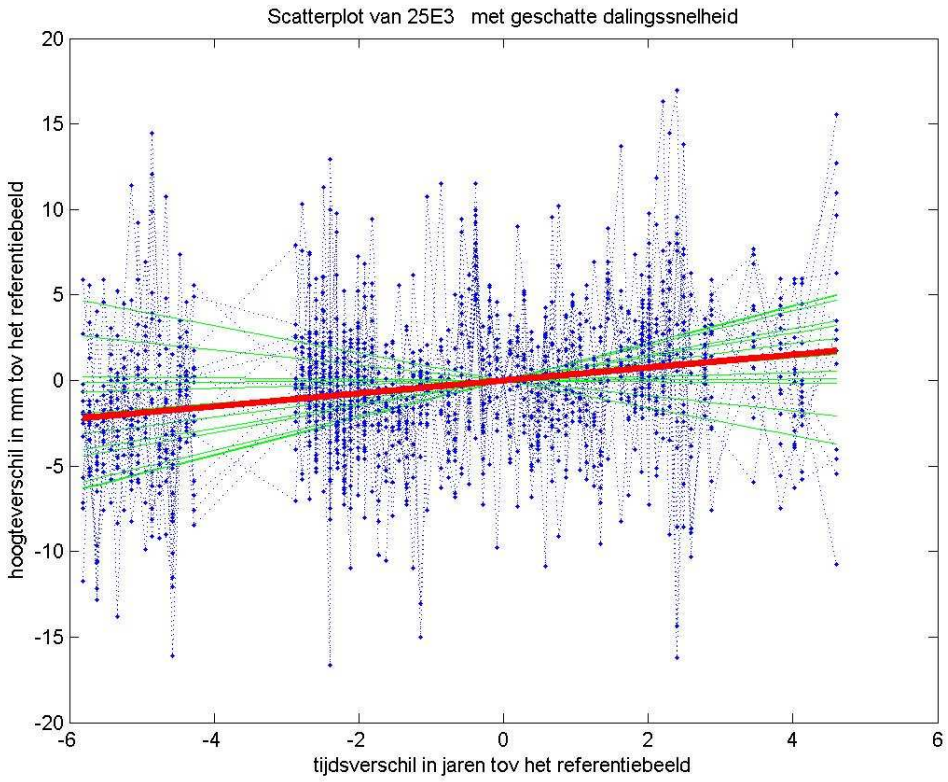
Deformatiemeting met PS-InSAR en peilmerken

–analyse van het verschil in deformatiesnelheid–



Stageverslag van Bas van Goor

Deformatiemeting met PS-InSAR en peilmerken

Analyse van het verschil in deformatiesnelheid

Stageverslag

B. van Goor
Delft, juli 2005

Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Geodesie
Technische Universiteit Delft

Technische Universiteit Delft

Voorwoord

Dit rapport dient als stageverslag van de stage in de Bacheloropleiding Geodesie aan de TU Delft. De stage vond plaats bij TNO-NITG, afdeling Geologie, en heeft een periode van twee maanden beslagen.

Het doel van de stage was om mee te draaien in een geodetisch project en hieraan een eigen bedrage te leveren. Er moet ervaring opgedaan worden in een bedrijf en gekeken worden naar de rol die een geodeet in het bedrijf speelt. Op deze manier moet een beeld ontstaan van het geodetische bedrijfsleven, waarna aan de hand van persoonlijke voorkeur een passende vervolgstudie gekozen kan worden.

Mijn dank gaat uit naar mijn begeleiders Gini Ketelaar van de TU Delft en Chris Bremmer van TNO-NITG voor hun hulp bij en adviezen ten aanzien van het onderzoek. De spoedcursussen InSAR waren noodzakelijk en zeer waardevol voor het verloop van het onderzoek.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord ..... **iii**
Inhoudsopgave ..... **iv**
Samenvatting ..... **vi**

1 Inleiding **1**

2 Achtergrond (PS-)InSAR **2**
2.1 Wat is InSAR? 2
2.2 Permanent Scatterer InSAR 4
2.3 Foutenbronnen bij PS-InSAR 5

3 Identificatie permanent scatterer **8**
3.1 Satellietbeelden/luchtfoto's 8
3.2 Combineren in ArcGIS 10
3.3 Foutenbronnen 11
3.4 Conclusies 12

4 Lokaties voor vergelijking **13**
4.1 Selectiecriteria 13
4.2 Geselecteerde punten 14
4.3 Resultaat veldwerk 15

5 Berekeningen permanent scatterer deformatie **19**
5.1 Beschrijving van de dataset 19
5.2 Voorbewerkingen data 19
5.3 Gebruikte modellen 21
5.4 Resultaten 24
5.5 Conclusies 25

6 Berekeningen peilmerk deformatie **27**
6.1 Beschrijving van de dataset 27
6.2 Voorbewerkingen data 27
6.3 Gebruikte modellen 28
6.4 Resultaten 30
6.5 Conclusies 30

7 Berekening verschil in deformatie **32**
7.1 Beschrijving van de data 32
7.2 Gebruikte model 32
7.3 Resultaten 33
7.4 Analyse resultaten 34

8 Conclusies en aanbevelingen.....36
8.1 Conclusies 36
8.2 Aanbevelingen 37

Literatuurlijst.....38

Bijlagen
1: De noodzaak van hoogteverschillen..... 39
2: Uitgebreide beschrijving veldwerk..... 41
3: Foto's veldwerk..... 56
4: Scatterplots permanent scatterer deformatie en histogrammen w-toets.. 64
5: Scatterplots hoogteverschillen peilmerken..... 75
6: Overzicht geselecteerde peilmerken..... 80
7: Beschrijving peilmerken..... 81
8: Beschrijving TNO.....83
9: Evaluatie stage..... 85

Samenvatting

TNO-NITG beschikt over een dataset met Permanent Scatterer InSAR data van zuidelijk Noord-Holland. Om deze data te kunnen koppelen aan geologische informatie moet bekend zijn of de gemeten deformatie overeenkomt met de deformatie zoals die volgt uit de peilmerkbewegingen. Alleen als de onderlinge relatie bekend is, en dus zeker is dat de permanent scatterers dezelfde bewegingen vertonen als de peilmerken, kan de data aan de geologische informatie worden gekoppeld. De hoofdvraag van het onderzoek is dan ook hoe de permanent scatterer bewegingen gerelateerd zijn aan de peilmerkbewegingen. Hiertoe zijn 11 lokaties geselecteerd (huizen, gebouwen, infrastructurele werken) die voorzien zijn van een peilmerk en als reflectiepunt voor InSAR dienen. Voor deze lokaties zijn twee deformatiesnelheden berekend: één voor de deformatie van de permanent scatterers en één voor het peilmerk. Het verschil tussen de twee snelheden is gebruikt voor het berekenen van een offset tussen de twee meettechnieken.

Voordat een goede vergelijking van de deformatiesnelheden plaats kan vinden moet het duidelijk zijn dat de beide technieken de deformatie van hetzelfde object beschrijven. Om dit te onderzoeken zijn topografische kaarten en luchtfoto's gecombineerd met de lokatie van de peilmerken en de permanent scatterers. Helaas zit er altijd een onnauwkeurigheid in de gegeven lokatie van een permanent scatterer. Hierdoor is het moeilijk de afkomst van een radarreflectie aan te wijzen. Aan de hand van veldwerk is beoordeeld of de beide gemeten deformaties dezelfde fysieke deformatie kunnen voorstellen.

Voor de berekening van de deformatie van de peilmerken is het noodzakelijk dat er gebruik wordt gemaakt van hoogteverschillen en niet van de gepubliceerde NAP-hoogten. Hoogteverschillen zijn niet gerelateerd aan een rekenbasis, terwijl de NAP-hoogten dat wel zijn. Wanneer de NAP-hoogten niet elke keer ten opzichte van hetzelfde eerste orde peilmerk zijn berekend zijn de hoogten waardeloos voor een deformatiemeting.

Bij de berekening van de deformatiesnelheden is grote aandacht uitgegaan naar de variantie van de waarnemingen. De variantie van de permanent scatterer deformatie-metingen is gerelateerd aan de coherentie van de permanent scatterers. Deze parameter geeft een indicatie van de kwaliteit van de gemeten deformatie. Bij de deformatie van de peilmerken is de variantie berekend aan de hand van de afstand tussen het peilmerk en het referentiepeilmerk. Er bestaan vuistregels voor de meetruis van een waterpasmeting.

Er is gezocht naar een offset tussen de deformatiesnelheden die voor alle gekozen lokaties geldig is. De offset wordt veroorzaakt door de beweging van het referentiepunt van de permanent scatterer deformatie. Doordat dit punt sneller zakt dan de andere scatterers lijkt het alsof de andere scatterers omhoog bewegen. Geologisch gezien is dit heel onwaarschijnlijk voor dit gebied.

Vergelijking van de deformatiesnelheden leidt tot de conclusie dat er een offset bestaat tussen de twee deformatiemetingen. De offset is -0,90 mm/yr, met een variantie van 0,0115 mm^2/yr^2. De offset moet worden opgeteld bij de deformatiesnelheid van de permanent scatterers. De precisie van de offset is goed genoeg, de betrouwbaarheid van het resultaat is echter niet zo hoog. Voor een groot deel wordt dit veroorzaakt door de lage betrouwbaarheid van de deformatiesnelheid van de peilmerken.

1. Inleiding

TNO-NITG draait mee in een Europees project waarin met behulp van Permanent Scatterer InSAR data (PS-InSAR) deformatiemetingen worden verricht. De interesse gaat uit naar bodemdaling die veroorzaakt wordt door de winning van natuurlijke bestaansbronnen zoals olie, water of gas. Het is de bedoeling dat met behulp van de PS-InSAR-metingen een oorzaak gevonden kan worden voor bodemdaling. Daarvoor is het noodzakelijk dat de gemeten deformatie dezelfde deformatie beschrijft als gemeten wordt met de beweging van de NAP-peilmerken. Uit vooronderzoek is gebleken dat er een offset bestaat tussen de twee deformatiemetingen. Een schatting van dit verschil zorgt ervoor dat de PS-InSAR-deformaties dezelfde bewegingen beschrijven als de peilmerken, waardoor wellicht ook met behulp van PS-InSAR gekeken kan worden naar de oorzaken van bodemdaling.

De doelstelling van dit onderzoek is het onderzoeken hoe groot de offset tussen de twee verschillende deformatiemetingen is. Hiervoor worden een aantal lokaties geselecteerd waarvoor de twee verschillende deformatiesnelheden worden berekend. Belangrijkste voorwaarde hierbij is dat de twee deformaties de beweging van hetzelfde object beschrijven. Hiervoor is het van belang de afkomst van de radarreflectie te identificeren. Bij het berekenen van de deformatie gaat speciale aandacht uit naar de nauwkeurigheid van de beide meetmethoden.

De benodigde achtergrond informatie over InSAR en PS-InSAR staat in hoofdstuk 2. Hierin worden ook de foutenbronnen die een rol spelen bij PS-InSAR behandeld. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de identificatie van de permanent scatterer. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een combinatie van verschillende soorten geografische informatie. De nauwkeurigheid van het resultaat wordt behandeld. Hoofdstuk 4 beschrijft hoe de punten voor de vergelijking van de twee meetmethoden zijn geselecteerd. Er wordt gekeken naar de identificatie van de permanent scatterer door middel van veldwerk. Voor de berekening van de deformatie op basis van permanent scatterer data wordt verwezen naar hoofdstuk 5. Hier wordt beschreven hoe de gebruikte dataset eruit ziet, hoe op basis van deze data een deformatie kan worden berekend en welke resultaten hieruit voortvloeien. Hetzelfde gebeurt in hoofdstuk 6 voor de NAP-peilmerken. In hoofdstuk 7 wordt het verschil tussen de resultaten van de twee deformatiemetingen geanalyseerd. De offset wordt berekend en er wordt gekeken naar de betrouwbaarheid van het resultaat. De conclusies en de aanbevelingen voor verder onderzoek staan in hoofdstuk 8.

2. Achtergrond (PS-)InSAR

In dit hoofdstuk wordt de achtergrond van de gebruikte techniek beschreven. In de eerste paragraaf wordt het principe van InSAR behandeld. In paragraaf twee wordt de permanent scatterer techniek beschreven. De laatste paragraaf gaat in op de foutenbronnen die een rol spelen in de permanent scatterer techniek.

2.1 Wat is InSAR?

Het woord InSAR is te onderscheiden in drie delen:

- radar (RAdio Detection And Ranging);
- SAR (Synthetic Aperture Radar); en
- Interferometric SAR.

Radar is de techniek waarmee met behulp van uitgezonden elektromagnetische golven reflecties van een oppervlak worden gemeten. Er wordt gebruik gemaakt van de tijd die het signaal nodig heeft om heen en terug te gaan, de two-way travel time. Hieruit kan de afstand tot een object worden afgeleid. Met behulp van de achtergrondreflecties kunnen fysische eigenschappen van een object worden bepaald, zoals afmeting en oppervlakte-structuur. Van de sensor zijn er versies waarbij de antenne alleen kan signalen kan verzenden of ontvangen, maar een combinatie is ook mogelijk.

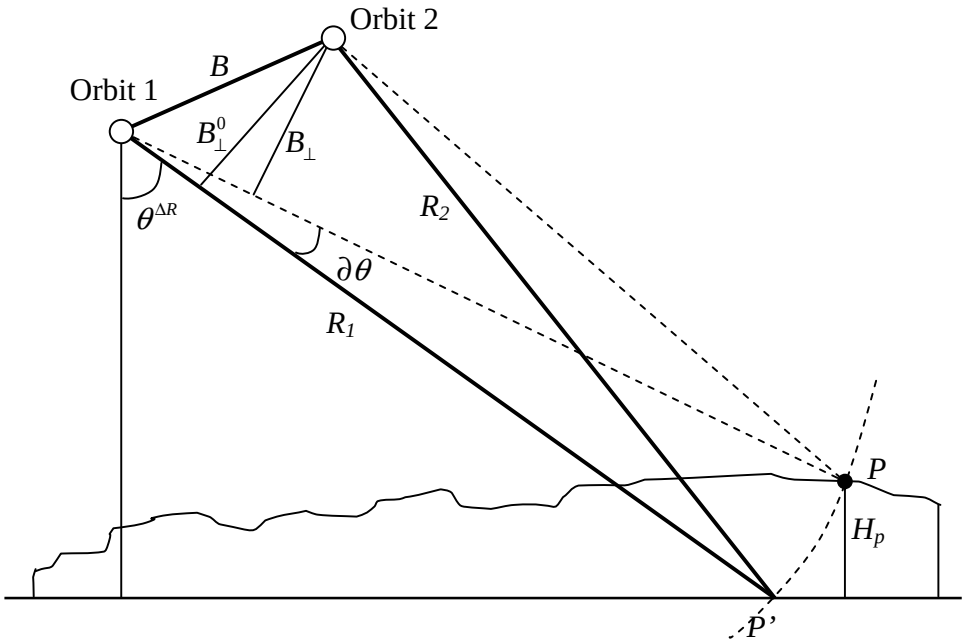
Een van oudsher belangrijke functie van radar is de detectie van objecten in de lucht, zoals bij vliegtuigen. Een object wordt ontdekt en de afstand wordt bepaald. Later werd dit hoofdzakelijke militaire doel bijgestaan door wetenschappelijke doelen. Zo bleek radar uitermate geschikt voor astronomisch onderzoek. Door de radarsensor aan een satelliet te bevestigen konden andere planeten in het zonnestelsel bestudeerd worden.

Een deelgebied van de radar is de beeldende radar, zoals SAR. Het grote voordeel van radar boven optisch beeldende technieken, zoals fotogrammetrie, is dat radar niet afhankelijk is van verlichting door de zon of van bewolking. Het systeem bestaat uit een sensor die signalen uitzendt en de reflecties ontvangt. Het gereflecteerde signaal bestaat uit een amplitude en een fase. De amplitude geeft informatie over de sterkte van het gereflecteerde signaal. Hieruit kan weer informatie over het materiaal op het aard-oppervlak worden afgeleid, zoals de vegetatie. De fase geeft informatie over de looptijd van het signaal, waar de afgelegde afstand uit kan worden afgeleid. Bij eenvoudige toepassingen van de beeldende radar wordt alleen gebruik gemaakt van de amplitude. De signalen worden loodrecht op de vliegrichting uitgezonden. Gevolg hiervan is dat de across track resolutie goed is. De breedte van de signaal in de vliegrichting is echter zeer klein, slechts enkele graden. Hierdoor is het moeilijk om punten te onderscheiden in de vliegrichting. Deze along track resolutie is te verhogen door gebruik te maken van een langere antenne. De lengte van de antenne zorgt echter voor enorme fysieke beperken. Als oplossing hiervoor wordt gebruik gemaakt van de Synthetic Aperture Radar. De

teruggekaatste signalen worden opgeslagen en gecombineerd bij de verwerking. Hierdoor ontstaat op een kunstmatige manier een lange antenne.

De ESA heeft in 1991 een SAR-satelliet gelanceerd, de ERS-1. Het voornaamste doel van deze missie was het monitoren van polen en ijskappen. De regelmatige passages van de satelliet samen met de precieze baansbepaling en het datadistributiebeleid hebben ervoor gezorgd dat SAR een grote stap voorwaarts heeft gemaakt. In 1995 werd de opvolger van ERS-1 gelanceerd, de ERS-2. Gedurende 9 maanden vlogen ze in dezelfde baan, slechts 30 minuten gescheiden van elkaar (tandemvlucht). Door dit kleine temporele verschil is deze tandemconfiguratie geschikt voor de constructie van digitale landschapsmodellen, doordat de temporele correlatie heel hoog is. Het landschap vertoont vrijwel geen deformaties in deze tijdsperiode.
Vanaf 1996 wordt ERS-1 als back-up gebruikt en slechts voor speciale gelegenheden, zoals heftige aardbevingen en aardverschuivingen.

Het grote probleem van radar is dat alleen de afgelegde afstand van het gereflecteerde signaal bekend is. Twee objecten op dezelfde afstand van de sensor zijn niet te onderscheiden. Een oplossing is het gebruik van twee sensoren op een kleine afstand van elkaar. Aan de hand van de twee beelden en kennis over de positie van de satelliet op het moment van opname kan de hoek tussen twee signalen bepaald worden. Met deze informatie kan de topografie van het oppervlak bestudeerd worden en een digitaal landschapsmodel worden gemaakt. Dit was één van de eerste toepassingen van InSAR.
Een interessante toepassing van InSAR bleek de mogelijkheid tot het monitoren van deformaties in het oppervlak. Door gebruik te maken van beelden die op verschillende tijdstippen zijn opgenomen kan de beweging in een gebied bekeken worden. De relatieve beweging van een punt ten opzichte van een referentiepunt kan gemeten worden als fractie van de golflengte, waardoor een nauwkeurigheid van enkele millimeters behaald kan worden. Echter, wanneer de beelden niet vanaf exact dezelfde lokatie zijn opgenomen ontstaat een fasevermenging met de topografische informatie. De oplossing hiervoor is differentiële interferometrie. Een beeld met de topografische fase wordt gebruikt als referentiebeeld, waardoor een interferogram van de deformatie overblijft.



Figuur 2.1: Configuratie InSAR (bron: [4])

2.2 Permanent Scatterer InSAR

De deformatie analyse wordt bemoeilijkt door de atmosferische vertraging van het signaal en fase decorrelatie. Om toch verantwoorde uitspraken over de bodembeweging te kunnen doen wordt gebruik gemaakt van de permanent scatterer techniek. Deze wordt gedetailleerd uitgelegd in [2]. Het basisprincipe is dat de verschillende bijdragen aan de fase (deformatie, atmosfeer, topografie, ruis) worden gesplitst. Dat gebeurt door gebruik te maken van een grote hoeveelheid interferometrische data, bijvoorbeeld data uit het ERS-1-archief, en permanent scatterers. Dit zijn punten, willekeurig verdeeld over het gebied, die over een lange periode een coherente reflectie tonen. Dit blijkt uit een statistische analyse van de reflecties. Hoe groter de amplitude, hoe sterker de reflectie is. De coherentie geeft aan in hoeverre de fasemetingen van een lokatie onderling overeenkomen in de tijd en is een indicatie voor de kwaliteit van de deformatiemeting.
Voor een vergelijking van de data is het essentieel dat iedere pixel, in elk beeld, overeenkomt met dezelfde resolutiecel op de grond. Voor deze referentie wordt gebruik gemaakt van een masterbeeld. Dit beeld wordt gekozen op basis van een optimale relatieve temporele en loodrechte basislijn ten opzichte van de andere beelden en minimale atmosferische invloed. Na oversampling van het beeld heeft de SAR-pixel een afmeting van 10x2 meter. Door oversampling wordt aliasing tegen gegaan.
Alle beelden worden op het masterbeeld geplaatst. Op dit beeld wordt ook een DEM geplaatst. Met behulp van dit masterbeeld kan voor elk slavebeeld een differentieel interferogram worden berekend. Om alle differentiële interferogrammen gezamenlijk te kunnen gebruiken worden er eisen gesteld aan de geometrische en temporele decorrelatie. Punten die vrijwel niet beïnvloed worden door deze decorrelatie, en dus een sterke reflectie vertonen in alle beelden, worden permanent scatterers genoemd.

De fase van een interferogram bestaat uit vier delen [2]:

(2.1) $$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r_{T_i} + \Delta\alpha_i + \Delta n_i + \varepsilon_{topo_i}$$

λ is de golflengte van de radar (voor C-band ERS-data is dit 5,66 cm);
r_{Ti} is de mogelijke deformatie, relatief ten opzichte van de positie in het masterbeeld;
α_i is de atmosferische fase bijdrage;
n_i is de decorrelatieruis; en
ε_{topo_i} is de fout in het referentie-DEM.

De permanent scatterer methode is er op gericht om de verschillende fasetermen te splitsen door gebruik te maken van de verschillende spectrale eigenschappen [1]. Zo is de mogelijke deformatie sterk gecorreleerd in de tijd en sterk afhankelijk van de onderliggende fysische oorzaak van de deformatie. De bijdrage van de atmosfeer is sterk ruimtelijk gecorreleerd en niet gecorreleerd in de tijd. De fout in het referentie landschapsmodel komt overeen met de hoogte van de reflector relatief tot het landschapsmodel en is afhankelijk van de basislijn geometrie ($B_\perp$) is daardoor gecorreleerd in de tijd.

2.3 Foutenbronnen bij PS-InSAR

Voor de beschrijving van de foutenbronnen bij PS-InSAR is gebruikt gemaakt van [5].

De precisie en betrouwbaarheid van de deformatieschatting is afhankelijk van een aantal parameters. Hieronder worden de foutenbronnen met de grootste invloed besproken.

Wavelength
De line of sight deformatie tussen twee beelden wordt gemeten als fractie van de golflengte. Een te kleine golflengte wordt door kleine objecten op de aarde gereflecteerd. Kleine objecten hebben meer last van willekeurige bewegingen in de tijd, zoals bladeren in de wind. Een grotere golflengte reflecteert goed op grote objecten, zoals gebouwen. Omdat deze gebouwen minder bewegen dan kleinere objecten zal de fasemeting minder verstoort zijn. Bovendien heeft een grotere golflengte minder last van vegetatie, waardoor scatterers beter reflecteren op de grond of op gebouwen. De ERS-satelliet maakt gebruik van een golflengte van 5,66 cm. De Japanse SAR-satelliet (JERS) gebruikt signalen met een golflengte van 24 cm. Bij nog grotere golflengtes ondervindt de fasemeting te veel hinder van vertraging in de ionosfeer. Ook de Signal-to-Noise ratio heeft invloed op de nauwkeurigheid. Deze heeft invloed op de nauwkeurigheid van de fasemeting, die weer rechtstreeks doorwerkt op de nauwkeurigheid van de deformatie.

