



Delft University of Technology

Satellietdeformatiemetingen Eemdijk Technisch Report

Ozer, Ece; van Leijen, Freek

Publication date
2018

Document Version
Final published version

Citation (APA)
Ozer, E., & van Leijen, F. (2018). *Satellietdeformatiemetingen Eemdijk: Technisch Report*. POV Macrostabieliteit.

Important note
To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy
Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*This work is downloaded from Delft University of Technology.
For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to a maximum of 10.*

Satellietdeformatiemetingen Eemdijk

Technisch Report

POV

MACRO
STABILITEIT



Auteurs: ir. Ece Ozer, TU Delft
Dr.ir. Freek van Leijen, TU Delft

Datum: Oktober, 2018

Versie: 1.0

Inhoud

1.	Introductie	2
1.1.	Achtergrond	2
1.2.	Organisatie van het werk	2
1.3.	Documentstructuur	3
2.	Satellietradarinterferometrie (InSAR).....	3
2.1.	Basisprincipes van InSAR.....	3
2.2.	Gebruik van hoekreflectoren	4
3.	Opzet van het veldexperiment.....	6
3.1.	Installatie van de hoekreflectoren	6
4.	Data en verwerking	9
5.	Eerste resultaten	10
5.1.	Identificatie van de signalen.....	11
5.2.	Gemeten signaalsterkte en verplaatsing	12
6.	Conclusies en aanbevelingen.....	14
6.1.	Conclusies	14
6.2.	Aanbevelingen	15
7.	Referenties.....	16

1. Introductie

1.1. Achtergrond

Satellietradarinterferometrie (InSAR) maakt het mogelijk om voor bepaalde objecten op het aardoppervlak deformaties op mm niveau te meten. De techniek wordt onder andere toegepast voor het monitoren van de stabiliteit van verschillende typen infrastructuur, zoals wegen en spoorwegen. De voordelen van satellietradarinterferometrie zijn dat grote gebieden kunnen worden waargenomen, over lange tijd, met een meetfrequentie van enkele dagen tot enkele weken. Door de hoge meetprecisie kan de techniek potentieel bijdragen tot een vroege detectie van stabiliteitsproblemen in infrastructuur.

Vanwege de grootte van het totale netwerk van waterkeringen in Nederland is toepassing van de techniek op waterkeringen ook erg interessant. Momenteel wordt binnen het kader van het SAFELevee project door de Technische Universiteit Delft verder onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van de techniek. Een van de mogelijke toepassen is het gericht monitoren van speciale constructies, zoals damwanden.

Het doel van dit door de Technische Universiteit Delft uitgevoerde project is om de bruikbaarheid van InSAR voor dijken met speciale constructies te analyseren en evalueren gebaseerd op metingen van de damwandproef bij Eemdijk. Om een aantal goede reflectiepunten van de radarsignalen te creëren, zullen hoekreflectoren op de dijk worden geplaatst. Ondanks dat de looptijd van de proef kort is in vergelijking met de meetfrequentie van de satellietdata, kunnen toch enkele metingen worden verkregen, die gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de potentie van de techniek voor monitoring in de toekomst.

1.2. Organisatie van het werk

Bij de opzet van het project is uitgegaan van twee delen. In dit rapport wordt het eerst deel behandeld:

- Deel 1 Installatie hoekreflectoren en eerste analyse satellietmetingen

Zowel op de 'groene' als op de 'blauwe' dijk zullen reflectoren worden geplaatst. Tevens zal een hoekreflector worden geïnstalleerd die fungeert als referentiepunt. Hiervoor zal een geschikte plaats moeten worden gezocht. Verdere uitwerking hiervan zal plaatvinden tijdens het opstellen van het monitoringsplan, zie hieronder.

Verder is er een eerste analyse van de satellietmetingen gemaakt. De resultaten hiervan worden in dit rapport gerapporteerd.

Over de uitvoering van deel 2 van het project, zal, naar aanleiding van de resultaten behaald in deel 1, nader overleg volgen.

1.3. Documentstructuur

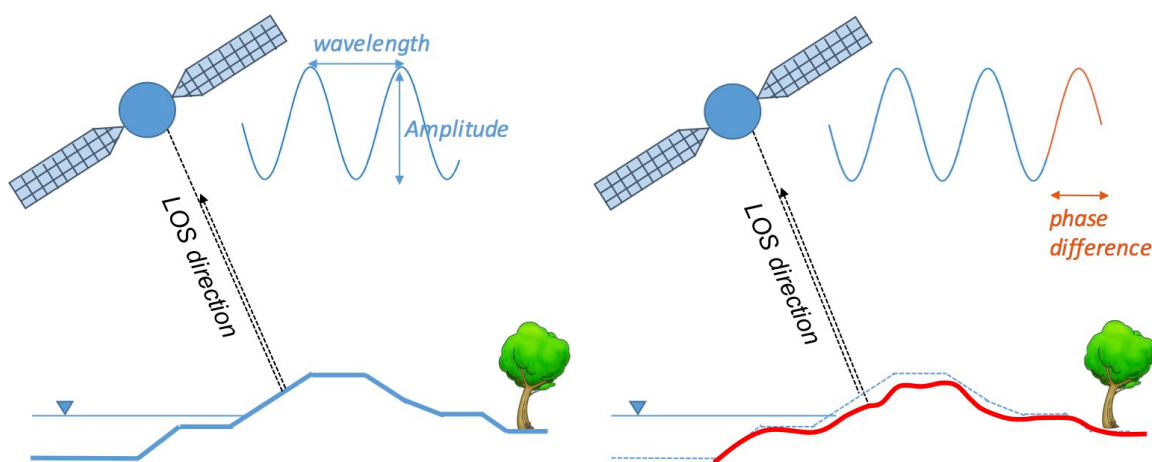
Een algemeen overzicht van de basisprincipes van InSAR en het gebruik van hoekreflectoren wordt gegeven in hoofdstuk 2. De opzet van het veldexperiment wordt beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt de verwerking van de InSAR-gegevens uitgelegd en in hoofdstuk 5 worden de resultaten en analyse van de gegevensverwerking weergegeven. Tot slot worden in hoofdstuk 6 conclusies en enkele aanbevelingen gegeven.

