Deltares

Verkenning toepassingsmogelijkheden InSar bij waterkeringen

voor locaties te Zeeland

Bernadette Wichman
Gerard Kruse
Andre van Hoven
Geeralt van den Ham
Freek van Leijen (Hansje Brinker)
Mathijs Schouten (Hansje Brinker)

1202195-002

© Deltares, 2011, B

Deltares

Titel
Verkenning toepassingsmogelijkheden InSar bij waterkeringen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
ZKS Operational risk management (Deltares)	1202195-002	1202195-002-ZKS-0004	30

Trefwoorden
PS InSAR, monitoring, dijken, faalmechanismen, onderhoud

Samenvatting
Onderstaande selectie van locaties is beschouwd:
1 Havengebied Vlissingen, Ellewoudsdijk + Borssele, d.w.z. het gebied nabij waterkeringen direct ten Oosten van Vlissingen (bij Borssele)
2 Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk (d.w.z. bij de Zuidelijke Noordland binnenhavendam bij de Oosterschelde kering)
3 Zierikzee
4 Westkapelle
De gemiddelde verplaatsingssnelheid van reflectoren over de periode 2003 - 2010 in kleine zones (ca. 50 – 100 m2) zijn gebruikt en zijn vergeleken met over gemiddelde reflecties over gebieden van 250 x 50 m (d.w.z. in de lengterichting x dwars op de dijk).
Ten behoeve van de interpretatie zijn de volgende aanvullende gegevens gebruikt:
- Echolodingen (peilingen 2006, 2009 en 2010)
- 3D gegevens van de waterkering met bekledingstypen anno 2010
- Gegevens over uitgevoerde werkzaamheden op betreffende locaties vanaf 1999 tot 2010
- Dino (en Geotop en DGM) gegevens (voor Ellewoudsdijk+Borssele)
- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Google voor terreininformatie

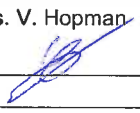
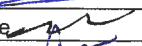
Er zijn voor een aantal locaties (Havengebied Vlissingen, Ellewoudsdijk + Borssele en Westkapelle) duidelijke patronen in de gemeten vervormingssnelheden gevonden. De schaal waarop deze patronen zichtbaar zijn, bepaalt wat de mogelijke oorzaak hiervan kan zijn.
Ook de grootte van de vervormingssnelheden is beschouwd en of de verschillen in vervormingssnelheid significant kunnen zijn.
Er treden gedurende de periode 2003 – 2010 lokaal duidelijke veranderingen in vervormingssnelheden op.

Uit de analyse van de vervormingssnelheden is voor geen enkele van de 4 beschouwde locaties het optreden van een geotechnisch faalmechanisme aangetoond. Dit geeft vertrouwen in de stabiliteit van de betreffende waterkeringen, met name voor die waterkeringen met voldoende dekking van meetpunten (Persistant Scatterers).

Kortom:
Door PS-InSAR gegevens te gebruiken is het mogelijk een inschatting te geven van locaties waar mogelijk iets aan de hand is (Early warning), maar kunnen ook potentiële probleem locaties worden aangemerkt als stabiel (Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk t.a.v. zettingsvloeiing en Westkapelle t.a.v. zware golfaanval + steil onderwatertalud bijvoorbeeld). Als er locaties met problemen of afwijkingen aan dijktaluds bekend zijn, kan met InSAR de ruimtelijke extensie van deze afwijkingen in kaart worden gebracht, alvorens andere technieken hiervoor in te zetten. Er moeten dan wel voldoende puntmetingen aanwezig zijn.
Uit de InSAR gegevens, op de wijze zoals tot nu toe geanalyseerd, zijn duidelijke patronen en trends te halen. De oorzaak van deze trends is nog niet altijd eenduidig, zie par. 4.2. Dit kan wel verder worden uitgewerkt, zie de in dit rapport opgenomen aanbevelingen.

Titel
Verkenning toepassingsmogelijkheden InSar bij waterkeringen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
ZKS Operational risk management (Deltares)	1202195-002	1202195-002-ZKS-0004	30

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Maart 2011	Dr. B.G.H.M. Wichman		Drs. V. Hopman		Ing. A.T. Aantjes	
		Drs. G.A.M. Kruse					
		Ir. A. van Hoven					
		Dr. G.A. van den Ham					
		Ir. F. van Leijen (Hansje Brinker)					
		Dr ir. M.W. Schouten (Hansje Brinker)					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Aanleiding voor deze verkenning 1
1.2 Doelstelling project 1
1.3 Betrokkenen 1

2 Aanpak project **3**
2.1 Globale opzet 3
2.2 Keuze locaties 3
2.3 InSAR analyse gegevens (Freek van Leijen) 4
2.3.1 Beschrijving van type analyses 4
2.3.2 Implicaties voor bruikbaarheid (betrouwbaarheid, resolutie e.d.) 4
2.3.3 Beschouwing over bruikbare reflecties per type bekleding 5
2.4 Additionele gegevens 5
2.5 Werkwijze per locatie 6
2.5.1 Gebied nabij waterkeringen direct ten Oosten van Vlissingen (Havengebied, Ellewoudsdijk + Borssele) 6
2.5.2 Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk 8
2.5.3 Dijken en kanaal bij Zierikzee 11
2.5.4 Zeewering bij Westkapelle 12

3 Bevindingen **14**
3.1.1 Gebied nabij waterkeringen direct ten Oosten van Vlissingen (Havengebied, Ellewoudsdijk + Borssele) 14
3.1.2 Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk 19
3.1.3 Dijken en kanaal bij Zierikzee 21
3.1.4 Zeewering bij Westkapelle 25

4 Algemene conclusies en aanbevelingen **29**
4.1 Bruikbaarheid PS-InSAR analyse gegevens 29
4.2 Mogelijke oorzaken voor de gevonden patronen 30
4.3 Aanbevelingen 30
4.3.1 M.b.t. InSAR analyse 30
4.3.2 M.b.t. gegevens, zoals gekregen van beheerder 31
4.3.3 M.b.t. inbreng van beheerder 31
4.4 Actieplan (stappenplan) voor toekomstig gebruik van PS-InSAR gegevens 31

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor deze verkenning

In 2010 hebben het Waterschap Scheldestromen en het projectbureau Zeeweringen belangstelling getoond voor de monitoring van deformaties m.b.v. PS-InSAR satellietwaarnemingen. Scheldestromen geeft aan dat er behoefte is aan gegevens over de hoogte en het deformatiegedrag van de bekledingen op de dijken in haar beheersgebied. InSAR heeft als voordeel dat het terug kan kijken in de tijd.
De dijkbeheerder wil nagaan m.b.v. PS-InSAR of er deformaties in de omgeving van steile onderwatertaluds (1:4 of steiler) zichtbaar zijn, en op plaatsen waar in het verleden zettingsvloeiingen zijn opgetreden. Tevens wil men indirect informatie krijgen over het type ondergrond, met name over plotselinge en zeer lokale overgangen in deze opbouw. De onderwatertaluds kan men goed in kaart brengen met echolodingen, en men wil dit voor de dijklichamen ook op een kosteneffectieve wijze doen. Deltares heeft binnen het strategisch onderzoek ruimte gemaakt, om samen met Hansje Brinker de interpretatie van deze InSAR gegevens te onderzoeken en waar zinvol aanbevelingen te doen ter verbetering van de data analyse. Om een systematische permanente InSAR monitoring te onderhouden voor de beheerder, en van de grond te krijgen, lijkt het toeleveren van reeds geïnterpreteerde PS-InSAR informatie voor de beheerders wenselijk. Dit rapport is een verkenning naar de wijze waarop PS-InSAR gegevens kunnen worden geïnterpreteerd.

1.2 Doelstelling project

De doelstelling van het project is het maken van een eerste stap in het verkennen van het gebruik van InSAR data voor:
1. Signaalfunctie leidend tot een selectie van nader te onderzoeken dijkstrekkingen (geografische selectie)
2. Duiding van vermoedens van experts voor specifieke locaties waar meer informatie gewenst is (kwantitatieve of kwalitatieve inverse modellering)
3. Signalering van plotselinge veranderingen van trends (mechanisme indicatoren) of events (kruiend ijs etc.) voor locaties waar monitoring gewenst is.

1.3 Betrokkenen

Johan van Cranenburgh (Waterschap Scheldestromen)
Yvo Provoost (projectbureau zeeweringen RWS)

Pieter Bas Leezenberg, Freek van Leijen en Mathijs Schouten (Hansje Brinker)

Bernadette Wichman, Jos Maccabiani, Geeralt van den Ham, Gerard Kruse, Andre van Hoven, Victor Hopman, Chris Sprengers (Deltares)

2 Aanpak project

2.1 Globale opzet

Het project bestaat uit de volgende stappen:

1 Selectie kansrijke locaties, met toepassingsmogelijkheid, bij voorkeur in Zeeland.
2 Samenstellen dataset van geselecteerde gebieden
3 Analyse door Deltares van InSAR dataset in combinatie met nadere informatie Zeeland
4 Herhaalde analyse van veelbelovende locaties, aansluitend bij interpretatie
5 Overleg tussen Deltares en Hansje Brinker over de resultaten
6 Opstellen van een rapportage met bevindingen door Deltares, met inbreng van Hansje Brinker (dit rapport)
7 Overleg resultaten met potentiële klant te Zeeland
8 Gezamenlijke Publicatie en persbericht

Potentiële toepassingen voor een (semi-) permanente spaceborne InSAR monitoring met het gebruikelijke tijdsinterval (enige weken voor de gebruikte satellieten) zijn:

1. Indiceren van significante veranderingen van de kering. Een belangrijk deel ervan zal triviaal zijn, echter omstandigheden als een zettingsvloeiing of verandering van (grond) waterhuishouding in de directe omgeving van de kering zal effect hebben op de geometrie van de kering en zal niet altijd op andere (eenvoudige) wijze herkenbaar zijn.
2. Indicaties over de mate van verandering, aantasting van harde taludbekleding
   - over langere tijdsperioden
   - indicatie van ernstige verstoring van taludbekleding na een stormseizoen of een individuele heftige storm.
3. Leveren van aanvullende informatie over de opbouw, eigenschappen en condities in de ondergrond. Zettingsverschillen kunnen in een aantal gevallen duiden op bijvoorbeeld verschillen in kruipsnelheid, inklinking, geleidelijke uitspoeling e.d.

Voor een aantal locaties zullen deze mogelijke toepassingen worden verkend.

2.2 Keuze locaties

Samen met Scheldestromen zijn de volgende locaties rond de diverse waterkeringen geselecteerd voor nadere analyse, met korte opgaaf van reden selectie:

- Havengebied Vlissingen (Vissingen zelf is niet beschouwd): interessante patronen in zettingssnelheid, mogelijk gerelateerd aan werkzaamheden
- Ellewoudsdijk + Borssele: interessante patronen in zettingssnelheid, mogelijke gerelateerd aan opbouw dijk en ondergrond
- Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk
- Zierikzee: Nagaan of er effecten van werkzaamheden, of verschillen in opbouw ondergrond te zien zijn
- Westkapelle: hoge golfaanval, effect werkzaamheden nagaan

De Hoek van Ossenisse is ter sprake geweest, maar is niet beschouwd, omdat deze niet in hetzelfde SAR-beeld zit.

2.3 InSAR analyse gegevens (Freek van Leijen)

2.3.1 Beschrijving van type analyses

Voor de geselecteerde locaties is een Persistent Scatterer Interfemetrie (PSI) analyse uitgevoerd. Hiervoor zijn 62 radarbeelden gebruikt, opgenomen door de Envisat satelliet. De beelden beslaan de periode van december 2003 tot oktober 2009. De PSI analyse resulteert in een set punten, die over de gehele periode consistente reflecties van het oppervlak tonen. Voor deze punten kan de beweging (of *deformatie*) in de loop der tijd worden gereconstrueerd. Vanuit de tijdreeksen van beweging kan vervolgens een trendlijn worden bepaald, die de deformatiesnelheid in mm/jaar weergeeft. Bijproducten van de analyse zijn de geschatte hoogte van het punt, de locatie (RD en WGS84) en een kwaliteitsindicatie.

PSI resultaten zijn relatief ten opzichte van een referentiepunt en moeten dan ook als zodanig worden geïnterpreteerd. De analyse van de verschillende geselecteerde locaties is op een consistente manier uitgevoerd, met als gevolg dat alle resultaten ten opzichte van hetzelfde referentiepunt zijn gegeven. De keuze van het referentiepunt is gedaan aan de hand van de consistentie van de reflectie-eigenschappen van het punt. Dit zegt echter niets over de beweging van het referentiepunt zelf. Interpretatie in relatieve zin blijft daarom belangrijk.

Vanwege onnauwkeurigheden in de baan van de satelliet, blijft er een onbekende ruimtelijke trend over in de PSI resultaten. Deze globale trend is gecorrigeerd door het schatten van een ruimtelijk vlak. Vergelijkingen van PS resultaten over grote afstanden wordt daarom ontraden of moet met zorg worden uitgevoerd.

PSI resultaten moeten worden geïnterpreteerd als puntmetingen. Radarbeelden worden weliswaar weergegeven in een raster van pixels, maar de waarden van de afzonderlijke pixels representeren de optelsom van reflecties binnen het grondoppervlak van het pixel. In het geval van PSI zal dit overwegend één overheersende sterke reflector zijn. De pixelgrootte van de radarbeelden is daarom vooral een maat voor de maximale ruimtelijke bemonstering van detecteerde Persistent Scatterers (PS). In het geval van de gebruikte Envisat data is dit (na interpolatie met een factor 2) 2 meter (Noord-Zuid) bij 10 meter (Oost-West).

2.3.2 Implicaties voor bruikbaarheid (betrouwbaarheid, resolutie e.d.)

PSI resultaten moeten worden geïnterpreteerd als puntmetingen, d.w.z. in termen van overwegend één overheersende sterke reflector per pixel. Wat er precies reflecteert, kan meestal pas worden vastgesteld na veldinspectie.
Interpretatie van de grootte van de deformaties in relatieve zin blijft belangrijk.
Vergelijkingen van PS resultaten over grote afstanden wordt ontraden of moet met zorg worden uitgevoerd.