Geometrische decorrelatie
De aanwezigheid van de loodrechte basislijn $B_\perp$ zorgt ervoor dat er topografische hoogteverschillen kunnen worden waargenomen (zie figuur 2.1). De lengte van deze

basislijn kan variëren van nul tot twee kilometer. Hoe groter de basislijn, hoe groter de invloed van de topografie op de gemeten deformatie zal zijn. Wanneer de interesse alleen uitgaat naar de deformatie zal de invloed van de topografie in het interferogram zo klein mogelijk moeten zijn. In het ideale geval heeft de basislijn een lengte van nul meter, zodat er geen invloed is van de topografische hoogte op de deformatiemeting. Deze situatie komt vrijwel nooit voor, omdat de satelliet niet perfect in zijn baan vliegt. Om te corrigeren voor de invloed van de topografische hoogte kan een digitaal landschapsmodel worden gebruikt, of een InSAR beeld zonder deformatie. De steilheid van het terrein is ook bepalend voor de invloed van de topografische hoogte, aangezien dit de invalshoek van het signaal bepaalt.
Een tweede effect van een basislijn groter dan nul is de introductie van faseruis. Deze ruis is proportioneel aan de lengte van de basislijn. Dit wordt veroorzaakt omdat de lengte van de basislijn voor een ander opnamepositie zorgt, en dus voor net iets andere reflecties op het oppervlak. Bij permanent scatterer speelt dit minder, omdat de reflectiepunten in alle beelden een goede reflectie hebben en dus minder gevoelig zijn voor een andere invalshoek.

Temporele decorrelatie
De temporele basislijn B_T is een veelvoud van de omlooptijd van de satelliet. Voor ERS-satellieten is de omlooptijd 35 dagen. De tijd tussen twee opnamen is afhankelijk van de planning voor de opnamen, die weer beïnvloed kan worden door belangen van verschillende commerciële organisaties en de wetenschap. Om een goed beeld te krijgen van de deformatie moet de temporele basislijn lang genoeg zijn. De ruis neemt wel toe met de lengte van de basislijn.
Afgezien van deze omlooptijd waarbij precies dezelfde groundtrack wordt gevolgd, kan ook gekeken worden naar de minimale tijdsperiode tussen twee opnames van hetzelfde gebied. Dit hoeft niet vanaf vrijwel dezelfde lokatie te zijn. Bij SAR-vluchten wordt onderscheid gemaakt tussen de ascending en de descending modus. In de ascending mode vliegt de satelliet volgens de inclinatiehoek van de satelliet, van zuid naar noord. De inclinatiehoek van de ERS-satelliet is 98º, dus de vliegrichting in de ascending mode is noordnoordwest. De descending mode is omgedraaid, van noordnoordoost naar zuidzuidwest. Elke lokatie kan in zowel de ascending als descending mode bekeken worden. Ook kunnen de tracks elkaar overlappen. De bezoektijd van een punt kan daardoor teruglopen tot een week. Deze beelden zijn niet geschikt voor een differentieel interferogram.

Aantal beelden (N)
Het grootste belang van het aantal beelden is het bepalen van de coherentie van de permanent scatterer. Er bestaat een direct verband tussen het aantal beelden en de standaardafwijking van de fase. De coherentie bepaalt immers de nauwkeurigheid van de fasebepaling. Het gebruik van een grote hoeveelheid beelden maakt de bepaling van de invloed van de atmosfeer op de deformatieparameter betrouwbaarder.
Er bestaat een archief met ERS-data, waarin beelden van 1992 en later zijn opgeslagen. Het aantal beelden dat gebruikt kan worden is hierdoor heel groot. Voor een goede keuze van coherente permanent scatterers zijn minstens 30 beelden nodig [5].

Atmosferische invloeden
Het grote voordeel van beeldende radar is dat deze geen hinder ondervindt van wolken. Het signaal wordt wel vertraagd door de atmosfeer, zoals bij elk elektromagnetisch signaal het geval is. Het nadeel van deze atmosferische vertraging is de sterke ruimtelijk correlatie per interferogram. Het verschil in invloed van de atmosfeer kan groot zijn in een beeld. Aangezien de deformatie relatief wordt gemeten tussen een punt en het referentiepunt zal de atmosferische fout groter zijn naarmate de afstand tussen de twee punten groter is. De weerssituatie speelt een grote rol bij de invloed van de atmosfeer. Bij veel waterdamp in de atmosfeer kan de fout oplopen tot enkele centimeters. De deformatieparameter is in Nederland vaak in dezelfde orde als de atmosferische fout, waardoor scheiden van deze twee parameters vaak moeilijk is. In de permanent scatterer methode worden beiden beschouwd als bijdrage in het totale faseverschil, om ze op basis van de ruimtelijke en temporele correlatie uit elkaar te kunnen houden.

Voorkennis over de deformatie
Wanneer op voorhand kennis beschikbaar is over het deformatieproces wordt het makkelijker deze invloed te scheiden van de andere bijdragen aan de fase. Een langzame lineaire deformatie zal moeilijker te detecteren zijn dan een deformatie door een aardbeving.
Het is mogelijk dat het deformatiesignaal gelijke karakteristieken heeft als de fout in de satellietbaansbepaling of de atmosferische fout. Onderscheid is dan moeilijk te maken.

Reflectie-eigenschappen aardoppervlak.
De reflectie-eigenschappen van de objecten zijn het belangrijkste bij de bepaling van de deformatie. De nauwkeurigheid is afhankelijk de reflecties van de objecten. Hoe constanter de reflecties, hoe hoger de coherentie, en daarmee samenhangend, hoe nauwkeuriger de deformatie gemeten kan worden. Wanneer de reflectieve eigenschappen van een scatterer veranderen in de observatietijd zal dit een foutief deformatiesignaal op kunnen leveren.

Referentiepunt
Alle deformaties in het beeld worden berekend relatief tot het referentiepunt. Voor een goede deformatieschatting is het van belang dat het referentiepunt geringe bewegingen vertoont. De plaats van het referentiepunt maakt voor de nauwkeurigheid van de deformatiemeting niet uit, het gaat immers om de relatieve nauwkeurigheid. Voor de visuele interpretatie is het wel gunstig wanneer het referentiepunt centraal in het beeld ligt.

3. Identificatie permanent scatterer

Om een goed beeld te krijgen van de deformatie zal het noodzakelijk zijn om te achterhalen wat het achterliggende fysische proces is. Het is ook mogelijk dat er meerdere processen aan ten grondslag liggen. De daling kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door winning van grondstoffen of door natuurlijke processen in de ondergrond. De koppeling van de PS-InSAR data met geologische of thematische informatie kan nieuwe inzichten geven in de processen.

3.1 Satellietbeelden/luchtfoto's

Een goede mogelijkheid om een idee te krijgen van de afkomst van de radarreflecties is het gebruik maken van satellietbeelden of luchtfoto's. Satellietbeelden zijn in vele resoluties verkrijgbaar, variërend van wereldwijde opnamen tot resolutiecellen van minder dan 1 meter op de grond. Om te permanent scatterer te identificeren moet de resolutie zodanig zijn dat individuele objecten zichtbaar zijn in het satellietbeeld. Daarom is gezocht naar satellietbeelden met een hoge resolutie. Er zijn in Nederland verschillende bedrijven die satellietbeelden verkopen. Beelden met de gewenste resolutie (<1 meter) zijn afkomstig van de IKONOS of de QuickBird satelliet. Hieronder staat een voorbeeld van een QuickBird-opname van Amsterdam.

Figuur 3.1: QuickBird-opname centrum Amsterdam (bron: www.geoserve.nl)

Het grote voordeel van satellietbeelden is dat het mogelijk is om ze aangeleverd te krijgen met een georeferentie. Voor het combineren met de permanent scatterer lokaties is dat ideaal. Het nadeel van deze satellietbeelden is dat op gebouwen de mogelijke veroorzaker van de reflecties niet te identificeren is. De resolutie is nog niet voldoende. Ook de hoge prijs van de beelden voor het hele onderzoeksgebied is een nadeel.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van luchtfoto's. Orthogonale foto's hebben als voordeel dat er geen omvalling is. De lokatie van de permanent scatterer wordt dan beter op het gebouw geprojecteerd. Gezien de nauwkeurigheid van de permanent scatterer lokaties is orthogonaliteit niet een vereiste. Over de nauwkeurigheid wordt in paragraaf 3 gesproken.

Op Internet zijn, met een beetje zoekwerk, genoeg luchtfoto's te vinden. Op *www.globexplorer.com* zijn gratis luchtfoto's te bekijken. Tegen betaling zijn de foto's zonder watermerk en in hoge resolutie te downloaden. De gratis variant bevat watermerken, maar de resolutie is al wel voldoende om een vermoeden te krijgen over de afkomst van de satellietreflecties. Hieronder staat een luchtfoto zoals deze gratis te verkrijgen is.

Figuur 3.2: Paleis op de Dam in Amsterdam. Linksboven op het IKONOS beeld, rechtsonder op de luchtfoto.

Wanneer het IKONOS-beeld wordt vergeleken met de luchtfoto, dan valt op dat de resolutie van de luchtfoto geschikter is voor de identificatie van de permanent scatterers. Op de daken zijn verschillende objecten te onderscheiden, terwijl bij het satellietbeeld dit niet het geval is. De resolutie van de gratis luchtfoto's hebben is voldoende. Het nadeel van de watermerken is ook te overzien. De foto's zijn zodanig te plaatsen in het beeld dat de daken van de gewenste objecten vrij blijven van een watermerk.

3.2 Combineren in ArcGIS

Er is nu beschikking over een digitale Top25-kaart, de geschatte lokaties van de permanent scatterers, luchtfoto's van mogelijk interessante objecten voor de vergelijking en lokaties van de peilmerken. Al deze informatie is te combineren in een gezamenlijk beeld in ArcGIS. Voor het combineren is het uiteraard wel noodzakelijk dat de verschillende lagen bekend zijn in hetzelfde referentiestelsel. De permanent scatterers lokaties zijn gegeven in WGS'84, terwijl de Top25-kaart gerefereerd is aan het Nederlandse Rijksdriehoeksnet. De lokaties van de peilmerken zijn ook bekend in dit laatstgenoemde stelsel. De luchtfoto's zijn niet gerefereerd aan een coördinatenstelsel. In ArcGIS is het wel mogelijk deze afbeeldingen te geocoderen.

De eerste stap in dit georeferentieproces is het inladen van de luchtfoto in het huidige referentiestelsel. Aangezien de topografische kaart al ingeladen is, is dit het RD-stelsel. De volgende stap is het gebruik van controlepunten. Aan de hand van deze punten wordt de afbeelding getransformeerd naar haar nieuwe lokatie. De nauwkeurigheid waarmee dit gebeurt is afhankelijk van de resolutie van de luchtfoto's en de idealisatieprecisie van de controlepunten. Voor een goed resultaat is het van belang dat de controlepunten duidelijk in het landschap aanwijsbaar zijn. Daarom is er voornamelijk gebruik gemaakt van kruispunten of hoeken van objecten. De resolutie van de luchtfoto's van de objecten in Amsterdam is beter dan de resolutie van de luchtfoto's van de rest van het gebied. De resolutie in Amsterdam is ongeveer een halve meter. Voor de rest van het gebied zal dit rond de 2 meter zijn. Deze resolutie werkt door in de nauwkeurigheid van de puntsoverdracht van de controlepunten. Een precieze georeferentie is niet mogelijk, daarvoor spelen de verschillende foutenbronnen een te grote rol (zie hierover paragraaf 3).

Figuur 3.3: Paleis op de Dam, luchtfoto gecombineerd met Top25-kaart en lokatie en coherentie van de permanent scatterers

3.3 Foutenbronnen

Voor de identificatie van de permanent scatterers worden zoals gezegd luchtfoto's gebruikt. Het combineren van de verschillende lagen met geografische informatie in ArcGIS brengt een aantal foutenbronnen met zich mee, waar rekening mee gehouden moet worden bij het aanwijzen van de afkomst van de radarreflectie en dus de lokatie van de permanent scatterer.

Allereerst is dat de nauwkeurigheid waarmee de lokatie van de permanent scatterer wordt bepaald. In tegenstelling tot bijvoorbeeld waterpassen is het bij permanent scatterer niet bekend waar de datapunten zullen liggen. De coördinaten van de lokatie zijn wel bekend in het coördinatenstelsel van de radar. Een transformatie moet de coördinaten in het gewenste stelsel opleveren. Bij de nauwkeurigheid van de lokatie spelen afwijkingen in de satellietbaan, de geometrie van de radar, atmosferische vertragingen en de hoogte van het referentiepunt een rol. Een fout in de hoogte van een meter leidt tot een fout in de geschatte lokatie van bijna tweeënhalve meter. De fout in de relatieve lokatie wordt

bepaald door de resolutie van het SAR-systeem en is 10 meter in de range-richting en 2 meter in de azimuth-richting [3].

Ten tweede ontstaat een fout door het gebruik van de luchtfoto's en dan specifieker door het georefereren van de luchtfoto's (zoals in de vorige paragraaf beschreven). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de controlepunten. Deze punten worden gekozen op basis van de idealisatieprecisie. De resolutie van de luchtfoto en de Top25-kaart introduceert een fout bij het aanwijzen van deze punten. Exacte puntsoverdracht is daardoor niet mogelijk. De fout kan, gezien de resolutie van foto en kaart, oplopen tot enkele meters.

In stedelijk gebied zijn veel punten die als permanent scatterer kunnen dienen. Deze dichtheid kan oplopen tot enkele honderden punten per km^2. Hierdoor kan het moeilijk zijn permanent scatterers van elkaar te onderscheiden als ze afkomstig zijn van hetzelfde object.

De geplotte lokatie van de permanent scatterers op de foto wordt ook verstoord door de omvalling in de foto. Geen van de foto's is perfect orthogonaal. Hierdoor ontstaat een verkeerde projectie van de scatterers op het object. Bovendien is de nauwkeurigheid van de lokatie van de scatterer, evenals het overbrengen van de controlepunten uit de luchtfoto naar de Top25-kaart, ongeveer even groot als de fout die veroorzaakt wordt door de niet-orthogonaliteit van de foto.

De Top25-kaart is ook niet vrij van fouten. De kaart wordt afgeleid uit een basisbestand, waar ook de Top10-kaart uit wordt afgeleid. Het basisbestand wordt aan de hand van orthogonale luchtfoto's gekarteerd, in combinatie met veldwerk ter controle. De mogelijke afwijking van de Top25-kaart zal in de orde van een halve meter liggen. De kaart wordt elke vier jaar bijgewerkt. Hierdoor is het niet ondenkbaar dat de situatie zoals op de gebruikte Top25-kaart staat weergegeven niet overeen komt met de gebruikte luchtfoto. Dit zou een fout kunnen veroorzaken bij het aanwijzen van de controlepunten.

3.4 Conclusies

Voor de identificatie van de precieze afkomst van de reflectie van het radarsignaal zal het noodzakelijk zijn om veldwerk te verrichten. Op basis van de gecombineerde beelden is een grof idee te krijgen van de afkomst van de permanent scatterers. Er moet echter altijd rekening gehouden worden met de fout in de lokatie van de permanent scatterer, de nauwkeurigheid van de topografische kaart en de fout die ontstaat door de transformatie van de luchtfoto naar het coördinatenstelsel van de Top25-kaart, het RD-stelsel. De hoge dichtheid van de permanent scatterers in stedelijk gebied maakt onderscheiden van de afkomst moeilijk. De fout in de geplotte lokatie van de permanent scatterer kan oplopen tot twintig meter.

De gepubliceerde lokaties van de peilmerk hebben een nauwkeurigheid van 30 meter [10]. De fysieke relatie tussen peilmerk en permanent scatterer moet zodoende ook worden gecontroleerd met behulp van veldwerk.

4. Lokaties voor vergelijking

Voor de vergelijking van de deformatie volgens NAP-peilmerken en PS-InSAR worden ongeveer vijftien lokaties gekozen. Voor deze lokaties worden de twee afzonderlijke deformatieparameters berekend, waarna een vergelijking plaats kan vinden. Om een goede keuze voor de vergelijkingslokaties te kunnen maken is het nuttig selectiecriteria op te stellen waaraan alle lokaties moeten voldoen. In dit hoofdstuk worden de criteria beschreven en volgt een overzicht van de op basis van deze criteria gekozen lokaties. In de laatste paragraaf wordt het veldwerk beschreven.

4.1 Selectiecriteria

Verbondenheid aan object.
Voor de vergelijking moeten objecten (gebouwen, infrastructurele bouwwerken) worden gekozen die voorzien zijn van een peilmerk voor NAP-hoogtemeting en die dienen als reflector voor de PS-InSAR metingen. De verbondenheid van een peilmerk met een object is eenvoudig vast te stellen, al is daar wel veldwerk voor nodig. Peilmerken zijn over het algemeen geplaatst in gebouwen of kunstwerken. De vraag of de permanent scatterer op het object gelokaliseerd is, is echter moeilijker te beantwoorden (zie hoofdstuk 3). De afkomst van de reflectie is van belang voor het soort deformatie dat beschreven wordt door de deformatiemeting. Directe reflecties zijn bruikbaarder dan indirecte reflecties. Eerstgenoemde zal zeker de deformatie van het object beschrijven, terwijl indirecte reflecties de deformatie van de omliggende grond kunnen beschrijven. De geschatte hoogte van de permanent scatterer kan meer informatie geven over het soort reflectie. Door de lokaties van de permanent scatterer te plotten op een topografische kaart of luchtfoto, in combinatie met de lokatie van het peilmerk, ontstaat een vermoeden over de waarschijnlijke fysieke relatie. Hierbij moet niet vergeten worden dat de weergegeven lokatie niet hoeft te kloppen.
De eis van verbondenheid is een belangrijke eis. Wanneer de radarreflecties niet afkomstig zijn van het object waar het peilmerk in gesitueerd is, is het punt ongeschikt voor een vergelijking tussen de deformatieparameters.

Aantal scatterers op het object.
Permanent scatterer kent een hoge dichtheid in stedelijk gebied (meer dan 200 PS/km^2). Voor de berekening van de PS-deformatie zal een groot aantal scatterers gewenst zijn, dit komt immers de overtalligheid ten goede waardoor de betrouwbaarheid hoger wordt. Wanneer een object één permanent scatterer heeft zal de geschatte deformatiesnelheid alleen van deze scatterer afhangen. Alle fouten werken door in de geschatte snelheid. Bij meerdere scatterers is er meer controle op de geschatte snelheid. Het aantal scatterers moet dus het liefst zo hoog mogelijk zijn. In de praktijk is dat moeilijk te realiseren, permanent scatterers laten zich jammer genoeg niet van te voren aanwijzen. Voor een goede vergelijking zal een minimum van 3 scatterers per object gewenst zijn.
In het onderzoek blijkt het niet mogelijk deze eis te handhaven. Er blijven dan te weinig lokaties over voor een goede vergelijking. Scatterers met een coherentie lager dan 0,7 hebben geen tijdserie in de dataset.

Beschikbaarheid historische gegevens peilmerken
Voor een goede vergelijking zal het van belang zijn inzicht te hebben in de beweging van het peilmerk door de tijd heen. Van veel peilmerken is data beschikbaar die in sommige gevallen teruggaat tot de jaren ’20 van de vorige eeuw. Beschikbaarheid van deze data speelt een rol bij de selectie van een peilmerk.
De historische data wordt gebruikt om hoogteverschillen te kunnen berekenen. Hoe meer historische data er beschikbaar is, hoe meer hoogteverschillen er berekend kunnen worden. Dit zorgt voor meer waarnemingen, waardoor een betrouwbaardere schatting van de deformatiesnelheid kan worden gemaakt.
De hoogte van de peilmerken worden bijgehouden door de Adviesdienst voor Geo-informatie en ICT (AGI), de voormalige Meetkundige Dienst. Vanaf 1988 worden alleen de eerste en twee orde peilmerken nog bijgehouden.

Kwaliteit van het peilmerk.
De kwaliteit van het peilmerk is afhankelijk van de orde van het netwerk waar deze toe behoort. Nederland beschikt over een netwerk van eerste orde peilmerken, die allemaal gefundeerd zijn in de Pleistoceen zandlaag. Er wordt vanuit gegaan dat deze peilmerken vrij van bewegingen zijn. Op dit netwerk worden tweede orde peilmerken aangesloten, door middel van waterpassingen. Deze waterpassingen bepalen de nauwkeurigheid van de NAP-hoogten.
Elke orde netwerk heeft zijn eigen nauwkeurigheidseis bij het aansluiten van waterpasmetingen. Deze eis bepaalt hoe groot de sluitfout mag zijn. De som van alle gewaterpaste hoogteverschillen moet uitkomen op nul. Het verschil wordt de sluitfout genoemd. Bij derde orde netwerken mag de sluitfout groter zijn dan bij tweede orde netwerken. De maximale sluitfout wordt gegeven door de wortel uit de gewaterpaste afstand vermenigvuldigd met een variabele die afhankelijk is van de orde van de punten.

Voor de vergelijking kunnen het beste eerste of tweede orde peilmerken gebruikt worden. Het probleem bij de eerste orde peilmerken is dat deze onder de grond liggen. Een fysieke relatie met de scatterers is dus niet mogelijk (de eerste eis). Doordat derde orde (en lager) netwerken niet meer worden bijgehouden blijven alleen de tweede orde peilmerken over voor de vergelijking.

4.2 Geselecteerde peilmerken

De vier criteria die in de vorige paragraaf genoemd zijn, zijn gebruikt voor de selectie van geschikte lokaties voor de vergelijking. Ze wegen niet allemaal even zwaar mee; de kwaliteit van de scatterers is belangrijker dan de kwantiteit. Deze criteria hebben geleid tot de volgende peilmerken:

24F17, 24H9, 25A1, 25A4, 25A43, 25A176, 25B62, 25C3, 25C50, 25D52, 25E3, 25E76, 25G143, 25G252

In bijlage 6 staat de beschrijving van deze peilmerken zoals deze aangeleverd wordt door AGI.

4.3 Resultaat veldwerk

Er zijn 14 lokaties geselecteerd voor de vergelijking van de daling van de peilmerken en de permanent scatterer. Om een goed beeld te krijgen van de afkomst van de radarreflecties is de situatie ter plekke bekeken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de beschrijving van de peilmerken zoals deze door AGI worden aangeleverd. De lokatie is geplot op een topografische kaart, tezamen met de lokaties van de permanent scatterers en een luchtfoto. Hierdoor werd het mogelijk om ter plekke in te schatten wat de afkomst van de radarreflectie zou kunnen zijn. Hierbij is rekening gehouden met de kijkhoek van de satelliet.

De satellietbeelden zijn allemaal opgenomen in de descending mode. Dit zorgt ervoor dat, voor een ideale reflectie, het schuine dak georiënteerd moet zijn in de vliegrichting. De satelliet kijkt dan tegen het dak aan. Er ontstaat een groot oppervlak voor mogelijke reflecties. Zie ter illustratie ook figuur 4.2.

Voor een uitgebreide beschrijving van de situatie per lokatie wordt verwezen naar bijlage 2. Hieronder volgt een beknopt overzicht.

24F17
Het peilmerk is gesitueerd in een lichtbunker op de zuidelijke pier in IJmuiden. Gezien de omgeving is het aannemelijk dat de radarreflecties afkomstig zijn vanaf de lichtbunker. Dit hoeft geen directe reflectie te zijn, een muur-grondreflectie is ook mogelijk. Dit punt wordt wel meegenomen in de vergelijking.

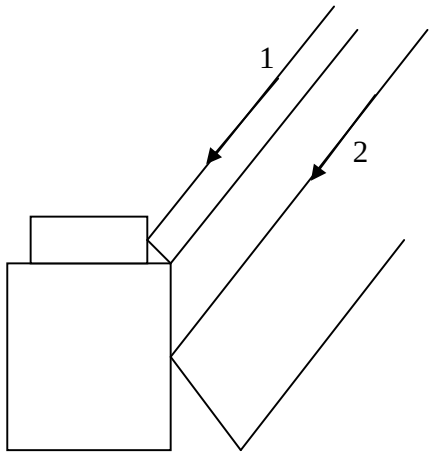
24H9
Het eerste dat opvalt is dat het dak van het huis, waarin het peilmerk zich in bevindt, haaks op de kijkrichting van de satelliet staat. Directe reflecties vanaf het dak zijn zodoende al uitgesloten. Vermoedelijk is op deze lokatie sprake van een indirecte reflectie, waardoor de gemeten deformatie niet de deformatie van het huis hoeft te beschrijven. Een vergelijking van de deformaties van dit punt heeft zodoende geen zin.

25A1
De permanent scatterers zijn vermoedelijk afkomstig van het schuine dak. Deze staat namelijk goed in de kijkrichting van de satelliet. Indirecte reflecties zijn, gezien de vliegrichting, vrijwel uitgesloten op deze lokatie. De beide meetmethoden beschrijven zodoende dezelfde deformatie. Deze lokatie kun dus gebruikt worden voor de vergelijking.

