

Bodembeweging langs de kust: “Wat kun je meten?”

**Notitie over de mogelijkheden en beperkingen van
waterpassen, GPS en radar interferometrie voor het meten
van bodemdaling langs de kust.**

**Rien Kremers
Hans van der Marel
Ramon Hanssen**

Delft Institute of Earth Observation and Space Systems (DEOS)



Technische Universiteit Delft

Inhoud

1.	Waterpassen.....	5
1.1.	Introductie.....	5
1.2.	Precisie.....	5
1.3.	Betrouwbaarheid	6
1.4.	Opmerkingen ivm schatting bodembeweging.....	6
1.4.1.	Nulmeting	7
1.4.2.	Stabiliteit aansluitingspunten.....	7
1.5.	Ontwikkelingen.....	7
1.5.1.	Instrumentarium.....	8
1.5.2.	Meetprotocol	8
1.5.3.	Combinatie waterpassen met GPS en zwaartekrachtmetingen.....	8
2.	Global Navigation Satellite Systemen (GNSS).....	9
2.1.	Introductie.....	9
2.2.	Meetprincipe	10
2.2.1.	Korte basislijnen en lokale netwerken.....	11
2.2.2.	Regionaal netwerk.....	12
2.2.3.	Precise point positioning (PPP)	13
2.3.	Verwachte ontwikkelingen	13
3.	Radar interferometrie (InSAR).....	15
3.1.	Achtergrond	15
3.1.1.	Satelliet- en vliegtuiggedragen radar interferometrie.....	15
3.1.2.	Meetprincipe.....	16
3.1.3.	Wat wordt gemeten?	16
3.1.4.	Unieke eigenschappen	17
3.2.	Validatie.....	18
3.2.1.	Interne validatie.....	18
3.2.2.	Externe validatie	18
3.3.	Relatie tot bodemdalingsdiscussie.....	18
3.3.1.	Scheiding deformatieregimes.....	19
3.3.2.	Detecteerbaarheid.....	19
3.3.3.	Controle van verdachte ondergrondse peilmerken	19
3.4.	Synthese en aanbevelingen.....	20
3.5.	Eerste analyse	20
4.	Literatuur	22

1. Waterpassen

door Rien Kremers

1.1. *Introductie*

Waterpassen is de meest nauwkeurige techniek om hoogteverschillen te bepalen over korte afstanden (enkele tientallen kilometers). Op het eerste gezicht is het een eenvoudige techniek, zeker gezien de huidige elektronische instrumenten met barcode techniek waarbij de meting direct digitaal wordt opgeslagen. Hierdoor worden belangrijke foutenbronnen, zoals aflees- en rekenfouten in het veld, voorkomen.

Er zijn echter nog een groot aantal foutenbronnen te bedenken die het uiteindelijke resultaat kunnen verstoren. Belangrijk voor het eindresultaat zijn ondermeer (grotendeels ontleend aan Lorenz e.a., 1991):

- orde van meting (primair/ secundair/ tertiair);
- meetmethode (optisch/ elektronisch/ hydrostatisch);
- verticale stabiliteit van instrumentarium en peilmerken; temperatuur en ondergrond spelen hierbij een belangrijke rol;
- niet ontdekte waarnemingsfouten;
- correctie voor getijdeneffecten;
- keuze van kans- en functiemodellen;
- netconfiguratie en keuze van referentiepunten;
- ijking van instrumentarium;
- zorgvuldig omgang met en onderhoud van instrumentarium.

Wanneer men echter maatregelen neemt om de gevolgen van bovengenoemde aspecten te beperken dan is waterpassen een zeer goed en nauwkeurig uit te voeren proces, dat ook al sinds lange tijd in methodisch vrijwel ongewijzigde vorm wordt toegepast.

1.2. *Precisie*

De a-priori standaardafwijking voor primaire waterpassingen is 0.64mm per $\sqrt{\text{km}}$. De uiteindelijke standaardafwijking van de 2^e t/m de 4^e NWP (Leusink, 2003) varieert tussen de 0.86 en 1.29mm per $\sqrt{\text{km}}$, afhankelijk van het mathematisch model dat gebruikt wordt (o.a. of peilmerken tussentijds bewegen, hetgeen bij langdurige meetcampagnes het geval is).

Voor de 5^e NWP werd de uiteindelijke vereffening uitgevoerd met een waarde van 0.72mm per $\sqrt{\text{km}}$ voor de optische metingen. Deze waarde is gebaseerd op een variantie schatting uit de waarnemingen. Dit is groter dan de a-priori waarde. Daarmee wordt weer bevestigd dat de precisie van waterpassen bepaald wordt door een complex van foutenbronnen.

Uitgaande van de resultaten van de vereffening van de 5^e nauwkeurigheidswaterpassing is berekend wat de relatieve precisie is van de nieuwe hoogten van de peilmerken (Brand, augustus 2004):

$$\sigma_{\text{rel}} = 2 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm per } \sqrt{\text{km}}$$

Op een afstand van 100 km is dat 4 mm.

1.3. *Betrouwbaarheid*

Een goede, eerste, indicatie voor de betrouwbaarheid en kwaliteit van de metingen zijn de sluitfouten van de waterpaskringen. Voor de 2^e t/m 5^e NWP zijn de maximale kringluitfouten respectievelijk 90.2, 132.5, 53.5 en 16.2 mm. De grote kringluitfouten uit 2^e en 3^e NWP kunnen o.a. veroorzaakt zijn door tussentijdse zakkingen van peilmerken i.v.m. de grote tijdsduur van de meetcampagnes (tot bijna 20 jaar!). De 5^e NWP werd in ongeveer 2 jaar tijd gemeten.

De 5^e NWP heeft een (veel) betere betrouwbaarheid dan de voorafgaande NWP's. Dit komt, naast de veel kortere meetduur, door de combinatie van primaire optische metingen met secundaire optische metingen, hydrostatische metingen, ijswaterpassingen, GPS-metingen en zwaartekrachtmetingen. Hierdoor werden kleine fouten aan het licht gebracht die anders niet zouden zijn ontdekt.

Interne betrouwbaarheid

Bij mathematische toetsing van de waarnemingen zal een fout ter grootte van de zogenaamde grenswaarde met een grote kans (meestal 80%) worden ontdekt. Dit betekent echter ook dat bij toetsing fouten ter grootte van de grenswaarden in 20% van de gevallen niet ontdekt zullen worden! Met alleen de metingen van de 5^e NWP (kringlengte 100-150 km) bedragen de grenswaarden 40 mm. Met toevoeging van metingen van de 2^e en 3^e planperiode (kringlengte circa 16 km) van het secundaire net is dit sterk verbeterd. De gemiddelde grenswaarde is dan ongeveer 12 mm en de grootste ongeveer 25 mm.

Externe betrouwbaarheid

De externe betrouwbaarheid is de invloed van niet ontdekte fouten op het eindresultaat. Er is een kleine, maar zeker niet uitgesloten, kans dat fouten ter grootte van de grenswaarden nog aanwezig blijven en dus een fout veroorzaken in de uiteindelijke hoogten. Om een indruk te krijgen van de externe betrouwbaarheid van het 5^e NWP net zijn simulatieberekeningen uitgevoerd (Brand, augustus 2004) met fouten ter grootte van de grenswaarden. Uit de rekenexperimenten blijkt dat de grootste afwijkingen beperkt blijven tot de punten waarop de fouten zijn gemaakt en dat de afwijkingen in de omgeving vrij klein zijn. Dit komt het sterkst naar voren bij een fout in het centrum van het net. Een fout aan de rand werkt meer door in de omgeving.