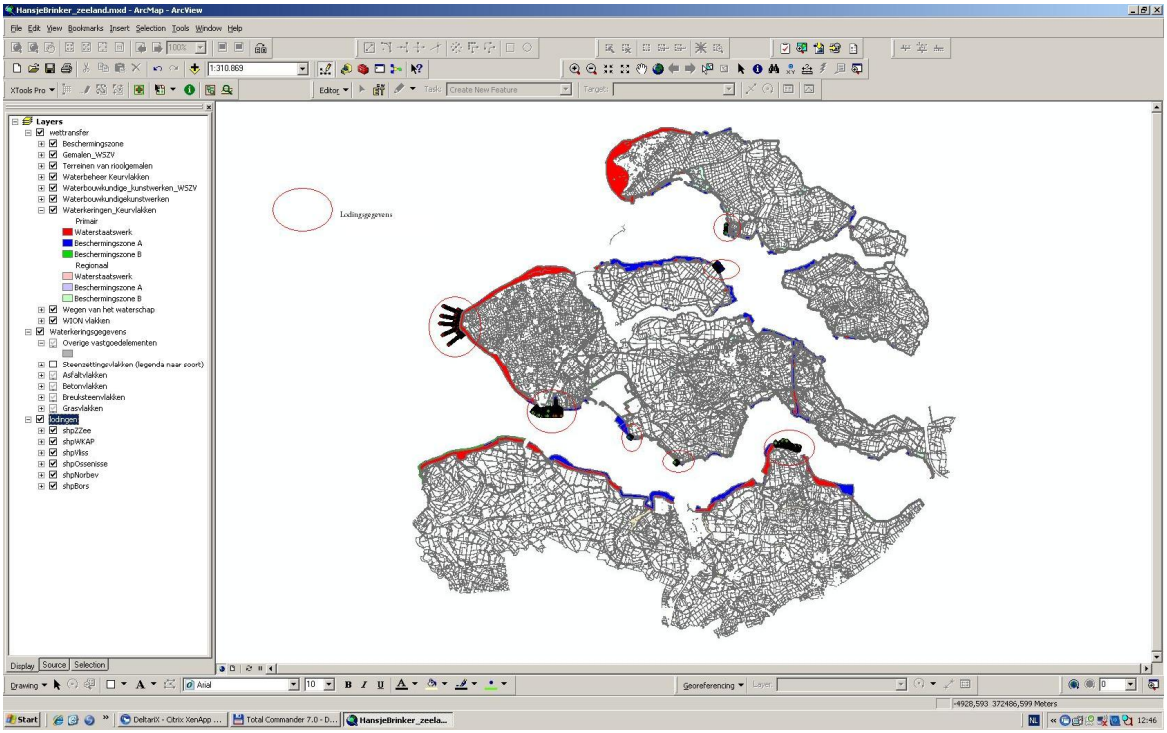
2.3.3 Beschouwing over bruikbare reflecties per type bekleding

Persistent scatterers moeten dus worden geïnterpreteerd als puntreflecties. In het geval van waterkeringen blijken vooral steenbestorting, steenbekleding en eventuele andere harde objecten goede bronnen te zijn van consistente sterke reflecties. Bepalende factor hierbij is de oriëntering van de betreffende objecten ten opzicht van de kijkrichting van de satelliet. Het object moet er namelijk voor zorgen dat het radar signaal teruggekaatst wordt naar de satelliet. Gladde oppervlakken, zoals een asfaltbekleding zijn daarom geen goede bronnen van reflectie. Combinatie van asfalt met stenen kan juist wel weer goed werken. Sterk veranderende oppervlakken, zoals gras en ook water, zorgen voor een te sterk veranderend signaal, waardoor het reconstrueren van de bewegingshistorie niet mogelijk is. Het aantal consistente reflecties is dus sterk afhankelijk van de bekleding van de waterkering.

2.4 Additionele gegevens

Ten behoeve van de interpretatie van de InSAR gegevens heeft de beheerder de volgende gegevens ter beschikking gesteld:

- Echolodingen: shp files (peilingen 2006, 2009 en 2010) voor de vlakken ter hoogte van onderstaande interessegebieden, zie figuur 2.1:
  1. Zierikzee (zzee**.shp),
  2. Ellewoutsdijk/Borssele (total**.shp + ellwdijk**.shp),
  3. Westkapelle (wkap**.shp),
  4. Hoek van Ossenisse (osse**.shp),
  5. Noord-Beveland (nrdbev**.shp),
  6. Vlissingen Boulevard (vlis**.shp).



Figuur 2.1 Locaties van geleverde echolodingen te Zeeland

- 3D gegevens van de waterkering met bekledingstypen anno 2010 (shapefile met glooiingstypen + layerfile). Daarnaast zijn foto's toegevoegd met voorbeelden van de bekledingstypen.
- Gegevens over uitgevoerde werkzaamheden op betreffende locaties vanaf 1999 tot 2010.

Deltares heeft het rapport “Zettingsvloeiing bij ontgrondingskuil Oosterscheldekering” (Deltares 2008) m.b.t. de zettingsvloeiing bij de Oosterschelde kering (Noord Beverland) geraadpleegd.

Referentie:
Deltares 2008: Zettingsvloeiing bij ontgrondingskuil Oosterscheldekering, ir. M.B. de Groot, rapportnummer 427540-0029 v02.

2.5 Werkwijze per locatie

2.5.1 Gebied nabij waterkeringen direct ten Oosten van Vlissingen (Havengebied, Ellewoudsdijk + Borssele)

De gemiddelde verplaatsingssnelheid van reflectoren over de periode 2003 – oktober 2009 in kleine zones (ca. 50 – 100 m2) zijn gebruikt en vergeleken met gemiddelde reflecties over gebieden van 250 x 50 m (in de strekking van de dijk). De deformatiesnelheden zijn weergegeven met kleuren voor de punten voor de betreffende zones. Tevens is een grafiek van de verplaatsingsnelheid voor individuele reflectoren gebruikt, die is op te roepen voor inspectie van individuele punten.

De analyse betreft de gegevens van het gebied direct ten oosten van Vlissingen en, met name, de waterkeringen (Figuur 2.2 en Figuur 2.3).
Naast de InSAR gegevens zijn Dino (en Geotop en DGM) gegevens gebruikt voor de ondergrond, het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) van de AHN site, en Google voor terreininformatie. Aanvullende gegevens over de bekledingstypen en bathymetrie (de echolodingen) zijn niet in detail meegenomen aangezien het om een eerste inschatting van de bruikbaarheid van de InSAR gegevens gaat.

Figuur 2.2 Overzicht van het beschouwde gebied ten oosten van Vlissingen. De groen tot rood gekleurde punten betreffen de verplaatsingsnelheid (ca. 1 – - 8 mm/a) voor 250x50 m2 pixels.

Figuur 2.3 Overzicht van de gedetailleerd weergegeven waarnemingen in het beschouwde gebied ten oosten van Vlissingen (pixels van 50-100 m2).

De InSAR gegevens zijn op de volgende aspecten onderzocht:

- correlatie van deformaties van de dijk met zetting achter de dijk t.g.v. ingrepen (aanpassing bebouwing, mogelijke vochtonttrekking)
- werkzaamheden in relatie tot deformatiegedrag: zetting is groter na recente ophoging bijv.
- correlatie met globale bodemopbouw: veen zet meer dan zand bijvoorbeeld (ook zogenaamd seculier effect)
- plotselinge veranderingen in trendlijn van deformaties over periode 2003-2009: nagaan of dit voor nabijgelegen punten net zo is
- ruimtelijke correlaties: schaalgrootte versus mogelijke oorzaken
- reden van afwezigheid van reflecties inschatten

2.5.2 Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk

Dit is om precies te zijn de Zuidelijke Noordland binnenhavendam bij de Oosterschelde kering (dammetje rechts in vierkant van figuur 2.4).
Langs de rand van de bodembescherming van de Oosterscheldekering, die zich op ca. 800 m uit de as van de kering bevindt, zijn sinds 1987 door erosie *zeer geleidelijk* ontgrondingskuilen ontstaan, waarvan de twee grootste zich in de Roompot bevinden. Regelmatig peilt de Meetdienst van de Directie Zeeland van de Rijkswaterstaat de bodemligging nauwkeurig om de ontwikkeling in de gaten te houden. Aan de zijde van de Oosterscheldekering en Noord-Bevelandse zijde worden de hellingen van de kuilen, indien die te steil worden, bestort, zodat geen zettingsvloeiing kan ontstaan. Aan de noordoostelijke

zijde van de rechthoek, d.w.z. rechtsonder in figuur 2.4, wordt niet bestort. Aan die zijde heeft twee keer een zettingsvloeiing plaatsgevonden, in de verschilkaart tussen twee peilingen duidelijk herkenbaar aan de schelpvorm:

1. tussen oktober 2003 en maart 2004, zie Figuur 2.4
2. tussen maart 2004 en april 2005, zie Figuur 2.5

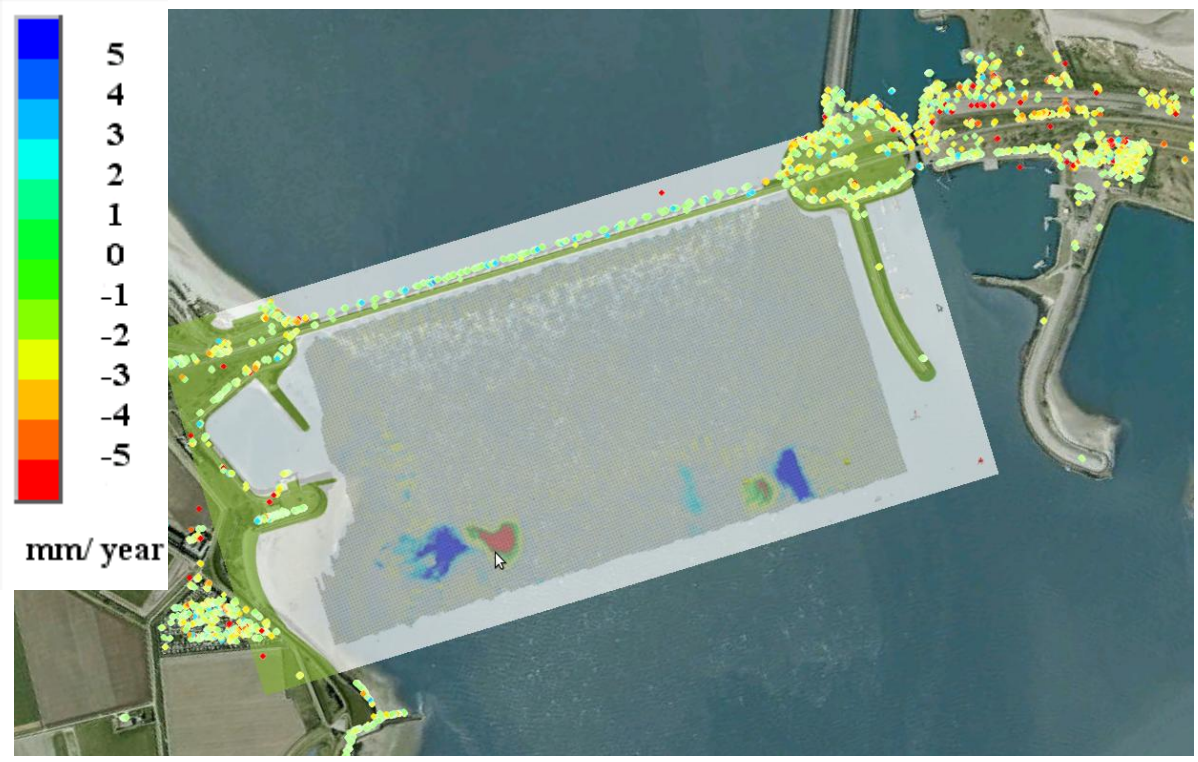
Uit de eerste figuur blijkt ook dat:

3. tussen oktober 2003 en maart 2004 ook aan Noord-Bevelandse zijde een zettingsvloeiing heeft plaatsgevonden, ondanks dat er aan die zijde bestort zou moeten zijn.

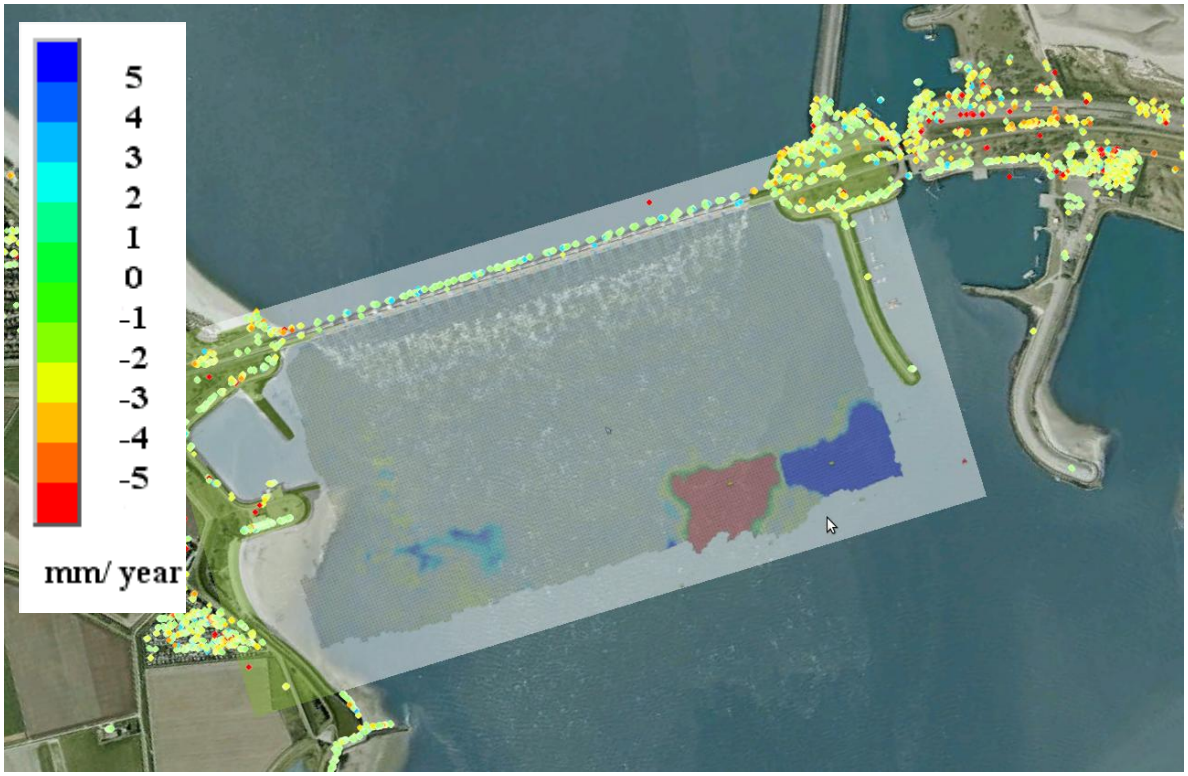
In het kader van het Stuurboord project (Deltares rapport 427540-0029 – Zettingsvloeiing bij ontgrondingskuil Oosterscheldekering) is met name de tweede zettingsvloeiing uitvoerig onderzocht en nagerekend.

