WALTER
wadden sea
LONG-TERM ECOSYSTEM RESEARCH

Gedegen, innovatieve en verbindende monitoring
van het waddengebied

FACTSHEET

FACTSHEET INSAR

Rens Swart

Swart*vast*

VERSIE 20150416

APR 15

INHOUDSOPGAVE

1 INLEIDING 4

2 BEWEGINGSMETING MET INSAR 6

2.1 Specificiteit en nauwkeurigheid 13
2.2 Inzetbaarheid en leverbetrouwbaarheid 14
2.3 Uniformiteit 15
2.4 Regionale geschiktheid 15
2.5 Continuïteit 17
2.6 Prijs/kwaliteit 18
2.7 Toepassingskader monitoring binnen probleemafbakening 18

3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 19

4 DANKWOORD 20

5 REFERENTIES 21

1 INLEIDING

De huidige winning van gas uit de diepe ondergrond van de Waddenzee vindt plaats volgens het principe van “hand aan de kraan” (Cleveringa 2013; NAM 2005). Het is aannemelijk dat dit ook zal gelden voor toekomstige winningen van delfstoffen, zoals de voorgenomen winning van steenzout (Commissie MER 2014). Winning mag plaatsvinden onder de voorwaarde dat de beschermde natuurwaarden geen schade ondervinden. Van tevoren is vastgesteld hoe snel de bodem maximaal mag dalen om aan die voorwaarde te voldoen. Tijdens de winning vindt monitoring plaats om zo nodig de hand aan de winningskraan te zetten om de winning te verminderen dan wel geheel te stoppen (waarbij moet worden aangetekend dat de daling met een zekere vertraging reageert op veranderingen in winningssnelheid).

De monitoring richt zich op i) de bodemdaling (meet en regelcyclus), ii) de mogelijke effecten op natuurwaarden van het natte wad, kwelders, duinen en polders:

Bodemdaling (meet en regelcyclus) in de Pleistocene ondergrond

- Voor de monitoring van de bodemdaling wordt op Ameland gebruik gemaakt van geodetische metingen op het land en GPS.
- Voor de velden Moddergat, Lauwersoog & Vierhuizen is sprake van de volgende metingen: (1) Continue metingen m.b.v. 3 permanente GPS-stations en InSAR rond Lauwersmeer, (2) Eens per 3 jaar: GPS-campagne peilmerkclusters Waddenzee, peilmerken Lauwersmeer, waterpassingen rond Lauwersmeer, waterpassingen Ameland, waterpassingen Schiermonnikoog, GPS-campagne op 2 Ameland platformen (vanaf 2014 mogelijk continu).
- Voor de voorgenomen zoutwinning is het meetplan (Auditcommissie 2014): (1) continue differentiële GPS-metingen op 2 vaste peilstations boven de caverne, (2) jaarlijkse meetcampagne op diepe peilmerken via mobiele GPS-stations

Effect op natuurwaarden

Hoe bodemdaling van de Pleistocene ondergrond tot eventuele schade aan natuurwaarden zou kunnen leiden wordt in sterke mate bepaald door het type aardoppervlak:

- Binnendijkse polders hebben voor een deel een relatief stabiele bovengrond, waardoor bodemdaling direct meetbaar is als oppervlaktedaling van het maaiveld. Dit heeft weer direct gevolgen voor de waterhuishouding en daarmee voor flora en fauna. Overigens vindt ook maaivelddaling plaats als gevolg van processen in de bovenste, Holocene ondergrond.
- Duinen variëren in stabiliteit afhankelijk van de ouderdom, maar het belangrijkste effect van bodemdaling is een verandering in waterhuishouding, c.q. een vernatting van duinvalleien, wat weer effect heeft op flora en fauna.

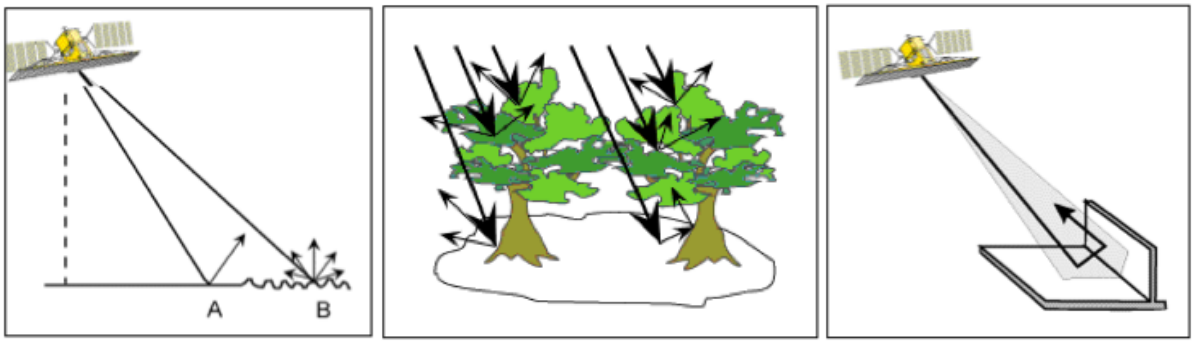
- Kwelders kunnen eroderen of opslibben, waarbij de mate van opslibbing binnen de kwelder sterk varieert. Bij opslibbende kwelders is de verandering van maaiveldhoogte een optelsom van bodemdaling, inklinking en opslibbing. De maaiveldhoogte heeft effect op (a) frequentie van overstroming en daarmee vegetatie, (b) het risico van overstroming van de nesten van kwelderbroedvogels tijdens de broedtijd.
- Op het natte wad verandert de grens tussen land en water voortdurend als gevolg van het getij en op de wat langere termijn is ook de morfologie van de platen en de geulen steeds in beweging. Het is duidelijk dat bodemdaling onder het natte wad neerkomt op onttrekking van sediment met een volume dat overeenkomt met het volume van het deel van de bodemdalingschotel dat onder het natte wad ligt. Mede als gevolg van de dynamiek van de platen en de geulen is het echter nog niet gelukt bodemdaling eenduidig aan het oppervlak van het sediment te meten. Daling van het wad heeft mogelijk gevolgen voor (a) sedimentsamenstelling van het wadoppervlak, (b) bodemdieren, (c) voedselbeschikbaarheid voor wadvogels.

De voorliggende factsheet verkent de mogelijkheden en kosten van toepassing van de InSAR-techniek in monitoring in de Waddenzee. Een specifieke invalshoek betreft de toepassingsmogelijkheden in relatie tot de plaatsing van vaste en goed in Pleistoceen verankerde peilmerken met radarreflector.

2 BEWEGINGSMETING MET INSAR

Het meten van beweging met radarinterferometrie of interferometrische SAR (InSAR) is een innovatieve meettechniek met buitengewone eigenschappen: het is met behulp van satellieten op 800 kilometer hoogte mogelijk bewegingen van met name gebouwen en infrastructuur te meten met een precisie van beter dan een millimeter per jaar. Deze techniek is inmiddels in het operationele stadium en wordt commercieel aangeboden.

Het basisprincipe dat ten grondslag ligt aan InSAR is het uitzenden van elektromagnetische golven en het 'luisteren' naar wat het terrein daarvan terugverstrooit (*backscatter*; figuur 1). Dit gaat via een puls en de bepaling van hoe lang het duurt vooraleer de reflectie van de puls wordt terugontvangen: radar (RAdio Detection And Ranging). Omdat het instrument zelf de straling uitzendt, is geen (zon)licht nodig. Een radar kan dus dag en nacht waarnemen en ook vrijwel ongehinderd door bewolking heen kijken.