25A4
Deze lokatie betreft de St. Bavo kerk in Haarlem. Het dak van deze kerk zorgt voor een groot aantal radarreflecties. Dit heeft te maken met de oriëntatie van het dak, waardoor de satelliet er recht tegenaan kijkt. Het grote aantal permanent scatterers maakt het mogelijk een goede vergelijking te maken. De precieze afkomst van de reflectie is moeilijk aan te wijzen. De lokatie wordt gebruikt voor de vergelijking.

25A43
Dit gebouw heeft een schuin dak, waar de satelliet recht tegenaan kijkt. Ook hier is de kans op directe reflecties groot, al zijn indirecte reflecties niet uit te sluiten. Het peilmerk en de permanent scatterers beschrijven dezelfde deformatie, mits de reflecties direct zijn. Dit punt wordt meegenomen in de vergelijking.

25A176
Het gebouw heeft geen schuin dak. De kans op directe reflecties wordt daardoor wel erg klein. Er zijn, gezien de bouw van het object, twee mogelijkheden voor reflecties.



Figuur 4.1: Mogelijke reflecties bij 25A176

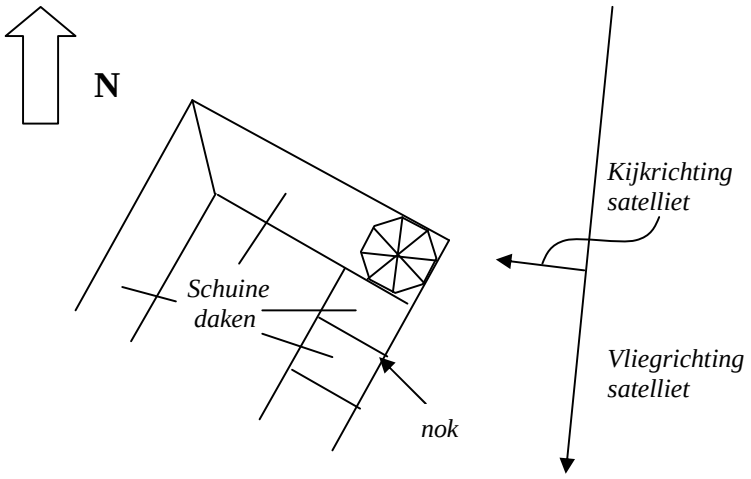
Bij mogelijkheid 1 beschrijft de permanent scatterer wel de deformatie van het gebouw. Mogelijkheid twee beschrijft echter de deformatie van de omgeving (zie ook [7]). Om de twee mogelijkheden te onderscheiden is de geschatte hoogte van de permanent scatterer van belang. Het plotten van de lokatie van de permanent scatterers op de luchtfoto maakt geen onderscheid mogelijk. Omdat het niet mogelijk is de directe en de indirecte reflecties te onderscheiden wordt dit punt wel meegenomen in de vergelijking.

25B62
Het peilmerk bevindt zich niet in het object dat volgens de geschatte lokatie van de permanent scatterer voor de reflectie zorgt. Gebruik maken van dit punt voor de vergelijking tussen de twee deformaties zou tot verkeerde conclusies kunnen leiden. Daarom wordt dit punt niet gebruikt.

25C3
Het peilmerk bevindt zich in een ander gebouw dan oorspronkelijk werd gedacht. Ze beschrijven dus niet dezelfde deformatie. De permanent scatterer heeft geen tijdserie,

omdat de coherentie te laag is. Deze lokatie gebruiken bij de vergelijking heeft zodoende geen nut.

25C50
Het huis waar het peilmerk zich in bevindt is de vermoedelijke afkomst van één permanent scatterer. Ook als deze reflectie niet van dit huis afkomstig is, maar van het naastgelegen huis, zal vrijwel dezelfde deformatie beschreven worden, aangezien beide huis met elkaar verbonden zijn. Het is echter wel aannemelijk dat de reflectie van dit huis afkomstig is. Daarom wordt dit punt wel gebruikt in de vergelijking.



Figuur 4.2: Situatieschets kijkrichting satelliet

25D52
Dit peilmerk bevindt zich naast de ingang van de kerk. Wanneer bij een kerk de oriëntatie van het dak goed is ontstaan scatterers met een hoge coherentie. Dat is ook hier het geval. Dit punt is zodoende geschikt om mee te nemen in de vergelijking.

25E3
Dit punt betreft de Beurs van Berlage in Amsterdam. Door de constructie van het dak ontstaat een groot aantal permanent scatterers. Het is echter moeilijk om de precieze afkomst aan te wijzen. De coherentie van de scatterers loopt erg uiteen. Een indirecte reflectie via de grond en de muur is hier vrijwel niet mogelijk door de dichte bebouwing aan de zichtszijde van de satelliet. Het punt wordt meegenomen in de vergelijking.

25E76
Dit peilmerk beschrijft weer de deformatie van een kerk. Ook hier staat het dak in de goede richting. Er zijn weer een aantal permanent scatterers met hoge coherentie. De omgeving vertoont wel veel tekenen van daling, de betegeling ligt behoorlijk scheef. Het punt kan goed gebruikt worden voor de vergelijking.

25G143
Het peilmerk bevindt zich in het Koninklijk Paleis op de Dam. De structuur van het dak zorgt voor goede reflectiepunten voor het radarsignaal. Hier is dus weer een ruim aantal scatterers. De afkomst is niet altijd duidelijk; behalve het dak kan het signaal ook reflecteren via de voorkant van het paleis en de grond. Ook lijken reflecties afkomstig te zijn vanaf de binnenplaats. Dit zou dan ook weer een muur-grondreflectie zijn. Deze lokatie wordt meegenomen voor de vergelijking.

25G252
Het peilmerk is bij het veldwerk niet gevonden. De afkomst van de radarreflecties is ook niet duidelijk, vermoedelijk komen die van de constructie van de brug. Door werkzaamheden aan de brug is dat moeilijk te achterhalen. Het punt wordt wel gebruikt voor de vergelijking.

Conclusie:
Op basis van dit veldwerk zijn twee lokaties geschrapt voor de vergelijking uit de eerder gekozen verzameling peilmerken. Dit zijn 25B62 en 25C3, beide omdat er geen fysieke relatie is tussen het peilmerk en de permanent scatterers. Vergelijking van de deformatie op basis van deze lokaties is niet zinvol. De resterende peilmerken zullen worden gebruikt voor de vergelijking van de deformatiesnelheden.

Het identificeren van de afkomst van de permanent scatterer is moeilijk. Meestal komt dat niet verder dan een sterk vermoeden van de mogelijke oorsprong van de reflectie. Identificatie wordt bemoeilijkt door de afwijking in de geschatte lokatie en het combineren van de lokaties met andere geografische informatie.

Peilmerk 25A1 zal ook niet worden gebruikt in de vergelijking. Dit komt doordat er gebruik moet worden gemaakt van hoogteverschillen in plaats van gepubliceerde NAP-hoogten. In paragraaf 6.1 en bijlage A wordt dit verder toegelicht.

5. Berekeningen permanent scatterer deformatie

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de berekeningen van de permanent scatterer deformaties plaats vonden. Welke data hiervoor aanwezig was wordt beschreven in de eerste paragraaf. De tweede paragraaf gaat in op wat er met de aangeleverde data moet gebeuren om het geschikt te maken voor de berekening. Paragraaf drie gaat in op de berekening: welke modellen zijn gebruikt, hoe is de variantiematrix bepaald. Daarna worden de resultaten gegeven en geanalyseerd.

5.1 Beschrijving van de dataset

Van de PS-InSAR is een dataset beschikbaar, met daarin de volgende informatie:

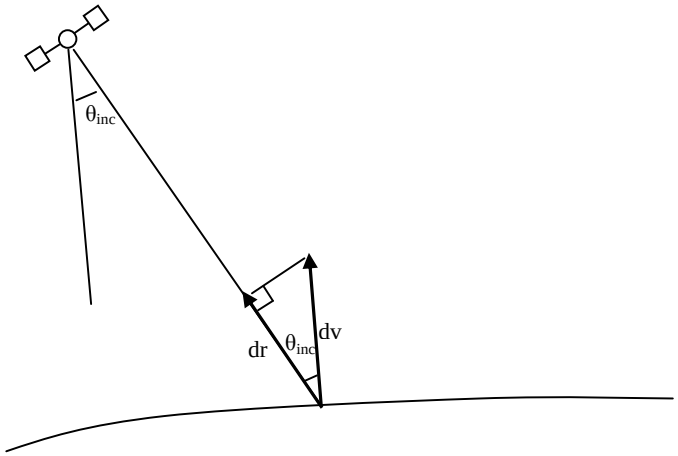
- unieke code van de permanent scatterer;
- de geschatte lokatie ten opzichte van de WGS'84 ellipsoïde (noorderbreedte en oosterlengte);
- de geschatte snelheid ten opzichte van het referentiepunt in het masterbeeld (mm/yr);
- de geschatte coherentie.

Verder is, wanneer voor een permanent scatterer de coherentie hoger is dan 0,70, een tijd-serie aanwezig, met per epoche de deformatie relatief tot het referentiepunt.

5.2 Voorbewerkingen op de data

Voordat de data gebruikt kan worden voor het berekenen van de deformatieparameter moeten er nog een paar bewerkingen plaats vinden. De data uit Access is ingeladen in Excel, en vervolgens als .txt-bestand opgeslagen. Hieronder staan alle bewerkingsstappen beschreven.

Correctie voor verticale displacement
De deformatie, zoals in de dataset weergegeven in de tijdserie, is de deformatie van de permanent scatterer in de line of sight (LOS) van de satelliet. Deze deformatie is te projecteren op een horizontale en verticale deformatie. Hier wordt aangenomen dat de deformatie alleen in de verticale richting is, dus loodrecht op het aardoppervlak. De relatie tussen de LOS-deformatie (d_r) en de verticale deformatie (d_v) is als volgt:



Figuur 5.1: Relatie tussen LOS-deformatie en de verticale deformatie.

θ_{inc} is de kijkhoek van de satelliet. Voor de ERS-satellieten is dit 23º.

De verticale deformatie is dan:

(5.1) $$d_v = \frac{d_r}{\cos(\theta_{inc})}$$

Conversie van datum naar dagen
In de tijdserie staat bij elke opname de datum gegeven. Om deze tijdstippen bruikbaar te maken in Matlab is deze datum omgerekend naar dagen vanaf 1-1-1900[1]. Vervolgens is de dag van het masterbeeld op nul gezet, en is voor elk slavebeeld het verschil in dagen met het masterbeeld berekend.

Omrekenen van WGS'84 naar RD-coördinaten
De coördinaten van de permanent scatterers worden omgerekend naar Rijksdriehoeks-coördinaten. Dit maakt de combinatie met andere geografische informatie mogelijk, die ook in het RD-coördinatenstelsel gegeven is. Deze transformatie heeft reeds voor dit onderzoek plaatsgevonden, met behulp van de *Coordinate Calculator* van Rijkswaterstaat [10].

Selecteren van de juiste scatterers
Op basis van de selectiecriteria zijn lokaties geselecteerd waar het peilmerk dezelfde deformatie zal beschrijven als de permanent scatterers (zie paragraaf 4.1). Door de combinatie met luchtfoto's en een topografische kaart is bepaald welke scatterers meegenomen moeten worden in de berekening van de deformatie van een lokatie. Uit het veldwerk bleek echter dat niet alle scatterers van hetzelfde object afkomstig waren als waar het peilmerk zich in bevindt (paragraaf 4.3). Hierdoor heeft verdere uitdunning plaatsgevonden. Het aantal permanent scatterers per lokatie wordt in onderstaande tabel

[1] Voor het omrekenen is gebruik gemaakt van Excel, waar voor een gegeven datum het aantal dagen dat sinds 1-1-1900 is verstreken wordt gegeven.

weergegeven. In bijlage 2 staan de permanent scatterer lokaties geplot op een luchtfoto, zodat een idee ontstaat over de verdeling van de scatterers op het object.

Tabel 4.1: Overzicht aantal permanent scatterers per lokatie.

lokatie	***24F17***	***25H9***	***25A4***	***25A43***	***25A176***	***25C50***	***25D52***	***25E3***	***25E76***	***25G143***	***25G252***
# PS	*2*	*2*	*11*	*2*	*4*	*1*	*7*	*14*	*6*	*8*	*4*

Input data
Na de bewerking van de oorspronkelijke data worden deze opgeslagen als .txt-bestand. Het bestand bevat:

- per rij het peilmerknummer (voor identificatie van de lokatie);
- x- en y-coördinaat in het RD-stelsel;
- geschatte deformatiesnelheid in mm/yr;
- geschatte coherentie
- deformatie per epoche

Er is een laatste rij toegevoegd aan het bestand, waarin in plaats van de datum van de epoche het aantal dagen ten opzichte van het masterbeeld gegeven is. Tevens is er een bestand gemaakt waarin per lokatie de begin- en eindrij is opgeslagen. Beide bestanden zijn nodig bij de berekening van de deformatieparameter.

5.3 Gebruikte modellen

De deformatie van een permanent scatterer wordt gegeven door:

(5.2) $$d_{i,ref}^{mt} = v_{ps} \cdot \Delta t$$

Hierin is:
$d_{i,ref}^{mt}$ de double difference[2] deformatie;
v_{ps} de deformatiesnelheid; en
Δt de tijd in dagen ten opzichte van het masterbeeld.

Omdat geldt dat op tijdstip *t=0* de deformatie $d_{i,ref}^{mt}$ =0, hoeft geen translatieparameter berekend te worden.

Voor het oplossen van dit model wordt gebruik gemaakt van de *'Delft Adjustment and Testing Theory'*. Deze wordt uitvoerig behandeld in [9]. Hier zullen kort de kernpunten worden beschreven.

---

[2] *Single difference* ($d_{i,ref}^{t}$ of d_{i}^{mt}) is de deformatie van punt *i* ten opzichte van het referentiepunt op tijdstip *t* resp. de deformatie van punt *i* tussen tijdstip *i* en referentietijdstip *m*. Bij permanent scatterer is per epoche $d_{i,ref}^{t}$ bekend. Double difference is dan $d_{i,ref}^{mt} = d_{i,ref}^{m} - d_{i,ref}^{t}$ (zie [8]). Door de deformatie van punt *i* in het masterbeeld op 0 te stellen wordt de double difference berekend.

Geodetische metingen bevatten willekeurige en systematische fouten. Dit zorgt ervoor dat de onbekende parameter niet rechtstreeks uit de waarnemingen kan worden berekend. Om ervoor te zorgen dat de waarnemingen toch voldoen, ondanks willekeurige fouten, worden ze vereffend. Dit gebeurt met behulp van het functionele model, waarin de relatie tussen de waarnemingen en de onbekende beschreven wordt. Het stochastische model bevat de statistische eigenschappen van de waarnemingen, rekening houdend met de willekeurige fouten. Beide modellen samen worden het mathematische model genoemd:

(5.3) $$E\{\underline{y}\} = Ax \quad ; \quad D\{\underline{y}\} = Q_y$$

Hierin is:
$E\{\underline{y}\}$ de verwachting van de waarnemingen;
A de ontwerpmatrix;
x de vector met onbekenden;
$D\{y\}$ de dispersie van de waarnemingen;
Q_y de variantiematrix.

De beste oplossing van dit model wordt verkregen door het verschil tussen de waarnemingen en het model te minimaliseren via de kleinste kwadraten methode. De verkregen lineaire kleinste kwadraten schatter, zuiver en met minimale variantie, wordt de *Best Linear Unbiased Estimator* genoemd. De schatter van de onbekende wordt gegeven door de volgende formule:

(5.4) $$\underline{\hat{x}} = \left(A^T Q_y^{-1} A\right)^{-1} A^T Q_y^{-1} \underline{y}$$

met als variantie de schatter:

(5.5) $$Q_{\underline{\hat{x}}} = \left(A^T Q_y^{-1} A\right)^{-1}$$

De onbekende parameter voor de deformatiesnelheid kan met behulp van dit model berekend worden. De deformatiesnelheid van een willekeurige permanent scatterer wordt gegeven door het volgende functionele model:

(5.6) $$E\{d_{i,ref}^{mt}\} = \Delta t \cdot v_i$$

Hierin is:
$d_{i,ref}^{mt}$ een 91×1 vector met alle gemeten deformaties van een permanent scatterer;
Δt een 91×1 vector met de bijbehorende tijdstippen in dagen relatief tot het masterbeeld;
v_i de te schatten snelheid van de permanent scatterer.

Ook is het mogelijk om één dalingssnelheid voor alle permanent scatterers op een lokatie uit te rekenen. Het model wordt dan als volgt:

(5.7) $$E\{\begin{bmatrix} d_{i,ref}^{mt} \\ \vdots \\ d_{i,ref}^{mt} \end{bmatrix}\} = \begin{bmatrix} \Delta t \\ \vdots \\ \Delta t \end{bmatrix} \cdot v_i$$

Voor het stochastische model wordt gebruik gemaakt van de coherentie van de permanent scatterer. In [1], p. 1690, formule 41, wordt de relatie tussen de coherentie en de standaardafwijking van de deformatiemeting als volgt gedefinieerd:

(5.8) $$\hat{\sigma}_r^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \cdot \left(-2 \cdot \ln\left|\hat{\gamma}\right|\right)$$

Hierin is:

$\hat{\sigma}_r^2$ de geschatte variantie van de gemeten LOS-deformatie;

λ de golflente van het gebruikte radarsignaal;

$\hat{\gamma}$ de geschatte coherentie van de permanent scatterer.

Dit is de deformatie in de LOS van de satelliet. Om de standaardafwijking van de verticale deformatie te berekenen kan gebruik gemaakt worden van de voortplantingswet der varianties (zie ook [9], bijlage E).

(5.9) $$d_v = \frac{d_r}{\cos(\theta_{inc})} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{d_v}^2 = \frac{\sigma_{d_r}^2}{\left(\cos(\theta_{inc})\right)^2}$$

Combineren van formule 5.8 en 5.9 levert de variantie van de gemeten verticale deformatie:

(5.10) $$\sigma_{d_{i,ref}^{mt}}^2 = \frac{\left(-2 \cdot \ln\left|\hat{\gamma}\right|\right)}{\left(\cos(\theta_{inc})\right)^2} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2$$

Voor de waarneming van een ERS-satelliet is de golflengte λ = 5,6 cm en de incidentiehoek θ_{inc} = 23º. Bij een coherentie van 0,8 levert dat voor de variantie van een deformatiemeting:

(5.11) $$\sigma_{d_{i,ref}^{mt}}^2 = \frac{\left(-2 \cdot \ln\left|0.8\right|\right)}{\left(\cos(23°)\right)^2} \cdot \left(\frac{56}{4\pi}\right)^2 = 10.46 \text{ mm}^2$$

Per permanent scatterer is een coherentie bekend, dus kan per deformatiewaarneming een variantie worden berekend. Deze variantie wordt gebruikt in de Q_y-matrix. Er wordt aangenomen dat de waarnemingen onderling ongecorreleerd zijn.

(5.12) $$Q_y = \begin{pmatrix} \sigma_{disp}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_{disp}^2 \end{pmatrix}$$

Toepassen van formule 5.4 levert voor de schatter van de onbekende deformatiesnelheid:

(5.13) $$\underline{\hat{v}}^{ps} = ([\Delta t]^T Q_y^{-1}[\Delta t])^{-1}[\Delta t]^T Q_y^{-1} \underline{d}_{i,ref}^{mt}$$

Gebruik maken van formule 5.5 geeft voor de variantie van de schatter:

(5.14) $$\sigma_{\hat{v}^{ps}}^2 = ([\Delta t]^T Q_y^{-1}[\Delta t])^{-1}$$

Als volgende stap kan het model getest worden [10]. Hierbij wordt gekeken naar fouten in de waarnemingen, in de ontwerpmatrix en in de variantiematrix Q_y. Testen is alleen mogelijk wanneer er meer waarnemingen dan onbekenden zijn (dat is hier duidelijk het geval).
De nulhypothese (het model bevat geen fout) wordt vergeleken met de alternatieve hypothese (het model bevat een fout). De testwaarden worden berekend en vergeleken met de kritieke waarde, die afhankelijk zijn van de gewenste betrouwbaarheid van de test en de kans op onterecht verwerpen van de nulhypothese.

Er worden twee statistische tests uitgevoerd. Als eerste wordt het gehele model getest op mogelijke fouten, de Overall Model Test. Hier volgt ook een schatting voor de variantiefactor ($\hat{\sigma}^2$) uit. De variantiefactor geeft een indicatie of de gebruikte varianties in de Q_y-matrix passen bij de berekende residuen. Ten tweede wordt per waarneming gekeken of deze voldoet aan het model, datasnooping of de w-toets genoemd. Als de waarnemingen inderdaad ongecorreleerd zijn, moeten de genormaliseerde w-toetswaarden standaard normaal verdeeld zijn.

5.4 Resultaten

De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van Matlab. Hiervoor zijn scripts geschreven, waarbij ook gebruik wordt gemaakt van de DATLAB-scripts van de afdeling Mathematische Geodesie en Puntsbepaling van de TU Delft. Waar nodig zijn deze aangepast naar de situatie in dit onderzoek.

Voor elke lokatie is per permanent scatterer een deformatiesnelheid uitgerekend. Ook is op basis van alle permanent scatterers op een lokatie een deformatiesnelheid berekend. In onderstaande tabel (tabel 5.2) staan de resultaten gegeven. In de eerste kolom staat de lokatie, in de tweede de geschatte deformatiesnelheid, in mm/yr. De derde kolom geeft de variantie van de schatter, in mm^2/yr^2, de vierde kolom geeft de variantiefactor, de schalingsfactor voor de variantie van de waarnemingen. De vijfde kolom geeft het

quotiënt van de testwaarde van de overall model test gedeeld door de kritieke waarde van de test. Wanneer dit quotiënt groter is dan 1 wordt de nulhypothese verworpen.

Tabel 5.2: Resultaten permanent scatterer deformatie

Lokatie	v^{ps} *mm/yr*	$\sigma^2_{v^{ps}}$ mm^2/yr^2	$\hat{\sigma}^2$	*OMT*
24F17	0.87328	0.003587	0.96446	0.9675
24H9	0.68576	0.006117	1.00869	1.0118
25A4	1.13594	0.001004	0.99006	1.0117
25A43	0.52022	0.009355	1.02116	1.0243
25A176	0.76317	0.004301	1.01305	1.0325
25C50	0.73514	0.021779	1.01699	0.9775
25D52	0.67894	0.001567	0.95473	0.9761
25E3	0.37645	0.001287	1.09701	1.1200
25E76	1.21063	0.002186	1.06565	1.0891
25G143	0.57451	0.001820	1.03498	1.0582
25G252	0.42954	0.002887	1.01264	1.0320

In bijlage 4 wordt per lokatie een scatterplot gegeven van alle waarnemingen per lokatie, geschatte snelheden per permanent scatterer en per lokatie. Tevens staat in deze bijlage per lokatie een histogram van de genormaliseerde w-toetswaarden.

Bij deze resultaten is er reeds gecorrigeerd voor de variantiefactor. Deze is, na de eerste berekening, op 1,15 gesteld, waardoor de variantie van de gemeten verticale deformatie van een permanent scatterer met een coherentie van 0,8 op 12,03 mm^2 komt. Dit verschilt dus een klein beetje met de theoretische variantie van de deformatiemeting.

5.5 Conclusies

Het eerste dat opvalt aan de resultaten is dat alle permanent scatterers stijgen ten opzichte van het referentiepunt. Bij de aanname dat het referentiepunt stabiel is, zou dit betekenen dat alle lokaties die gebruikt worden bij de vergelijking stijgen. Dit is echter zeer onwaarschijnlijk. Het gebied staat bekend als gevoelig voor dalende grondbewegingen. Zeker gezien de lokatie van het referentiepunt (waterrijke omgeving) en de aard van het gebouw (tuincentrum, zie beschrijving in bijlage 2) lijkt de aanname niet terecht.
De andere mogelijkheid is dat het referentiepunt wel beweegt. Bij alle deformatie-berekeningen wordt de deformatie van het referentiepunt gelijk gesteld aan nul. Op basis van deze resultaten zou dat niet terecht zijn. Het verschil met de deformatie zoals die door de beweging van de peilmerken wordt beschreven zou dan veroorzaakt worden door de daling van het referentiepunt ten opzichte van NAP. Helaas is er geen peilmerk aanwezig in het pand waar de referentiescatterer van afkomstig is. De daling van het referentiepunt is daarom berekend op basis van de verschillen in deformatiesnelheid per lokatie. Dit staat verder uitgewerkt in hoofdstuk 7.

