

# Geodetische toevalsnetwerken:

ontwikkelingen in deformatiemetingen met satelliet-radarinterferometrie en de permanent-scatterers-methode

Dr.ir. R.F. Hanssen  
TU Delft, Afdeling Geodesie

## 1. Introductie

Deformatiemetingen worden sinds geruime tijd ingezet voor het monitoren van verschillende soorten deformatieprocessen, zoals bodemdaling, gletsjerbeweging en tektonische en vulkanische deformatie. Alhoewel er een scala aan meettechnieken met een vast instrumentarium bestaat, zoals permanente hellings-, spannings- of lengteverschilmeters, beschouwen we hier voornamelijk de niet-continue metingen, uitgevoerd in beperkte campagnes en in een netwerkopzet, zoals waterpassing, elektronische afstandmeting en triangulatie.

Besproken zal worden hoe deze technieken zich verhouden tot moderne ruimtegeodetische technieken zoals GPS (Global Positioning System) en radarinterferometrie (InSAR). Hierbij wordt vooral ingegaan op de achtergronden van netwerkontwerp en de consequenties hiervan voor de uiteindelijke resultaten en kwaliteitsbeschrijving. In paragraaf 2 worden standaardgeodetische netwerken besproken. Uit recente ontwikkelingen in InSAR is gebleken dat meetwaarden van een beperkte set stabiele reflectoren, bekend als 'permanent scatterers', die inhomogeen verdeeld zijn op onvoorspelbare locaties, bruikbaar zijn om hoognauwkeurige deformatieparameters te schatten [4, 5]. Aangezien de positie van deze punten onvoorspelbaar is, vormen alle punten een netwerk dat gekenschetst kan worden als *toevalsnetwerk*. In paragraaf 3 worden de achtergronden van InSAR kort besproken, waarbij vooral wordt ingegaan op de parameters die de inzetbaarheid van de techniek voor een specifiek geval beïnvloeden. Dit wordt gevolgd door een discussie over permanent scatterers in paragraaf 4. In paragraaf 5 worden enkele belangrijke punten samengevat.

## 2. Geodetisch netwerkontwerp

Het concept van de gecontroleerde optimalisatie is kenmerkend voor het ontwerp en de analyse van geodetische netwerken. Een nauwgezet ontwerp van het netwerk maakt vereffenings- en toetsingsprocedures mogelijk, die leiden tot aanvaardbare precisie en betrouwbaarheid van de geschatte parameters, tegen aanvaardbare kosten [8, 2, 3, 1]. Een belangrijke, maar vaak onderbelichte voorwaarde voor een

succesvol netwerkontwerp is de beschikbaarheid van a-priori-informatie of aannamen over de fysica van het deformatieproces. Deze informatie wordt voornamelijk gebruikt om te komen tot een optimale parametrisatie van het probleem voor wat betreft robuustheid, gevoeligheid en een minimaal maar toereikend aantal onafhankelijke parameters. Wanneer een verscheidenheid aan meettechnieken beschikbaar is, kan de vooraf bepaalde set van parameters worden gerelateerd aan de precisie en de eigenschappen van deze techniek om via een optimaal ontworpen netwerk de inwendige betrouwbaarheid en de precisie en betrouwbaarheid van de parameters te bepalen.

In de praktijk houdt het ontwerpen van een netwerk in dat de fysische meetpunten optimaal gepositioneerd moeten worden in relatie tot het te verwachten deformatiepatroon. Hierbij moet worden gedacht aan de ruimtelijke omvang van het deformatiepatroon, maar ook aan de te verwachten ruimtelijke variabiliteit in verband met de bemonsteringsdichtheid en de relatieve positie van de punten binnen het netwerk. Deze beslissingen zijn direct bepalend voor de ontwerpmatrix van het vereffeningsprobleem. Een suboptimaal netwerkontwerp leidt tot rangdefecten en schattingsproblemen, die een juiste interpretatie van de metingen in de weg staan. In de tweede plaats moet een beslissing worden genomen over de herhalingsfrequentie van de meetcampagnes. Een herhalingsfrequentie die te laag is, temporele onderbemonstering, kan leiden tot het ontstaan van een kunstmatig signaal, een effect bekend als 'aliasing'. Een te hoge temporele bemonstering leidt tot een ongewenste toename in de meetkosten, zonder dat dit noodzakelijkerwijs leidt tot betere schatting. In deze overwegingen zit een paradox: om een netwerk en een meetstrategie te ontwerpen om deformatieoptimaal te monitoren, moet deze deformatie al bij voorbaat bekend zijn!