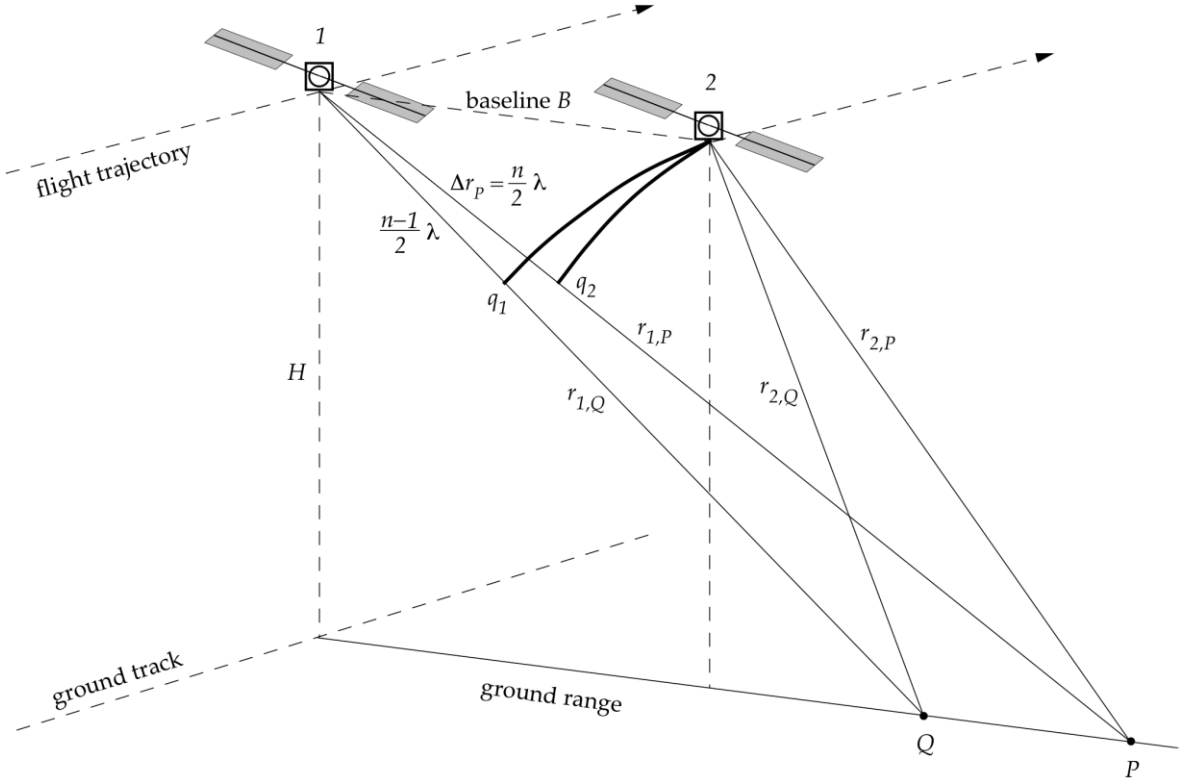
Figuur 1. De intensiteit van het SAR-beeld hangt af van de manier waarop de radarstraling verstrooid wordt. Een ruw oppervlak verstrooit veel terug in de kijkrichting van de satelliet en is dus relatief helder (links). Volumetrische verstrooiing vindt plaats aan bijvoorbeeld vegetatie (midden). Harde oppervlakken kunnen bij de juiste oriëntatie voor een dubbele reflectie en een zeer helder signaal zorgen (rechts).

Een radarantenne is echter niet in staat een beeld te vormen. Door een slimme signaalverwerkingstechniek kan toch een beeld worden vervaardigd: apertuursyntheseradar oftewel SAR (*synthetic aperture radar*).
Als het SAR-instrument behalve de sterkte (amplitude) van het terugverstrooide signaal ook de fase (het deel van de golflengte) registreert, kunnen uit twee SAR-beelden faseverschillen worden berekend: een interferogram (figuur 2). Deze techniek heet *interferometrische SAR* of *radarinterferometrie*. In principe correspondeert een faseverschil tussen twee beelden met een looptijdverschil en dat kan weer ontstaan als gevolg van een verschil in afstand. Het verschil in afstand kan de volgende oorzaken hebben:

- de satelliet staat tijdens de tweede opname op een (iets) andere positie dan tijdens de eerste opname; dit afstandsverschil tussen de waarneemposities leidt primair tot een bandenpatroon in de fase, waarvan de frequentie afhangt van de onderlinge afstand tussen de waarneemposities (de basislijn);

- de locatie van het waargenomen punt is sinds de eerste opname veranderd, bijvoorbeeld door een verschuiving of verzakking.

Een looptijdverschil hoeft niet beslist door een weglengteverschil veroorzaakt te worden, vocht in de atmosfeer en vrije ionen in de ionosfeer hebben een vertragend effect op het radiosignaal en veroorzaken dus ook een faseverschil.



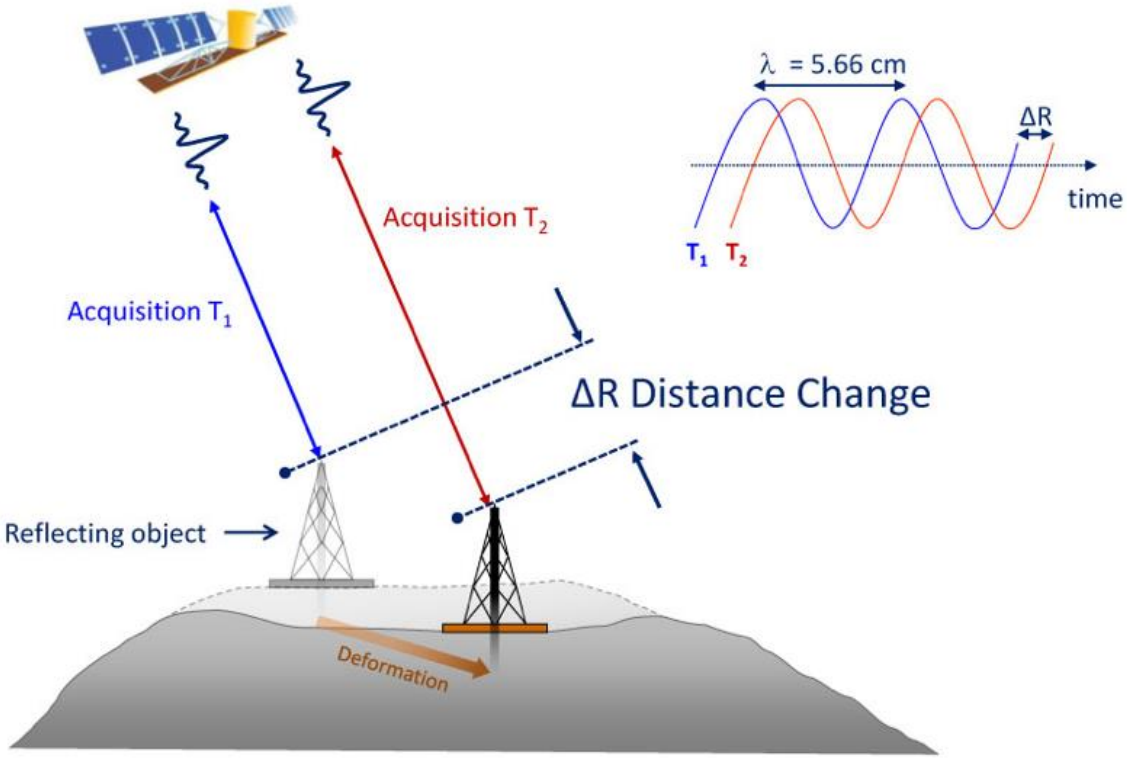
Figuur 2. Uit de onderlinge afstand van de twee waarneemposities 1 en 2 van de SAR-satelliet (de basislijn) kan berekend worden hoe het faseverschil tussen beide beelden afhangt van de locatie op het oppervlak (uit Swart, 2000)