2. Satellietradarinterferometrie (InSAR)

In dit hoofdstuk wordt een korte introductie gegeven over de InSAR techniek. Vervolgens wordt ingegaan op het gebruik van hoekreflectoren.

2.1. Basisprincipes van InSAR

Satellietradarinterferometrie (InSAR) is een techniek die is gebaseerd op herhaalde acquisities door middel van een beeldvormende radar. De satellieten draaien om de aarde en zenden actief radarsignalen naar het aardoppervlak. De signalen worden op het oppervlak gereflecteerd en delen van deze signalen worden ontvangen door de satelliet. Deze signalen worden vervolgens gebruikt om een beeld te construeren, waarbij elke resolutiecel de coherente som van alle reflecties in die cel bevat. Deze coherente som heeft informatie over de reflectiesterkte en fractionele fase van de binnenkomende elektromagnetische golf. Hierbij wordt een afstand-afhankelijke meting verkregen. Door het verschil in fase tussen twee acquisities te nemen, wordt een interferogram verkregen, dat het gecombineerde effect van vervorming, topografie en atmosferische signaalvertraging weergeeft (zie Figuur 1).

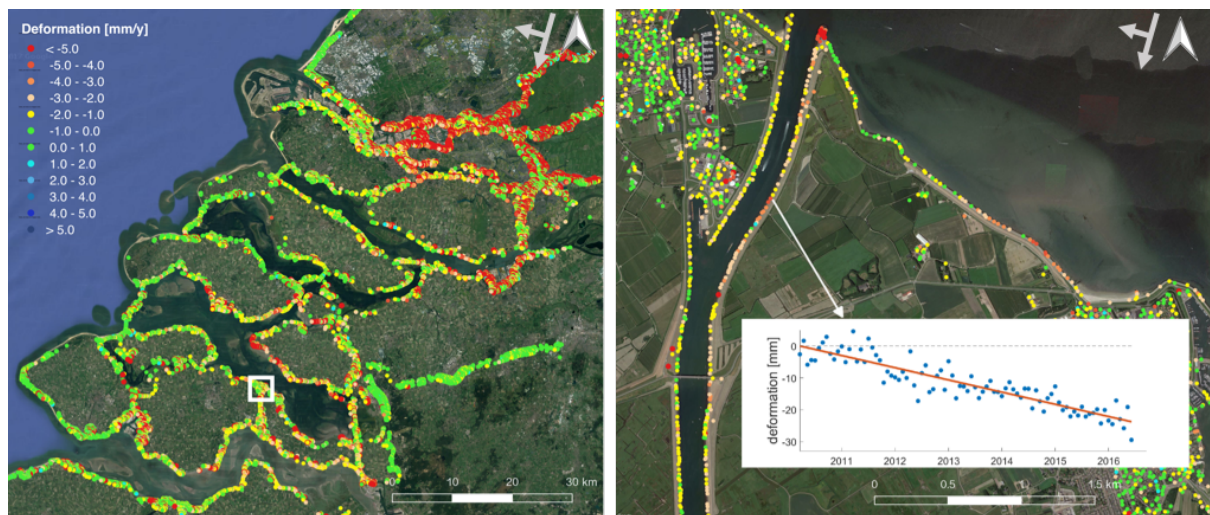


Figuur 1 Twee sequentiële SAR-metingen voor en na deformatie vinden plaats op een dijklichaam. Vervorming [mm] wordt gemeten in de kijkrichting van de radar ('Line-of-Sight (LOS)'), d.w.z. in de lijn tussen de satelliet en het reflectiepunt. Bron: Özer et al., (2018).

Om de schatting van en de verwijdering van de topografische en atmosferische fasebijdrage uit de interferometrische fasen mogelijk te maken, worden interferometrische tijdreeksmethoden ontwikkeld. Een van deze methoden wordt Persistent Scatterer

Interferometrie (PS-InSAR) genoemd. De PS-InSAR benadering is gebaseerd op de detectie van punten in de interferometrische dataset met een consistente reflectie in de loop van de tijd. Deze punten, de zogenaamde Persistent Scatterers (PS), bevinden zich vaak op door de antropogene objecten, zoals gebouwen en verschillende soorten infrastructuur. Voor elke gedetecteerde PS wordt een deformatietijdserie geschat.

De PS-InSAR techniek kan voor verschillende toepassingen worden gebruikt. In Nederland is de techniek onder andere met succes toegepast om bodembeweging te meten, bijvoorbeeld als gevolg van grondwaterwinning (van Leijen en Hanssen, 2008), veen oxidatie (Cuenca en Hanssen, 2008), zinkgatdetectie (Chang en Hanssen, 2014), gaswinning (Ketelaar et al., 2006; Hanssen et al., 2007), voormalige mijnbouw (Cuenca et al., 2013), en waterkeringen, zoals dijken (van Leijen en Hanssen, 2008; Ozer et al., 2018). Een voorbeeld van een PS-InSAR analyse van waterkeringen is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Links: Lineaire deformatiesnelheden [mm/jaar] van de waterkeringen in Zeeland gebaseerd op RadarSAT-2 data (2010-2017) uit de dalende satellietbaan. Rechts: Een voorbeeld van een deformatie tijdserie van een PS met een lineaire deformatiesnelheid van 4.1 mm/jaar. Bron: Özer et al. (2018).

