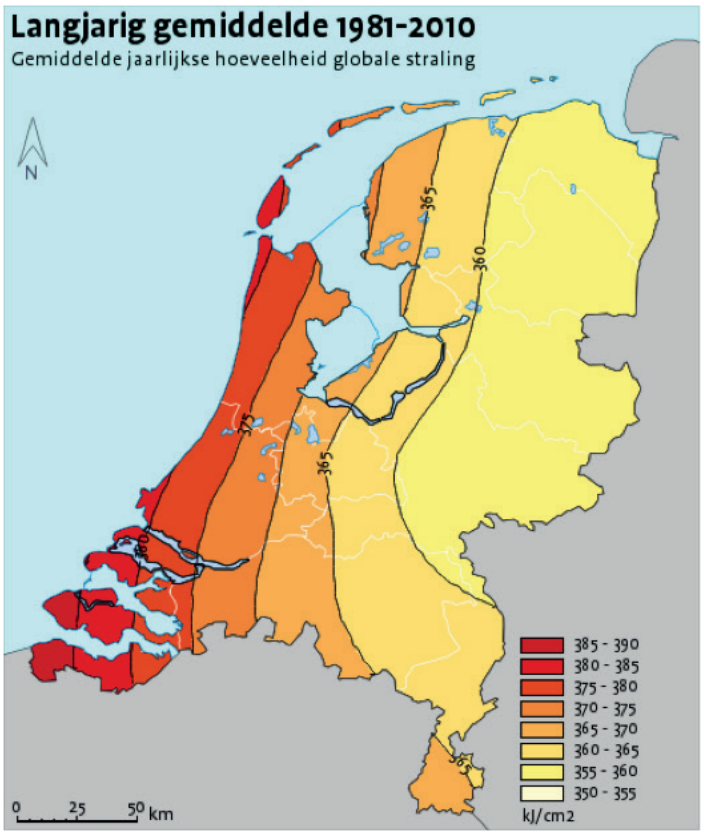
De panelen zijn geplaatst met een helling gelijk aan de helling van de dijk, in dit geval 25°. Dit is esthetisch het mooist, en zorgt er ook voor dat er bij de tussenruimtes geen rekening moet worden gehouden met rij-op-rij schaduw. De lijn van de rijen loopt namelijk door. Een voordeel hiervan is dat de hellingshoek vrij dicht bij de optimale hellingshoek (33°) ligt, wat betreft zonne-instraling. Bij zonneparken wordt normaal juist een lagere hellingshoek (10°-20°) toegepast. Dit is een praktische hellingshoek, omdat daarbij minder windbelasting plaats vind en daarmee een lichtere en goedkoper onderconstructie kan worden toegepast. Ook kan dan een vlak oppervlak beter worden benut. Dat laatste speelt bij de dijken niet, omdat ze toch in het vlak van de dijk worden geplaatst. De windbelasting is wel een aandachtspunt. Het voordeel is dat de dijk er wel direct onder ligt en dus als windscherm werkt, maar tegelijkertijd kan het profiel ook juist voor een vleugelwerking zorgen. Dit zal moeten worden onderschreven met een windbelastingsberekening.

De zonnepanelen wekken een DC spanning op. Dit moet worden omgevormd naar een AC spanning alvorens het op het net kan worden ingevoed. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden, variërend van micro-omvormers en optimizers tot string omvormers of zelfs centrale omvormers. De keuze in het geval van dijken zal zijn tussen string-omvormers en centrale omvormers. De keuze zal vooral bepaald worden door een prijsvoordeel van grotere omvormers ten opzichte van extra kosten van langere DC kabels en kabel verliezen. In dit voorbeeld zijn we uitgegaan van stringomvormers, maar wel van een relatief groot formaat (60 KWac). Hierbij hebben we 3 omvormers per 200 meter.