De belangrijkste praktische consequenties van de aanpak van het netwerkontwerp zijn: (i) de noodzaak tot het installeren van permanente kunstmatige meetpunten, (ii) de beperking in de ruimtelijke dichtheid van deze meetpunten als gevolg van praktische en financiële overwegingen, (iii) een meetcampagne die qua uitvoering te lang kan duren in vergelijking met de deformatiesnelheid, in het bijzonder voor arbeidsintensieve methoden zoals waterpassing, en (iv) de noodzaak voor een nulmeting die kan worden gebruikt als referentie voor de deformatieanalyse. Het is evident dat deformaties die plaatsvonden voor de nulmeting niet kunnen worden bepaald. Hierdoor blijven deformaties die niet werden verwacht buiten beschouwing, net als deformaties die vanuit economisch, veiligheids of wetenschappelijk oogpunt minder belangrijk worden geacht. Lokale afwijkingen binnen een deformatiepatroon blijven vaak onopgemerkt. Wanneer een meetpunt binnen zo'n gebied met een afwijkend patroon ligt, zal de schatting van het ruimere patroon een systematische afwijking geven of, in het beste geval, worden verworpen in de toetsing.

De afhankelijkheid van permanente meetpunten, de 'benchmarks', leidt dus tot een belangrijke beperking in de optimalisatie en het onderhoud van geodetische netwerken. De fysieke aard van meetpunten, bijvoorbeeld de bouten voor water-

passingen of de pijlers voor GPS-ontvangers en theodolieten, beperken het aantal mogelijke locaties. Voor waterpasmetingen zijn stabiele (onderheide) gebouwen of infrastructurele werken nodig, terwijl GPS-satellieten onder een lage elevatie dienen te worden gemeten voor nauwkeurige meetresultaten. Daarnaast verdwijnt jaarlijks vaak ook een aanzienlijk deel van de meetbouten ten gevolge van veranderende infrastructuur. Vaak zorgen deze praktische beperkingen in combinatie met financiële overwegingen voor een behoorlijke limitatie in de analyse van deformatiemetingen.

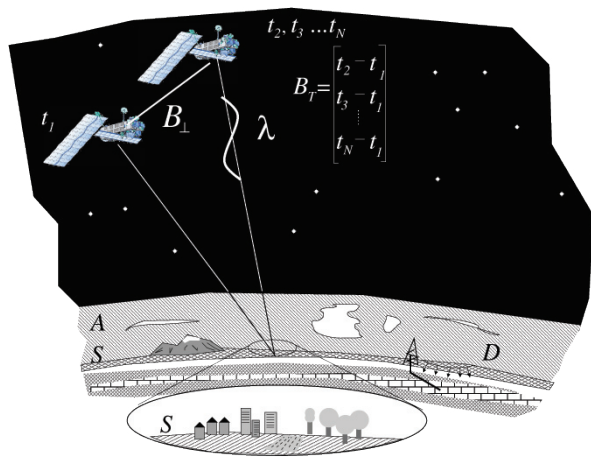
Door gebruik te maken van een speciale verwerkingsmethodiek van satellietradargegevens, kunnen onder bepaalde omstandigheden een aantal van de bovengeschetste problemen worden voorkomen door gebruik te maken van een set van door toeval gevonden en non-interveniërende kunstmatige meetpunten. Deze aanpak, 'permanent scatterers' genaamd, is vergelijkbaar met een Monte Carlo-methode, waarbij waarden willekeurig worden getrokken uit een bepaalde kansdichtheidsfunctie. Voordat we deze toepassing verder zullen bespreken volgt hier eerst een korte samenvatting van de conventionele toepassing van satelliet-radarinterferometrie voor deformatiemetingen.