De variantie van de geschatte deformatiesnelheid is erg goed. Dit komt door de hoge overtalligheid die in de meeste gevallen aanwezig is (een paar honderd waarnemingen voor één onbekende). De precisie van de geschatte deformatiesnelheid is heel hoog, de betrouwbaarheid een stuk lager.
De geschatte variantiefactoren zijn overal ongeveer gelijk aan 1. De schatting van de variantie is dus, op basis van deze waarnemingen en het gekozen model, goed. De lokatie waar slechts één permanent scatterer wordt gebruikt voor de berekening van de deformatiesnelheid heeft de slechtste variantie. Dit is volkomen logisch, want er is een lagere overtalligheid.
De Overall Model Test is overal ongeveer gelijk aan 1. Dit betekent dat de keuze voor een lineaire deformatiesnelheid goed zou kunnen zijn. De genormaliseerde w-toets is standaard normaal verdeeld.

6. Berekening deformatie peilmerken

In dit hoofdstuk wordt de berekening van de deformatie van de peilmerken uitgewerkt. Eerst wordt een korte toelichting op de beschikbare dataset gegeven. In de tweede paragraaf wordt beschreven welke voorbewerkingen er op de data plaats moeten vinden voordat ermee gerekend kan worden. In paragraaf drie worden de gebruikte modellen behandeld. De resultaten worden in paragraaf vier behandeld, waarna vervolgens in de vijfde paragraaf de resultaten geanalyseerd worden.

6.1 Beschrijving van de dataset

De Adviesdienst voor Geo-informatie en ICT (AGI) houdt in Nederland de hoogten van de NAP-bouten bij. Voor een groot aantal bouten zijn de gepubliceerde hoogten bewaard, zodat er een historisch overzicht van NAP-hoogten ontstaat.

In het originele databestand zoals AGI dat aanlevert staat per peilmerk de datum van de waterpassing en de vereffende hoogte. Verder staat bij elke vereffende hoogte de orde van de waterpassing, die een indicatie geeft over de toegestane sluitfout bij de vereffening (zie ook paragraaf 4.1).

6.2 Voorbewerkingen data

Berekenen double difference
De gepubliceerde hoogten zijn niet zonder meer geschikt voor bepaling van de deformatiesnelheid. De hoogten zijn berekend ten opzichte van een eerste orde peilmerk, dat als referentiepunt dient. Om de hoogte van het peilmerk door de tijd te kunnen vergelijken is het noodzakelijk dat de hoogte elke keer ten opzichte van hetzelfde referentiepeilmerk is berekend. Echter, het is onbekend welk eerste orde peilmerk is gebruikt bij het bepalen van de hoogte. De gepubliceerde hoogten zijn zodoende niet bruikbaar voor het bepalen van de deformatie. Voor een verdere toelichting hierop wordt verwezen naar bijlage A.

De ideale oplossing zou het gebruik van hoogteverschillen zijn. De precisie van deze hoogteverschillen is onafhankelijk van de gekozen basis (het eerste orde peilmerk). Deze hoogteverschillen waren helaas niet beschikbaar. Om dit probleem te omzeilen is uit de set geselecteerde peilmerken een referentiepunt gekozen waarvan de hoogte bekend is voor een groot aantal epochen. Deze epochen moeten overeen komen met de epochen voor de andere peilmerken. Door het hoogteverschil tussen het peilmerk en het referentiepeilmerk door de tijd heen te bekijken kan wel een deformatiesnelheid worden bepaald. Hierbij wordt aangenomen dat, omdat de peilmerkhoogte op dezelfde dag gemeten is, het peilmerk en het referentiepeilmerk uit dezelfde vereffening komen en zodoende ten opzichte van hetzelfde eerste orde peilmerk zijn bepaald. De fout door de beweging van het eerste orde peilmerk kan daardoor buiten beschouwing worden gelaten.

Er is een peilmerk dat aan de gestelde eis voor epochen voldoet, namelijk 25A1. Dit peilmerk ligt in Haarlem. Met elk ander peilmerk komen minstens drie epochen overeen. Dat is het minimale aantal datapunten dat nodig is voor de berekening van de lineaire deformatie. Voor elk peilmerk kan dan per epoche het hoogteverschil met het referentie-peilmerk worden berekend. Dit is de single difference:

(6.1) $$h_{i,ref}^{t} = H_i^t - H_{ref}^t$$

Hierin is $h_{i,ref}^{t}$ het hoogteverschil op tijdstip *t* tussen punt *i* en het referentiepunt en H^t de hoogte op tijdstip *t*.

De double difference is dan behalve dit ruimtelijke hoogteverschil ook het hoogteverschil in de tijd:

(6.2) $$\begin{aligned} h_{i,ref}^{mt} &= h_{i,ref}^{t} - h_{i,ref}^{m} \\ &= (H_i^t - H_{ref}^t) - (H_i^m - H_{ref}^m) \\ &= H_i^t - H_i^m - H_{ref}^t + H_{ref}^m \end{aligned}$$

Conversie van datum naar dagen
Net zoals bij de permanent scatterers (paragraaf 5.2) moet ook bij de peilmerken de gepubliceerde datum van een meetepoche worden geconverteerd naar dagen vanaf 1-1-1990. De eerste overeenkomstige epoche bij het berekenen van de hoogteverschillen is dan tijdstip *t=0*.

Datafiles
Het bestand met de inputdata bestaat uit een kolom met tijdstippen (in dagen) en een kolom met bijbehorende hoogteverschillen.
Verder is er een bestand waar per lokatie in staat beschreven welke rijen uit de inputdata bij die lokatie horen. Tevens staan hier de RD-coördinaten in.
In de laatste rij staan de coördinaten van het referentiepeilmerk. Deze zijn nodig bij de berekening van de variantie.

6.3 Gebruikte modellen

De relatie tussen de onbekende deformatiesnelheid en de gemeten *double differences*, in combinatie met de tijdstippen, levert het volgende lineaire model:

(6.3) $$h_{i,ref}^{mt} = \Delta t \cdot v^{pm}$$

Hierin is:
$h_{i,ref}^{mt}$ de *double difference*;
Δt de tijdstippen waarop het hoogteverschil is gemeten, in dagen; en
v^{pm} de te schatten deformatiesnelheid van het peilmerk.

Ook hier hoeft geen translatieparameter berekend te worden, omdat de deformatie op *t=0* gelijk is aan 0.

Ook hier wordt weer gebruik gemaakt van de *"Delft Adjustment and Testing Theory"*. Voor een korte toelichting op deze theorie zie paragraaf 5.3, of voor een uitgebreide toelichting in [9].

Het functionele model wordt gegeven door:

(6.4) $$E\{h_{i,ref}^{mt}\} = \Delta t \cdot v^{pm}$$

Voor het stochastische model wordt allereerst gebruik gemaakt van de variantie van de single difference. Deze kan bepaald worden omdat een peilmerk (25A1) als rekenbasis dient en daardoor kan het hoogteverschil worden berekend alsof het een waterpassing betreft. Bij een normale waterpassing kan de variantie van het hoogteverschil als volgt worden bepaald [6]:

(6.5) $$\sigma_h = 0.7 \cdot \sqrt{L} \quad mm$$

Hierin is L de afgelegde afstand in kilometers bij het waterpassen.

De afgelegde weg wordt hier gedefinieerd als de kortste afstand tussen het peilmerk en het referentiepeilmerk in een 2-dimensionaal vlak. Dit betekent voor de variantie van het hoogteverschil:

(6.6) $$\sigma_{h_{i,ref}^{t}}^{2} = 0.7^2 \cdot \sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + (y_i - y_{ref})^2} \quad mm$$

waarbij de x- en y-coordinaat in kilometer gegeven worden.

Voor de variantie van de double difference moet de voortplantingswet der varianties worden toegepast:

(6.7) $$\begin{aligned} h_{i,ref}^{mt} &= h_{i,ref}^{t} - h_{i,ref}^{m} \\ \sigma_{h_{i,ref}^{mt}}^{2} &= \sigma_{h_{i,ref}^{t}}^{2} + \sigma_{h_{i,ref}^{m}}^{2} \\ \sigma_{h_{i,ref}^{mt}}^{2} &= 2 \cdot 0.7^2 \cdot \sqrt{(x_i - x_{ref})^2 + (y_i - y_{ref})^2} \quad mm \end{aligned}$$

Deze varianties kunnen worden gebruikt in de Q_y-matrix. Dit levert het volgende stochastische model:

(6.8) $$D\{h_{i,ref}^{mt}\} = \hat{\sigma}^2 \cdot Q_y$$

De deformatieparameter kan nu als volgt worden berekend (gebruik makend van formule 5.4):

(6.9) $$\underline{\hat{v}}^{ps} = ([\Delta t]^T Q_y^{-1}[\Delta t])^{-1}[\Delta t]^T Q_y^{-1} \underline{d}_{i,ref}^{mt}$$

met als variantie van de schatter (zie ook formule 5.5):

(6.10) $$\sigma_{\hat{v}^{ps}}^2 = ([\Delta t]^T Q_y^{-1}[\Delta t])^{-1}$$

6.4 Resultaten

De schatter voor de deformatiesnelheid is berekend met Matlab. Er is een script geschreven die de twee eerder genoemde input bestanden gebruikt en daaruit de 11 deformatieparameters berekent.

In onderstaande tabel staan de resultaten gegeven. In de eerste kolom staat de lokatie, in de tweede de geschatte deformatiesnelheid, in mm/yr. De derde kolom geeft de variantie van de schatter, in mm^2/yr^2, de vierde kolom geeft de variantiefactor, de schalingsfactor voor de variantie van de waarnemingen. De vijfde kolom geeft het quotiënt van de testwaarde van de Overall Model Test gedeeld door de kritieke waarde van de test. Wanneer dit quotiënt groter is dan 1 wordt de nulhypothese verworpen.

Tabel 6.1: Resultaten deformatieberekening peilmerken

Lokatie	v^{pm} *mm/yr*	$\sigma_{v^{pm}}^2$ mm^2/yr^2	$\hat{\sigma}^2$	*OMT*
24F17	-0.72666	0.004943	1	0.2955
24H9	-1.03532	0.007095	1	0.1705
25A4	0.05342	0.000224	1	0.2955
25A43	0.33058	0.003329	1	0.3462
25A176	-0.54839	0.000719	1	0.1705
25C50	-0.16775	0.000036	1	0.3909
25D52	-0.21308	0.000453	1	0.1705
25E3	-0.11894	0.000130	1	0.2375
25E76	0.05943	0.001178	1	0.2955
25G143	-0.02072	0.000205	1	0.3462
25G252	-0.75837	0.003367	1	0.2375

In de berekening wordt al gecorrigeerd voor de geschatte variantiefactor. Dit zorgt ervoor dat bij de tweede berekening alle variantiefactoren 1 worden.

6.5 Conclusies

De berekende deformaties volgen allemaal vrij goed uit de scatterplots van de hoogteverschillen. Eén lokatie springt er echt uit, namelijk 25E76. Deze snelheid wordt niet

geschat zoals volgens de scatterplot (bijlage 4) verwacht zou mogen worden. Het vermoeden is dat deze deformatiesnelheid in werkelijkheid negatief zal zijn. Uit de Overall Model Test zou hier moeten blijken dat de aanname van lineaire deformatie in dit geval niet terecht is. Voor de overige lokaties lijkt de snelheid goed te zijn geschat uit de datapunten. Bij peilmerk 25G143 volgt de geschatte snelheid weliswaar niet de datapunten, maar op basis van de daling over de gehele periode lijkt de snelheid wel gerechtvaardigd.

De precisie is in alle gevallen goed, de betrouwbaarheid is echter laag. De varianties van de geschatte deformatiesnelheden lopen flink uiteen. Dit komt mede doordat het aantal waarnemingen per lokatie erg verschilt, waardoor de precisie lager wordt. Ondanks dat de Overall Model Test ruimschoots geaccepteerd wordt, kan er niet vanuit gegaan worden dat de geschatte deformatiesnelheden ook betrouwbaar zijn.

Toetsen van het model heeft, gezien het aantal waarnemingen, niet zo veel nut. Zoals blijkt uit de scatterplots (zie bijlage 4) is de geschatte fout $(\hat{e} = y - \hat{y})$ in enkele gevallen relatief groot zijn. De w-toetswaarde wordt berekend op basis van deze geschatte fout. Uit de plot blijkt echter dat de geschatte deformatiesnelheid wel de trend van de datapunten lijkt te volgen.

Uit de scatterplots valt ook op dat twee waarnemingen op één tijdstip kunnen verschillen. Dit komt doordat de NAP-hoogte ten opzichte van twee referentiepunten is berekend. Hierdoor is het mogelijk dat er twee hoogten uit volgen.

7. Berekening verschil in deformatie

Bij de berekening van de deformatiesnelheid van de permanent scatterers is gebleken dat alle lokaties stijgen ten opzichte van het referentiepunt. Dit komt door de aanname dat dit punt stabiel is. In werkelijkheid is dit niet het geval. Als gevolg hiervan komen de deformaties niet overeen met de peilmerkdeformaties. In dit hoofdstuk wordt de (vermoedelijke) relatie tussen de twee deformatieberekeningen bepaald.

7.1 Beschrijving van de data

Voor het berekenen van het verschil in deformatie zijn per lokatie de berekende snelheden van de permanent scatterer en de peilmerken nodig. Tevens is ook de berekende variantie van de deformatiesnelheid nodig.

7.2 Gebruikte model

De verwachting is dat het verschil in deformatiesnelheid wordt veroorzaakt door de daling van de referentiescatterer ten opzichte van NAP. Er wordt vanuit gegaan dat de snelheden dezelfde deformatie op een lokatie beschrijven. Daardoor kan het schalingsgetal op 1 gehouden worden. De offset tussen de daling volgens de permanent scatterer en volgens de peilmerken kan dan bepaald worden met het volgende model:

(7.1) $$\delta_i = v_i^{PM} - v_i^{PS}$$

Hierin is:

δ_i de offset op lokatie *i*;

v_i^{PM} de deformatiesnelheid van het peilmerk op lokatie *i*; en

v_i^{PS} de deformatiesnelheid van de permanent scatterers op lokatie *i*.

Op deze manier wordt voor elke lokatie een offset berekend. Voor elk van die offsets kan ook de variantie worden berekend, met behulp van de voortplantingswet der varianties:

(7.2) $$\sigma_{\delta_i}^2 = \sigma_{V_i^{PM}}^2 + \sigma_{V_i^{PS}}^2$$

Uit deze 11 geschatte offsets moet vervolgens één offset worden berekend. Dit kan niet door de offsets te middelen, dan wordt er geen rekening gehouden met de variantie van de offset. Daarom wordt er weer gebruik gemaakt van de *Best Linear Unbiased Estimator* (zie paragraaf 5.3 of [9]).

Het mathematische model ziet er als volgt uit:

$$(7.3) \qquad E\begin{Bmatrix}\delta_1\\ \vdots\\ \delta_{11}\end{Bmatrix}=\begin{pmatrix}1\\ \vdots\\ 1\end{pmatrix}\cdot\hat{\delta} \quad ; \quad D\begin{Bmatrix}\delta_1\\ \vdots\\ \delta_{11}\end{Bmatrix}=\begin{pmatrix}\sigma^2_{\delta_1} & 0 & 0\\ 0 & \ddots & 0\\ 0 & 0 & \sigma^2_{\delta_{11}}\end{pmatrix}$$

7.3 Resultaten

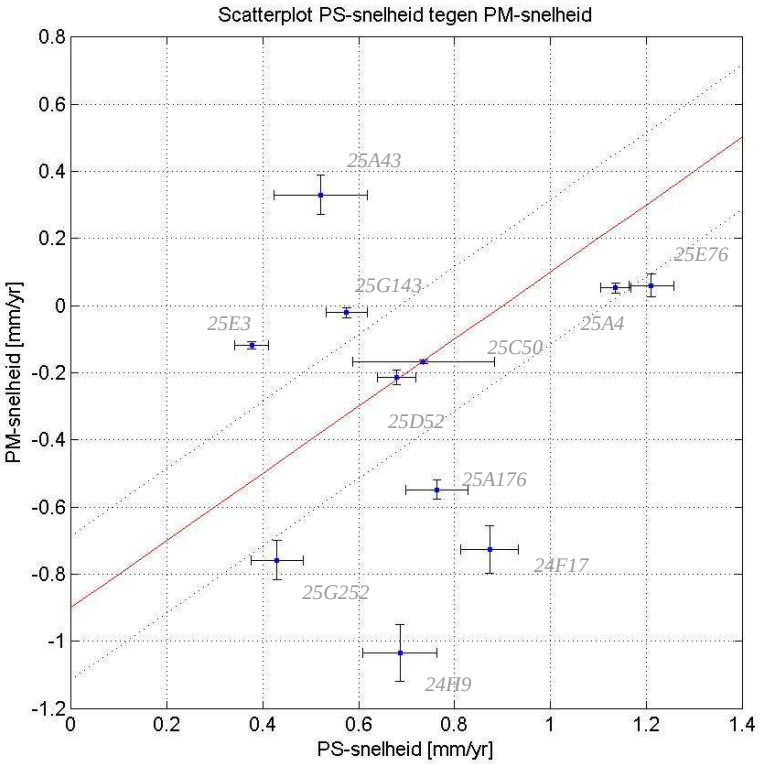
De berekening wordt uitgevoerd in Matlab. De schatting van de variantiefactor na de eerste berekening is 40,2. Dit betekent dat de gebruikte varianties veel te laag zijn om aan het model te voldoen. Dit komt doordat de varianties van de deformatiesnelheden van de permanent scatterers en de peilmerken heel laag zijn. De Overall Model Test geeft aan dat dit gebruikte model niet geschikt is voor de berekening van de offset. De berekening wordt nogmaals uitgevoerd, maar de varianties van de berekende worden aangepast met de variantiefactor.

Na aanpassing van de varianties van de offset per lokatie wordt het model wel geaccepteerd. In onderstaande tabel staat het resultaat.

Tabel 7.1: Resultaten berekening offset

$\hat{\delta}$ [*mm/yr*]	$\sigma^2_{\hat{\delta}}$ [mm^2/yr^2]	$\hat{\sigma}^2$	*OMT*
-0,89952	0,01155	1	0,5267

In onderstaande scatterplot staan de permanent scatterer en peilmerksnelheden tegen elkaar geplot. Het geschatte model staat ook gevisualiseerd, met het 2σ-interval. De datapunten zijn voorzien van errorbars. Ze geven het 95%-betrouwbaarheidsinterval weer, op basis van de berekende variantie van de deformatiesnelheid.



Figuur 7.1: Scatterplot permanent scatterer deformatiesnelheden en peilmerk deformatiesnelheden. De rode lijn is de geschatte lijn door de datapunten. Zowel de datapunten als de geschatte lijn zijn voorzien van het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

7.4 Analyse resultaten

De afstand van de datapunten tot de geschatte lijn is voor enkele lokaties vrij groot. Ze vallen ruim buiten het betrouwbaarheidsinterval van 95%. De variantie van de offset per lokatie wordt bepaald door de varianties van de geschatte snelheden voort te planten. De lage varianties van de deformatiesnelheden werkt door in de variantie van de offset.

Bij punt 24H9 is de permanent scatterer snelheid onduidelijk, omdat de precieze afkomst van de radarreflecties onduidelijk is. Mogelijk kwamen deze niet vanaf het object zelf, maar via de grond en de muur. Punt 24F17 heeft waarschijnlijk ook geen directe reflecties, waardoor de snelheid verkeerd geschat kan zijn.
Punt 25A43 bevat meer permanent scatterers, maar die hebben een te lage coherentie om meegenomen te worden. Als de coherentie lager is dan 0,70, is er geen tijdserie van in de dataset. Uit de geschatte snelheden blijkt dat deze punten een veel hogere deformatiesnelheid hebben. De deformatiesnelheid zoals die nu berekend is zou dan te laag zijn. Vermoedelijk heeft het datapunt in werkelijkheid een hogere permanent scatterer snelheid, waardoor deze dichter bij de geschatte offset zou liggen.

Wanneer deze drie punten weggelaten worden dan lijkt de geschatte offset aardig door de datapunten heen te gaan. Wanneer de punten echter weggelaten worden blijven er weinig punten over voor de vergelijking, waardoor de betrouwbaarheid sterk afneemt.

Bij de betrouwbaarheid van de berekende offset kunnen vraagtekens gezet worden. Allereerst komt dat door de betrouwbaarheid van de berekende deformatiesnelheden. Vooral de deformatie van de peilmerken lijkt niet betrouwbaar te zijn. Uit de toetsing volgde dat de Overall Model Test, bij de initiële waarden, ruimschoots boven de kritieke waarde uitsteeg (toetsingswaarde = 40,21, kritieke waarde = 19). Hieruit volgt dat bij de gebruikte snelheden en varianties het model niet klopt. Wanneer de varianties aangepast worden wordt het model wel geaccepteerd. De correctiefactor is wel heel erg groot, dus op basis van deze berekende snelheden is de betrouwbaarheid van de berekende offset laag.

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusie

In dit onderzoek is gezocht naar het verschil in de resultaten die volgen uit de deformatiemetingen met Permanent Scatterer InSAR en de hoogte van de peilmerken. Er is een model opgesteld waarbij aangenomen wordt dat dit verschil alleen wordt veroorzaakt door de daling van het permanent scatterer referentiepunt. Rekening houdende met de nauwkeurigheid van alle berekende deformatiesnelheden is de dalingssnelheid van het referentiepunt bepaald op -0,90 mm/yr. De variantie die hierbij berekend is, is $1{,}15 \cdot 10^{-2}$ mm^2/yr^2. De betrouwbaarheid van deze offset is echter laag. Dit wordt veroorzaakt door de spreiding van de datapunten rondom de geschatte offsetlijn. De gebruikte varianties van de geschatte deformatiesnelheden zijn heel erg laag, waardoor het moeilijk is een offset te schatten uit deze datapunten.

De identificatie van de afkomst van de permanent scatterer is moeilijk. Dit wordt veroorzaakt door de nauwkeurigheid van de geschatte lokatie van de permanent scatterer. Het combineren van de lokatie van de permanent scatterer en andere geografische informatie, zoals luchtfoto's, introduceert onder meer een fout door het georefereren van de luchtfoto aan de topografische ondergrond. Hierdoor kan de geplotte lokatie van de permanent scatterer tientallen meters afwijken van de werkelijke afkomst van de reflectie. Door de hoge dichtheid van permanent scatterers in bebouwd gebied is het moeilijk de afkomst van een radarreflectie aan te wijzen.

Bij de vergelijking van de verschillende deformatiesnelheden is het essentieel dat ze allebei dezelfde deformatie beschrijven. De radarreflecties moeten van hetzelfde object afkomstig zijn als waar het peilmerk in is aangebracht. In andere situaties heeft vergelijken geen zin. Wanneer er een indirecte reflectie plaatsvindt (signaal reflecteert bijvoorbeeld via de grond en de muur) dan moet er rekening mee gehouden worden dat de gemeten deformatie niet de deformatie van het object is, maar van de omliggende grond.

De foutenbronnen van de deformatiewaarnemingen van de permanent scatterer kunnen gemodelleerd worden in de variantie van de waarneming. Hierdoor wordt rekening gehouden met verschillende foutenbronnen, zoals ruimtelijke en temporele decorrelatie, het aantal gebruikte beelden, atmosferische invloeden en verschillende reflectie-eigenschappen van het oppervlak. Bij de deformatie van de peilmerken is de afstand tussen het peilmerk en het referentiepeilmerk gebruikt als maat voor de variantie van het gemeten hoogteverschil. Dit referentiepeilmerk is nodig om de hoogteverschillen in de tijd te berekenen. Gebruik maken van de gepubliceerde NAP-hoogten is nutteloos door het feit dat deze ten opzichte van een onbekend basispunt zijn gemeten. De hoogten kunnen elke keer ten opzichte van een ander basispunt zijn berekend, waardoor bepaling van de deformatie op basis van deze hoogten tot verkeerde conclusies kan leiden. Daarom is gebruik gemaakt van hoogteverschillen ten opzichte van een bekend punt in de dataset. Het aantal waarnemingen dat hierdoor gebruikt wordt voor de berekening van de

deformatie van de peilmerken is laag, waardoor de betrouwbaarheid van deze snelheden laag is.