2.2. Gebruik van hoekreflectoren

InSAR vereist consistente reflecties van het oppervlak in tijd. Dit kunnen zowel reflecties van bepaalde objecten zijn, de eerdergenoemde Persistent Scatterers, of van consistent reflecterende oppervlakken, zoals droge gronden (zogenaamde gedistribueerde scatterers (DS)). Het komt echter voor dat op bepaalde locaties geen consistente reflecties worden verkregen, bijvoorbeeld in gebieden met veel vegetatie. Zo komen de meeste consistente reflecties in geval van het monitoren van dijken van de harde bekleding van de dijk¹.

De oplossing voor het gebrek aan natuurlijk reflectiebronnen is het installeren van hoekreflectoren op de betreffende locatie, zie Figuur 3. Een dergelijke reflector bestaat uit

¹ Momenteel vindt er op de Technische Universiteit Delft onderzoek plaats naar het toepassen van InSAR voor het schatten van maaiveld daling van weilanden. Mogelijk kunnen de ontwikkelde methodieken in de toekomst ook toegepast worden voor het monitoren van de delen van de dijk met grasbekleding.

drie metalen platen die onder een hoek van precies 90 graden aan elkaar zijn bevestigd. Een radarsignaal wordt daardoor niet in alle richtingen weerkaatst, maar alleen in de richting waar het signaal vandaan komt, dus terug naar de radarsatelliet. Hierdoor wordt er sterke reflectie ontvangen. De hoekreflector werkt daarmee als een Persistent Scatterer (PS) voor InSAR-verwerking en beweegt, uitgaande van een juiste installatie, mee met de oppervlaktebeweging van de dijk.

Figuur 3 toont het ontwerp van de hoekreflector die wordt gebruikt in het Eemdijk proef. De reflector is geplaatst op een driepoot, waardoor het richten van de reflector wordt vergemakkelijkt. Door de schroef onder de basisplaat kan de reflector 360 graden om de verticale as worden gedraaid, en zo door middel van een kompas loodrecht op de vliegrichting van de satelliet worden gericht. Doordat de driepoot zodanig wordt opgesteld dat de basisplaat waterpas staat, kan de stelschroef van de reflector worden gebruikt om de kanteling te optimaliseren voor de hoek van het inkomende radarsignaal.



Figuur 3 Ontwerp van hoekreflectoren voor Eemdijk.

De verplaatsingsmeting van PS in elke dataset is relatief ten opzichte van een referentiepunt. Om de verschillende reflectoren, verkregen uit verschillende satellietdataset met elkaar te kunnen vergelijken, is een referentiohoekreflector geïnstalleerd. Deze referentierreflector (Hanssen, 2017) heeft twee reflectoren op dezelfde constructie, zie Figuur 7. Hierdoor kunnen zowel beelden opgenomen uit de klimmende als uit de dalende satellietbanen worden gekoppeld. Deze reflector is naast de dijk geplaatst, nabij de proeflocatie waarin het oppervlak geacht stabiel te zijn.

3. Opzet van het veldexperiment

In deze sectie wordt de opzet van het veldexperiment op de Eemdijk proeflocatie beschreven. De proeflocatie is ontworpen om de betrouwbaarheid van dijken te testen. Er zijn twee onafhankelijke dijkproeven: een dijk met damwand (blauwe dijk) en dijk zonder damwand (groene dijk) om inzicht te krijgen in de gedragsverschillen tijdens een faalgebeurtenis. Zo krijgen we meer inzicht in het werkelijke vervormingsgedrag en de sterkte van een dergelijke constructie in een dijk.

Het testgebied Eemdijk ligt ten zuidoosten van Amsterdam, naast de rivier Eem (zie Figuur 4).



Figuur 4 Google Earth- afbeelding van de Eemdijk proeflocatie, die de locatie van de dijken toont.

3.1. Installatie van de hoekreflectoren

Het eerste experiment is het falen van de groene dijk. Het oorspronkelijke plan was om 3 reflectoren op de groene dijk en 3 reflectoren op de blauwe dijk te plaatsen. De oorspronkelijke test van de groene dijk is echter naar een eerdere datum verplaatst en de blauwe dijk was op dat moment nog niet voltooid, d.w.z. er waren nog geen damwandplaten in het dijklichaam geïnstalleerd. Daarom is besloten om 4 hoekreflectoren op de top van de groene dijk te plaatsen, rekeninghoudend met de integriteit van de dijk en de andere meettechnieken (zoals drone, tachymetrie), zie Figuur 5. De ervaringen met deze opzet zouden vervolgens kunnen worden gebruikt voor de opzet van de reflectoren op de blauwe dijk.

De driepoten die worden gebruikt om de reflectoren te installeren, zijn verzwaard met zandzakken. Tevens zijn er scheerlijnen aangebracht. Hiermee is een stabiele constructie verkregen, zie Figuur 6. De referentiehoekreflector is op een stelcon plaat naast de dijk geplaatst (Figuur 5 en 7). Alvorens de stelcon plaat te installeren is een zandlaag aangebracht op het weiland. Ondanks deze zandlaag is niet uit te sluiten dat de

referentiehoekreflector zelf ook een eigen zakking ondervindt vanwege de zwakke ondergrond. Deze zakking is echter gelijk voor alle relatieve metingen van de reflectoren op de dijk.