### 3. InSAR conventionele aanpak

De introductie van de beeldvormende radar kan worden gezien als een van de meest spectaculaire ontwikkelingen in de remote sensing sinds de jaren 1960. Hierdoor werd een breed scala van toepassingsgebieden in de geowetenschappen en de astronomie geopend en werd een alternatief gevonden voor de traditionele optische methoden, die belichting door de zon en wolkenvrije omstandigheden nodig hadden. Beeldvormende radar werd mogelijk gemaakt door het concept van de synthetische apertuur: het kunstmatig vergroten van de afmetingen van de radarantenne om hiermee hoge resoluties te behalen. De afstanden, afgeleid uit tijdmetingen, worden gemeten vanuit het referentiesysteem van de satelliet en kunnen worden gebruikt om de gemeten reflectiewaarden in een grid of beeld te representeren. Aangezien de radar geen hoekmetingen kan uitvoeren kan dit beeld niet direct worden gebruikt om bijvoorbeeld topografie te meten. Wanneer echter twee radaropnamen worden gebruikt en het principe van multiplicatieve interferometrie wordt toegepast op de complexe waarden van het radarsignaal, kunnen zowel afstanden als hoeken nauwkeurig worden afgeleid waardoor hoogtemetingen mogelijk worden. Vanuit een satelliet kan deze techniek, bekend als Interferometrische Synthetische Apertuur Radar (InSAR), worden gebruikt om metingen te verrichten in willekeurige gebieden op aarde met een typische herhalingsfrequentie van een beeld per maand. De basismetgrootte in de combinaties van beelden zijn faseverschillen. De interferometrische beelden worden interferogrammen genoemd.

Temporele veranderingen in de afstand satelliet - aarde, zoals bijvoorbeeld veroorzaakt door deformaties zoals bodemdaling, tektoniek, vulkaan- of gletsjerbeweging,

kunnen ook worden gemeten met nauwkeurigheden vanaf het subcentimeterniveau. Twee belangrijke groepen parameters, de ontwerp- en de omgevingsparameters, zijn van invloed op de potentiële toepassingen en de beperkingen van de techniek. Voor een diepgaander overzicht in de techniek kan worden verwezen naar bijvoorbeeld [9, 7] en de daarin genoemde referenties. Figuur 1 is een schets van de interferometrische geometrie met haar relatie tot de belangrijkste parameters. De belangrijkste ontwerpparameters zijn de radargolflengte  $\lambda$  (3 - 24 cm), de loodrechte basislijn  $B_{\perp}$  (de effectieve afstand tussen de twee satellieten), de temporele basislijn  $B_T$  (het tijdsinterval tussen de radaropnamen) en het totale aantal radaropnamen  $N$ . De omgevingsparameters zijn de aardse atmosfeer  $A$ , het aardoppervlak  $S$  en de eigenschappen van de deformatie  $D$ .



*Figuur 1. De belangrijkste parameters die van invloed zijn op de inzetbaarheid van satelliet-radarinterferometrie voor deformatiemetingen: de loodrechte basislijn  $B_{\perp}$ , de temporele basislijn  $B_T$ , de radargolflengte  $\lambda$ , de tijdstippen van opname  $t_i$ , de atmosfeer  $A$ , het aardoppervlak  $S$  en de deformatie-eigenschappen  $D$ .*

De radargolflengte  $\lambda$  is belangrijk omdat de component van de deformatievector in de richting van de satelliet wordt gemeten als fractie van de (halve) golflengte. Afhankelijk van het signaal-ruisniveau van de radar wordt de nauwkeurigheid van de fasemeting direct vertaald naar de nauwkeurigheid van de gemeten deformatie. Een standaardafwijking van 15 graden in de fasemeting leidt dus bij een golflengte van 56 mm tot een standaardafwijking van 1,2 mm in de deformatiemeting. Een radar met een korte golflengte en een hoge signaal-ruisverhouding lijkt dus optimaal. Hierbij moet echter rekening worden gehouden dat korte golflengten (bijvoorbeeld 3 cm) ook verstrooid worden door kleine objecten op aarde, bijvoorbeeld door bladeren aan bomen. De willekeurige veranderingen van objecten van deze dimensies in de tijd verstoren de analyse van het fasesignaal. Om deze reden wordt vaak een wat langere golflengte zoals 5,6 en 24 cm geprefereerd. Een golflengte van 24 cm wordt voornamelijk verstrooid door grotere objecten, waar-

