Bodemdaling Groningen

satelliet radar interferometrie

rapportage behorende bij het meetplan Groningen 2010

NAM EP201203202214

Maart 2012

Inhoudsopgave

Samenvatting 3
1 Introductie 4
2 InSAR 5
2.1 Satelliet missies 5
2.2 Methodologie 6
2.3 Aansluiting deformatie opeenvolgende satelliet missies 7
3 Resultaten 9
4 Validatie 14
4.1 InSAR validatie methodieken 14
4.2 Waterpassing Lauwersmeergebied 14
4.3 Referentie in ruimte en tijd 14
4.4 Evaluatie toetsgrootheden sluittermen 16
5 Conclusies 20
Appendix A Geleverde data 21
Appendix B Precisie en betrouwbaarheid 22
Appendix C Interpretatie van afwijkende tijdseries 29
Referenties 30

Samenvatting

In het herziene meetplan Groningen 2010 (EP201103204917) wordt aangegeven dat in 2011 geen kleine waterpassing wordt uitgevoerd, maar dat in plaats daarvan satelliet radar interferometrie (InSAR) resultaten worden gerapporteerd, die worden gevalideerd aan de hand van de waterpassing in het Lauwersmeergebied in 2011 en de continue GPS metingen in het zelfde gebied (Anjum, Moddergat). De InSAR techniek maakt gebruik van een tijdserie van radar opnames van een satelliet. De meetpunten (Persistent Scatterers, PS) hebben een consistente reflectie in de tijd, en corresponderen voornamelijk met de bebouwing in het terrein. Dit rapport beschrijft de InSAR processing, de berekende deformatie, en de validatie daarvan.

Geconcludeerd kan worden dat de resultaten van de steekproef validatie aantonen dat met InSAR een vergelijkbare nauwkeurigheid te behalen is, ten opzichte van de waterpassingen. InSAR is tevens een veilige techniek, waardoor risico's door meten langs drukke wegen worden uitgesloten.

Om de continuïteit en de kwaliteit van monitoring van bodembeweging met InSAR te waarborgen worden er een aantal aanbevelingen gedaan, waaronder het rapporteren van model aannames tijdens de InSAR processing en de beschrijving van de precisie en de betrouwbaarheid van de resultaten. Ook is het van belang dat er een overlap is tussen verschillende satelliet missies, en dat op de continuïteit wordt geanticipeerd.

Naast de vergelijking van de meettechnieken onderling, zijn de deformatie tijdseries boven het Groningen gasveld vergeleken met de prognose volgens (NAM,2010). De InSAR techniek biedt mogelijkheid om de bodembeweging regelmatig te updaten en potentiële afwijkingen nauwlettend te monitoren.

1 Introductie

In het herziene meetplan Groningen 2010 (EP201103204917) wordt aangegeven dat in 2011 geen kleine waterpassing wordt uitgevoerd, maar dat in plaats daarvan (in overleg met SodM) InSAR resultaten worden gerapporteerd, die worden gevalideerd aan de hand van een steekproef met een onafhankelijke meettechniek. In het Lauwersmeergebied is in 2011 een waterpassing uitgevoerd. Omdat het Lauwersmeergebied en Groningen in hetzelfde InSAR beeld liggen, en bovendien continue GPS metingen (Moddergat, Anjum) worden uitgevoerd, is dit gebied als steekproef gekozen voor de validatie van de InSAR resultaten. De focus ligt hierbij op de berekende deformatie uit Envisat waarnemingen (dalende baan 2003-2010, klimmende baan 2006-2010), aangezien deze het grootste deel van de periode bestrijken tussen de laatste waterpassing boven het Groningen gasveld en de geplande kleine waterpassing in 2011. Om de representativiteit van de validatie middels een steekproef voor een groot gebied te evalueren, worden de resultaten ook beoordeeld ten opzichte van het gemiddelde gedrag van de InSAR meetpunten (Persistent Scatterers, PS) in de omgeving van het referentiepunt voor Groningen (het ondergrondse merk 000A2080 bij Gasselte).

Dit rapport beschrijft de analyse resultaten van de bodembeweging over noordoost Nederland berekend op basis van radar satelliet metingen (InSAR), alsmede de resultaten van de validatie op basis van de waterpassing in het Lauwersmeergebied.

