

EINDRAPPORT DE MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN VAN INSAR

Definitief

Studentgegevens:

naam:	Pascal Rooster
ID-code:	1565741
telefoon:	0610964659
e-mail:	booster119@gmail.com
datum:	04-06-2012
aantal pagina's:	71 (inclusief bijlagen)
afstudeerrichting:	Geodesie / geo-informatica
cursuscode:	TGEO-LAFO4-08

Hogeschool Utrecht:

ir. Hiddo Velsink (1^e docentbegeleider)
ir. Regine Brugelmann (2^e docentbegeleider)

RPS:

ing. Eric Buishand (1^e bedrijfsbegeleider)

Hansje Brinker:

dr. ir. Mathijs Schouten (2^e bedrijfsbegeleider)

Voorwoord

Dit eindrapport is gemaakt in het laatste jaar van de drie jaar durende duale opleiding geodesie/geo-informatica, Faculteit Natuur en Techniek, instituut voor de gebouwde omgeving aan de Hogeschool Utrecht. De scriptie is gemaakt in een samenwerkingsverband tussen RPS advies- en ingenieursbureau bv en Hansje Brinker bv.

Zonder inspanning van derden zou dit eindrapport niet op deze wijze vorm hebben gekregen. Om die reden wil ik een aantal mensen in het bijzonder bedanken. Allereerst Mathijs Schouten, voor de goede begeleiding in alle aspecten die bij het afstuderen komen kijken. Dankzij jou goede didactische manier van uitleggen (grote voeten grote mensen) is mijn kennis in InSAR enorm ontwikkeld in alle opzichten.

Voor de wekelijkse bezoeken gedurende de gehele afstudeerperiode wil ik alle medewerkers van Hansje Brinker bv bedanken voor de begeleiding, kennisoverdracht en de prettige samenwerking. De colleges radarinterferometrie aan de TU-Delft hebben de theoretische en praktische complexiteit van InSAR enorm verhelderd. Dankzij Ramon Hanssen heb ik de colleges samen met Eric Buishand vrijblijvend mogen volgen. Via deze weg wil ik mijn collega Eric Buishand bedanken voor de goede begeleiding bij het afstuderen en met name de goede begeleiding intern bij RPS. De ontwikkeling in kwaliteit, rapporteren, Move3, heb jij mij in de afgelopen jaren geduldig en in een prettige samenwerking bijgebracht. Voor de sturing bij het afstuderen binnen de Hogeschool Utrecht ben ik Hiddo Velsink zeer dankbaar voor de kritische en heldere feedback op het eindrapport en de sturing tijdens het gehele afstudeertraject. Voor de controle op spelling en zinsopbouw wil ik Gerda Vonk bedanken.

Allen die mij geholpen hebben en hier niet zijn genoemd wil ik hierbij alsnog bedanken.

Pascal Rooster
Breda, 21-05-2012

Samenvatting

RPS heeft brede expertise in terrestrische landmeetkundige technieken, maar is op zoek naar innovatieve uitbreiding van het scala aan inwinningsmethoden. Eén potentiële nieuwe techniek is het doen van deformatiemetingen vanuit de ruimte, door middel van radar satelliet metingen (InSAR). Het doel van het onderzoek is om een duidelijk overzicht te krijgen van de mogelijkheden en beperkingen van InSAR.

De opzet van het onderzoek in hoofdlijnen:

- Literatuuronderzoek. Het literatuuronderzoek heeft bruikbare informatie opgeleverd ter ondersteuning bij het opzetten van de casus.
- Casus. Bij de casus op de Haringvlietsluizen is de InSAR-meetmethode vergeleken met de terrestrische meetmethode. Omdat de twee methodieken nogal verschillen qua opzet, uitkomsten en interpretaties daarvan, is een een-op-een vergelijking niet zomaar mogelijk. Dit maakt dat enkele interpretatiestappen nodig waren die geleid hebben tot een kwantitatieve vergelijking van de methodes. Uit deze vergelijking tussen de resultaten van de waterpasmeting en de InSAR-meting is een standaarddeviatie van 3-4 mm berekend.
- Enquête. De enquête is opgesteld met het doel om mogelijke toepassingsgebieden te inventariseren. Met de enquête zijn meerdere collega's binnen RPS geïntroduceerd in de techniek van InSAR. Uit de enquêteresultaten zijn twee toepassingsgebieden geselecteerd voor nadere analyse.

De mogelijkheden en beperkingen van InSAR zijn in dit onderzoek goed zichtbaar geworden. De techniek is door het gebruik van diverse radarsatellieten werelddekkend. Omdat er al data verzameld zijn vanaf 1992, is het mogelijk om analyses uit te voeren terug in de tijd, wat voor veel toepassingen een groot voordeel kan opleveren.

De precisie van een InSAR-meting wordt op millimeterniveau bepaald. Met minimaal 20 waarnemingen kan er een betrouwbare meting gepresenteerd worden. De kwaliteit van de meting wordt bepaald door de combinatie van het aantal waarnemingen en de wijze waarop de waarnemingen correleren met het gekozen wiskundige model (lineaire, seizoens). De absolute locatie van een meetpunt wordt bepaald met een nauwkeurigheid tot enkele meters (afhankelijk van de satelliet), waarbinnen op basis van kennis van de radarreflecties de exacte locatie van de dominante reflectie geschat wordt. Met name op het gebied van deformatiemetingen heeft InSAR een duidelijk toegevoegde waarde op de huidige meetmethodieken bij RPS.

INHOUD

1	INLEIDING	5
2	PROBLEEMSTELLING EN AANPAK	6
3	ANALYSE VAN DE LITERATUUR	8
3.1	Samenvatting gebruikte casestudies	8
3.1.1	Bodemdaling Friesland	8
3.1.2	Monitoren van infrastructuur	9
3.1.3	Een monitoringstechniek voor de HSL-Zuid	10
3.2	Analyse	11
3.3	Bijdrage casus Haringvlietsluizen	12
4	ANALYSE VAN DE HUIDIGE PRAKTIJK	13
4.1	RPS	13
4.2	Hansje Brinker	15
4.2.1	Kwaliteit van permanente reflectoren	17
5	VAN RADARBEELD NAAR PERMANENTE REFLECTOR	21
5.1	Historie PS-InSAR	21
5.2	Depsi	24
6	CASUS HARINGVLIETSLUIZEN	28
6.1	Inleiding	28
6.2	Terrestrische meetmethode Haringvlietsluizen	28
6.3	InSAR-meting toegepast op de Haringvlietsluizen	30
6.4	De vergelijking	31
7	VRAGENLIJST (ENQUÊTE)	36
7.1	Inleiding	36
7.2	Voorgedragen toepassingsgebieden	37
7.3	Analyse toepassingsgebied 1 (Deformatiemeting aan woonboerderij)	40
7.4	Analyse toepassingsgebied 2 (zetting van gebouwen waar NAP-bouten in zitten)	43
7.5	Conclusies enquête	45
8	BEDRIJFECONOMISCH ASPECT.....	46
9	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	49
10	REALISATIE LEERDOELEN.....	52
11	BIJLAGEN	54
11.1	Definities van begrippen en afkortingen	54
11.2	Bronnen	56
11.3	Resultaat verticale terrestrische deformatiemetingen Haringvlietsluizen (alle metingen)	57
11.4	Resultaat horizontale terrestrische deformatiemetingen Haringvlietsluizen	58
11.5	Enquête	59
11.6	Grafieken vergelijking waterpassing en InSAR-meting op de Haringvlietsluizen	63
11.7	Resultaat InSAR-meting op de Haringvlietsluizen	71

1 INLEIDING

Voor RPS is het van belang om in deze krimpende markt, waarbij de concurrentie toeneemt, te zoeken naar innovaties. De afdeling landmeten zoekt naarstig naar een nieuwe innovatieve meetmethodiek die als nieuwe of aanvullende dienst aangeboden kan worden. Onderzocht is of InSAR kan dienen als nieuwe innovatieve meetmethodiek. Deze scriptie geeft het onderzoek weer.

Voor degene die niet bekend zijn met de basisprincipes van InSAR, wordt aangeraden om bijlage 11.1 'definities van begrippen en afkortingen', en vervolgens hoofdstuk 5 'van radarbeeld tot permanente reflector' als eerste door te nemen.

2 PROBLEEMSTELLING EN AANPAK

Algemeen

Het doel van het onderzoek is om een duidelijk overzicht te krijgen van de mogelijkheden en beperkingen van InSAR. De in dit onderzoek opgedane expertise maakt het mogelijk in te schatten wanneer InSAR bij projecten mogelijk een rol kan spelen en wanneer dit niet het geval is.

Bedrijfseconomisch gezien wordt onderzocht of InSAR een meerwaarde kan zijn als het ter aanvulling op onze huidige meetmethodieken aangeboden kan worden.

Praktijkvraag

Binnen de afdeling landmeten voeren wij metingen uit met het volgende meetinstrumentarium:

- Total station (afstanden en richtingen meter);
- Digitaal/analooq waterpasinstrument;
- GPS (zowel RTK als statische metingen worden uitgevoerd).

De metingen die verricht worden met het hierboven genoemde meetinstrumentarium zijn relatief duur. De grootste oorzaak hiervan is dat elk punt door mensenhand ingewonnen wordt. Met InSAR-metingen is het niet meer nodig om metingen in het veld met de hand te verrichten. Dit zou financieel een groot voordeel op kunnen leveren (voor de klant). De praktijkvraag is:

- Hoe betrouwbaar zijn de resultaten van InSAR-metingen.
- Waar zijn InSAR-metingen inzetbaar ter vervanging/aanvulling van conventionele meetmethoden.

Kennisvraag

- Dit onderzoek zal meer kennis verschaffen over de volgende onderwerpen:
- De toepassinggebieden van InSAR.
- De kwaliteit van InSAR-metingen.
- De financiële voordelen van InSAR-metingen ten opzichte van reguliere meetmethoden.

Competenties

- Het kunnen beoordelen of InSAR geschikt is als meetmethode bij een opdracht.
- Het verbeteren van rapportagevaardigheden.
- Het beoordelen van kwaliteit (meetkwaliteit).

Probleemstelling

Voor RPS is het van belang om in deze krimpende markt, waarbij de concurrentie toeneemt, te zoeken naar innovaties. De afdeling landmeten is druk bezig met het vinden van een nieuwe innovatieve meetmethodiek die als nieuwe of aanvullende dienst aangeboden kan worden.

Onderzoeksvragen

Dit onderzoek beperkt zich tot een nieuwe innovatieve meetmethodiek, gericht op InSAR-metingen.

Om een beter beeld te krijgen van wat er onderzocht kan worden, heb ik voor de aanvang van het schrijven van het plan van aanpak verschillende casussen¹ doorgenomen. Met behulp van deze informatie heb ik meer inzicht gekregen om de juiste onderzoeksvragen te formuleren. Op de volgende onderzoeksvragen dienen antwoorden geformuleerd te worden:

¹ De verschillende casussen zijn opgenomen in hoofdstuk 11.2 bronnen van het eindrapport.

- In tegenstelling tot de reguliere inwinningsmethoden is het interpreteren van resultaten die verkregen zijn door middel van InSAR-metingen relatief lastig. Zo is bijvoorbeeld de exacte locatie van het reflectiepunt vaak niet exact te bepalen. In dit onderzoek zal duidelijk moeten worden hoe omgegaan moet worden met deze -en mogelijk andere- interpretatiekwesties.
- Toepassing van InSAR zal niet overal tot bruikbare resultaten leiden. De vraag is voor welke werkzaamheden InSAR gebruikt kan worden.
- Is het mogelijk een adequate kwaliteitsbeschrijving van de met InSAR verkregen resultaten te geven? Naast de vraag naar de kwaliteit van de ingewonnen data is een belangrijke vraag hoe de kwaliteit getoetst en gewaarborgd kan worden.
- Is het financieel interessant in vergelijking met conventionele meetmethoden?

Methoden en technieken

De bij de probleemstelling geformuleerde onderzoeksvragen wil ik met de volgende methoden en technieken inzichtelijk en toetsbaar maken:

- Analyse van de literatuur (hoofdstuk 3).
- Casus Haringvlietsluizen (hoofdstuk 6).
- Vragenlijst (enquête) (hoofdstuk 7).

Om InSAR als nieuwe meetmethodiek te kunnen aanbieden zal de kwaliteit inzichtelijk gemaakt moeten worden. In dit onderzoek wil ik de kwaliteit van de data toetsen op basis van een casus waarbij de Haringvlietsluizen, die normaliter gemeten worden door middel van waterpassing en tachymetrie, te vergelijken met metingen die uitgevoerd worden met behulp van InSAR. De volgende onderdelen zullen behandeld worden bij deze casus:

- Bij terrestrische metingen op de Haringvlietsluizen worden er vanuit de waarnemingen coördinaten berekend in XY en Z-richting. Bij InSAR-metingen worden er hoogteverschillen berekend vanuit de waarnemingen die gedaan worden vanuit de kijkrichting van de satelliet. Om een vergelijking te kunnen doen tussen InSAR-metingen en terrestrische metingen dient er een translatie uitgevoerd te worden.
- De verwerkingsstappen die nodig zijn om te komen tot het eindresultaat.
- De controles die in het proces zijn ingebouwd.

Om meer inzicht te krijgen waar InSAR mogelijk toegepast kan worden, zal ik met behulp van een vragenlijst meerdere personen vanuit verschillende afdelingen binnen RPS hierover ondervragen. Om deze personen een goed beeld te geven van InSAR wordt er met behulp van een begeleidende brief en/of met een bijeenkomst in samenwerking met Hansje Brinker uitleg verstrekt. De verschillende potentiële toepassingen die uit de vragenlijst naar voren komen zullen op basis van theoretisch opgedane kennis en daar waar mogelijk met behulp van een zogenaamde quickscan worden beoordeeld. De quickscan zal aan de hand van de volgende criteria worden beoordeeld:

- Zijn er genoeg bruikbare persistent scatterers beschikbaar.
- Is de aangegeven deformatiesnelheid bruikbaar voor de desbetreffende geformuleerde toepassing.
- Is er eventueel een vergelijking mogelijk met de huidige meetmethode.

3 ANALYSE VAN DE LITERATUUR

Inleiding

In paragraaf 3.1 wordt er een samenvatting gegeven van drie casestudies. Bij de samenvatting worden teksten uit het desbetreffende onderzoek letterlijk geciteerd. In paragraaf 3.2 wordt er een analyse uitgevoerd op de bevindingen die samengevat zijn in paragraaf 3.1. Zowel de samenvatting als de analyse is gebaseerd op drie punten:

- Vergelijkingsproblemen tussen InSAR en terrestrische inwinmethoden.
- De kwaliteit van InSAR-metingen.
- Toepassingsgebieden van InSAR-metingen.

In paragraaf 3.3 wordt er gekeken of, en op welke manier, de gekozen literatuur een bijdrage levert aan de analyse die in hoofdstuk 6 'Casus Haringvlietluizen' wordt uitgevoerd.

3.1 Samenvatting gebruikte casestudies

3.1.1 Bodemdaling Friesland

In dit onderzoek [Muntendam, 2009] is onderzocht of InSAR een bijdrage kan leveren aan beter inzicht in de omvang en interpretatie van de bodemdaling in Noordwest-Friesland. Bij het bepalen van bodemdaling volgens de reguliere methoden wordt er gekeken naar NAP-peilmerken, waarbij de daling bepaald wordt ten opzichte van ondergrondse merken.

(Vergelijkingsprobleem)

- De deformatie die door de satelliet aan de meetpunten wordt waargenomen is in de kijkrichting van deze satelliet. Doordat deze kijkrichting zeer stijl is (ongeveer 23 graden vanuit de verticaal) en er minimale horizontale deformatie wordt verwacht, is de deformatie die mogelijk gemaakt is in het horizontale vlak verwaarloosd.
- Een directe vergelijking tussen de waterpassing en permanente reflectoren was niet mogelijk omdat de permanente reflectoren en de NAP-peilmerken niet op hetzelfde tijdstip en dezelfde locatie gemeten zijn. Het vergelijkingsprobleem van het tijdstip is gecorrigeerd door het deformatieverschil tussen twee meetepoche lineair te schatten. En om een vergelijking te maken in ruimte is het locatieprobleem opgelost door beide datasets te interpoleren (door middel van de interpolatietechniek kriging).

(Kwaliteit)

- Uit de conclusie van dit onderzoek blijkt dat de bodembeweging van InSAR-metingen goed overeenkomt met bodembeweging bepaald uit gewaterpaste peilmerken.
- De kwaliteit van de radarmetingen is intrinsiek verschillend voor elk meetpunt. Radarreflecties kunnen immers afkomstig zijn van veel verschillende objecten in het terrein, met verschillende fysische en reflectie-eigenschappen. Daarnaast is de kwaliteit van de geschatte parameters afhankelijk van het aantal beschikbare radaracquisities en hun verdeling in de tijd, en van de gesteldheid van het radarinstrument. De kwaliteit is voor deze datasets empirisch geschat door de standaardafwijking van honderden metingen in Harlingen te gebruiken, onder de aanname dat Harlingen niet beïnvloed wordt door significante bodembeweging. Hieruit volgt dat de standaardafwijking van een enkele deformatieschatting 2,7 mm is voor de ERS dataset, en 2,1 mm voor de Envisat dataset. (Ter vergelijking: de kwaliteit van de uiteindelijk vereffende hoogtemeting met waterpassing wordt geschat op 2,5 mm; deze vergelijking heeft in dit onderzoek plaatsgevonden).
- Er wordt in dit onderzoek ook een opvallend verschil in het vinden van permanente reflectoren tussen twee verschillende satellieten geconstateerd. De ERS-2 satelliet verkrijgt ongeveer 800

permanente reflectoren en de Envisat dataset ongeveer 3300 permanente reflectoren. Het verschil wordt verklaard door de variaties in de stabiliteit van de radarsensor van de ERS-2 satelliet.

- In het onderzoek is gebleken dat in de standaard nulhypothese fasemeerduidigheden kunnen optreden bij radarpunten in meer geïsoleerd liggende gebieden. Het toepassen van een alternatieve hypothese om het deformatiegedrag te beschrijven heeft dit probleem opgelost.

(Toepassingsgebieden)

- De interpretatie van bodemdaling gebaseerd op enkel peilmerk- of InSAR-data kan significant anders zijn dan een interpretatie van beide technieken gecombineerd. Bij het bepalen van de bodemdaling wordt geadviseerd om daar waar meerdere databronnen aanwezig zijn, alle data te gebruiken. Uit deze bevinding kunnen we concluderen dat InSAR wel geschikt is om als hybride techniek te fungeren bij het bepalen van bodemdaling.

3.1.2 Monitoren van infrastructuur

Dit onderzoek [Arroyo, 2009] bekijkt de mogelijkheid of InSAR een toegevoegde waarde kan zijn bij het monitoren van de spoortunnel in Delft.

(Vergelijkingsprobleem)

- In dit onderzoek is geen meetkwaliteitsvergelijking gedaan tussen InSAR en een andere inwinningsmethode. Wel is er een vergelijking gedaan naar de voordelen/nadelen ten opzichte van Lidar, fotogrammetrie, tachymetrie, waterpassen en GPS op de volgende onderdelen: kosten, nauwkeurigheid, puntafstand, gebiedsdekking, meetinterval en inzetbaarheid bij weersomstandigheden. De tabel in afbeelding 3.1 laat hiervan de uitkomst zien.

		Cost	Accuracy level (10^{-x} m)	Point spacing (10^{-x} m)	Covered area/time	Possible repeat interval	Unavailability due to
Lidar	Satellite	very low	0	< 0	very high	limited	weather
	Aerial	low	2	2	high	on demand	weather
	Terrestrial	medium	3	3	medium	continuous	obstructions
Photogrammetry	Satellite	very low	0	< 0	very high	limited	weather, night
	Aerial	low	2	0	high	on demand	weather, night
	Close range	medium	≥ 4	3	low	continuous	obstructions
Tachymetry		very high	3	1	low	continuous	obstructions
Levelling		very high	≥ 4	0	very low	on demand	obstructions
GPS		high	3	0	medium	continuous	obstructed sky
PSInSAR		low	≥ 4	1	very high	limited	vegetation

Afbeelding 3.1: In de tabel wordt een vergelijking gedaan tussen verschillende inwinningsmethoden. PSInSAR toont volgens deze tabel aan dat het lage kosten heeft in vergelijking met de andere inwinningsmethoden, een hoog nauwkeurigheid behaalt (0.1mm), een groot gebied in een keer kan meten, een beperkte interval heeft en niet toepasbaar is op vegetatie.

In de derde kolom staat letterlijk vertaald het nauwkeurniveau. Dit moet hoogstwaarschijnlijk de afleesnauwkeurigheid van de desbetreffende techniek zijn. De overige kolommen geven een goed beeld van de voordelen en nadelen van de verschillende inwinmethodieken onderling.

(Kwaliteit)

- Het absolute coördinaatverschil in zowel het horizontale (lengtebreedtegraad) als het verticale vlak (NAP) is te reduceren tot op drie meter nauwkeurig.
- Er wordt gesuggereerd dat de locatie van de permanente reflectoren relatief betrouwbaarder bepaald kan worden ten opzichte van de absolute locatie. De bewering wordt niet gefundeerd door een berekening.

- De nauwkeurigheid waarop de deformatie bepaald is wordt in dit onderzoek uitgedrukt in een MDB-waarde (Minimum Detectable Bias, het punt waarop je kan zeggen dat er daadwerkelijk sprake is van deformatie) en is gesteld op 1.1 mm in de verticale richting en 1.6 tot 31 mm in de horizontale richting (de horizontale richting is bij deze casus berekend door gebruik te maken van de opgaande en neergaande baan van de satelliet).
- De permanente reflectoren zijn bepaald aan de hand van een hypothese dat er enkel lineaire deformatie mogelijk is. In het onderzoek wordt aangeraden om gebruik te maken van meerdere hypothesen, mede omdat er bij de gebruikte hypothese temperatuursinvloeden niet meegenomen worden in de berekening. Dit terwijl er wel priori kennis aanwezig was over het uitzettingscoëfficiënt van de gebouwen in Delft en dat dit verschillen kunnen opleveren tot 30 mm bij een meting uitgevoerd in de winter ten opzichte van een meting in de zomer.

(Toepassingsgebied)

- Het uitvoeren van een PSI-analyse in een bebouwd gebied levert een punt dichtheid van ongeveer 5000 permanente reflectoren per vierkante kilometer op (TerraSAR-X satelliet). Deze constatering laat zien dat InSAR zeer geschikt is in bebouwde omgeving.

3.1.3 Een monitoringstechniek voor de HSL-Zuid

In dit onderzoek [Duijts, 2008] is er gekeken of InSAR kan dienen als toegevoegde waarde bij het monitoren van de Hogesnelheidslijn. In deze casus wordt er een stuk spoorrail gemeten waarbij er voornamelijk deformatie verwacht wordt in XY door de naastgelegen rijksweg A4.

(Vergelijkingsprobleem)

- Er is geen correlatie waargenomen tussen de terrestrische meting en de InSAR-meting.
- Het is in dit onderzoek moeilijk geweest om een betrouwbare vergelijking te kunnen maken tussen de terrestrische metingen en de meting uit permanente reflectoren.

(Kwaliteit)

- Volgens de antwoorden die verkregen zijn door het interview met Ramon Hanssen van de TU Delft, zijn er minimaal twintig radarbeelden nodig om goede permanente reflectoren te bepalen.
- In dit onderzoek zijn maar 9 radarbeelden beschikbaar omdat het te meten gebied nog vrij nieuw is. De kwaliteit waarmee de permanente reflectoren zijn bepaald, is in strijd met de grens van minimaal twintig beelden uit het interview met Ramon Hanssen.
- In een relatief landelijk gebied komen in dit onderzoek meer fouten voor bij het oplossen van fase-meerduidigheden dan in een stedelijk gebied.

(Toepassingsgebied)

- SAR-beelden bevatten informatie over de gronddekkende laag.
- Er kunnen gaten voorkomen in de dichtheid van de PS-punten wanneer er grote niet-lineaire bewegingen voorkomen. Om deze fouten op te lossen moet er gebruikgemaakt worden van geavanceerde verwerkingstechnieken die veel tijd en geld kosten.
- Grote gebieden analyseren om kleine gebieden te detecteren die deformerend zijn.
- In de eindconclusie wordt geformuleerd dat InSAR een niet op zichzelf staande techniek is.

Voordelen PS-InSAR	Nadelen PS-InSAR
■ Geen hinder door metingen op het terrein. ■ Vervangende techniek voor monitoren van objecten. ■ Resultaten zijn precies en betrouwbaar. ■ Voordelige verhouding kosten/resultaat. ■ Geschiedenis van een terrein kan worden bekeken tot 1992. ■ Hoge punt dichtheid in bevolkte gebieden.	■ Niet van tevoren kunnen voorspellen welke objecten juiste reflectie geven. ■ Niet altijd de gewenste data kunnen verkrijgen. ■ Soms kunnen er simpelweg geen PS punten voorkomen in het terrein. ■ PS-InSAR meet enkel kleine deformaties.

Afbeelding 3.2: In het schema worden de voor- en nadelen benoemd van PS-InSAR. Bij de voordelen wordt geschreven dat PS-InSAR een vervangende techniek is voor het monitoren van objecten. Dit komt niet overeen met de bevindingen uit dit en overige onderzoeken. Dat PS-InSAR precies en betrouwbaar is zal niet voor elke situatie, elk doel gelden. De overige punten geven wel een goed beeld van de voor- en nadelen van PS-InSAR.

3.2 Analyse

Vanaf april 2011 is er voor dit onderzoek gezocht naar informatie over InSAR. In het begin is er voornamelijk gezocht naar de techniek en de mogelijkheden van InSAR. In mei 2011 is er contact geweest met Hansje Brinker bv die bereid was ons (RPS) te ondersteunen bij dit afstudeeronderwerp. Na diverse overleggen hebben we, Hansje Brinker en RPS, in december 2011 een overeenkomst gesloten om een casus op de Haringvlietsluizen uit te voeren (zie hoofdstuk 6 'Casus Haringvlietsluizen'). Vervolgens zijn we specifieker gaan zoeken naar literatuur waarin een casus behandeld wordt die vergelijkbaar is met een casus op de Haringvlietsluizen. Bij de zoektocht zijn de drie hierboven behandelde casussen gevonden.

De opvallende bevindingen zoals beschreven bij de casestudies (paragraaf 3.1) zijn besproken en geanalyseerd samen met Hansje Brinker. De belangrijkste bevindingen hiervan zijn hieronder puntsgewijs weergegeven.

Vergelijkingsproblemen tussen InSAR en terrestrische inwinmethoden

- Als de horizontale deformatie in de vergelijking verwaarloosd kan worden. Dan is een eenvoudige transformatie van deformatie in de kijkrichting van de satelliet naar deformatie in Z-richting mogelijk door de met InSAR bepaalde deformatie te vermenigvuldigen met 1.08 (zie hoofdstuk 5 'van radarbeeld naar permanente reflector').

De kwaliteit van InSAR-metingen

- Het is mede door de literatuur duidelijk geworden dat er minimaal twintig waarnemingen (radarbeelden) nodig zijn om een kwalitatieve InSAR-meting te kunnen uitvoeren.
- Het bepalen van de standaardafwijking bij een InSAR-meting hangt mede af van het gekozen model/hypothese. Zo kunnen er bij het analyseren van de resultaten verkeerde aannamen gedaan worden als er geen priori kennis is over de zetting van het object, gebied. Als het verkeerde model (lineaire, seizoen, enzovoort) gekozen wordt, zou een permanente reflector die door de jaren heen veel beweging vertoont door bijvoorbeeld de wisseling van de seizoenen, als onbetrouwbaar meetpunt gezien kunnen worden als er geen seizoen in de berekening meegerekend wordt. Bij het verwerken van een permanente reflector dienen er aannamen (modelkeuze) gedaan te worden

waardoor het berekenen van een standaardafwijking minder betrouwbaar is dan een berekende standaardafwijking van een waterpassing.

- Hansje Brinker bevestigt dat er een verschil in gevonden permanente reflectoren tussen de ERS-2 satelliet en de Envisat satelliet mogelijk te wijten is aan de stabiliteit van de radarsensor van de ERS-2 satelliet. Het verschil in het aantal gevonden permanente reflectoren zegt volgens Hansje Brinker niks over de kwaliteit van de gevonden permanente reflectoren.
- Per satelliet is de kwaliteit van het absolute coördinaatverschil anders en varieert tussen de 0.5 meter (bijvoorbeeld TerraSAR-X) en 5 meter (bijvoorbeeld ALOS) nauwkeurig. De relatieve nauwkeurigheid tussen de permanente reflectoren onderling is nauwkeuriger en varieert tussen de 0 en 1 meter.

Toepassingsgebieden van InSAR-metingen

- Een relatief landelijk gebied zal minder permanente reflectoren opleveren. Er wordt in het onderzoek [Duijts, 2008] beweerd dat dit zal leiden tot meer fouten in het oplossen van fasemeerduidigheden. Hansje Brinker weet niet of er een directe relatie is tussen het aantal beschikbare permanente reflectoren en het oplossen van fasemeerduidigheden.