Om InSAR voor het meten van *bewegingen* (vaak *deformaties* genoemd, een term die in de civiele techniek een veel striktere betekenis heeft) te kunnen inzetten, moeten de overige effecten op de fase berekend en verwijderd worden. Het hierboven genoemde afstandsverschil tussen de waarneemposities is gerelateerd aan de volgende parameters, die berekend moeten worden.

- De vorm van de aarde leidt tot faseverschillen, die regelmatig verlopen als de aarde ‘vlak’ zou zijn en te berekenen zijn uit de satellietbanen.
- De satellietbanen zijn weliswaar *a priori* nauwkeurig bekend, maar restfouten daarin moeten uit de beelden geschat worden.
- De topografie van het terrein, dat wil zeggen bergen en dalen, leidt tot afwijkingen in de afstand tot de satelliet: een bergtop is dichter bij de satelliet.

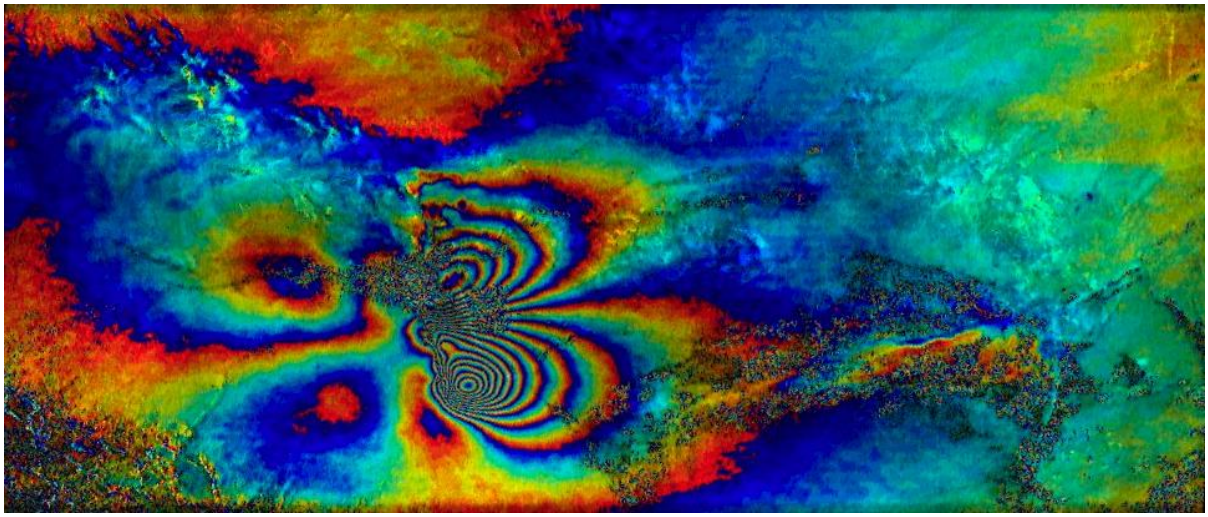
Als ook de atmosferische invloed is geschat, kunnen faseverschillen overblijven die het gevolg zijn van de *beweging* van het aardoppervlak of objecten daarop. De kracht van bewegingsmeting met radarinterferometrie zit hem erin dat een beweging van de helft van de golflengte (in de kijkrichting van de satelliet) al leidt

tot een faseverschil van 2π (figuur 3). Dit betekent dat de beweging met een zeer kleine standaardafwijking kan worden vastgesteld.



Figuur 3. Als alle andere invloeden op het faseverschil tussen twee beelden zijn verwijderd, blijft de essentie over: een beweging leidt tot een weglengteverschil ΔR en daarmee tot een faseverschuiving, die het mogelijk maakt de beweging met millimeterprecisie te meten (uit TRE, 2013)

In principe zijn alleen SAR-beelden genomen vanuit dezelfde positie met elkaar te combineren. Dit heeft te maken met de coherentie: het terrein moet op exact dezelfde manier het radiosignaal terug verstrooien. Maar dit betekent dat alleen de grootte van de beweging in de kijkrichting van de satelliet is vast te stellen. Het is een projectie van de werkelijke beweging in de kijkrichting van de satelliet. Indien de beweging zowel een horizontale als verticale component heeft, zijn meerdere kijkrichtingen nodig om de werkelijke beweging vast te stellen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van beelden genomen uit verschillende satellietposities. Indien kan worden aangenomen dat de beweging hoofdzakelijk een verticale component heeft, dan is één kijkrichting voldoende.



Figuur 4. Beweging van het aardoppervlak als gevolg van de aardbeving bij Bam in Iran op 26 december 2003. Eén kleurencyclus van rood tot blauw komt overeen met een verplaatsing van 28 mm in de kijkrichting van de satelliet. Door integratie is vast te stellen dat de deformatie minimaal 30 cm is in de kijkrichting van de satelliet. Door te delen door de sinus van de invalshoek (23°) wordt een puur horizontale verschuiving van 77 cm verkregen. Door de korte tijd tussen de twee SAR-opnamen waaruit het interferogram is berekend, is er vrijwel geen decorrelatie opgetreden. Slechts kleine gebieden vertonen ruis (uit ESA, 2004, verwerking Politecnico di Milano)