8.2 Aanbevelingen

Voor de berekening van de offset zijn in dit onderzoek 11 punten overgebleven. De betrouwbaarheid van de lijn die door deze 11 punten is geschat is laag. Wanneer gebruikt wordt gemaakt van meer datapunten kan de betrouwbaarheid van de offset worden verbeterd. Hierbij moet wel gedacht worden aan de kwalitatieve eisen van de punten, zoals de aanwezigheid van coherente scatterers en peilmerken van een het tweede orde netwerk.

Voor de berekening van de deformatie van de peilmerken moet gebruik worden gemaakt van de vereffende hoogteverschillen en de varianties hiervan. Deze zijn namelijk onafhankelijk van de gekozen rekenbasis. Bewegingen van referentiepunten worden daardoor irrelevant. De betrouwbaarheid van de berekende deformatiesnelheden zal groter worden, waardoor ook de betrouwbaarheid van de geschatte offset toe zal nemen.

Literatuurlijst

[1] Colesanti, C., A. Ferretti, F. Novali, C. Prati en F. Rocca, 'SAR monitoring of Progressive ans Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, jul. 2003, p. 1686.

[2] Ferretti, A., C. Prati, en F. Rocca, 'Permanent Scatterers in SAR Interferometry', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, jan. 2001, p. 8-20.

[3] Gehlot, S., V.B.H. Ketelaar, E. Verbree, R.F. Hanssen, *Conceptual framework for PS-InSAR deformation interpretation assisted by geo-information technology*.

[4] Hanssen, R.F., *Radar Interferometry, data interpretation and error analysis*, Dordrecht: Kluwer Publishers, 2001.

[5] Hanssen, R.F., 'Subsidence monitoring using contiguous and PS-InSAR: Quality assessment based on precision and reliability', *11th FIG symposium on Deformation Measurements*, 2003.

[6] Kenselaar, F., Overzicht van geodetische meetmethoden, modellering en analyse, In: *Bodemdaling meten in Nederland: hoe precies moet het en hoe moet het precies?*, Delft, 2002, p. 41.

[7] Ketelaar, V.B.H. en R.F. Hanssen, *Seperation of different deformation regimes using PS-InSAR data*.

[8] Leijen, F.J. van, V.B.H. Ketelaar, P.S. Marinkovic en R.F. Hanssen, *Persistent Scatterer Interferometry: Precision, Reliability and Integration*.

[9] Teunissen, P.J.G., *Adjustment Theory; an introduction*, Delft: Delft University Press, 2000.

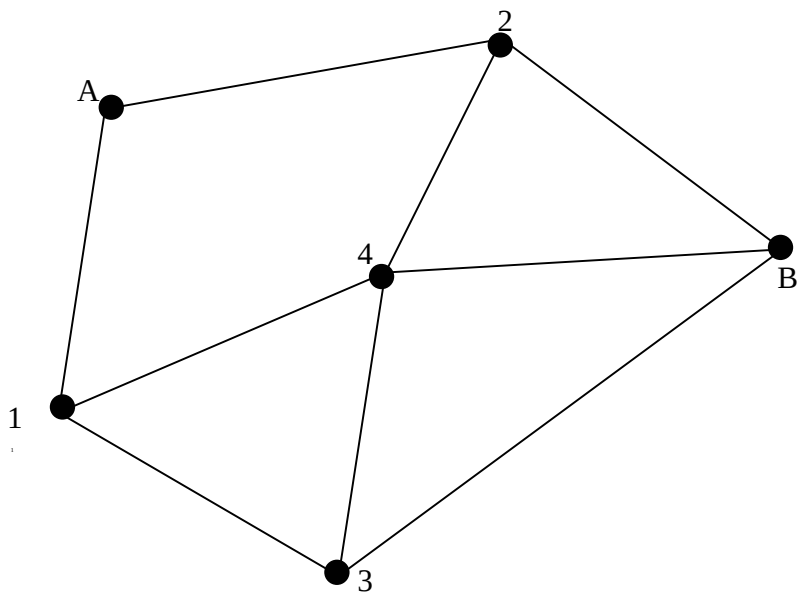
[10] Teunissen, P.J.G., *Testing Theory; an introduction*, Delft: Delft University Press, 2000.

[11] www.rdnap.nl, juni 2005

Bijlage 1: De noodzaak van hoogteverschillen

De Adviesdienst Geo-Informatie en ICT (AGI) van Rijkswaterstaat berekent de hoogten van de peilmerken door middel van waterpassingen. Hiervoor worden waterpaskringen ontworpen, waarbij hoogteverschillen tussen bekende (eerste orde peilmerken) en onbekende punten worden gemeten. Bij deze metingen is ook de variantie van de gemeten hoogteverschillen bekend. AGI vereffent de gemeten hoogteverschillen en sluit ze aan op het bestaande netwerk van peilmerken. Deze nieuwe hoogten worden gepubliceerd. De variantie van de hoogteverschillen is afhankelijk van de lengte van de waterpasslag, het instrument dat gebruikt wordt, weersomstandigheden, etc, waarbij de lengte van de slag de grootste invloed heeft. Aangenomen wordt dat de standaard-afwijking van de meetruis gelijk is aan $0.7 \cdot \sqrt{L}$ mm, waarbij L de lengte van de slag in km is.

Om de deformatie van de bodem te kunnen beschrijven aan de hand van de NAP-hoogten, zoals gepubliceerd door AGI, is het van belang kennis te hebben van de variantie van deze hoogte. Ook moet, bij elke waterpassing, de hoogte van het peilmerk bepaald zijn ten opzichte van hetzelfde referentiepunt. Wanneer dit niet gebeurd heeft gebruik maken van de NAP-hoogten geen nut. In het onderstaande voorbeeld wordt dit toegelicht.



Figuur B.1: Waterpasnetwerk.

Wanneer de hoogten van de afzonderlijke punten bepaald moeten worden, wordt er gewaterpast. Daarbij wordt het hoogteverschil tussen twee punten bepaald. Het maakt

hierbij niet uit vanaf welk punt er wordt gemeten. Het hoogteverschil zoals dat tussen twee punten gemeten wordt is elke keer gelijk, mits er geen deformaties plaats vinden.

In het bovenstaande netwerk (figuur B.1) worden alle hoogteverschillen gemeten. Om de hoogten van de punten te berekenen moet de hoogte van één van de punten bekend zijn. Bij het bepalen van de NAP-hoogten van de onbekende punten zal dat een eerste orde peilmerk zijn, waarvan de NAP-hoogte bekend is. In dit waterpasnetwerk is de NAP-hoogte van punt A en B bekend. De berekende hoogtes van de punten 1, 2, 3 en 4 zijn afhankelijk van welke van de twee bekende punten wordt gekozen. Ze hoeven niet tot hetzelfde resultaat te leiden. Ondanks dat de gemeten hoogteverschillen niet veranderen is de berekende hoogte van de onbekende punten afhankelijk van het gekozen referentie-punt.

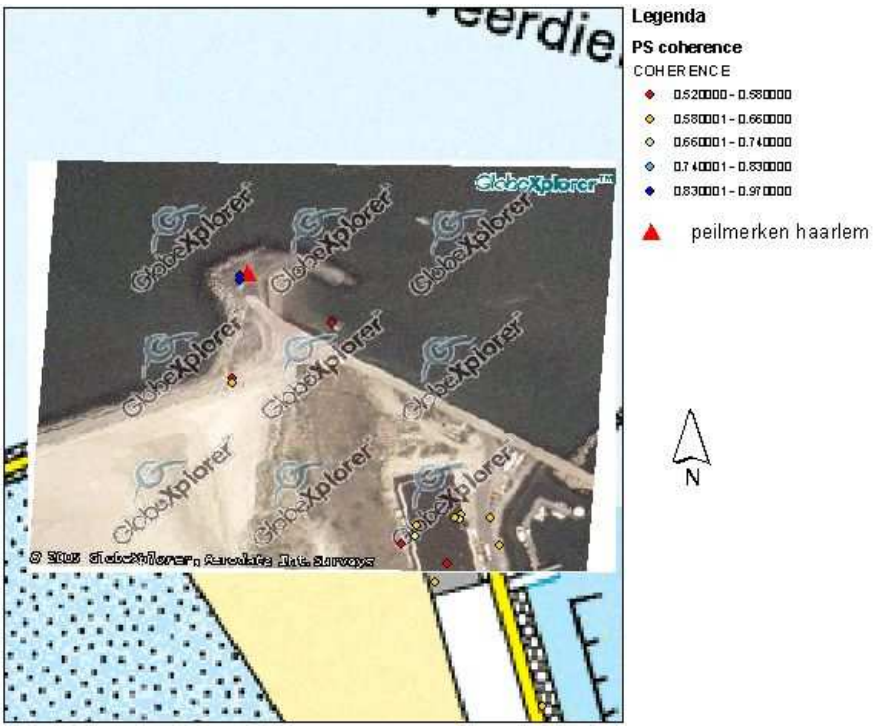
Het gevaar van de gepubliceerde NAP-hoogten van AGI is dat de hoogten niet ten opzichte van hetzelfde eerste orde peilmerk zijn gemeten. Ondanks dat de hoogteverschil-len gelijk kunnen zijn, kan de berekende hoogte verschillen. Deformatieberekeningen op basis van de gepubliceerde hoogten kan tot verkeerde conclusies leiden. In het historische overzicht van de NAP-hoogten komt het voor dat een peilmerk op één dag twee verschillende hoogten heeft. Dit komt simpelweg door het gekozen referentiepunt. Een ander nadeel van de historische hoogten is dat er geen variantie bekend is van de berekende NAP-hoogte, waardoor de nauwkeurigheid van de hoogte onbekend is.

Het gebruik van de hoogteverschillen en de varianties hiervan geniet dus duidelijk de voorkeur. Aan de hand van deze hoogteverschillen kan wel de deformatie berekend worden, zonder dat de rekenbasis een rol speelt. Tevens wordt door het gebruik van hoogteverschillen een eventuele fout in het eerste orde peilmerk geëlimineerd, omdat deze peilmerken niet meer gebruikt worden in de deformatieberekening.

Bijlage 2: Uitgebreide beschrijving veldwerk

Peilmerknummer: 24F17
Lokatie: lichtbunker zuidelijke pier IJmuiden
Orde peilmerk: 2

Op de pier bevindt zich een lichtbunker. Verder is er alleen asfalt. In deze bunker bevindt zich de NAP-bout (zie foto). De bout is ten tijde van de bouw van de bunker erin verwerkt. Als de bunker er net staat zal hij eerst zakken als gevolg van inklinking van de ondergrond. Na verloop van tijd kan er een stabilisatie plaats vinden. Dat lijkt hier ook het geval te zijn.
Er zijn op de pier weinig reflecterende oppervlakken. Het zou kunnen dat er een directe reflectie plaats vindt, vanaf de bovenkant van de toren. Een andere mogelijkheid is een muur-grondreflectie. De twee scatterers hebben een hoge coherentie in de jaren van de opnamen. Bij een muur-grondreflectie zullen de scatterers de beweging van de pier monitoren. Bij een directie reflectie zal de beweging van het object worden gemonitord. Informatie over de geschatte hoogte van de scatterer zou kunnen uitwijzen of de reflectie direct of indirect is.
Uit het veldwerk komt wel het vermoeden naar voren dat de pier nog steeds deformeert. Het oppervlak betoont verschijnselen van deformatie. Dit laat zich blijken uit (kleine) hoogteverschillen in het oppervlak, die wel met het oog zijn waar te nemen. Dit zou invloed kunnen hebben op de indirecte reflecties.



Figuur B.2: Situatie 24F17

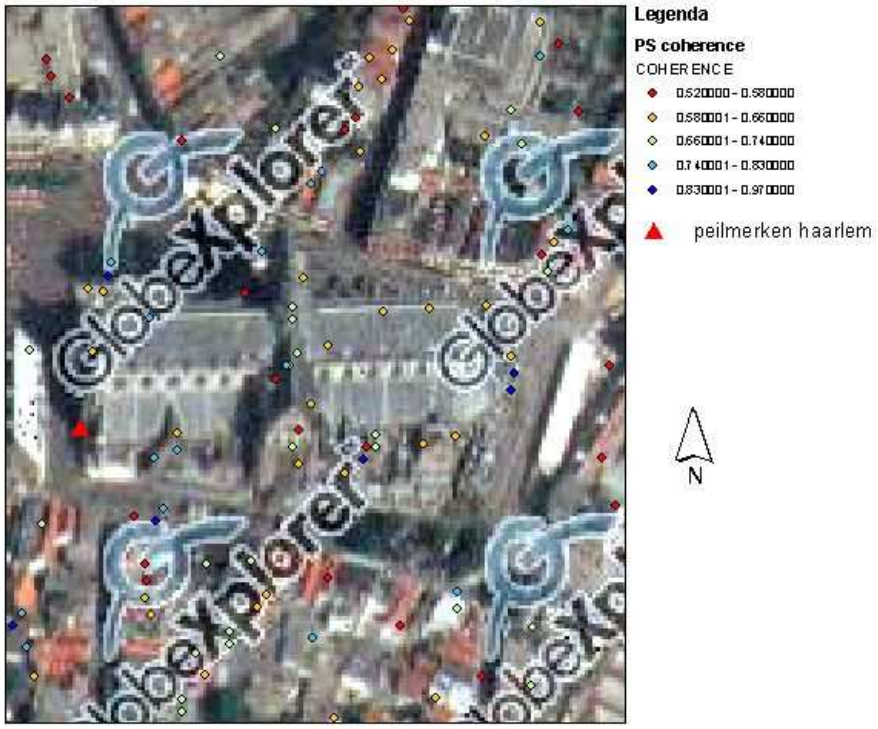
Peilmerknummer: 24H9
Lokatie: huis langs weg
Orde peilmerk: 2

Bij het veldwerk is gebleken dat de oriëntatie van het dak van het huis zodanig is dat de reflecties niet van het dak kunnen komen. Van de vijf scatterers die in eerste instantie tot het object werden gerekend, zullen er een paar niet een fysieke relatie met het huis hebben. Het huis bestaat uit een hoofdgedeelte met een kleine uitbouw erachter. Beide beschikken over een schuin dak, alleen de oriëntatie is zodanig dat er geen mooi reflecterend vlak ontstaat voor de radarsignalen (evenwijdig aan de kijkrichting). Achter het huis is een stukje betegeling. Het pand dat achter het huis ligt, ligt een heel stuk lager. Door dit hoogteverschil ontstaat er een verticaal vlak. Het signaal zou hier via de grond en dit vlak kunnen reflecteren. Een tweede mogelijke weg voor het signaal is via de betegeling en de uitbouw, die in de goede richting georiënteerd staan. Het peilmerk bevindt zich niet op de lokatie zoals weergegeven op de luchtfoto.
De betegeling van het terras achter het huis laat al wat mogelijke beweging van de grond zien. Het huis is waarschijnlijk wel goed gefundeerd. De gemeten daling zou dan door de daling van het terras veroorzaakt kunnen worden en niet door de daling van het huis. Op deze manier is de daling van het huis niet te meten. Voor een goede vergelijking is dit punt dus niet geschikt.

Figuur B.3: Situatie 24H9

Peilmerknummer: 25A4
Lokatie: St. Bavo kerk te Haarlem
Orde peilmerk: 2

Kerken zorgen altijd voor een grote hoeveelheid scatterers. Dit is zeker het geval wanneer het nok van de kerk van noord naar zuid loopt, dus optimaal georiënteerd is. Er ontstaat dan een groot schuin oppervlak loodrecht op de kijkrichting van de radarsensor, waardoor er veel reflecties ontstaan. Tevens bestaat de kerk uit kleine uitbouwen aan de zijkant. Deze hebben ook weer een schuin dak, die als reflecterend oppervlak kunnen dienen (zie figuur B.19). Uit de combinatie van de gelokaliseerde scatterers en de luchtfoto ontstaat het vermoeden dat alle scatterers direct afkomstig zijn van de kerk. De twee scatterers aan de oostkant van de kerk zouden ontstaan kunnen zijn door een muur-grondreflectie, gezien de geplotte lokatie. Deze lokatie is uiteraard niet exact bekend, dus het is niet met zekerheid te zeggen waar de scatterers precies vandaan komen. Hetzelfde geldt voor de scatterer aan de zuidoost kant. Uit de foto blijkt de diversiteit van het mogelijk reflecterende oppervlak.
Het geselecteerde peilmerk bevindt zich aan de westkant van de kerk, naast de ingang. De staat van dit peilmerk is goed, het is stevig gefundeerd.



Figuur B.4: Situatie 25A4

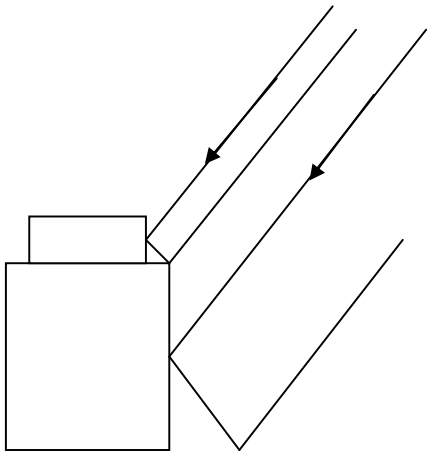
Peilmerknummer: 25A43
Lokatie: Gebouw van de marine te Driehuis
Orde peilmerk: 2

Op het gebouw bevinden zich een aantal scatterers, waarvan slechts twee met een voldoende coherentie voor een tijdserie. De reflecties lijken afkomstig te zijn van het dak. Dit is ook mogelijk gezien de bouw van het dak en de kijkrichting van de satelliet. Het dak bestaat uit een schuin dak met een nok, met daaronder een nog steiler schuin dak (zie figuur B.20). Dit schuine dak zorgt weer voor een goed reflecterend oppervlak. De kijkrichting van de satelliet wijkt net iets af van de oriëntatie van de nok van het gebouw, waardoor het aantal scatterers met een hoge coherentie niet hoog is (slechts twee).
De twee scatterers die gebruikt worden voor de berekening kunnen ook nog ontstaan zijn door een muur-grondreflectie. Door de beperkte toegankelijk van het gebouw is het niet duidelijk of dit ook werkelijk kan. De kans op reflecties direct vanaf het dak is wel groter. Het peilmerk bevindt zich in de westelijke muur van het gebouw. Er zijn wel tekenen van beweging van de grond, zoals blijkt uit de bestrating voor het gebouw. Of dit aan de andere kant van het gebouw ook gebeurt is onduidelijk.

Figuur B.5: Situatie 25A43

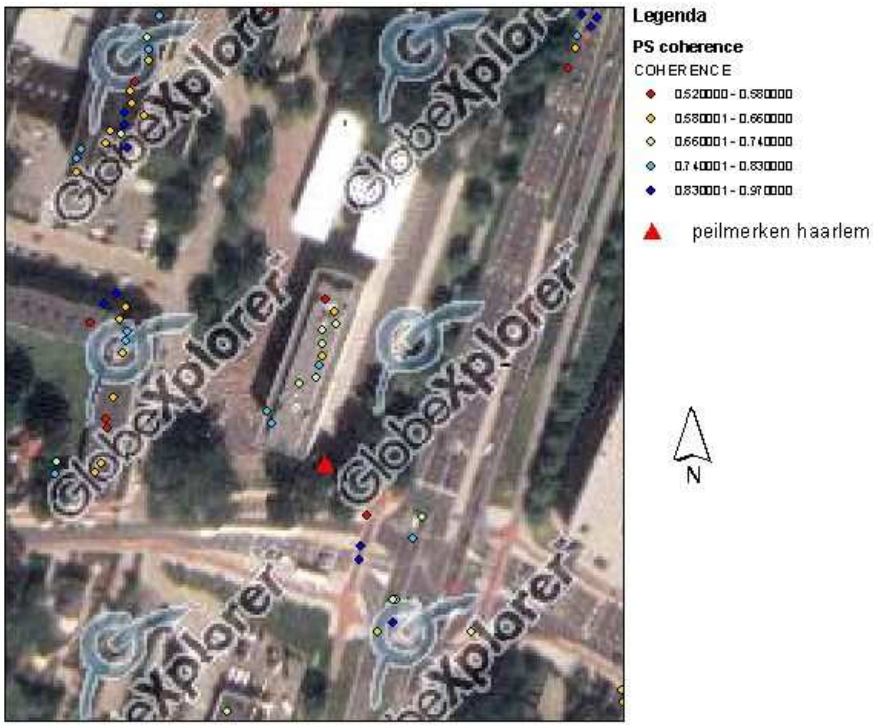
Peilmerknummer: 25A176
Lokatie: Gebouw provincie Noord-Holland
Orde peilmerk: 2

Het gebouw heeft geen schuin dak. De kans op een directe reflectie is daardoor nihil. Gezien de situatie zijn er twee mogelijkheden voor reflecties. De eerste mogelijkheid is dat het signaal reflecteert via de grond en de zijkant van het gebouw. De oppervlak van het zijkant is immers groot. Een tweede mogelijkheid is dat het signaal bovenop het gebouw reflecteert, maar dan wel via de zijkant van de bouwwerk op het dak en de horizontale van het dak. Gezien de grote hoeveelheid scatterers op het gebouw is het waarschijnlijk dat allebei de genoemde mogelijkheden voorkomen.



Figuur B.6: De twee mogelijke reflecties bij 25A176

Wanneer er beschikking is over de geschatte hoogte van de permanent scatterer, kan preciezer worden gekeken waar de scatterers vandaan komen. Doordat deze informatie niet beschikbaar was, is het moeilijk de precieze lokatie van de reflectie aan te wijzen. Zeker bij dit gebouw, waar een groot aantal scatterers aanwezig is. Wat wel van belang is, is dat de twee reflectiemogelijkheden andere deformaties beschrijven. Omdat onderscheid maken niet mogelijk is op basis van de gegevens, moet in het achterhoofd gehouden worden dat de geschatte deformatie kan afwijken van de werkelijke deformatie. De oriëntatie van het gebouw is bijna ideaal voor de satelliet. De lange zijde staat vrijwel loodrecht op de kijklijn van de satelliet. Figuur B.21 geeft de situatie weer zoals die aan de andere zijde van het gebouw is. De zijde aan de zichtzijde van de satelliet is echter identiek, maar wordt voor de foto gehinderd door de aanwezigheid van bomen.
Het peilmerk bevindt zich in de zuidkant van het gebouw. In de omgeving zijn weinig tekenen van deformatie. In de muur waar ook het peilmerk zich in bevindt zit wel een scheur. Deze is moeilijk zichtbaar op de foto's. Dit kan wel invloed hebben gehad op de hoogte van het peilmerk, maar zal beperkt zijn tot millimeterniveau.