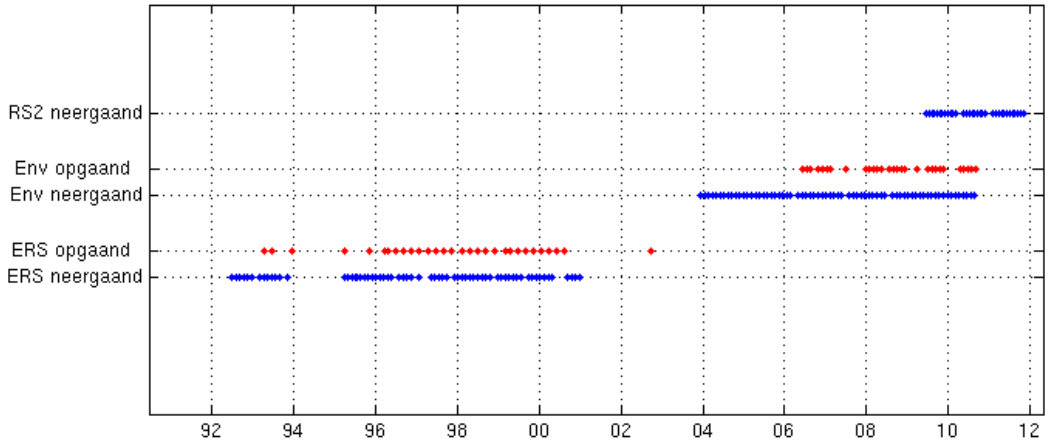
Voor het Groningen gasveld worden tevens de deformatie tijdseries van de meettechnieken (InSAR, waterpassen) getoond ten opzichte van de prognose volgens (NAM,2010).

2 InSAR

In de InSAR techniek wordt gebruikt gemaakt van een tijdserie van radar opnames van een satelliet. De meetpunten (Persistent Scatterers, PS) hebben een consistente reflectie in de tijd, en corresponderen voornamelijk met de bebouwing in het terrein. De bodembeweging van de Persistent Scatterers wordt berekend uit de faseverschil waarnemingen tussen de verschillende opnames in de tijdserie.

2.1 Satelliet missies

In noordoost Nederland is vanaf 1992 satelliet data opgenomen door achtereenvolgens ERS-1, ERS-2, Envisat, en Radarsat-2. Figuur 1 toont de bemonstering in de tijd.



Figuur 1: Bruikbare satelliet opnames in de tijd: ERS-1, ERS-2, Envisat, Radarsat-2. In blauw de opnames vanuit de dalende baan, in rood de opnames vanuit de klimmende baan.

Voor de continuïteit van de monitoring is het van belang dat satelliet missies op elkaar aansluiten. Tabel 1 toont een overzicht van de satelliet missies in de tijd. De continuïteit in de toekomst dient te worden gewaarborgd door ESA's Sentinel-1 missie, de opvolger van Envisat.

Satellite	Repeat interval (days)	<2006	2006	2007	2008	2010	2011	2012	2013	2014	>2014
ERS-1	35										
ERS-2	35										
Envisat	35										
Radarat-1	24										
Radarsat-2	24										
Radarsat-2 constellation (3)	12										
Sentinel 1a, 1b	12										
TerraSAR-X	11										

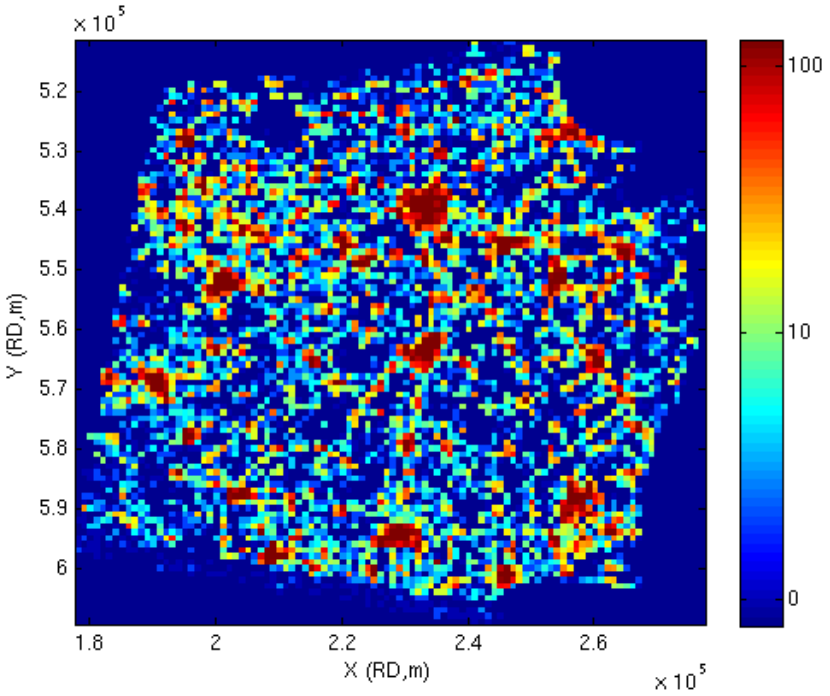
TanDEM-X	11										
Cosmo Sky-Med (4)	16										
JERS-1	44										
ALOS PALSAR	46										

Tabel 1: Overzicht satelliet interferometrie missies.