3.3 Bijdrage casus Haringvlietsluizen

- De orde grootte van relatieve deformatie in verticale richting bepaald met behulp van waterpassing op de Haringvlietsluizen, ligt tussen de nul en tien millimeter over een periode van 16 jaar. Bij het verkeerd oplossen van de fasemeerduidigheden kunnen er waarnemingen in de InSAR-dataset ontstaan met een afwijking van 28 mm (Envisat golflengte 56 mm). Om een goede vergelijking te kunnen maken is het onacceptabel dat er zich te veel fasemeerduidigheden in de InSAR-dataset bevinden.
- De interpretatie van bodemdaling op basis van een gecombineerde dataset (InSAR en Peilmerkdata) verschilt significant t.o.v. beide technieken afzonderlijk [Muntendam, 2009]. Aan de hand van deze conclusie is het verstandig om ook bij de Haringvlietsluizen een analyse uit te voeren per dataset (InSAR en waterpas) afzonderlijk en gecombineerd.
- Bij de casus [Arroyo, 2009] wordt beweerd dat het mogelijk is om de absolute positie van een permanente reflector te bepalen op drie meter nauwkeurig. Op de Haringvlietsluizen is per pilaar een regulier meetpunt geplaatst. De tussenruimte tussen de pilaren is ongeveer 57 meter. Als de locatie van een permanente reflector bepaald kan worden op 3 meter nauwkeurig, is de kans groot dat zowel de permanente reflector als de reguliere meetpunten de deformatie van de betonnen pilaar beschrijven.
- De Haringvlietsluizen zijn al sinds 1970 in gebruik. Er worden al radarbeelden opgenomen vanaf 1992, waardoor er voldoende beelden beschikbaar zijn om permanente reflectoren te bepalen.
- Een vergelijking tussen verschillende meetmethodieken is een universeel probleem. Bij de Haringvlietsluizen zijn er per pilaar zes meetpunten aangebracht: zowel aan de zee- als de landzijde drie (twee Z-meetpunten en een XY-meetpunt). De Z-meetpunten per zijde en per pilaar vertonen hetzelfde deformatiegedrag waardoor de aanname gedaan kan worden dat de gehele pilaar hetzelfde beweegt.

4 ANALYSE VAN DE HUIDIGE PRAKTIJK

4.1 RPS

Bij RPS wordt de huidige procedure van een deformatiemeting geanalyseerd vanaf de opdracht tot het eindproduct. Als hulpmiddel hierbij is er een stroomschema gemaakt waarvan de beslissings-, controle- en productiestappen hieronder worden beschreven.

Aanvraag offerte

Vanuit de vraag van de opdrachtgever wordt een offerte opgesteld. In de meeste gevallen moet de vraag van de opdrachtgever verder toegelicht worden om te bepalen aan welke eisen de opdracht moet voldoen.

Voorverkenning

Bij de meeste opdrachten is er geen fysieke voorverkenning in het veld nodig en fungeert Google-Earth als prima hulpmiddel bij het uitvoeren van deze stap. Bij het voorverkennen dient een aantal vragen beantwoord te worden:

- Keuze meetinstrumentarium.
- Tijdbesteding (uitvoeren en verwerken).

Bepalen meetopzet

Bij deze productiestap wordt er op basis van parate kennis binnen de organisatie, en in sommige gevallen aanvullend met een verkenningberekening in Move, bekeken op welke manier de meting uitgevoerd dient te worden om te voldoen aan de gestelde eisen. Als de meetopzet bepaald is, wordt de offerte voor het uitvoeren van de opdracht opgesteld.

Meting uitvoeren

Na het opstellen van de offerte en na goedkeuring van de opdrachtgever wordt de meting uitgevoerd. De landmeter levert dagelijks de ingewonnen data in bij de desbetreffende projectleider of landmeetkundig rekenaar. De data wordt op een eenduidige gestructureerde wijze opgeslagen zodat de database consistent en overzichtelijk blijft.

Berekening uitvoeren

De ruwe meetdata worden bij deformatiemetingen door middel van drie softwarepakketten bewerkt:

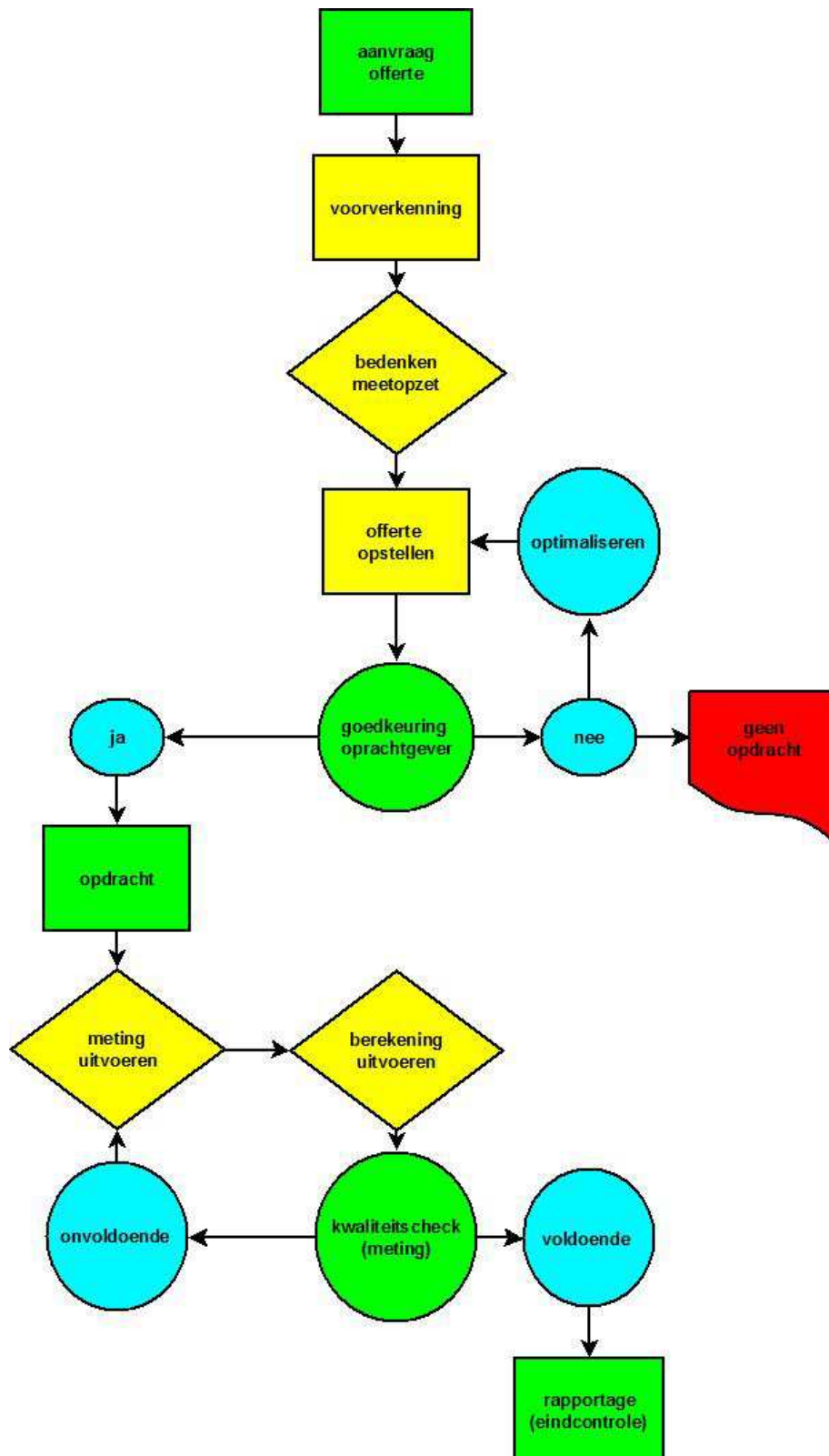
- Georeken. Dit zelfgeschreven pakket is ontworpen voor meerdere doeleinden. Bij deformatiemetingen heeft het pakket als hoofdtak om de ruwe meetdata (tachymetrie) om te zetten naar een leesbaar formaat voor Move3.
- LGO (Leica Geo Office). Als er bij de verwerking in Move3 foutieve waarnemingen geconstateerd worden, biedt LGO de mogelijkheid om de ruwe meetdata verder te analyseren op de ingevoerde parameters (prismaconstante, luchtdruk, temperatuur). LGO biedt ook de mogelijkheid om statische GPS-metingen om te rekenen naar GPS-basislijnen, waarna het mogelijk is om deze in Move3 te laden.
- Move3. Per meetepoche wordt er een vereffening uitgevoerd met Move3. Op basis van de gestelde eisen wordt het kansmodel van de waarnemingen en de stations ingevuld. Nadat alle toetsen geaccepteerd zijn wordt er een kwaliteitscheck uitgevoerd.

Kwaliteitscheck (meting)

De kwaliteit van de meting hangt af van de behaalde precisie en de betrouwbaarheid. In het automatisch gegenereerde meetrapport (door Move3) staan een aantal belangrijke parameters (standaardafwijking, redundantiegetal, MDB-waarde) die gebruikt worden om de kwaliteit van de meting te beoordelen. Als de kwaliteit niet voldoet aan de gestelde eisen, worden er bijmetingen uitgevoerd. Voldoet de meting dan wordt er een (meet/kwaliteits)rapportage opgesteld.

Rapportage (eindcontrole)

Het rapport wordt op spelling en presentatie beoordeeld door het secretariaat. Als alles gereed is voor oplevering wordt er aan de hand van een checklist een eindcontrole uitgevoerd, zodat de kwaliteit van het opgeleverde product gewaarborgd is.



Afbeelding 4.1 stroomschema verwerking deformatiemeting RPS (lichtblauw beslissingsstappen), (groen controlestappen), (geel productiestappen), (rood opdracht afwijzen).

4.2 Hansje Brinker

Om de huidige praktijk van Hansje Brinker te analyseren is er gezamenlijk een stroomschema opgezet waarvan de beslissings-, controle- en productiestappen hieronder worden beschreven.

Inschatting mogelijkheden

Als er een opdracht binnenkomt wordt die op een aantal punten beoordeeld:

- Welke satellietbeelden (en het daarbij beschikbare tijdpad) zijn er voor de desbetreffende opdracht beschikbaar:
 - resolutie;
 - periode van opnamen.
- Worden er terrestrische metingen uitgevoerd en is er een vergelijking mogelijk met terrestrische metingen.
- Is de opdracht theoretisch mogelijk.
- Hebben er op de desbetreffende locatie in het verleden werkzaamheden plaatsgevonden die van invloed zijn bij het produceren van permanente reflectoren.

Quickscan

Wordt de opdracht als uitvoerbaar ingeschat, dan volgt er een quickscan. Voor deze quickscan worden parameters gekozen waarmee de kans groot is dat er betrouwbare permanente reflectoren geproduceerd worden.

Kwaliteitscheck

Bij deze bewerkingssap wordt er een kwaliteitscheck door Hansje Brinker uitgevoerd. De geselecteerde permanente reflectoren zijn op basis van het fasecoherentiegetal gekozen. Het fasecoherentiegetal (getal tussen de 0 en 1) geeft een beschrijving van de mate waaraan de meting aan het gekozen model voldoet. De betrouwbaarheid van het fasecoherentiegetal varieert met het aantal gebruikte radarbeelden.

Dichtheidscheck

Deze stap in het stroomschema wordt bepaald door de specificaties van de opdrachtgever. Op basis van een quickscan is het merendeel in orde grootte van 70 procent van alle permanente reflectoren gevonden. De opdrachtgever bepaalt of het aantal te verwachten permanente reflectoren voldoende is voor de desbetreffende opdracht. Na deze stap begint het offertetraject.

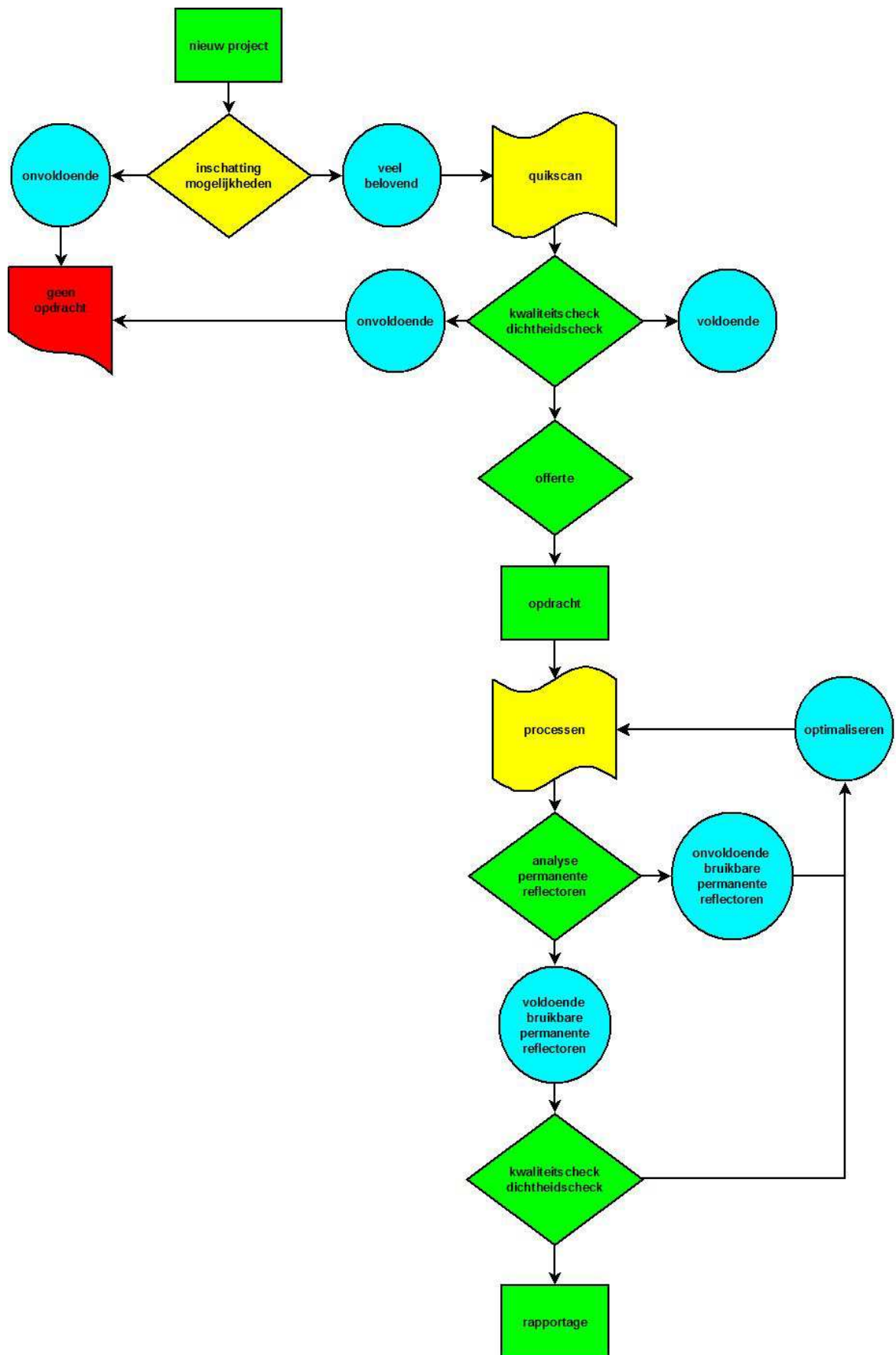
Verwerken

Deze stap wordt uitvoerig beschreven in hoofdstuk 5 van 'radarbeeld naar permanente reflector'.

Analyse permanente reflectoren

Een analyse wordt uitgevoerd op basis van de volgende onderdelen:

- Komt het gekozen model overeen met de werkelijkheid.
- Komen de InSAR-metingen overeen met de verwachte deformaties.
- Is er een stabiel referentiepunt gekozen.
- Welke soorten ruis kunnen er van invloed zijn op de gemeten hoogteverschillen.



Afbeelding 4.2 stroomschema verwerking Hansje Brinker (lichtblauw beslissingsstappen), (groen controlestappen), (geel productiestappen), (rood geen opdracht).

4.2.1 Kwaliteit van permanente reflectoren

Inleiding

In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op de kwaliteit van permanente reflectoren. De paragraaf is opgedeeld in twee onderwerpen:

- kwaliteitsbeoordeling
- kwaliteitscontrole

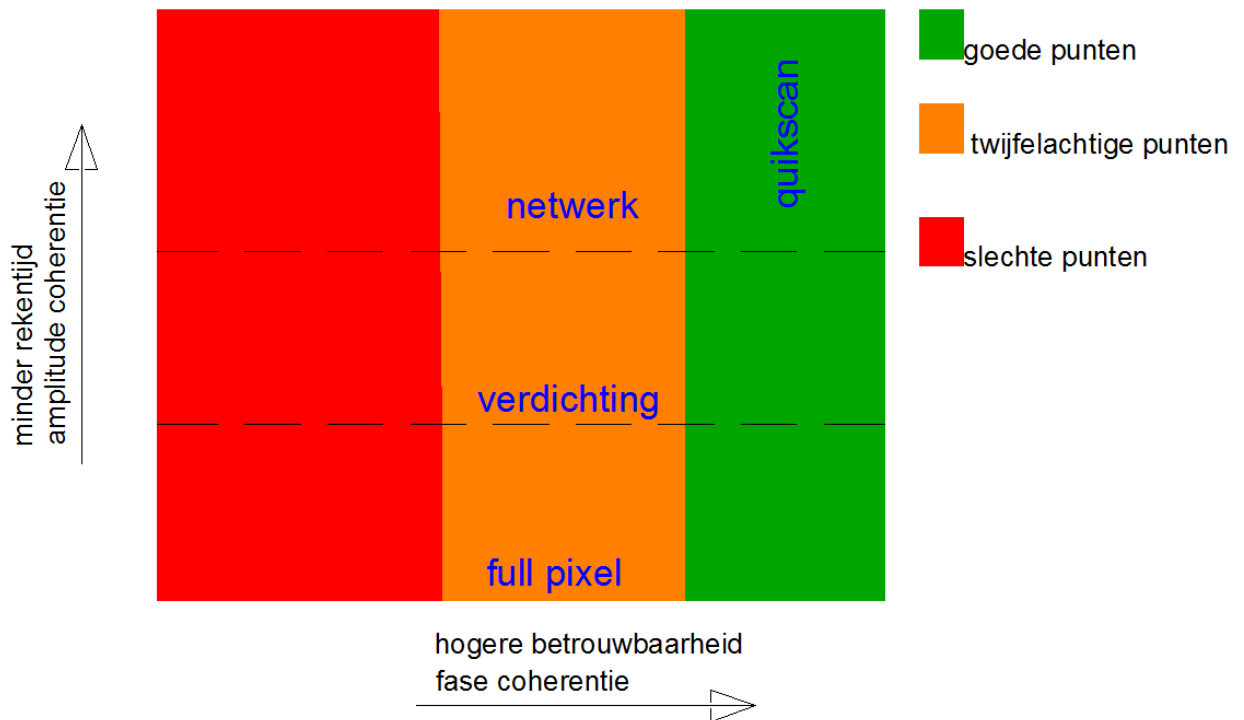
Kwaliteitsbeoordeling

Het beoordelen van de kwaliteit van een permanente reflector betekent voor de meeste geodeten een andere denkwijze ten opzichte van terrestrische metingen. Bij terrestrische metingen is het te meten punt in de meeste gevallen duidelijk aanwijsbaar, denk aan een messingboutje in een huis of viaduct. Bij een InSAR-meting is de locatie van het gemeten punt lastiger aan te wijzen. Binnen een pixel hebben meerdere reflecties een rol in het schatten van de fase. Vaak is aan de hand van de hoogteschatting een goede indicatie te geven van de reflectielocatie, maar dat is niet altijd het geval. Een nauwkeurigheid tot enkele meters in zowel hoogte- als horizontale positionering maakt dat niet altijd duidelijk is aan te wijzen waar een reflectie vandaan komt.

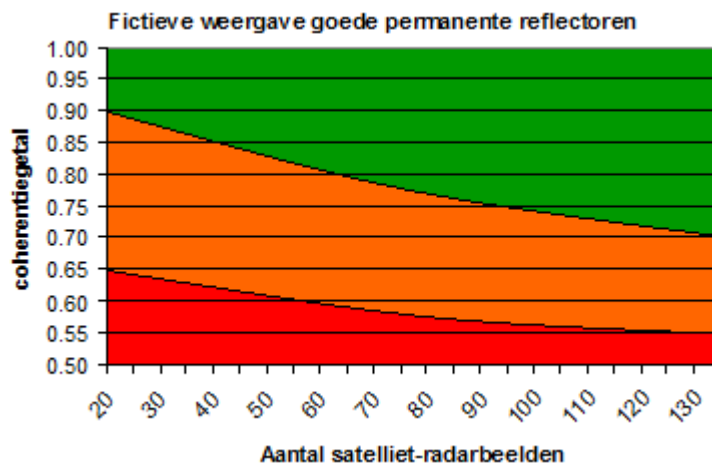
Het interpreteren van de meetlocatie blijft een onzekere factor bij de beoordeling van een InSAR-meting.

In afbeelding (4.3) is een aantal niveaus van InSAR-analyse schematisch aangeduid. Het opgevangen signaal door de radarsensor bestaat uit informatie over de fase en amplitude. Langs de verticale as wordt de amplitudecoherentie aangegeven. Langs de horizontale as wordt de fasecoherentie weergegeven, die een maat is voor de betrouwbaarheid en precisie van de meting op een punt.

De amplitudecoherentie langs de verticale as is een initiële inschatting van de verwachte kwaliteit van een meetpunt. Een initiële inschatting met behulp van punten met een hoge amplitudecoherentie kan snel gedaan worden en vergt weinig rekentijd. Wanneer een lage punt dichtheid nodig is, kan worden volstaan met een beperkte set kandidaatpunten (punten geselecteerd op amplitudecoherentie), en dus een snelle berekening. Voor een initieel netwerk (met een dichtheid van enkele goede punten per km²) is dit de aangewezen methode. Wanneer meer kandidaatpunten worden meegenomen (omlaag langs de verticale as) kost dit meer rekentijd, maar worden er ook veel meer goede punten gevonden. Als het om een analyse van een groot gebied gaat, zoals een provincie, waarbij de grootschalige beweging in kaart wordt gebracht (bijvoorbeeld bodemdaling als gevolg van mijnbouw), is de hiermee bereikte punt dichtheid vaak goed genoeg. Een analyse op volle resolutie (full pixel) kost aanzienlijk veel meer rekentijd, maar levert de hoogst mogelijke punt dichtheid. Vaak wordt dit gedaan als het om wat kleinere gebieden gaat, zoals een woonwijk of een gemeente.



Afbeelding 4.3 kwaliteitsbeoordeling. Er zijn bewust geen getallen geplaatst. Dit komt omdat het berekende coherentiegetal sterk varieert met het aantal beschikbare radarbeelden. Zo zal een permanente reflector met een coherentiegetal van 0.7 bij 64 beelden in het groene gebied vallen. In tegenstelling tot een permanente reflector met een coherentiegetal van 0.7 bij 20 beelden (zie afbeelding 4.4).



(Afbeelding 4.4) Een fictieve weergave van de grens tussen goede en twijfelachtige permanente reflectoren. Het is een fictieve weergave omdat de grens afhankelijk is van allerlei parameters zoals de manier van opnemen, en de locaties van de satelliet op de momenten van opname.

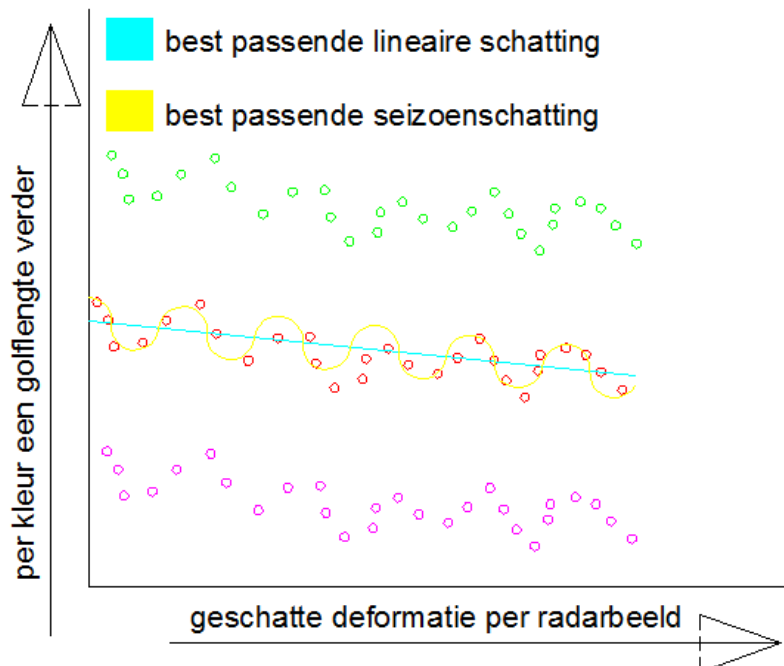
Verticale as (afbeelding 4.3)

- De amplitudecoherentie geeft de sterkte van de reflectie binnen een pixel weer. Naarmate de sterkte van een reflectie binnen een pixel toeneemt, des te groter is de kans dat de pixel een coherente fase heeft. Dit betekent dat met veel minder rekenwerk een behoorlijk deel van de 'goede' punten wordt gevonden. Om alle goede punten te vinden, moeten ook alle pixels worden doorgerekend. Dat is veel meer werk en wordt dus niet voor grote gebieden gedaan wanneer het niet nodig is om de benodigde punt dichtheid te bereiken.
- Het analyseren van grote gebieden vergt veel reken capaciteit en tijd. Om de rekentijd te reduceren wordt er mede bij een quickscan een analyse gemaakt op een select aantal pixels met een hogere

amplitudecoherentie. Het is goed mogelijk dat een pixel met een lage amplitudecoherentie een coherente fase heeft in de tijd. In de meeste gevallen wordt de analyse dan ook opgedeeld in twee gebieden. Het interessegebied en een groot gebied om het interessegebied heen dat gebruikt wordt om de verschillende bijdragen (deformatie, atmosfeer, topografie en ruis) aan de fase te schatten. In het interessegebied worden meerdere punten en soms alle punten (Full pixel analyse) geanalyseerd op een coherente fase, door de parameters van de amplitudecoherentie te verlagen.

Horizontale as (afbeelding 4.3)

- Het fasecoherentie getal beschrijft de verhouding tussen de geschatte deformaties en het gekozen model. In de meeste gevallen wordt er gekozen tussen het lineaire model en een seizoensmodel (afbeelding 4.5 voorbeeld seizoensmodel en een lineair model) of een combinatie van beide modellen. Als het te analyseren gebied een significante deformatie in orde grootte van enkele centimeters heeft meegemaakt op tijdstip/periode X, is het noodzakelijk om dit in het model mee te schatten.



Afbeelding 4.4 'voorbeeld seizoensmodel en een lineair model': In de afbeelding wordt een voorbeeld gegeven van een seizoensmodel (gele lijn) en een lineair model (blauwe lijn). Elk rondje (per kleur een golflengte verder) is een meetresultaat van een fictieve InSAR-meting. Het seizoensmodel zal in deze grafiek een hogere waarde van het coherentiegetal opleveren dan het lineaire model.

- Wanneer de beweging van de meetpunten niet voldoet aan het gekozen model, leidt dit tot een lage waarde van de fasecoherentie, terwijl het wel een goede meting kan zijn. Het is dus belangrijk ervoor te zorgen dat het gebruikte model de bewegingen in het gebied goed kan beschrijven. Als er bijvoorbeeld significante seizoensbeweging is, wordt een seizoensmodel mee geschat, zodat de fasecoherentie een bruikbare kwaliteitsmaat wordt. Door het model te wijzigen verandert het fasecoherentiegetal waardoor er mogelijk permanente reflectoren zichtbaar worden die op de grens tussen twijfelachtige punten en goede punten balanceerden. Punten die binnen het groene gebied vallen ('goede punten', afbeelding 4.3) zijn permanente reflectoren met een stabiele reflectie en een deformatie die niet te veel afwijkt van het gekozen model. In de meeste gevallen (waarbij de deformaties klein zijn ten opzichte van de golflengte van enkele centimeters) is een lineair model (eventueel in combinatie met een seizoensmodel) voldoende om de meeste goede reflectiepunten te vinden. Wanneer er duidelijk niet-lineaire beweging wordt verwacht (zoals bij het starten van gas- of zoutwinning op een bepaald moment) wordt een uitgebreider model gebruikt.

Kwaliteitscontrole (in het gebied van de twijfelachtige punten afbeelding 4.3)

Om de kwaliteit van de permanente reflectoren rond het ruisniveau te controleren is er door Hansje Brinker een programma geschreven waarbij de permanente reflectoren nader geanalyseerd kunnen worden. Met dit programma kunnen de volgende handelingen uitgevoerd worden:

- Het verplaatsen van het referentiepunt.
- De geschatte hoogte aanpassen. De verandering in fase verandert aanzienlijk bij kleine aanpassingen in de hoogte. Rechts onder in afbeelding 4.6 is per beeldopname een kruisje geprojecteerd (per kleur komt het kruisje terug). De verschillende kleuren duiden op een verschillende fase (een golflengte verder).