De toepasbaarheid van InSar met betrekking tot bovenstaande problematiek zou m.b.t. de volgende aspecten zinvol kunnen zijn:

1. detectie van erosiekuilen (geleidelijke verandering)
2. detectie van zettingsvloeiingen (snelle verandering)



Figuur 2.4 Zettingsvloeiingen aan zowel zuid- als noordzijde, tussen oktober 2003 en maart 2004, Noord Beverlandse zijde van de Oosterscheldekering.



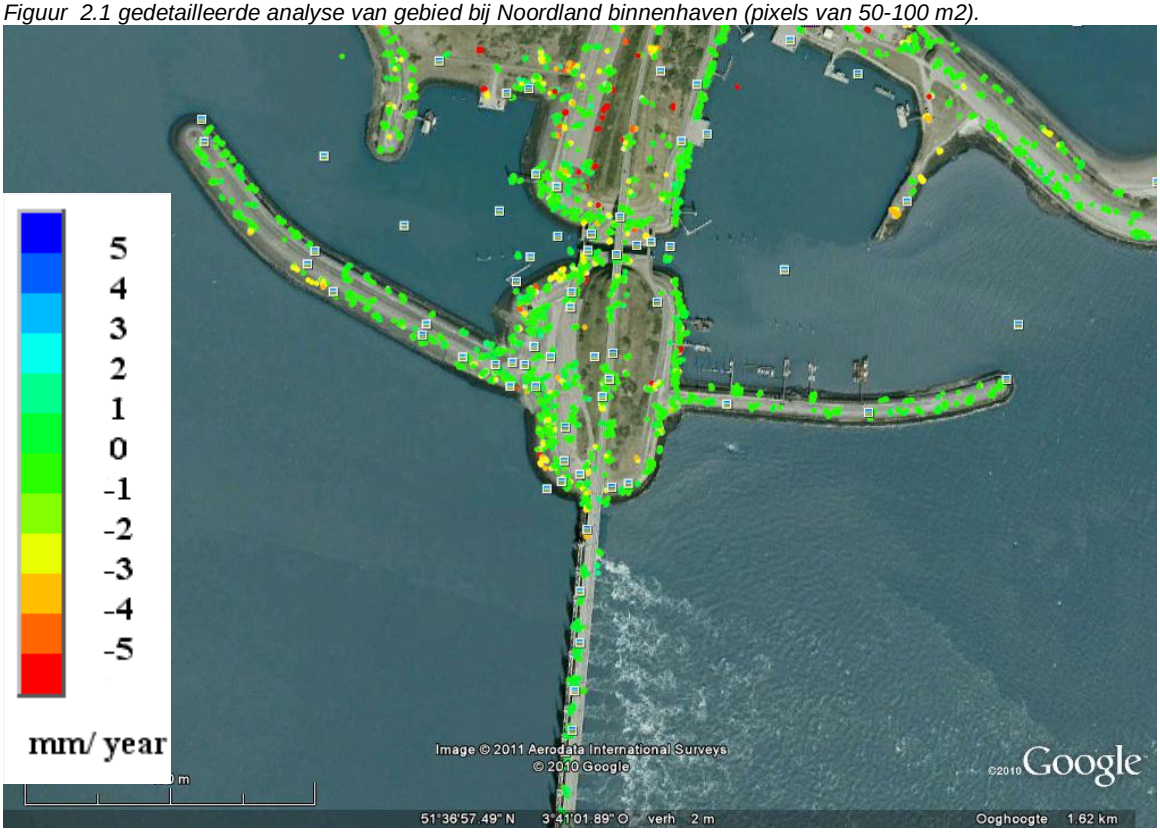
Figuur 2.5 Grote zettingsvloeiing aan noordzijde tussen maart 2004 en april 2005, Noord Beverlandse zijde van de Oosterscheldekering.

Als eerste is een globale analyse van de InSAR gegevens uitgevoerd, zie figuur 2.4. Op verzoek van Deltares heeft Hansje Brinker daarna locaal meer bruikbare reflecties kunnen verkrijgen, zodat de binnenhavendam in voldoende mate gedekt is, zie figuur 2.6. D.w.z. dat er voldoende zekerheid is over het deformatiegedrag in die zones waar mogelijke effecten van zettingsvloeiing mogen worden verwacht. De gemiddelde verplaatsingssnelheid van reflectoren over de periode 2003 – oktober 2009 in kleine zones (ca. 50 – 100 m2) zijn hierbij gebruikt.

Vervolgens is de aard van de opgetreden zettingsvloeiing (uit het Deltares 2008 rapport) beschouwd, met name de dimensies van de vloeiing, afstand tot de dam, verandering in taludhellingen en de tijdsduur van de zettingsvloeiing.

Er is ingeschat welke deformaties van de dam (qua grootte en tijdsduur) zouden kunnen duiden op een effect van de zettingsvloeiing. Hierbij zijn meerdere reflecties met elkaar vergeleken.

Figuur 2.1 gedetailleerde analyse van gebied bij Noordland binnenhaven (pixels van 50-100 m2).



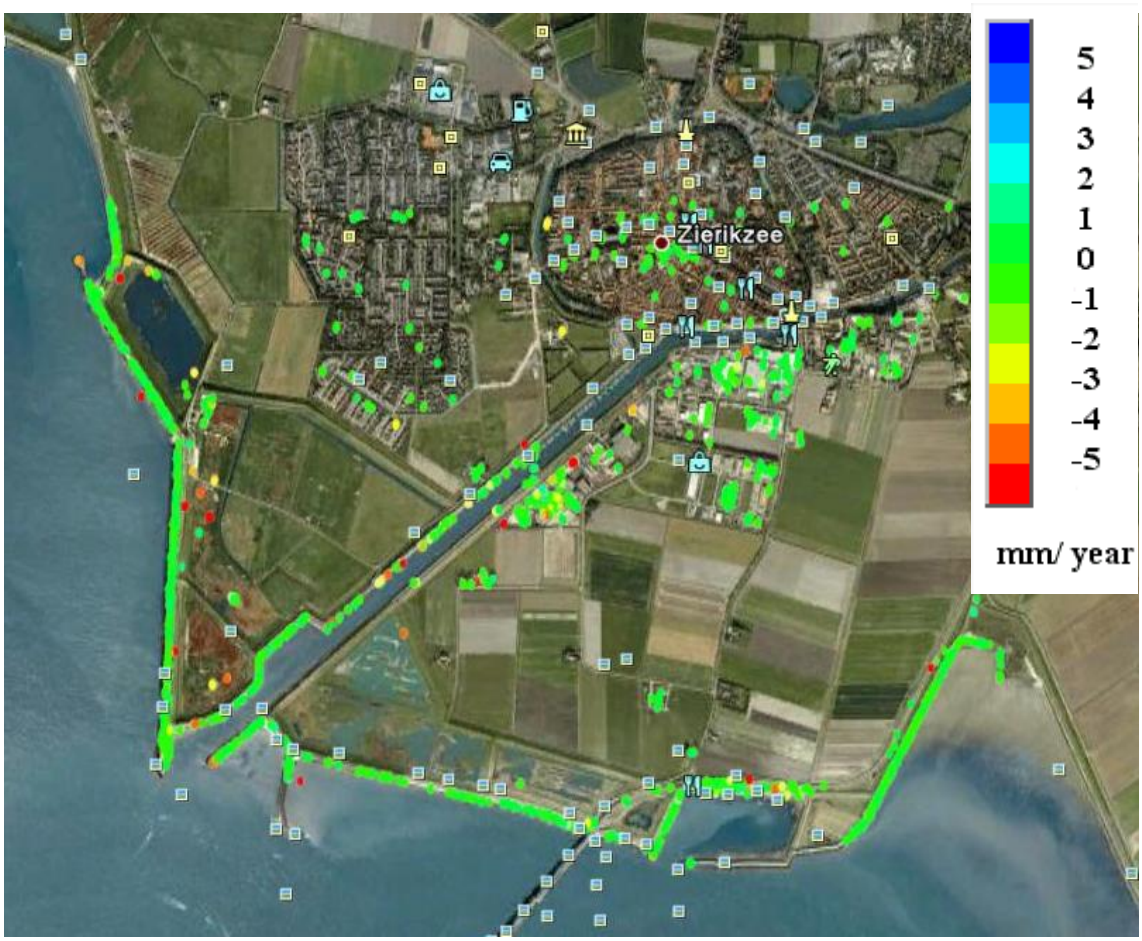
2.5.3 Dijken en kanaal bij Zierikzee

Een overzicht van de door Hansje Brinker gemeten vervormingen nabij Zierikzee staan in Figuur 2.7. De analyse betreft de periode vanaf 2003 tot 2010. Per meetpunt, is een trendlijn getrokken door de metingen gedurende de hele periode. In kleur is aangegeven wat de stijging van de trendlijn is. De gemiddelde verplaatsingssnelheid van reflectoren over de periode 2003 – oktober 2009 in kleine zones (ca. 50 – 100 m2) zijn hierbij gebruikt.

Naast de vervormingsmetingen van Hansje Brinker is gekeken naar lodingen die inzicht geven in het verloop van de bodem, naar het hoogtebestand Nederland voor het lokaliseren van geologische bijzonderheden, naar bekleding types en naar werkzaamheden die in de afgelopen periode (1999 tot 2010) zijn uitgevoerd.

De InSAR gegevens zijn op de volgende aspecten onderzocht:

- Het effect van geologische patronen in de ondergrond, bijvoorbeeld opgevulde stroomgeulen of plaatafzettingen, op de deformatiesnelheden.
- Lokale afwijkingen in het overall deformatie patroon
- Orde grootte deformaties t.o.v. de lokale bodemdaling
- Extra aandacht voor grootte deformaties bij steilere onderwatertaluds (uit de lodingen). Check op ontwikkeling bodemligging.
- Afwezigheid van reflecties: waarom?

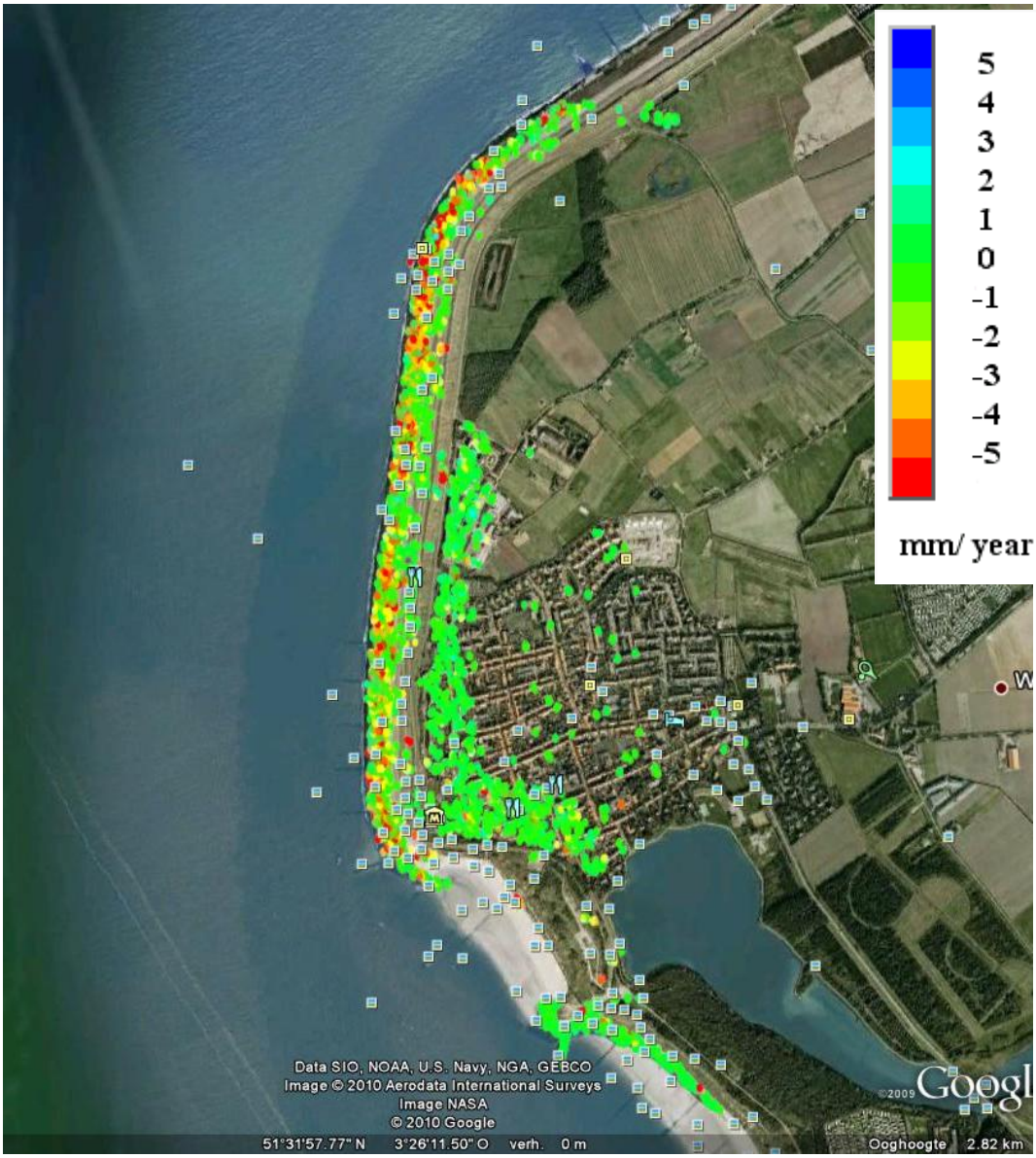


Figuur 2.2 Overzicht van de gedetailleerd weergegeven waarnemingen in het beschouwde gebied bij Zierikzee (pixels van 50-100 m2).