OPBRENGST

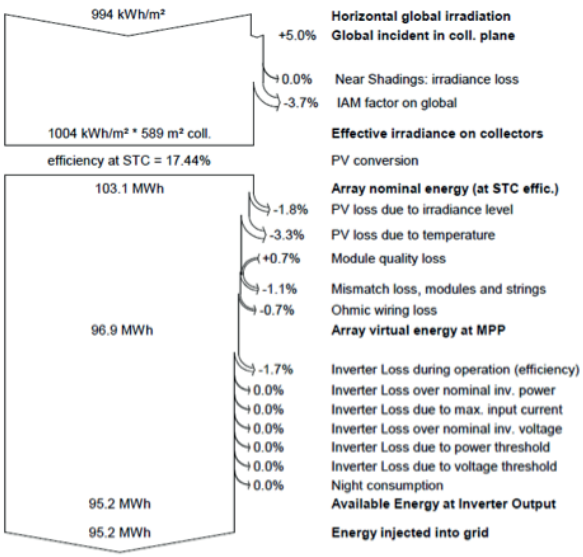
De opbrengst is berekend met behulp van PV Syst, een wereldwijde industrie-standaard voor simulatie van zonne-energie opbrengst. Voor dit voorbeeld zijn de klimatologische gegevens gebruik van Hilversum, de Bilt. Dit is niet geheel representatief voor de locatie Zierikzee, omdat de instraling aan de kust statistisch gezien hoger ligt dan in het binnenland, zie figuur 4.

FIGUUR 4 **ZONINSTRALING IN NEDERLAND (BRON: KNMI)**



De instraling in het horizontale vlak in Hilversum komt neer op gemiddeld 994 kWh m-2 a-1. Het programma berekent zelf de toename, vanwege de helling, van de instraling op het vlak van de model. In dit geval is er een toename van slechts 5%, omdat de helling weliswaar gunstig is, maar de modules zijn wel georiënteerd op 240°. Vervolgens berekent het programma allerlei verlies factoren, zowel intern aan de modules als extern, zoals beschaduwing en elektrische verliezen in kabels en omvormers, zie Error! Reference source not found.. Op basis van deze berekening concluderen we dat de zonne-energie op deze dijk een specifiek opbrengst haalt van 924 kWh/kWp/a, ofwel een totale opbrengst van 95 MWh/a per 100 meter.

FIGUUR 5 **SANKEY DIAGRAM VAN DE OPBRENGST VAN ZONNEPANELEN EN DE DIVERSE VERLIESFACTOREN**



BIJLAGE 4

VERSLAG EXPERTSESSIE 28 JUNI 2018

Als separaat rapport beschikbaar.

BIJLAGE 5

BRONNEN

- Energie en ruimte een nationaal perspectief (Dirk Sijmons, H+N+S et al, 2017)
- Samenvatting in: Het volgende landschap (Stichting Landschapstriennale en Vereniging Deltametropool, 2018)
- Petaplan: opwekking duurzame energie op rijksgronden (College van Rijksadviseurs, 2018)
- Agenda IJsselmeergebied (Witteveen en Bos & Abe Veenstra, 2016)
- Grebbedijk circulair (Metabolic, 2017)
- Nut en noodzaak van de Knardijk (Waterschap Zuiderzeeland en provincie Fleveoland, 2015)
- Meer dan een dijk, beschrijving van de ontwikkeling en waarden van de Knardijk (Reitsema stedenbouw et al)
- Zonnepark Knardijk (Anteagroep, 2018)
- Slim samenwerken aan groene waterschappen (Stowa, 2017)
- De energetische Delta Zuid Holland (Lola Landscape Architect,2018)
- Handreiking zonnevelden (Gelderse Natuur en Milieu Federatie, 2018)
- De energietransitie: een nieuwe dimensie in ons landschap (ECN & WUR, 2018)
- Verkenning Zon op Dijk (Deltares, 2017)
- Presentatie Zon op Dijk (Seac, Hans de Neve, 2017)
- Presentatie Zon op Dijk (Seac, Hans de Neve, 2018)
- Onderzoeksvragen voor het ontplooien van PV zonneparken op dijken (Seac, 2018)
- ‘Dijken van Nederland’ (Lola Landscape Architects, 2014)
- Grutsk op ‘e romte (provincie Fryslan, 2012)
- Polders en waterkeringen, college f3, gedeelte waterkeringen, prof. ir. P.A. van de Velde (Technische Hogeschool Delft, afdeling der Civiele Techniek, 1976)
- Dynamisch gedrag van waterbouwkundige constructies (Kolkman en Jongeling, 1996)
- Overgangen bij grasbekledingen in primaire waterkeringen, aanzet tot oplossingsrichtingen (Deltares, 2013)