door deze door het bladerdak van bomen heen dringt en dicht bij de grond wordt verstrooid. Statistisch gezien is de variatie in de tijd van deze grotere objecten kleiner, waardoor de verstoring van het fasesignaal beperkt is. Golflengten groter dan 24 cm zijn minder geschikt vanwege hun gevoeligheid voor radiogolfinterferentie en ionosferische verstoringen.

De lengte van de loodrechte basislijn  $B_{\perp}$  bepaalt de interferometrische geometrie (zie figuur 1). Hierdoor wordt de gevoeligheid voor topografische hoogteverschillen geïntroduceerd. Afhankelijk van de radargolflengte en de terreinhelling varieert de absolute lengte tussen 0 m, waarbij de configuratie ongevoelig is voor topografische hoogte, en 1 - 2 km, waarbij er een zeer sterke invloed van de topografie op de fasewaarden is. Idealiter worden deformatiemetingen uitgevoerd met een basislijn van nul meter, waardoor alle invloed van topografie uit het signaal verwijderd is. Helaas vertonen satellietbanen een drift ten opzichte van hun nominale banen, waardoor de basislijn in het algemeen ongelijk aan nul zal zijn. Externe topografische informatie (DEM's) of DEM's afgeleid uit InSAR-metingen zonder deformatiesignaal worden in deze gevallen gebruikt om de topografische invloed uit de deformatiemetingen te elimineren. Een additioneel ongewenst effect van de basislijn is, dat faseruis wordt geïntroduceerd proportioneel aan de basislijnlengte.

Een derde ontwerpparameter is de temporele basislijn  $B_T$ ; een veelvoud van de herhalingsstijd  $\Delta T$  (zie tabel 1) van de satellietbaan en afhankelijk van de acquisitieplanning. De acquisitieplanning wordt gestuurd door het energieverbruik van de radar en het gebruik van mogelijke conflicterende andere instrumenten aan boord van de satelliet. De temporele basislijn dient lang genoeg te zijn om de verwachte deformatie te kunnen detecteren, maar niet te lang aangezien de ruis in de beelden meestal proportioneel toeneemt met het tijdsinterval. De redenen hiervoor worden hieronder verder beschreven.

Missie	start - eind	$T$ (dagen)	$\lambda$ (cm)
ERS-1	1991 - 2000	35(3)	5,6
ERS-2	1995 -	35	5,6
ERS-1/ERS-2	1995 - 1996	1	5,6
JERS	1992 - 1998	44	23,6
Radarsat	1995 -	24	5,6
Envisat	2002 -	35	5,6

Tabel 1. Overzicht van de satelliet-InSAR-missies die gebruikt kunnen worden voor deformatiemetingen, met duur van de missie, de herhalingsfrequentie en de golflengte.

Tenslotte is het totale aantal beschikbare radaropnamen  $N$  van belang, aangezien de beschikbaarheid van veel beelden alternatieve wijzen mogelijk maakt om individuele pixels met een hoge kwaliteit te kunnen herkennen temidden van de ruis,

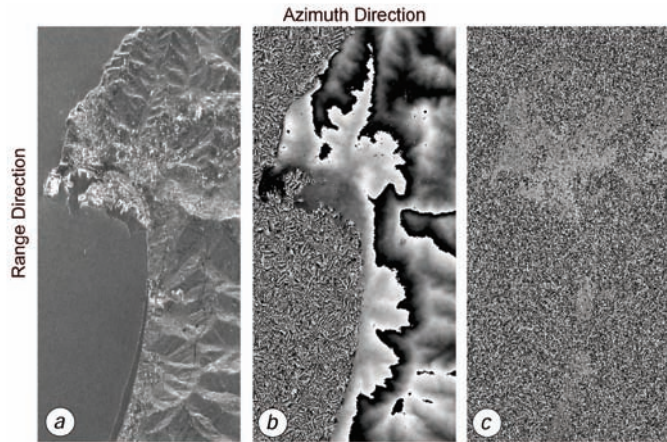
zoals beschreven in de volgende paragraaf. Bovendien wordt met veel beelden de ratio tussen het deformatiesignaal en het atmosfeersignaal gunstiger.