2.5.4 Zeewering bij Westkapelle

Een overzicht van de door Hansje Brinker gemeten vervormingen nabij Westkapelle staan in Figuur 2.8. De analyse betreft de periode vanaf 2003 tot oktober 2009. Per meetpunt, is een trendlijn getrokken door de metingen gedurende de hele periode. In kleur is aangegeven wat de stijging van de trendlijn is. De gemiddelde verplaatsingssnelheid van reflectoren over de periode 2003 - 2010 in kleine zones (ca. 50 – 100 m2) zijn hierbij gebruikt.

Naast de vervormingsmetingen van Hansje Brinker is gekeken naar lodingen die inzicht geven in het verloop van de bodem, naar het hoogtebestand Nederland voor het lokaliseren van geologische bijzonderheden, naar bekleding types en naar werkzaamheden die in de afgelopen periode (1999 tot 2010) zijn uitgevoerd.



Figuur 2.3 Overzicht van de gedetailleerd weergegeven waarnemingen in het beschouwde gebied bij Westkapelle (pixels van 50-100 m2).

De InSAR gegevens zijn op de volgende aspecten onderzocht:

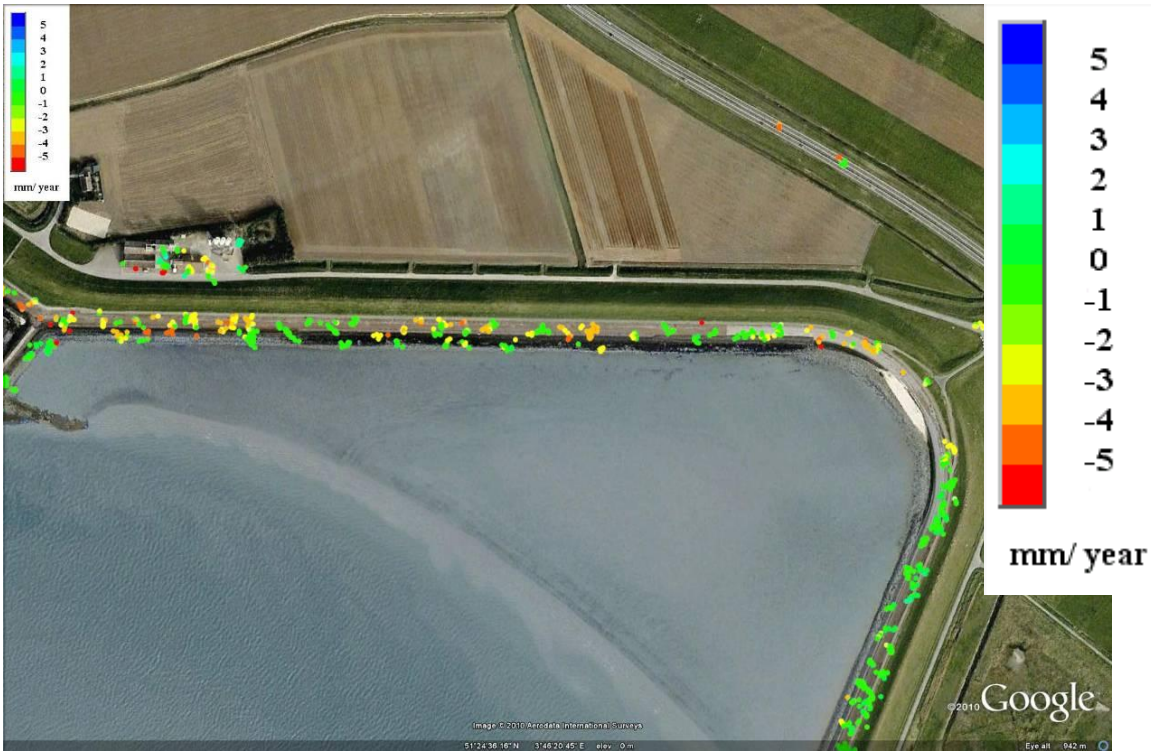
- Het effect van geologische patronen in de ondergrond, bijvoorbeeld opgevulde stroomgeulen of plaatafzettingen, op de deformatiesnelheden
- Ruimtelijke verdeling van deformatiesnelheden: bijv. waarom meer of minder uniform?
- Lokale afwijkingen in het overall deformatie patroon
- Orde grootte deformaties t.o.v. de lokale bodemdaling
- Extra aandacht voor grootte deformaties bij steilere onderwatertaluds (uit de lodingen). Check op ontwikkeling bodemligging.
- Afwezigheid van reflecties: waarom?

3 Bevindingen

3.1.1 Gebied nabij waterkeringen direct ten Oosten van Vlissingen (Havengebied, Ellewoudsdijk + Borssele)

De voor 250 x 50 m gebieden weergegeven verplaatsingsnelheden vertonen verschillen tussen +1 tot meer dan 8 mm per jaar voor de waarnemingsperiode (zie figuur 2.2). Bijna overal is de waterkering in herkenbare aaneengesloten strekkingen met eenzelfde verplaatsingsnelheid ingedeeld met een lengte van enige honderden meters tot enige kilometers. Een deel van de strekkingen met hogere negatieve verplaatsingsnelheden is geconcentreerd waar recent, naar Google Earth opnamen en “extrapolatie” daarvan, aanpassingen in de omgeving zijn geweest (grondwerk). De voor 250 x 50 m gebieden weergegeven verplaatsingsnelheden hebben geen duidelijke relatie met de opbouw van de ondiepe (Holoceen) ondergrond voor het betreffende gebied. De verwachting dat een dikker pakket niet zettinggevoelige grond tot een hogere negatieve verplaatsing leidt, lijkt bij één overgang (wel naar geen veenpakket) eerder tegengesteld. Het is aannemelijk dat afwijkend onderhoud voor dijken met andere ondergrond dit verschil kan verklaren. Deze waarneming is mogelijk eventueel relevant in relatie tot onderhoudsfrequentie. De locatie van veranderingen van verplaatsingsnelheid is wellicht aanvullend te gebruiken door ter zake deskundigen voor het begrenzen van verschil in opbouw van de ondergrond.

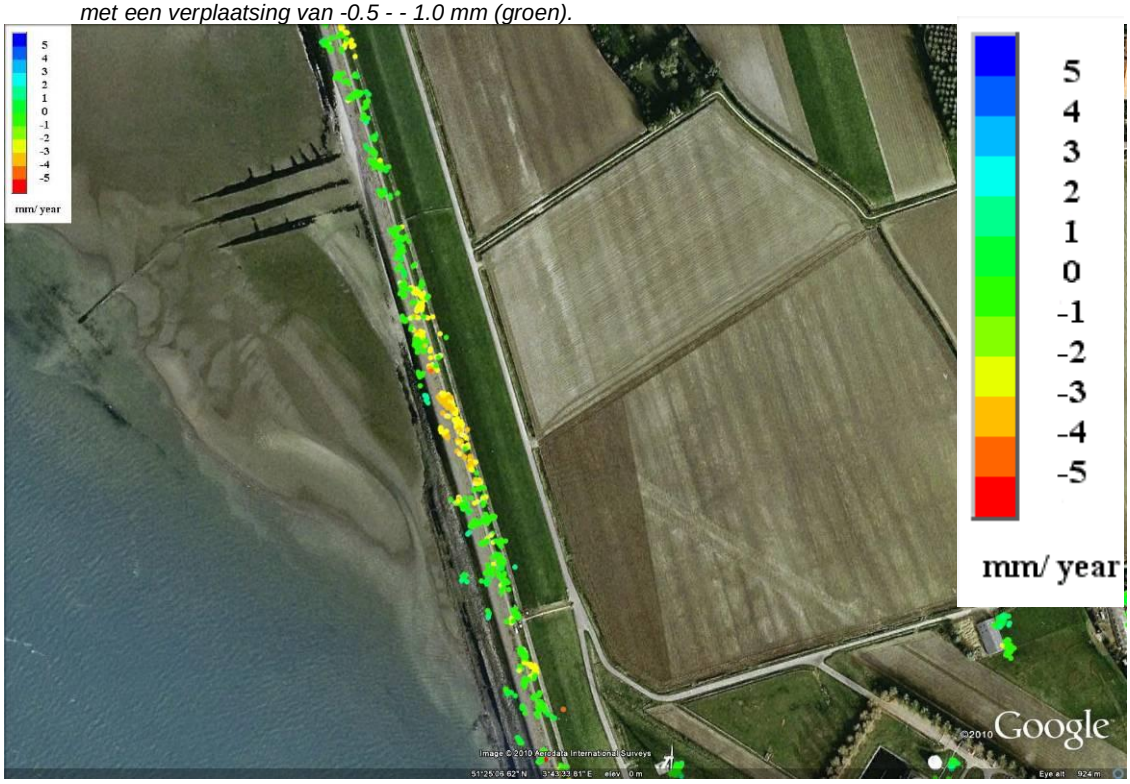
In de waarnemingen voor kleine (ca. 50 – 100 m2) gebiedjes is een grotere en vaak minder systematische ruimtelijke variatie aanwezig (zie figuur 2.3). Ook hierin zijn echter langere strekkingen met eenzelfde verplaatsingsnelheidspatroon te onderkennen (constant hoger of lager, of wisselend met een quasi regelmatige ruimtelijke variatie, zie bijvoorbeeld figuur 3.1). De patronen zijn niet eenduidig met de opbouw van de ondergrond te correleren voor het gebied, behoudens mogelijk locale omstandigheden.



Figuur 3.1 Overgangszone (ca. 650 m) van een strekking met grotere verplaatsingsnelheden (links) naar een strekking met lagere snelheden (groen,rechts). De overgangzone kenmerkt zich door afwisselend hogere (ca. -2.5 mm/a) en lagere(< -1 mm/a) snelhedenvoor stukken van 30 – 80 m lengte.

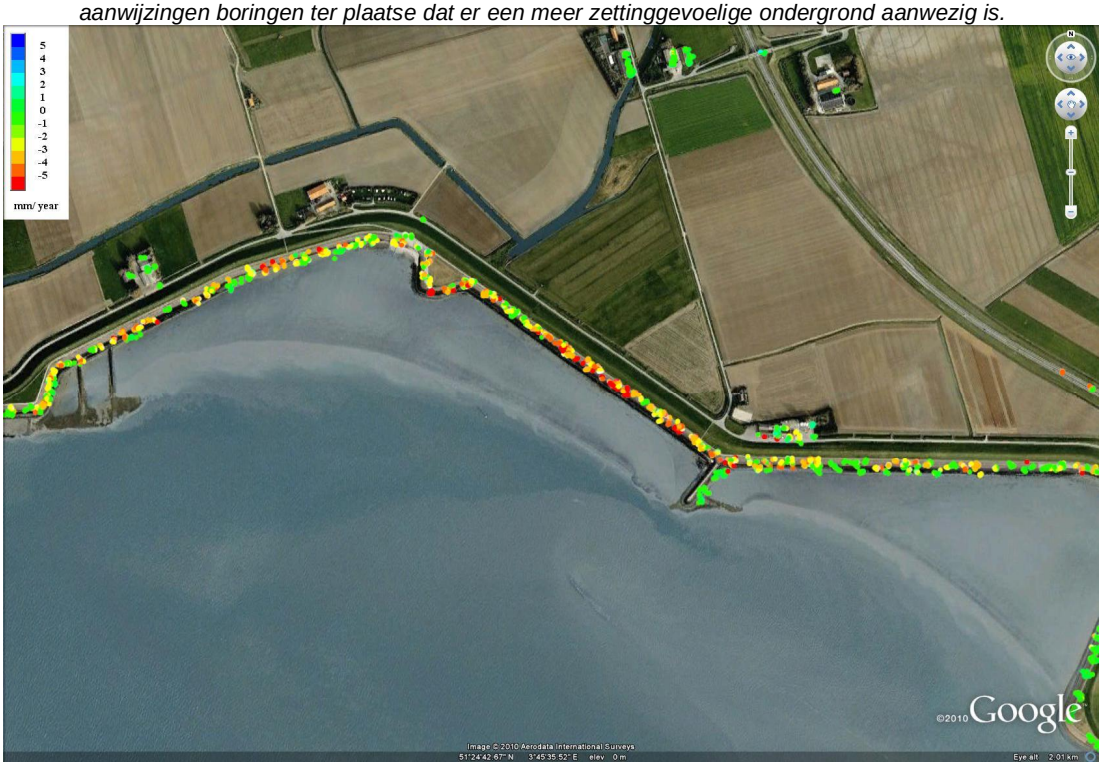
In figuur 3.2 is een zone met wat hogere negatieve verplaatsingsnelheid te herkennen die zeer globaal samenvalt met een gebiedje met een wat dikkere veenlaag (1.5 m dik in plaats van ca. 0.8 m in de omgeving) in de ondergrond. Elders zijn zulke verschillen in verplaatsingsnelheden niet met aangetoonde verschillen in de ondergrond in verband te brengen en, anderzijds, uiten aangetoonde verschillen in opbouw zich niet in de INSAR waarnemingen.

Figuur 3.2 Een zone (ca. 150 m) met een verplaatsingsnelheid van -3 - -4 mm/a(gele stippen) in een strekking met een verplaatsing van -0.5 - - 1.0 mm (groen).