1.4. *Opmerkingen i.v.m. schatting bodembeweging*

Om bodemdaling te kunnen schatten zijn meerdere meetcampagnes nodig, bij voorkeur over een langere periode, en stabiele aansluitingspunten.

De precisie van de hoogten aan de randen van het net berekend uit landelijke NWP's is circa 1 cm (alleen bij de 5^e NWP is die aanzienlijk beter, namelijk maximaal 6mm). Dit betekent dat de standaardafwijking van een hoogteverschil aan de randen van het netwerk circa 1.5 cm ($\sqrt{2} \cdot 1$ cm) is. Om een bodemdaling te kunnen onderscheiden van meetruis zal die groter moeten zijn dan circa 2 keer de standaardafwijking van het hoogteverschil, in dit geval dus circa 3 cm.

Tijdseries van metingen gecombineerd met een goede geologische kennis van de ondergrond maken een betere schatting van de bodemdaling mogelijk.

Voor de beoordeling van regionale bodembewegingen is een uitgebreid net van geschikte peilmerken nodig om de bodembeweging te kunnen onderscheiden van incidentele zettingen.

1.4.1. Nulmeting

Voor een goede bodemdalingsanalyse is de kwaliteit van de referentie-epoche (nulmeting) doorslaggevend. De nulmeting moet aan de gestelde eisen (afhankelijk van de doelstelling) van precisie en betrouwbaarheid voldoen en voldoende stabiele referentiepunten bevatten.

Het belang van een goede nulmeting is ook bij de analyse van 5^e NWP naar voren gekomen. De hierna volgende reflectie is ontleend aan (Brand e.a., maart 2004).

Met de nieuwe waterpasdata uit de 5^e NWP is de conclusie bevestigd dat er discrepanties voorkomen in het primaire net van het NAP. Voor de 5^e NWP werd als oorzaak vooral gedacht aan bodembeweging. Op dit moment wordt daarnaast ook rekening gehouden met onnauwkeurigheden van eerdere NWP's (met name de 2^e NWP).

1.4.2. Stabiliteit aansluitingspunten

Ondergrondse merken (OM) zijn veel stabielere dan gewone peilmerken en dus geschikter om kleine bodembewegingen te schatten. Gewone peilmerken zijn onderhevig aan dezelfde invloeden als OM maar daarnaast zijn slechte funderingen en de waterhuishouding ook van invloed.

Uit analyseberekeningen van de 2e t/m 4e NWP's (periode van 60 jaar), blijkt dat zelfs de OM bewegingen vertonen ten opzichte van het gekozen nulvlak. Bij het toetsen bleek dat de beweging van alle OM lineair is; er zijn geen aanwijzingen voor een 'trendbreuk' in de bodembeweging.

Bij de 5e NWP is het nulniveau van het NAP zo goed mogelijk gehandhaafd door aan te sluiten op een cluster van stabiele grondmerken in het gebied Utrechtse Heuvelrug / Veluwe. Door het bijstellen van de hoogte van het basispunt op de Dam in Amsterdam is het historisch bepaalde nulniveau van het NAP zo goed mogelijk gehandhaafd.

1.5. Ontwikkelingen

Uit de 5^e NWP, de meest uitgebreide landelijke meetcampagne tot nu toe, zijn waardevolle ervaringen opgedaan voor toekomstige meetcampagnes. Deze ervaringen zijn mede gebruikt bij het aangeven van ontwikkelingen voor de toekomst die van belang kunnen zijn om de resultaten te verbeteren.

1.5.1. Instrumentarium

Gezien de goede ervaringen met het digitale waterpassen (met barcode baken) verdient dit de voorkeur boven optisch waterpassen.

Uit het kalibreren van waterpasbaken is naar voren gekomen dat baken soms ernstig beschadigd zijn (deuken baakhuis, schaalverdeling beschadigd). Daarom is het van belang om meer aandacht te besteden aan opslag, transport en omgang met apparatuur en aan tussentijdse inspecties.

Bij baken blijft de scheefstand van de baakvoet een zwak punt. Bij controles blijkt dat er regelmatig niet wordt voldaan aan de eisen. Het is wenselijk om daarover te communiceren richting leveranciers.

Het databasesysteem HIS (hoogte informatiesysteem voor NAP-gegevens) kan op grond van de vele ingevoerde meetgegevens extra informatie opleveren over de kwaliteit van de apparatuur en metingen. Dit kan nuttig zijn voor o.a. de analyse van de metingen en voor selectie van apparatuur voor toekomstige meetcampagnes.

1.5.2. Meetprotocol

Het is interessant om verder onderzoek te doen naar het optimale meetprotocol. Het primaire meetprotocol zorgt ervoor dat bepaalde systematische fouten worden geëlimineerd, maar daar staat tegenover dat de metingen langer duren, waardoor andere fouten weer groter worden.

De meetresultaten kunnen worden verbeterd door de tolerantie van de sectietoets scherp te stellen, zodat men gedwongen wordt om zorgvuldig te meten.

1.5.3. Combinatie waterpassen met GPS en zwaartekrachtmetingen

Door het combineren van waterpassen met GPS en zwaartekrachtmetingen wordt het eindresultaat beter. GPS leent zich zeer goed voor het monitoren van hoogteveranderingen. Met zwaartekrachtmetingen is het, in tegenstelling tot waterpassen en GPS, ook mogelijk om hoogteveranderingen in absolute zin te meten.

De hierna volgende reflectie over het gebruik van GPS is ontleend aan (Brand e.a., maart 2004). Met de 5^e NWP is duidelijk geworden dat het met GPS goed mogelijk is om nauwkeurige NAP-hoogten te meten, maar dat op kortere afstanden de nauwkeurigheid van waterpassen niet zal worden gehaald. Op grond van efficiencyoverwegingen is er inmiddels voor gekozen om GPS in te zetten ter vervanging van hydrostatisch waterpassen.

De hierna volgende conclusie over de mogelijkheden van zwaartekrachtmetingen is ontleend aan (Klees e.a., augustus 2004). Herhaalde zwaartekrachtmetingen zijn geschikt om pleistocene bodembewegingen te detecteren. Indien meetpunten, meetopzet en apparatuur zorgvuldig worden geselecteerd kunnen bodembewegingen 0.75 mm/jaar na 25 jaar met een waarschijnlijkheid van 90% worden bepaald mits de metingen elke 2 jaar herhaald worden. De nauwkeurigheid neemt proportioneel toe met de wortel van het aantal meetcampagnes.