De tweede groep van parameters bestaat uit de omgevingsinvloeden ten tijde van de radaropname: atmosfeer, deformatie-eigenschappen en het landoppervlak. Alhoewel radargolven niet worden tegengehouden door wolken, worden ze wel inhomogeen vertraagd, wat resulteert in spatieel gecorreleerde fouten in de afstandmetingen. De mate van verstoring is afhankelijk van de klimaatomstandigheden en de lokale weersituatie ten tijde van de opname. Weersverschijnselen zoals regen, convectieve bewolking en fronten resulteren vaak in significante fouten, oplopend tot enkele centimeters [7]. Aangezien een potentieel deformatiesignaal relatief wordt gemeten tussen punten in het beeld zal een grotere afstand tussen de punten leiden tot een grotere atmosferische fout  $A$  in de deformatiemeting

De verwachte eigenschappen van het deformatiesignaal  $D$  dienen te worden meegenomen wanneer de inzetbaarheid van InSAR wordt overwogen. Fouten in de satellietbanen resulteren in langgolfige trends in de interferogrammen, terwijl het atmosfeersignaal leidt tot een 'gladde' fasevariatie over verschillende schalen. Het deformatiesignaal met vergelijkbare eigenschappen, zowel ruimtelijk als qua magnitude, is moeilijk te onderscheiden van de verstoringen. Bij interferometrische analyses die slechts gebruik maken van twee beelden, worden hierdoor bijvoorbeeld aardgetijden en langzame en ruimtelijk uitgestrekte bodemdaling zeer moeilijk te meten. De kinematische eigenschappen van de deformatie spelen een belangrijke rol: een plotselinge deformatie veroorzaakt door een aardbeving is vele malen makkelijker af te leiden dan tektonisch kruipgedrag, alhoewel de methodologie voor het analyseren van dit laatste fenomeen al is ontwikkeld. Tenslotte dienen de ruimtelijke deformatiegradiënten tussen naburige pixels in het beeld kleiner te zijn dan de radargolflengte.

Verreweg de belangrijkste omgevingsparameter is het verstrooiende oppervlak  $S$  van de aarde. Het afleiden van deformatie uit interferometrische metingen is slechts mogelijk wanneer er sprake is van coherente verstrooiing. Dit betekent dat voor elk interferogram de fase-informatie alleen afhankelijk mag zijn van de geometrie. Met andere woorden, in de tijd variërende verstrooiingseigenschappen binnen een resolutiecel dienen te worden vermeden. Deze beperking maakt bijvoorbeeld water onbruikbaar voor interferometrie, aangezien de vorm van het wateroppervlak al binnen een seconde te sterk verandert. Voor temporele basislijnen van meerdere weken worden door hetzelfde principe ook veel landbouwgebieden en gebieden met een sterke vegetatie uitgesloten. Ook gebieden waar veel menselijke activiteit waarneembaar is, bijvoorbeeld bij het bouwen of slopen van gebouwen of infrastructuur, zijn in het algemeen onbruikbaar. De mate waarin deze interferometrische correlatie aanwezig is, wordt uitgedrukt in de coherentie.

Een hoogcoherent-interferogram resulteert in een glad fasepatroon: er is in dat geval een sterke ruimtelijke correlatie tussen de modulo- $2\pi$ -fasewaarden (zie figuur 2b). Gebieden met een lage coherentie resulteren in een ruizig fasebeeld (zie figuur 2c).