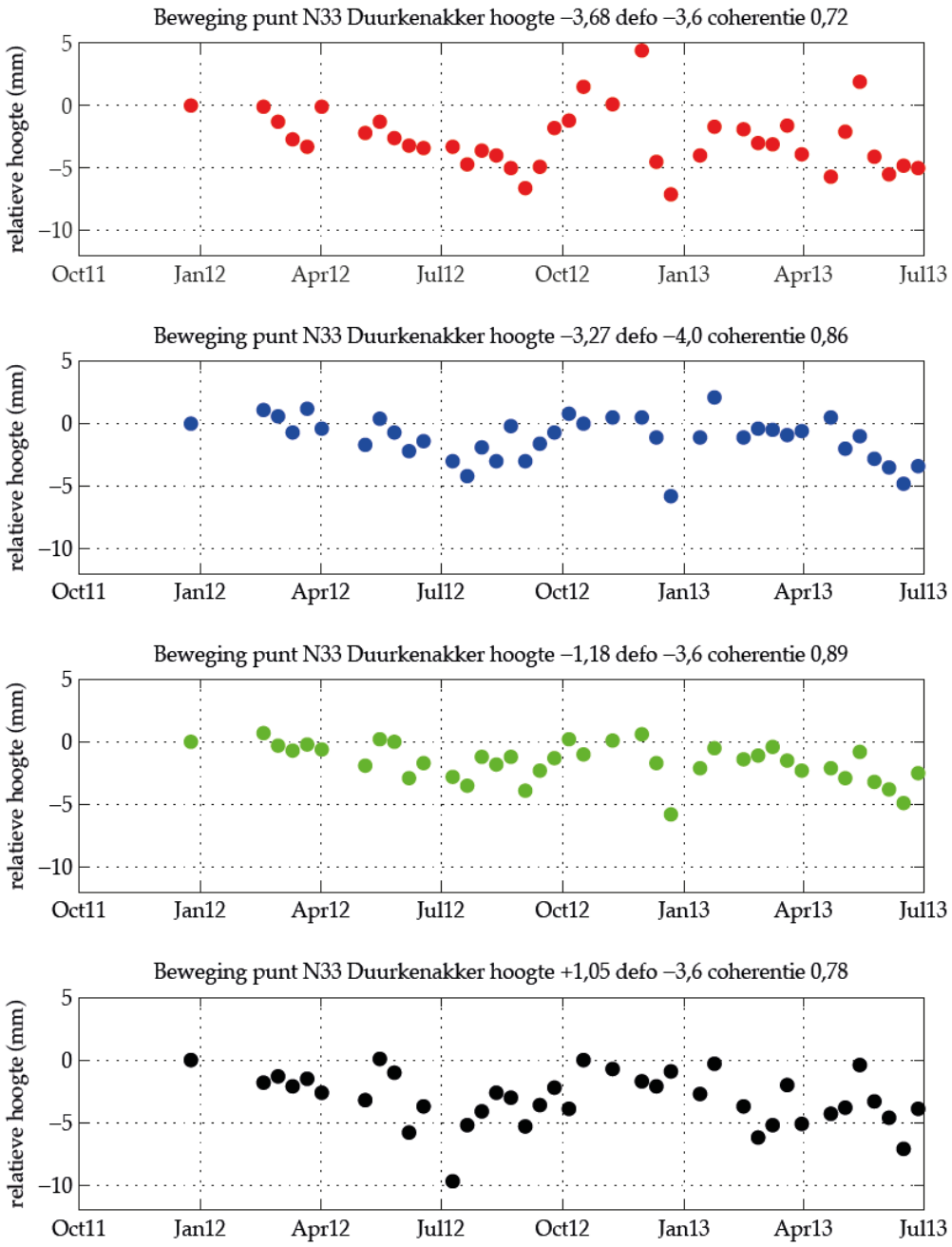
Op deze manier is alleen de grootte van de beweging in de kijkrichting van de satelliet vast te stellen. Het is een projectie van de werkelijke beweging in de kijkrichting van de satelliet. De werkelijke beweging kan alleen worden vastgesteld door er nog een andere kijkrichting bij te betrekken en dan ook nog maar met beperkte precisie. Bovendien verdubbelt dit de kosten omdat een tweede volledige reeks beelden moet worden verwerkt.

Deze techniek werkt alleen als de wijze waarop het terrein de radarstraling verstrooit in de tijd tussen de twee opnamen niet verandert, zoals in het geval dat de ene opname direct vóór en de andere direct na een aardbeving is gemaakt (figuur 4). De fase-informatie moet behouden zijn. In Nederland is als gevolg van vegetatiegroei, verstuiving, sedimentatie of antropogene activiteiten zoals ploegen de coherentie over het algemeen, afhankelijk van genoemde factor, na enkele uren tot maanden verdwenen. Het interferogram vertoont dan ruis.

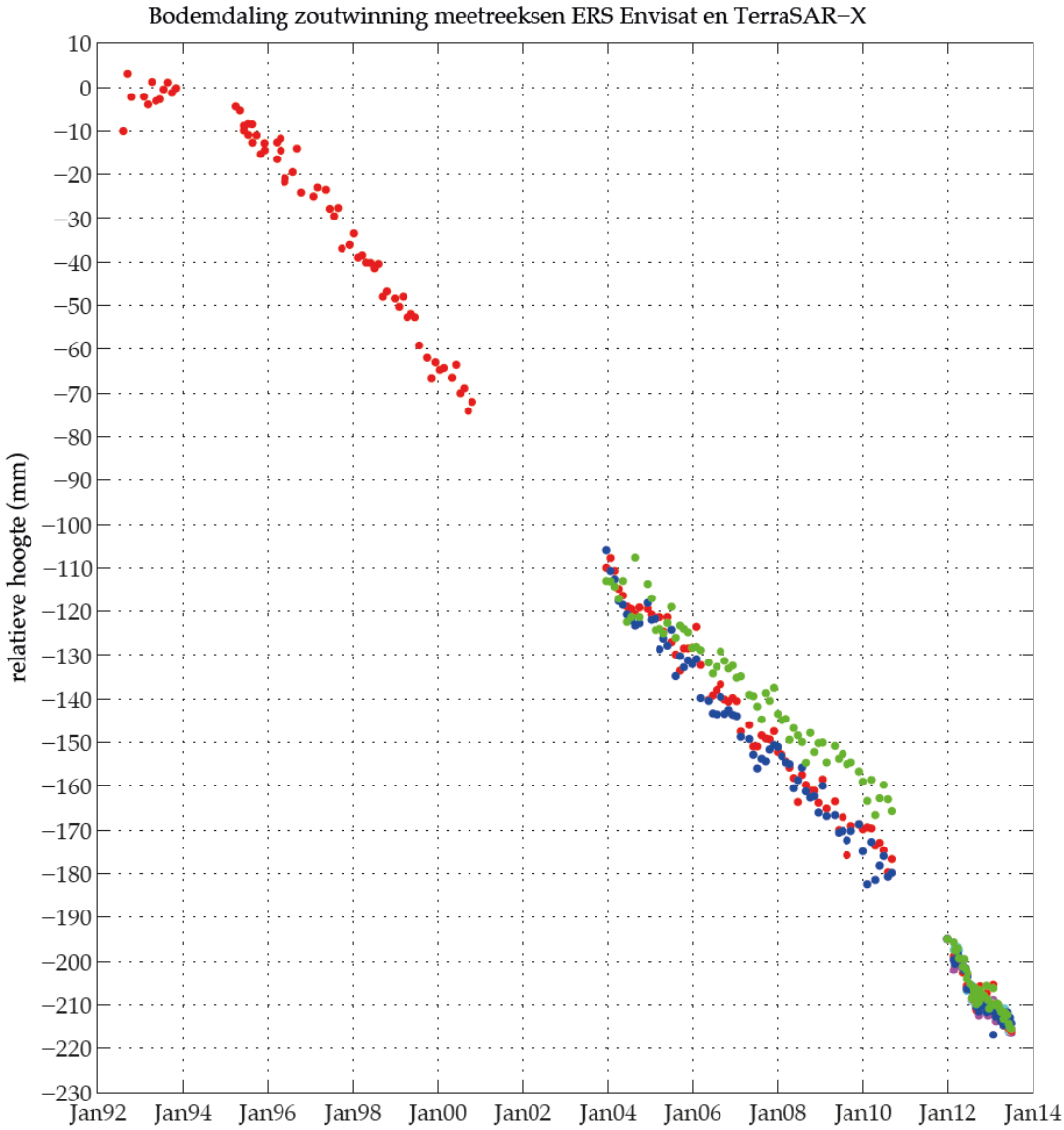
Er zijn echter altijd resolutiecellen die hun coherentie wél behouden over langere tijd. In het algemeen is er dan sprake van harde, nauwelijks begroeide oppervlakken of van een sterke verstrooier die dominant is binnen de resolutiecel, bijvoorbeeld door dubbele reflecties aan gebouwen of andere harde objecten. Ook kunstmatige reflectoren (aluminium hoekreflectoren met zijden van enkele decimeters) zijn coherent.