Figuur 5 Locaties van de 4 hoekreflectoren op de groene dijk en de referentiehoekreflector in het testgebied van Eemdijk.

Na de installatie zijn de hoekreflectoren georiënteerd in de richting loodrecht op de Sentinel-1 satellietbaan en de optimale richting voor de verschillende radarsignalen. Vervolgens is het fasemiddelpunt van de hoekreflectoren ingemeten door middel van RTK-GPS (Tabel 1).

Tabel 1 Het fasemiddelpunt van de reflectoren.

	RD		ETRS89	
	X [m]	Y [m]	Lat [graden]	Lon [graden]
CR.1	150978.446	474511.479	52.25862182	5.32830226
CR.2	150985.749	474503.566	52.25855075	5.32840932
CR.3	150993.379	474494.882	52.25847276	5.32852118
CR.4	151001.114	474485.901	52.25839210	5.32863457
Ref.	151074.014	474519.507	52.25869466	5.32970192

Op 19 januari 2018 rond 16:00 uur was de installatie van de hoekreflectoren voltooid zoals weergegeven in Figuur 6 en Figuur 7. De reflectoren zijn na het bezwijken van de dijk, dus na 29 januari 2018, weer weggehaald.



Figuur 6 De 4 geïnstalleerde hoekreflectoren op de groene dijk.



Figuur 7 De referentiereflector (Hanssen, 2017). De reflector is geïnstalleerd op een stelcon plaat, bovenop een extra aangebrachte zandlaag.

4. Data en verwerking

In dit hoofdstuk worden de aanpak en de resultaten van de eerste verwerking van de satellietdata beschreven.

SAR Data

De verplaatsing van de hoekreflectoren, en daarmee de vervorming van de dijk, kan gemeten worden door de analyse van een set SAR beelden. Er zijn verschillende SAR satellietmissies operationeel, elk met hun eigen karakteristieken, zoals ruimtelijke resolutie, temporele herhalingsbaan, golflengte en polarisatie van het radar signaal. Voor iedere toepassing en project kan een afweging worden gemaakt welke satellietmissie het meest geschikt is (of eventueel een combinatie van missies). Gezien de korte duur van het Eemdijk project, is in dit geval voor data van de Sentinel-1 missie van ESA gekozen. Deze missie levert data met een herhalingsstijd van 6 dagen, waardoor gedurende de proef ten minste een aantal opnamen beschikbaar zijn voor interferometrische analyse. Door gebruik te maken van zowel de klimmende als de dalende satellietbanen, en omdat de opgenomen stroken boven Nederland ongeveer een 50% overlap hebben, zijn er voor de Eemdijk locatie opnamen vanuit vier verschillende satellietposities mogelijk (elke 6 dagen). Hierdoor wordt de testlocatie dus gemiddeld elke 1 a 2 dagen bemonsterd. Dit geldt overigens voor geheel Nederland.

De vier gebruikte Sentinel-1 SAR datasets zijn weergegeven in Tabel 2. De vliegrichting geeft de richting van de satelliet ten opzichte van het noorden weer. Het radarsignaal wordt loodrecht op deze richting, onder een hoek ten opzichte van zenit, uitgezonden. Hierdoor komt het radarsignaal onder een bepaalde inkomende hoek op het oppervlak terecht. Het gevolg hiervan is dat de metingen zowel gevoelig zijn voor verplaatsingen in verticale en in horizontale richting (Özer et al., 2018).

Tabel 2 Karakteristieken van gebruikte Sentinel-1 datasets.

Track	Baan	Vliegrichting [graden]	Inkomende hoek [graden]	Eerste opname dataset (elke 6 dagen herhaald)	Opnametijd [hh:mm, UTC]
088	Klimmend	344.5	33.2	06-11-2017	17:25
161	Klimmend	344.5	41.8	12-10-2017	17:33
037	Dalend	195.5	44.6	16-10-2017	05:49
110	Dalend	195.5	36.7	15-10-2017	05:58

Data verwerking

Voor de verwerking van de data kunnen de volgende stappen worden onderscheiden:

1. Downloaden SAR beelden.
2. Co-registreren van de SAR beelden, zodat de verschillende beelden precies op elkaar liggen en ze in het tijdsdomein kunnen worden geanalyseerd.
3. Identificeren van de signalen afkomstig van de hoekreflectoren, gebaseerd op de GNSS metingen en een positie-optimalisatie gebaseerd op maximale signaalsterkte.
4. Analyse van de signaalsterkte (Radar Cross Section (RCS)) en de verplaatsing.

Het gehele verwerkingsproces wordt uitgevoerd door software ontwikkeld binnen de Technische Universiteit Delft. De eerste resultaten van de analyse worden beschreven in het volgende hoofdstuk.

5. Eerste resultaten

In dit hoofdstuk worden de eerste resultaten van de dataverwerking voor de groene dijk gepresenteerd. In de ochtend van 30 januari 2018 is de groene dijk bezweken. De lengte van de afschuiving bedraagt ongeveer 25 meter (zie, Figuur 8 en Figuur 9).