*Figuur 2. Interferometrische radarbeelden van Ancona, Italië, uit Hanssen en Ferretti (2002). (a) ERS SAR-magnitudebeeld. (b) Hoogcoherent-interferogram afgeleid uit een ERS-'tandembaar': twee acquisities met een tussentijd van 24 uur. De fasecycli komen direct overeen met de lokale topografie. (c) Laagcoherent-interferogram van hetzelfde gebied. De loodrechte basislijn is kort (< 10 m), maar de temporele basislijn is langer dan 1 jaar. Interferometrische metingen zijn niet mogelijk wanneer de lokale verstrooiing van het terrein te veel verandert in de tijd.*

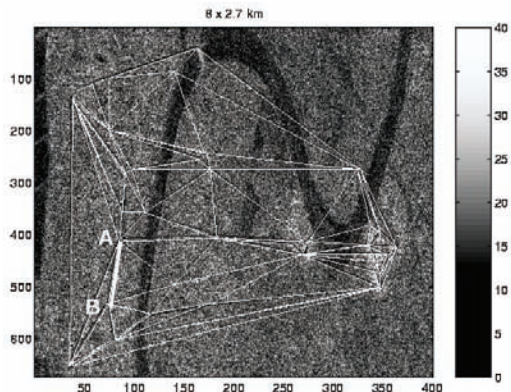
Aangezien de coherentie een belangrijke kwaliteitsmaat voor het interferogram is, variërend over het beeld, dient deze per pixel te worden geschat. In een ideale situatie zijn herhaalde metingen onder identieke omstandigheden nodig om de coherentie per pixel te schatten. Dit is echter in de conventionele interferometrische aanpak niet mogelijk aangezien slechts twee beelden worden gebruikt waaruit een interferogram wordt berekend. Hierdoor is er geen overtaligheid in de interferometrische metingen per pixel en kan de coherentie niet worden geschat. Als benadering wordt in plaats hiervan de coherentie uit een groep waarnemingen rondom een pixel bepaald, onder de aanname van ergodiciteit. Deze aanname is in veel gevallen bruikbaar, voornamelijk wanneer de eigenschappen van het terrein homogeen zijn en korte temporele basislijnen worden gebruikt. Desalniettemin is de aanname zeker niet juist bij interferogrammen met lokaal sterk variërende verstrooiingseigenschappen. Hierdoor zijn veel interferogrammen met lange temporele basislijnen vaak aanzienlijk gedecorreleerd, voornamelijk in gebieden met vegetatie. Gebouwen, blootliggende rots of infrastructurele werken behouden vaak hun verstrooiingseigenschappen over lange tijdsintervallen en onder variabele opnamegeometrieën. Herkenning van dit soort punten, vaak een enkele pixel temidden van ruis, is zeer moeilijk wanneer slechts een beperkt aantal beelden beschikbaar is. Wanneer meerdere beelden beschikbaar zijn, kan een oplossing voor dit herkenningsprobleem worden gevonden door een stapeling van beelden te maken. Deze aanpak wordt gehanteerd bij de permanent-scatterers-methode en wordt besproken in de volgende paragraaf.



#### 4. InSAR-permanent-scatterers-methode

De permanent-scatterers-methode (PS) is ontwikkeld om geïsoleerde coherente pixels te herkennen en om het probleem van atmosferfouten op te lossen. De prijs die hiervoor betaald wordt, is dat een groot aantal beelden (meer dan 30), pixel voor pixel, moet worden verwerkt [5]. Puntdoelen die niet worden beïnvloed door temporele decorrelatie worden herkend door middel van een statistische analyse van hun amplitude in de gehele set radarbeelden. De statistische verdeling van de amplitudewaarden per pixel in de gehele gecoregistreerde set SAR-beelden wordt gebruikt om potentiële permanent scatterers te identificeren. Deze selectie vindt plaats onder de aanname dat pixels met PS-eigenschappen een minimale verandering in amplitude hebben, waardoor hun variantie laag is. Pixels die sterk variëren in amplitude zijn hoogstwaarschijnlijk ook niet stabiel in fase. De invloed van topografie, deformatie en atmosfeer kan met behulp van een iteratieve kleinstekwadratenvereffening worden geschat door zorgvuldig gebruik te maken van het verschil in hun ruimtelijke en temporele gedrag. Zo is het atmosferisch signaal ruimtelijk sterk gecorreleerd, terwijl het in de tijd nagenoeg ongecorrleerd is. Topografie is constant in de tijd en schaal met de loodrechte basislijn. Deformatie tenslotte is vaak sterk gecorreleerd in de tijd, op breukpunten na, en afhankelijk van het type deformatie ook in meer of mindere mate in ruimtelijke zin.