Figuur B.7: Situatie 25A176

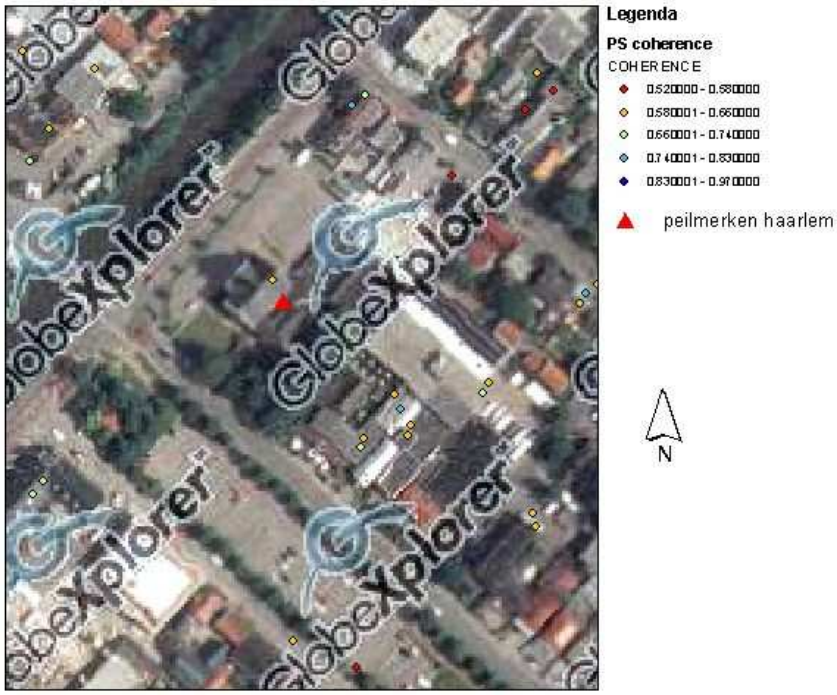
Peilmerknummer: 25B62
Lokatie: Boerderij vlakbij Zaandam
Orde peilmerk: 2

Uit de combinatie van een luchtfoto, plot van de permanent scatterer lokaties, topografische kaart en de lokatie van het peilmerk is het niet duidelijk of er een fysieke relatie bestaat tussen de afkomst van de reflecties en het peilmerk. Dit komt onder meer door de fouten die geïntroduceerd worden bij het combineren van de verschillende lagen en de fout in de positie van het peilmerk. Uit het veldwerk is gebleken dat het peilmerk zich in het object bevindt dat het dichtst bij de openbare weg ligt. De twee scatterers met hoge coherentie die zich eventueel in het gebouw zouden bevinden, bevinden zich dus op een ander gebouw. Er bestaat dus ook geen fysieke relatie tussen het peilmerk en de reflecties. Er zijn ook geen indirecte reflecties in verband te brengen met dit gebouw. Het heeft dus geen nut deze lokatie te gebruiken voor de vergelijking.
Het peilmerk zit wel stevig gefundeerd in het huis. In de directe omgeving van het huis bevindt zich veel water. Dit zou voor een behoorlijke daling van het object kunnen zorgen.

Figuur B.8: Situatie 25B62

Peilmerknummer: 25C3
Lokatie: Kerk te Nieuw-Vennep
Orde peilmerk: 2

De lokatie van het peilmerk is enigszins onduidelijk uit de gegeven positie gecombineerd met de luchtfoto en de lokatie van de scatterers. Uit het veldwerk blijkt dat het object waar het peilmerk zich in bevindt slechts één scatterer met lage coherentie heeft. Door deze lage coherentie is er geen tijdserie beschikbaar voor de permanent scatterer. Ook deze lokatie is dus niet geschikt voor een vergelijking tussen de daling van het peilmerk en de permanent scatterer daling.



Figuur B.9: Situatie 25C3

Peilmerknummer: 25C50
Lokatie: Huis in het noorden van Haarlem
Orde peilmerk: 2

Bij deze lokatie is het van belang om te weten waar het peilmerk zich precies bevindt, aangezien er weinig scatterers zijn. Er is in de directe omgeving van het peilmerk slechts één permanent scatterer met een zodanige coherentie dat er ook een tijdserie beschikbaar is. Deze scatterer is zeer waarschijnlijk wel rechtstreeks afkomstig van het object. Op de hoek van het huis bevindt zich een torentje met een schuin dak. De andere schuine daken op het pand zijn verkeerd georiënteerd ten opzichte van de kijkrichting van de satelliet.

Figuur B.10: Situatie 25C50

Het is niet helemaal uit te sluiten dat het signaal reflecteert via de grond en de muur, maar vermoedelijk is de reflectie afkomstig van het torentje.
Het peilmerk bevindt zich aan de oostkant van het pand. Er is aan de omgeving niets af te leiden over een mogelijke deformatie.

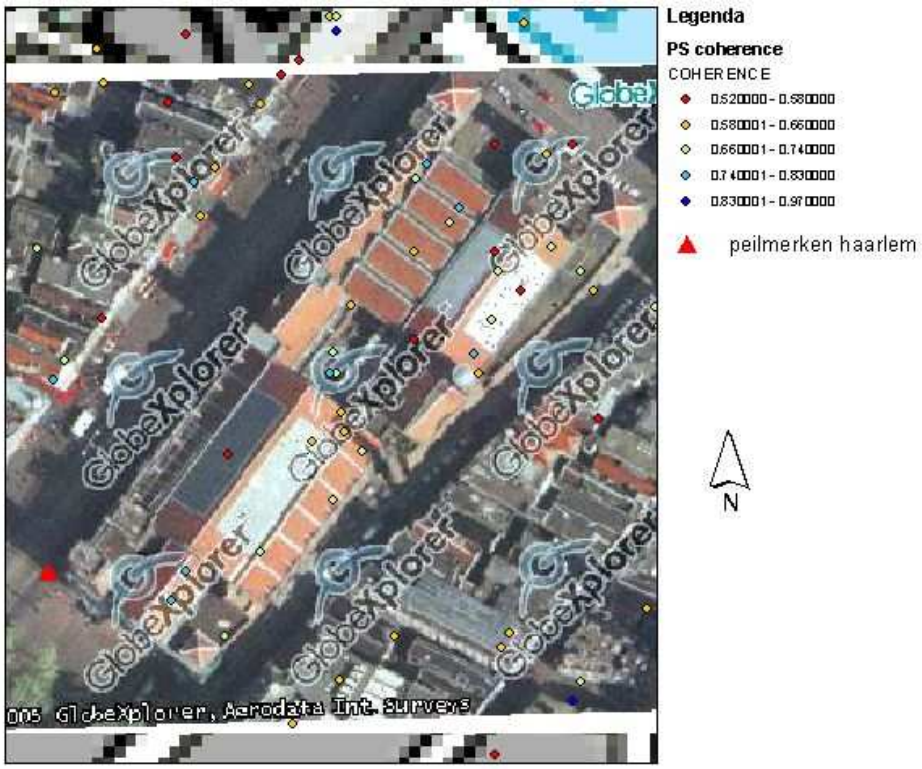
Peilmerknummer: 25D52
Lokatie: Kerk Sloten
Orde peilmerk: 2

Net zoals bij de kerk in Haarlem geldt ook hier dat het dak van de kerk voor een goed reflecterend oppervlak zorgt. De oriëntatie van het dak is niet helemaal perfect, maar door allerlei uitbouwen op het dak (zie figuur B.23 zijn er toch een aantal scatterers mogelijk. De scatterers hebben een hoge coherentie, wat tot een betrouwbaardere analyse leidt.
Het peilmerk bevindt zich naast de ingang van de kerk. Een goede vergelijking van de twee verschillende meetmethoden is dus mogelijk, want ze beschrijven allebei de daling van hetzelfde object.
De bestrating rondom de kerk verraadt lichte bewegingen van de grond.

Figuur B.11: Situatie 25D52

Peilmerknummer: 25E3
Lokatie: Beurs van Berlage, Amsterdam
Orde peilmerk: 2

De Beurs zorgt voor een groot aantal scatterers. Er zijn veel objecten op het dak die voor reflecties zorgen. Dit blijkt onder andere uit de luchtfoto. Uit de combinatie van de luchtfoto en de geschatte lokatie van de scatterers blijkt wederom dat schuine daken in de richting van de satelliet voor een goede reflectie zorgen. Van de meeste scatterers is wel met zekerheid te zeggen dat ze van het gebouw afkomstig zijn. De precieze afkomst van een reflectie is echter moeilijk aan te wijzen. De rode scatterer op de westkant van het grote schuine dak is duidelijk verkeerd gelokaliseerd. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de satelliet een reflectie ontvangt vanaf dat deel van het dak.
Het peilmerk bevindt zich aan de westelijke hoek van het gebouw, naast de toren. De bestrating rondom het peilmerk verraadt wel enige beweging in de grond.



Figuur B.12: Situatie 25E3

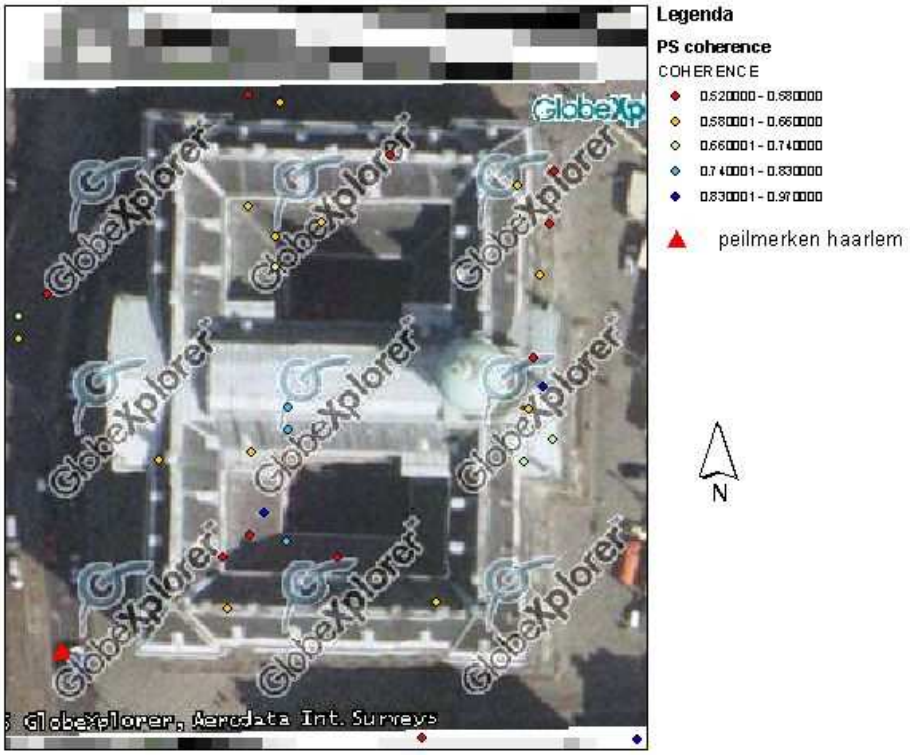
Peilmerknummer: 25E76
Lokatie: Kerk Nieuwendammerdijk te Amsterdam
Orde peilmerk: 2

De dak van deze kerk beschikt, zoals blijkt uit de luchtfoto, een ideale oriëntatie om als reflecterend oppervlak te dienen. Een aantal scatterers met hoge coherentie lijken van dit deel van het dak te reflecteren. Op het westelijke deel van het dak worden ook een aantal scatterers gelokaliseerd. Dit zou ook weer onmogelijk zijn, gezien de vlieg- en kijkrichting van de satelliet. Waar deze reflecties dan wel vandaag komen is onduidelijk.
Het peilmerk bevindt zich naast de ingang van de kerk. In de gehele straat zijn duidelijke gevolgen van grondbewegingen waarneembaar. Delen van de straat zijn verzakt, bestrating ligt scheef. Ook voor de kerk lijken de gevolgen van deformatie waarneembaar. De grond toont een aardig hoogteverschil. Dit kan als gevolg van de beweging van de bodem zijn, maar het is ook mogelijk dat het zo aangelegd is.

Figuur B.13: Situatie 25E76

Peilmerknummer: 25G143
Lokatie: Paleis op de Dam
Orde peilmerk: 2

Het Paleis op de Dam zorgt met zijn schuine daken ook voor een groot aantal reflecties. De oriëntatie van het gebouw is zodanig dat de lange schuine daken loodrecht op de kijkrichting van de satelliet staan. Dit zorgt voor goede reflecties. Of deze rechtstreeks van dit dak afkomstig zijn is moeilijk te zeggen. Indirecte reflecties via de voorgevel behoren ook tot de mogelijkheid, evenals reflecties vanaf de versiering of torentje. Een aantal scatterers lijken ook afkomstig te zijn vanaf de binnenplaats. Of hier iets is dat rechtstreeks reflecteert, of dat het signaal reflecteert via de gevel en de grond is niet duidelijk.
Het peilmerk zit stevig verankerd in het gebouw. De bestrating van rondom het paleis toont wel tekenen van bewegingen. Dit is rondom het hele gebouw zo. Dit zou invloed hebben op de deformatie die gemeten wordt door indirecte reflecties. Op de directe reflecties heeft dit geen invloed. Het gebouw zal goed gefundeerd zijn. Alleen bewegingen van de diepe ondergrond zullen dan invloed hebben op de hoogte van het gebouw.



Figuur B.14: Situatie 25G143

Peilmerknummer: 25G252
Lokatie: Brug over de Weespertrekvaart, Diemen
Orde peilmerk: 2

Op deze lokatie is de afkomst van de reflectie moeilijk te bepalen. Het heeft er, gezien de werkzaamheden, alle schijn van dat de situatie ter plekke inmiddels is veranderd. De scatterers zouden afkomstig kunnen zijn van de stalen brugconstructie, zoals de brugleuning. Wellicht dat er ook nog een reflectie mogelijk is via de brug en de grond. De drie scatterers hebben wel een hoge coherentie, dus er is wel iets dat goed reflecteert.
Het peilmerk is niet gevonden. Er kan dus niets gezegd worden over de staat van het peilmerk, of hoe deze gefundeerd zit in het object. Het peilmerk zou in de trap naast de brugleuning moeten zitten, maar daar is hij niet gevonden. Er vanuit gaande dat de scatterers direct van de brug afkomstig zijn bevindt het peilmerk zich in hetzelfde object als de scatterers.
Er is uit de omgeving geen informatie af te leiden over eventuele grondbewegingen.

Figuur B.15: Situatie 25G252

Referentiepunt
Beschrijving: Dak tuincentrum Osdorp.

In het InSAR-beeld moet een referentiepunt gekozen worden om de deformaties van de permanent scatterers te kunnen bepalen. Deze deformatie is dan relatief ten opzichte van het referentiepunt. De permanent scatterer die hier dient als referentiepunt ligt op het dak van een tuincentrum in Amsterdam-Osdorp. Helaas is dit gebouw een aantal jaren geleden gesloopt. Er is dus weinig bekend over de fysieke staat van het gebouw, waar de referentiescatterer precies vandaan kan komen. Wel is het duidelijk dat het gebied gevoelig is voor grondbewegingen. Er is veel water in de omgeving, waardoor het grondwater veel invloed heeft op bewegingen in de grond.

Bijlage 3: Foto’s veldwerk

Figuur B.16: De lichtbunker op de pier in IJmuiden, 24F17.

Figuur B.17: Peilmerk 24H9. Op de achtergrond is nog net het achterliggende pand te zien alsmede een stukje van het terras dat zich achter het huis bevindt.

Figuur B.18: Midden in de foto is het gebouw te zien dat achter het huis met het peilmerk ligt. Rechts is nog net het huis zelf te zien. Vooral het hoogteverschil tussen het huis en het gebouw is opvallend.

Figuur B.19: Hier bij de St. Bavo kerk te Haarlem is het vrijwel onmogelijk om de afkomst van de satellietreflectie aan te wijzen.

Figuur B.20: Het gebouw waar peilmerk 25A43 in gesitueerd is. Vooral het dak zal voor reflecties zorgen.

Figuur B.21: De zijkant van het gebouw waar het peilmerk 25A176 zich in bevindt. De satelliet kijkt tegen de andere kant van dit gebouw aan, maar de vormgeving is daar hetzelfde. Het is onduidelijk waar de reflecties vandaan komen.

Figuur B.22: Dit is de situatie bij 25B62. Het peilmerk zit in de voorgevel van dit huis. De reflecties komen vermoedelijk van het gebouw dat achter dit huis ligt.

Figuur B.23: De satelliet kijkt ongeveer tegen dit dak aan. Het lijkt ideaal voor goede reflecties te zijn.

Figuur B.24: De Beurs van Berlage in Amsterdam.

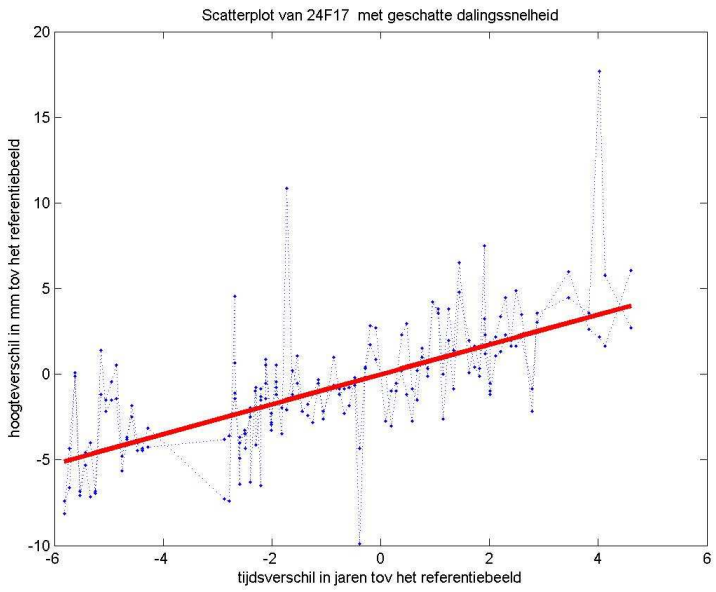
Figuur B.25: Duidelijke verzakkingen bij 25E76. Het peilmerk zit rechts boven de rand in de muur.

Figuur B.26: De satelliet kijkt tegen deze kant van het paleis aan. Er zijn veel mogelijkheden voor een reflectie op het dak.

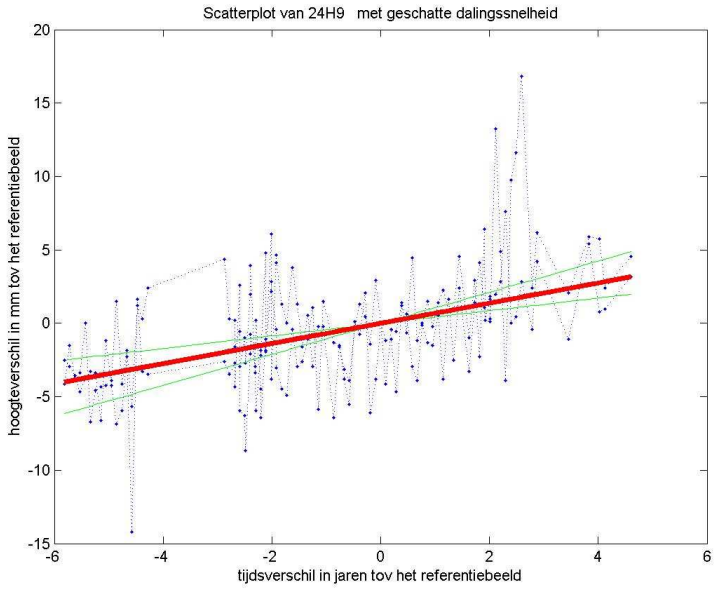
Figuur B.27: Het peilmerk zou links in de brug moeten zitten, naast de trap. Waar het peilmerk zich werkelijk bevindt bleek onduidelijk. De afkomst van radarreflecties is ook moeilijk te beoordelen.

Figuur B.28: De lokatie waar het tuincentrum zich bevond (links van de boom in de foto). De referentiescatterer was gelokaliseerd op het dak van het tuincentrum.

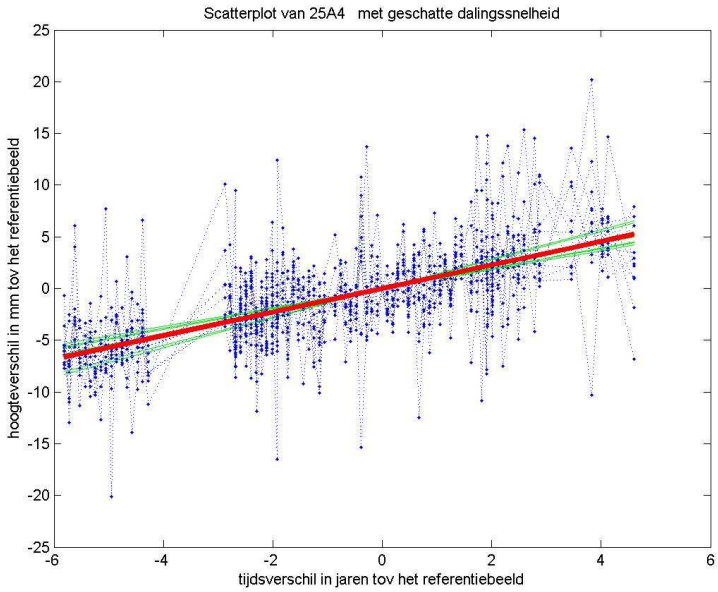
Bijlage 4: Scatterplots permanent scatterer deformatie en histogrammen w-toets