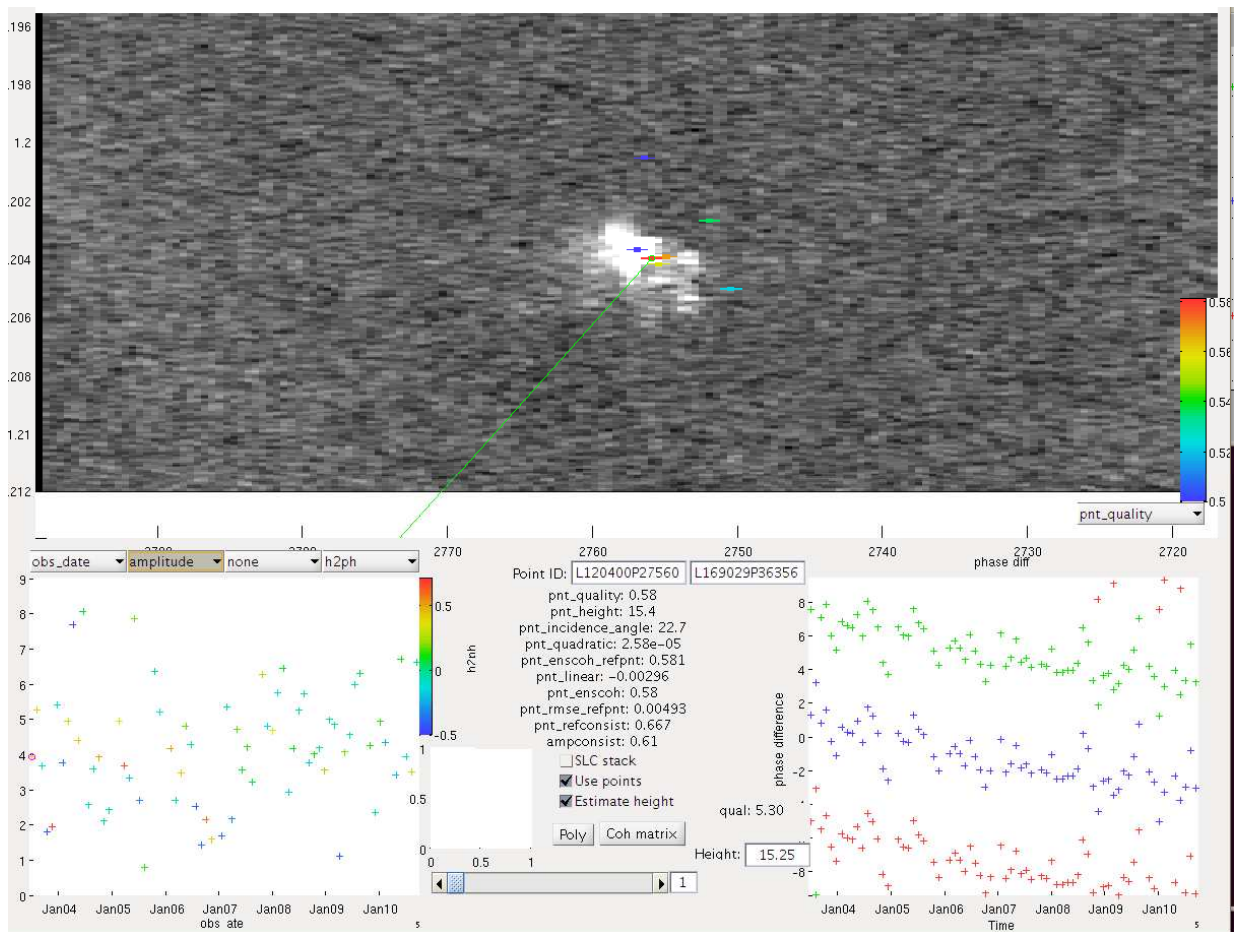
De geschatte hoogte wordt op twee manieren berekend:

- Gecombineerd met deformatie over een langere periode.
- Meerdere korte periodes schatten (een hoogteschatting telkens uit twee opeenvolgende SAR-beelden) en vervolgens middelen.

Als via beide methoden van hoogteschatting overeenkomt, kan er met een grote zekerheid van uitgegaan worden dat de geschatte hoogte juist is.

Op basis van het programma kunnen de volgende analyses uitgevoerd worden:

- Welke permanente reflector gaat dienen als referentiepunt.
- Welke permanente reflectoren beschrijven de desbetreffende vraag van de opdracht.



Afbeelding 4.6 Kwaliteitscontrole permanente reflectoren programma Hansje Brinker. Per geselecteerd punt worden een aantal parameters weergegeven zoals kwaliteit, geschatte hoogte, lineaire deformatiesnelheid, fasecoëfficiënt ten opzichte van gekozen model, enzovoort.

5 VAN RADARBEELD NAAR PERMANENTE REFLECTOR

Dit hoofdstuk beschrijft op summier de stappen van radar(beeld) tot het verwerken van permanente reflectoren. Het hoofdstuk is zo opgebouwd dat er minimale geodetische kennis nodig is om uiteindelijk te begrijpen hoe een permanente reflector tot stand is gekomen, en welke belangrijke ontwikkelingen eraan voorafgegaan zijn. Het hoofdstuk is opgedeeld in de volgende paragrafen: historie InSAR (Radar, SAR en Interferometrie), Depsi (verwerken van permanente reflectoren).

5.1 Historie PS-InSAR

Het boek Radar Interferometry [Hanssen, 2001] en de gevolgde colleges Radar Interferometry bij de afdeling Geomatics aan de TU-Delft, dienen als basis bij het beschrijven van de historie van InSAR.

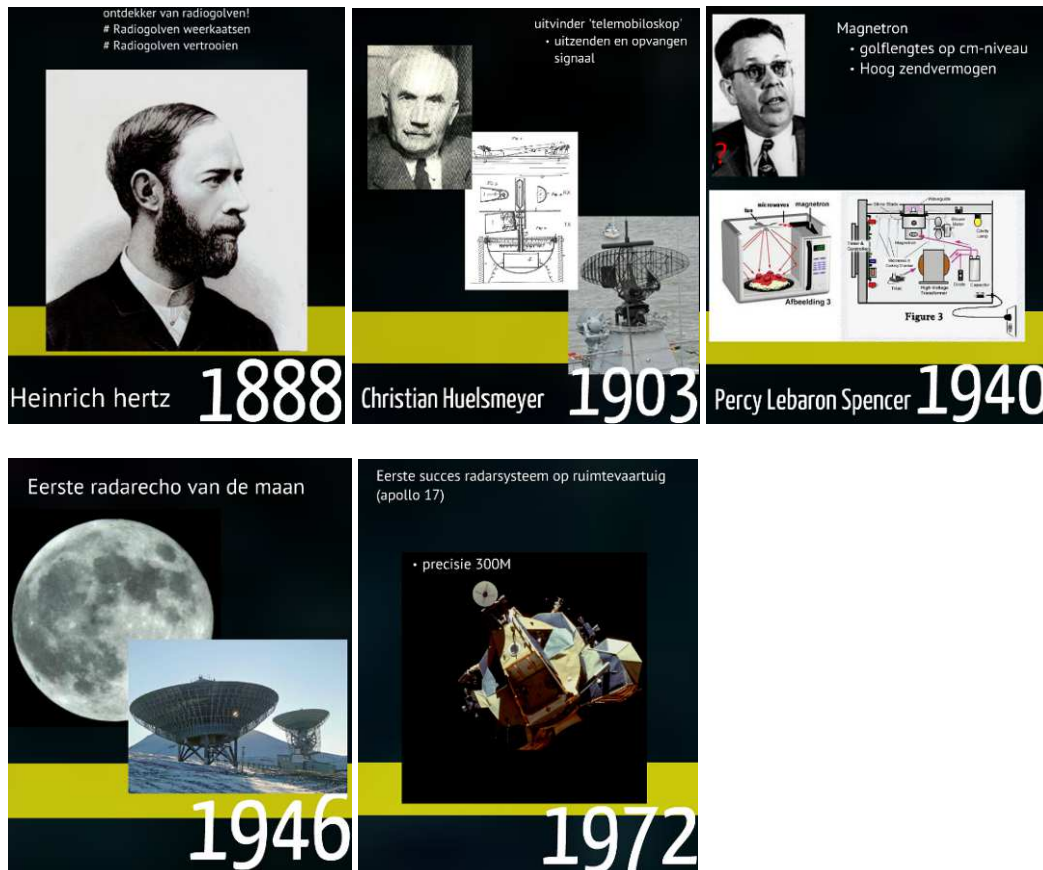
InSAR is een verzamelnaam van verschillende technieken.

- Radar (Radio detection and ranging)
- SAR (Synthetic Aperture Radar)
- Interferometrie

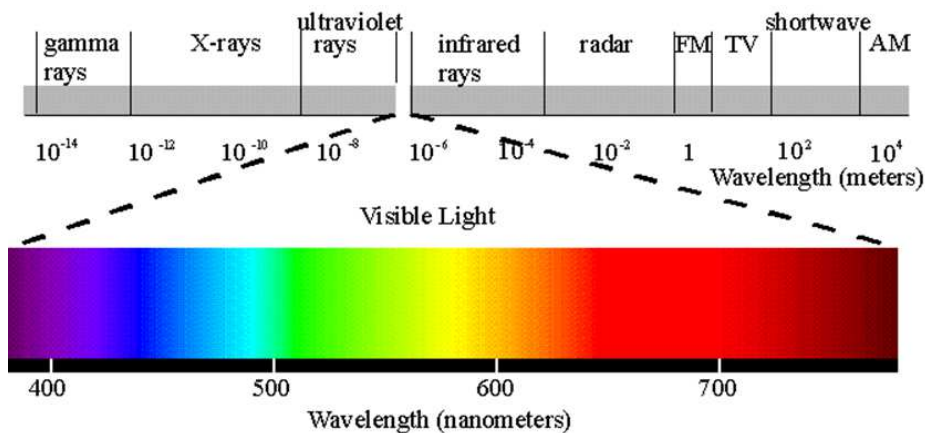
Radar

Een radar zendt elektromagnetische golven uit en ontvangt de reflecties. Door de looptijd te meten tussen zenden en ontvangen wordt de afstand bepaald tot het reflecterende object. Doordat gebruikgemaakt wordt van golflengtes die langer zijn dan die in het zichtbare deel van het spectrum kennen radaropnames andere karakteristieken dan optische beelden (foto's). Zo zijn de reflectie-eigenschappen anders, maar ook de voortplantingskarakteristieken door bijvoorbeeld de atmosfeer. Radarsignalen gaan door wolken heen, en soms (afhankelijk van de golflengte) ook door bladeren of andere materialen. Doordat radar ook op grote afstanden werkt en niet afhankelijk is van daglicht of weersomstandigheden (elektromagnetische golven worden nauwelijks gedempt door de atmosfeer) kent radar belangrijke toepassingen in de luchtvaart, scheepvaart en militaire context.

Ook in het dagelijks leven wordt de mens echter regelmatig geconfronteerd met radar: zo valt te denken aan flitspalen, parkeersensoren in de auto, of de sensor van de schuifdeur bij de supermarkt. Een aantal belangrijke significante gebeurtenissen uit het verleden hebben een bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van radar (afbeelding 5.1).



Afbeelding 5.1 aantal significante gebeurtenissen bij de ontwikkeling van radar. 1888, Heinrich Hertz: radiogolven weerkaatsen, verstrooien. 1903, Christian Huelsmeyer: Uitvinder 'radar', het uitzenden en opvangen van het radarsignaal. 1940, Percy Lebaron Spencer (uitvinder magnetron): Golflengtes op cm-niveau met een hoog zendvermogen. 1946: Eerste radarecho van de maan. 1972: Eerste succes radarsysteem op ruimtevaartuig.



Afbeelding 5.2 elektromagnetisch spectrum [Astronomie, 2012]: De golflengtes in d orde van grootte van enkele centimeters tot enkele decimeters worden doorgaans tot de 'radargolflengtes' gerekend. Deze worden weer verder onderverdeeld in verschillende banden die elk verschillende eigenschappen en toepassingen kennen.

SAR (Synthetic Aperture Radar, beeldvormende radar)

De resolutie bij beeldende radar wordt in de vliegrichting van de satelliet bepaald mede door de lengte van de antenne, en in de kijkrichting van de satelliet mede door de frequentieband (afbeelding 5.3 'voorbeelden van veelgebruikte radarsatellieten'). In het begin werd er gebruik gemaakt van een fysiek lange antenne, vandaar de naam Real Aperture Radar (RAR). Na enkele verwerkingsstappen was het uiteindelijke resultaat een resolutiecel van 5 bij 14 km.

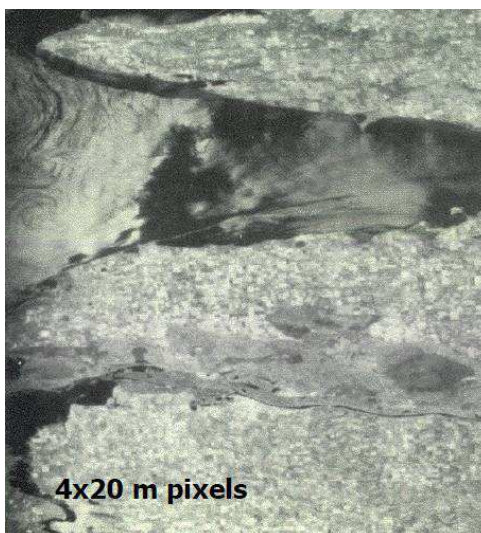
Voorbeeld satelliet:	Afbeelding Satelliet:	Frequentieband en golflengte:
TERRASAR (D) COSMO SKYMED (It)		X-band (2.4 t/m 3.8cm)
ERS / ENVISAT (ESA) RADARSAT (Can)		C-band (3.8 t/m 7.5cm)
JERS-1 / ALOS (JP)		L-band (15 t/m 30cm)

Afbeelding 5.3 voorbeelden van veel gebruikte radarsatellieten die toegepast worden voor InSAR die werken op verschillende frequentiebanden.

Door signalen te combineren die over een stukje van de omloopbaan van de satelliet worden opgenomen (tot bijvoorbeeld 5 km), kun je doen alsof je een langere antenne gebruikt. Met een 'kunstmatige antenne' (in het Engels Synthetic Aperture) van bijvoorbeeld 5 km lengte is een resolutie te bereiken van enkele meters op de grond. De exacte resolutie die wordt behaald varieert per satelliet en soms per opnamemodus. Veel SAR-satellieten kennen een hoge resolutiemodus met pixels van enkele meters, maar ook een modus met pixels van bv 100x100 m, die gebruikt kan worden voor snelle beeldvorming over grotere gebieden.



Afbeelding 5.3 (Real Aperture Radar)



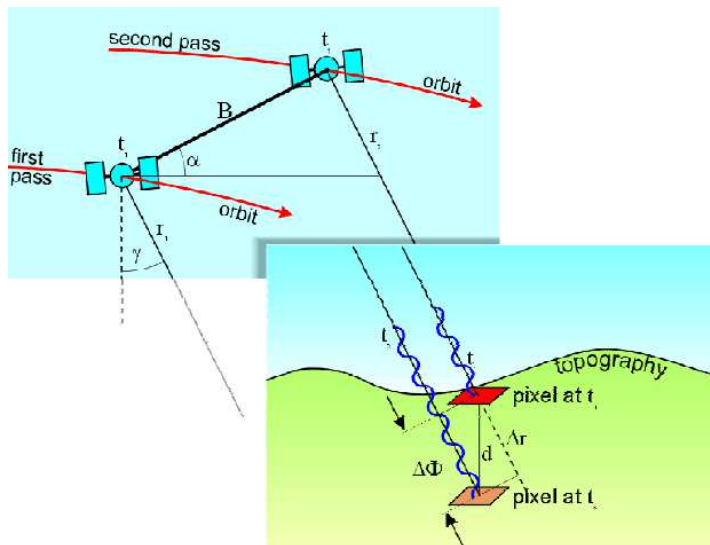
Afbeelding 5.6 SAR opname van de ENVISAT-satelliet

[afbeeldingen afkomstig uit presentatie R. Hanssen]

Interferometrie

Interferometrie is het meten met behulp van interferentie, een gezamenlijke werking van meerdere golven die worden gemeten op dezelfde tijd en plaats. Bij InSAR werkt het principe omgekeerd, zo meet je niet 2 golven van 1 locatie maar 1 golf van twee locaties (dicht bij elkaar 1 km). Om bij InSAR verschillen te kunnen meten worden er meerdere satellietbeelden (SAR), opgenomen vanuit iets verschillende locaties, gebruikt waardoor er verschillen geconstateerd kunnen worden. Het meten van verschillen door middel van deze techniek noemt men 'Multi Pass Interferometrie'. Dit kent

toepassingen in bijvoorbeeld de analyse van aardbevingen, waarbij met behulp van een beeld voor en een beeld na de beving kan worden bekeken wat er is gebeurd met het aardoppervlak.



Afbeelding 5.5 'Multi pass Interferometrie' [afbeelding presentatie Ketelaar, NAM]: de afbeelding laat twee opnamemomenten van de radarsatelliet zien. Door het verschil (B) in positie (oplopend tot een kilometer) is het mogelijk om verschillen te meten.

5.2 Depsi

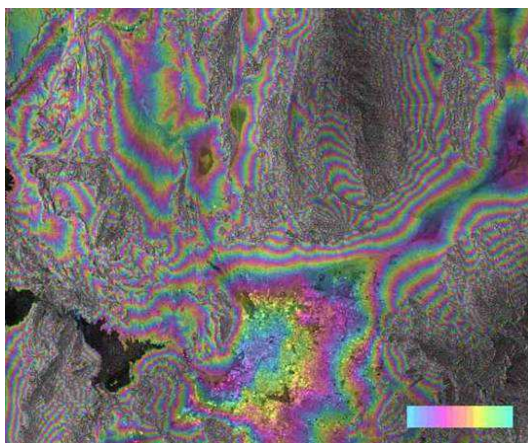
In dit hoofdstuk worden de stappen uitgelegd die genomen worden tot het produceren van permanente reflectoren. Het basisprincipe is dat verschillende bijdragen aan de fase (deformatie, atmosfeer, topografie, ruis) worden gesplitst.

Inleiding

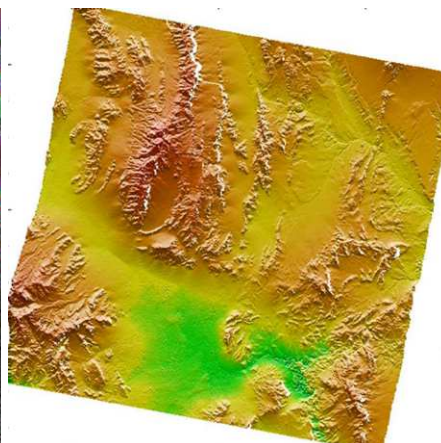
Depsi is het programma dat door Hansje Brinker wordt gebruikt om permanente reflectoren te berekenen. Voordat er met Depsi gerekend kan worden zijn er al verschillende bewerkingsstappen uitgevoerd met het programma Doris. Het programma Doris (Delft object-oriented radar interferometric software) is ontwikkeld op de TU-Delft en kan gebruikt worden voor de volgende doeleinden:

- Het produceren van Interferogrammen (afbeelding 5.6 eerste Envisat interferogram).
- DEM: (Digital Elevation models) (afbeelding 5.7 DEM)

Het verwerken van interferogrammen met Doris wordt in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.



(afbeelding 5.5 eerste Envisat interferogram)



(afbeelding 5.6 EM, locatie onbekend)

De verwerking (Deps)

Het verwerken met Depsi is opgedeeld in een aantal verwerkingsstappen. De afbeeldingen die getoond worden bij het beschrijven van de verwerkingsstappen zijn afkomstig van de permanente reflectoren analyse op de Haringvlietsluizen (hoofdstuk 6 'casus Haringvlietsluizen').

Primair netwerk:

- Puntselectie (op basis van amplitude).
- Een netwerkvereffening uitvoeren om fasemeerduidigheden op te lossen.
- Atmosferische verstoringen schatten en oplossen.
- Oplossen van satellietbaanfouten.

Secundair netwerk (verdichtingsnetwerk):

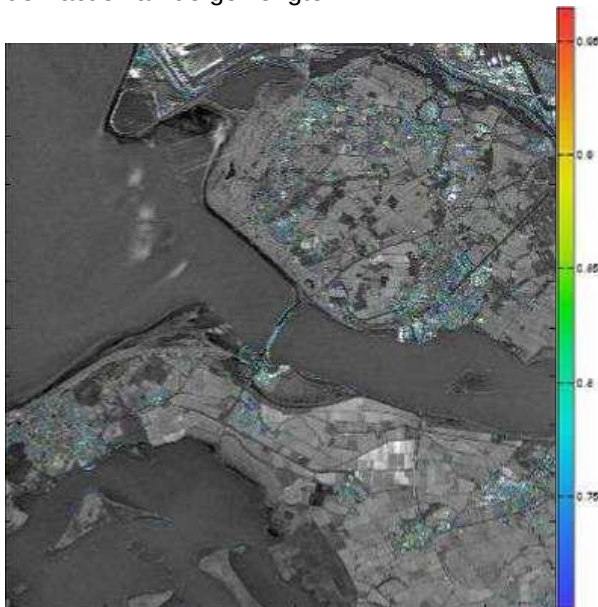
- Puntselectie (op basis van lagere amplitude of een full pixel-processing).
- Op basis van punten uit het primaire netwerk fasemeerduidigheden oplossen uit het secundaire netwerk.
- Kwaliteitscontrole, en indien nodig aanpassingen uitvoeren door de verwerkingsstappen bij het secundaire netwerk te herhalen. (In paragraaf 4.2 'Hansje Brinker' en 4.2.1 'kwaliteit van permanente reflectoren' wordt beschreven hoe er gecontroleerd wordt op de kwaliteit van de geproduceerde permanente reflectoren).

Puntselectie (afbeelding 5.8)

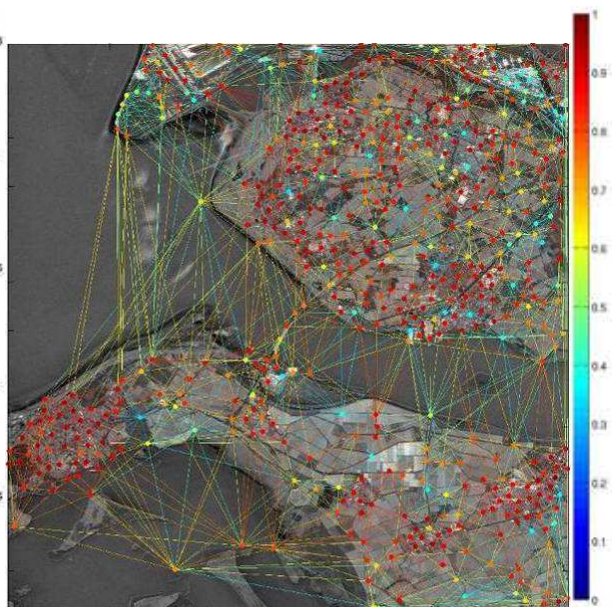
Bij de eerste processtap wordt een permanente reflector geselecteerd op basis van de sterkte van de amplitude. De sterkte van de amplitude zegt iets over het de sterkte van het reflectiesignaal. Hoogstwaarschijnlijk geeft een sterk reflecterend punt een consistente correlatie (fase) in de tijd. De sterkte van de amplitude wordt uitgedrukt in een getal tussen 0.0 en de 1.0.

Een netwerkvereffening uitvoeren om fasemeerduidigheden op te lossen (afbeelding 5.9)

Het relatieve hoogteverschil is in de meeste gevallen meer dan 1 golflengte. Bij het oplossen van de fasemeerduidigheden wordt bepaald hoeveel hele golflengtes er in totaal tussen de permanente reflectoren zitten. De processtap moet uitgevoerd worden omdat er enkel deformatie gemeten wordt in de fractie van de golflengte.

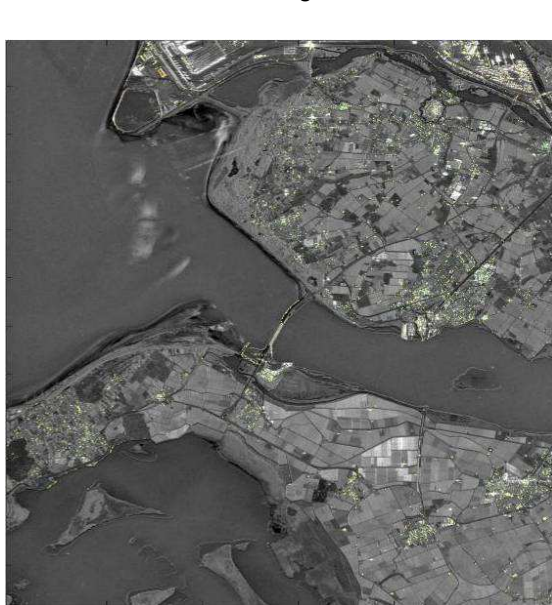


Afbeelding 5.8 puntselectie

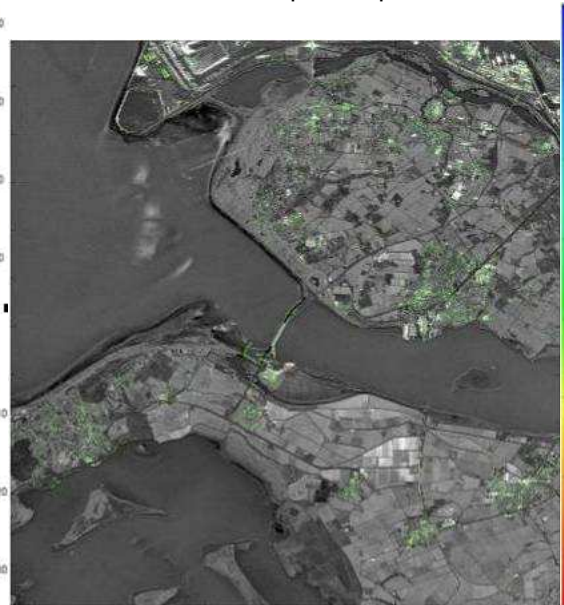


Afbeelding 5.9 netwerkvereffening om fasemeerduidigheden op te lossen.

Per verbindinglijn tussen twee punten worden een aantal parameters geschat, topografische hoogte verschil (afbeelding 5.9) en deformatie (afbeelding 5.10). Door middel van de netwerkvereffening wordt hiermee de absolute hoogte en deformatie ten opzichte van een referentiepunt bepaald.



Afbeelding 5.10 Geschatte topografisch hoogte

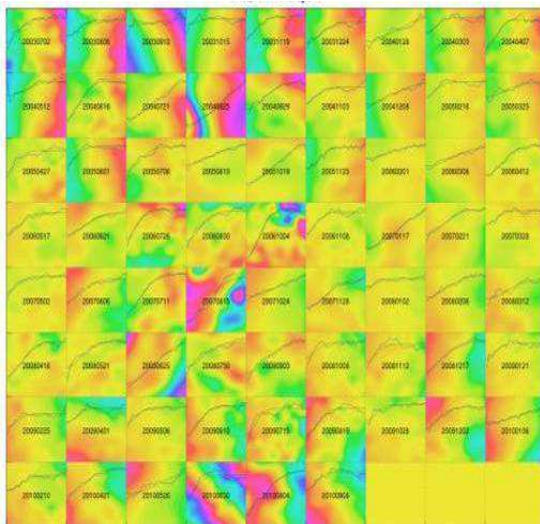


Afbeelding 5.11 Geschatte lineaire deformatie

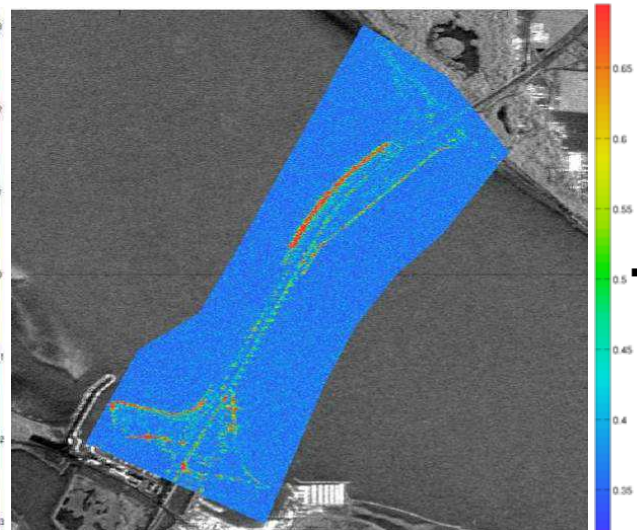
a(

Atmosferische verstoringen schatten en oplossen en het oplossen van satellietbaanfouten (afbeelding 5.12)

In het primaire netwerk wordt op basis van de voorgaande verwerkingsstappen de atmosfeer geschat. De atmosfeer wordt per beeldopname (SAR-beeld) geschat. De kleuren in de afbeelding geven het faseverschil weer.