2. Global Navigation Satellite Systemen (GNSS)

door Hans van der Marel

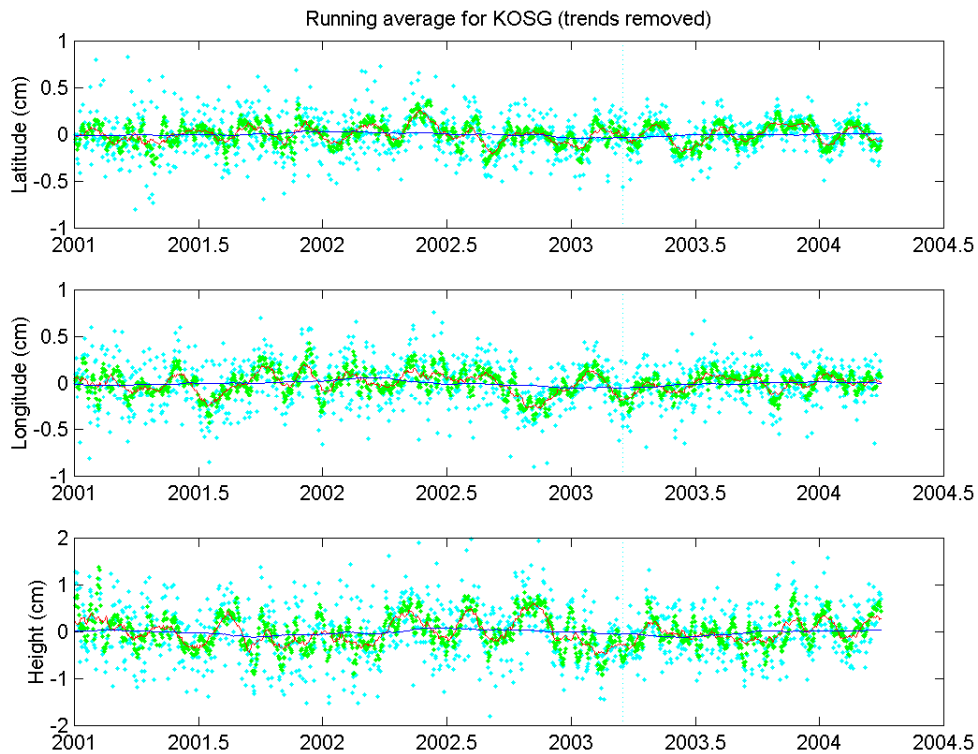
2.1. **Introductie**

Het Global Positioning System (GPS) van de Amerikaanse overheid is tegenwoordig alom bekend door het gebruik in voertuignavigatie systemen. Minder bekend is dat GPS sinds eind jaren 80 van de vorige eeuw wordt gebruikt door geodeten voor het bepalen van heel nauwkeurige posities en hoogteverschillen.

Een belangrijk uitgangspunt is daarbij het gebruik van een geodetische ontvanger en antenne. Geodetische ontvangers onderscheiden zich door naast de code modulatie ook de fase van de draaggolf te meten, en wel op beide signaal frequenties. De fasemeting geeft informatie over de afstand tussen satelliet en ontvanger met een nauwkeurigheid van beter dan 1 mm. Daarnaast, door op twee frequenties te meten, kunnen bepaalde atmosferische vertragingen geëlimineerd worden.

Een tweede uitgangspunt bij nauwkeurige GNSS metingen is dat bepaalde foutenbronnen (maar niet alle) door middel van relatieve metingen, d.w.z. door tegelijk met twee ontvangers te meten, sterk gereduceerd kunnen worden. Dit geldt ook voor de populaire "Precise Point Positioning" (PPP) techniek, waarover later meer. Ook de kwaliteit van de software en de daarin verwerkte modellen en procedures speelt een belangrijke rol bij deze nauwkeurige metingen.

Met de juiste ontvanger, meetopzet en software is de herhaalbaarheid van de metingen - onder gelijkblijvende omstandigheden - beter dan 2-3 mm/dag in ligging en 5-7 mm/dag in hoogte (de gegeven waarden zijn standaard afwijkingen, zie ook figuur 1). Het sleutelwoord hier is "herhaalbaarheid" onder gelijkblijvende omstandigheden. Verandering van antenne of de directe omgeving van de antenne, ontvanger, referentiefraam, en zelfs software, kunnen sprongen in de hoogte veroorzaken van enkele millimeters tot 1-2 centimeter. Hiermee moet terdege rekening gehouden worden bij het uitvoeren van meetcampagnes. Een groot voordeel van GPS is dat de genoemde herhaalbaarheid tegenwoordig, door de beschikbaarheid van het wereldwijde netwerk van de International GNSS Service (IGS), vrijwel onafhankelijk is van de afstand tussen de stations. Dit maakt GPS natuurlijk zeer geschikt voor het detecteren van deformaties van een klein aantal stations m.b.v. permanente opstellingen.



Figuur 1: Voorbeeld van een GPS tijdserie voor het station Kootwijk met dagelijkse posities, en wekelijks, maandelijks en jaarlijks lopend gemiddelde. Alle epochen zijn in hetzelfde referentiestelsel en lineaire trends zijn verwijderd (de snelheid in de hoogte is 0.02 ± 0.05 mm/jaar). Bron: JPL.

2.2. Meetprincipe

Het meetprincipe van GPS is vrij eenvoudig: GPS satellieten zenden een tijdcode uit en de ontvanger vergelijkt de ontvangen tijdcodes met een interne klok. Het tijdverschil hangt af van de afstand tussen satelliet en ontvanger, de klokfout van de ontvanger, de klokfout van de satelliet, en de atmosferische vertraging. Iedere satelliet zendt tevens een navigatieboodschap uit met daarin de door het GPS controle segment bepaalde baanparameters en satelliet klokfout. Met de gegevens van minimaal vier satellieten is de positie van de ontvanger en klokfout van de ontvanger te berekenen. Bij meer dan vier satellieten vindt een kleinste kwadratenvereffening plaats. Bij een geodetische ontvanger wordt ook de fase van de draaggolf geregistreerd. Het grote voordeel van de fasemeting is dat deze veel preciezer is, namelijk beter dan 1 mm. Een nadeel van de fasemetingen is dat deze een initiële meerduidigheid van een geheel aantal golflengten heeft. Door echter enige tijd te meten en met geavanceerde gegevensverwerkingsmethoden is deze meerduidigheid op te lossen. Daarnaast meet de geodetische ontvanger altijd op twee frequenties waardoor het mogelijk is de atmosferische vertraging t.g.v. de ionosfeer te elimineren.

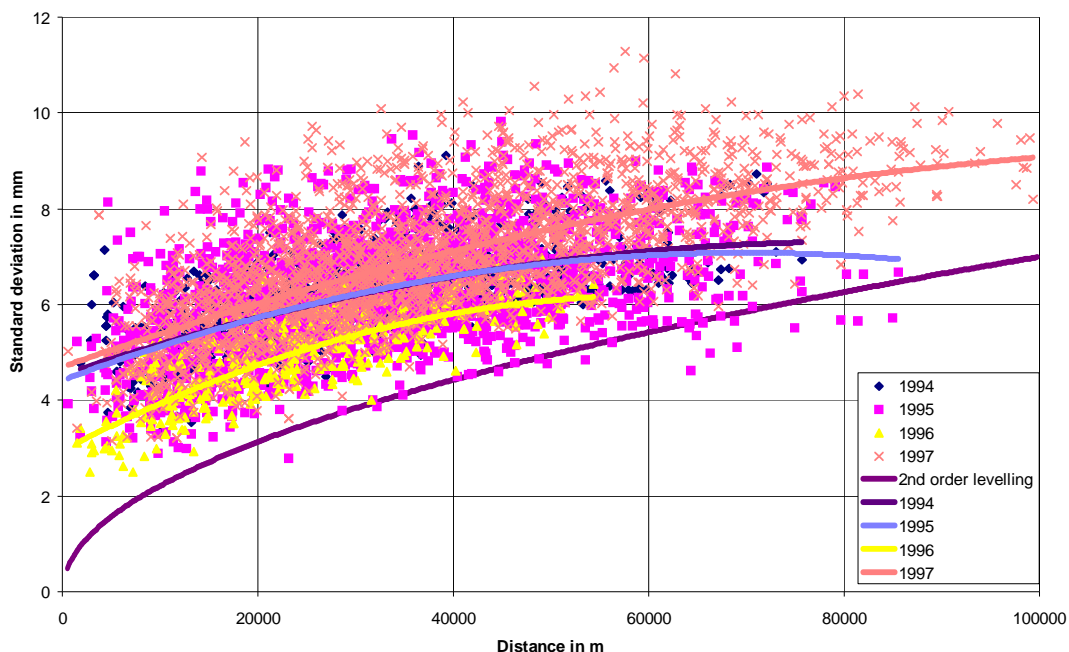
Voor nauwkeurige metingen zijn verschillende meetstrategieën mogelijk. Voor nauwkeurige hoogtebepaling zijn de volgende meetstrategieën het meest relevant:

2.2.1. Korte basislijnen en lokale netwerken

De korte basislijn is het klassieke voorbeeld van relatieve metingen. Twee - vaak identieke - ontvangers en antennes worden op afstanden tot enige tientallen kilometer van elkaar opgesteld. De meeste foutenbronnen worden op deze manier - afhankelijk van de afstand - grotendeels geëlimineerd. De enige foutenbronnen die niet worden geëlimineerd zijn de thermische ruis op de metingen, fase vertraging verschillen tussen de antennes en invloed van de verschillende multipath op beide stations. Verder is het zo dat bij toenemende afstand tussen de ontvangers de invloed van atmosferische fouten snel toeneemt, zodat deze techniek alleen geschikt is voor korte basislijnen. Het grote voordeel van deze strategie is dat opsteltijden van enige minuten volstaan voor het bepalen van de fase meerduideligheden. Echter, voor nauwkeurige hoogtebepaling moet aanzienlijk langer worden gemeten voordat b.v. multipath uitmiddelt

Het lokale netwerk is een variant van de korte basislijn strategie waarbij meer dan twee ontvangers worden ingezet. Het grote voordeel van meer ontvangers tegelijkertijd inzetten is dat de productiviteit meer dan proportioneel toeneemt.

Een voorbeeld van deze strategie zijn de GPS campagnes in Groningen. Hierbij is gebruik gemaakt van opeenvolgende kleine lokale netwerkjes met waarnemingstijden van 1-2 uur, waarbij ieder punt meerdere keren heeft deelgenomen aan een netwerkje, om zodoende het gewenste gebied te bestrijken. De precisie van de resultaten is weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Precisie van de GPS campagnes (1994-1997) in Groningen. Zie ook Beckers e.a., 1999 en de Heus e.a., 1999.

Een andere toepassing is bijvoorbeeld die van het permanent monitoren van de deformatie van een dam. Permanent monitoren heeft een aantal voordelen. O.a. is het mogelijk om de effecten van multipath te reduceren door verschillen tussen opeenvolgende siderische dagen te nemen.

2.2.2. Regionaal netwerk

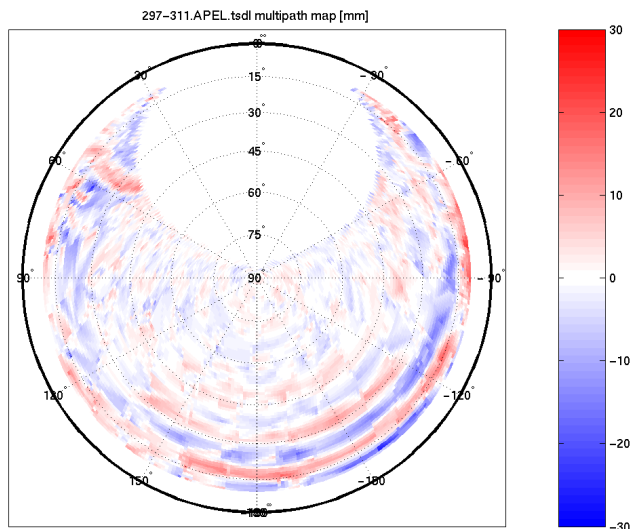
Wanneer men een groter gebied wil bestrijken dan voldoet de eerste strategie niet meer. In het geval van een regionaal netwerk, dat zich kan uitstrekken over schalen van 50-5000 km, wordt een andere strategie gebruikt om met de atmosferische vertragingen af te rekenen. Er wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde ionosfeer vrije lineaire combinatie van metingen op twee frequenties, en de vertraging t.g.v. de troposfeer wordt als extra parameter geschat samen met de andere onbekenden. Verder wordt er gebruik gemaakt van nauwkeurige satellietbanen van IGS en wordt de data van een aantal IGS en/of EPN (EUREF Permanent Network) stations aan het netwerk toegevoegd. De extra stations zijn nodig om aan te sluiten op het internationale referentiestelsel (ITRS). Het gevolg is wel dat de noodzakelijke waarnemingstijd toeneemt tot enkele dagen. Voor de 5e nauwkeurigheidswaterpassing was dit drie dagen. EUREF gebruikt een richtlijn van 7 dagen voor campagnes.

Doordat er vaak gebruik wordt gemaakt van bestaande stations zijn deze netwerken erg inhomogeen voor wat betreft de gebruikte ontvangers en antennes. Hierdoor kunnen alleen antennes gebruikt worden voor welke een type (of individuele) kalibratie heeft plaatsgevonden en software die deze kalibratietabellen kan verwerken. Daarnaast moet de software in staat zijn getijden en ocean loading te modelleren.

Voorbeelden van dit soort netwerken zijn het EUREF Permanent Network (EPN) en het Actief GPS referentie systeem voor Nederland (AGRS.NL), en campagnes zoals de NEREF, EUREF campagnes, en de GPS campagne die tijdens de 5e nauwkeurigheidswaterpassing is gehouden.

Het nadeel deze strategie voor deformatieanalyse is dat de resultaten erg beïnvloed kunnen worden door veranderingen in apparatuur, het gebruikte referentiestelsel, en de gebruikte software versie en instellingen. Deze drie effecten zijn duidelijk terug te zien in de EPN tijdserie. Concreet betekent dit voor campagnes dat elke epoeche met dezelfde software en instellingen verwerkt moet worden in hetzelfde referentiestelsel, dat liefst dezelfde antenne (of op zijn minst antennetype) op verschillende epochen gebruikt wordt en/of dat de antennes gekalibreerd zijn. Verder moet er voor gezorgd worden bij campagnes dat de opstellingen op de verschillende epochen identiek zijn. Bijvoorbeeld, een andere antennehoogte heeft gevolgen voor de multipath en daarmee de hoogte.

Gezien deze problemen heeft een permanente opstelling grote voordelen, omdat veranderingen in apparatuur zichtbaar worden als sprongen in de tijdserie, en duidelijk onderscheiden kunnen worden van de autonome deformatie. Tevens kan bij permanente opstellingen de multipath veel beter in kaart worden gebracht, zie bijvoorbeeld figuur 3.



Figuur 3: Voorbeeld van (extreme) multipath op het AGRS.NL station Apeldoorn.