De kunst is nu deze *langdurig coherente verstrooiers* oftewel *persistent scatterers* in het beeld op te sporen. Het is deze PS-InSAR- of PSI-techniek die bewegingsmeting in Nederland alsnog mogelijk maakt (figuren 5–8). Algoritmes sporen de langdurig coherente punten op in een reeks van minimaal dertig beelden en schatten daarvan bijvoorbeeld de lineaire component van de beweging. Karakteristiek voor de methode is dat geen vlakdekkend resultaat wordt

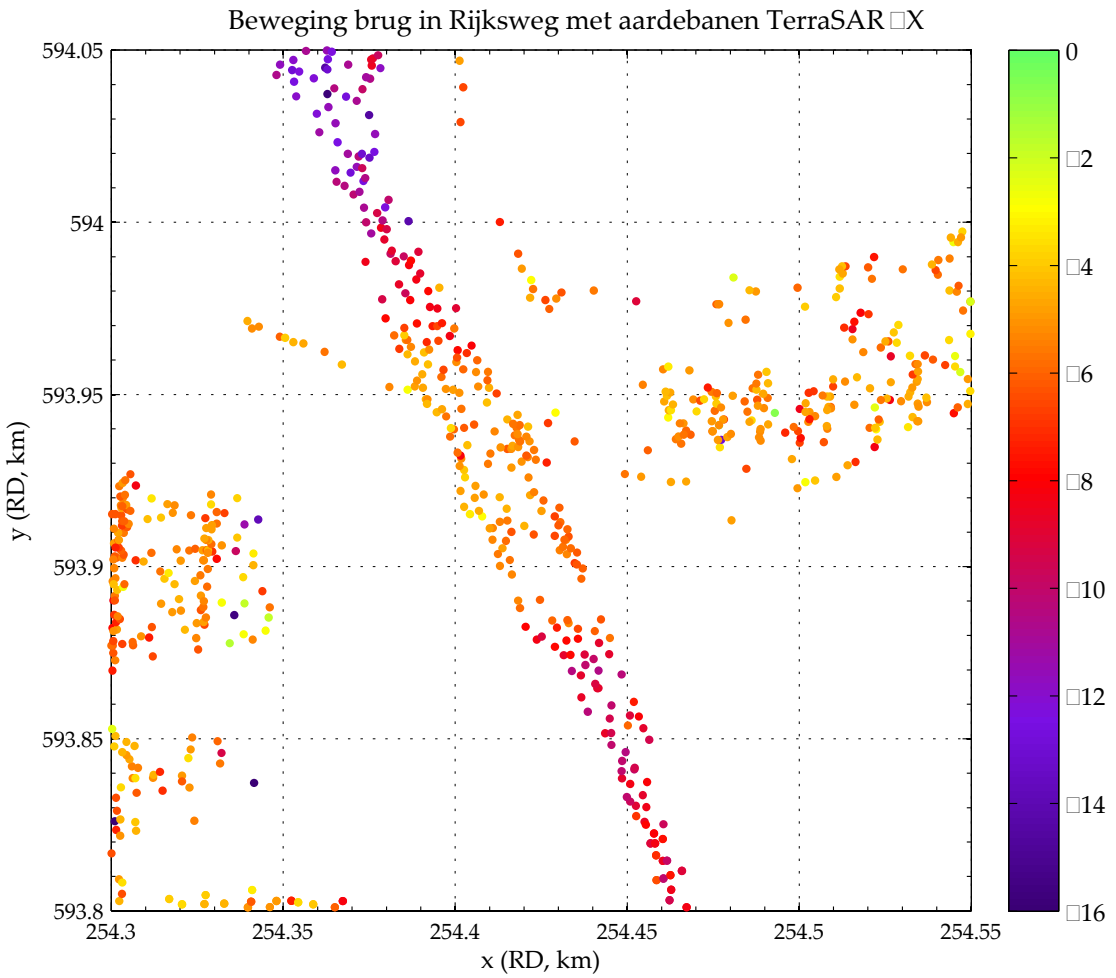
gepresenteerd, maar een grote hoeveelheid puntjes waarvan de beweging kon worden vastgesteld. De puntjes worden vaak kleurgecodeerd aan de hand van de lineaire component van de beweging (figuur 7). Ook typerend is dat tevoren niet is te zeggen waar (dus hoeveel) punten gevonden worden, noch wat de punten die gevonden zijn in het terrein representeren.



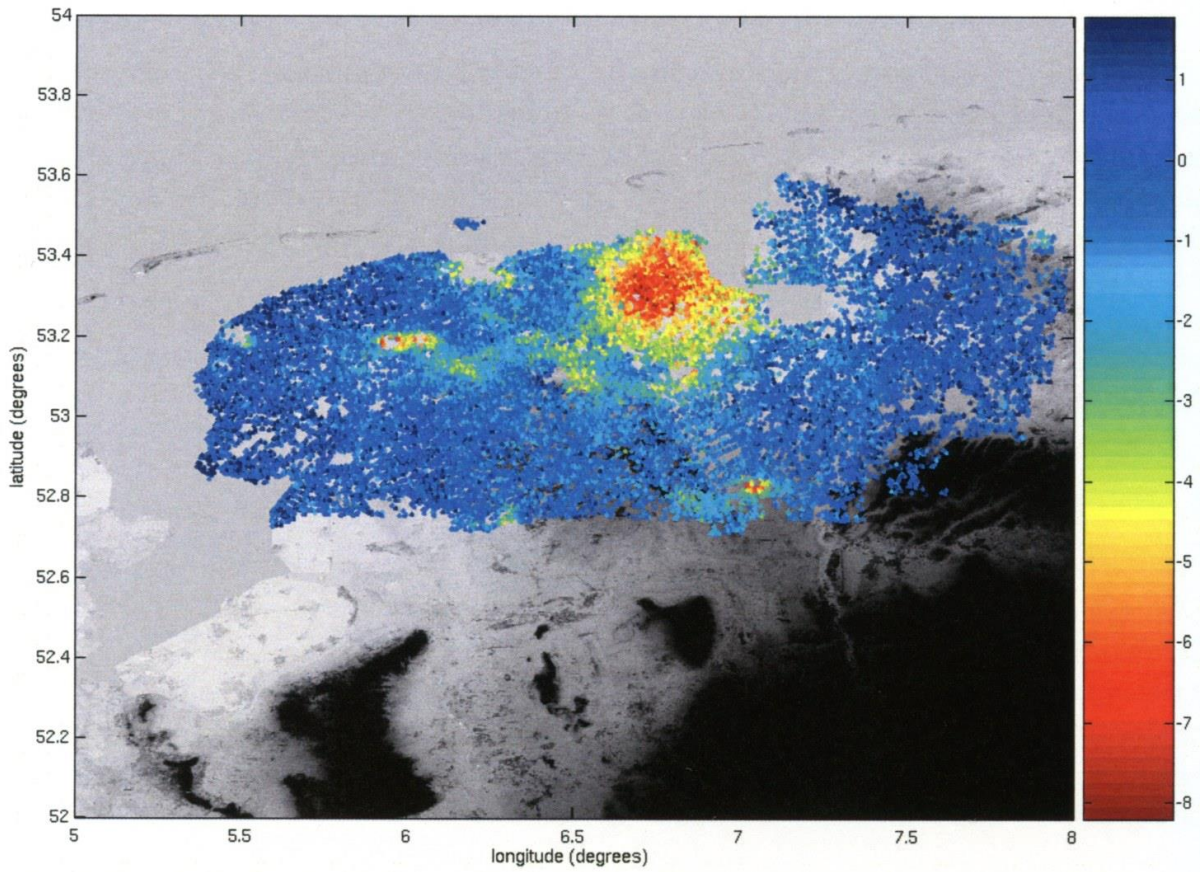
Figuur 5. Voor elk gevonden langdurig coherent punt kan de relatieve hoogte en daarmee bijvoorbeeld de lineaire beweging in millimeter per jaar vastgesteld worden ('defo'). Elk van de vier grafieken gaat over één punt in het terrein; elk puntje daarin is afgeleid uit één satellietbeeld (analyse Swartvast in opdracht van Rijkswaterstaat, data Hansje Brinker: Swart, 2014a).