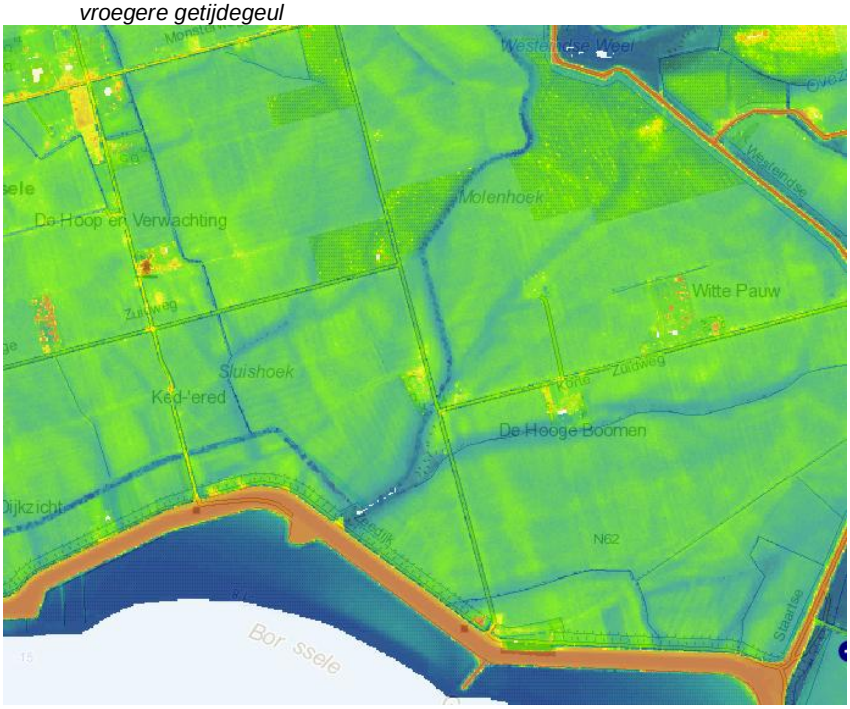


In figuur 3.3 is een zone met hogere negatieve verplaatsingsnelheden te herkennen (rode punten). In de boringen in het gebied is geen duidelijke afwijking met betrekking tot zettinggevoeligheid te herkennen. Het AHN beeld (figuur 3.4) wijst er op dat aan de westzijde van de zone een voormalige getijde geul is gelegen. Het is mogelijk dat de waterkering ter plaatse in verband daarmee afwijkend van constructie is (bijvoorbeeld later aangelegd of doorgebroken geweest) en het is niet geheel uit te sluiten dat er subtiele verschillen in opbouw van de ondergrond zijn die het verschil bepalen. De verschillen in opbouw van de ondergrond in het beschouwde gebied zijn relatief beperkt wat betreft hun aanleg voor natuurlijke bodemdaling in vergelijking met bijvoorbeeld delen van het rivierengebied, maar in het algemeen zijn verschillen zettinggevoeligheid goed te herkennen ook in het onderzoeksgebied. De grote verschillen in zettinggevoeligheid komen minder voor dan in het rivierengebied, maar in het beschouwde gebied is dat niet eenduidig te herkennen in samenhang tussen verplaatsingsnelheid en opbouw van de ondergrond.

Figuur 3.3 Zone met grotere negatieve verplaatsingsnelheden (midden van het beeld). Er zijn geen duidelijke aanwijzingen boringen ter plaatse dat er een meer zettinggevoelige ondergrond aanwezig is.

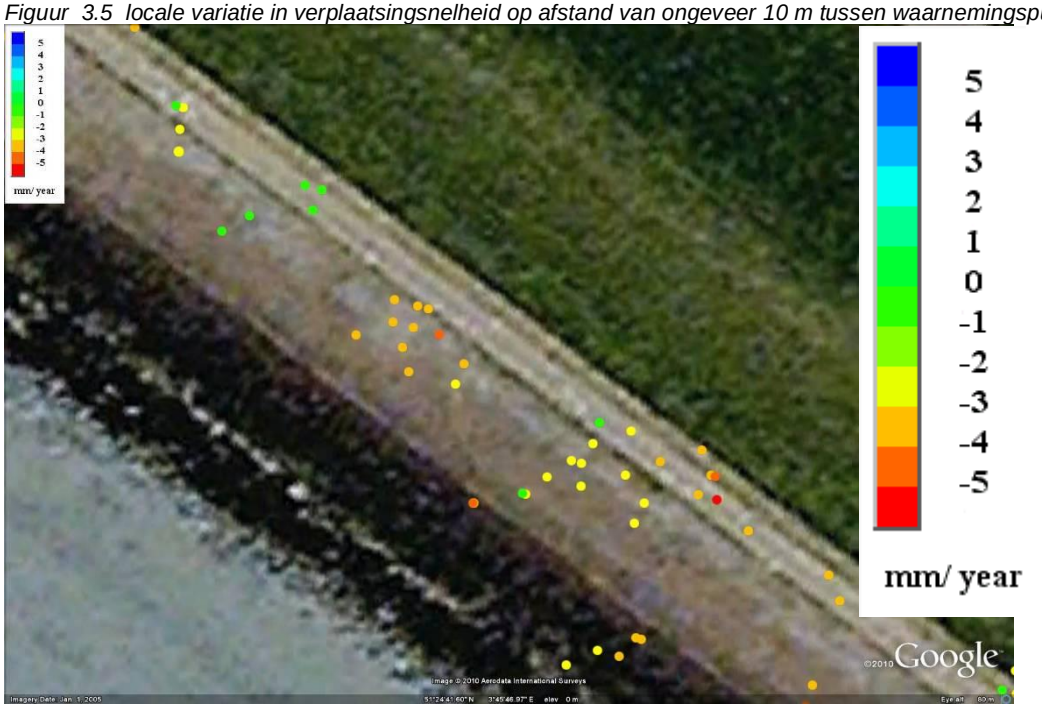


Figuur 3.4 AHN beeld van de zone in figuur 3.3. Ter plaatse van de zone met veel rode punten is geen duidelijke aanwijzing voor afwijkende omstandigheden, echter de zone ligt in de directe nabijheid, ten oosten, van een vroegere getijdegeul



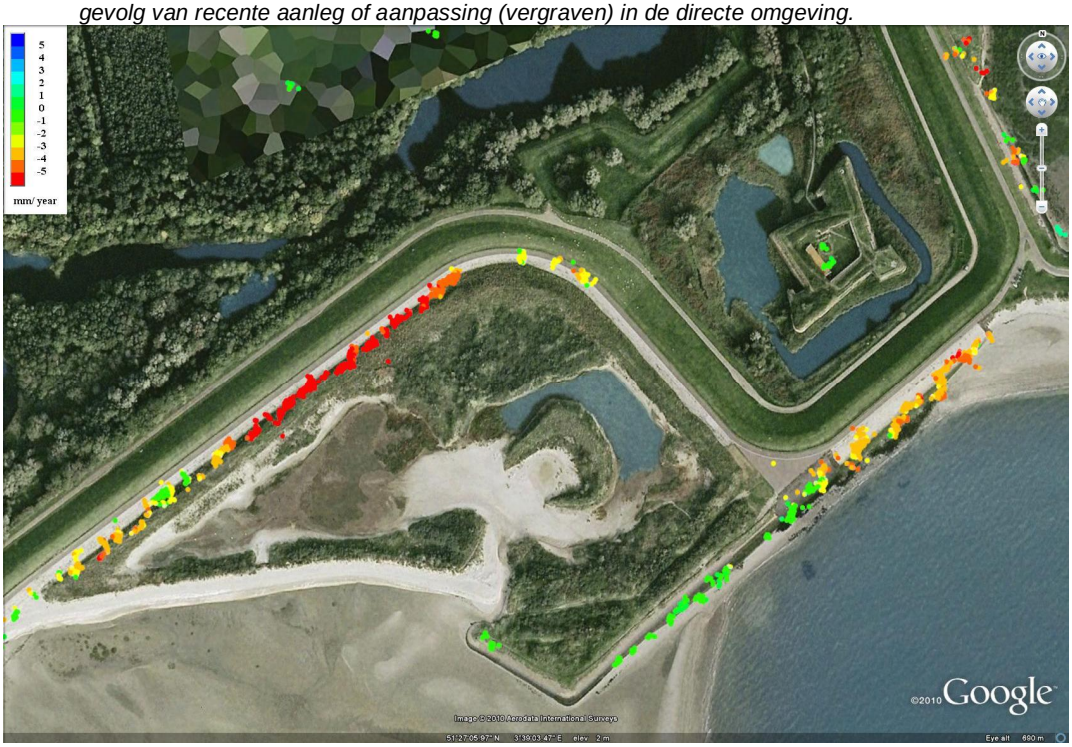
De waargenomen verplaatsingsnelheden geven informatie over vervormingen van harde delen aan het oppervlak van de waterkering en directe omgeving. De verplaatsingsnelheden bedragen +1 mm/a tot ongeveer -8 mm/a met uitschieters tot – 14 mm/a hetgeen voor grondwerken betrekkelijk gering is. Klink van een net aangelegde kleidijk bedraagt ongeveer 4% van de hoogte in een periode van ongeveer 3 jaar na aanleg, zeg 10 centimeter voor 2.5 m aangebrachte klei in 3 jaar. Seizoensfluctuaties in dikte van een kleilaag van 1 m bedragen enige centimeters waarbij rond vorst en droge perioden in de zomer zulke verschillen binnen 1 week kunnen voorkomen. Aangenomen wordt dat deze temporele variatie in de bewerking van de gegevens geëgaliseerd wordt. Opvallend is de consistentie in de trend in de in veel opzichten geringe verplaatsingsnelheid voor de waarnemingsperiode vanaf 2003 voor alle weergegeven punten. Deze trend is voor zowel de dijklichamen als voor overige objecten in het gebied te zien in de grafieken, en nagenoeg alle punten dalen. De zeer geringe afstanden (< 10 m) tussen individueel weergegeven punten met significante verschillen in verplaatsingsnelheid (zie bijvoorbeeld figuur 3.5) wijzen op een oorzaak in de ondiepe ondergrond of systematische beweging van het object zelf waar deze door terreinomstandigheden wordt veroorzaakt.

Figuur 3.5 locale variatie in verplaatsingsnelheid op afstand van ongeveer 10 m tussen waarnemingspunten



Zones die over een wat grotere lengte een systematisch afwijkende verplaatsingsnelheid hebben, kunnen te maken hebben met oorzaken die verband houden met gedrag van de wat diepere ondergrond. Deze oorzaken kunnen zetting van nieuwe of verzwaarde constructies zijn of bijvoorbeeld veranderingen in grondwaterstand of van stijghoogte in wat dieper gelegen lagen. Relatief snelle verplaatsing van punten in de directe omgeving van het industriegebied zijn naar het zich laat aanzien het gevolg van met name zetting door grondwerken (zie ook figuur 3.6).

Figuur 3.6 Systematisch afwijkende strekkingen met grotere negatieve verplaatsing snelheid, waarschijnlijk als gevolg van recente aanleg of aanpassing (vergraven) in de directe omgeving.



De afmetingen waarover herkenbare verschillen in verplaatsingsnelheid optreden zijn van belang voor het duiden van de relatie ervan met omgevingsfactoren.

De ruimtelijke en temporele samenhang van de informatie in de INSAR gegevens kan van een belangrijke bijdrage leveren in de inventarisatie van aantasting van waterkeringen na gebeurtenissen of perioden met hoge belastingen. Het is daarbij belangrijk dat de informatie ook ingaat op verlies van coherente reflectoren.
De verschillen in verplaatsingsnelheid lijken in hoofdzaak samen te hangen met de constructie (vooral in een periode na grootschalig onderhoud), constructiewijze en wijze van aanleg en uitvoeringvariatie daarin. De opbouw van de ondergrond speelt hierbij een rol, maar de ondergrond uit zich niet rechtstreeks in de waarnemingen zoals hier beschouwd. De waarnemingen zijn mogelijk aanvullend bij het vaststellen van aspecten van de opbouw van de ondergrond.

3.1.2 Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk

Dit is om precies te zijn de Zuidelijke Noordland binnenhavendam bij de Oosterschelde kering (dammetje rechts in vierkant van figuur 2.4). De onderwaterbodem wordt aan de noordelijke zijde niet bestort. Aan die zijde heeft twee keer een zettingsvloeiing plaatsgevonden, in de verschilkaart tussen twee peilingen duidelijk herkenbaar aan de schelpvorm:

1. tussen oktober 2003 en maart 2004, zie figuur 2.4
2. tussen maart 2004 en april 2005, zie figuur 2.5.

De toepasbaarheid van InSar met betrekking tot de in paragraaf 2.2.1 beschreven problematiek zou m.b.t. de volgende aspecten zinvol kunnen zijn:

1. detectie van erosiekuilen (geleidelijke verandering)
2. detectie van zettingsvloeiigen (snelle verandering)

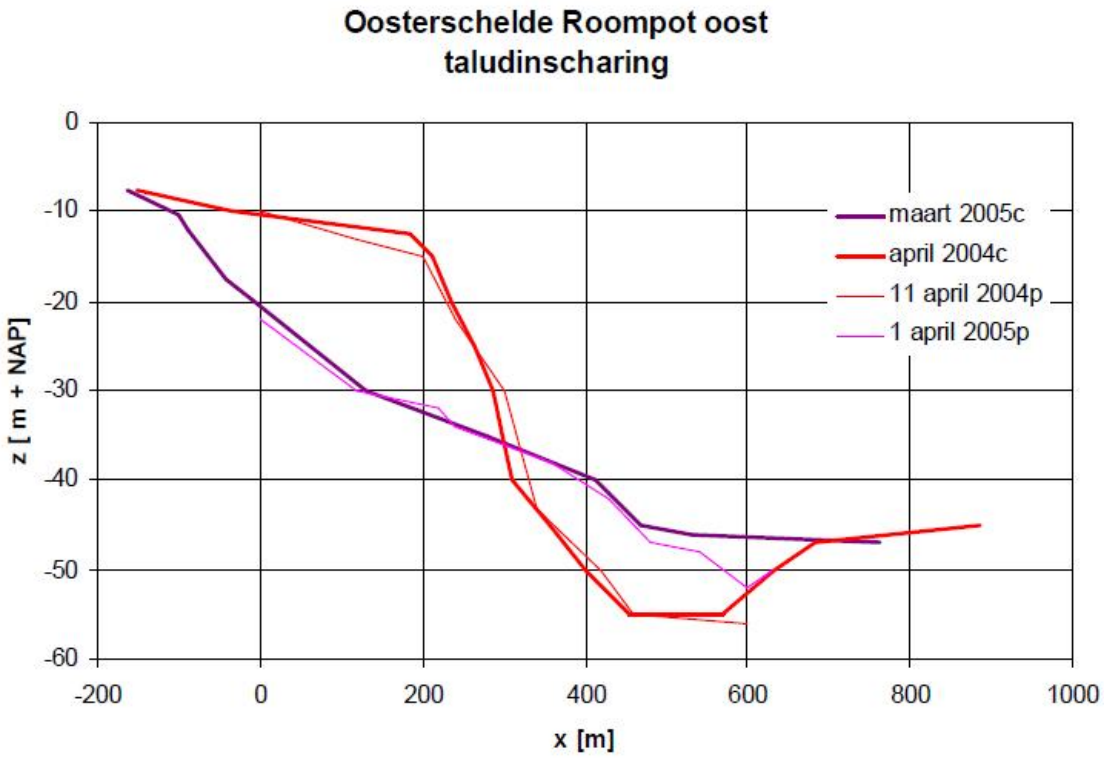
Beide mechanismen zijn alleen via peilingen waarneembaar (zie figuren 2.4 en 2.5). Bij de Oosterscheldekering worden die regelmatig uitgevoerd (meermaals per jaar), maar in erosieve en/of zettingsvloeiingsgevoelige gebieden elders veel minder frequent (bijvoorbeeld erosieve rivieren als de Oude Maas, Spui en Dordtsche Kil).