2.2.3. Precise point positioning (PPP)

Het belangrijkste kenmerk van Precise Point Positioning is dat (ogenschijnlijk) met een enkele ontvanger gewerkt kan worden en dat toch een precisie van centimeters tot enkele millimeters mogelijk zijn (zie bijvoorbeeld figuur 1). In het geval van Precise Point Positioning worden nauwkeurige satellietbanen en klokken van IGS gebruikt. Doordat nu ook satellietklokken worden gebruikt is een tweede (referentie) ontvanger niet nodig. Verder is de verwerking grotendeels gelijk aan die van de regionale netwerken, met uitzondering dat het één ontvanger betreft en het referentiestelsel gerealiseerd wordt door de satellietbanen en klokken, met dezelfde voor en nadelen, opsteltijden, richtlijnen, etc. In feite is er bij Precise Point Positioning sprake van een globale netwerk vereffening, waarbij in een eerste fase door een IGS analyse centrum het globale netwerk is verwerkt met de gecorrigeerde satellietbanen en -klokken als belangrijkste product, en in een tweede fase door de gebruiker een lokaal station aan dit netwerk wordt toegevoegd. Voor de meest precieze resultaten is het daarom ook van groot belang dat de gebruiker exact dezelfde modellen en software, met dezelfde instellingen, als het IGS analyse centrum gebruikt. Bijvoorbeeld, getijden moeten op exact dezelfde manier gemodelleerd worden in de IGS analyse als door de gebruiker, zo niet, dan ziet de gebruiker dat direct terug in zijn hoogte. De praktische consequentie is dat de gebruiker exact dezelfde software moet gebruiken. Hierin wordt steeds meer voorzien doordat op het World Wide Web steeds meer processing services volgens het PPP principe worden aangeboden waarbij de resultaten in de vorm van een e-mail beschikbaar komen.

2.3. Verwachte ontwikkelingen

De meest significante ontwikkeling is de lancering van het Europese satelliet navigatie systeem GALILEO in 2010 en de modernisering van de GPS signalen. Door ontvangers te gebruiken die zowel GPS, GALILEO als GLONASS signalen ontvangen wordt het aantal navigatie satellieten dat gebruikt kan worden enorm vergroot. Daarmee neemt het aantal

waarnemingen ook toe, terwijl het aantal onbekenden min of meer hetzelfde blijft, waardoor de redundantie sterk wordt verbeterd t.o.v. GPS. Dit heeft niet alleen gevolgen voor de precisie en betrouwbaarheid, die toeneemt, maar het vergroot tevens de ruimte voor het schatten van extra parameters t.b.v. bijvoorbeeld de modellering van de atmosfeer. Daarnaast komen nieuwe signalen beschikbaar, zoals de nieuwe civiele code L2C op de tweede GPS frequentie, en een derde frequentie (L5) die zowel door GALILEO als GPS gebruikt gaat worden. Het belang van deze nieuwe signalen is evident wanneer men beseft dat bij GPS het signaal op de tweede frequentie versleuteld is met een geheime militaire code (Anti-Spoofing) die alleen maar te omzeilen is d.m.v. kruiscorrelatie technieken met de eerste frequentie, wat onherroepelijk leidt tot verlies in signaalruis verhouding. Bovendien is de bandbreedte van de nieuwe signalen op L5 veel groter en wordt er gebruik gemaakt van nieuwe signaalkvormen, zoals de BOC-modulatie, hetgeen in combinatie met voortschrijdende ontwikkelingen op signaal processing gebied een betere resistentie tegen multipath tot gevolg heeft.

Ook de ontwikkelingen in de verwerking en analyse van de GNSS metingen staan niet stil; steeds nieuwere en betere modellen komen ter beschikking voor het modelleren van getijden, loading effecten en atmosferische vertragingen, satellietbanen en -klokken worden steeds beter, evenals het mondiale referentiestelsel, en kalibraties van antennes en multipath zijn volop in ontwikkeling. Al deze ontwikkelingen zijn natuurlijk ook toepasbaar op de verwerking van historische GPS data. De verwachting is dat over enige jaren een volledige herverwerking van de IGS dataset vanaf 1994 beschikbaar komt, met alle satellietbanen en klokken in een uniek referentiestelsel. Deze informatie kan dan weer gebruikt worden voor het opnieuw berekenen van regionale en nationale netwerken van GPS stations en oude GPS campagnes.

Het meest kritische element in de hele keten is en blijft de GNSS antenne. De uiteindelijk te behalen nauwkeurigheid is afhankelijk van de kwaliteit van de antenne, de stabiliteit van de fase vertragingen, en isolatie van omgevingsinvloeden en ongewenste reflecties. Ook hier staan de ontwikkeling niet stil. Zo wordt voor GALILEO wordt veel aandacht geschonken aan de ontwikkeling van nieuwe typen antennes. Een andere interessante ontwikkeling voor de toekomst is het gebruik van antennes met meerdere actieve elementen en elektronische beam-forming.

3. Radar interferometrie (InSAR)

door Ramon Hanssen

3.1. Achtergrond

3.1.1. Satelliet- en vliegtuiggedragen radar interferometrie

Radar interferometrie is een techniek die gebruik maakt van de complexe metingen van beeldvormende radars. In het algemeen wordt hiervoor de synthetische apertuur radar (SAR) gebruikt, een dataverwerkingsmethode die gebruik maakt van (i) het fasegedrag van radarreflecties als functie van een veranderende positie van de radar antenne, en (ii) een frequentie gemoduleerde (*chirped*) golfvorm. Door deze methode is het mogelijk om hoge spatiële resoluties te bereiken. Radar interferometrie (interferometrische SAR, ofwel InSAR) koppelt verschillende complexe radarbeelden, opgenomen op verschillende tijdstippen en/of vanaf verschillende locaties, op een coherente wijze. Het product hiervan wordt het complexe interferogram genoemd. Het argument van dit interferogram bevat (per resolutie element) informatie over (a) de tijdsduur tussen zenden en ontvangen van het radarsignaal en (b) de fysisch-geometrische eigenschappen van de objecten waarop het radarsignaal verstrooit. Beide types informatie zijn ongecorrleerd.

Het eerste type informatie, de tijdsduur tussen zenden en ontvangen van het radarsignaal is afhankelijk van (i) de geometrie van de verstrooiers ten opzichte van de twee antenneposities:

- 1^e orde: referentievorm van het aardoppervlak, bijvoorbeeld ellipsoïde, aangevuld met
- 2^e orde: lokaal hoogtemodel, DEM, en
- 3^e orde: relatieve hoogte van verstrooiers ten opzichte van DEM, b.v. gebouwhoogte en vegetatie-effecten.

(ii) de vertraging van het radarsignaal ten gevolge van de refractief inhomogene atmosfeer,
(iii) de veranderingen in de onder (i) genoemde geometrie als functie van tijd (deformatie).

Het tweede type informatie in het argument van het interferogram wordt gevormd door de fysisch-geometrische eigenschappen van de objecten waarop het radarsignaal verstrooit. De waargenomen radarreflectie van een bepaald resolutie-element kan worden gedomineerd door een enkele verstrooier, bijvoorbeeld een hoekreflector, maar kan ook worden gevormd door de superpositie van meerdere elementaire reflectoren. In het algemeen hebben elementaire reflectoren afmetingen in de orde van grootte van de radar golflengte (3, 5 of 20 cm). Bij resolutie-elementen met dimensies van meerdere meters is het samenspel van alle elementaire reflectoren al snel niet meer te modelleren. Tijdsafhankelijke veranderingen in de onderlinge posities en fysische eigenschappen van de verstrooiers zijn waarneembaar als een faseverandering in het interferogram.

Platform

Radar interferometrie voor het waarnemen van beweging van (kunstmatige of natuurlijke) reflectoren maakt noodzakelijkerwijs gebruik van herhalingsmetingen. In deze configuratie kan de gebruikte radar worden gemonteerd op een vliegtuig of een satelliet. Momenteel zijn vliegtuiggedragen radarconfiguraties minder interessant vanwege (i) hoge exploitatiekosten,

o.a. leidend tot minder frequente metingen, (ii) navigatie- en controlebeperkingen in de mogelijkheid om vanaf constante posities waarnemingen te doen, (iii) platforminstabiliteit. Satellietgedragen systemen zijn op al deze punten momenteel in het voordeel. Binnen een termijn van 4 jaar kan hier verandering in komen wanneer de eerste prototypes van UAV (Unmanned Aerial Vehicles) radars zijn uitgetest. Deze kunnen onbemand (lage kosten) frequent (b.v. dagelijks) op grote hoogtes (~20 km, stabiel) metingen uitvoeren die met satellietmetingen kunnen wedijveren. Het is echter aannemelijk dat dit type platforms slechts voor specifieke, bekende, taken zal worden ingezet en niet voor meer exploratieve doeleinden.