Figuur 6. De meetreeksen van enkele punten afgeleid uit de ERS- (links), Envisat- (midden) en TerraSAR-X-beeldreeksen (rechtsonder). De reeksen met gelijke kleur hoeven niet hetzelfde punt in het terrein te representeren en zijn slechts globaal in elkaars verlengde gelegd. Per satelliet is de meting echter zeer nauwkeurig. Op deze manier ontstaat een aardig beeld van de bodemdaling over een lange periode. Door het gebruik van ERS kan ook nu nog tot 1992 teruggekeken worden (analyse Swartvast, data Hansje Brinker: Swart, 2014a).



Figuur 7. Het aantal gevonden langdurig coherente verstrooiers in de analyse op basis van TerraSAR-X-beelden kan zeer hoog zijn. Eén vak is 50 bij 50 meter. Van elk punt is de lineaire component van de beweging in millimeter per jaar bepaald. Het betreft een rijksweg (van linksboven naar rechtsonder) over een vaart. De brug vertoont een niet geheel homogene beweging, maar opvallend is vooral dat de aardebanen ten zuiden en vooral ten noorden van de brug zeer snel dalen. De punten links zijn typerend voor bebouwing (analyse Swartvast in opdracht van Rijkswaterstaat, data Hansje Brinker: Swart, 2014a).



Figuur 8. Snelheden in mm per jaar van de in Groningen en Duitsland gevonden langdurig coherente punten, waarbij (in locatie) verschillende beeldreeksen over de periode van 1993 tot en met 2000 aan elkaar gerekend zijn. Gini Ketelaar liet zien dat het toevoegen van kennis over de gaswinning, zoals het tijdsverloop en de grootte van de onttrekking en de druk en de compactiecoëfficiënt, samen met geomechanische modellering de resultaten van de PS-InSAR-analyse nauwkeuriger maakt en daarmee meer valide (uit Ketelaar, 2008).

2.1 Specificiteit en nauwkeurigheid

Bij PS-InSAR worden in een reeks van minimaal 25–30 SAR-beelden punten geselecteerd die langdurig coherent zouden kunnen zijn. Een hoge amplitude is een eenvoudig selectiecriterium. In de analyse die volgt worden allerlei parameters geschat, waaronder de lineaire component van de beweging in millimeter per jaar, een sinusoïdale beweging per jaar, de hoogte en de locatie. De kwaliteit van de schatting wordt onder meer aangegeven met de coherentie (≤1). De analist selecteert punten op basis van een coherentiedrempel van bijvoorbeeld 0,6. Van punten met een coherentie van vrijwel 1 zijn de parameters met hoge precisie bekend. De parameters van punten met een coherentie nauwelijks boven de drempel hebben een lage precisie, maar de kans wordt naarmate de coherentie lager wordt steeds groter dat de berekende parameters onzinnig zijn (de analyse levert altijd getallen op, maar deze getallen kunnen onzinnig zijn, vergelijkbaar met het fitten van een lijn door ruis; een punt kan worden geclassificeerd als langdurig coherent, terwijl de fase slechts toevallig leidt tot een vermeend verband).

Hieronder is cijfermateriaal omtrent de precisie van bewegingsmetingen met PS-InSAR uit verschillende bronnen op een rijtje gezet. Deze gelden onder de

voorwaarde dat er een reeks van minimaal 25 SAR-beelden ter beschikking staat en dat de signaal-ruisverhouding gunstig is. Het gaat hierbij om C-band.

- De standaardafwijking van de berekende beweging per punt per tijdstip is gemiddeld
  4–5 mm, maar deze kan lokaal kan variëren tussen 2 en 9 mm.
- De intrinsieke meetruis in de data, geïnduceerd door instrumentele i.c. thermische en dataverwerkingsruis, is 3,5 mm, leidend tot temporele variabiliteit van de radarmetingen.
- Voor de lineair veronderstelde bewegingssnelheid van een langdurig coherent meetpunt kan, indien de analyse zich uitstrekt over meerdere jaren, een standaardafwijking van 0,1–0,3 mm per jaar worden bereikt. Voor een analyse gebaseerd op een kortere tijdspanne is de precisie wat slechter.
- De standaardafwijking van de bepaling van de *locatie* van de langdurig coherente verstrooier is typisch 3–5 meter.
- De standaardafwijking van de bepaling van de *hoogte* van de langdurig coherente verstrooier is typisch 1–2 meter.

Voor X-band zijn de meeste getallen grosso modo tweemaal zo goed.

2.2 Inzetbaarheid en leverbetrouwbaarheid

Bewegingsmeting met PS-InSAR is nauwelijks afhankelijk van plaatselijke factoren, op de aanwezigheid van langdurig coherente punten na althans: zie daarvoor de paragraaf ‘regionale geschiktheid’.

De belangrijkste praktische beperking voor de toepasbaarheid van PS-InSAR is de aanwezigheid van voldoende SAR-beelden. De analyse moet worden geïnitialiseerd met omstreeks 30 beelden. Dit betekent dat er grosso modo een jaar vóór de methode tot resultaten leidt beelden moeten worden opgenomen. Als de analyse op het moment van opdrachtverlening tot resultaten moet leiden, betekent dit dat moet kunnen worden teruggegrepen op reeds opgenomen beelden. In het geval van hogeresolutiebeelden met X-band zijn er twee complicaties: in de eerste plaats zijn deze beelden in het verleden mogelijk niet opgenomen, zodat er een vertraging van zeg een jaar optreedt vooraleer de analyse tot resultaten leidt. In de tweede plaats blijkt uit onze analyse dat geen enkele X-band-satelliet in staat is om grote delen van Nederland op te nemen (Swart, 2014b). Het hangt van de reeds geprogrammeerde opnamen af of er nog plaats is voor opnamen van het gewenste gebied. TerraSAR-X blijkt boven Nederland bijvoorbeeld reeds tamelijk ‘volgeboekt’ (pers communicatie E. Ludewig). Niettemin biedt de combinatie van verschillende bestaande en nog te lanceren satellieten wel perspectief (pers communicatie R.F. Hanssen).