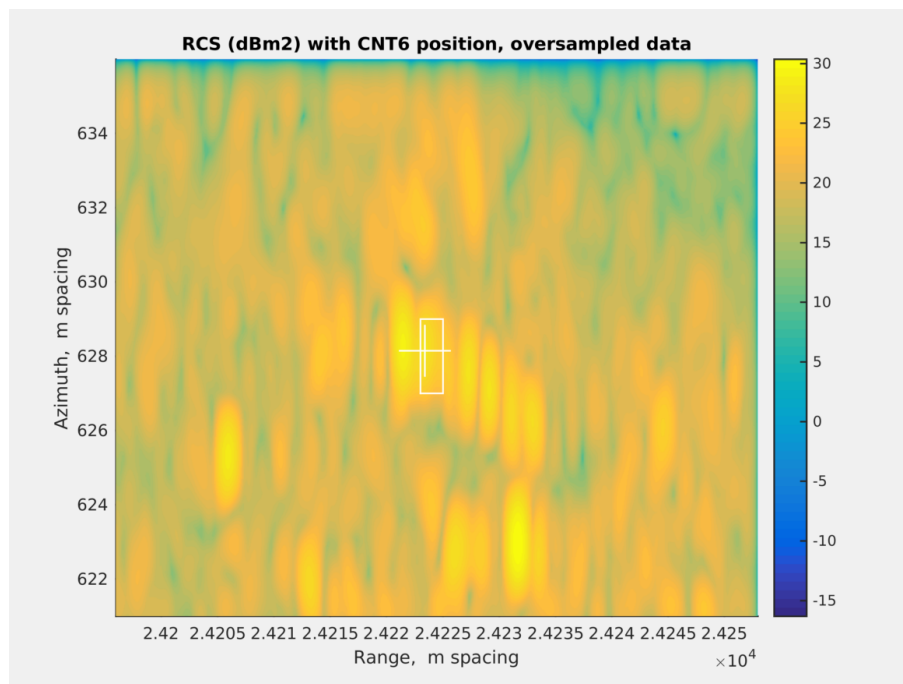
Figuur 8 Foto van het bezwijken van de groene dijk.



Figuur 9 Foto van het bezwijken van de groene dijk.

5.1. Identificatie van de signalen

Gedurende de proef met de groene dijk is begonnen met de dataverwerking (data download, co-registratie van beelden). Al snel bleek dat het identificeren van de signalen afkomstig van de hoekreflectoren niet mogelijk was. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar in Figuur 10, waar de signaalsterkte (RCS) voor een beeld uit track 37 is weergegeven. In plaats van vier relatief sterke reflecties voor de hoekreflectoren zijn (afhankelijk van de satellietbaan) zes tot acht sterke reflecties zichtbaar die overeenkomen met de containers bovenop de dijk. Tijdens het ontwerp van de meetopzet is al rekening gehouden met de containers, maar hierbij is geen rekening gehouden met het feit dat de bovenkant van de containers open is. Het gevolg is de containers zelf als een radarreflector functioneren, en door de grootte ten opzichte van de geïnstalleerde hoekreflectoren, het signaal van de hoekreflectoren volledig overstralen. Analyse van de reflecties van de hoekreflectoren is daardoor niet mogelijk. Daarentegen vormen de containers zelf juist een zeer sterke hoekreflector, waarvan het effectieve reflectiepunt weliswaar niet eenduidig is bepaald.



Figuur 10 Reflectiesterkte (RCS) van het radarsignaal voor een beeld uit dataset uit track 37.

Vervolgens is besloten een analyse te doen van de reflecties afkomstig van de containers. Omdat van de positie van de containers geen directe GNSS-metingen beschikbaar waren, zijn de posities uit de radarbeelden geschat door een optimalisatie in de signaalsterkte. Figuur 10 laat hiervan een voorbeeld zien voor container 6 (CNT6, alle acht containers zijn aangeduid met CNT1-8, zie Figuur 11). Vervolgens zijn voor deze posities de signaalsterkte en verplaatsing geanalyseerd.



Figuur 11 Nummering van de containers op de groene dijk (in de tekst aangeduid met CNT1-8). Container 8 staat op de kopse kant van de dijkkring (niet op de foto).

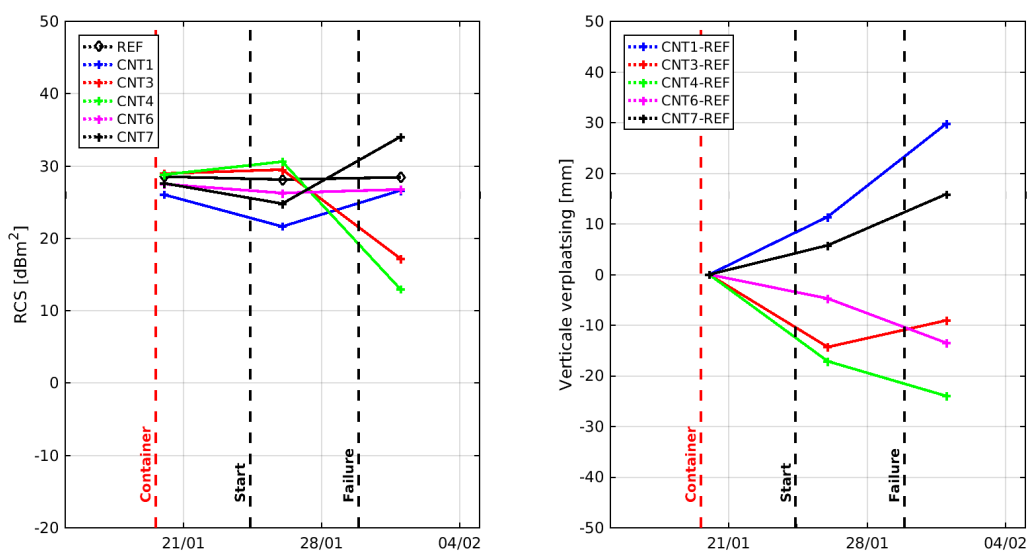
5.2. Gemeten signaalsterkte en verplaatsing