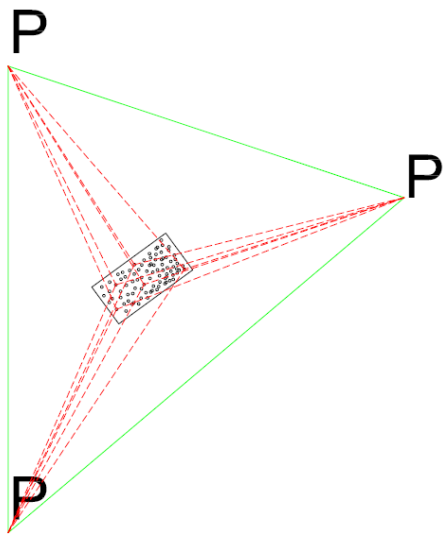
Afbeelding 5.12 Atmosferische verstoringen schatten en oplossen



Afbeelding 5.13 Geselecteerde punten met bijbehorende amplitudecoherentie

Puntselectie (op basis van lagere amplitudecoherentie of een full pixel-processing afbeelding 5.13)

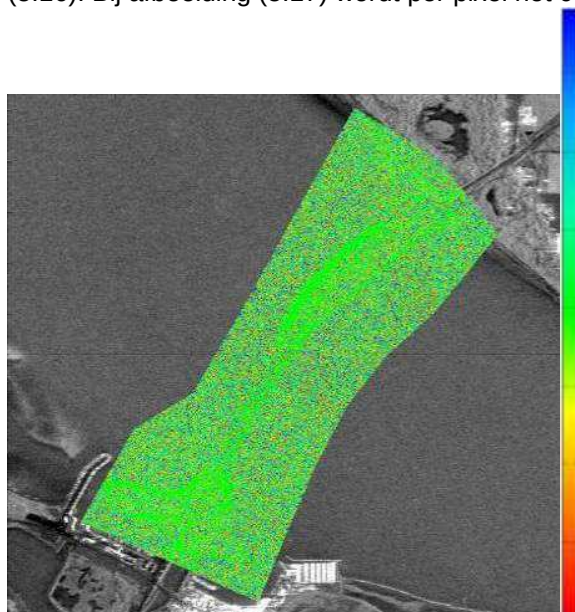
Het gebied dat daadwerkelijk geanalyseerd dient te worden is vastgesteld aan de hand van een aantal coördinaten die bepaald zijn in Google-Earth. De coördinaten vormen samen een vlak waarin in dit geval een full pixel proces (geen selectie meer op amplitude, alle punten doen mee) is uitgevoerd.



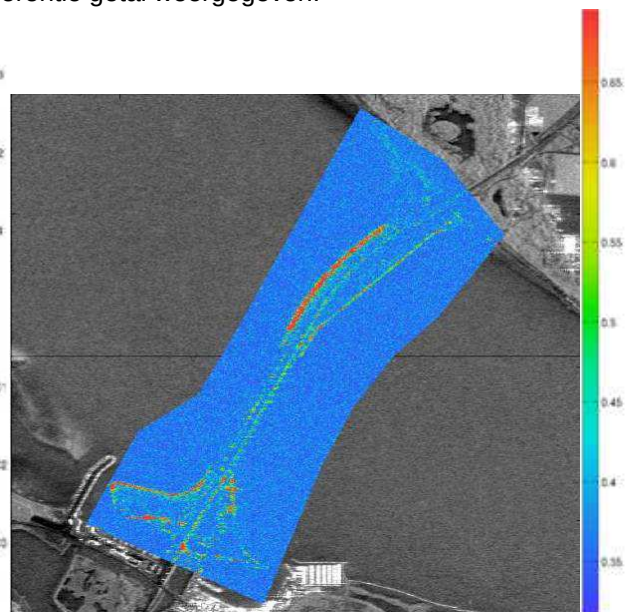
Afbeelding 5.14 (links) op basis van punten uit het primaire netwerk (P) fasemeerduidigheden oplossen uit het secundaire netwerk. Afbeelding 5.15 (rechts) Hoogteschatting ten opzichte van het primaire netwerk.

Op basis van punten uit het primaire netwerk fasemeerduidigheden oplossen uit het secundaire netwerk (afbeelding 5.14 en 5.15)

De resultaten van de verdichting ten opzichte van het primaire netwerk: hoogte (5.15) en deformatie (5.16). Bij afbeelding (5.17) wordt per pixel het coherentie getal weergegeven.



Afbeelding 5.16 Geschatte lineaire deformatie.



Afbeelding 5.17 coherentie

6 CASUS HARINGVLIETSLUIZEN

6.1 Inleiding

Informatie Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen bestaan uit zeventien spuisluizen die buitenwater spuien en keren. Dit spuisluizencomplex is ongeveer een kilometer lang. Het is een primaire waterkering, omdat de sluizen bescherming bieden tegen het buitenwater (de zee). In 1970 werden de sluizen voor het eerst daadwerkelijk gebruikt en sindsdien is het Haringvliet afgesloten voor de directe invloed van eb en vloed. De sluis heeft de volgende kenmerken:

- Gebouwd op 22300 heipalen.
- Een lengte van ongeveer 5 kilometer en een breedte van 56 meter (het sluizencomplex is ongeveer 1 kilometer lang).
- In totaal 17 sluizen die elk 56.5 meter breed zijn.

[Haringvlietsluizen, 2012]



Afbeelding 6.1 overzichtsfoto Haringvlietsluizen (spuisluizencomplex).

6.2 Terrestrische meetmethode Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen worden regulier gemeten door middel van tachymetrie (horizontale deformatie) en waterpassing (verticale deformatie). Er zijn op dit moment zeven metingen uitgevoerd, de 0-meting op 01-12-1994 en de herhalingsmetingen op 01-11-1995, 01-11-1996, 01-07-2000, 15-10-2009, 06-04-2010 en 17-03-2010. De terrestrische meetmethode zoals hieronder beschreven wordt komt uit het meetrapport deformatiemetingen Haringvlietsluizen 2011 (6^e herhalingsmeting opgesteld door RPS).

Horizontale deformatie

De meting is uitgevoerd vanuit vier in het kunstwerk verankerde meetpalen (afbeelding 6.2) met dwangcentrerings. Elk deformatiepunt is minimaal vanuit drie onafhankelijke opstellingen in twee kijkerstanden aangemeten. Minimaal om de twee uur is de juiste luchtdruk en temperatuur in de tachymeter ingevoerd om de ppm-correctie te kunnen bepalen in verband met de grote afstanden die gemeten worden.

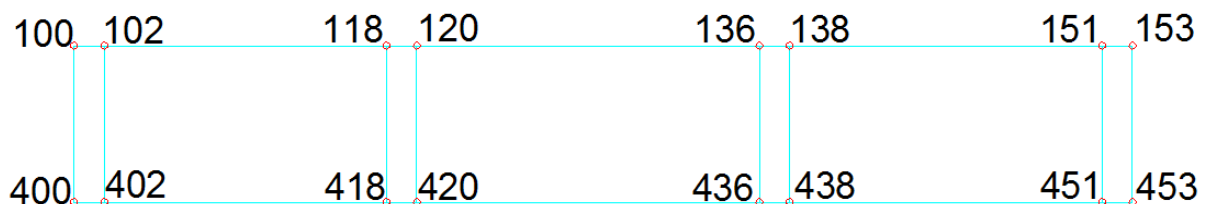
Naast de metingen vanuit de vier meetpalen zijn er vier standplaatsen in het midden van het kunstwerk gecreëerd, zodat er enkele dwarsverbindingen gemeten konden worden. Deze standplaatsen zijn verzekerd met een meetspijker en vanuit de vier meetpalen ingemeten.



Afbeelding 6.2 verankerde meetpaal

Verticale deformatie

De meting is relatief uitgevoerd door middel van een kringwaterpassing (afbeelding 6.3) over alle deformatiepunten van het kunstwerk. Als maximaal toegestaan hoogteverschil tussen de heen- en teruggang van een sectie is tijdens de meting de waarde uit de formule $3\sqrt{L}$ aangehouden (L in kilometers). Er wordt 1 referentiepunt gekozen. Het referentiepunt wordt zo gekozen dat alle andere referentiepunten zakken ten opzichte van het gekozen referentiepunt. De resultaten van de 6 meetepochen van de verticale deformatie zijn terug te vinden in bijlage 11.3 'Resultaat verticale deformatie terrestrische metingen Haringvlietsluizen'. De resultaten van de 6 meetepochen van de horizontale deformatie zijn terug te vinden in bijlage 11.4 'Resultaat horizontale deformatie terrestrische metingen Haringvlietsluizen'.



Afbeelding 6.3 meetnetoverzicht kringwaterpassing. De gepresenteerde nummers zijn de puntnummers van de meetpunten. De blauwe lijnen laten de gewaterpaste route zien. De waterpassing is in heen- en teruggang uitgevoerd.

Analyse huidige praktijk (reguliere meetmethode)

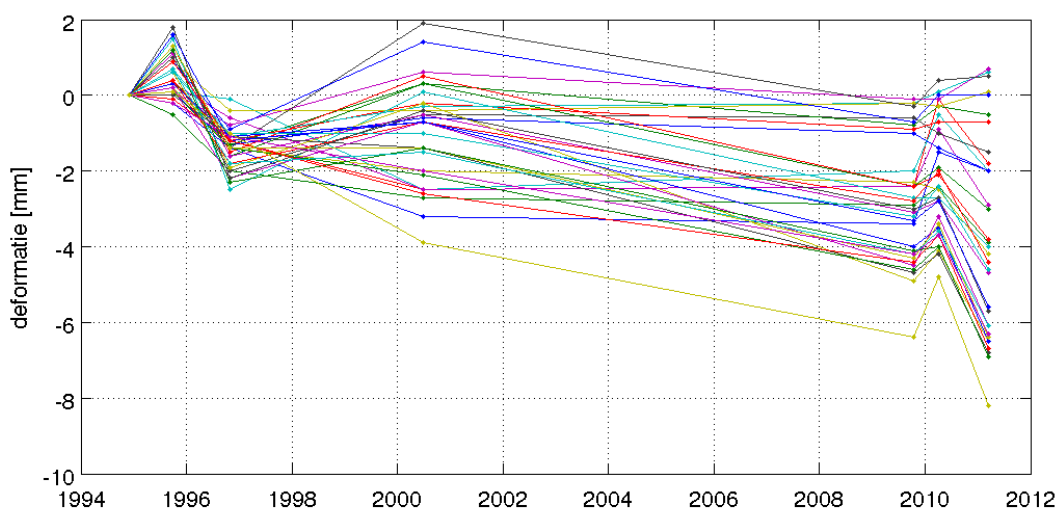
Bij de herhalingsmeting van 1995, 1996 en 2000 is de 100-serie (zeezijde) om onbekende redenen niet gemeten. Er is daarom besloten om bij de vergelijking tussen de terrestrische meetmethode en de InSAR-meting alleen de 400-serie (landzijde) te vergelijken.

Elke meetepoche moet voldoen aan strenge kwaliteitseisen van de productspecificatie deformatiemetingen (Rijkswaterstaat). Het nader analyseren van de reguliere meetmethodiek wordt in deze casus niet verder onderzocht.

Bij het analyseren van de gemeten verschillen valt het op dat er bij de horizontale deformatie geen significante ($XY > 10\text{mm}$) verschillen geïdentificeerd worden. De horizontale deformatie is bij de vergelijking tussen de reguliere meetmethode en de InSAR meetmethode te verwaarlozen. Om de

resultaten van de verticale verschillen beter te visualiseren is er een grafiek (afbeelding 6.3) gemaakt waarbij de deformatie van elk meetpunt per meetepoche is gepresenteerd.

- Meetepoche 1996: weinig verschil tussen de gemeten punten onderling er zijn geen significante verschillen gemeten.
- Meetepoche 1997: weinig verschil tussen de gemeten punten onderling, er is wel een absolute sprong zichtbaar tussen de meetepoche van 1996 wat kan duiden op verandering in referentiepunt.
- Meetepoche 2001: er zijn grotere verschillen tussen de gemeten punten onderling ten opzichte van de meetepoche die uitgevoerd is in 1997. Deze constatering kan meerdere oorzaken hebben. Een mogelijke oorzaak is veel wind bij het uitvoeren van de waterpassing. De metingen blijven nog wel binnen de productspecificatie gestelde deformatiedrempel van 5 mm.
- Meetepoche 2009: Bij deze meetepoche kan dezelfde constatering gedaan worden als bij de meetepoche van 2001. Enkele punten overschrijden de productspecificatie gestelde deformatiedrempel van 5 mm.
- Meetepoche 2010 en 2011: Bij beide meetepochen kan dezelfde constatering gedaan worden als bij de meetepoche van 2009. Bij beide meetepochen is een absolute sprong zichtbaar wat kan duiden op verandering in referentiepunt.



Afbeelding 6.3 (analyse waterpassing). Voor alle meetpunten die gebruikt zijn om de verticale deformatie van de Haringvlietsluizen te bepalen is een lijn (met elk een eigen kleur) in de tabel gemaakt. In de grafiek worden 6 meetepochen gepresenteerd ten opzichten van de eerste meting, de zogenaamde 0-meting.

6.3 InSAR-meting toegepast op de Haringvlietsluizen

Omdat InSAR een relatief nieuwe innovatieve meetmethodiek is, zijn er in tegenstelling tot de reguliere meetmethodiek op de Haringvlietsluizen nog geen kwaliteitseisen beschreven. De verwerkingsmethode tot het komen van permanente reflectoren bij de Haringvlietsluizen wordt uitvoerig beschreven in hoofdstuk 5 'van radarbeeld tot permanente reflector'. In bijlage 11.7 'resultaat InSAR-meting op de Haringvlietsluizen' wordt de InSAR-meting op de Haringvlietsluizen met behulp van twee afbeeldingen weergegeven. In de eerste afbeelding wordt er een dataset met punten getoond vanaf een coherentiewaarde van 0.5, en in de tweede dataset worden er punten vanaf een coherentiewaarde 0.6 getoond.

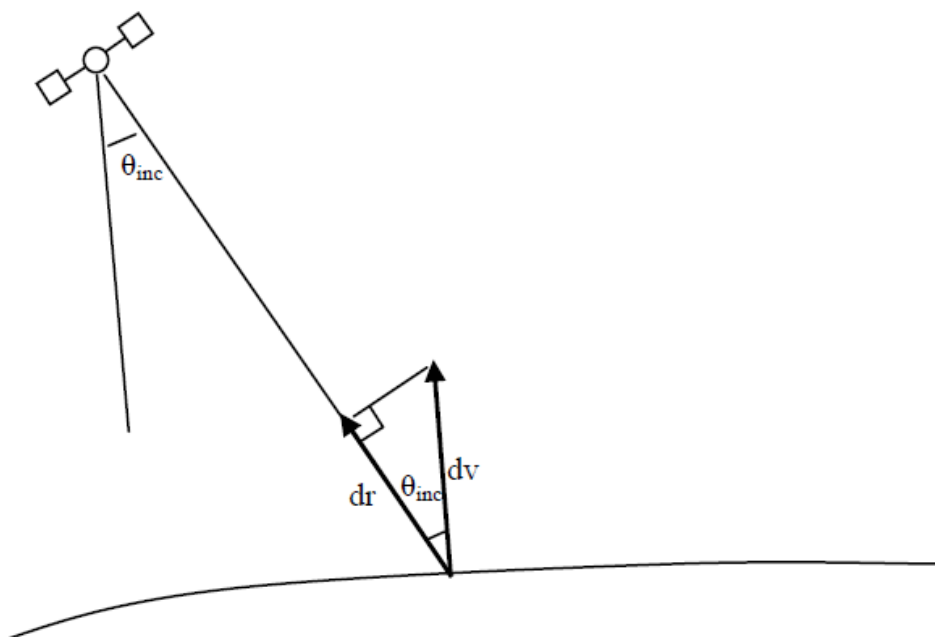
6.4 De vergelijking

In dit hoofdstuk is er een vergelijking gemaakt tussen de reguliere meetmethode (waterpassing en tachymetrie) en is er een meting uitgevoerd met InSAR. Bij het uitvoeren van de vergelijking hebben we met verschillende complicaties te maken gehad. Hieronder wordt elke complicatie apart beschreven, waarbij per complicatie aangegeven wordt hoe er mogelijk gehandeld is en of er binnen de geringe tijd van dit onderzoek het überhaupt mogelijk is om een oplossing te vinden voor de complicatie. De vergelijking van de waterpasmeting zou uitgevoerd worden ten opzichte van permanente reflectoren geproduceerd uit data van Envisat-satelliet (tijdperk 2003 t/m 2010) en ERS-2 satelliet (1992 t/m 2000). Er zijn helaas te weinig bruikbare permanente reflectoren geproduceerd uit de ERS-2 Satelliet data. De oorzaak hiervan wordt in dit onderzoek niet verder behandeld. Opmerkelijk is wel dat in hoofdstuk 3 (analyse van de literatuur) in het onderzoek 'PS-InSAR – analyse van de bodemdaling in Noordwest-Friesland' getwijfeld wordt aan de stabiliteit van de radarsensor van de ERS-2 Satelliet.

Complicatie (kijkrichting van de satelliet)

Bij de reguliere meetmethode wordt de deformatie aangetoond in drie dimensies (XYZ). De vraag is hoe je de InSAR-deformatie die aangetoond wordt in de kijkrichting van de satelliet (1 dimensie) zo nauwkeurig mogelijk kan vergelijken met de deformatie uit de reguliere meetmethode die aangetoond wordt in drie dimensies.

Gekozen oplossing



Afbeelding 6.4: De volgende formule wordt grafisch uitgebeeld $dv = \frac{dr}{\cos(\theta_{inc})}$ [Arroyo, 2009].

Met de volgende formule is er een vergelijking te maken tussen de meting in de kijkrichting van de satelliet en de gewaterpaste hoogten:

- θ_{inc} is de kijkhoek van de satelliet en (Envisat 23 graden)
- dr is de afstand gemeten in de kijkrichting van de satelliet
- dv verticale deformatie

$$dv = \frac{dr}{\cos(\theta_{inc})}$$

Bij de casus zijn alle met InSAR geconstateerde hoogteverschillen met $1/\cos(23) = 1.08$ vermenigvuldigd.

Complicatie (relatief en absoluut)

Bij een InSAR-meting worden de gepresenteerde coördinaatverschillen relatief gepresenteerd ten opzichte van een consistente (best reflecterende) permanente reflector die zich buiten de Haringvlietsluizen bevindt. Doordat er een referentiepunt buiten de Haringvlietsluis gekozen is kunnen er zowel (absolute) verschillen geconstateerd worden tussen de Haringvlietsluis en de omgeving als vormverandering van de Haringvlietsluis op zich.

De waterpassing is relatief uitgevoerd ten opzichte van een stabiel verondersteld referentiepunt dat zich op de Haringvlietsluis bevindt. Bij een relatieve meting wordt het object gecontroleerd op vormverandering. Zo kan men wel zien hoe bijvoorbeeld de pijlers en de landhoofden ten opzichte van elkaar bewegen, maar niet hoe het gehele object beweegt ten opzichte van zijn omgeving. Bij een InSAR-meting en een terrestrische meting moet er rekening gehouden worden dat er ook een absoluut hoogteverschil aanwezig kan zijn tussen beide meetmethodes.

Gekozen oplossing

Het absolute verschil tussen de reguliere meetmethode en de InSAR-metmethode is in het resultaat niet eenvoudig te corrigeren. Bij een InSAR-meting worden er verschillen bepaald ten opzichte van een referentiepunt. Alle permanente reflectoren kunnen gekozen worden als referentiepunt, alleen niet alle permanente reflectoren zijn geschikt om te dienen als referentiepunt. Alle permanente reflectoren die berekend zijn op de Haringvlietsluis hebben een coherentiegetal lager dan 0.8 en hoger dan 0.55. De verwerking is uitgevoerd met 64 beelden, wat inhoudt dat de punten zich in het gebied van de goede punten bevinden (zie paragraaf 4.2.1 'kwaliteit van permanente reflectoren'). Een kwalitatief goed referentiepunt vertoont weinig tot geen zetting en heeft in deze dataset (64 beelden) minimaal een coherentiewaarde van meer dan 0.8.

Om toch een kwantitatieve vergelijking te maken zijn alle met InSAR gemeten hoogteverschillen van meetpunt 418 afgetrokken van alle overige meetpunten. Op deze manier fungeert punt 418 als referentiepunt. Meetpunt 418 is gekozen omdat dit punt volgens de waterpassing als stabiel gezien mag worden. In de waterpasmeting van 2011 is de pilaar waarop meetpunt 418 is aangebracht gekozen als referentie. Dit is gedaan omdat de andere pilaren zakken ten opzichte van de pilaar waarop meetpunt 418 is aangebracht.

Het is bij de uitwerking van deze casus niet gelukt om een kwalitatieve meting te krijgen van de ERS satelliet (tijdpad 1992 t/m 2000). Het gevolg hiervan is dat enkel de waterpasmeting van 2009 en 2010 een relatie hebben met het tijdpad van de Envisat-metingen (2003 t/m 2010). Het verschil in opnamedatum tussen de InSAR-meting en de waterpasmeting is gecorrigeerd door de InSAR-meting lineair te interpoleren op de exacte datum van de terrestrische metingen. Waarbij de eerste InSAR-meting voor en na de meetepoche van 15-10-2009 en 06-04-2010 (waterpasmeting) als uitgangspunt voor de linearisering is genomen.

2009				2010			
	(ΔH)	(ΔH)	Verschil WP - InSAR		(ΔH)	(ΔH)	Verschil WP - InSAR
	InSAR	WP			InSAR	WP	
Puntnr	[mm]	[mm]	[mm]	Puntnr	[mm]	[mm]	[mm]
400	-0.5	-3.4	-2.9	400	-2.1	-1.5	0.6
403	-10.6	-2.4	8.2	403	-2.3	-0.1	2.2
406	-5.8	-2.4	3.4	406	-7.1	-0.9	6.2
409	-0.7	-0.6	0.1	409	-1.1	-1.0	0.1
412	3.7	-0.8	-4.5	412	5.3	-0.3	-5.6
415	-3.3	-0.2	3.1	415	-5.2	0.1	5.3
418	0.4	-0.1	-0.5	418	0.4	-0.1	-0.5
424	0.0	-2.4	-2.4	424	2.8	-1.9	-4.7
427	-2.2	-2.7	-0.5	427	0.9	-2.7	-3.6

2009				2010			
	(ΔH)	(ΔH)	Verschil WP - InSAR		(ΔH)	(ΔH)	Verschil WP - InSAR
	InSAR	WP			InSAR	WP	
Puntnr	[mm]	[mm]	[mm]	Puntnr	[mm]	[mm]	[mm]
430	-7.9	-4.9	3.0	430	-5.1	-4.1	1.0
433	-5.9	-4.0	1.9	433	-2.8	-3.5	-0.7
436	1.8	-2.8	-4.6	436	3.9	-2.0	-5.9
439	-2.2	-4.5	-2.3	439	-1.3	-3.2	-1.9
442	-1.1	-3.0	-1.9	442	-1.3	-2.7	-1.4
445	1.5	-4.1	-5.6	445	6.7	-4.0	-10.7
448	-8.3	-4.2	4.1	448	-4.3	-3.6	0.7
Standaarddeviatie			3.8	Standaarddeviatie			4.3

Het verschil Waterpassing – InSAR-meting waarbij punt 418 als referentiepunt fungeert.

Meetpunt 418 heeft een coherentiewaarde van 0.71 wat normaliter te laag is om te dienen als referentiepunt. Om de ruis te onderdrukken is er een lijn geschat door de InSAR gemeten hoogteverschillen heen. De schatting is uitgevoerd door bij elke meetepoche het gewogen gemiddelde te nemen over een periode van 75 dagen voor en na de meetepoche. Hoe verder het meetpunt van de meetepoche afligt des te minder gewicht het heeft op het berekende gemiddelde. Hieronder is er een vergelijking uitgevoerd tussen de vereffende InSAR-hoogteverschillen en de gewaterpaste hoogteverschillen.

2009				2010			
	(ΔH)	(ΔH)	Verschil WP - InSAR		(ΔH)	(ΔH)	Verschil WP - InSAR
	InSAR	WP			InSAR	WP	
Puntnr	[mm]	[mm]	[mm]	Puntnr	[mm]	[mm]	[mm]
400	-2.3	-3.4	1.1	400	-6.7	-1.5	-5.2
403	-10.5	-2.4	-8.1	403	-4.9	-0.1	-4.8
406	-5.9	-2.4	-3.5	406	-9.9	-0.9	-9.0
409	-1.3	-0.6	-0.7	409	-4.5	-1.0	-3.5
412	1.1	-0.8	1.9	412	-0.1	-0.3	0.2
415	-2.4	-0.2	-2.2	415	-7.0	0.1	-7.1
418	2.2	-0.1	2.3	418	-0.6	-0.1	-0.5
424	-2.6	-2.4	-0.2	424	-2.5	-1.9	-0.6
427	-4.8	-2.7	-2.1	427	-4.5	-2.7	-1.8
430	-4.1	-4.9	0.8	430	-4.1	-4.1	0.0
433	-10.4	-4.0	-6.4	433	-10.0	-3.5	-6.5
436	-3.1	-2.8	-0.3	436	-3.7	-2.0	-1.7
439	-3.6	-4.5	0.9	439	-5.4	-3.2	-2.2
442	-4.0	-3.0	-1.0	442	-7.0	-2.7	-4.3
445	-3.0	-4.1	1.1	445	-0.6	-4.0	3.4
448	-10.7	-4.2	-6.5	448	-9.5	-3.6	-5.9
Standaarddeviatie			3.2	Standaarddeviatie			3.3

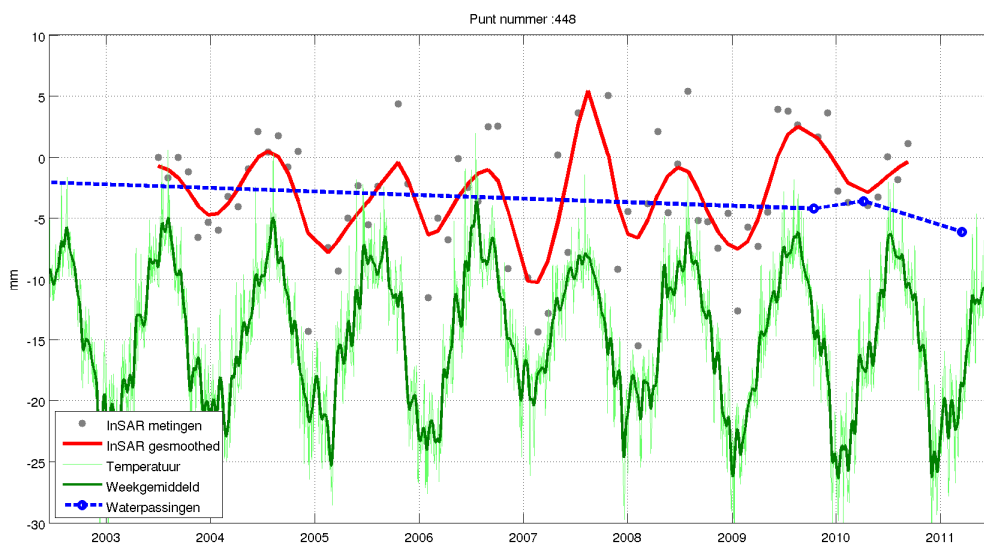
Het verschil waterpassing – vereffende InSAR-meting waarbij een geschatte lijn (per InSAR-meetpunt het gemiddelde van de InSAR-meetpunten van 75 dagen voor en na een InSAR-meetpunt gebruikt wordt voor het schatten van de lijn) dient als referentielijn (om de ruis te onderdrukken) bij het berekenen van de hoogteverschillen onderling.

In bijlage 11.6 (grafieken) is voor elk meetpunt een grafiek gemaakt waarbij zowel een meting relatief ten opzichte van meetpunt 418 (vereffende hoogteverschillen) is gemaakt als een grafiek waarbij de meting relatief gemeten is ten opzichte van een permanente reflector op het land. Het begin van de rode lijn (vereffende InSAR-waarneming) is op de blauwe lijn (waterpasmeting) geplaatst, waardoor het tijdsverschil tussen de waterpasmeting en de InSAR-meting wordt opgelost.

Complicatie (temperatuur en getijden)

Bij de vorige complicatie (relatief en absoluut) hebben we gezien dat het voor een vergelijking tussen de reguliere-meetmethode en de InSAR-meetmethode noodzakelijk is om een correctie uit voeren op een van de berekenen hoogteverschillen. De resultaten van een InSAR-meting worden normaal gesproken niet gecorrigeerd waardoor er bij het analyseren van de gegevens rekening gehouden dient te worden met meerdere invloeden. Als de Haringvlietsluizen absoluut gemeten worden, zullen temperatuur en getijden hoogstwaarschijnlijk invloed hebben.

- De invloed van de temperatuur. In afbeelding 6.5 wordt de temperatuur (relatief weergegeven) gecombineerd weergegeven met de InSAR- en waterpasmetingen op meetpunt 448. In afbeelding 6.5 worden de volgende variabelen gepresenteerd:
 - InSAR-metingen. Het gemeten hoogteverschil per meetepoche.
 - InSAR gesmoothed. Per meetepoche is het gemiddelde genomen van 75 dagen voor en na de meetepoche. Hoe verder het meetpunt van de meetepoche af ligt des te minder gewicht (volgens gausskromme) het heeft op het berekende gemiddelde.
 - Temperatuur (gemiddelde dagtemperatuur). Op de website <http://www.knmi.nl/klimatologie/> is gezocht naar het weerstation dat het dichtst bij de Haringvlietsluizen ligt. De gemiddelde dagtemperatuur die door weerstation 330 (Hoek van Holland) zijn opgenomen worden gebruikt.
 - Weekgemiddelde (temperatuur). Omdat de gemiddelde dagtemperatuur niet direct invloed zal hebben op een object ter grootte van de Haringvlietsluizen is er net als bij de variabele InSAR-gesmoothed een lijn geschat, waarbij in dit geval het gemiddelde genomen is van 7 dagen voor en na de meetepoche.
 - Waterpassing. Het gemeten hoogteverschil per meetepoche.



Afbeelding 6.5: invloed van temperatuur op de Haringvlietsluizen. De afbeelding laat zien dat er duidelijk een relatie is tussen de temperatuur en de InSAR-meting.