De combinatie van alle geïdentificeerde permanent scatterers is vergelijkbaar met een standaard geodetisch netwerk (zie figuur 3), alhoewel de posities van deze punten door het toeval worden bepaald en onvoorspelbaar en niet te optimaliseren zijn. Desalniettemin, alhoewel voor stedelijke gebieden slechts tussen de 0,5 en 2,5 procent van het totale aantal punten kan worden gebruikt, correspondeert dit met tussen de 50 en 400 punten per vierkante kilometer. Dit is veel meer dan de

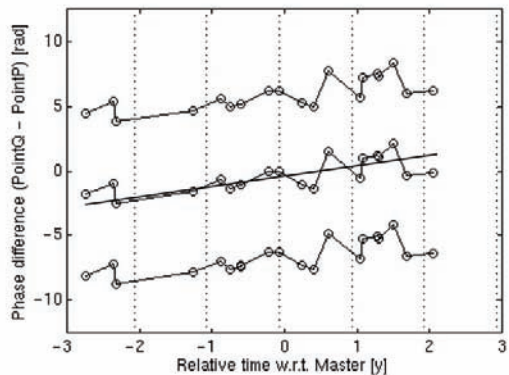


*Figuur 3. Eerste selectie pixels (permanent scatterers) met een signaal-ruisverhouding hoger dan 50, georganiseerd in een netwerk van basislijnen. Ondergrond vormt het gemiddelde amplitudebeeld 20 interferogrammen van Hangu, China. Bij een groter aantal beelden wordt de detectiedrempel van stabiele reflectoren lager, waardoor een hogere punt dichtheid kan worden bereikt.*



gemiddelde punt dichtheid bij typische waterpassings- of GPS-metingen, waardoor optimaliseren minder belangrijk is dan in een standaard geodetisch netwerk ontwerp. De nauwkeurigheid van de permanent-scatterer-deformatiemetingen is in bepaalde gevallen beter dan 0,1 mm per jaar. De hoge herhalingsfrequentie van nieuwe satellietbeelden leidt tot een tijdige identificatie van een veranderend deformatiepatroon. Dit is bijvoorbeeld belangrijk bij het monitoren van de stabiliteit van individuele gebouwen.

Alhoewel de verzameling van geïdentificeerde permanent scatterers kan worden gezien als een geodetisch toevalsnetwerk, zijn er ook belangrijke verschillen. Zo ontbreekt de sluitfout zoals bekend uit waterpasnetwerken. Dit wordt veroorzaakt doordat waterpassingen hoogteverschilmetingen zijn die in een waterpaskring gesommeerd worden. Hierdoor stapelen meetfouten zich op en dient er vereffend te worden, wat meteen een controle op de metingen vormt. De permanent-scatterers-netwerken zijn in feite kinematische deformatiemetingen, waarbij per punt een deformatiegedrag in de tijd wordt geschat. Ruimtelijk gezien zijn de metingen vergelijkbaar met hoogte- in plaats van hoogteverschilmetingen. De hoogteverschillen zijn afgeleide grootheden van de hoogten en daarom ook niet te vereffenen of te toetsen in kringmetingen.



*Figuur 4. Deformatie van zijde AB in figuur 3 met een lengte van 530 m. De fasewaarnemingen zijn gerepresenteerd in drie ambiguïteitsmogelijkheden. De geschatte lineaire deformatie bedraagt 3 mm per jaar.*