3.1.2. Meetprincipe

De principes van radar interferometrie voor het meten van deformatie van het aardoppervlak zijn in verschillende rapportages reeds uitvoerig beschreven (zie bijvoorbeeld Hanssen (2001) en referenties daarin). De waarnemingen worden gevormd door de gemeten fase per resolutie-element (het argument van het complexe interferogram) per acquisitie. De te schatten parameters (per resolutie-element) zijn de topografische hoogte van het (effectieve) reflectiecentrum, de verplaatsing hiervan in de richting van de antenne¹ (als functie van het tijdsinterval tussen de acquisities) en de atmosferische vertraging, onder de aanname van volledige interne reflectiestabiliteit.

Datum

Alhoewel de positie van de satelliet op het moment van de radar acquisitie bekend is tot op decimeter niveau in een (absoluut) aardvast datum, is het vanwege de faseambigüiteiten zonder additionele informatie niet mogelijk om de positie van de effectieve reflectiecentra nauwkeurig in een aardvast datum te bepalen. Desalniettemin zijn de relatieve posities (zowel in hoogte als horizontaal) tussen de reflectiecentra (onder de aanname van volledige interne reflectiestabiliteit) wel voldoende nauwkeurig te bepalen.

3.1.3. Wat wordt gemeten?

Zowel in het geval van dominante hoekreflectoren als bij gedistribueerde elementaire verstrooiers kan worden gesproken van een *effectief* fasecentrum per resolutie-element. Aangezien hoekreflectoren de fase van naburige resolutie-elementen beïnvloeden is het mogelijk om de positie van het fasecentrum bij dit type reflectoren op sub-pixel niveau (enkele meters) te bepalen. Met uitzondering van kunstmatige reflectoren is het echter niet mogelijk het *fysieke* fasecentrum in het terrein aan te wijzen. Alhoewel dus wel kan worden vastgesteld dat het effectieve fasecentrum op een bepaalde manier beweegt ten gevolge van bijvoorbeeld bodemdaling, is dit punt niet aan te wijzen in het terrein, hetgeen validatie met externe methoden bemoeilijkt.

Bovenstaande uitspraken zijn wederom onder de aanname van volledige interne reflectiestabiliteit. Opgemerkt dient te worden dat deze aanname voor de meeste *natuurlijke* verstrooiers (biomassa) niet correct is. Als gevolg hiervan is het grootste deel van de resolutie-elementen niet meer reflectiestabiel (*coherent*) bij tijdsintervallen van dagen/weken, in het bijzonder in Nederlandse omstandigheden. Coherente interferometrische toepassingen zijn dan ook niet meer mogelijk.

¹ Bekend als de *line-of-sight* component van de deformatievector

Interne reflectiestabiliteit (*temporele coherentie*) wordt wel waargenomen bij een deel van de reflecties die een duurzame antropogene oorsprong hebben, zoals bebouwing, masten, en infrastructuur. Alhoewel het voorkomen van dit type reflecties in relatie met de antenne belichtingskarakteristiek moeilijk voorspeld kan worden, kunnen wel statistische uitspraken worden gedaan over hun aantal. Bijvoorbeeld in een stedelijke omgeving zijn meerdere tientallen temporeel coherente reflecties per vierkante kilometer te verwachten. Sommige studies spreken zelfs van meerdere honderden punten. In landelijke gebieden is deze punt dichtheid vanzelfsprekend een stuk lager. Belangrijk kenmerk van de techniek is dan ook haar opportunistische karakter: algemene uitspraken over het voorkomen van temporeel coherente reflecties zijn onmogelijk zonder de data te analyseren. Dit in tegenstelling tot technieken die gebruik maken van fysisch aanwijsbare *benchmarks*.

3.1.4. Unieke eigenschappen

Radar interferometrie, in het bijzonder wanneer toegepast voor deformatiemetingen, heeft een aantal unieke eigenschappen in vergelijking met complementaire technieken. Allereerst bestaat er geen noodzaak tot a-priori kennis van deformatie (bijvoorbeeld een vermoeden van bodemdaling), om een nulmeting uit te voeren. De systematische acquisities van radar satellieten sinds 1991, in combinatie met een eenvoudig toegankelijk archief, maakt het mogelijk om a-posteriori deformatieprocessen waar te nemen. Zo kan dus ook a-posteriori stabiliteit worden aangetoond.

Het feit dat radar interferometrie geen gebruik maakt van fysisch aanwijsbare *benchmarks* is zowel een voordeel als een nadeel. Voordeel is dat hun aantal in principe onbegrensd is, er geen sprake is van *benchmark-loss* ($\sim 3\%$ benchmark loss per jaar is veelvoorkomend, leidend tot $\sim 50\%$ verlies na 10 jaar), en de spatiële dichtheid in stedelijke gebieden veel hoger is dan bij conventionele technieken. Nadeel is dat de verdeling van punten inhomogeen is (punt dichtheid hoog in stedelijk en laag in landelijk gebied) en dat verschillende processen (diepe, ondiepe, funderingsgedreven, temperatuurafhankelijke) een rol kunnen spelen.

Een andere unieke eigenschap is de temporele bemonsteringsgraad. Met een herhalingsfrequentie in de orde van 3-5 weken zijn de meeste satellietsensoren in staat tijdsafhankelijke processen goed waar te nemen, bijvoorbeeld seizoensgebonden effecten. Een enkele 'epoche' (acquisitie) is binnen enkele seconden uitgevoerd. De spatiële uitgestrektheid van een meting is circa 100 km in oost-west richting, en honderden kilometers in noord-zuid richting (geheel Nederland). Combinatie van enkele belichtingsbanen maakt integrale monitoring van geheel Nederland mogelijk en verkort de temporele bemonstering voor elke locatie tot circa 2 weken.

De omvang van de tijdseries is meestal beperkt tot de levensduur van een bepaalde satelliet. Voor de combinatie ERS-1/ ERS-2 was dit zo'n 14 jaar, maar in het algemeen is de nominale levensduur van een satellietsysteem circa 5 jaar. Het aantal internationale radarmissies zal naar verwachting echter toenemen in de tijd. Momenteel worden bijvoorbeeld al de eerste civiele constellaties van radarsatellieten ontworpen. Het is daarom te verwachten dat deformatiemetingen met radar interferometrie zullen kunnen worden gecontinueerd. Toekomstige missies zoals momenteel worden bestudeerd in Europa worden bovendien geoptimaliseerd voor deformatiemetingen.

Precisie van de metingen naar temporeel coherente reflectoren is in de orde van enkele millimeters (1 sigma). Dit betekent dat een lineaire deformatie kan worden geschat met een precisie van 1 mm/jaar of beter.

Tot slot is natuurlijk het kostenaspect belangrijk. Voor radar interferometrie zijn de kosten relatief laag. Het volledige archief van ERS acquisities (1991-2005) van een gebied van 100x100 km is voor onderzoeksdoeleinden verkrijgbaar voor zo'n 3 kEuro. Voor circa 12 kEuro is een volledig redundante analyse van een gebied mogelijk.