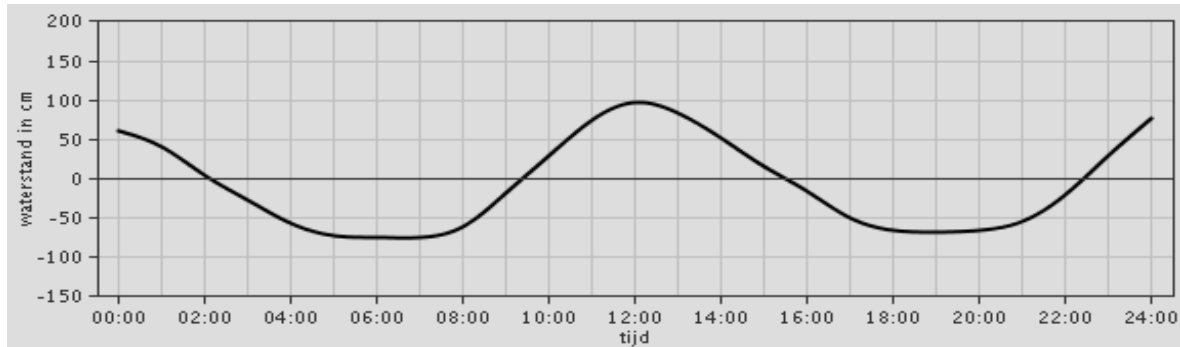
- De invloed van eb en vloed tussen twee meetepochen en gedurende de opnamemomenten per meetepoche voor de reguliere meetmethode.

In afbeelding 6.6 is te zien dat het maximale verschil in waterstand tussen eb en vloed ongeveer twee meter bedraagt. Door die extra waterdruk op de bodem kan deze meebewegen (wat inzakken bij vloed), zodat de hele constructie mogelijk met eb en vloed op en neer beweegt. Dit kan een kleine component zijn in de verticale beweging zoals die wordt waargenomen en komt dan tot uitdrukking in de ruis.

De invloed van eb en vloed is voor de reguliere meting te verwaarlozen. Dit komt omdat de meting relatief uitgevoerd wordt waarbij zowel het instrumentarium als het referentiepunt zich op het

'bewegende' object bevindt. Bij InSAR is de meting relatief ten opzichte van een permanente reflector bepaald die zich buiten de Haringvlietsluizen bevindt, en kan deze component dus een rol spelen.

Het waterniveau blijft aan de landzijde en de zeezijde gelijk. Hierdoor zal het getij hoogstwaarschijnlijk geen horizontale deformatie veroorzaken.



Afbeelding 6.6: grafiek van eb en vloed op 15-01-2012, waarneming verricht nabij de Haringvlietsluizen. [getij, 2012]

Complicatie (meetlocatie verschil)

Het interpreteren van de meetlocatie van een permanente reflector is met een nauwkeurigheid van ongeveer drie meter te bepalen (Envisat). Dit in tegenstelling tot de reguliere meetmethode waarbij het te meten punt fysiek aangewezen kan worden.

Gekozen oplossing

In de waterpassing zijn per pilaar en per zijde (land en zeezijde) twee meetpunten (hoogte) aangebracht. Bij elke waterpasmeetepoche is te zien dat beide punten dezelfde deformatiesnelheid vertonen in de verticale richting. Om bij de reguliere meetmethode de deformatie in horizontale richting te bepalen is per pilaar een apart (ten opzichte van de verticale meetpunten) referentiepunt aangebracht. De verschillen in horizontale richting zijn voor alle reguliere herhalingsmetingen minimaal en vallen binnen de meetruis van de tachymetriemeting. Uit de constatering dat de horizontale deformatie te verwaarlozen is en de verticale deformatie per pilaar gelijk is, kunnen we de aanname doen dat een permanente reflector die op een pilaar gemeten wordt dezelfde deformatie constateert.

7 VRAGENLIJST (ENQUÊTE)

7.1 Inleiding

Om meerdere toepassingsgebieden te vinden die uitgevoerd kunnen worden met InSAR, heb ik er voor gekozen om een online enquête te versturen. De vragen in de enquête zijn in samenwerking met Hansje Brinker samengesteld. De meerkeuzevragen zijn zo opgesteld dat er gelijk enkele mogelijkheden van InSAR geïntroduceerd worden. Na elke meerkeuzevraag heeft de deelnemer de mogelijkheid om zelf een mogelijk toepassingsgebied aan te dragen.

De enquête is op basis van de volgende aandachtspunten opgezet:

- Doel van de enquête
Het doel van de enquête is om meer inzicht te krijgen in toepassingsmogelijkheden van InSAR. Door de enquête bij verschillende mensen van verschillende afdelingen binnen RPS af te nemen, wordt het onderwerp geïntroduceerd en worden er hopelijk zo veel mogelijk nieuwe toepassingsgebieden aangedragen.
- Op welke manier ga je de enquête uitvoeren
Het onderzoek wordt uitgevoerd via het internet. Bij het bepalen van de juiste website is er een proefenquête opgesteld onder 6 personen. Bij het verwerken van de gegevens ben ik de volgende onvolkomenheden tegengekomen.
 - Het was niet bekend wie er welk antwoord gegeven had. Aangezien het de bedoeling is om feedback te geven op de ingevulde enquêtes is dit wel van belang. Dit is bij de definitieve versie opgelost door alle deelnemers het eindresultaat van de enquête te tonen en de antwoorden op te delen per vraagstuknummer. Op deze manier was het voor de deelnemers mogelijk om op vraagstuknummer gericht een antwoord te formuleren.
 - Het was niet bekend welke personen de enquête hadden afgenomen. Bij de laatste vraag diende de deelnemers van de enquête hun naam achter te laten als ze wel of niet geïnteresseerd waren in het deelnemen van een eventuele presentatie over InSAR.
- Wie moeten deelnemen aan de enquête
Bij deze vraag heb ik Arjan Holster (teamleider landmeten) gevraagd om een namenlijst op te stellen met potentieel geïnteresseerden. Arjan is binnen RPS de spreekwoordelijke 'spin in het web' en heeft meerdere mensen op de hoogte gesteld over het onderwerp en mede op basis van deze peiling heeft Arjan twintig potentieel geïnteresseerden van verschillende afdelingen binnen RPS aangedragen.

In Bijlage ? ('uitslag enquête') word het resultaat van de enquête weergegeven zoals het door de website <http://www.netq-enquete.nl/> automatisch is gegenereerd.

7.2 Voorgedragen toepassingsgebieden

Inleiding

Er zijn in het totaal 26 antwoorden (mogelijk toepassingsgebieden) aangedragen.

Alle antwoorden op de gestelde vragen zijn in het zwart weergegeven. Ik heb alle antwoorden nagekeken en daar waar mogelijk feedback (rode tekst) of om extra informatie (rode tekst) gevraagd.

Vraag:

Heb je wel eens het idee dat het handig was geweest om eerder te beginnen met meten?

1. Deformatiemeting voorafgaand aan bouwwerkzaamheden. Soms wordt pas tijdens de bouw begonnen met meten.
Met InSAR is het mogelijk om deformatie te bepalen vanaf 1992, dus als de bouw al begonnen is kan er alsnog gekeken worden wat er in de periode voorafgaand aan de werkzaamheden is gebeurd. Met InSAR is het van tevoren niet bekend welk object op de aarde gaat reflecteren. Het zou dus zomaar kunnen zijn dat het huis of viaduct geen reflectie geeft. Het is dus niet verantwoord om enkel van InSAR-metingen uit te gaan.
2. Ja, om de natuurlijke zetting te kunnen bepalen zou je eigenlijk één jaar van tevoren moeten beginnen met deformatiemetingen en vervolgens vlak voor de start van de werkzaamheden een herhalingsmeting moeten uitvoeren. Dit gaat geregeld verkeerd, maar vaak zonder gevolgen omdat er niets gebeurt. Als er wat gebeurt heb je onduidelijkheid in de veroorzaker van de schade. Een probleem dus.
Zie antwoord vraag 1.
3. Bouwrijpmaakprojecten waarbij er ongecontroleerd zand ge- en verplaatst wordt.
Deze toepassing is hoogstwaarschijnlijk niet mogelijk mede doordat:
 - Zand geen goede reflectie geeft.
 - Met InSAR wordt de fractie van de golflengte gemeten. Een hele golflengte varieert per satelliet (voorbeeld: Envisat 56 mm). Aangezien het signaal eerst uitgezonden wordt door de satelliet en vervolgens weer opgevangen wordt door dezelfde satelliet, is het enkel mogelijk om de helft van de gehele golflengte te meten (voorbeeld: Envisat 28 mm). De omlooptijd per satelliet varieert tussen de 10 en 34 dagen. Als er binnen deze periode zetting, deformatie groter dan de helft van de golflengte optreedt, dan moet hier priori kennis over aanwezig zijn zodat hier in de berekening/analyse van de InSAR-meting rekening mee gehouden kan worden.
4. Monitoren van ophogingen.
Zie antwoord vraag 3.
5. Ingeschakeld om deformatiemeting uit te voeren aan pand, waaraan al schade was geconstateerd zonder dat er een goede nulmeting was uitgevoerd.
Zie antwoord vraag 1. Heb je hier een concreet voorbeeld van (locatie?)!
6. Lage Kade in Arnhem
Het meten van een kademuur is een reële toepassing om uit te voeren met InSAR. Met name de bolders die op en in de muur zijn geplaatst geven een goede reflectie.
7. Deformatiemetingen, bodemdaling etc.

Voorbeeld

In Groningen wordt InSAR toegepast om bodemdaling te bepalen die mede veroorzaakt wordt door gaswinning. De bodemdaling wordt bepaald aan de hand van permanente reflectoren in het gebied. Aangezien vegetatie geen bruikbare reflectie geeft wordt de bodemdaling bepaald door bijvoorbeeld zakkende huizen, bruggetjes, steenbestorting, enzovoort.

Vraag:

Wel eens benieuwd geweest wat er tussen je metingen door is gebeurd?

8. Deformatiemeting aan woonboerderij na dijkverzwaring in veengebied nabij verbreding A2.
Meerdere invloeden dus.

Heb je hier meer informatie over? Exacte locatie, de periode? Wanneer er zetting zou zijn? Dit is een leuk voorbeeld voor de bijeenkomst als er meer informatie over is!

9. Diverse kunstwerken in de rijkswegen, dijken, verzakkingen in wegen.

Voorbeeld wegen:

Het verschil in zetting bij het wegdek varieert tussen onderheide constructies (kunstwerken, duikers, enzovoort) en tussen het niet-onderheide wegdek. Het verschil in deformatiesnelheid kan bepaald worden aan de hand van InSAR-metingen.

Dijken: (is meerdere keren met succes ingemeten door middel van InSAR zie website www.hansjebrinker.com)

Met name dijken die door middel van basaltblokken zijn bekleed, zijn zeer geschikt om te monitoren met InSAR.

10. Soms wil je weten wanneer een zetting is ontstaan en of dit plotseling is gebeurd.

Voorbeeld:

Als er significante zetting geconstateerd wordt door reguliere inwinmethode (bijvoorbeeld waterpassing, tachymetrie) en je wilt achteraf meer metingen hebben tussen de twee reguliere meetepochen. Dan zou InSAR gebruikt kunnen worden om meer inzicht te krijgen over de geconstateerde zetting.

11. verplaatsen van voorbelasting over een terrein

Zie vraag 3.

12. monitoring van ophogingen

Zie vraag 3.

13. Deformatiemetingen aan panden / objecten. Komt wel voor dat we pas worden ingeschakeld om een herhalingsmeting uit te voeren op het moment dat de schade al geconstateerd is. Je zou door meerdere monitoringen tussendoor eerder kunnen constateren of er iets gebeurt met het object qua deformatie.

Dit is zeker mogelijk met InSAR.

14. Raadsliedenbuurt Leerdam, bouw- en woonrijp maken.

Heb je hier meer informatie over?

- Op wat voor manier kan InSAR een toegevoegde waarde zijn bij dit project?

15. Het monitoren van 147 panden in Leiden voor RWS.

Verschaffen de reguliere meetmethoden niet genoeg informatie?

16. deformatie, toestand aanleg etc.

'Toestand aanleg', heb je hier voorbeelden van?

Vraag:

Kun je een project, opdracht, toepassingsgebied benoemen waarbij het handig is om de stabiliteit te bepalen op basis van gegevens uit het verleden?

17. Peilgebieden opstellen.

Op wat voor manier kan InSAR een toegevoegde waarde zijn bij deze toepassing, zou je hier meer informatie over willen verschaffen?

18. Eigenlijk bij elke deformatiemeting. Wat is projectgerelateerde zetting en wat is de natuurlijke zettingstrend?

In veel gevallen wordt de kwaliteit van de deformatiemeting onderdrukt door het budget dat beschikbaar is. InSAR is voor de meeste toepassingsgebieden nog niet een op zichzelf staande techniek. Bij projecten waarbij het budget een significante rol speelt zou ik InSAR op de volgende manier toepassen:

- Bepalen van natuurlijke zetting (waardoor minder reguliere metingen benodigd zijn om natuurlijke zetting te bepalen).
- Zie vraag 10.

19. Zetting aan kunstwerken (bv Vaanplein) of zetting van gebouwen waar NAP-bouten inzitten voor het bepalen van de stabiliteit van een pand.

Het bepalen van de stabiliteit van gebouwen/objecten waarin NAP-bouten zijn geplaatst zou een mooie nieuwe toepassing kunnen worden!

Voorbeeld

In de gemeente Gouda werden de straten in het verleden in een vaste periode ongeacht de zakking opnieuw opgehoogd. Hansje Brinker heeft de zakking van de straat per deelgebied in kaart gebracht. Aan de hand van de InSAR-gegevens is er per deelgebied bepaald wanneer de straat opnieuw opgehoogd dient te worden.

Bij de controlemetingen van het NAP-stelsel zou er dus een vergelijkbare InSAR-meting uitgevoerd kunnen worden om een realistische tijdsinterval van controlemetingen te bepalen.

20. Ja, zeker interessant om het gebied te bepalen waar deformatiemetingen uitgevoerd moeten worden.

21. Ophoging van Bombraak nabij Oostzaan.

Op wat voor manier kan InSAR een toegevoegde waarde zijn bij deze toepassing, zou je hier meer informatie over willen verschaffen?

22. Dijken, wat is de invloed van hoog water op de stabiliteit van een dijk.

Wil je weten wat de invloed van getijden is op de dijken? Zou je hier meer informatie over willen verschaffen?

23. Gebieden waar voorbelasting aangelegd wordt

Op wat voor manier kan InSAR een toegevoegde waarde zijn bij deze toepassing, zou je hier meer informatie over willen verschaffen?

24. Ja, aanleg snelwegen.

Op wat voor manier kan InSAR een toegevoegde waarde zijn bij deze toepassing, zou je hier meer informatie over willen verschaffen?

25. Vopak tank op Maasvlakte voor Delftech 2011.

Op wat voor manier kan InSAR een toegevoegde waarde zijn bij deze toepassing, zou je hier meer informatie over willen verschaffen?

26. Kunstwerken objecten gebouwen etc.

Zie vraag 9.

Nader geanalyseerde toepassingsgebieden

Alle antwoorden zijn op basis van het stroomdiagram dat weergegeven is in hoofdstuk 4 'analyse huidige praktijk' subparagraaf 4.2 'Hansje Brinker', geanalyseerd. Hieruit zijn twee interessante toepassingsgebieden gekozen die verder geanalyseerd worden.

Toepassingsgebied 1

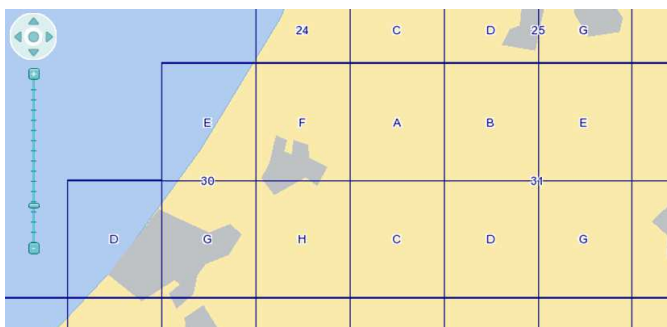
(Vraag 8: Deformatiemeting aan woonboerderij na dijkverzwaring in veengebied nabij verbreding A2. Meerdere invloeden dus.)

Op basis van een quickscan is gebleken dat er op de woonboerderij twee bruikbare permanente reflectoren bevinden (1 op het hoofdgebouw en 1 op het bijgebouw). Aangezien er meerdere waterpassingen verricht zijn tussen 2005 en 2008 en er gebruik gemaakt wordt van Envisat-data (tijdspad +/- 2004 t/m 2010), is er een vergelijking tussen de terrestrische meting en InSAR-metingen mogelijk waardoor het aangedragen toepassingsgebied zeer interessant is om nader te analyseren.

Toepassingsgebied 2

(Vraag 19: Zetting van gebouwen waar NAP-bouten inzitten voor het bepalen van de stabiliteit van een pand.)

De kwaliteit van de geschatte absolute hoogte bij een InSAR-meting is volgens Hansje Brinker voldoende om te onderscheiden of een permanente reflector afkomstig is van het dak van een huis of vanaf het straatniveau. Dit maakt het mogelijk om vrij eenvoudig op grote schaal punten te sorteren op dak en straatniveau. Een groot deel van alle NAP-bouten bevinden zich in de gevel van een huis. Omdat alle coördinaten van de NAP-bouten bepaald zijn is het mogelijk om de geproduceerde permanente reflectoren te koppelen aan de locatie van de NAP-bout. Na alle bewerkingsschappen zou het theoretisch mogelijk zijn om op grote schaal de stabiliteit van de NAP-bouten te bepalen. Om dit te onderzoeken zijn alle NAP-bouten op basis van een quickscan in kaartblad 31E (afbeelding 7.1) gemeten.



Afbeelding 7.1 overzicht kaartbladen, kaartblad 31E is voor de analyse gebruikt. [NAPinfo, 2012]

7.3 Analyse toepassingsgebied 1 (Deformatiemeting aan woonboerderij)

Inleiding

RPS heeft in 2005 de opdracht gekregen om een huis te monitoren doormiddel van waterpassing. De Landmeter die de opdracht toen der tijd uitgevoerd heeft was benieuwd of de geconstateerde zakking daadwerkelijk veroorzaakt werd door de aanleg van de nieuwe dijk.

InSAR

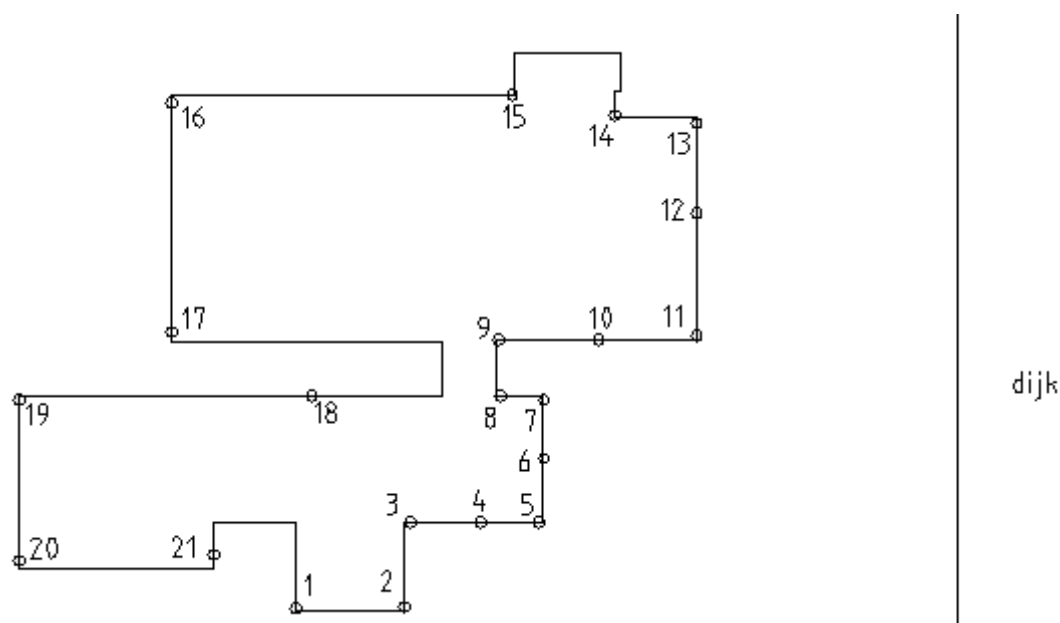
De wijze waarop een quickscan wordt uitgevoerd is uitvoerig beschreven in hoofdstuk 5 'van radarbeeld tot permanente reflector'. Op basis van een quickscan zijn er twee bruikbare permanente reflectoren (afbeelding 7.2) overgebleven op de woonboerderij.



Afbeelding 7.2 twee permanente reflectoren op woonboerderij

Waterpassing

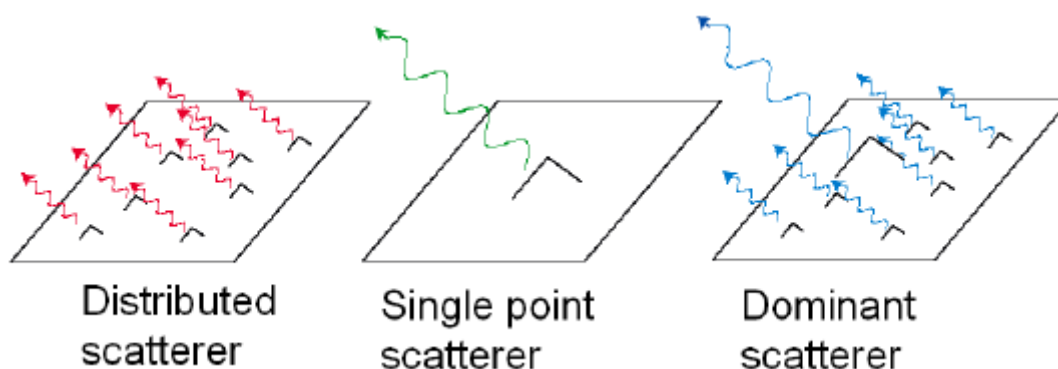
De eerste meting (0-meting) is uitgevoerd ten opzichte van een stabiel verondersteld referentiepunt dat buiten het zettingsgebied is geplaatst. De 0-meting heeft plaatsgevonden op 21 maart 2005, vervolgens zijn er tussen 21 maart 2005 en 2006 acht herhalingsmetingen uitgevoerd waarbij de maximaal geconstateerde zetting ten opzichten van de 0-meting 2 mm bedraagt. De constatering in deze periode was dat er geen significante deformatie was opgetreden tijdens de werkzaamheden. Vervolgens is er drie jaar later op 21 mei 2008 nogmaals een herhalingsmeting uitgevoerd waarbij de maximale deformatie 12 mm bedraagt.



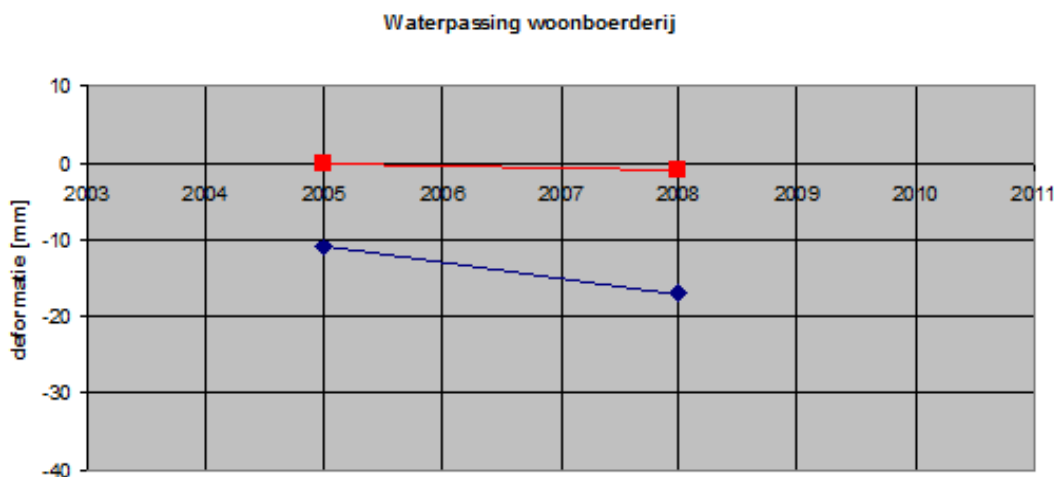
Afbeelding 7.3 overzicht meetpunten(zettingboutjes horizontaal geplaatst in het verticale vlak) in de woonboerderij

Vergelijking tussen de waterpassing en de InSAR-meting

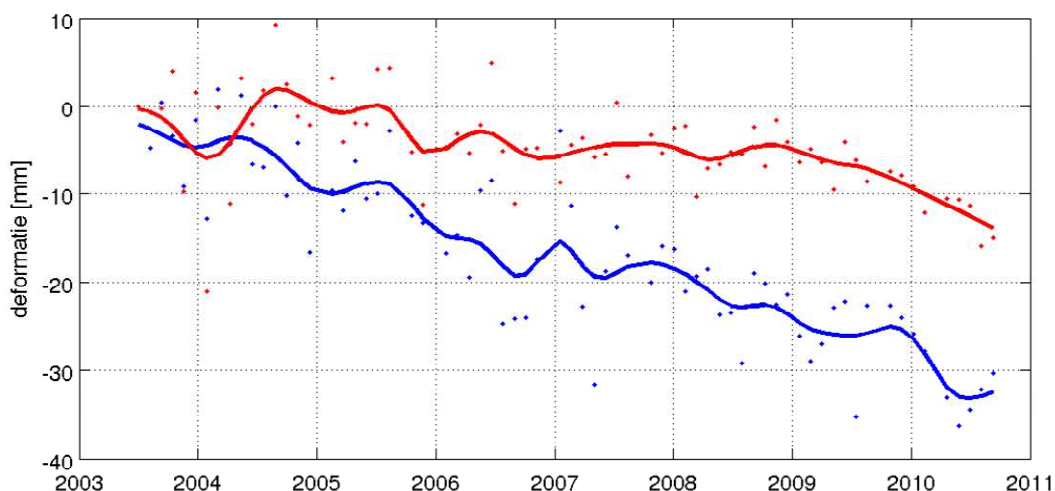
Een radarbeeld geproduceerd door middel van de Envisat-satelliet heeft een pixelgrootte van 4 bij 20 meter. Binnen dit pixel zijn er verschillende reflectiemogelijkheden (afbeelding 7.4 verschillende soorten weerkaatsing binnen een pixel). De geschatte hoogte (absolute hoogte InSAR-meting) van de permanente reflector wijst uit dat de reflectie hoogstwaarschijnlijk afkomstig is vanaf het dak van de woonboerderij. Bij de vergelijking zijn we ervan uitgegaan dat het gemiddelde van meerdere dominante reflecties binnen de pixel van de permanente reflectoren de waarneming bepaald hebben. Om een vergelijking te kunnen maken met de waterpassing zijn de hoogteverschillen van de meetpunten 9, 15, 16 en 17 gemiddeld voor het blauwe punt (afbeelding 7.2). En voor het rode punt (afbeelding 7.2) zijn de hoogteverschillen van de meetpunten 1 t/m 8 en 18 gemiddeld. Afbeelding 7.5 laat de gemiddelde (gemiddeld ten opzichte van de aangegeven meetpunten) deformatiesnelheid zien van zowel het rode als het blauwe punt in de periode tussen 2005 en 2008 (het absolute verschil tussen de InSAR-meting en de waterpassing is in de afbeelding gecorrigeerd). Afbeelding 7.6 toont de deformatie van zowel de rode als de blauwe permanente reflector in de periode van +/- 2004 t/m 2011.



Afbeelding 7.4 verschillende soorten weerkaatsing binnen een pixel (verdeelde reflectie, enkel punt reflectie, dominante reflectie)



Afbeelding 7.5 gemiddelde (van een aantal waterpas meetpunten die hoogstwaarschijnlijk dezelfde locatie omvatten als de permanente reflectoren rood en blauw uit figuur 7.2) deformatiesnelheid bepaald door middel van waterpassing. De rode en blauwe lijn komen overeen met het rode en blauwe punt uit afbeelding 7.2.



Afbeelding 7.6 deformatiegrafiek InSAR-meting. De rode en blauwe lijn komen overeen met het rode en blauwe punt uit afbeelding 7.2.

Als je beide grafieken vergelijkt met elkaar is er zowel met InSAR als de Waterpasmeting dezelfde trend waar te nemen. Bij een vergelijking tussen de InSAR-meting en de waterpasmeting op tijdstip 2008 (waarden afgeleid uit de grafiek) zijn de volgende waarden waar te nemen.

Punt	WP 2008	InSAR 2008	verschil InSAR - WP
	[mm]	[mm]	[mm]
Rood	-1	-4	-3
Blauw	-17	-18	-1

Afbeelding 7.7 grafiek waarin het verschil tussen de waterpassing en de InSAR-meting is weergegeven. De resultaten van zowel de InSAR-meting als de waterpasmeting zijn uit de grafiek afgelezen.

7.4 Analyse toepassingsgebied 2 (zetting van gebouwen waar NAP-bouten in zitten)

Inleiding

Als de hoogte van een terrestrische meting aan het NAP-net gekoppeld dient te worden, gebeurt dit meestal door middel van een waterpassing aan NAP-bouten van het secundaire netwerk. Om een betrouwbare NAP-hoogte te kunnen leveren wordt de waterpassing minimaal gekoppeld aan twee NAP-bouten. Wanneer de gemeten hoogteverschillen niet correleren met de gepresenteerde hoogte van de NAP-bouten, wordt de meting uitgebreid naar meerdere NAP-bouten totdat de NAP-hoogte betrouwbaar geleverd kan worden.