Details vloeiing 2 (maart 2004 – april 2005)

De eerste twee vloeiingen zijn tot vlakbij de dam die de jachthaven beschermd gekomen. Met name bij de tweede grote vloeiing, tussen maart 2004 en april 2005, is het gedeelte waar zand is verdwenen tot ca. 100 m afstand van de dam gekomen. Figuur 3.7 geeft de Het totale volume dat is weggevloeid is ca. 850.000 m^3, waarbij de bodem ca. 10m tot 20m lager is komen te liggen over een afstand van ca. 300 m. De breedte bedraagt maximaal ca. 350 m. Het diepste kuilgedeelte is vele meters (maximaal ongeveer 10m) ondieper geworden.

Berekeningen met zettingsvloeiingsmodellen geven aan dat de vloeiing ca. 30 uren heeft geduurd. Dit wijst erop dat er hoofdzakelijk sprake is geweest van *bresvloeiing*. Een *verwekingsvloeiing* (indien zeer losgepakt zand aanwezig is) vindt doorgaans veel sneller plaats (enkele minuten)

Figuur 3.7 Langsprofiel voor en na zettingsvloeiing



In figuren 2.4, 2.5 (en meer in detail in figuur 2.6) zijn de reflectoren op Zuidelijke Noordland binnenhavendam weergegeven, evenals de reflectoren in de omgeving hiervan. Gekeken is naar de reflectoren die zich op het uiteinde van de dam ten noorden van de vloeiing bevinden (de groene punt in de figuren 2.4 en 2.5). Hier bevinden zich 19 scatterers, waarvan de

hoogste zich op NAP+2,5 m bevinden en de laagste op NAP-8,6 m. De verplaatsingen tussen september 2003 en maart 2010 zijn per scatterer in een grafiek weergegeven (1 punt per 36 dagen). De gemiddelde verplaatsingsnelheid van de individuele scatterers varieerde tussen 0,65 mm/jaar (laagste scatterers) en 1,1 mm/jaar (hoogste scatterers). Dit zijn zeer geringe snelheden (vandaar de groene punten in figuren 2.4 en 2.5). Echter onduidelijk is in welke richting de dam zich verplaatst.

Er zijn in de tijdsreeksen in de perioden oktober 2003 - maart 2004 en maart 2004 - april 2005, toen de vloeiingen hebben plaatsgevonden, geen significante afwijkingen in de verplaatsingssnelheden zichtbaar.
De geleidelijke verplaatsing van de dam zou een indicatie kunnen zijn voor voortschrijdende ontgronding in de bodem van de Roompot ten zuiden van de dam. Echter de richting van de verplaatsing is onduidelijk en bovendien zeer gering en niet significant afwijkend van de verplaatsingsnelheden van meer westelijk gelegen reflectoren op de dam, daar waar een bestorting op de bodem aanwezig is, en erosie dus niet mogelijk is. De toepasbaarheid van InSar m.b.t. detectie van erosie lijkt dus beperkt.

Ofschoon de afstand tussen de insteek (scarp) van de grootste vloeiing die tussen maart 2004 en april 2005 heeft plaats gevonden en de dam waarop zich de reflectoren bevinden slechts 100 m bedraagt en de vloeiing met een weggevloeid volume van 850.000 m3 als zeer groot kan worden bestempeld, is van deze gebeurtenis in de verplaatsingsnelheden van de scatterers niets terug te zien. Hetzelfde geldt voor de vloeiing tussen oktober 2003 en maart 2004. Dit zou verklaard kunnen worden het feit dat zand, waar de ondergrond ter plaatse uit is opgebouwd, zeer stijf is (in vergelijking met bijvoorbeeld klei of veen). Het invloedsgebied van een afschuiving of zettingsvloeiing is in zand daarom beperkt. In een kleiige ondergrond zal dit invloedsgebied groter zijn (verder ook kruip mogelijk).
De toepasbaarheid van InSar voor detectie van zettingsvloeiingen, die alleen in zand kunnen optreden, lijkt daarom beperkt. Het zou kunnen dat zettingsvloeiingen die in kortere tijd optreden (enkele minuten, indien sprake is van een pure verwekingsvloeiing, en niet van een bresvloeiing, zoals in deze case waarschijnlijk het geval is geweest) wel een groter effect o de omgeving kunnen hebben.

3.1.3 Dijken en kanaal bij Zierikzee

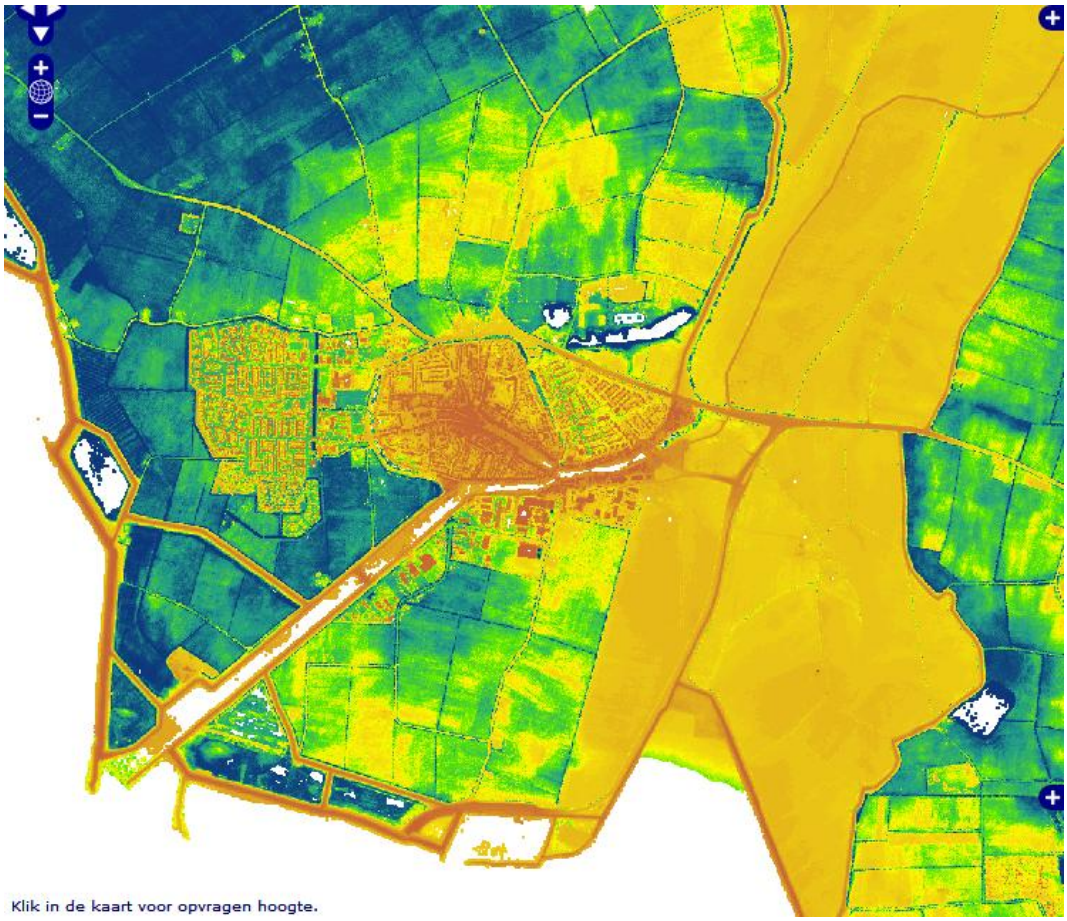
Een overzicht van de door Hansje Brinker gemeten verticale vervormingen nabij Zierikzee staan in figuur 2.7. Hoogtemetingen zijn genomen over een periode vanaf 2003 tot 2010. Per meetpunt, is een trendlijn getrokken door de metingen gedurende de hele periode. In kleur is aangegeven wat de stijging van de trendlijn is.

De harde bekledingen op het buitentalud van de dijken geven goede reflecties en daarmee meetpunten, de grasbekledingen niet. De gemeten groene punten langs de contour van de dijk in figuur 2.1, met een verticale vervormingen tussen +2 mm en -2 mm per jaar, betreffen dus alleen het buitentalud van de dijk. Opgemerkt wordt dat er een kleine verschuiving is tussen de reflecties en het beeld van google earth.

De range van de gemeten vervormingen vallen binnen de verwachtte bodemdaling bij Zierikzee in de komende 50 jaar, namelijk 0,4 – 2 mm per jaar.

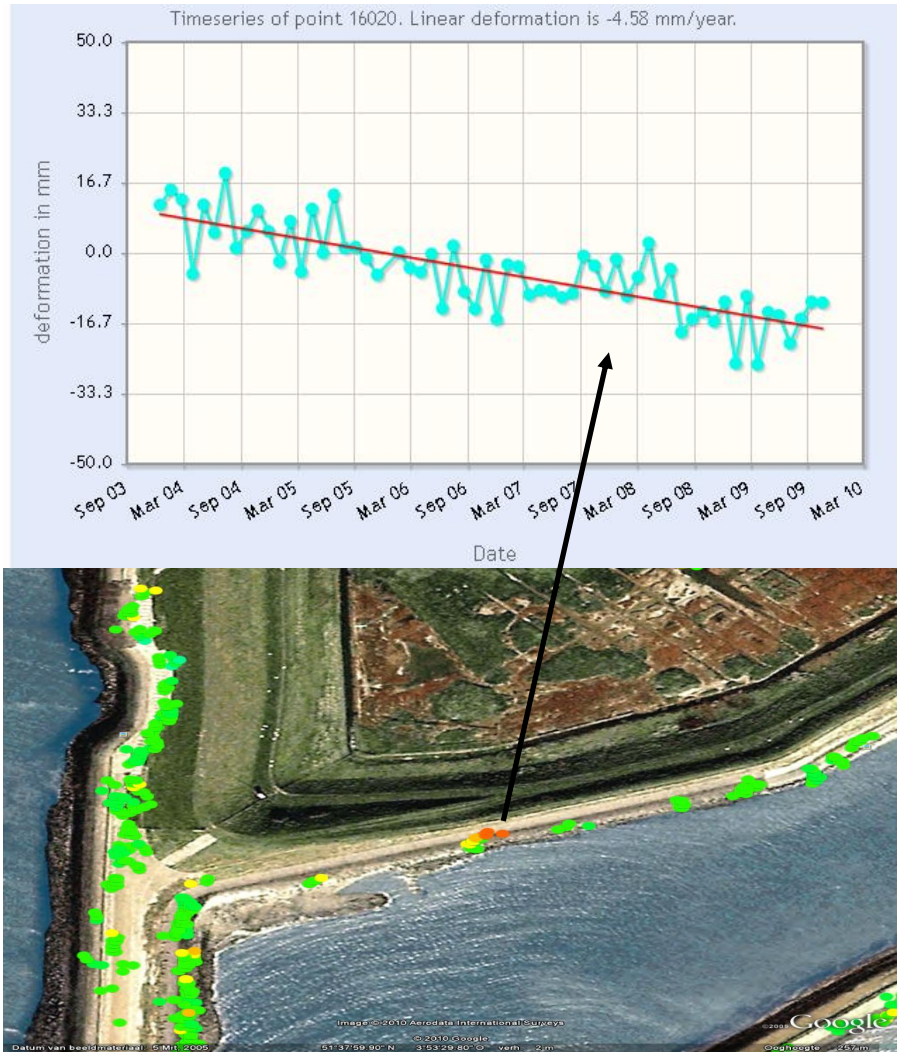
Geologische patronen in de ondergrond, bijvoorbeeld opgevulde stroomgeulen of plaatafzettingen waar de dijk in het verleden mogelijk overheen is gelegd en die zouden

kunnen zorgen voor afwijkende vervormingen, zijn in de metingen niet terug te vinden. In het hoogtebestand Nederland zijn dergelijke patronen ook niet te vinden (figuur 3.8).
Oostelijk van Zierikzee loopt in figuur 3.8 een oranje band in Noord-Zuid richting. Oostelijk en westelijk van deze band zijn geen verschillen te zien in de metingen. Aan beide zijden zijn de metingen ‘groen’.