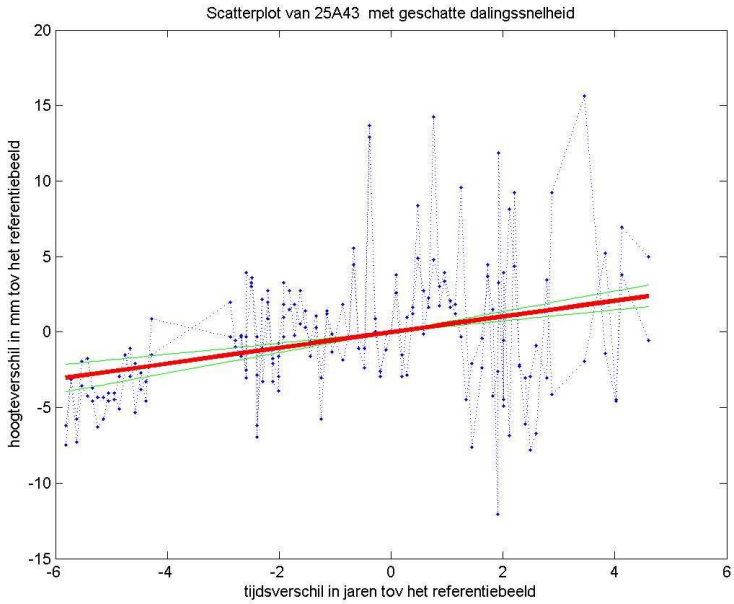
Figuur B.29: Scatterplot 24F17



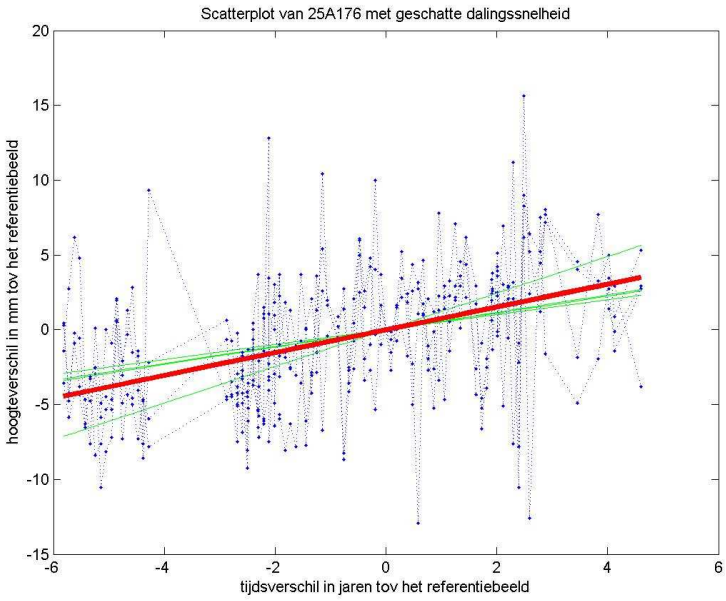
Figuur B.30: Scatterplot 24H9



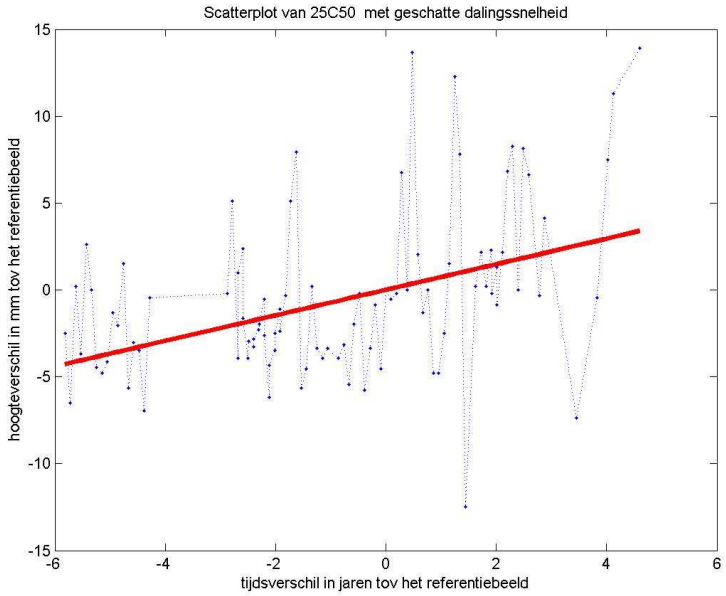
Figuur B.31: Scatterplot 25A4



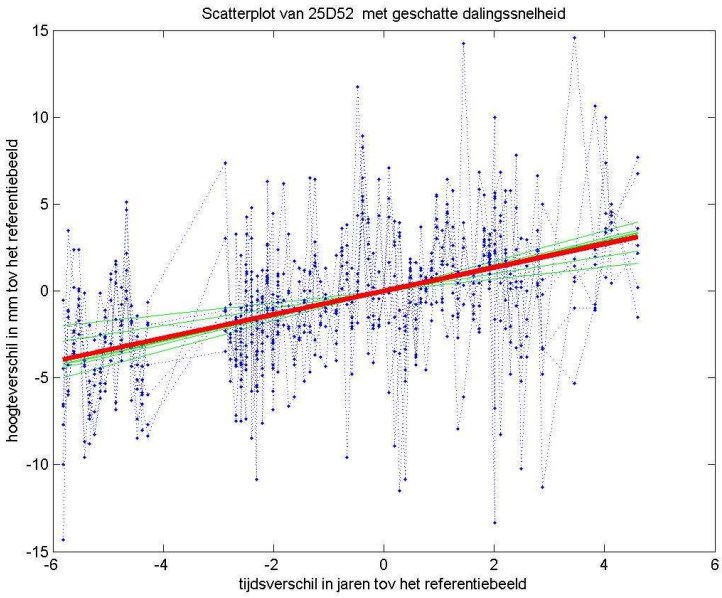
Figuur B.32: Scatterplot 25A43



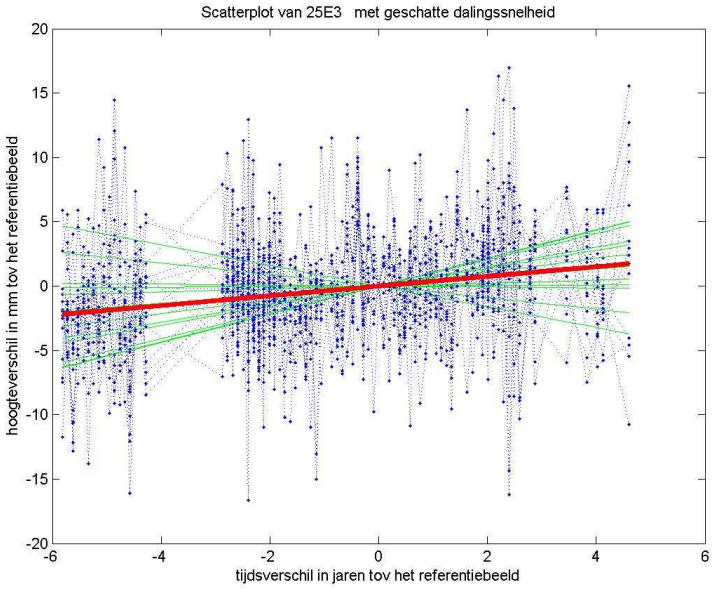
Figuur B.33: Scatterplot 25A176



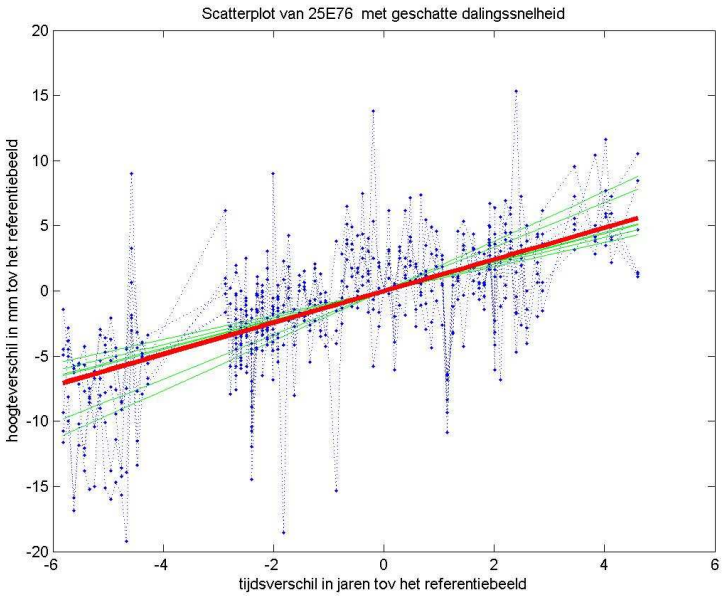
Figuur B.34: Scatterplot 25C50



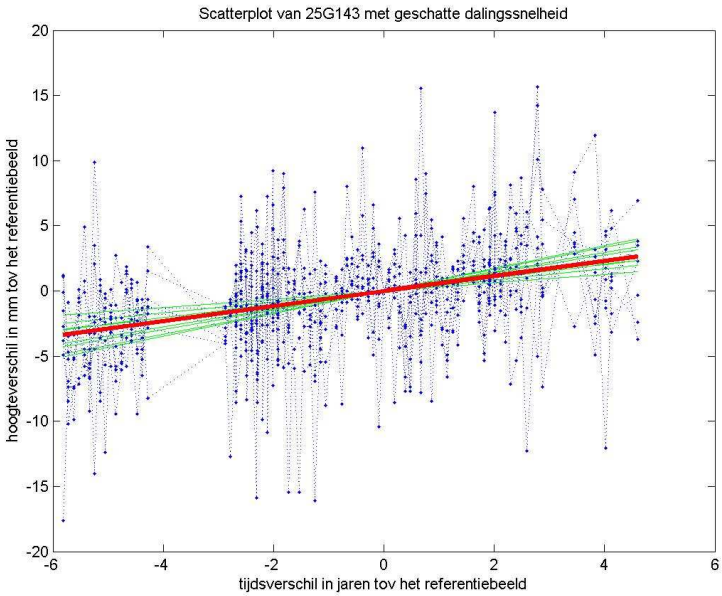
Figuur B.35: Scatterplot 25D52



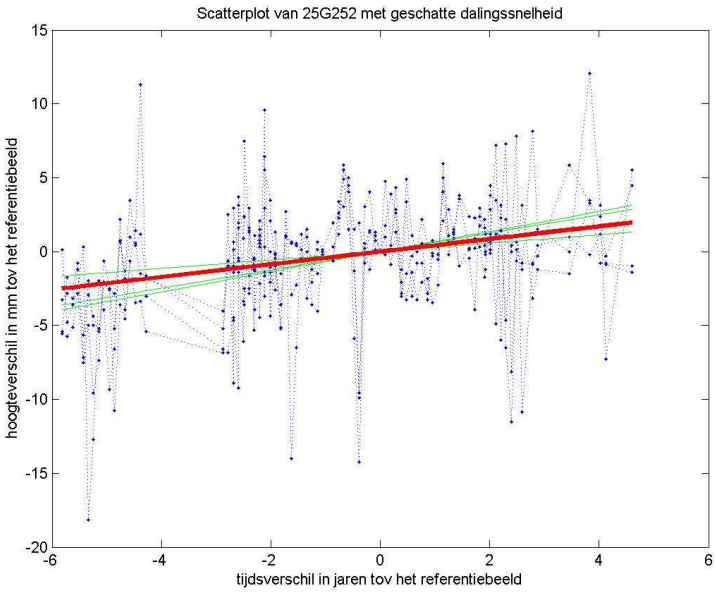
Figuur B.36: Scatterplot 25E3



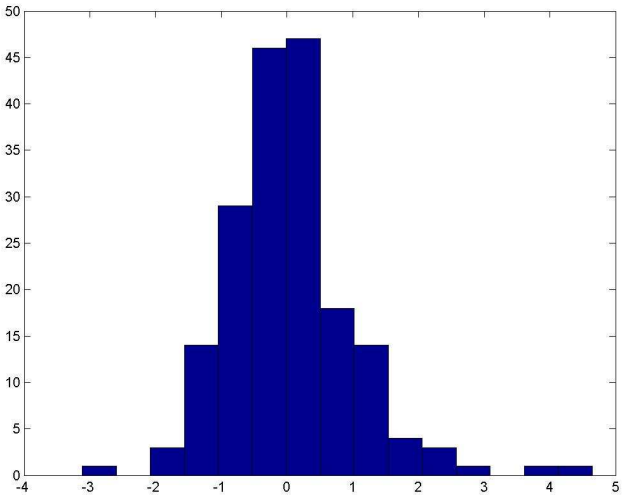
Figuur B.37: Scatterplot 25E76



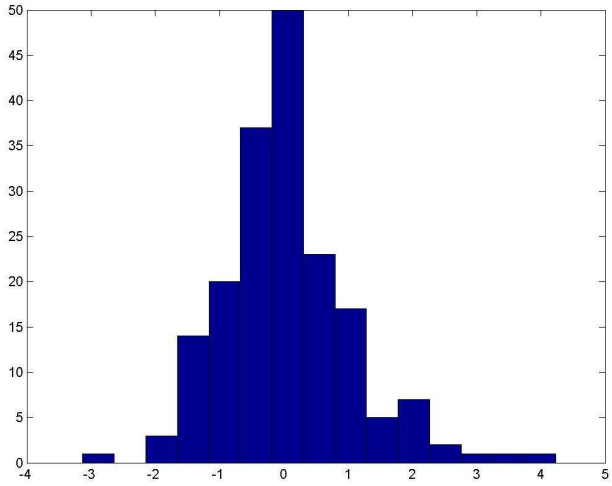
Figuur B.38: Scatterplot 25G143



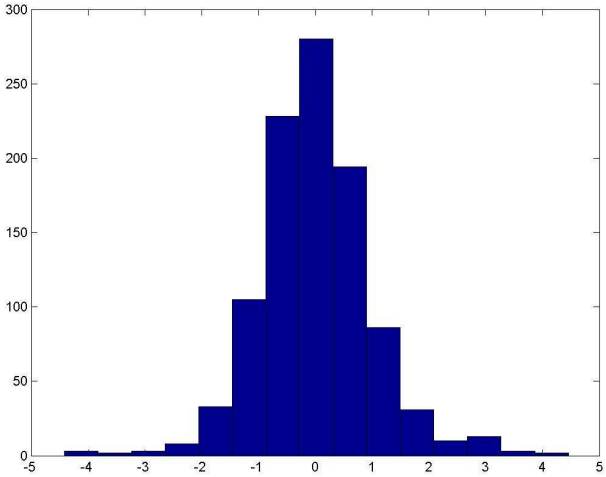
Figuur B.39: Scatterplot 25G252



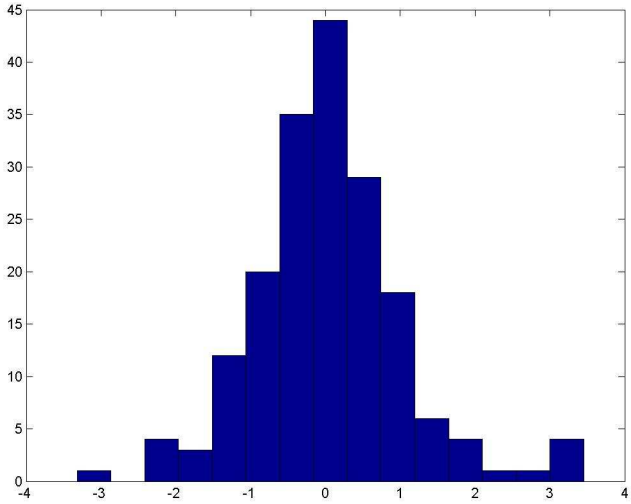
Figuur B.40: Histogram w-toets 24F17



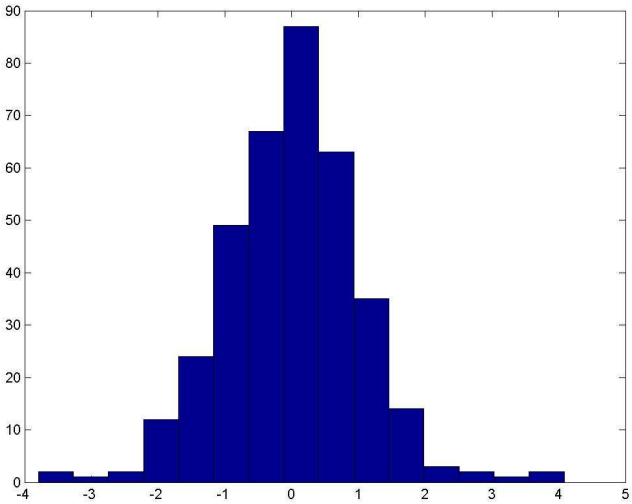
Figuur B.41: Histogram w-toets 24H9



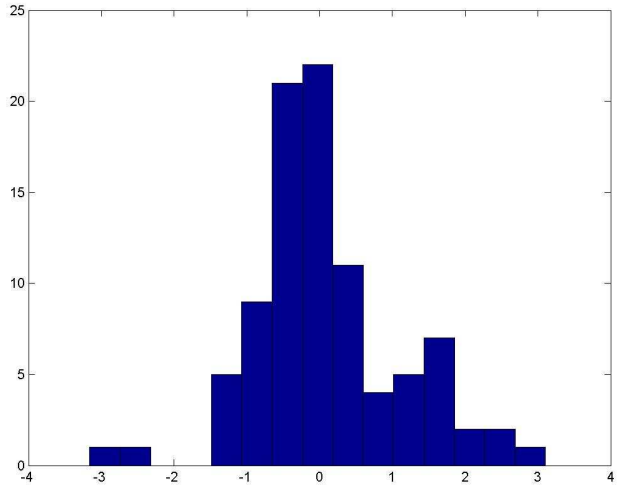
Figuur B.42: Histogram w-toets 25A4



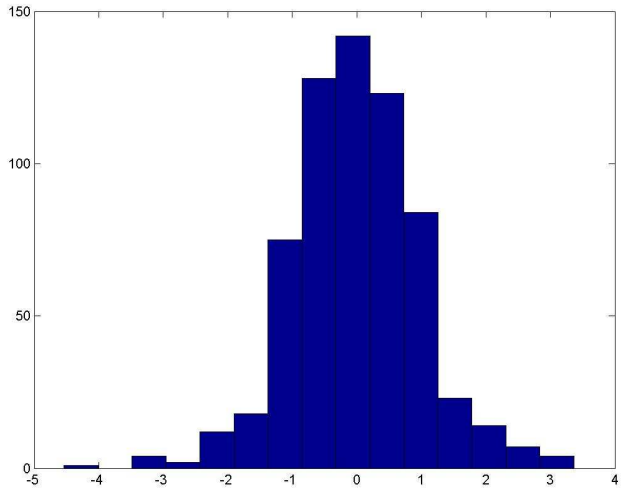
Figuur B.43: Histogram w-toets 25A43



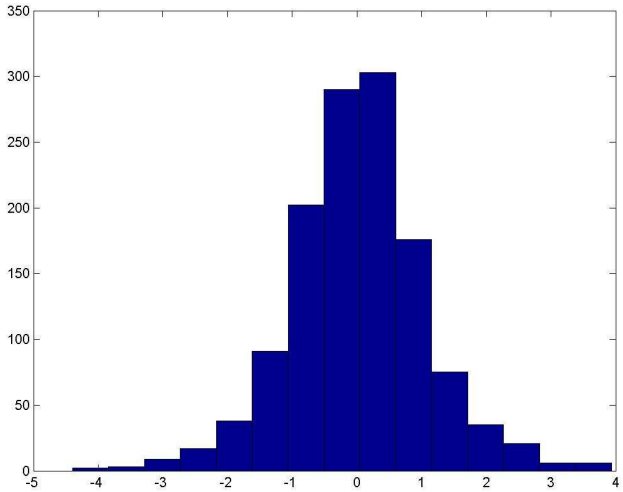
Figuur B.44: Histogram w-toets 25A176



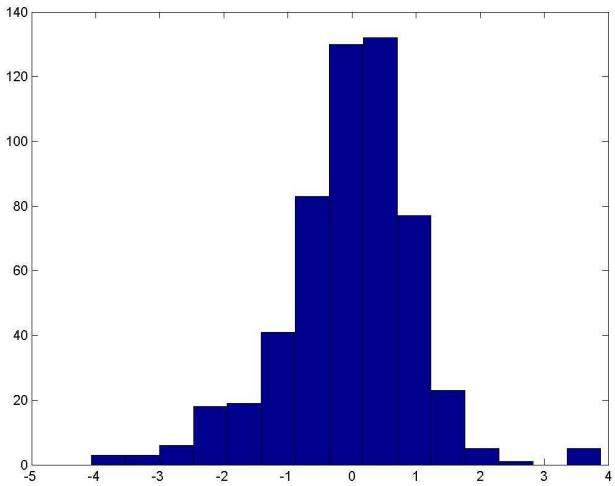
Figuur B.45: Histogram w-toets 25C50



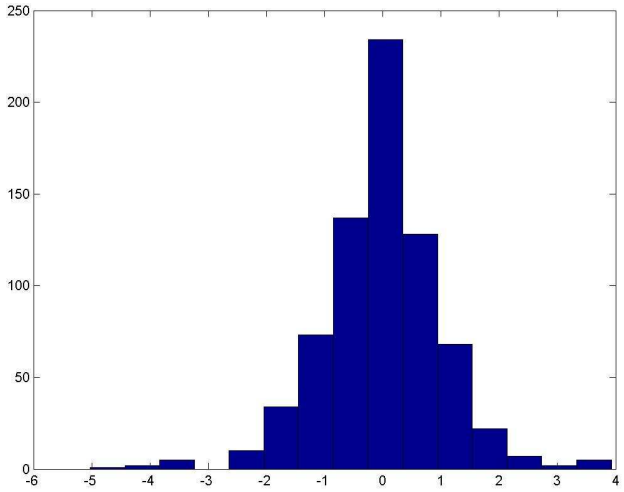
Figuur B.46: Histogram w-toets 25D52



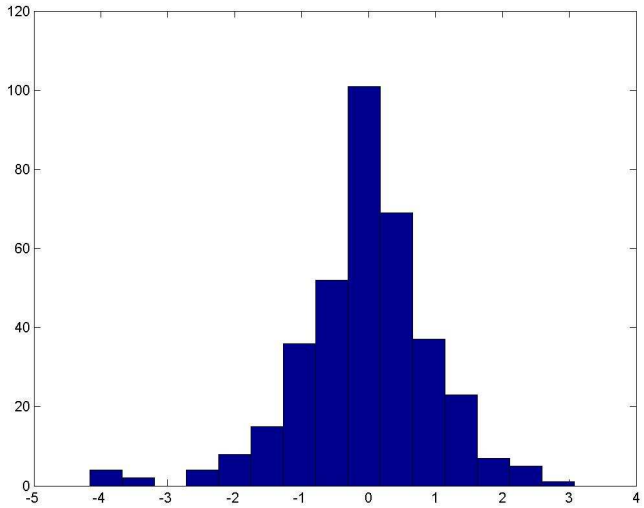
Figuur B.47: Histogram w-toets 25E3



Figuur B.48: Histogram w-toets 25E76

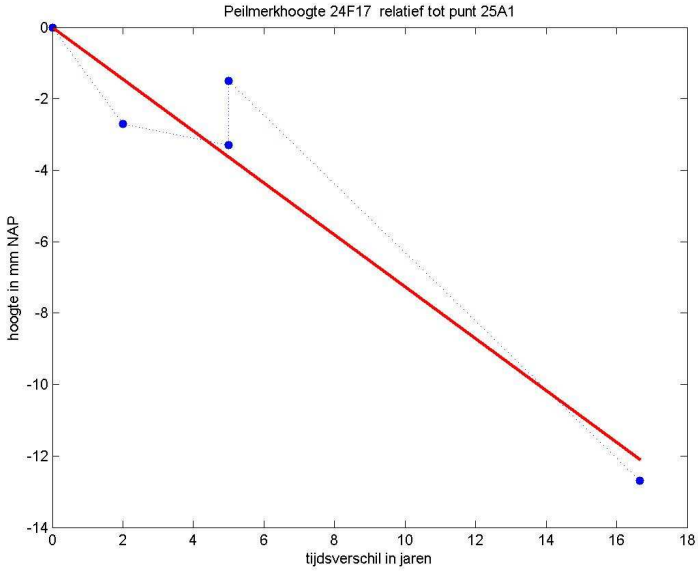


Figuur B.49: Histogram w-toets 25G143

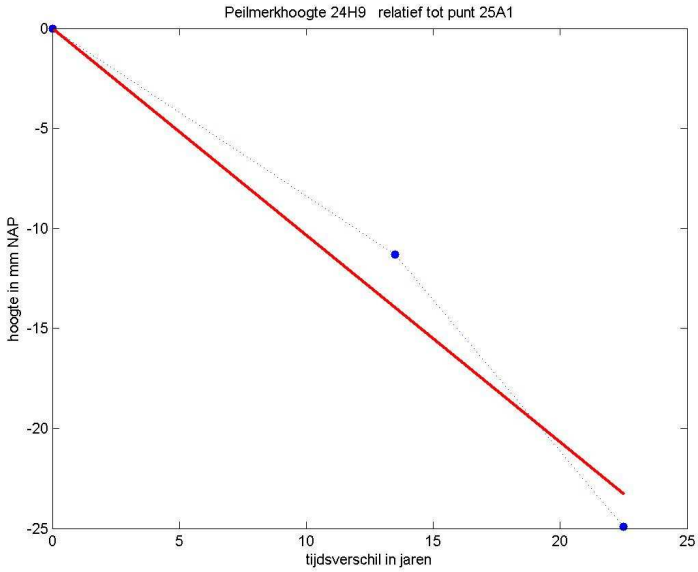


Figuur B.50: Histogram w-toets 25G252

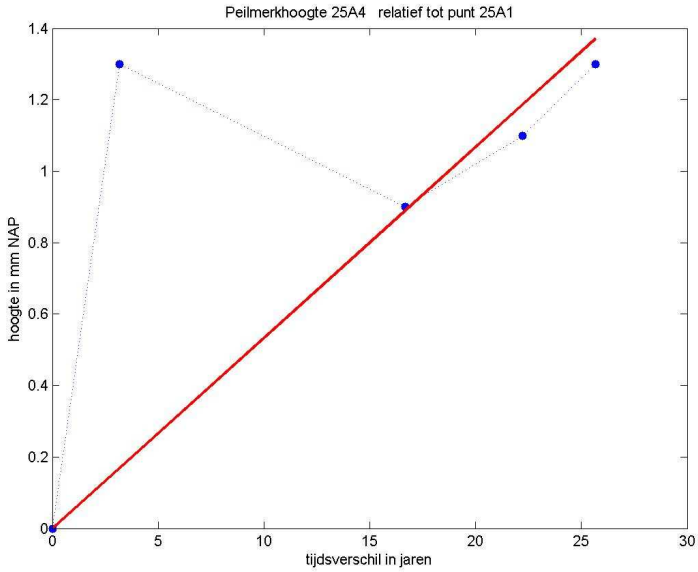
Bijlage 5: Scatterplots hoogteverschillen peilmerken