2.2 Methodologie

De Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) analyse voor noordoost Nederland is uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft als onderdeel van het InSAR onderzoeksproject 2009-2013 in samenwerking met NAM.

De kracht van PS-InSAR ligt in de ruimtelijke en temporele dichtheid, gebruikmakende van natuurlijke, d.w.z. niet speciaal voor dit doel geconstrueerde, objecten in het terrein. De opname frequentie vanuit een enkele satellietbaan is 24 dagen voor Radarsat-2 en 35 dagen voor Envisat. De PS dichtheid varieert van 0-25 PS/km^2 in het landelijke gebied tot meer dan 100 PS/km^2 in het stedelijke gebied.



Figuur 2: PS dichtheid (aantal PS per km^2) in noordoost Nederland voor Radarsat-2.

De waarnemingen in de PS-InSAR analyse worden gevormd door interferometrische faseverschillen tussen PS. Het berekenen van de deformatie, alsmede de foutenbronnen zoals atmosferisch signaal, gebeurt in een geodetisch netwerk. De belangrijkste stappen in deze procedure zijn:

1. Selectie PS ‘kandidaten’ op basis van amplitude dispersie (verhouding tussen de standaardafwijking en het gemiddelde van de amplitudes in de beschikbare SAR beelden).

2. Constructie 1e orde PS netwerk, oplossen waarnemingsvergelijkingen per zijde om de deformatie te bepalen, inclusief het schatten van de meerduidigheden (aantal gehele golflengtes).
3. Detectie en verwijderen van sluitfouten.
4. Schatten en verwijderen van atmosferisch signaal.
5. Verdichting in het 2e orde PS netwerk, herhaling van stappen 2 en 3.

Hiernaast zijn de volgende additionele stappen doorlopen:

- Het schatten en verwijderen van een ruimtelijke trend uit de berekende deformatie voor Envisat (op basis van de data zelf).
- Het verwijderen van PS waarvan de berekende bodembewegingssnelheid niet ruimtelijk correleert met naburige PS. Eveneens zijn de tijdseries beoordeeld op ruimtelijke consistentie.

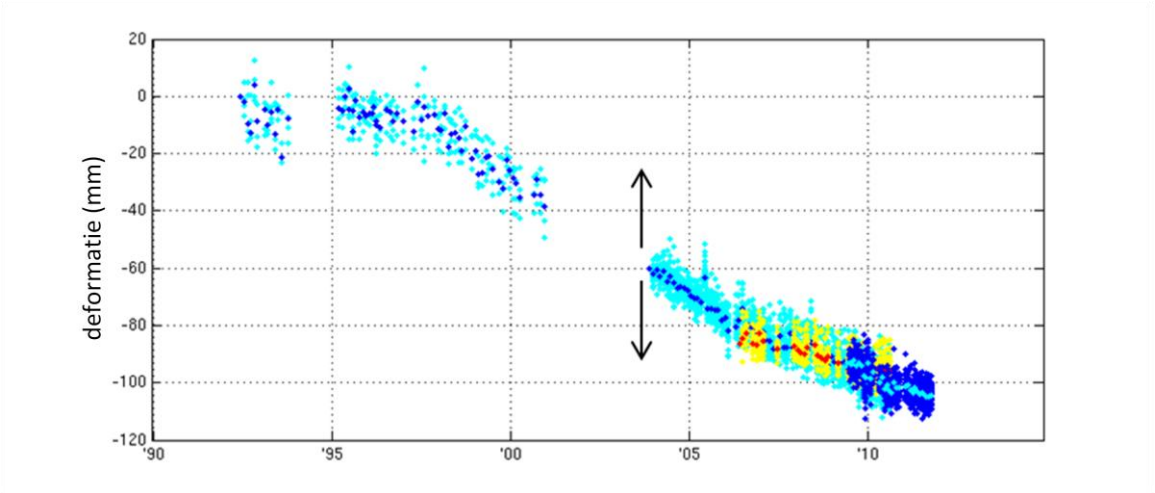
Verder heeft een decompositie van de snelheden uit de klimmende en dalende baan van Envisat plaatsgevonden in verticale en horizontale richting. Door de relatief kleine horizontale bewegingen ligt het effect in de kijkrichting en de verticaal in de orde van nauwkeurigheid van de meettechniek (een beweging van 3 mm/jaar in de horizontale richting vertaalt zich naar een beweging van ~1 mm/jaar in de satelliet kijkrichting). De gerapporteerde Envisat deformatie is naar de verticaal geconverteerd zonder correctie voor horizontale bewegingen. Op deze wijze kan de deformatie per opname tijdstip worden gerapporteerd, en hoeft er niet te worden geïnterpoleerd.