Bij deze aangedragen toepassing wordt er gekeken of de stabiliteit van de objecten waarin NAP-bouten geplaatst zijn gecontroleerd kan worden door een InSAR-meting. De toepassing zou op kleine schaal uitgevoerd kunnen worden door enkele NAP-bouten te analyseren. De toepassing zou ook op grote schaal uitgevoerd kunnen worden bijvoorbeeld een kaartblad (10 bij 12.5 kilometer) of heel Nederland te analyseren.

InSAR

Om de toepassing te analyseren is er een quickscan op een willekeurig kaartblad (31E Locatie midden Nederland) van Nederland uitgevoerd. De geproduceerde permanente reflectoren zijn samen met de locaties van de NAP-bouten in een afbeelding geplaatst. Bij het analyseren zijn er een aantal onvolkomenheden geconstateerd:

- De RD-coördinaten van de NAP-bouten komen in de meeste gevallen zeer slecht overeen met de verwachte locatie op de kaart (Google-Earth). Er kunnen verschillen optreden in orde grootte van enkele tientallen meters (oplopend tot wel 300 meter).
- De quickscan is uitgevoerd met radarbeelden van de Envisat-satelliet. De kaartlocatie van de XY-locatie van de permanente reflectoren is aan de hand van deze data in orde grootte van 1 tot enkele meters.

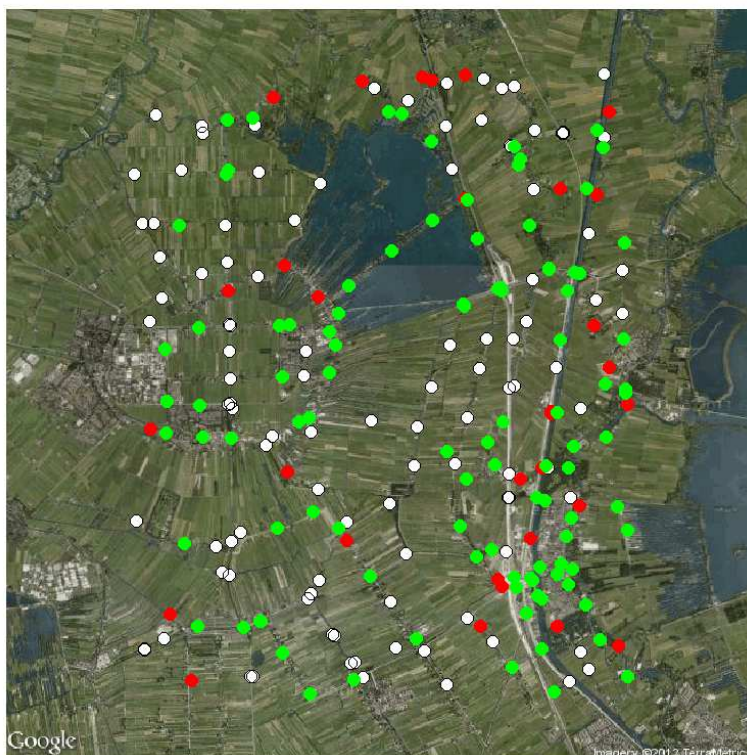
Om een zo goed mogelijke correlatie te krijgen tussen de locatie van de NAP-bouten en de locatie van de permanente reflectoren, moeten er enkele bewerkingsschappen uitgevoerd worden:

- Alle gepresenteerde NAP-boutlocaties moeten gecontroleerd en gecorrigeerd worden.
- Veel NAP-bouten zijn geplaatst in verticale wand van een huis. Met de precisie van de berekende absolute hoogte van een permanente reflector is het mogelijk om onderscheid te maken tussen punten die afkomstig zijn van het dak van een huis of het omringende maaiveld. Om de kans te vergroten dat de locatie van de permanente reflector overeenkomt met de locatie van de NAP-bout kunnen beide datasets (NAP-boutenbestand – geproduceerde permanente reflectoren) gefilterd worden op metingen/bouten die afkomstig/bevestigd zijn in/van huizen.

Resultaat

Om een kwalitatieve analyse uit te voeren zullen er voor een grootschalige analyse (ter grootte van een enkel kaartblad) meerdere tijdrovende bewerkingsschappen uitgevoerd dienen te worden. Aangezien de geringe tijd waarin dit onderzoek uitgevoerd is, zijn de hierboven geconstateerde nog uit te voeren bewerkingsschappen niet uitgevoerd. Om een voorbeeld te geven wat het uiteindelijke resultaat van de meting zou kunnen zijn is afbeelding (7.8) gemaakt waarin permanente reflectoren gekoppeld zijn aan NAP-bouten in een straal van 50 meter. In de afbeelding zijn permanente reflectoren die meer dan 1 mm per jaar zetting vertonen rood gemarkeerd. Er is gekozen voor een drempelwaarde van 1 mm omdat NAP-bouten op dit moment 1 keer in de 10 jaar gecontroleerd en gecorrigeerd worden. Voor een NAP-bout waarvan verondersteld wordt dat deze stabiel dient te zijn, is het onacceptabel dat deze 10 mm in tien jaar zakt.

NAP bouten met PS punten binnen 50m



(Afbeelding 7.8) Een vergelijking tussen permanente reflectoren en de locatie van NAP-bouten. Groene punten zijn permanente reflectoren die minder dan 1mm deformatie per jaar vertonen. Rode punten zijn permanente reflectoren die meer dan 1 mm deformatie per jaar vertonen. Witte punten zijn de locaties van de NAP-bouten waarbij in een straal van 50 meter geen bruikbare permanente reflector geproduceerd is.

7.5 Conclusies enquête

Door een enquête uit te voeren onder collega's van verschillende afdelingen binnen RPS is InSAR voor een groot deel van de collega's geïntroduceerd als nieuwe innovatieve meetmethodiek. Degenen die daadwerkelijk de enquête bekeken en ingevuld hebben, zijn door gerichte vragen aan het denken gezet om zelf een mogelijk toepassingsgebieden aan te dragen. Bijna 50 procent van de gestuurde enquêtes zijn daadwerkelijk ingevuld en geretourneerd. Helaas was er weinig respons van de collega's buiten mijn afdeling (landmeten) wat de diversiteit in aangedragen toepassingsgebieden niet ten goede is gekomen.

Van de aangedragen mogelijke toepassingsgebieden zijn er twee nader geanalyseerd. Bij de analyse op toepassingsgebied 1 ('Deformatiemeting aan woonboerderij') kunnen we op basis van de gegevens concluderen dat er een verband is tussen de hoogteverschillen berekend uit de waterpassing en de hoogteverschillen berekend uit de InSAR-meting. Bij toepassingsgebied 2 zijn er een aantal onvolkomenheden geconstateerd die door tijdrovende bewerkingen zeker opgelost kunnen worden. Het uitvoeren van een stabiliteitsanalyse van het NAP-boutennetwerk is gezien de kwaliteit, "zie hoofdstuk kwaliteit" van de InSAR-meting, zeker haalbaar. Daarentegen zal deze toepassing op basis van een kosten-batenanalyse nader geanalyseerd dienen te worden als het op grote schaal toegepast zou gaan worden.

8 BEDRIJFECONOMISCH ASPECT

Inleiding

In dit hoofdstuk worden alle voor en nadelen opgesomd wanneer RPS InSAR als nieuw product gaat leveren. Daarbij wordt er gekeken wat er op dit moment mogelijk is en wat de mogelijkheden van InSAR zijn in de toekomst. Het produceren van permanente reflectoren vergt complexe bewerkingsstappen waarbij grote kennis en kunde benodigd is. Deze kennis en kunde is ruimschoots aanwezig bij Hansje Brinker. Binnen RPS (afdeling landmeten) is er geen ervaring met werken van radarbeelden. Dat RPS op korte termijn InSAR-metingen zelfstandig zal verwerken is geen realistische doelstelling. Om deze reden is deze optie niet meegenomen in het eindrapport. Wel wordt een mogelijk samenwerkingsverband met Hansje Brinker geanalyseerd.

Voordelen InSAR

Binnen RPS, de afdeling landmeten, is er veel ervaring met het werken en verwerken van terrestrische metingen. Als het mogelijk is om met InSAR-metingen de terrestrische metingen te reduceren of te vervangen, wat is dan het nut van het leveren van InSAR-metingen. Het sleutelwoord hiervoor is innoveren.

Door InSAR als innovatieve meetmethodiek te leveren is het mogelijk om:

- Te concurreren door meer contrast/kwaliteit te leveren, door InSAR te leveren als hybride techniek naast terrestrische metingen. Hierbij kun je denken aan een deformatieanalyse waarbij InSAR-metingen samen met terrestrische metingen geleverd worden.
- Te concurreren met prijs door de aanzienlijke duurdere terrestrische meetepochen te reduceren en aan te vullen met InSAR-meetepochen. Door bijvoorbeeld niet 1 keer per jaar een terrestrische meting uit te voeren maar 1 keer in de 5 jaar.

Nadelen InSAR

Als InSAR-metingen kunnen dienen als een opzichzelfstaande techniek voor opdrachten die normaliter terrestrisch door RPS uitgevoerd worden, dan zou Hansje Brinker bij deze opdrachten het monopolie in handen krijgen. Om te bekijken waarbij InSAR mogelijk kan gaan dienen als vervangende techniek van terrestrische waarnemingen is er een tabel (afbeelding 8.1) opgesteld met veel voorkomende werkzaamheden die normaliter terrestrisch uitgevoerd worden door RPS. In de tabel wordt gekeken of het mogelijk is om de toepassing te meten met InSAR, en vervolgens of het mogelijk is om de toepassing geheel met InSAR over te nemen.

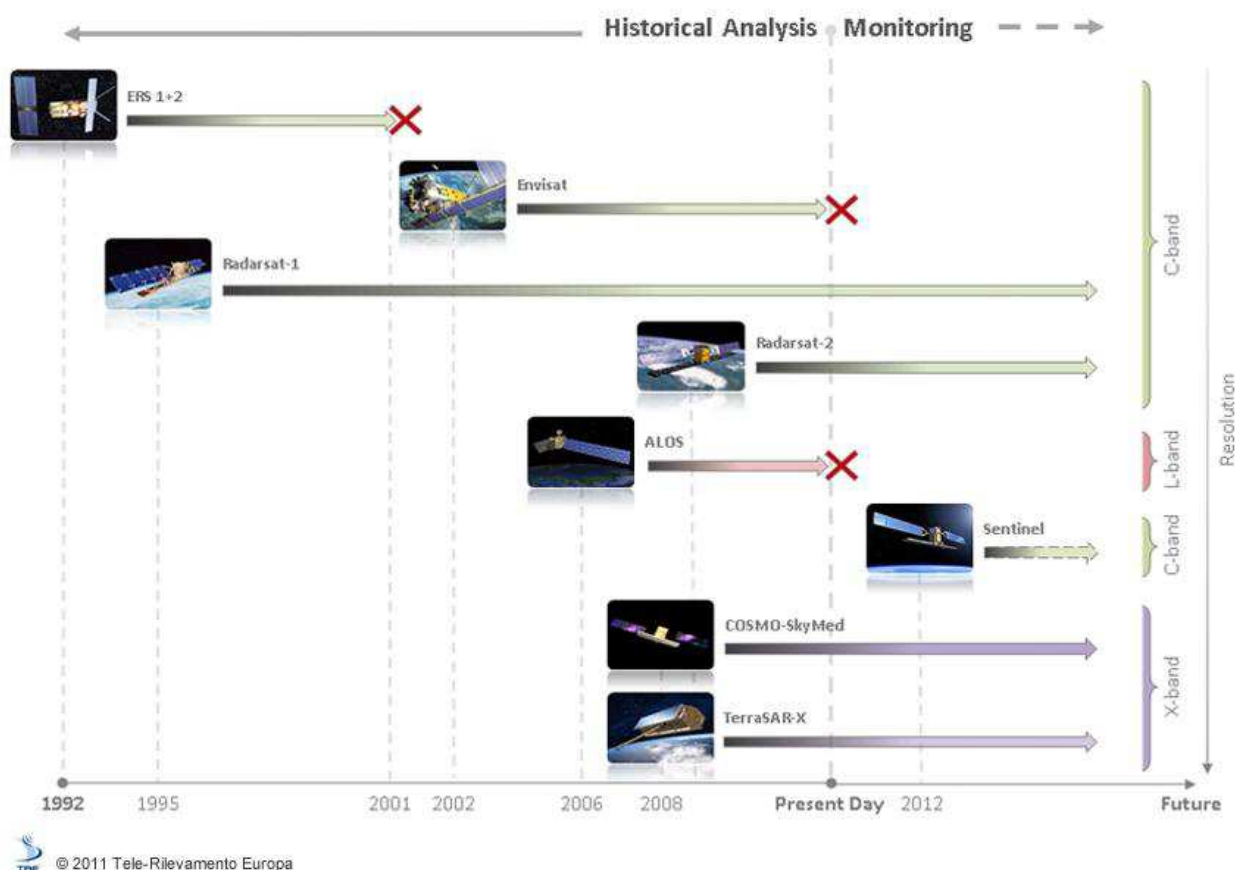
Werkzaamheden	Mogelijk met InSAR	Overname mogelijkheid
Uitzetten GWW (grond-, weg- en waterbouw)	NEE	NEE
Topografische opnamen	JA	NEE
(DTM) Digitale terreinmetingen	JA	NEE
Deformatiemetingen	JA	JA
Opbouw revisiegegevens	NEE	NEE
Profielmetingen	JA	NEE
Inventarisaties kunstwerken, waterlopen en peilgebieden	NEE	NEE

afbeelding 8.1: in de tabel worden werkzaamheden die normaliter terrestrisch uitgevoerd worden door RPS theoretisch geanalyseerd of het mogelijk is om de werkzaamheden uit te voeren met InSAR. Daarna wordt er gekeken of het mogelijk is om de toepassing geheel met InSAR over te nemen (overnamemogelijkheid).

Op dit moment is er alleen kans op overname bij deformatiemetingen. De kwaliteit van een InSAR-meting is nog niet gelijk aan die van de terrestrische metingen. InSAR zal bij veel opdrachtgevers nog vertrouwen moeten gaan winnen mocht het als een opzichzelfstaande techniek bij deformatiemetingen willen fungeren. Als het vertrouwen en de kwaliteit groeit (nieuwe nauwkeurige satellieten, verbetering van proces, gebruik van kunstmatige reflectoren), is er in de toekomst een kans dat deformatiemetingen met InSAR als een opzichzelfstaande techniek kan fungeren.

Toekomst InSAR

De toekomst van InSAR hangt nauw samen met de beschikbare radardata en de toekomstige te beschikken radardata. Afbeelding 8.2 geeft een tijdlijn met reeds uitgevoerde en toekomstige satellietmissies.



Afbeelding 8.2: tijdpad van satellietmissie, met de kleuren rood (L-band), groen (C-band), Blauw (X-band) wordt de golflengte van de satelliet weergegeven.

Overzicht van radarsatellieten waarvan de beelden voor Nederland landsdekkend beschikbaar zijn of komen. Tussen de haakjes staat of er voor de beelden betaald moet worden of dat deze (vrijwel) gratis beschikbaar zijn.

- ERS-1, ERS-2, Envisat (gratis)
- Radarsat (commercieel beheerd, 2010 en 2011 verzameld door Hansje Brinker en 2012 t/m 2015 centraal ingekocht door de Nederlandse overheid)
- Sentinel – 1a (gratis)
- ALOS-1 (wereldwijde dekking, vrij goedkoop beschikbaar)
- TerraSAR-X (beperkt dekkend, commercieel tarief)

Op dit moment is InSAR afhankelijk van toevallig reflecterende objecten. Er wordt op dit moment veel onderzoek uitgevoerd naar kunstmatige reflectoren (corner reflectors afbeelding 8.3, repeaters) aan te brengen. De grootte van een cornerreflector varieert minimaal 1 tot enkele meters. gezien de grootte en daarmee de kans op verstoring (door bijvoorbeeld dieren die er tegenaan lopen) is een corner reflector voor veel toepassingen geen optie. Over onderzoek naar repeaters is op dit moment nog maar weinig te vinden (op het internet). Het basisidee is dat een apparaatje (repeater), dat bevestigd kan worden op een te monitoren locatie, een signaal uitzendt wanneer de radarsatelliet passeert. De afmetingen van een repeater zullen aanzienlijk kleiner zijn ten opzichte van een cornerreflector.



Afbeelding 8.3 voorbeeld van een corner reflector geplaatst op een zandvlakte.

Conclusies (bedrijfseconomisch aspect)

De laatste jaren is de groei in innovatieve meetmethodieken in de landmeetkunde enorm gegroeid. Innovatieve meetmethodieken als 3d-laserscanners, mobile mapping en luchtfoto's vanuit model-vliegtuigjes zijn aan het assortiment van de landmeter toegevoegd. RPS heeft in de laatste jaren een afwachtende houding aangenomen bij het innoveren in nieuwe meetmethodieken, waardoor het assortiment in meetmethodieken beperkt is gebleven tot tachymetrie, waterpassing en GPS.

Om in de toekomst te kunnen concurreren in een krimpende markt is een innovatieve meetmethodiek als InSAR voor RPS meer dan welkom. Met name op het gebied van deformatiemetingen zou InSAR een mooie aanvulling kunnen zijn. Een samenwerking tussen RPS en Hansje Brinker zou voor beide partijen kunnen leiden tot nieuwe opdrachten. Gezien de geplande satellietmissies en lopende onderzoeken op kunstmatige reflectoren, is een toekomst met InSAR veelbelovend.

9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Inleiding

In dit hoofdstuk worden de opgestelde onderzoeksvragen uit het plan van aanpak beantwoord. Vervolgens worden er aanbevelingen gericht naar RPS en Hansje Brinker geschreven omtrent het gebruik van InSAR.

Conclusies

Onderzoeksvraag: *In tegenstelling tot de reguliere inwinningsmethoden is het interpreteren van resultaten die verkregen zijn door middel van InSAR-metingen relatief lastig. Zo is bijvoorbeeld de exacte locatie van het reflectiepunt vaak niet exact te bepalen. In dit onderzoek zal duidelijk moeten worden hoe omgegaan moet worden met deze -en mogelijk andere- interpretatiekwesties.*

In het onderzoek zijn een aantal bevindingen gedaan omtrent het interpreteren van InSAR-metingen.

- *Het interpreteren van de exacte meetlocatie:* Het interpreteren van de exacte meetlocatie van een permanente reflector is en blijft discutabel bij het analyseren van een InSAR-meting. De precisie van de meetlocatie varieert per satelliet van 1 tot enkele meters. Bij het analyseren van de meetlocatie per punt, kan er op basis van de absolute hoogteschatting en kennis over de eigenschappen van radarreflecties een aanname gemaakt worden welk object of meerdere objecten het dominante aandeel heeft in de reflectie. De absolute hoogte schatting gebeurt in dezelfde orde grootte als het schatten van de meetlocatie. Een belangrijk voordeel van de absoluut geschatte hoogte is dat het mogelijk is om onderscheid te maken tussen reflecties die afkomstig zijn vanaf het maaiveld of vanaf het dak van een huis.
- *Het interpreteren van de juiste modelkeuze/hypothese:* Bij het analyseren van de resultaten kunnen er verkeerde aannamen gedaan worden als er geen priori kennis is over de zetting van het object, gebied. Als het verkeerde model (lineaire, seizoen, enzovoort) gekozen wordt dan zou een permanente reflector die door de jaren heen veel beweging vertoont door bijvoorbeeld de wisseling van de seizoenen als onbetrouwbaar meetpunt gezien kunnen worden als er geen seizoen in de berekening meegerekend wordt. Als niet het best passende model gekozen wordt, kunnen er alsnog kwalitatieve punten gevonden worden. Bij een verkeerde modelkeuze is de kans groter dat de goede punten niet gevonden worden.

Onderzoeksvraag: *Toepassing van InSAR zal niet overal tot bruikbare resultaten leiden. De vraag is voor welke werkzaamheden InSAR gebruikt kan worden.*

De werkzaamheden die uitgevoerd kunnen worden met InSAR zijn afhankelijk van meerdere factoren:

- Is de toepassing theoretisch mogelijk?
- Welke satellietbeelden (en daarbij beschikbare tijdspad) zijn er voor de desbetreffende opdracht beschikbaar.
 - Resolutie
 - Tijdsperiode van opnames.
- Hebben er op de desbetreffende locatie in het verleden werkzaamheden plaats gevonden die van invloed zijn bij het produceren van permanente reflectoren?

Als er voldaan wordt aan de hierboven gestelde criteria dan wordt er in de praktijk na het uitvoeren van een Quickscan een analyse op het resultaat uitgevoerd of het mogelijk is om de vraag van de klant te beantwoorden.

Onderzoeksvraag: *Is het mogelijk een adequate kwaliteitsbeschrijving van de met InSAR verkregen resultaten te geven? Naast de vraag naar de kwaliteit van de ingewonnen data is een belangrijke vraag ook hoe de kwaliteit getoetst en gewaarborgd kan worden.*

Het beoordelen van de kwaliteit waarmee een permanente reflector wordt bepaald vraagt van de meeste geodeten een andere denkwijze ten opzichte van terrestrische metingen. Bij terrestrische metingen is het te meten punt in de meeste gevallen duidelijk aanwijsbaar, denk aan een messingboutje in een huis of een viaduct. Bij een InSAR-meting is de locatie van het gemeten punt lastiger aan te wijzen. De twijfel over de meetlocatie van een permanente reflector blijft een onzekere factor bij InSAR-metingen.

De precisie van een InSAR-meting wordt behaald door een grote hoeveelheid waarnemingen (radar-beelden). Een kwalitatieve analyse kan pas uitgevoerd worden bij minimaal 20 waarnemingen. Een InSAR-meting is betrouwbaar wanneer het resultaat correleert met een gekozen model, dit wordt uitgedrukt in een coherentiegetal. Bij welke waarde een coherentiegetal als betrouwbaar aangenomen mag worden, hangt af van het aantal radarbeelden waarmee de analyse is uitgevoerd.

Om de kwaliteit van een InSAR-meting te waarborgen zullen er duidelijke afspraken gemaakt/gevonden dienen te worden over een acceptabele grens van het coherentiegetal. Aan de hand van dit onderzoek is er geen duidelijke grens gevonden. Op basis van de kennis en kunde van Hansje Brinker wordt er op basis van ervaring een acceptabele grens van het coherentiegetal toegepast.

Onderzoeksvraag: *Is het financieel interessant in vergelijking met conventionele meetmethoden?*

Beide meetmethodieken kunnen niet een-op-een financieel vergeleken worden. InSAR is een meetmethode op zich, waar verschillende factoren (kwaliteit, tijdsperiode van opname, enzovoort) meespelen in de analyse van het resultaat.

Bij toepassingsgebieden waar het mogelijk is om op grote schaal de conventionele meetmethoden te vervangen of te reduceren met InSAR-metingen, is InSAR zeker een optie om de kosten te verlagen.

Aanbevelingen

De aanbevelingen zijn zowel richting Hansje Brinker als RPS geschreven, omdat beide partijen verschillende belangen hebben bij het onderzoek.

Hansje Brinker

De grootste zorg van een potentiële klant is de kwaliteit van een InSAR-meting. De stelling *'Reeds eerder behaalde resultaten bieden geen garantie voor de toekomst'* is duidelijk te merken bij potentiële klanten. Een verbeterpunt bij het tonen van de gegevens is het visualiseren van de kwaliteit van de meting en dit misschien per punt uitdrukken in een kleurschaal of getal.

Aangezien Hansje Brinker een jong bedrijf is, zijn er op verschillende punten nog significante ontwikkelingen/verbeteringen nodig. Een aanbeveling die hoogstwaarschijnlijk al tot de agendapunten behoort, is meer structuur brengen in de verwerking en archivering van projecten.

RPS

Voor RPS is de grote vraag op welke manier InSAR een toekomst zou kunnen hebben binnen de organisatie. Op dit moment is het nog niet mogelijk om zelfstandig het gehele proces van InSAR uit te voeren. Dit komt mede doordat er niet voldoende kennis aanwezig is voor het werken van radarbeelden.

Een volgende stap om te gaan werken met InSAR zal in samenwerking samen met Hansje Brinker zijn. Bij een mogelijke samenwerking zullen meerdere voor- en nadelen tegen elkaar afgewogen dienen te worden.

Voordelen:

- Met InSAR kan er richting opdrachtgever meer contrast in de analyse van de meetresultaten geleverd worden. De kwaliteit van de analyse zal hiermee significant verbeterd worden.
- Door terrestrische metingen te vervangen of te reduceren zal er qua prijs op de huidige markt sterk geconcentreerd kunnen worden.

Nadelen:

- Door te innoveren met InSAR is het mogelijk dat het aantal terrestrische metingen gereduceerd kan worden. Een dergelijke vermindering is voor RPS geen voordeel. Bij een eventuele samenwerking zullen er duidelijke afspraken gemaakt dienen te worden zodat er wederzijds voordeel mogelijk is.

Als Hansje Brinker en RPS overeenstemming zouden bereiken over een samenvoeging van beide bedrijven, zou dat voor beide partijen grote voordelen kunnen opleveren. Als deze stap genomen zal worden zullen terrestrische metingen ter ondersteuning van InSAR-metingen en andersom aangeboden kunnen worden. RPS heeft een grote klantenkring waarbij InSAR als nieuwe meetmethode met open armen ontvangen zal worden. Dit zou voor Hansje Brinker in een korte periode een explosieve groei van de klantenkring kunnen betekenen.

RPS heeft in totaal 85 vestigingen in Nederland, Engeland, Ierland, Rusland, Verenigde Staten, Canada, Australië, Zuidoost-Azië, Brazilië, Midden-Oosten en Afrika. Doordat InSAR een wereldwijde dekking heeft zou het gemakkelijk voor andere vestigingen van RPS wereldwijd ingezet kunnen worden. Hansje Brinker is tot dusver gericht op het berekenen van permanente reflectoren, dat een onderdeel is van radarinterferometrie. Door de diverse werkvelden binnen RPS, zal er ook vraag ontstaan naar meerdere diensten (bijvoorbeeld: detecteren van olielekages op zee, smelten van de ijskappen, analyses van aardbevingen) die door middel van InSAR geleverd kunnen worden. De vraag naar meerdere diensten van InSAR zou een groei in uitbreiding van het takenpakket binnen Hansje Brinker kunnen betekenen.

10 REALISATIE LEERDOELEN

Inleiding

Bij het opstellen van het plan van aanpak zijn er een aantal leerdoelen geformuleerd. In dit hoofdstuk wordt toegelicht of en hoe de leerdoelen zijn gerealiseerd.

Kennisvraag

Kennisvraag: *Meer kennis over de toepassingsgebieden van InSAR.*

Met name hoofdstuk 7 'vragenlijst (enquête)' hebben mijn kennis over de mogelijke toepassingsgebieden met InSAR vergroot.

Kennisvraag: *De kwaliteit van InSAR-metingen.*

Aan mijn kennisontwikkeling van InSAR-metingen is door mijn wekelijkse bezoeken aan Hansje Brinker in Delft flink gewerkt. In paragraaf 4.1.2 'kwaliteit permanente reflectoren' is uitgeschreven hoe de kwaliteit van InSAR-metingen beoordeeld dient te worden.

Kennisvraag: *De financiële voordelen van InSAR-metingen ten opzichte van terrestrische meetmethoden.*

De financiële voordelen van InSAR-metingen ten opzichte van terrestrische meetmethoden zijn niet een-op-een te vergelijken. De resultaten van beide methoden verschillen zowel in kwaliteit als in de wijze van opname. Een directe vergelijking tussen beide meetmethoden is dus het vergelijken van appels met peren. Hoe je mogelijk financiële voordelen zou kunnen halen uit InSAR-metingen is beschreven in hoofdstuk 10 'bedrijfs-economisch aspect'.

Competenties

Competentie: *Het kunnen beoordelen of InSAR geschikt is als meetmethode bij een opdracht.*

Om te beoordelen of InSAR geschikt is als meetmethode bij een opdracht, heb ik in dit onderzoek in paragraaf 7.1 'voorgedragen toepassingsgebieden' de resultaten van de enquête beargumenteerd en geretourneerd aan degenen die de enquête ingevuld hebben.

Competentie: *Het verbeteren van rapportagevaardigheden.*

Bij het rapporteren heb ik een aantal leermomenten tijdens het afstudeertraject mogen ervaren. Zo zijn er bij het opstellen van het PvA een aantal conceptversies voorafgegaan aan de definitieve versie. In het vervolg laat ik een conceptversie beargumenteren door alle betrokken partijen voordat er aanpassingen doorgevoerd worden.

Bij de start van het onderzoek heb ik een boek [Verschuren, 2010] over het ontwerpen van een onderzoek bestudeerd. Gezien ik voor het onderzoek geen enkele affiniteit met InSAR had, was het moeilijk om een passende doelstelling en probleemstelling te formuleren. Met hulp van derden is dit toch gelukt. In de toekomst zal het opstellen van rapporten zoals een plan van aanpak minder moeite kosten. Mede omdat ik nu gericht weet te zoeken naar passende onderzoeksvragen.

Competentie: *Het beoordelen van kwaliteit (meetkwaliteit).*

Door middel van de geproduceerde kwaliteitsparameters bij een desbetreffende opdracht met het programma Move3 ben ik dagelijks bezig met het beoordelen van de meetkwaliteit van terrestrische metingen. De kwaliteit van een InSAR-meting kan ik op basis van het kwaliteitsproces, dat beschreven is in hoofdstuk 4.1 'analyse huidige praktijk Hansje Brinker', beoordelen.