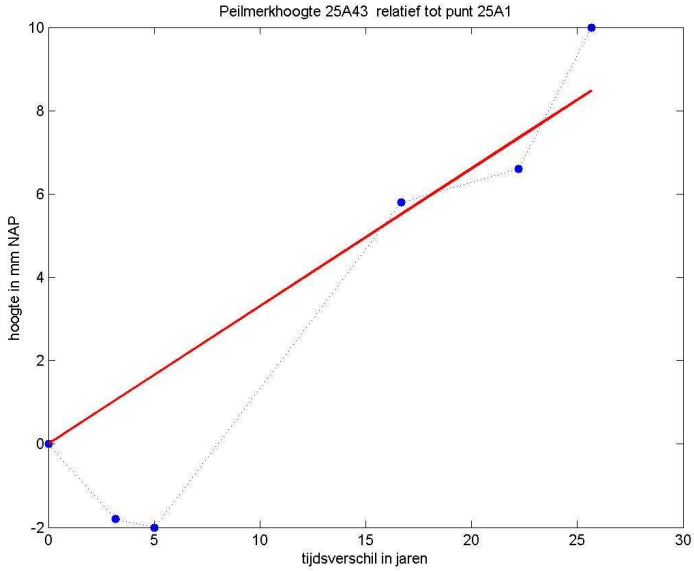
Figuur B.51: Scatterplot 24F17



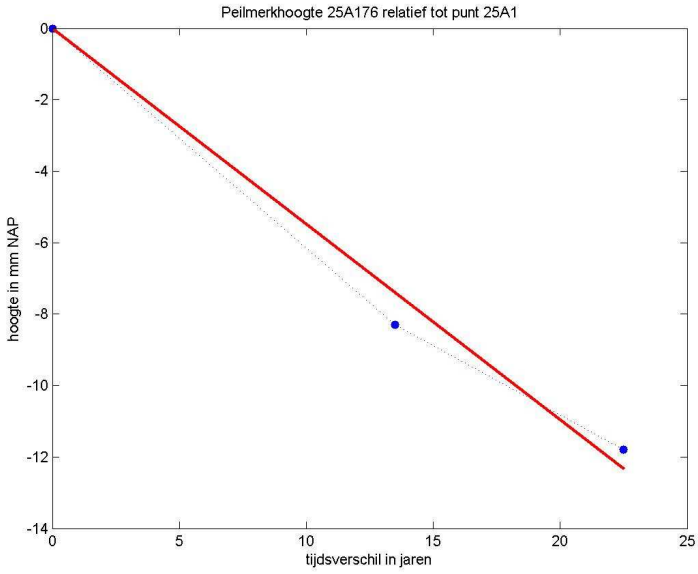
Figuur B.52: Scatterplot 24H9



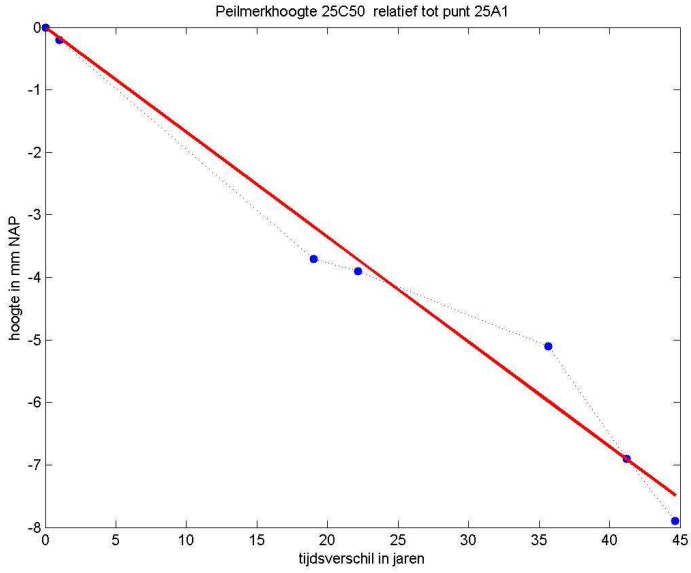
Figuur B.53: Scatterplot 25A4



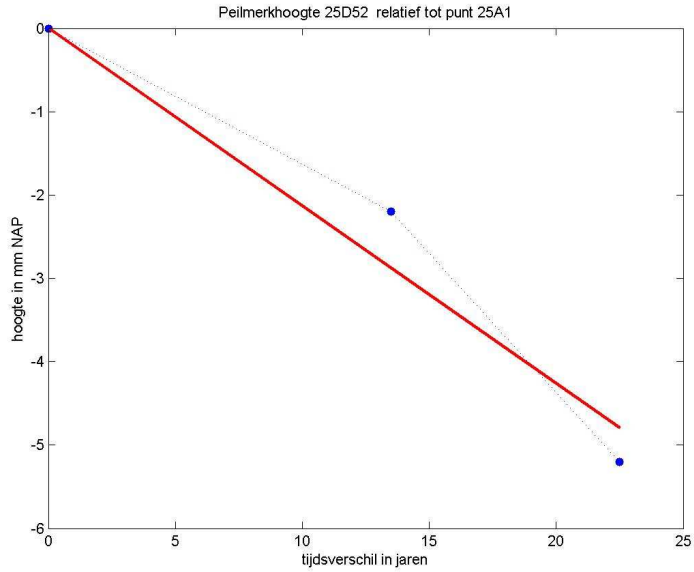
Figuur B.54: Scatterplot 25A43



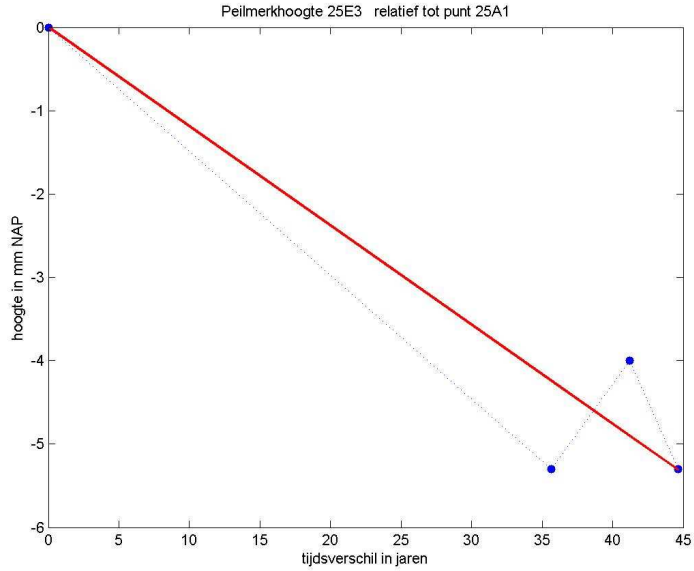
Figuur B.55: Scatterplot 25A176



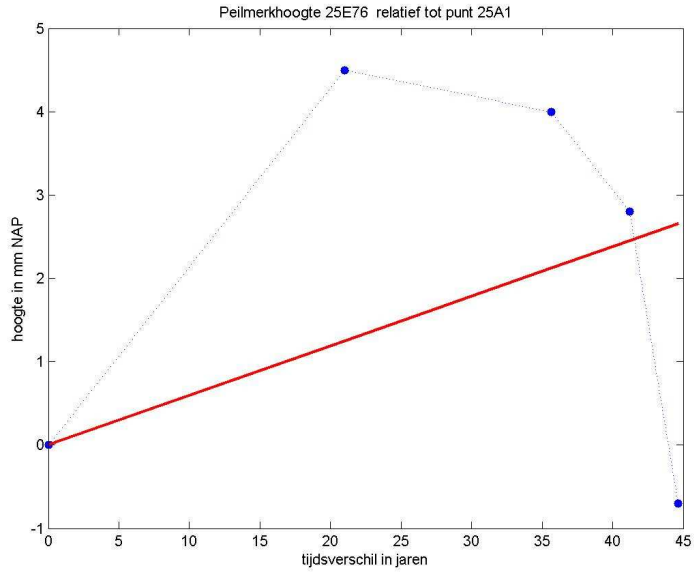
Figuur B.56: Scatterplot 25C50



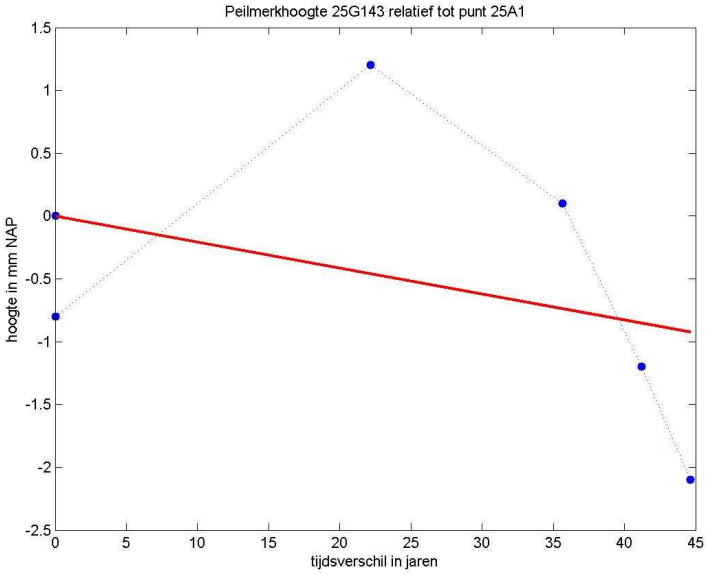
Figuur B.57: Scatterplot 25D52



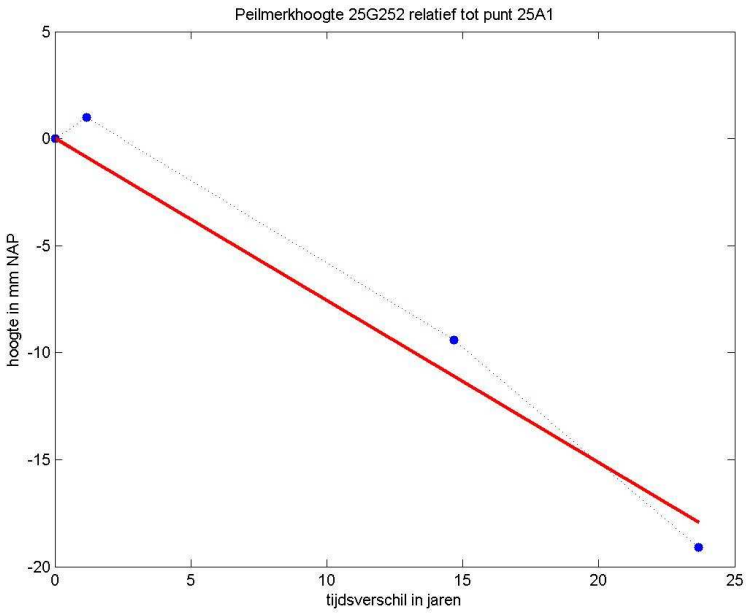
Figuur B.58: Scatterplot 25E3



Figuur B.59: Scatterplot 25E76

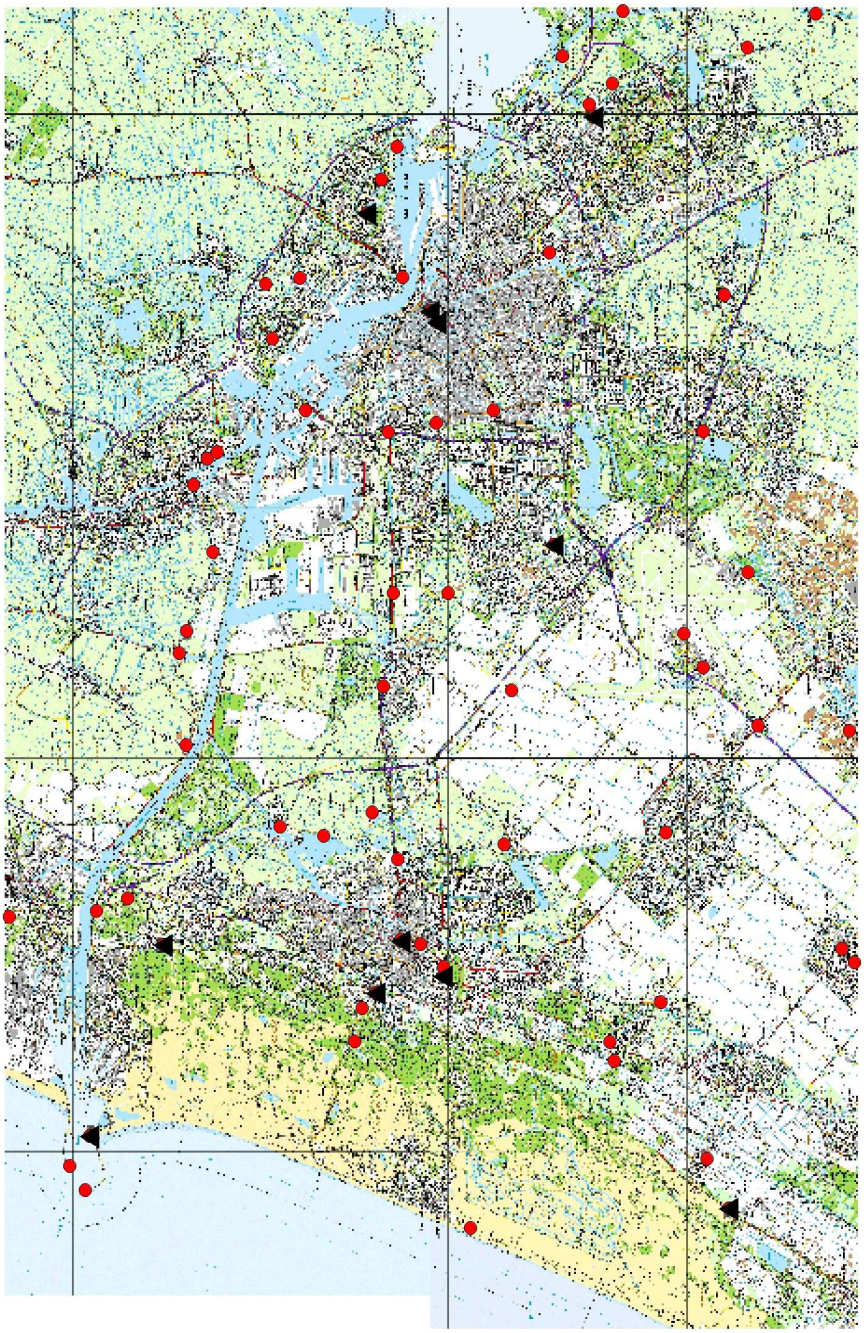


Figuur B.60: Scatterplot 25G143



Figuur B.61: Scatterplot 25G252

Bijlage 6: Overzicht geselecteerde peilmerken



● = *peilmerk*

▲ = *geselecteerd peilmerk*

Figuur B.62: Overzicht peilmerken

Bijlage 7: Beschrijving peilmerken

PEILMERKEN VAN HET NAP TIENDE UITGAVE

MEETKUNDIGE DIENST
VAN DE RIJKSWATERSTAAT

DATUM LAATSTE HERZIENING
DATUM VAN UITGIFTE 20041013

PEIL-MERK-NUM-MER	TOP.KRT KOORDINATEN IN KM X	Y	KORTE BESCHRIJVING	WS	MUURVLAK-KOORD IN CM X	Y	MERK	JAAR VAN ME-TING	ORDE	STAB	HOOGTE T.O.V. NAP IN M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24F17	98.44	497.50	LICHTBUNKER OP OUDE GED. Z-PIER	Z	17	47	0	1997	2		4.514
24H09	96.40	478.76	HS ZILKER DUINW 22	NW	20	48	0	2000	2	3	3.756
24A01	103.80	487.80	HS KAMPERSINGEL 1	N	-26	63	0	2000	2	1	1.737
25A04	103.88	488.39	ST.BAVOKERK LEPELST, STEUNB.L.V.INGANG	W	115	48	0	2000	2	1	2.259
25A43	103.78	495.36	SOC.MED.DIENST (VM MISSIEHS) DRIEHUIZER-KERKWG 123 R.V.INGANG	W	286	66	0	2000	2	A	6.040
25A176	102.42	489.12	KNT PWS SCHOONZICHTLN GELIJK MET BV-KANT BET.RAND	Z	36	95	1	2000	2	2	1.735
25B62	112.56	494.66	BDR 'JOHANNAHOEVE' VELDWEG 287	N	-391	305	0	2000	2	1	0.748
25C03	103.66	475.44	HK VENNEPERW HOEK HOOFDW, R.V.INGANG	ZW	-360	92	0	2000	2	3	-2.536
25C50	102.90	487.14	HS BOSCH EN VAARTST 1 HOEK WAGENWEG	ZO	-77	53	0	2000	2	1	2.154
25D52	114.97	483.90	TOREN RKK SLOTERW SLOTEN:1186	ZW	-98	71	0	2000	2	1	0.149
25E03	121.50	487.53	TOREN BEURSGB DAMRAK 62A	NW	-250	85	7	2000	2	1	2.173
25E76	124.23	489.38	STEUNBEER TOREN RKK NIEUWENDAMMERDK 227	ZW	-32	100	0	2000	2	2	3.070
25G143	121.19	487.33	KON.PALEIS N.Z. VOORBURGWAL, INSPR.GED.	W	-116	105	7	2000	2	1	3.115
25G252	126.94	482.72	Z-LANDHFD O-VL. BR O/D WEESPERTREKVAART, BR-LEUNING NAAST TRAP	Z	-16	-50	4	2000	2	3	5.568

Bijlage 8: Beschrijving bedrijfsstructuur TNO-NITG

TNO in het algemeen
TNO is een kennisorganisatie voor bedrijven, overheden en maatschappelijke organisaties. Het is bij wet opgericht in 1932 om onderzoek toepasbaar te maken voor bedrijven en overheden. Het vervult een aantal taken van maatschappelijk belang en ontvangt overheidsfinanciering om te kunnen investeren in kennis en bij te dragen aan de oplossing van maatschappelijke problemen. Het is echter geen overheidsbedrijf, maar wel nauw verbonden met het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap. Het onderzoek heeft vooral betrekking op defensieonderzoek en beheer en beschikbaar stellen van geografische informatie.

TNO is onderverdeeld in vijf kerngebieden, te weten:
– TNO Kwaliteit van Leven;
– TNO Defensie en Veiligheid;
– TNO Industrie en Techniek;
– TNO Bouw en Ondergrond; en
– TNO Informatie- en Communicatietechnologie.

De kerngebieden zijn verdeeld over 15 instituten. Het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO is hier één van, en valt voornamelijk onder het kerngebied Bouw en Ondergrond.

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO

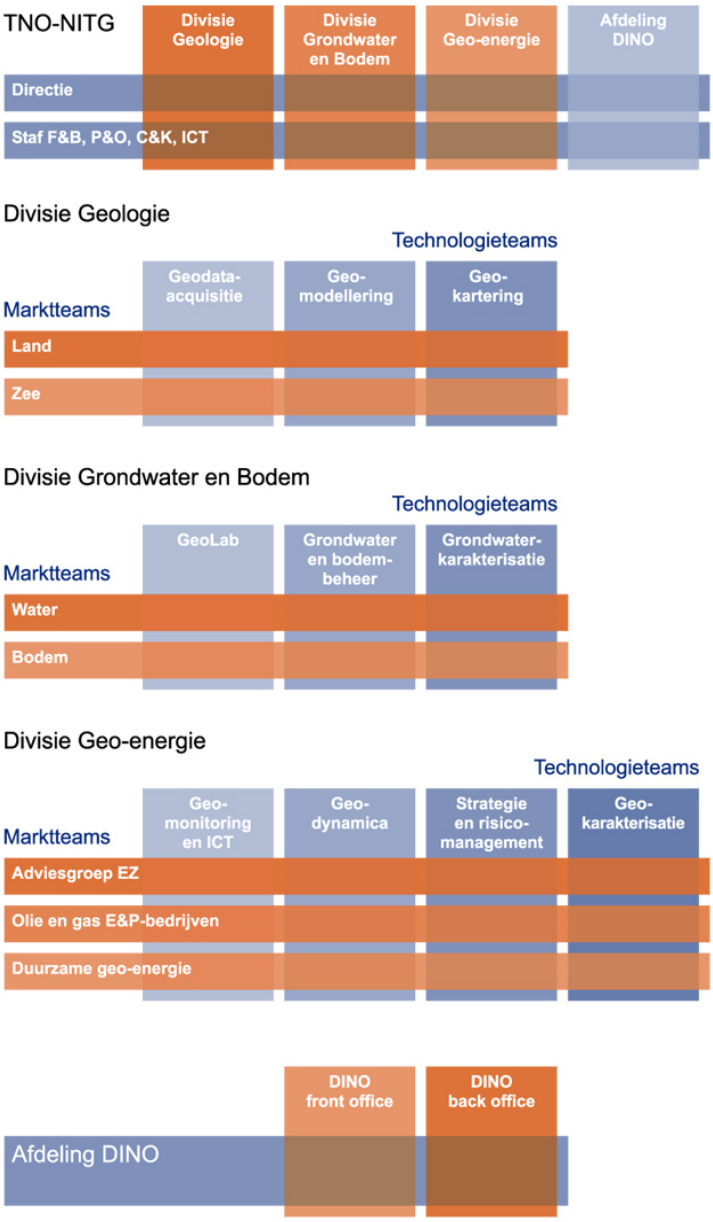
"Het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO is het centrale geowetenschappelijke informatie- en onderzoeksinstituut van Nederland, ten behoeve van het duurzaam beheer en gebruik van de ondergrond en de ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen."

Het is in 1997 ontstaan uit de Rijks Geologische Dienst en het instituut TNO Grondwater en Geo-Energie. NITG levert geowetenschappelijke kennis, data en informatie aan bedrijven, overheden en particulieren. Het moet het landelijk centrale instituut op het gebied van geowetenschappelijke kennis en informatie zijn en een onafhankelijk, objectief en gezaghebbend oordeel kunnen geven over geowetenschappelijke aspecten van het beheer van de Nederlandse ondergrond.
Op Europees vlak maakt het deel uit van EuroGeoSurveys.

De Raad voor het Nederlandse Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO geeft NITG advies en zorgt voor handhaving van het opgestelde beleid.

De stage vindt plaats bij de divisie Geologie. Deze divisie is onderverdeeld in drie technologieën: Geodata-aquisitie, Geomodellering en Geokartering. Geodata-aquisitie houdt zich bezig met het ontwikkelen en toepassen van (geofysische) opnametechnieken en bemonstering t.b.v. karakterisering van de ondergrond. Geomodellering heeft betrekking

op het analyseren en modelleren van fysische aspecten van geosystemen voor (ingenieurs)geologie en voor een duurzame ruimtelijke inrichting. Geokartering tenslotte bestudeert de ruimtelijke interpretatie van data en informatie betreffende de ondiepe ondergrond en de analyse van geobiologische systemen ten behoeve van datering, paleomileu- en klimaatonderzoek. Aan het hoofd van elke divisie staat het divisiehoofd. Elke afdeling heeft zijn eigen afdelingshoofd.



Figuur B.63: Organogram TNO-NITG.

Bijlage 9: Evaluatie stage

Het 4e kwartaal van het derde studiejaar is besteed aan de bachelorstage. Deze vond plaats bij TNO-NITG in Utrecht. Het doel van de stage was vooral om mee te draaien in een geodetisch project en een beeld krijgen van de geodetische bedrijfswereld. Over het geodetisch project wordt genoeg gezegd in de rest van dit stageverslag. Deze bijlage gaat in de evaluatie van de stage en mijn bevindingen.

Om te beginnen een evaluatie van het onderzoek. Het grote probleem, en wellicht de grootste uitdaging, was de voorkennis over het onderwerp. In de Bachelor van de Geodesieopleiding word nog weinig bijgebracht over InSAR, laat staan Permanent Scatterer InSAR. Alle kennis hierover moest zelfstandig vergaard worden. Bij TNO-NITG zijn weinig werknemers bezig met deze techniek. Veel zelfstudie heeft plaatsgevonden aan de hand van boeken en papers. Ook de begeleidster vanuit de opleiding heeft een grote rol gespeeld bij het opkrikken van de kennis op dit gebied.
De rol van een geodeet in dit project draait vooral om de kwaliteitscontrole van de berekening en het combineren van data uit verschillende meettechnieken. Dit zal binnen een organisatie als TNO-NITG ook wel het geval blijven. Binnen de afdeling waar de stage plaats vond gaat de aandacht vooral uit naar geologische kennis. Een geodeet is daar een vreemde eend in de bijt. Toch komen delen van de geodesie in veel disciplines terug, zeker nu Geografische Informatie Systemen een grote rol in het bedrijfsleven gaan spelen. In sommige situaties wordt het duidelijk dat je als geodeet breed opgeleid wordt. Zodoende kun je als geodeet veel kanten op na de opleiding.

Een punt waar ik persoonlijk tevreden over ben is het navolgen van het stageplan. Dit plan is aan het begin opgesteld. De punten die erin genoemd werden zijn vrijwel allemaal uitgevoerd. De tijdsplanning die toentertijd gemaakt is, is goed gevolgd. Geluk hierbij is wel dat sommige onderdelen sneller gingen en daardoor bleef meer tijd over voor andere onderdelen, die ook meer tijd bleken te vergen.

Een grote uitdaging van de stage was de communicatie. Het bleek soms moeilijk de geodetische kennis over te brengen op collega’s met een andere achtergrond. Ook de communicatie met externe partijen was interessant, zoals het proberen te verkrijgen van satellietbeelden.

De indruk van de stage is positief. Het was een interessante opdracht, die mijn inziens deelgebieden uit de geodesie wist te combineren. Het was zeker interessant om te zien hoe geodesie ook in andere disciplines een rol speelt!