De berekende deformatie heeft een basis transformatie ondergaan, zowel in ruimte als in tijd. In de ruimte wordt dit impliciet al gedaan door het verwijderen van de ruimtelijke trend uit de berekende deformatie op basis van een gebied dat buiten de invloedssfeer van de delfstoffenwinning ligt. In de tijd is geconverteerd van het opname tijdstip van het InSAR ‘master’ beeld (referentie bij de processing) naar het tijdstip van de eerste acquisitie.

De geleverde data wordt beschreven in Appendix A. Een nadere beschrijving van de precisie en betrouwbaarheid van de berekende deformatie uit InSAR waarnemingen is te vinden in Appendix B.

2.3 Aansluiting deformatie opeenvolgende satelliet missies

De berekende deformatie uit waarnemingen van verschillende satellieten hebben een verschillende referentie in ruimte en tijd. Alleen de radar beelden van ERS-1 en ERS-2 kunnen direct worden gecombineerd op basis van de fase waarnemingen. Voor de overige satellieten betekent dit, dat alleen gecombineerd (aangesloten) kan worden op het niveau van de berekende deformatie. Tussen ERS en Envisat ontbreekt zo’n overlappende periode, en zijn de tijdseries op elkaar aangesloten onder de aanname van een vloeiend gedrag in de tussenliggende periode. Hier zit echter een mate van onzekerheid in. De tijdseries van Envisat ten opzichte van ERS kunnen dus mogelijk een additionele offset hebben en moeten als dusdanig worden geïnterpreteerd. De betrouwbaarheid van de InSAR monitoring wordt aanzienlijk verhoogd, indien er wel een overlap in tijd is tussen de verschillende satellietmissies. Daarom is NAM medio 2009 al begonnen met het opbouwen van een Radarsat-2 tijdserie, waardoor er ruim een jaar overlap bestaat tussen Envisat en Radarsat-2. Omdat de monitoringsperiode van een bodemdalingssignaal vaak groter is dan de duur van een satellietmissie, is het essentieel om in de toekomst telkens op een overlap in de tijd te anticiperen.



Figuur 3: Door het ontbreken van een overlap in de tijdserie tussen ERS en Envisat, kan de berekende deformatie alleen worden aangesloten onder de aanname van een vloeiend verloop in de tijd (polynoom). De Envisat en Radarsat-2 tijdseries kunnen dus mogelijk enkele millimeters hoger of lager liggen.

3 Resultaten

Deze paragraaf toont de berekende deformatie (InSAR, waterpassen, GPS) voor een select aantal gebieden. Het betreft hier 5 locaties boven de velden Moddergat, Nes en Anjum en 2 locaties in het verwachte diepste gedeelte van de Groningen bodemdalingskom:

A. Nes (dorp)
B. Moddergat (locatie)
C. Moddergat (dorp)
D. Anjum (dorp)
E. Anjum (locatie)
F. Groningen I
G. Groningen II

Alle overige tijdseries in evaluatie gebieden boven het Groningen gasveld en in het validatie gebied zijn als figuren aangeleverd (zie Appendix A).