De analyse van de vier verschillende datasets laat zien dat per dataset 3 tot 5 reflecties afkomstig van de containers kunnen worden gedetecteerd. Deze detectie is gebaseerd op de eerder bepaalde posities, en het reflectiepatroon in de specifieke datasets. De gedetecteerde containers verschillen per dataset. Sommige containers zijn zichtbaar in alle datasets, terwijl anderen in geen enkele set voldoende duidelijk naar voren komt. De resultaten voor satellietbanen 37, 110 en 88 zijn weergegeven in Figuren 12, 13 en 14.

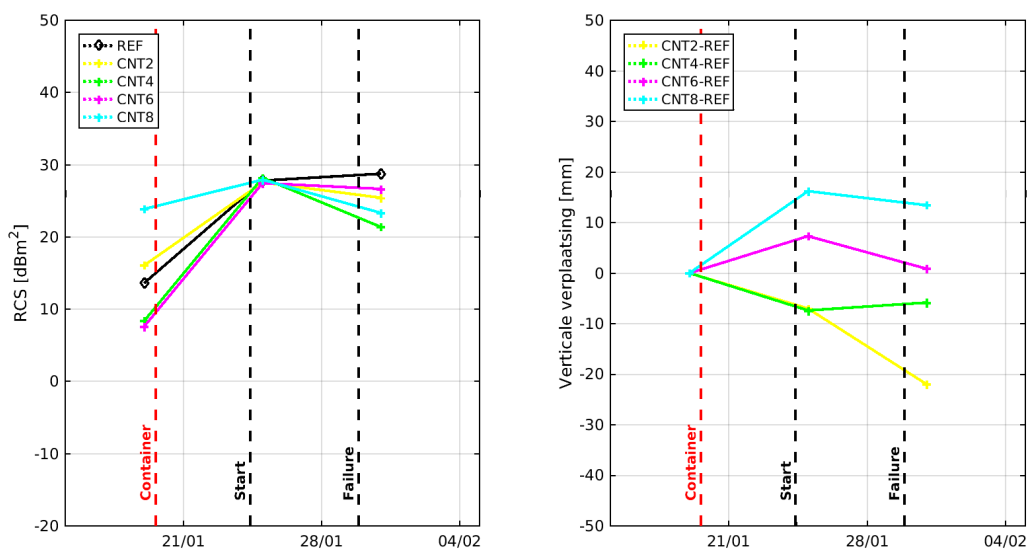
Per dataset is zowel de reflectiesterkte (uitgedrukt in Radar Cross Section (RCS) en de verplaatsing ten opzichte van de referentiereflector, gebaseerd op de gemeten fase, weergegeven. De figuren laten zien dat de reflectiesterkte van de referentiereflector inderdaad stabiel is met een RCS van ongeveer 28 dBm². De gedetecteerde containers tonen een soortgelijke sterkte. Dit is significant meer dan de geïnstalleerde hoekreflectoren op de dijk, die een stuk kleiner zijn in vergelijking met de referentiereflector. De figuren laten ook zien dat de reflectiesterkte na het falen van de dijk verandert, waarschijnlijk door het kantelen van de containers, mogelijk in combinatie met de invloed van een laag regenwater die zich in de containers verzameld heeft.

De gemeten fasen zijn vertaald naar een verplaatsing in millimeters ten opzichte van de referentiereflector. De meting is in de kijkrichting van de radar, die is bepaald door de vliegrichting van de satelliet en de inkomende hoek van het signaal, zie Tabel 2. Deze zijn anders voor de vier verschillende datasets. Tussen de twee klimmende of dalende banen gaat het hierbij vooral om een verschil in inkomende hoek ten opzichte van zenit. De kijkrichtingen vanuit de dalende t.o.v. de klimmende banen verschillen zo'n 180 graden, waardoor aangenomen kan worden dat twee verschillende hoeken van de containers, diagonaal ten opzichte van elkaar, zijn gemeten. Directe vergelijking van de metingen is door de verschillende kijkrichtingen en gemeten punten moeilijk. Om toch enigszins een