3.2. Validatie

3.2.1. Interne validatie

Door gebruik te maken van klimmende en dalende satellietbanen, en naburige overlappende banen kan een bepaald gebied vier maal onafhankelijk worden waargenomen. Alhoewel de meetpunten in al deze vier gevallen anders zullen zijn, zullen alle metingen wel gerelateerd zijn aan hetzelfde deformatiegedrag. Op deze wijze is de betrouwbaarheid (van het geschatte deformatiemodel) te verbeteren.

3.2.2. Externe validatie

Externe validatie is in bijna alle gevallen slechts mogelijk door de geschatte deformatiemodellen te vergelijken. Directe validatie is nagenoeg onmogelijk, omdat de fysieke locatie van de effectieve fasecentra van de radarreflecties niet te bepalen is. Een andere factor die externe validatie bemoeilijkt is dat er met de radartechnieken zeer veel autonome beweging wordt gedetecteerd, d.w.z. beweging die uniek is voor de specifieke locatie en dus ongecorrleerd is met de langgolvige diepere deformatie. Aangezien bij de meeste waterpassings- en GPS-campagnes veel minder punten worden waargenomen is dit effect daarbij veel minder goed waar te nemen en zal de autonome beweging dus per abuis gealiases in de deformatiemodellen belanden. Testcampagnes met hoekreflectoren in Delft laten zien dat er door seizoenseffecten al gauw een aantal centimeters seizoensgebonden signaal meetbaar is over afstanden van slechts een paar honderd meter. Ook al zijn waterpasmerken meestal beter gefundeerd, door de lage temporele bemonsteringsgraad blijven dit soort effecten onopgemerkt. Concluderend kan worden gesteld dat wanneer de radarcampagnes een inhomogener deformatiebeeld laten zien dan b.v. waterpascampagnes, dit nog niet wil zeggen dat de metingen minder relevant zijn.

3.3. Relatie tot bodemdalingdiscussie

In relatie tot de momenteel gevoerde discussie over de maximale bodemdalingssnelheden in Nederland kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden.

3.3.1. Scheiding deformatieregimes

De waargenomen deformaties (bodemdaling) kunnen de volgende oorzaken hebben.

1. sub-pleistoceen. Locale verhoogde dalingssnelheden in bijvoorbeeld kleilagen onder het pleistoceen zullen leiden tot waargenomen bodemdaling bij alle metingen, dus zowel van de op het pleistoceen gefundeerde gebouwen als van de natuurlijke omgeving daaromheen. Desalniettemin kunnen deformaties met ondiepere oorzaken nog een additioneel effect hebben. De sub-pleistocene deformatie kan dus slechts als ondergrens (minimale deformatie) worden waargenomen, in veel gevallen zal meer worden waargenomen. Scheiding tussen de verschillende oorzaken is niet eenvoudig, al zullen sub-pleistocene deformaties een grotere invloedssfeer hebben.
2. Super-pleistoceen. Bodemdaling in de lagen boven de pleistoceenlagen zal zorgen voor verzakking van het natuurlijk terrein, maar niet van de op het pleistoceen gefundeerde objecten. Dit type deformatie zal dus worden waargenomen bij (i) niet-gefundeerde temporeel-coherente reflectoren, en (ii) bij zogenaamde *dihedrale* reflecties via een pleistoceen-gefundeerd gebouw en de grond er omheen. Dit type reflecties kan worden herkend door hun lage topografische hoogten en eventueel hun polarimetrische karakteristieken.
3. Autonome beweging. Onder autonome beweging worden deformaties gerekend die niet tot bovenstaande twee categorieën horen. Dit zijn bijvoorbeeld temperatuurgeïnduceerde effecten bij gebouwen

De radar interferometrische analyses zullen een combinatie van bovengenoemde regimes aantonen, waarbij een grondige evaluatie nodig is om tot een regime scheiding te komen.

3.3.2 Detecteerbaarheid

Aangezien bij een analyse van het volledige archief het mogelijk is om locale veranderingen in deformatiesnelheid (bijvoorbeeld bij kustgebieden) waar te nemen, met een precisie van sub-mm per jaar (1 sigma) is het in principe mogelijk om geclaimde variaties te detecteren. Hiervoor zou een volledige analyse van de Nederlandse kustgebieden moeten worden uitgevoerd. Opgemerkt dient te worden dat wijde effecten zoals de 'kanteling' van Nederland, of een totale verzakking van geheel Nederland, in de nulruimte van de radarmetingen zit, en diensgevolge niet kunnen worden gedetecteerd. Zoals gesteld is dit wel mogelijk voor locale variaties met een invloedssfeer van maximaal enkele tientallen kilometers. Show-stoppers bij zo'n analyse zijn (i) een te dominante en spatieel variabele bijdrage van de super-pleistoceen en autonome deformatieregimes, en (ii) een tekort aan temporeel-coherente reflectoren in de landelijke gebieden.

3.3.3 Controle van verdachte ondergrondse peilmerken

Eén van de belangrijkste punten in de huidige discussie is hoe de beweging van enkele ondergrondse merken moet worden geïnterpreteerd: als autonome beweging van het betreffende peilmerk of als indicatie van sub-pleistocene deformatie. In het eerste geval kan de beweging van het merk als een uitschieter worden geclassificeerd, maar zonder gevolgen voor lange termijn bodemdaling. In het tweede geval dient de beweging zeer serieus genomen te worden aangezien er sprake kan zijn van een onderschatting van de werkelijke bodemdalingssnelheid. Probleem hierbij is dat de gebruikte methode, waterpassing, niet in staat is om hierover falsifieerbare uitspraken te doen: beide verklaringen voor de waargenomen deformatie zijn mogelijk. De oplossing hiervoor zou kunnen liggen in het

aanbrengen van meerdere ondergrondse merken, maar daarbij is het probleem dat het zeker enkele decennia zal duren voordat er een waarneembaar signaal valt te ontwaren. In deze problematiek kan radar interferometrie wellicht een oplossing bieden. Bij lokale sub-pleistocene bodemdaling zullen immers *alle* waargenomen radarreflecties hiermee behept zijn. Statistisch gezien is het zeer wel mogelijk dat er voldoende bruikbare reflecties in het verdachte gebied zijn, en het archief van 14 jaar biedt de mogelijkheid dit momenteel na te gaan. In het slechtste geval kan zo'n exercitie leiden tot de uitspraak dat een nulhypothese als *'er zijn geen additionele locale bodemdalingseffecten'* niet kan worden verworpen. Dit zou voor de huidige discussie een zinvolle bijdrage kunnen geven.²

3.4 Synthese en aanbevelingen

Bij de huidige stand van de techniek is het mogelijk om locale (< enkele tientallen kilometers) variaties in de bodemdaling te detecteren, gebruik makend van gearchiveerde radar data. Zo'n analyse kan voor alle kustgebieden of voor heel Nederland worden uitgevoerd. De meer langgolvige effecten zoals kanteling of zelfs absolute verzakking van het hele land zijn niet meetbaar. Vanwege de lange tijdsintervallen zijn nationale waterpascampagnes hiervoor het best geschikt. Voor absolute veranderingen zouden absolute zwaartekrachtmetingen kunnen worden gebruikt.

Een andere mogelijkheid is het specifiek analyseren van 'verdachte' locaties, daar waar de ondergrondse merken een gedrag vertonen dat afwijkend is van de trend. Zeker wanneer diepere (sub-pleistocene) oorzaken hierbij een rol spelen beïnvloed dit alle radarmetingen.