C-bandbeelden zijn breder beschikbaar. Het Netherlands Space Office biedt voor Nederlandse toepassingen beelden aan via het satellietdataportaal, dat tot maart 2015 loopt (Loos, 2012). Waarschijnlijk wordt dit nog vijf jaar voortgezet, waarbij waarschijnlijk Radarsat-2 C-bandbeelden met relatief hoge resolutie (5x5 meter) worden aangekocht. (pers communicatie J. van Loon). In de loop van 2015 komen de beelden van ESA’s Sentinel-1 beschikbaar. Deze beelden worden gegarandeerd opgenomen, dat wil zeggen zonder te moeten worden geprogrammeerd op basis van een klantvraag. Bovendien zijn de beelden gratis. De resolutie en het aantal

gevonden langdurig coherente punten is aanmerkelijk lager dan op basis van bijvoorbeeld TerraSAR-X.

Een ander aspect van de leverbetrouwbaarheid is dat er wereldwijd slechts een handvol bedrijven op dit vlak actief is en in Nederland slechts één. In het kader van het onderzoek naar en de ontwikkeling van de techniek voert ook de TU Delft op projectbasis analyses uit.

Aan het zelf uitvoeren van de analyse op basis van gekochte beelden en gekochte software hoeft niet te worden gedacht. Dergelijke software wordt door slechts een of twee bedrijven wereldwijd aangeboden en is zeer kostbaar. Daarnaast is het opbouwen van expertise om hiermee te kunnen werken en de analyse te kunnen uitvoeren eveneens kostbaar.

2.3 Uniformiteit

De kracht van analyses op basis van satellietdata is dat een zeer homogeen resultaat ontstaat omdat de beelden zo groot zijn. Overigens zijn TerraSAR-X-beelden relatief klein: 30 bij 50 km. Radarsat-2- en Sentinel-1-beelden zijn 250 km breed. Dus als de beelden beschikbaar of opneembaar zijn (zie paragraaf over leverbetrouwbaarheid) dan is de uniformiteit zeer goed.

2.4 Regionale geschiktheid

De vraag in hoeverre satellietbeelden beschikbaar zijn voor de Waddenzee is besproken in de paragraaf over de leverbetrouwbaarheid.

De belangrijkste beperking van de toepassing van bewegingsmeting met PS-InSAR is de aanwezigheid van langdurig coherente punten. Zoals in de paragraaf over de techniek uiteengezet, is de beweging alleen vast te stellen van punten die over een lange periode hun terugverstrooiingseigenschappen behouden. Deze langdurig coherente punten zijn op het Wad niet te vinden. Sedimentatie, sedimenttransport, verstuiving en natte oppervlakken zorgen voor een volledige decorrelatie van het signaal. Ook begroeide gebieden verliezen in het algemeen hun coherente eigenschappen, omdat de begroeiing verandert en de som over een resolutiecel van het SAR-instrument willekeurig maakt. Slechts hardere oppervlakken en objecten en bebouwing blijken in praktijk langdurig coherent te zijn. Er wordt wel vooruitgang geboekt met de detectie van resolutiecellen waarbinnen zich enkele matig coherente verstrooiers bevinden, maar voor puur vegetatieve gebieden levert ook deze techniek niets op. Niettemin laat recent onderzoek aan de TU Delft zien dat er mogelijk toch een beweging te schatten is van gebieden met lage coherentie door beelden die in tijd en ruimte relatief dicht bij elkaar opgenomen zijn optimaal te combineren, gebruikmakend van SAR-beelden met verschillende golflengte (Morishita en Hanssen, 2013).

Overigens is er bij X-bandbeelden wel sprake van een hogere resolutie en een aanmerkelijk hoger aantal gevonden langdurig coherente punten, maar voor gebieden met een toch al lage coherentie heeft dit geen meerwaarde.

De NAM heeft een aantal specialisten in huis. Deze melden dat op het oostelijke deel van Ameland slechts een stuk of vijf langdurig coherente verstrooiers worden gevonden die goed genoeg van kwaliteit lijken om diepe bodemdaling te kunnen meten (pers communicatie H. Bähr). Vergelijk dit met bebouwde gebieden, waar tegenwoordig meer dan duizend langdurig coherente punten per vierkante kilometer kunnen worden gevonden.

Een mogelijkheid zou zijn om de beschikbare meetpalen uit te rusten met kunstmatige reflectoren. Door op een punt een aluminium hoekreflector met zijden van enkele decimeters te plaatsen (zie figuur 9) en te zorgen dat deze absoluut niet verstoord wordt en niet in zijn vorm wordt aangetast, kan dit punt in de SAR-data als langdurig coherente verstrooier opduiken. Niettemin is het gebruik van dergelijke hoekreflectoren kritisch, omdat ze in het open veld vatbaar zijn voor storm en ook bijvoorbeeld sneeuw, rommel en vogelnesten voor verstoring kunnen zorgen, terwijl ze over meerdere jaren op de millimeter nauwkeurig hun vorm en positie moeten behouden. Dit zal regelmatige inspectie vergen en dat is op de Waddenzee niet efficiënt. De reflectoren moeten worden gericht op de plek waarvandaan de satelliet ze waarneemt, hetgeen ze bijvoorbeeld alleen voor de klimmende en niet voor de dalende baan geschikt maakt.

Een grotere kans op een duurzame opstelling is mogelijk door niet een passieve metalen reflector, maar een actieve transponder te plaatsen (Mahapatra et al., 2014). Deze techniek is nog niet uitgekristalliseerd. Bij een deel van de geometrische infrastructuur in Nederland worden hiermee experimenten uitgevoerd, opdat SAR-metingen direct te vergelijken zijn met GPS-metingen.

Voorts moeten de reflectoren worden gefundeerd. Dit geeft enerzijds de mogelijkheid de werkelijke (diepere) bodembeweging te meten in plaats van de hoogte van het oppervlak, waarin ook het signaal van sedimentatie en sendimenttransport is opgenomen. Anderzijds moet men rekening houden met de zetting en stabiliteit van de gefundeerde meetpaal zelf, met name direct na aanbrengen.

Figuur 9. Een aluminium hoekreflector met een zijde van 93 cm, die zichtbaar is in SAR-satellietbeelden. Wil het punt in een PS-InSAR-beeldreeksanalyse als langdurig coherent punt kunnen worden gebruikt, dan zal de vorm op de millimeter behouden moet blijven. Foto Swartvast.

De afstand tussen langdurig coherente punten mag niet te groot zijn, omdat de oplossing wordt berekend door een netwerk van verschilmetingen. Als de onderlinge afstand te groot is, is het onmogelijk om de fasemeerduidigheid op te lossen en kunnen mogelijk ook langzame variaties als het verloop in beweging en invloeden van fouten in de satellietbaanbepaling niet goed bepaald worden. Daarnaast wordt het lastiger de atmosferische verstoring te berekenen, die als ruis met een Gaussische verdeling over alle punten ligt. Als de oplossing voor de Waddenzee zou inhouden zich alleen te verlaten op kunstmatige punten, dan is de kans aanwezig dat de onderlinge afstand te groot is om een betrouwbare oplossing te berekenen. Niettemin laten Caro Cuenca et al. (2011) zien dat het mogelijk is een bewegingsanalyse van geheel Nederland te maken, waarbij zij er ook in geslaagd zijn de oversteek naar de Waddeneilanden te berekenen. (pers communicatie F. van Leijen).