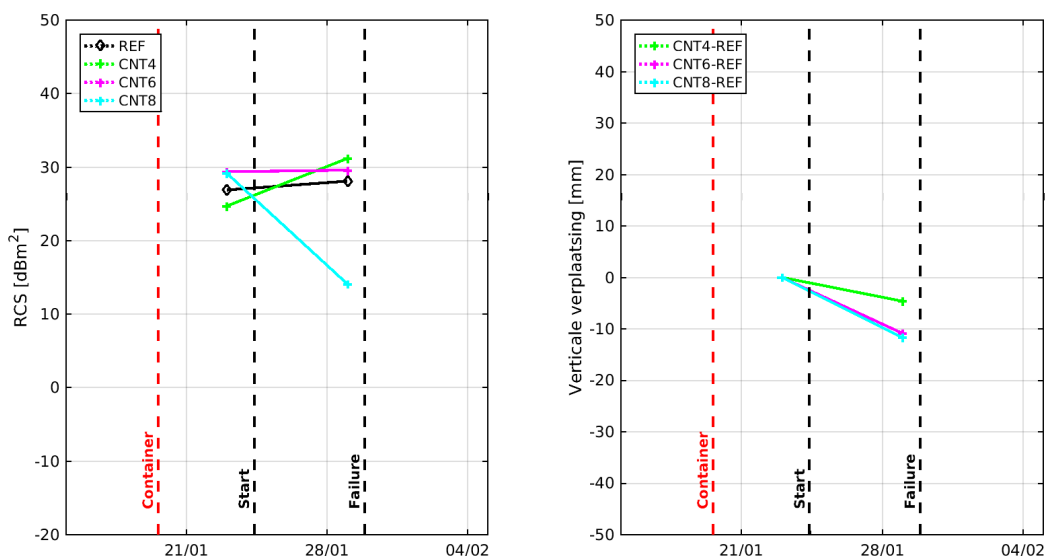
vergelijking mogelijk te maken, zijn de metingen getransformeerd naar verplaatsingen in verticale richting. Eventuele horizontale verplaatsingen die hebben plaatsgevonden zijn hiermee ook vertaald naar een verticale verplaatsing.



Figuur 12 Radarmetingen voor de referentiereflector (REF) en verschillende containers vanaf Sentinelbaan 37 (dalende baan). Links) Radarreflectiesterkte, uitgedrukt in Radar Cross Section (RCS). Rechts) Verplaatsing in verticale richting. De momenten van plaatsing van de containers, de start van de proef, en het falen van de dijk zijn weergegeven in de figuren.



Figuur 13 Radarmetingen voor de referentiereflector (REF) en verschillende containers vanaf Sentinelbaan 110 (dalende baan). Links) Radarreflectiesterkte, uitgedrukt in Radar Cross Section (RCS). Rechts) Verplaatsing in verticale richting.



Figuur 14 Radarmetingen voor de referentiereflector (REF) en verschillende containers vanaf Sentinelbaan 88 (klimmende baan). Links) Radarreflectiesterkte, uitgedrukt in Radar Cross Section (RCS). Rechts) Verplaatsing in verticale richting.

Een eerste analyse van de verplaatsingen laat zien dat een aantal consistente metingen zijn verkregen. Bijvoorbeeld laten de metingen voor dalende banen 37 en 110 een soortgelijke zakking van zo'n 8 mm zien van CNT6. Vanuit klimmende baan 88 is een overeenkomstige waarde gemeten. Voor andere containers is het beeld echter meer diffuus. Dit zou kunnen komen omdat de verplaatsing van de andere containers groter is. De fasemetingen (gemeten tussen $-\pi$ en $+\pi$) hebben namelijk een onbekende fase-ambigüiteit. Voor Sentinel-1 komt dit overeen met 31 mm verplaatsing in verticale richting. Verplaatsingen van meer dan de helft van deze waarden, worden hierdoor met een modules van 31 mm weergegeven. Een verzakking met -17 mm wordt hierdoor bijvoorbeeld +14 mm. Overeenkomstig kan geen onderscheid worden gemaakt tussen een verzakking van -8 en -39 mm.

Door de beschikbare metingen uit de dalende en klimmende banen te combineren zou per container een betere schatting van de verplaatsing van de container als geheel kunnen worden verkregen. Hierbij zouden mogelijk ook een inschatting van de fase-ambigüiteiten kunnen worden verkregen. Deze analyse is, gezien de beperkte omvang van dit project, niet toegepast.

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1. Conclusies

De onverwachte sterke reflecties van de open containers bovenop de groene dijk hebben het onmogelijk gemaakt om de geïnstalleerde hoekreflectoren op de dijk te meten. In plaats daarvan zijn de reflecties van de containers gedetecteerd en geanalyseerd. Ondanks dat een aantal consistente reflecties en daaruit afgeleide verplaatsingen zijn gemeten, is de verdere analyse complex. Hierbij spelen onder andere de fase-ambigüiteiten van de signalen, en eventuele omgevingsfactoren zoals de invloed van regenwater in de containers een rol.

Het probleem van de sterke reflecties van de open containers, en daarmee de onzichtbaarheid van de geïnstalleerde hoekreflectoren, werd door de near-real time analyse van de satellietdata gedurende de proef met de groene dijk al snel duidelijk. Hiermee kon ook gelijk de conclusie worden getrokken dat installatie van de hoekreflectoren voor de proef met de blauwe dijk niet zinvol was.

Het is mogelijk om de reflecties van de containers, zowel op de groene als ook op de blauwe dijk, verder te analyseren. Echter, de complexiteit van de signalen, bijvoorbeeld door het vullen van de containers op de blauwe dijk met water gedurende de proef, maken dit meervoudig interpretabel. Aangezien het toepassen van satellietdeformatiemetingen tijdens de proef vooral als doel had de toepasbaarheid van de techniek voor dergelijke constructies te evalueren, en gezien het beperkt aantal meetmomenten tijdens de proef, lijkt verdere uitwerking van de data niet zinvol.

De proef heeft laten zien dat de radarreflecties van de satellietsignalen volledig afhankelijk zijn van de bekleding van, en objecten op de dijk. Ook al is de interpretatie van de reflecties van de containers tijdens deze proef complex, in een andere situatie zouden soortgelijke objecten juist over een langere termijn voor zeer waardevolle waarnemingen kunnen zorgen. Een verandering in de stabiliteit, bijvoorbeeld door verzakking of kanteling, zou juist voor het detecteren van een zwakke plek kunnen zorgen. Hierbij moet ophoping van regenwater, die van invloed is op het gemeten verplaatsingssignaal, voorkomen worden. Naast objecten zorgt in veel gevallen ook de steenbekleding en de steenbestorting van dijken van goede reflecties. Eerdere studies (van Leijen en Hanssen, 2008; Ozer et al., 2018) hebben laten zien dat deze 'natuurlijke' reflecties van het dijkoppervlak voor honderdduizenden waardevolle meetpunten van de dijken van Nederland kunnen zorgen.