3.5 Eerste analyse

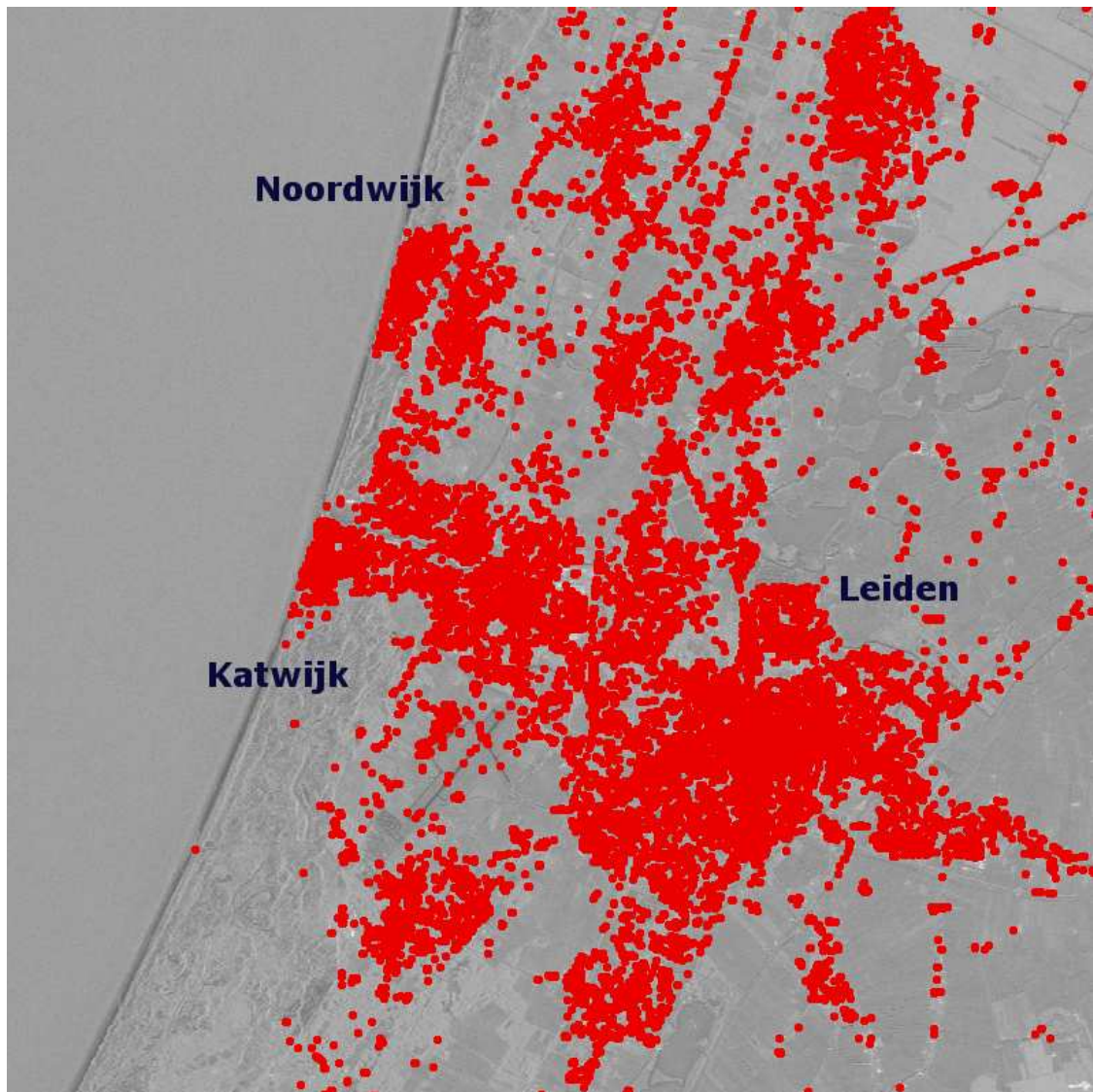
Om een indruk te krijgen van de toepasbaarheid van radar interferometrie in kustgebieden is een kleine test gedaan voor het gebied rond Katwijk. Belangrijkste doelstelling hierbij is inzicht te krijgen in de distributie van bruikbare meetpunten. Het resultaat is weergegeven in figuur 4. Getoond worden de resolutie-elementen met een temporele coherentie van minimaal 0.6 (temporele coherentie is een maat voor fase stabiliteit met een waarde tussen 0 en 1).

Zoals verwacht is de punt dichtheid in stedelijke gebieden zeer hoog. In de duingebieden langs de kust is het aantal punten echter minimaal. Desalniettemin bevatten deze waarnemingen zeer waardevolle informatie, die, gezien het ontbreken van metingen door

² In het kader van de huidige discussie dient onderscheid gemaakt te worden tussen additionele bodemdaling *achter* en *onder* de zeeweringen. Additionele bodemdaling achter de zeewering is belangrijk maar niet direct bedreigend in de discussie over de veiligheid van onze kustverdedigingswerken. Additionele locale bodemdaling *onder* de zeewering (onder duinen en dijken) is daarentegen wel uitermate belangrijk om adequaat te monitoren. Op basis van de geïnterpoleerde bodemdalingskaarten gebaseerd op de ondergrondse merken kan deze uitspraak niet gedaan worden, aangezien hiervoor extrapolatie noodzakelijk is. Radar interferometrische analyses in deze gebieden zouden hierover uitkomst kunnen bieden, al is aan te nemen dat het aantal temporeel coherente reflecties in het duinengebied beperkt is.

andere technieken, de analyse van de bodembeweging in de kustgebieden zeker kunnen versterken.

Opgemerkt dient te worden dat deze resultaten zijn bereikt met standaard verwerkingsmethoden. Een diepgaandere analyse van de fase waarnemingen in de kustgebieden zal ongetwijfeld tot een hogere punt dichtheid leiden.



Figuur 4: Distributie van bruikbare radar interferometrische waarnemingen. Getoond worden de resolutie-elementen met een temporele coherentie van minimaal 0.6 (temporele coherentie is een maat voor fase stabiliteit met een waarde tussen 0 en 1).

4 Literatuur

Beckers, G.W.J., H.M. de Heus, H. van der Marel and M.H.F. Martens (1998). Onderzoek bodemdalings-metingen Groningen '95-'96-'97, In: *Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, No. 18, Delft

Brand, G.B.M. en J.H. Ten Damme (2004), De waterpasmetingen van de 5^e NWP, AGI-GAP-2004-15, Rijkswaterstaat AGI.

Brand, G.B.M. (2004). Herberekening van het primaire net van het NAP. Verbetering precisie en betrouwbaarheid ten behoeve van de nieuwe NAP publicatie, AGI/GAP-04/004, Rijkswaterstaat AGI.

De Heus, H., M.H.F. Martens en H. van der Marel (1999). Re-weighting of GPS baselines for vertical deformation analysis. In: *Geodesy beyond 2000*, IAG General Assembly, Vol. 121, Birmingham, July 19-30 1999, Springer.

Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Klees, R. en P. Ditmar (2004). Definitiestudie Zwaartekracht netwerk Nederland – Eindrapport, DEOS, Delft University of Technology.

Leusink, J.G. (2003). Wat waterpasgegevens vertellen over geologische bodembeweging, De schatbaarheid van een tijd-plaatsmodel voor de beweging van meetpunten van het NAP, afstudeerscriptie TU Delft, Delft.

Lorenz, G.K., W. Groenewoud, F. Schokking, M.W. van den Berg, H. Wiersma, S. Jelgersma en F. Brouwer (1991). Heden en verleden – Nederland naar beneden??? Interim rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland. Rijkswaterstaat Delft/Rijswijk, Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 72 pp.