Meer kennis krijgen over InSAR op het gebied van:

Techniek

Een goed beeld van de techniek (theorie) is gevormd in hoofdstuk 5 'van radarbeeld tot permanente reflector'. Om de techniek te beschrijven hebben verschillende bronnen een bijdrage geleverd aan het realiseren van dit leerdoel:

- College radar interferometrie bij de afdeling Geomatics aan de TU-Delft.
- Theoretisch boek [Hanssen, 2001] over radar Interferometrie.

Verwerken

Bij het produceren van permanente reflectoren dienen er diverse stappen (3 in hoofdlijnen) gedaan te worden:

1. Het bestellen van een stapel radarbeelden (stack) waarbinnen het te analyseren gebied valt.
 2. Het op de juiste manier opstapelen van de radarbeelden door middel van het programma Doris (TU-Delft).
 3. Het uitvoeren van een permanente reflectoranalyse met het programma Depsi (Hansje Brinker).
- Met de eerste twee stappen heb ik theoretisch kennisgemaakt vanuit de literatuur. Het uitvoeren van stap 3 heb ik meerdere malen kunnen ervaren tijdens mijn bezoeken bij Hansje Brinker. Mede het beschrijven hoe het programma Depsi werkt in paragraaf 5.2 'Depsi' heeft ervoor gezorgd dat ik dit leerdoel gerealiseerd heb.

Kwaliteit

Een uitgebreide omschrijving van kwaliteit is gerealiseerd in paragraaf 4.2.1 'kwaliteit van permanente reflectoren'.

Mogelijkheden en beperkingen

De mogelijkheden en beperkingen van InSAR zijn in het gehele afstudeertraject duidelijk geworden. Door de paragrafen heen zijn er een aantal belangrijke beperkingen benoemd. Een van de belangrijke beperkingen is de onzekerheid over de meetlocatie. Het woord mogelijkheden is in dit onderzoek synoniem aan het woord toepassingsgebieden. Zo wordt er in hoofdstuk 7 'vragenlijst (enquête)' een aantal mogelijkheden geanalyseerd.

11 BIJLAGEN

11.1 Definities van begrippen en afkortingen

Begrippen:

Amplitude: Is de grootte, of sterkte, van een trilling.

Betrouwbaarheid: De mate waarin een waarde overeenstemt met de werkelijke waarde.

Correlatie: Verschijnsel wanneer er een samenhang blijkt te zijn tussen twee reeksen metingen.

Deformatie: Positieverandering van een object.

Fase: Een fase is een grootheid die de positie van een punt in een golfbeweging of trilling aangeeft.

Interferometrie: Interferometrie is het meten met behulp van interferentie, een gezamenlijke werking van meerdere golven die worden gemeten op dezelfde tijd en plaats. Bij InSAR werkt het principe omgekeerd, zo meet je niet twee golven van één locatie, maar één golf van twee locaties (dicht bij elkaar 1 km).

Move3: Is een softwarepakket voor verkenning, vereffening en kwaliteitscontrole van 3D, 2D en 1D geodetische netwerken.

Ondergrondse merken: Naast alle bovengrondse peilmerken bestaan in Nederland circa 220 ondergrondse merken. Dit zijn ijkpunten die (diep) gefundeerd zijn in de stabiele pleistocene zandlagen, die meer dan 10.000 jaar oud zijn. De ondergrondse merken vormen de basis voor het bepalen van de peilmerken boven de grond.

Precisie: De mate waarin de verdere metingen of de berekeningen dezelfde resultaten zullen tonen.

Quickscan: Een methode waarop permanente reflectoren berekend kunnen worden met geringe rekentijd.

Redundantie: Overtalligheid

Standaardafwijking: De standaardafwijking wordt gebruikt om de spreiding (de mate waarin de waarden onderling verschillen) van een verdeling aan te geven.

Afkortingen:

Doris: Delft object- oriented radar interferometric software

ENVISAT: Environmental Satellite

ERS: European Remote-Sensing Satellite

GPS: Global Positioning System

InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar

LGO: Leica Geo office

Lidar: light detection and ranging

MDB: Minimal Detectable bias

NAP: Normaal Amsterdams Peil

PS: Persistent Scatterer

PSI: Persistent Scatter Interferometrie

PS-InSAR: Persistent Scatter Interferometric Synthetic Aperture Radar

RADAR: Radio Detection and Ranging

RD: Rijks Driehoeksnet

RWS: Rijkswaterstaat

RTK: Real time kinematic

SAR: Synthetic Aperture Radar

TU-Delft: Technische universiteit Delft

11.2 Bronnen

Internet

[HB, 2012]

Hansje Brinker infrastructure monitoring (geraadpleegd, 2011 en 2012), <http://www.hansjebrinker.com>

[RPS, 2012]

RPS gebiedsinrichting & infrastructuur (geraadpleegd, 2011 en 2012), <http://www.rps.nl>

[Astronomie, 2012]

Astronomie: auteur onbekend, elektromagnetisch spectrum.

http://www.astronomie.nl/encyclopedie/62/electromagnetische_straling_en_spectra.html, geraadpleegd op 16 mei 2012.

[Haringvlietsluizen, 2012]

Haringvlietsluizen: auteur onbekend, Haringvlietsluizen.

http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten_en_cijfers/vaarwegenoverzicht/haringvliet/index.aspx, geraadpleegd op 15 maart 2012.

[getij, 2012]

Getij: auteur onbekend, getij.

http://live.getij.nl/getij_resultaat.cfm?page=home&location=STELLDBTN&timezone=MET_DST&refplane=NAP&from=20120115, geraadpleegd op 20-03-2012.

[NAPinfo, 2012]

NAPinfo: auteur onbekend, NAP

<https://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/napinfo3/>, geraadpleegd op 24-03-2012.

Literatuur

[Muntendam, 2009]

Muntendam - Bos, A.G., et al.(2009). *PS-InSAR - analyse van de bodemdaling in Noorwest-Friesland: TNO-rapport*

[Duijts, 2008]

Duijts, C. et al. (2008). *Radar Interferometrie, Een monitoringstechniek voor de HSL-Zuid, Afstudeerscriptie faculteit natuur en techniek, Instituut voor de gebouwde omgeving geodesie.*

[Arroyo, 2009]

Arroyo, K. et al. (2009). *Satellite radar observation feasibility stude for large infrastructural public works. A case study on the Delft train tunnel, Geomatics Synthesis Project.*

Boeken

[Hanssen, 2001]

Hanssen, R.F (2001). *Radar Interferometry*. Delft: Kluwer Academic Publishers.

[Verschuren, 2010]

Verschuren, P.J.M. en Doorewaard J.A.C.M (2010). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Boom Lemma uitgevers.

11.3 Resultaat verticale terrestrische deformatiemetingen Haringvlietsluizen (alle metingen)

Punt	1e herh [mm]	2eherh [mm]	3e herh [mm]	4e herh [mm]	5 herh [mm]	6e herh [mm]		Punt	1e herh [mm]	2eherh [mm]	3e herh [mm]	4e herh [mm]	5 herh [mm]	6e herh [mm]
100	-	-	-	-4.5	-3.7	-3.2		417	0	0	0	0	0	0
102	-	-	-	-4.1	-4.6	-5		418	0.1	-0.8	0.6	-0.1	-0.1	0.7
103	-	-	-	-3.4	-2.1	-3.2		420	0.9	-0.4	-0.4	-0.2	-0.3	0.1
105	-	-	-	-3.5	-3.3	-3		421	1	-1.4	1.9	-0.3	0.4	0.5
106	-	-	-	-3	-2.1	-2.5		423	0.9	-0.9	1.4	-0.7	0	0
108	-	-	-	-3.7	-3.3	-3.5		424	1.3	-1.6	0.3	-2.4	-1.9	-3
109	-	-	-	-2.6	-0.6	-1.2		426	1.3	-1.5	0.5	-2.4	-2.1	-3.8
111	-	-	-	-2.1	-0.9	-1		427	1.5	-2.5	0.1	-2.7	-2.7	-4
112	-	-	-	-1.7	1	-0.1		429	1.1	-1.6	-0.5	-3.1	-2.8	-4.7
114	-	-	-	-1.3	0.5	-0.1		430	0.6	-1.9	-0.2	-4.9	-4.1	-6.5
115	-	-	-	-3.6	-1	-2.4		432	0	-1.1	-1.4	-4.7	-4.2	-6.8
117	-	-	-	-3.5	-1.9	-3		433	0.3	-1.1	-0.7	-4	-3.5	-6.5
118	-	-	-	-3.5	-0.7	-2.3		435	0.1	-1.4	-2.1	-4.6	-4	-6.9
120	-	-	-	-2.5	-0.5	-1.8		436	0.4	-1.8	-0.7	-2.8	-2	-4.4
121	-	-	-	-3.8	-0.7	-3.4		438	0.6	-1	-1	-3.2	-2.4	-4.6
123	-	-	-	-3.8	-1.6	-3.5		439	0.2	-2.2	-0.7	-4.5	-3.2	-6.1
124	-	-	-	-4.4	-2.3	-4.3		441	1.3	-1.4	-1.4	-4.3	-3.4	-6.4
126	-	-	-	-4	-2.7	-4.5		442	1.8	-2.2	-0.4	-3	-2.7	-5.7
127	-	-	-	-5.2	-3.2	-6.5		444	1.6	-1.2	-0.7	-3.3	-2.8	-5.6
129	-	-	-	-4.8	-3.3	-5.9		445	1.2	-2.3	-1.4	-4.1	-4	-6.9
130	-	-	-	-6.8	-4.7	-8.3		447	0.9	-1.2	-2.6	-4.4	-3.7	-6.7
132	-	-	-	-6.5	-5.1	-7.9		448	0.7	-1.8	-1.5	-4.2	-3.6	-6.1
133	-	-	-	-7.1	-5.3	-8.9		450	-0.2	-1.1	-2	-4.2	-3.7	-6.3
135	-	-	-	-7.1	-6	-9.2		451	0	-1.4	-1.8	-3.4	-3.7	-8
136	-	-	-	-4.5	-2.5	-7.2		453	0.1	-1	-3.9	-6.4	-4.8	-8.2
138	-	-	-	-4.1	-2.6	-7.4								
139	-	-	-	-3.4	-1	-6.7								
141	-	-	-	-3	-0.8	-6								
142	-	-	-	-6.1	-4	-9.5								
144	-	-	-	-5.2	-3.8	-8.6								
145	-	-	-	-4.5	-3	-8								
147	-	-	-	-4.6	-3.1	-7.8								
148	-	-	-	-5.5	-3.5	-8.8								
150	-	-	-	-5	-3.2	-7.9								
151	-	-	-	-4.6	-3.5	-8.9								
153	-	-	-	-5.6	-3.3	-7.4								
400	-0.2	-1.4	-3.2	-3.4	-1.5	-2								
402	-0.5	-2	-2.7	-2.9	-2.4	-3.9								
403	-0.1	-1.2	-2.5	-2.4	-0.1	-1.8								
405	0.1	-0.1	-2.5	-2	-0.5	-2								
406	0.3	-0.6	-2.5	-2.4	-0.9	-2.9								
408	0.2	-1.4	-2	-2.3	-2.5	-4.2								
409	0.6	-2	-0.5	-0.6	-1	-1.5								
411	0.1	-1.3	-0.6	-1	-1.4	-2								
412	0.4	-1.3	0.3	-0.8	-0.3	-0.5								
414	0.4	-1.2	-0.2	-0.9	-0.7	-0.7								
415	0.7	-1.1	-0.3	-0.2	0.1	0.6								

Resultaten zijn afkomstig uit het 6^e meetrapport deformatiemeting van RWS (17-03-2011).

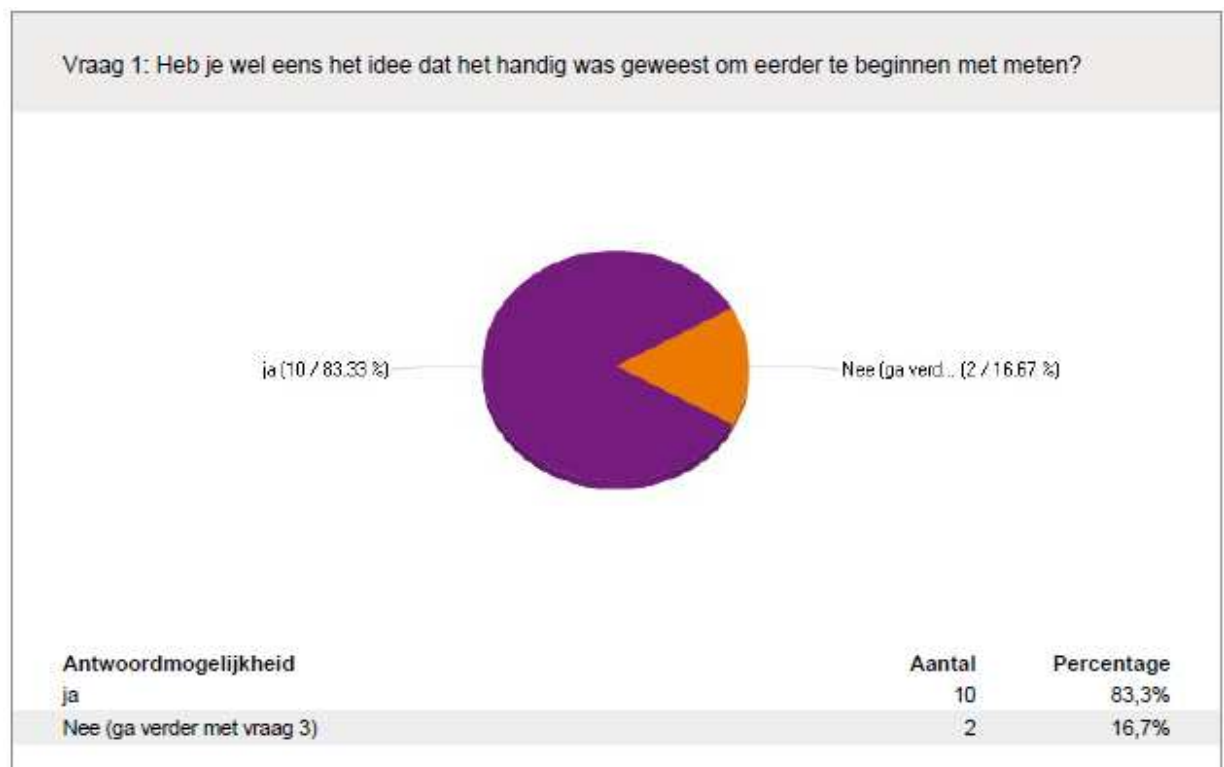
11.4 Resultaat horizontale terrestrische deformatiemetingen Haringvlietsluizen

punt	1e herh		2e herh		3e herh		4e herh		5e herh		6e herh	
	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]
101	0	0	0	0	1	0	0	-2	1.4	-0.7	-0.4	-0.9
104	1	-1	0	1	-2	-3	-4	2	1.9	-0.4	1.1	-0.8
107	0	-1	-1	0	-2	-4	-1	2	0.8	0.0	0.8	-1.4
110	-1	-1	-3	0	0	-4	-5	0	-1.0	-0.7	-6.4	-1.0
113	-1	0	-5	1	4	-4	-4	1	0.0	-1.0	1.4	-2.1
116	1	-1	-2	0	1	-3	-4	-3	0.3	-2.9	3.4	-4.0
119	-2	0	-2	0	-8	-4	4	-5	0.0	-5.4	0.6	-5.9
122	-1	-1	-2	0	8	-3	-1	1	-3.7	-1.3	-0.4	-1.9
125	3	-1	3	0	5	-2	7	-1	0.9	-0.5	3.0	-1.6
128	1	0	-2	0	8	-1	1	-1	-4.7	-0.1	5.8	0.0
131	4	0	0	0	7	0	5	-2	1.2	-0.6	5.0	-2.3
134	3	1	0	0	2	-1	1	-1	4.3	0.8	1.5	1.0
137	3	1	3	-1	-4	0	3	-2	-1.9	-0.2	2.2	-0.9
140	3	1	2	0	0	1	1	0	1.9	2.4	0.6	1.6
143	5	1	0	-1	2	2	2	-2	-1.7	1.2	2.4	0.4
146	3	1	2	0	3	2	4	-2	2.7	2.1	1.8	-0.2
149	1	1	0	-1	2	3	2	-1	1.7	2.0	4.7	0.3
152	0	0	0	0	0	0	1	-2	1.8	0.3	2.1	-0.6
401	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
404	0	-1	0	0	-1	-3	2	1	-0.1	-1.8	-1.9	-0.6
407	-1	-1	1	2	-1	-4	1	3	0.7	0.0	-3.8	0.6
410	1	-1	2	0	-3	-3	5	1	3.2	-3.0	0.5	-2.2
413	-1	0	-2	1	0	-3	4	3	3.2	-1.0	-3.4	0.1
416	1	-1	0	0	5	-2	5	3	1.7	-0.7	-0.8	-1.7
419	1	-2	0	1	1	-2	6	-1	2.9	-3.7	-0.2	-4.5
422	4	-1	3	0	-5	-2	3	2	-1.8	-0.3	-2.8	-1.1
425	-2	0	1	0	1	-1	-1	1	4.3	-0.5	-5.7	0.8
428	-1	0	-3	0	0	-1	0	1	0.2	-0.3	1.8	-0.5
431	1	1	-2	0	4	0	1	-3	-6.2	-2.8	3.1	-2.1
434	-1	1	-1	0	3	1	0	3	0.4	3.6	-3.5	3.4
437	3	2	1	1	1	1	2	0	0.8	0.7	-1.8	2.9
440	1	2	0	0	-1	2	5	-2	-2.8	-0.7	0.1	-0.7
443	-1	0	-1	-1	1	3	0	-3	-2.5	-0.9	-1.3	-1.6
446	0	3	0	1	0	2	3	-2	-2.1	-0.1	0.0	2.0
449	0	1	1	0	0	2	1	-2	-1.8	-0.3	-2.4	0.2
452	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0

Resultaten zijn afkomstig uit het 6^e meetrapport deformatiemeting van RWS (17-03-2011).

11.5 Enquête

Algemene vragenlijststatistieken	
Naam	Vragenlijst (3)
Inhoud	9 vragen
Startdatum	28-03-2012 (verstreken looptijd: 10 dag(en) en 10 uur)
Einddatum	-
Afgerond	12
Begonnen	14
Uitgenodigd (per e-mail)	0
Gemiddelde tijdsduur	02:01:31 ± 06:24:08 (3,2%)
Gemiddelde tijdsspanne	02:01:31 ± 06:24:08 (3,2%)
Gemiddeld aantal sessies	1,0 ± 0,0 (0%)



Vraag 2: Kun je een voorbeeld noemen van een of meerdere projecten waarbij dit het geval is geweest?

dit voren vervolgens met aan pas en
deformatiemeting test ja, gaat vlak verkeerd, jaar
van maar start natuurlijke meten... in besloten uitvoeren, voor
bouwwerkzaamheden soms wordt de zetting beginnen voorafgaand zou er
een te je de moeten kunnen was
eigenlijk herh werkzaamheden zonder metingen meting tijdens begonnen
geregeld om één bouw

test

deformatiemeting voorafgaand aan bouwwerkzaamheden. Soms wordt pas tijdens de bouw begonnen met meten...

Ja, om de natuurlijke zetting te kunnen bepalen zou je eigenlijk één jaar van te voren moeten beginnen met def metingen en vervolgens vlak voor de start werkzaamheden een herh meting moeten uitvoeren. Dit gaat geregeld verkeerd, maar vaak zonder gevolgen omdat er niets gebeurt. Als er wat gebeurt heb je onduidelijkheid in de veroorzaker van de schade. Een probleem dus.

bouwnijpmaak projecten waarbij er ongecontroleerd zand ge en verplaatst wordt.

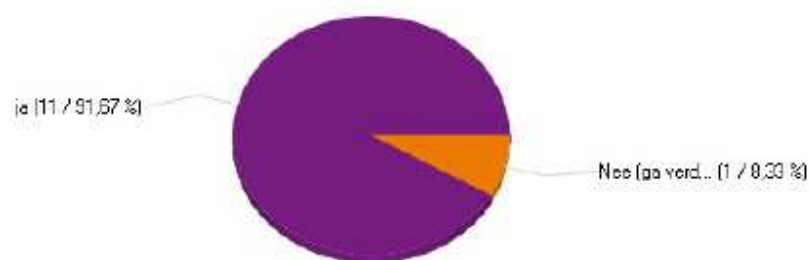
monitoring van ophogingen

ingeschakeld om deformatiemeting uit te voeren aan pand, waaraan al schade was geconstateerd zonder dat er een goede nulmeting was uitgevoerd.

Lage Kade in Arnhem

deformatiemetingen, bodemdaling etc.

Vraag 3: Wel eens benieuwd geweest wat er tussen je metingen door is gebeurd?



Antwoordmogelijkheid	Aantal	Percentage
ja	11	91,7%
Nee (ga verder met vraag 5)	1	8,3%

Vraag 4: Kun je een voorbeeld noemen van een of meerdere projecten waarbij dit het geval is geweest?

ophogingen weten dit en is veengebied voor je deformatiemeting
dus. deformatiemetingen plotseling objecten. wil meerdere komt
verplaatsen diverse invloeden het dijken, monitoring gebeurd. na dijkverzwaring
zetting kunstwerken wanneer woonboerderij verzakkingen een de
aan van In panden rijkswegen, test wegen over
voorbelaasting dat ontstaan terrein nabij a2. / of soms verbreding

test

deformatiemeting aan woonboerderij na dijkverzwaring in veengebied nabij verbreding A2. Meerdere invloeden dus.

Diverse kunstwerken in de rijkswegen, dijken, verzakkingen in wegen

Soms wil je weten wanneer een zetting is ontstaan en of dit plotseling is gebeurd.

verplaatsen van voorbelasting over een terrein

monitoring van ophogingen

deformatiemetingen aan panden / objecten. Komt wel voor dat we pas worden ingeschakeld om een herhalingsmeting uit te voeren op het moment dat de schade al geconstateerd is. Je zou door meerdere monitoring tussendoor eerder kunnen constateren of er iets gebeurd met het object qua deformatie.

Raadsliedenbuurt Leerdam, bouw- en woonrijp maken

147 panden in Leiden voor RWS

deformatie, toestand aanleg etc.

Vraag 5: Zou het wel eens goed zijn om te weten hoe groot het gebied met deformatie eigenlijk is?

ja (12 / 100,00 %)



Nee (ga verder... (0 / 0,00 %)

Antwoordmogelijkheid	Aantal	Percentage
ja	12	100,0%
Nee (ga verder met vraag 7)	0	0,0%

Vraag 6: Kun je hier een potentieel voorbeeld van geven?

werkzaamheden nog eventuele te en de worden zakt
zelfde natuurlijke zijn claims zettingsanalyse gebied
kunnen ook beter zetting? werkzaamheden nap deze
van dan er allemaal? damwanden bv steeds of voorbeeld weg **de**
wat **het** of **is** in n210 test ligt ze beoordeeld
een amsterdam gevolg wel voornoemde bij aan veen relateren

test

zelfde voorbeeld. Wat zakt er allemaal? En is dit wel te relateren aan voornoemde werkzaamheden, of is het natuurlijke zetting?

bv de N210 deze weg ligt in veen gebied en zakt nog steeds of de damwanden in amsterdam

Eventuele claims kunnen dan beter beoordeeld worden of ze het gevolg van de werkzaamheden zijn.

bij een zettingsanalyse ook kunnen kijken naar de omgeving

kan me voorstellen dat het belangrijk is te weten wat de invloedzone is waarbinnen deformatie optreed tijdens werkzaamheden. Denk bijvoorbeeld aan een dijkverzwarringsproject.

Nap bouten Gouda

Portalen A15 Vari Ridderkerk na 2004

NAP projecten kunnen op die manier worden gevolgd.

Vraag 7: Kun je een project, opdracht, toepassingsgebied benoemen waarbij het handig is om de stabiliteit te bepalen op basis van gegevens uit het verleden?

dijken, interessant deformatiemetingen het voor projectgerelateerde op
waar eigenlijk kunstwerken(bv invloed uitgevoerd water zeker is dijk
worden vaanglein) aan peilgebieden nabouten oostaan moeten elke
deformatiemeting gebied of om bij inzitten **de** zetting
Wat stabiliteit **van** een gebouwen opstellen
pand bombraak ophoging test te nabij en zettingstrend? hoog bepalen is
natuurlijke

test

Peilgebieden opstellen

Eigenlijk bij elke deformatiemeting. Wat is projectgerelateerde zetting en wat is de natuurlijke zettingstrend?

zetting aan kunstwerken(bv vaanglein) of zetting van gebouwen waar NAPbouten inzitten voor het bepalen van de stabiliteit van een pand

Ka zeker interessant om het gebied te bepalen waar deformatiemetingen uitgevoerd moeten worden.

ophoging van Bombrak nabij oostaan.

dijken, wat is de invloed van hoog water op de stabiliteit van een dijk.

gebieden waar voorbelasting aangelegd wordt

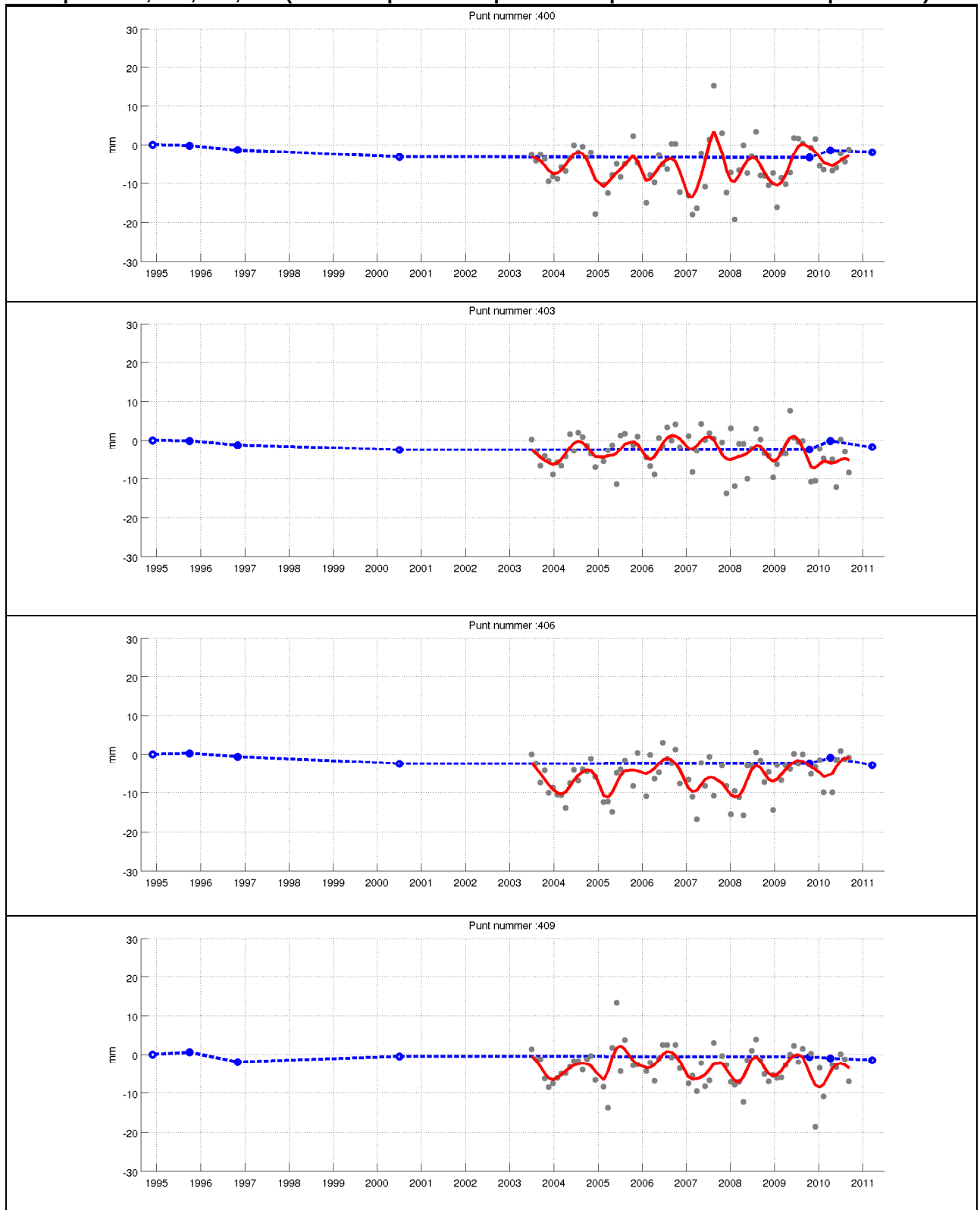
Ja aanleg snelwegen

Vopak tank op maasvlakket voor Delftech 2011

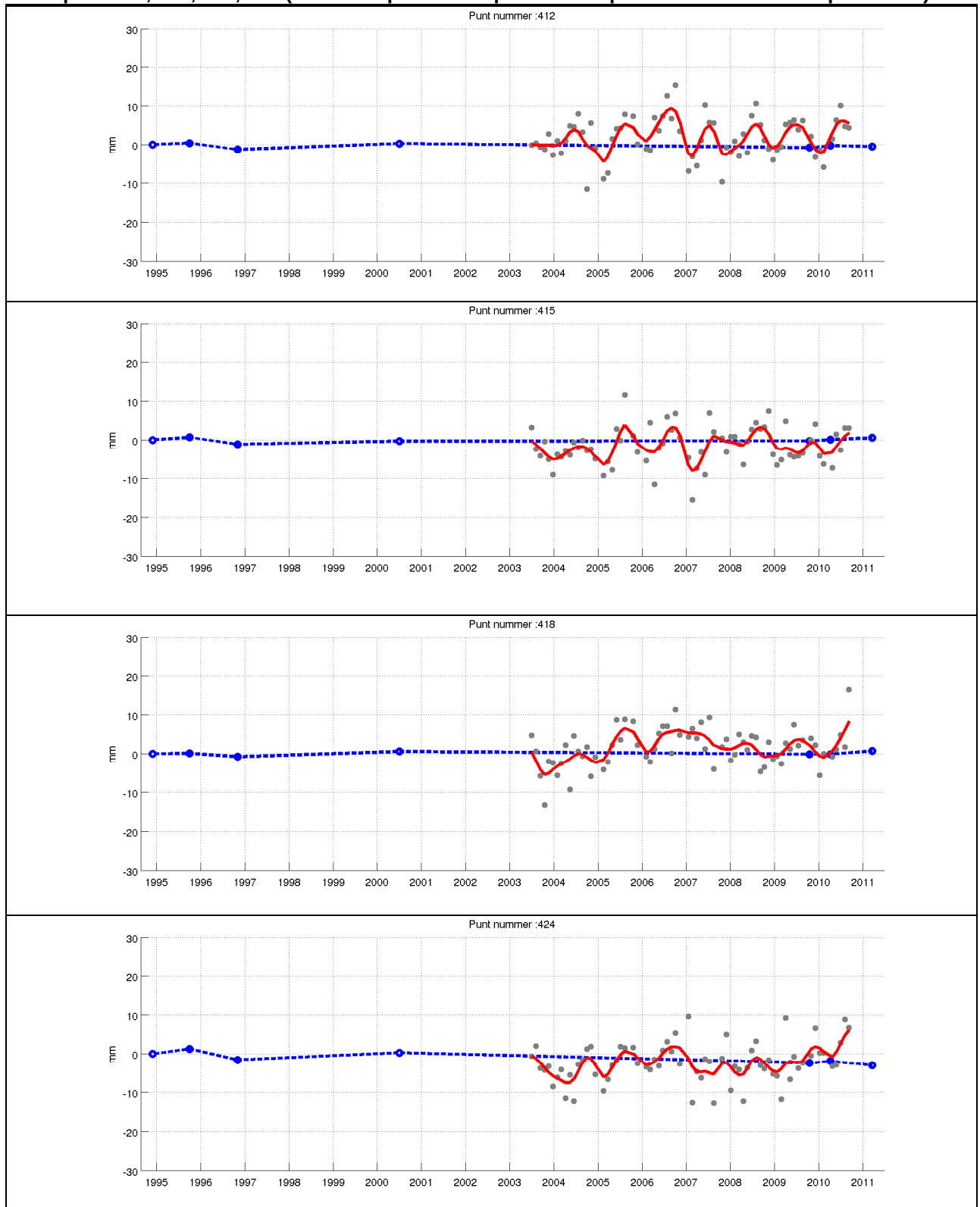
kunstwerken objecten gebouwen etc.