Figuur 3.8 Hoogtebestand Nederland rond Zierikzee

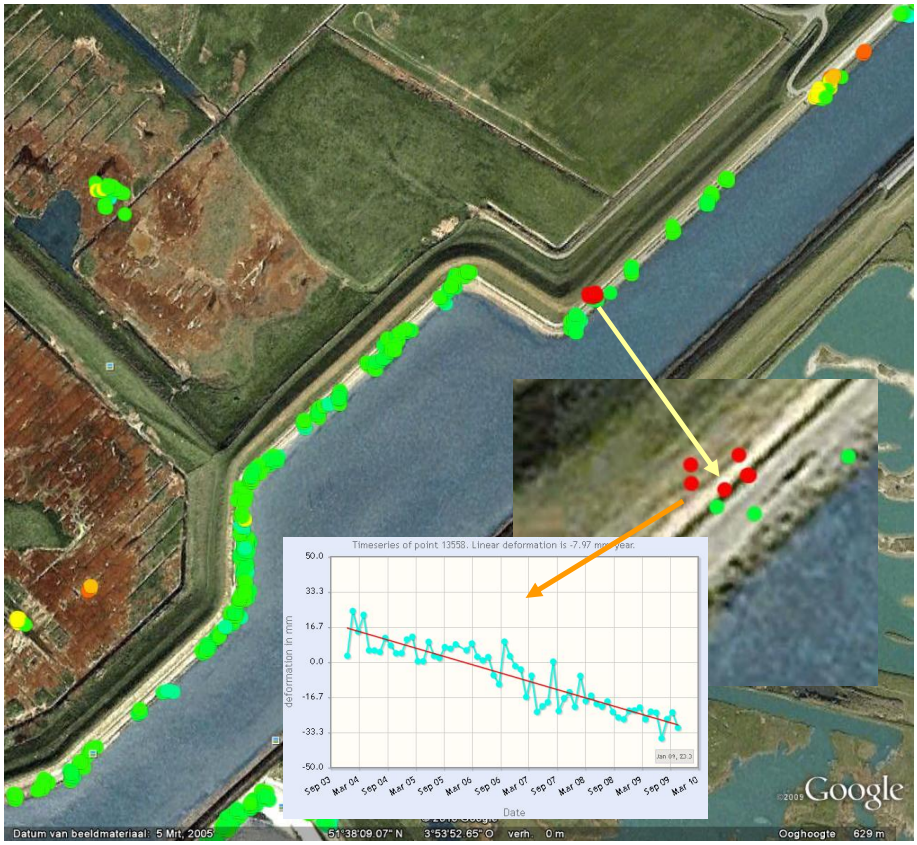
Op enkele plekken langs het kanaal tussen de Oosterschelde en Zierikzee is de vervorming iets meer dan elders wordt aangetroffen, zie figuur 3.9.



Figuur 3.9 Afwijkende meting langs het kanaal tussen de Oosterschelde en Zierikzee (meer vertikale vervorming)

De afwijking is zeer lokaal en zeer gering. Vlak naast de ‘oranje’ metingen zijn ‘groene’ metingen aanwezig. De vervorming lijkt stapsgewijs plaats te vinden (rond september 2005 en rond september 2008). Mogelijk is tijdens stormen in deze perioden enige verdichting van de ondergrond opgetreden, of enige slijtage van het bekledingsmateriaal. Een eenduidige oorzaak is op basis van de beschikbare informatie niet te vinden. Het is ook de vraag of een dergelijke kleine afwijking van belang is. Er zijn op deze locatie geen werkzaamheden geweest.

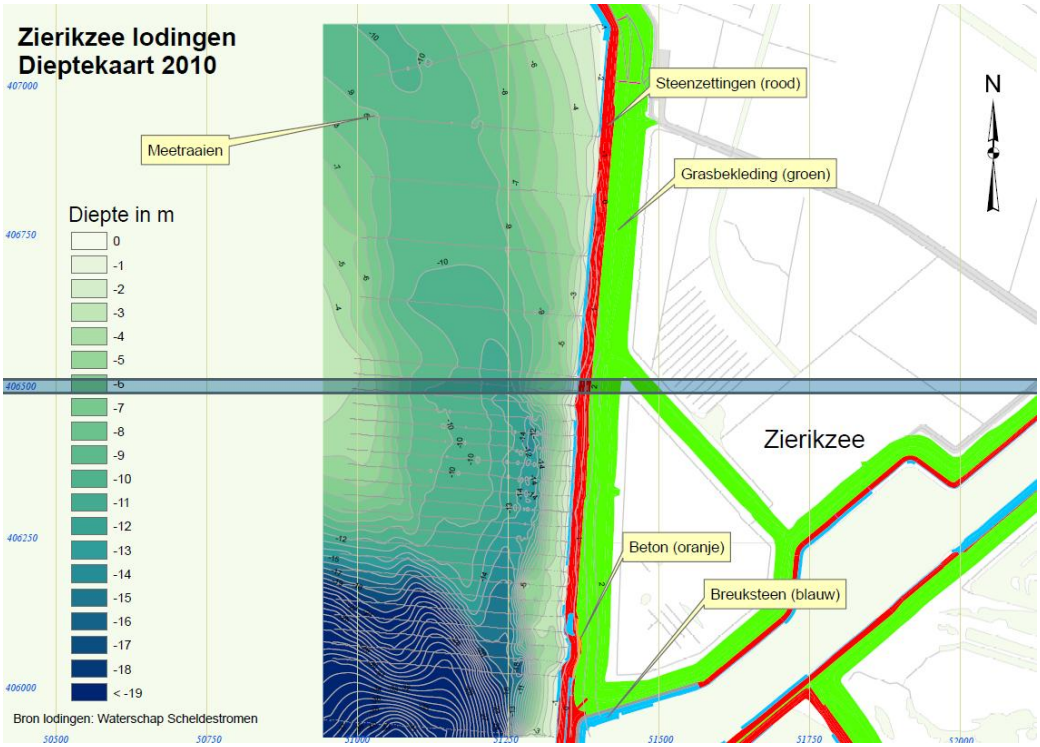
Langs het kanaal naar Zierikzee liggen nog meer afwijkende metingen, zie figuur 3.10. Ook hiervoor is geen eenduidige verklaring. Noordelijk van de locatie in figuur 3.10 zijn in 2004 werkzaamheden uitgevoerd. De deformatiesnelheid lijkt af te nemen vanaf mei 2006.



Figuur 3.10 Afwijkende meting Zierikzee langs kanaal

Opvallend is dat in figuur 2.6 langs de zuidelijke kant van het kanaal geen reflecties zijn weergegeven. Mogelijk wordt dit veroorzaakt doordat het talud teveel in lijn ligt met de kijkrichting van de satelliet.

Er zijn lodingen beschikbaar nabij Zierikzee, zie figuur 3.11. Er is een relatief steil onderwatertalud aanwezig, maar dit heeft geen significante gevolgen voor de gemeten verplaatsingen. De verplaatsingssnelheden liggen allemaal in het groene gebied (verticale vervormingen tussen +2 mm en -2 mm per jaar).
Verschillen in dieptemetingen tussen 2009 en 2010 laten geen opmerkelijke ontwikkeling van de bodemligging zien.



Figuur 3.11 Lodingen uit 2010 nabij Zierikzee

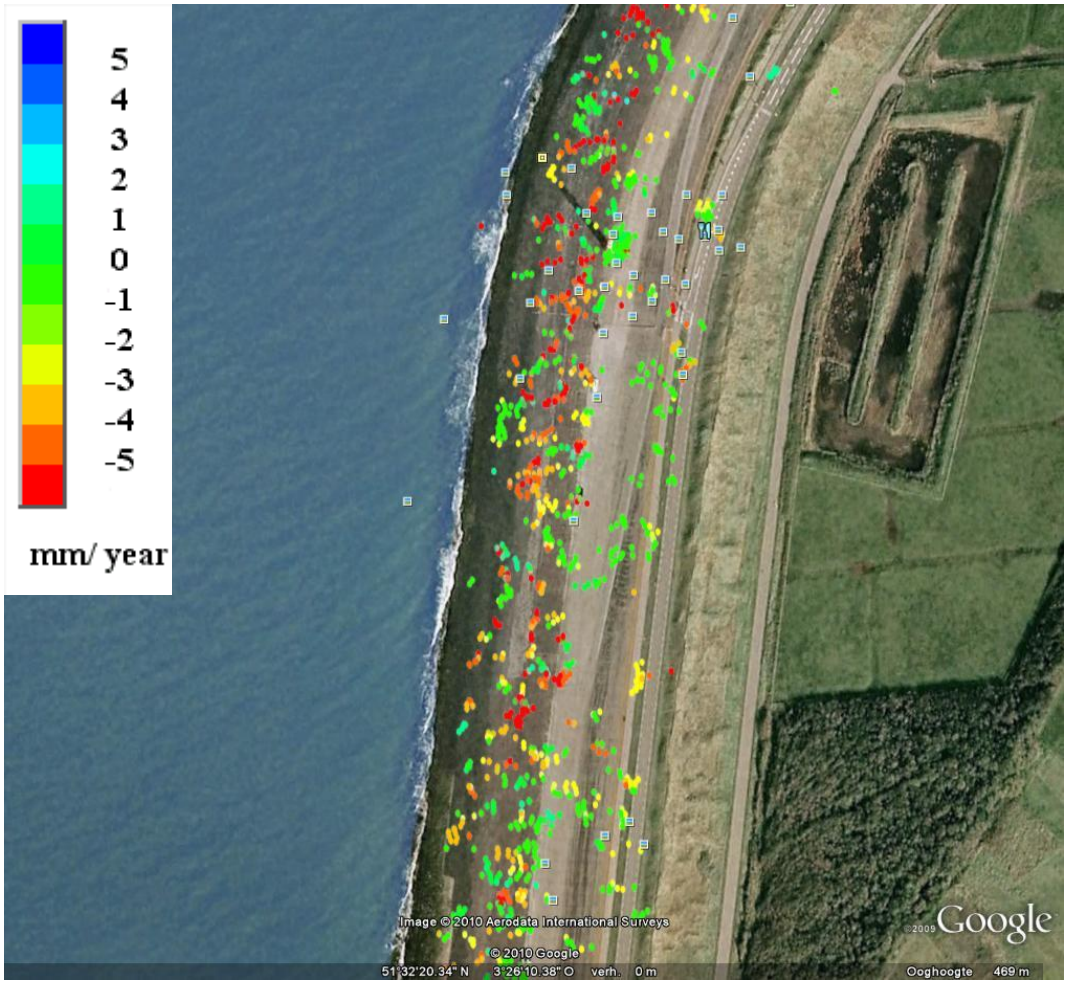
3.1.4 Zeewering bij Westkapelle

Figuur 2.8 geeft een globaal beeld van de vervormingssnelheden bij Westkapelle.

De metingen binnendijks, in het dorp, geven een stabiel beeld, binnen de marge van bodemdaling in dit gebied. De bekleding op het buitentalud laat ten opzichte van de bekleding binnendijks, een duidelijk grillig beeld van verticale vervormingen zien.

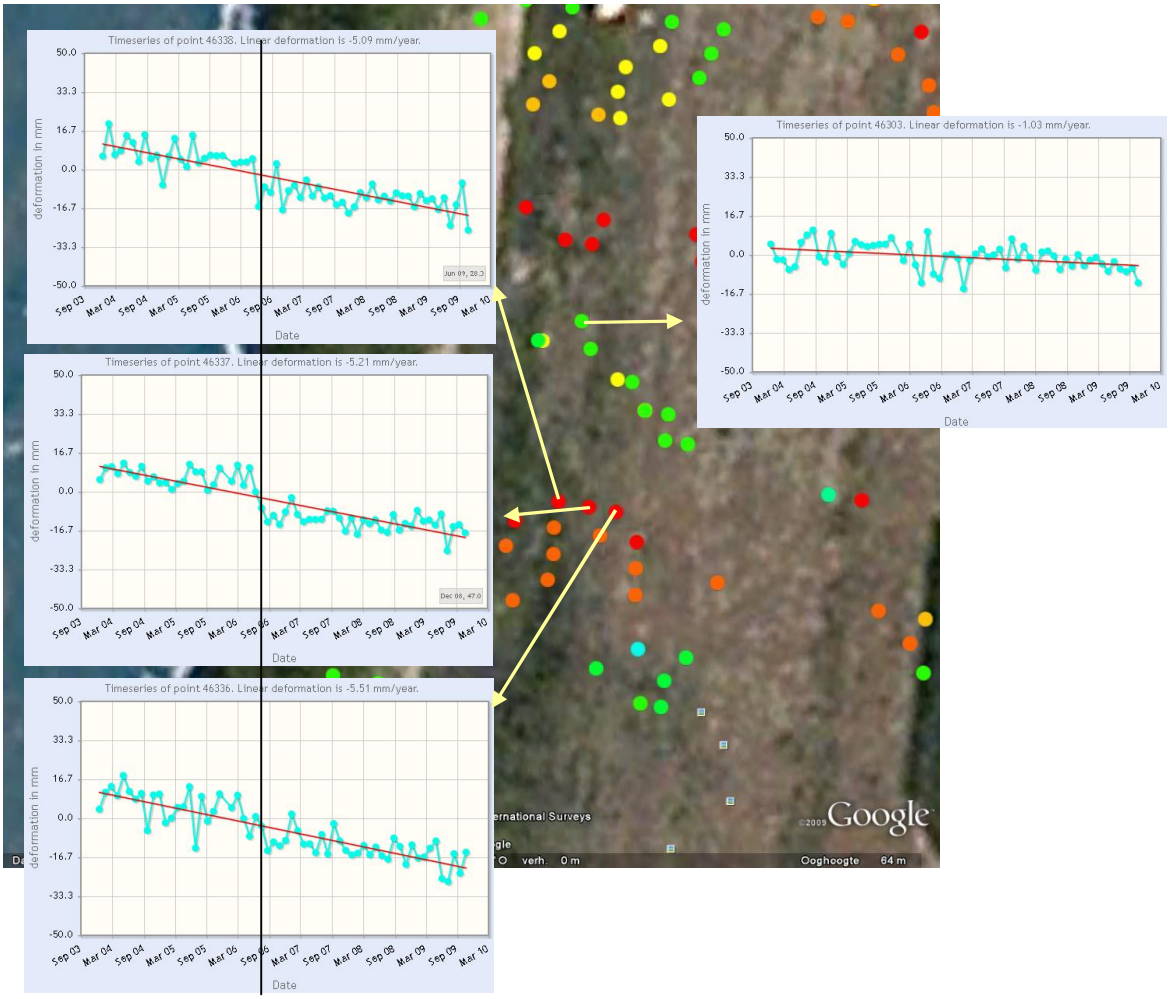
In figuur 3.12 is een uitvergroting gegeven van de buitenbekleding van de dijk bij Westkapelle.

De verdeling van groene, gele, oranje en rode metingen is verspreid over het buitenbeloop van de dijk.