6.2. Aanbevelingen

De resultaten van de proef tonen aan dat een goede analyse van de ruimtelijke situatie van groot belang is voor een juiste inschatting satellietverplaatsingsmetingen met InSAR. In deze uitzonderlijke situatie dat de dijk specifiek gebouwd is voor deze proef, was het niet mogelijk om van te voren een verkenningsanalyse te doen. Voor de meeste andere toepassingen is dit wel mogelijk.

Zoals aangegeven zorgen de bestaande dijken in Nederland al voor honderdduizenden natuurlijke meetpunten, die systematisch gemonitord kunnen worden. Tot op heden zijn analyses beperkt gebleven tot case studies, vaak gerelateerd aan op handen zijnde verstevigingswerkzaamheden. Toepassing met een monitoringsdoel voor de veiligheid van Nederland is nog niet geïnitieerd. Gezien de landsdekkende beschikbaarheid van satellietdata, met een herhalingsfrequentie van 1 a 2 dagen, lijkt dit wenselijk en zou de inpasbaarheid van zo'n nieuwe informatiestroom in de dagelijkse beheerpraktijk onderzocht moeten worden.

Op dijken waar tot nu toe geen bruikbare natuurlijke reflecties worden gedetecteerd, bijvoorbeeld door grasbekleding, zou verder onderzoek moeten worden gestimuleerd om slimmere bewerkingstechnieken te ontwikkelen en testen. Inmiddels worden al veelbelovende resultaten bereikt voor weilanden en akkers. Deze technieken zouden verder geoptimaliseerd moeten worden voor toepassing op de kleinere grasoppervlakken op dijken.

Voor locaties waar desondanks geen natuurlijke reflecties worden gedetecteerd, kunnen kunstmatige reflectoren worden geïnstalleerd. Ervaringen uit het verleden tonen aan dat hoekreflectoren, zoals gebruikt bij de Eemdijk proef, erg gevoelig zijn voor verstopping door regenwater en vuil, beschadiging, en zelfs diefstal. Een onverstoord signaal over een langere tijd, kan daardoor niet worden gegarandeerd. Actieve radar transponders vormen een waardevol alternatief. Deze elektronische apparaten zenden actief het radarsignaal uit. Voordeel is dat deze transponders kleiner en minder zwaar zijn ten opzichte van de hoekreflectoren. Nadeel is dat zij een energiebron nodig hebben, in de vorm van een batterij, eventueel gecombineerd met een zonnepaneel. Ook kan de diefstal- of vandalismegevoeligheid een probleem zijn.

Gezien de nadelen van de hoekreflectoren en de actieve transponders, is het ontwerpen van een nieuw type dijkbekleding, dat zorgt voor een goede radar reflectie, een alternatieve optie. Deze dijkbekleding zou een bepaalde mate van ruwheid moeten hebben, om voor een goede reflectie te zorgen. Ophoping van vuil en regenwater zou echter voorkomen moeten worden. Naast dijkbekleding, zouden wellicht ook objecten kunnen worden ontwikkeld die voor een goede radarreflectie zorgen.

7. Referenties

1. Chang, L. & Hanssen, R. F., 2014. Detection of cavity migration and sinkhole risk using radar interferometric time series. *Remote sensing of environment*, 147, 56-64.
2. Cuenca, M. C. & Hanssen, R., 2008. Subsidence due to peat decomposition in the Netherlands, kinematic observations from radar interferometry. *Proc. Fringe 2007 Workshop*, 2008. 1-6.
3. Cuenca, M. C., Hooper, A. J. & Hanssen, R. F., 2013. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, The Netherlands observed by satellite radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 88, 1-11.
4. Hanssen, R. F., van Leijen, F. J., van Zwieten, G. J., Dortland, S., Bremmer, C. N. & Kleuskens, M., 2008. Validation of PSI results of Alkmaar and Amsterdam within the TerraFirma validation project. *Proceedings of Fringe 2007 Workshop*, November, 2007. 26-30.
5. Hanssen, R.F., & van Leijen, F.J., 2008. Monitoring water defense structures using radar interferometry. In *IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 26-30 May 2008*.
6. Hanssen, R. F. 2017. Device with integrated double sar corner-reflectors, gnss, levelling, triangulation and photogrammetric benchmarks. Netherlands patent 2019103. 21 June 2017.
7. Ketelaar, G., van Leijen, F., Marinkovic, P. & Hanssen, R., 2006. On the use of point target characteristics in the estimation of low subsidence rates due to gas extraction in Groningen, the Netherlands. *Fringe 2005 Workshop*, 2006.
8. Özer, I.E., van Leijen F.J., Jonkman S.N., Hanssen R.F., 2018. Applicability of satellite radar imaging to monitor the conditions of levees. *Journal of Flood Risk Management*, e12509, <https://doi.org/10.1111/jfr3.1250916>.
9. van Leijen, F. & Hanssen, R., 2008. Ground water management and its consequences in Delft, the Netherlands as observed by persistent scatterer interferometry. *Proc. Fringe 2007 Workshop*, 2008. 1-6.