Hier volgt een kort overzicht van de voor- en nadelen van de permanent-scatterers-methode. Voordelen zijn onder andere: (i) de grote punt dichtheid in stedelijke gebieden, (ii) de instantane waarnemingsgreep, (iii) de hoge potentiële nauwkeurigheid van geschatte deformaties, (iv) het grote archief van data, vanaf 1991, (v) de hoge herhalingsfrequentie, die leidt tot gevoeligheid voor bijvoorbeeld seizoensinvloeden, selectieve wateronttrekking, etc, (vi) de potentiële monitorfunctie: ook wanneer er niks deformeert of verzakt kan dat aangetoond worden (dit is belangrijk bijvoorbeeld in relatie met juridische aspecten), en (vii) de relatief lage kosten per

radaropname. De nadelen zijn onder andere: (i) de onzekerheid van de serievoorzetting in verband met de beperkte levensduur van de satelliet, (ii) de beperking in de omvang van het gebied, (iii) succes is niet bij voorbaat verzekerd en dient van geval tot geval te worden bekeken, (iv) de beperking tot gebieden met een behoorlijke dichtheid van infrastructuur of lage vegetatiegraad, (v) de afhankelijkheid van een minimum aantal beelden (dit wordt niet overal ter wereld gehaald), en (iv) de rekentechnische aspecten.

Onderzoeksonderwerpen die kunnen worden geïdentificeerd zijn onder meer (a) het kwantitatief beschrijven van de precisie en betrouwbaarheid van de resultaten, (b) het oplossen van de faseambigüïteiten en het kwantitatief beschrijven van de kwaliteit van de oplossing, bijvoorbeeld met integer kleinstekwadratenmethoden, (c) het opzetten van een toetsingsmethodiek om fouten of afwijkingen in het model (en dus het deformatiegedrag) automatisch te detecteren, (d) het uitbreiden van de techniek voor grotere gebieden, waardoor onder andere atmosfeerschatting moeilijker wordt, (e) het uitbreiden van de toepassingen naar gebieden met een lagere dichtheid van stabiele reflectoren en het analyseren van dit type geïsoleerde reflectoren, (f) de aanscherping van het model voor verdwijnende en bijkomende reflectoren, (g) het doorzetten van de ERS-1- en ERS-2-tijdserie met ENVISAT-data, in principe mogelijk voor een selecte set punten, (h) het optimaliseren van rekenmethoden voor grote datahoeveelheden, en (i) het integreren van de radarmetingen met alternatieve en complementaire technieken.

## 5. Discussie

De definitie van geodetische netwerken zou kunnen worden uitgebreid met *toevalsnetwerken*, netwerken van meetpunten die op onvoorspelbare locaties worden gekozen. Alhoewel dit concept nieuw is in de geodesie, is het statistisch vergelijkbaar met de bekende Monte Carlo-methoden. De inzetbaarheid van deformatie-monitoring met behulp van satelliet-radarinterferometrie en de permanent-scatterers-methode kan redelijk snel worden nagegaan door een beperkt aantal parameters te evalueren. De ontwerpparameters zoals de loodrechte en temporele basislijnen, de radargolflengte en het totale aantal beelden (belangrijk voor de permanent-scatterers-methode) kunnen eenvoudig worden verkregen uit de overzichtsbestanden van data zoals deze door de diverse ruimtevaartorganisaties beschikbaar worden gesteld. De omgevingseigenschappen, zoals atmosfeer, oppervlakedecorrelatie en de verwachte deformatie-eigenschappen zijn moeilijker te voorspellen en worden dan ook stochastisch gemodelleerd. Voorstellen voor InSAR-satellietmissies toegesneden voor deformatiemetingen worden momenteel geëvalueerd door de grote ruimtevaartorganisaties.

## Referenties

1. J.E. Alberda. Planning and optimization of networks: some general considerations. *Bolletino di Geodesia e Scienze Affini*, 2: 209-240, 1974.
2. W. Baarda. Statistical concepts in geodesy. Volume 4 of Publications on Geodesy. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1967.
3. W. Baarda. A testing procedure for use in geodetic networks. Volume 5 of Publications on Geodesy. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 2 edition, 1968.
4. A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212, September 2000.
5. A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20, January 2001.
6. R. Hanssen and A. Ferretti. Deformation monitoring by satellite radar interferometry: Design parameters and environmental factors affecting feasibility. *GIM International*, 16(9): 27-31, September 2002.
7. R.F. Hanssen. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
8. F.R. Helmert. Studien über rationelle Vermessungen im Gebiete der höheren Geodäsie. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 13(73), 1868.
9. P. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin, F.K. Li, S. Madsen, E. Rodriguez and R. Goldstein. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3): 333-382, March 2000.