Figuur 3.12 Uitvergroting vertikale vervormingen Westkapelle (pixels van 50-100 m2)

Een mogelijke verklaring hiervoor is een lokale verdichting van het zand onder de bekleding door golfklappen gedurende een storm. Geprobeerd is dit te verifiëren met de tijdreeksen van meetpunten vlak bij elkaar (figuur 3.13).

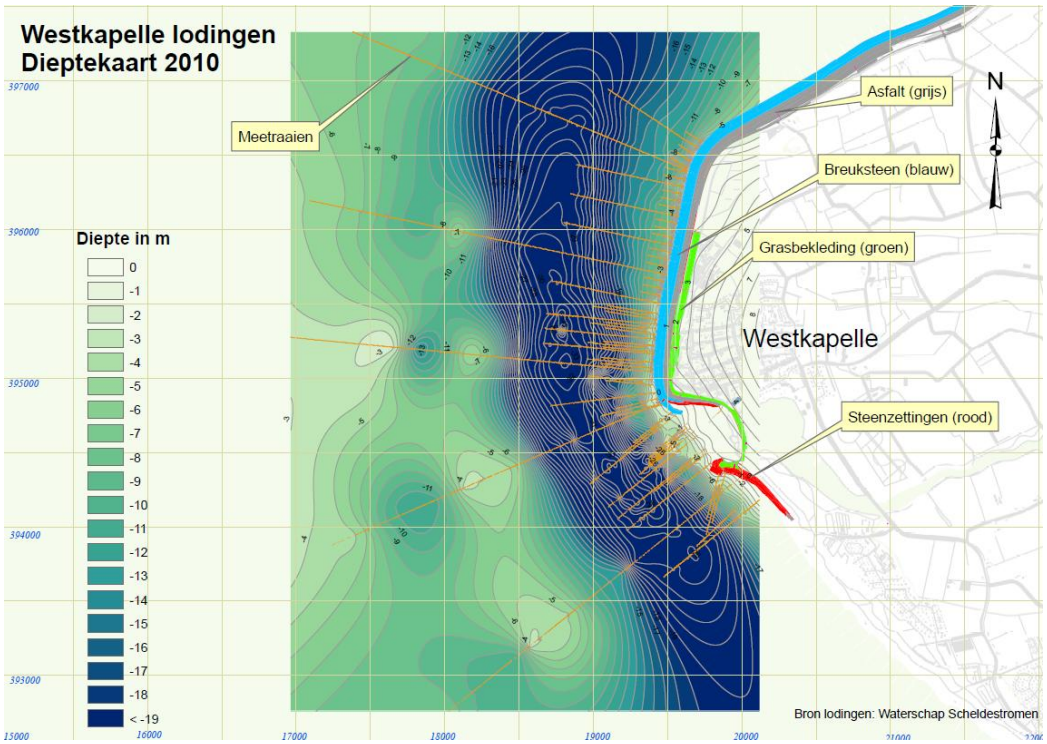


Figuur 3.13 Vergelijking tijdreeksen meting vervormingen bij Westkapelle

Uit figuur 3.13 blijkt dat punten die dicht bij elkaar liggen geen consistent beeld geven. De effecten die de zetting veroorzaken zijn dus zeer lokaal van aard.

Enkele punten lijken rondom september 2006 te zijn gedaald. Dit is mogelijk te koppelen aan werkzaamheden op dit traject (2006 en 2008). Een overlaging of vervanging van het buitentalud zou echter moeten leidein tot aanzienlijk grotere vervormingen dan waargenomen. (nagaan bij Scheldestroom wat hier is gebeurd).

Er zijn lodingen beschikbaar (figuur 3.14), waaruit blijkt dat het onderwatertalud vrij steil is.
Dit zou mogelijk kunnen leiden tot een geotechnisch mechanisme, zoals verminderde buitenwaartse stabiliteit.



Figuur 3.14 Loding Westkapelle

Een geotechnisch mechanisme (verminderde grondmechanische stabiliteit) zou echter een minder gespreid beeld van vervormingen geven. De gemeten verschillen in vervormingen zijn zo lokaal en zo verspreid dat alleen zeer lokale processen hieraan ten grondslag kunnen liggen, zoals verschillen in verdichting van het materiaal en materiaalsamenstelling, ontstaan bij het opbouwen van de dijk of verschillen in belasting en belastinggeschiedenis (golfklappen die lokaal het talud belasten).

4 Algemene conclusies en aanbevelingen

4.1 Bruikbaarheid PS-InSAR analyse gegevens

Onderstaande selectie van locaties is beschouwd:

1 Havengebied Vlissingen, Ellewoudsdijk + Borssele, d.w.z. het gebied nabij waterkeringen direct ten Oosten van Vlissingen (bij Borssele)
2 Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk (d.w.z. bij de Zuidelijke Noordland binnenhavendam bij de Oosterschelde kering)
3 Zierikzee
4 Westkapelle

De gemiddelde verplaatsingssnelheid van reflectoren over de periode 2003 - 2010 in kleine zones (ca. 50 – 100 m2) zijn gebruikt en zijn vergeleken met over gemiddelde reflecties over gebieden van 250 x 50 m (d.w.z. in de lengterichting x dwars op de dijk).

Ten behoeve van de interpretatie zijn de volgende aanvullende gegevens gebruikt:

- Echolodingen (peilingen 2006, 2009 en 2010)
- 3D gegevens van de waterkering met bekledingstypen anno 2010
- Gegevens over uitgevoerde werkzaamheden op betreffende locaties vanaf 1999 tot 2010
- Dino (en Geotop en DGM) gegevens (voor Ellewoudsdijk+Borssele)
- Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN)
- Google voor terreininformatie

Er zijn voor een aantal locaties (Havengebied Vlissingen, Ellewoudsdijk + Borssele en Westkapelle) duidelijke patronen in de gemeten vervormingssnelheden gevonden. De schaal waarop deze patronen zichtbaar zijn, bepaalt wat de mogelijke oorzaak hiervan kan zijn.
Ook de grootte van de vervormingssnelheden is beschouwd en of de verschillen in vervormingssnelheid significant kunnen zijn.
Er treden gedurende de periode 2003 – 2010 lokaal duidelijke veranderingen in vervormingssnelheden op.

Uit de analyse van de vervormingssnelheden is voor geen enkele van de 4 beschouwde locaties het optreden van een geotechnisch faalmechanisme aangetoond. Dit geeft vertrouwen in de stabiliteit van de betreffende waterkeringen, met name voor die waterkeringen met voldoende dekking van meetpunten (Persistant Scatterers).

Kortom:
Door PS-InSAR gegevens te gebruiken is het mogelijk een inschatting te geven van locaties waar mogelijk iets aan de hand is (Early warning), maar kunnen ook potentiële probleem locaties worden aangemerkt als stabiel (Noord-Beveland dam + "inlaat" dijk t.a.v. zettingsvloeiing en Westkapelle t.a.v. zware golfaanval + steil onderwatertalud bijvoorbeeld). Als er locaties met problemen of afwijkingen aan dijktaluds bekend zijn, kan met InSAR de ruimtelijke extensie van deze afwijkingen in kaart worden gebracht. Er moeten dan wel voldoende puntmetingen aanwezig zijn.

Uit de InSAR gegevens, op de wijze zoals tot nu toe geanalyseerd, zijn duidelijke patronen en trends te halen. De oorzaak van deze trends is nog niet altijd eenduidig, zie par. 4.2. Dit kan wel verder worden uitgewerkt, zie de aanbevelingen en het actieplan (volgende paragrafen).

4.2 Mogelijke oorzaken voor de gevonden patronen

Uit de interpretatie van de InSAR-gegevens zijn de volgende onderliggende oorzaken voor de verschillen in deformatiesnelheid naar voren gekomen:

- locale overgang van kleiige of venige ondergrond naar zandlaag, of verandering van de dikte van de klei of veenlaag. Deze oorzaak wordt vaak gemaskeerd door andere oorzaken voor zettingsverschillen, te weten:
- Werkzaamheden op de dijk of in de nabijheid ervan Voor een aantal dijkvakken was er een verband te zien met de optredende deformaties. Bijvoorbeeld een ophoging geeft extra zetting. Ook ontgravingen nabij de dijk hebben een effect.
- Zeer lokale processen (golfklappen) of verschillen in materiaalgebruik en kwaliteit ervan (slijtage bekleding of verschillen in verdichting ondergrond). Dit uit zich in grillige patronen van vervormingssnelheden. De variatie vindt plaats over een schaal van een aantal meters. Dit is te zien op het buitentalud van de dijk bij Westkapelle. De gemeten verschillen in vervormingen zijn zo lokaal en zo verspreid dat alleen zeer lokale processen hieraan ten grondslag kunnen liggen, zoals verschillen in verdichting van het materiaal en materiaalsamenstelling, ontstaan bij het opbouwen van de dijk of verschillen in belasting en belastinggeschiedenis (golfklappen die lokaal het talud belasten).
- Steile onderwatertaluds (1:4 of steiler) in de nabijheid van de dijk lijken geen significant grotere vervormingssnelheden te geven. Geotechnische mechanismen, zoals zettingsvloeiing of instabiliteit van het dijklichaam, kunnen leiden tot deformaties met een schaalgrootte van 50 tot honderden meters. De deformaties zijn dan orde grootte een aantal centimeters. Deze effecten zijn niet waargenomen.
- Een overwegend zandige ondergrond levert kleine (verschillen in) deformatiesnelheden op, orde grootte de lokale bodemdaling. Dit is waargenomen bij de Zuidelijke Noordland binnenhavendam bij de Oosterschelde kering. Ook bij Zierikzee zijn de deformatiesnelheden klein, waarschijnlijk omdat de ondergrond hier vrij uniform is.

4.3 Aanbevelingen

4.3.1 M.b.t. InSAR analyse

- Gegevens binnen- en buitentalud beter scheiden, ook in smoothing proces (scatterers achter de dijk apart bekijken en dus niet meenemen in smoothing).
- Het wegvallen en ontbreken van reflecties nader beschouwen door locatiebezoek of aanpassen filtering.
- De periode voor en na een belangrijke gebeurtenis (werkzaamheden of een bepaalde storm) analyseren.

- Type reflecties nader uitwerken (maskeren, pixel-grootte, ruimtelijke correlaties opnemen in analyse etc.).
- Beter in kaart brengen welke delen van de dijk reflecties zouden moeten geven (in verband met de kijkrichting van de satelliet, taludhelling, type bekleding, werking van getij, rietbegroeiing, etc.).

Criterium vaststellen voor puntendichtheid op de dijk die bruikbaar is om er zeker van te zijn dat de dijk(bekleding) acceptabel gedrag vertoont. D.w.z. er mogen geen belangrijke reflecties ontbreken. Immers, reflecties kunnen wegvallen tijdens het analyse proces met als reden dat er iets mis kan zijn. Snelle deformaties groter dan enkel centimeters (van belang voor geotechnisch falen) vallen bijvoorbeeld weg. Indien de bestorting gedeeltelijk wegspoelt, ziet men dat ook niet meer terug. Hierop moet de filtering aangepast worden, door bijvoorbeeld een nieuwe tijdreeks te beginnen.

4.3.2 M.b.t. gegevens, zoals gekregen van beheerder

Gebruik hoge resolutie luchtfoto's als achtergrond voor de InSAR vervormingssnelheids-gegevens.

Navraag doen naar aard van uitgevoerde werkzaamheden (incl. onderhoud).

Type bekleding nog beter bekijken, i.v.m. de te verwachten reflecties.

Nagaan waar op het talud en wanneer golfklappen significant zijn (geweest)

4.3.3 M.b.t. inbreng van beheerder

Nagaan of onze bevindingen bruikbaar zijn als verificatie of aanvulling op de veiligheidstoetsing

Nagaan of onze bevindingen bruikbaar zijn als informatiebron voor toekomstig onderhoud

4.4 Actieplan (stappenplan) voor toekomstig gebruik van PS-InSAR gegevens

Gebruik hoge resolutie luchtfoto's als achtergrond voor de InSAR vervormingssnelheids-gegevens.

Navraag doen naar aard van uitgevoerde werkzaamheden (incl. onderhoud).

Gegevens binnen- en buitentalud beter scheiden, ook in smoothing proces (scatterers achter de dijk apart bekijken en dus niet meenemen in smoothing)

Beter in kaart brengen welke delen van de dijk reflecties zouden moeten geven (in verband met de kijkrichting van de satelliet, taludhelling, type bekleding, werking van getij, rietbegroeiing, etc.)

Criterium vaststellen voor puntendichtheid op de dijk die bruikbaar is om er zeker van te zijn dat de dijk(bekleding) acceptabel gedrag vertoont. D.w.z. er mogen geen belangrijke

reflecties ontbreken. Immers, reflecties kunnen wegvallen tijdens het analyse proces met als reden dat er iets mis kan zijn. Snelle deformaties groter dan enkele cm (van belang voor geotechnisch falen) vallen bijvoorbeeld weg. Indien de bestorting gedeeltelijk wegspoelt, ziet men dat ook niet meer terug. Hiertoe de filtering aanpassen.

De periodes voor en na een belangrijke gebeurtenis (werkzaamheden of een bepaalde storm) analyseren.

Nagaan waar op het talud en wanneer golfklappen significant zijn (geweest).

Het wegvallen en ontbreken van reflecties nader beschouwen.

Nagaan of onze bevindingen bruikbaar zijn als verificatie of aanvulling op de veiligheidstoetsing.
Indien er dijkvakken zijn met een verhoogd risico op een geotechnisch faalmechanisme, zoals zettingsvloeiing of piping, kan worden nagegaan of op die plaatsen het deformatiepatroon, zoals waargenomen met PS-InSAR, afwijkend is. Onderhavige studie is een eerste aanzet geweest tot het leggen van deze verbanden.

Nagaan of onze bevindingen bruikbaar zijn als informatiebron voor toekomstig onderhoud.
Onderhoudsmaatregelen, zoals het bestorten van taluds, uitvoeren van reparaties aan bekledingen, of dijkverhogingen, hebben consequenties voor de PS-InSAR waarnemingen.
Vaak vallen dan reflecties (tijdelijk) weg. Veranderingen die nopen tot onderhoud zijn mogelijk ook zichtbaar te maken.
In deze studie is een eerste aanzet hiervoor gegeven.