Aan de randen van de Waddenzee zou bewegingsmeting met InSAR mogelijk een bijdrage kunnen leveren, zeker als er sprake is van een dijk opgebouwd uit ruw materiaal zoals stortsteen of heel grof asfalt.

2.5 Continuïteit

In principe zijn satellietbeelden gedurende meerdere jaren beschikbaar, zij het dat alleen beeldreeksen van dezelfde satelliet met elkaar gecombineerd kunnen worden in één analyse. Zodra beelden van een nieuwe satelliet worden betrokken, of wordt begonnen met het bestellen van beelden bij een bestaande satelliet, moet de analyse opnieuw geïnitialiseerd worden, waarvoor een reeks van omstreeks 30

beelden nodig is. De uitval van een satelliet, het niet beschikbaar zijn van beelden of de omschakeling op een andere satelliet vormen de grootste bedreiging voor de continuïteit.

De ESA erkent dit en diens beleid met betrekking tot de Sentinel-satellieten is dan ook een continue stroom beelden die uitwisselbaar en gezamenlijk verwerkbaar zijn beschikbaar te stellen. Zie, ook over de mate waarin een groot gebied gedekt kan worden, verder de paragraaf over leverbetrouwbaarheid.

2.6 Prijs/kwaliteit

Commerciële satellietbeelden zijn tamelijk kostbaar, zo'n € 1500 per stuk indien individueel aangeschaft (analysebedrijven die honderden beelden kopen, kunnen lagere prijzen bedingen). Een analyse op basis van de hoge resolutie TerraSAR-X-beelden kost € 40–50.000 per jaar aan beelden plus nog enkele tienduizenden euro's voor de analyse daarvan tot een bewegingsproduct. TerraSAR-X-beelden zijn bovendien klein met 30 x 50 km.

Wordt gebruik gemaakt van Radarsat-2- of Sentinel-1-beelden, dan vervallen de kosten van de satellietbeelden. Zoals eerder opgemerkt, hebben deze beelden een aanzienlijk lagere resolutie en worden veel minder langdurig coherente punten gevonden. Voordeel is wel dat in één beeld een gebied van 250 km breed gevat is. Dit heeft ook tot gevolg dat de analyse op een groot gebied ineens kan geschieden, waardoor de kosten van enkele tienduizenden euro's nu voor een groot gebied gelden in plaats van voor een klein gebied van 30 x 50 km.

2.7 Toepassingskader monitoring binnen probleemafbakening

Toepassing van InSAR voor de Waddenzee is buitengewoon moeizaam. Inzicht in bodembeweging ontstaat vooral voor zover gasvelden zich ook onder land uitstrekken. Monitoring met de bekende technieken biedt meer, en deels complementaire, informatie en meer perspectief op verbetering, in het bijzonder de inzet van laseraltimetrie. Niettemin is het verstandig de ontwikkelingen rond InSAR te volgen. De inzet van passieve reflectoren of actieve transponders, samen met de verschijning van nieuwe satellieten, biedt mogelijk kansen om toch de beweging van de diepere ondergrond te meten. Daarbij moet worden aangetekend dat de stabiele en onverstoorde plaatsing van meetpalen met reflectoren of transponders op het Wad operationeel niet eenvoudig is.

3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De monitoring van bodemdaling op de Waddenzee met InSAR is problematisch. Andere technieken, met name GPS en laseraltimetrie, meten weliswaar andere grootheden, maar kunnen wellicht het gezochte bodemdalingssignaal effectiever bepalen.

Niettemin is het verstandig de ontwikkelingen rond InSAR te volgen, ook omdat met deze techniek via gefundeerde objecten de daadwerkelijke beweging van de diepere ondergrond kan worden gemeten, in tegenstelling tot met laseraltimetrie dat de hoogteverandering van het oppervlak inclusief sedimentatie meet. De techniek en de toepassingen van PS-InSAR zijn nog steeds in ontwikkeling. Dit geldt niet alleen voor het meten van gebieden die hun coherentie snel verliezen, maar ook voor de toepassing van kunstmatige reflectoren en transponders. Ook het aanbod van satellietbeelden is in ontwikkeling. Opgemerkt werd dat TerraSAR-X verre van geheel Nederland kan dekken en dat het zelfs de vraag is of een klein gebied, zeg oost-Ameland, opgenomen kan worden wegens conflicten met andere bestellingen. Er komen de komende jaren echter X-band-satellietbeelden bij. Ook de gegarandeerde beschikbaarheid van de SAR-beelden van Sentinel-1 is een nieuwe ontwikkeling die grote kansen met zich meebrengt, onder meer doordat dit onderzoek en ontwikkeling stimuleert, waardoor mogelijk nieuwe technieken ontstaan.

4 DANKWOORD

Met dank aan Freek van Leijen en Ramon Hanssen (Technische Universiteit Delft) en Hermann Bähr (NAM) voor hun waardevolle opmerkingen.

5 REFERENTIES

Auditcommissie 2014. Opzet monitoring zoutwinning Frisia, havenmond Harlingen. Advies 2013 van de auditcommissie, Commissie voor de milieueffectrapportage, Utrecht, Rapport 2852-37, 9 pagina's.

Caro Cuenca, M., R.F. Hanssen, A. Hooper & Arıkan, M., 2011. Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis. In: Proceedings of Fringe 2011 Workshop, Frascati, Italy, 19-23 September 2011.

Cleveringa J., 2013. Monitoringsplan Havenmond. Arcadis Nederland BV, Assen, Rapport C01022.100263.0500.

Hanssen, R.F., 2001. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers.

Ketelaar, V.B.H., 2008. Monitoring surface deformation induced by hydrocarbon production using satellite radar interferometry, Springer, Berlijn.

Loos, M., 2012. Satellietdataportaal – Beschikbare data Radarsat-2, Netherlands Space Office, http://www.spaceoffice.nl/nl/Satellietdataportaal/Beschikbare-data/Radarsat-2 .

Mahapatra, P.S., S. Samiei-Esfahany, H. van der Marel & Hanssen, R.F., 2014. On the use of transponders as coherent radar targets for SAR interferometry. In: IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 52, 1869-1878.

Morishita, Y. & Hanssen, R.F., 2013. Deformation parameter estimation in low-coherence areas using a multi-satellite InSAR approach. In: Proceedings Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR).

NAM 2005. Verslag NAM-workshop. Gaswinning onder de Waddenzee met het principe 'Hand aan de kraan' vanaf de landlocaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. NAM, Assen.

Swart, L.M.Th., 2000. Spectral filtering and oversampling for radar interferometry, Technische Universiteit Delft.

Swart, L.M.Th., 2013. Praktische toepassingen van deformatiemeting met InSAR. Techniek, projecten, ontwikkelingen en aanbieders, Swartvast.

Swart, L.M.Th., 2014a. Bewegingsmeting van Rijkswaterstaat-kunstwerken met InSAR in Noordoost-Groningen. Een vergelijking met conventionele deformatiemeting, Swartvast, nog te verschijnen.

Swart, L.M.Th., 2014b. Dekking van Nederland met SAR-beelden voor bewegingsmetingen, Swartvast.

TRE, 2013. Milaan, http://treuropa.com .