11.6 Grafieken vergelijking waterpassing en InSAR-meting op de Haringvlietsluizen

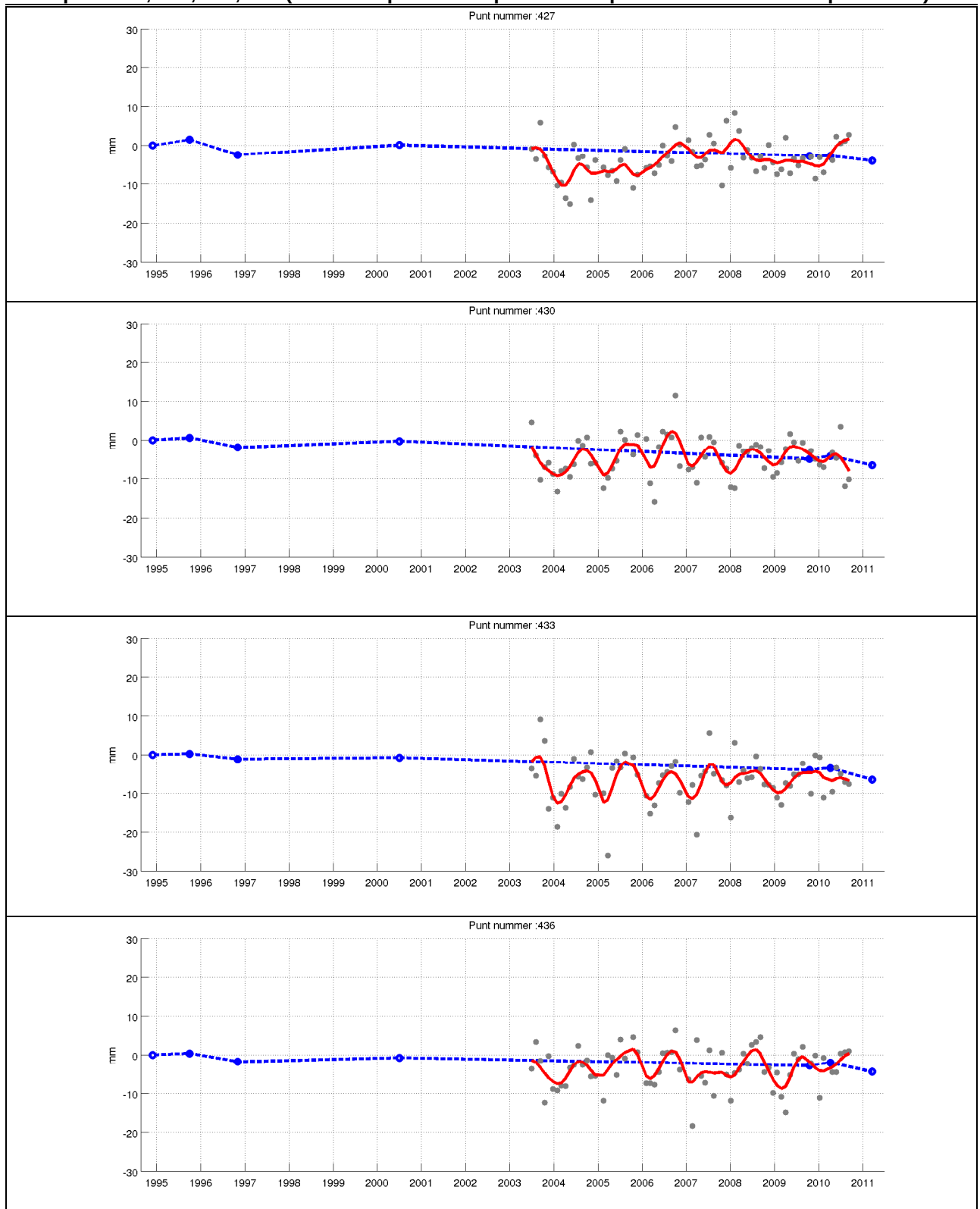
Meetpunt 400, 403, 406, 409 (relatief bepaald ten opzichte van permanente reflector op het land)



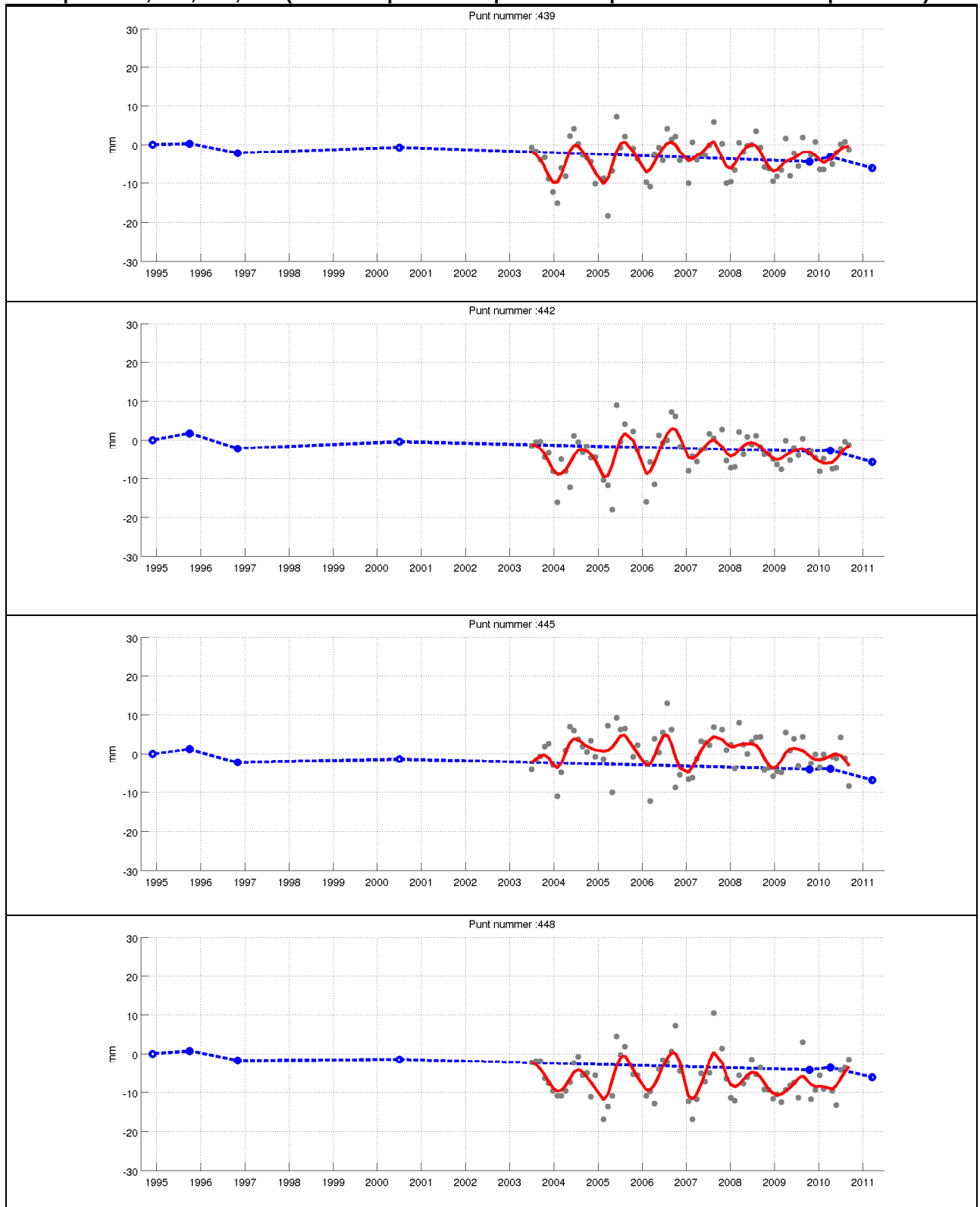
Meetpunt 412, 415, 418, 424 (relatief bepaald ten opzichte van permanente reflector op het land)



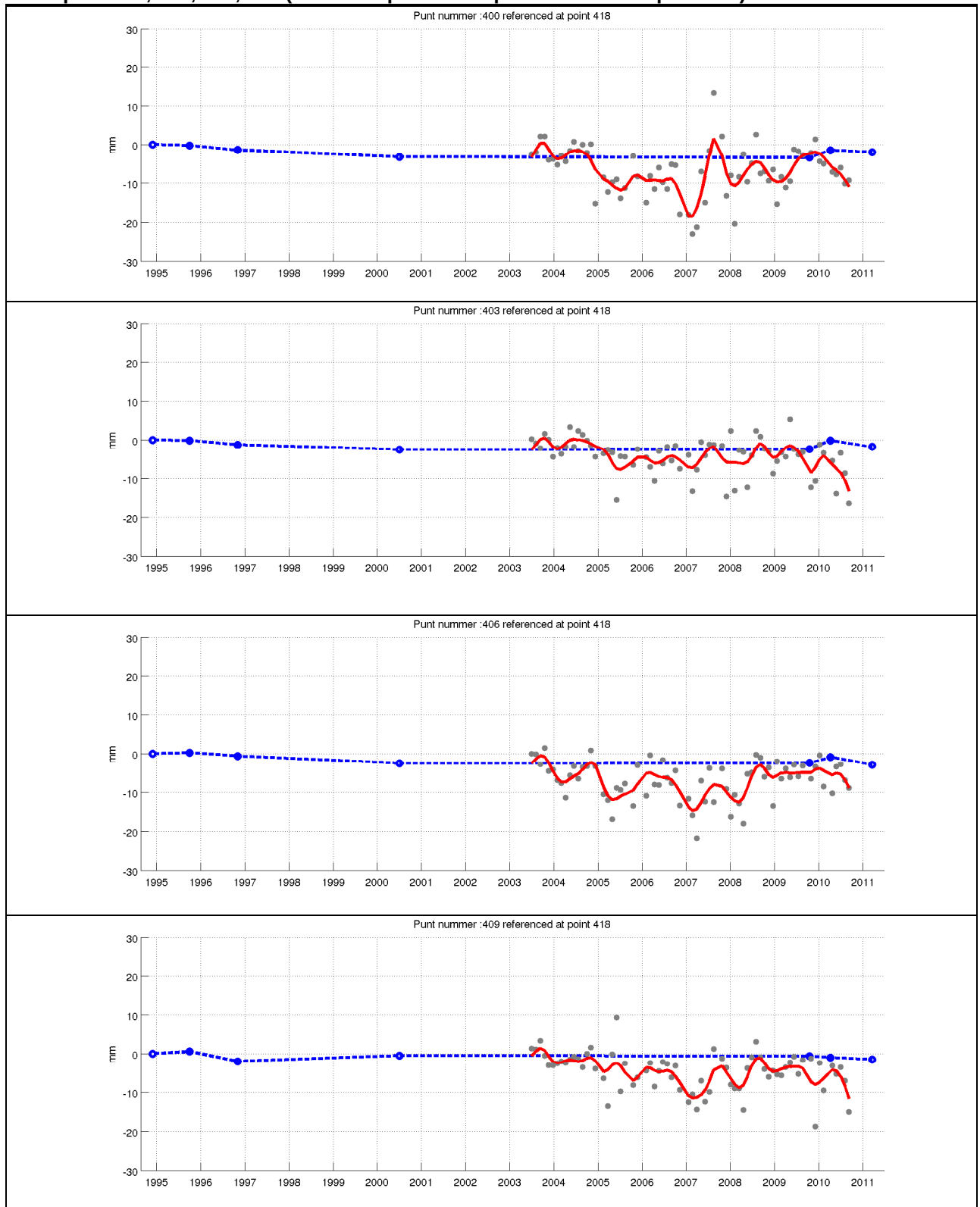
Meetpunt 427, 430, 433, 436 (relatief bepaald ten opzichte van permanente reflector op het land)



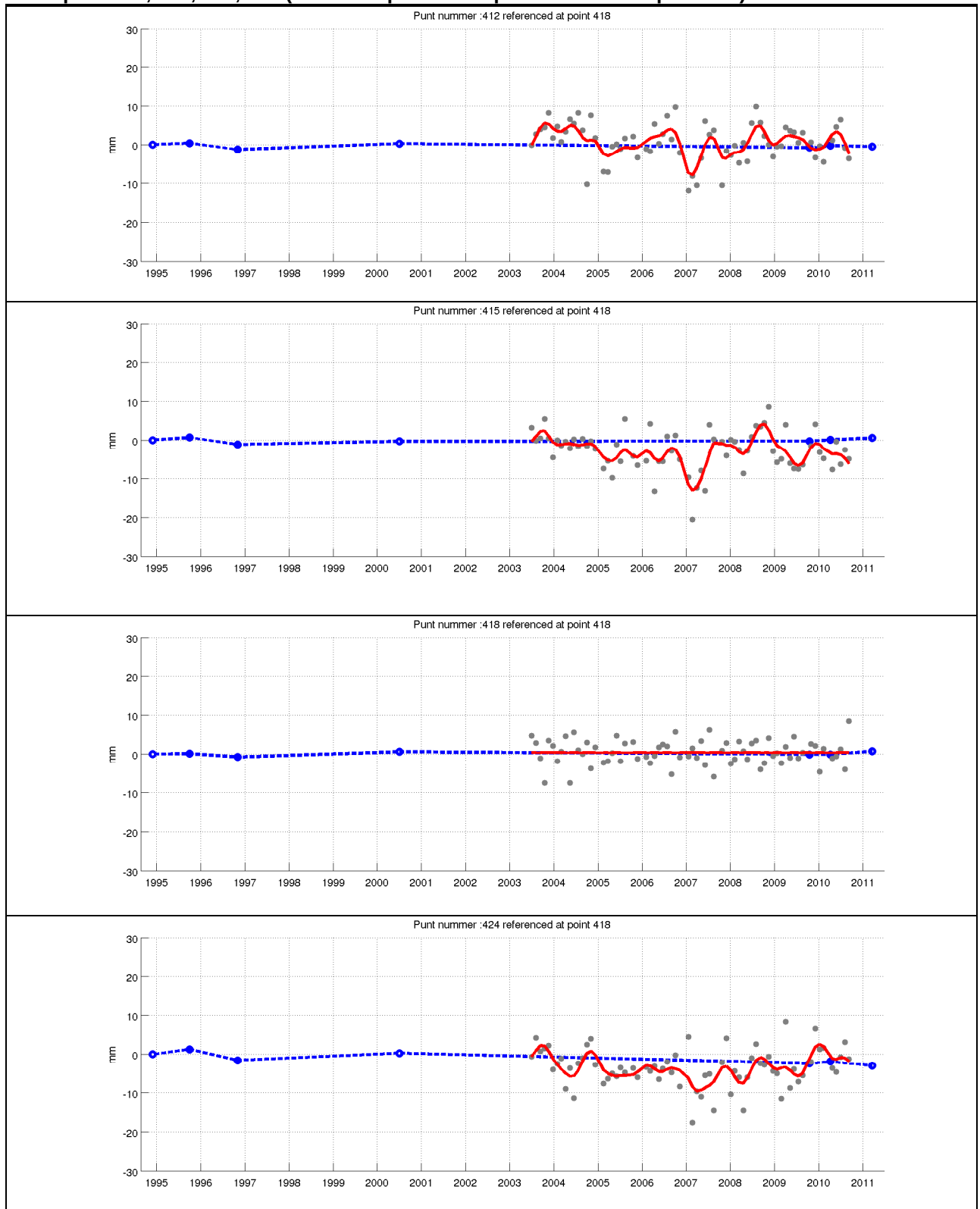
Meetpunt 439, 442, 445, 448 (relatief bepaald ten opzichte van permanente reflector op het land)



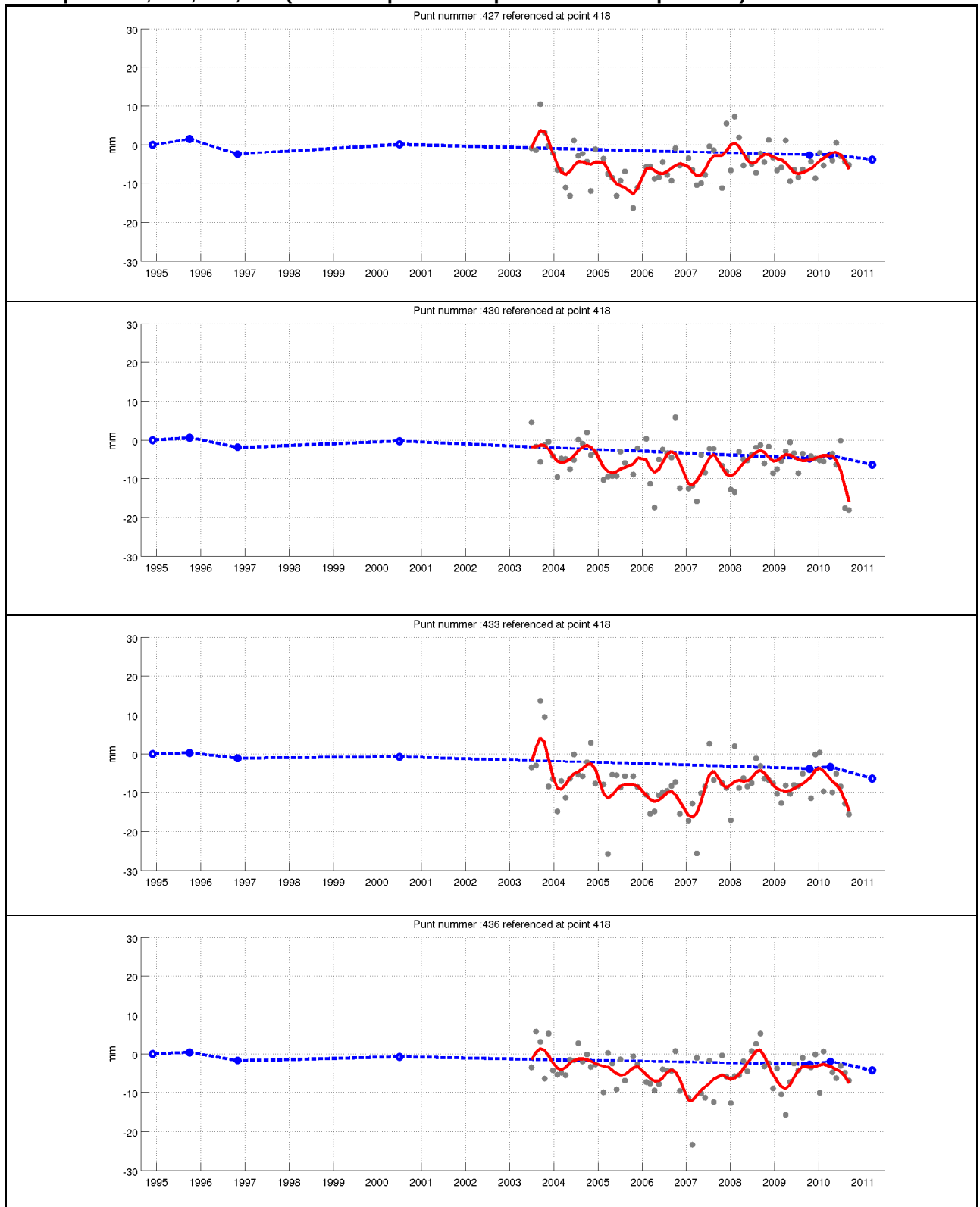
Meetpunt 400, 403, 406, 409 (relatief bepaald ten opzichte van meetpunt 418)



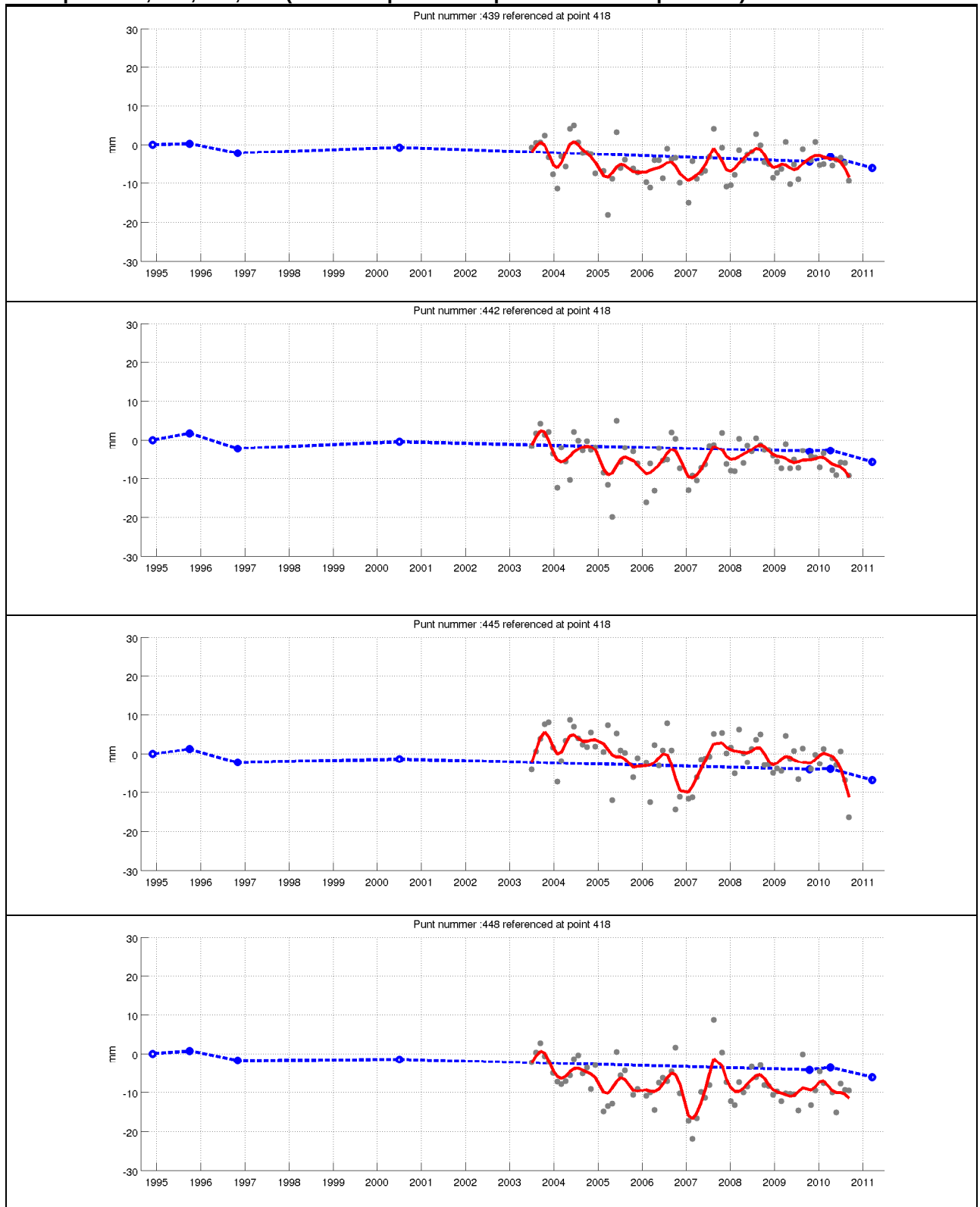
Meetpunt 412, 415, 418, 424 (relatief bepaald ten opzichte van meetpunt 418)



Meetpunt 427, 430, 433, 436 (relatief bepaald ten opzichte van meetpunt 418)

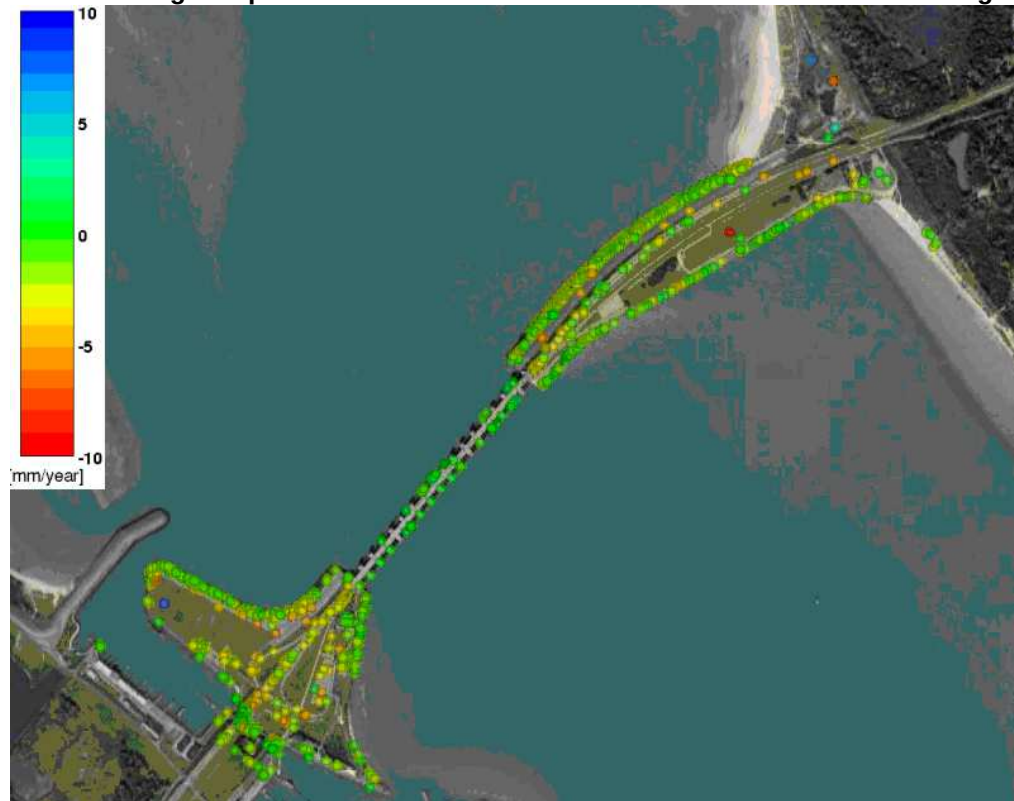


Meetpunt 439, 442, 445, 448 (relatief bepaald ten opzichte van meetpunt 418)



11.7 Resultaat InSAR-meting op de Haringvlietsluizen

InSAR-meting met punten met een minimale coherentiewaarde van 0.6 en hoger



InSAR-meting met punten met een minimale coherentiewaarde van 0.5 en hoger