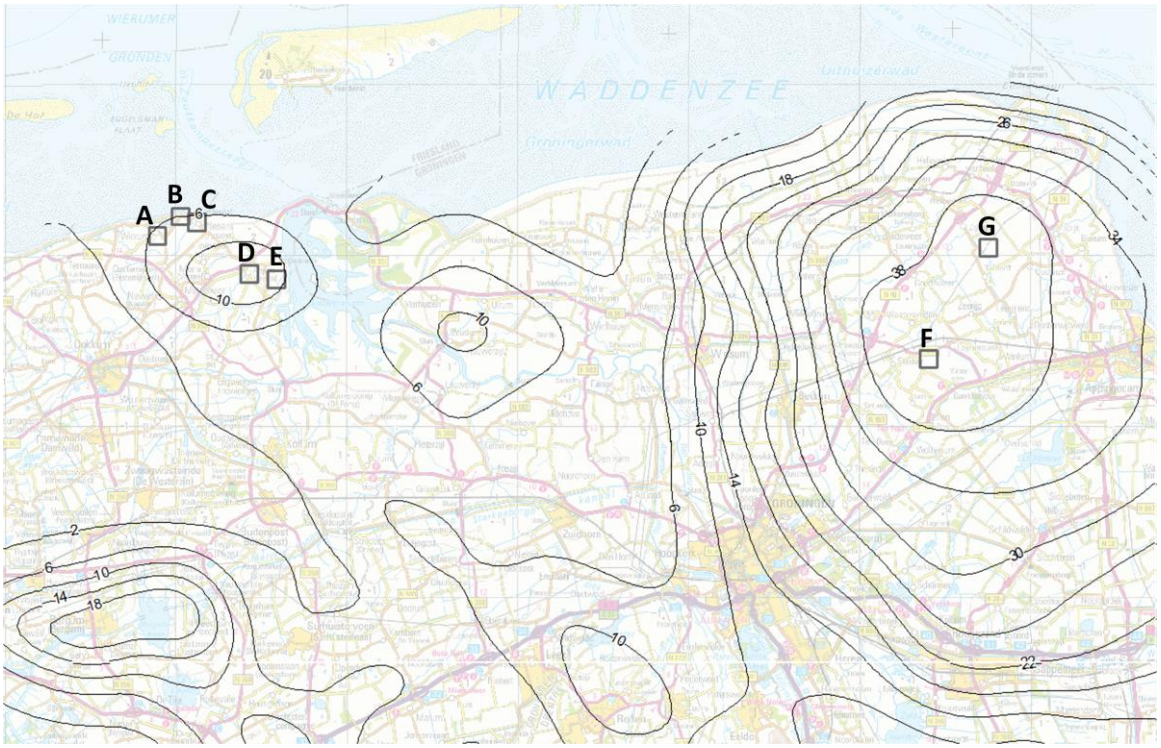
Voor het Groningen gasveld zijn er twee evaluatie gebieden (F en G), omdat de prognose uitwijst dat er twee meest dalende gebieden te vewachten zijn (I en II). Voor deze twee gebieden wordt tevens de prognose volgens (NAM,2010) getoond.

Omdat er verschillende referenties zijn in ruimte en tijd tussen de verschillende meettechnieken, moeten de tijdseries worden aangesloten. Hierbij worden de InSAR resultaten van de verschillende satelliet missies eerst intern gekoppeld. Tussen de InSAR tijdseries van ERS en van Envisat/Radarsat-2 is er een ‘time gap’. De offset die is berekend voor de Envisat/Radarsat-2 tijdserie is dus enkel op basis van de InSAR data gedaan, op basis van een vloeiend verloop van de bodembeweging (wat een logische aanname is voor het Groningen gasveld bij ongewijzigd productiebeleid). Bij het interpreteren van de tijdseries moet daarom rekening worden gehouden met het feit dat de InSAR tijdserie na 2003 in zijn geheel iets hoger of lager kan liggen (zie ook Figuur 3).

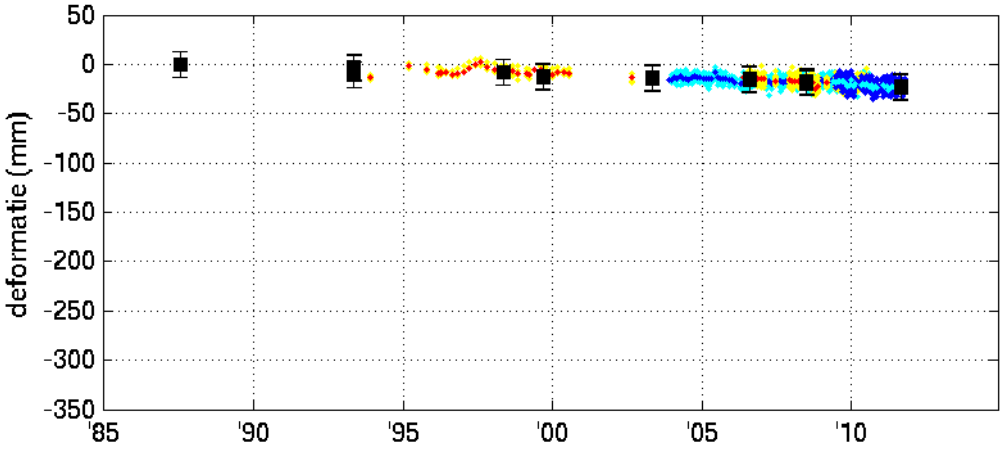
Samengevat is de procedure om de tijdseries van waterpassen en InSAR op elkaar aan te sluiten als volgt:

1. ERS en Envisat worden aangesloten onder de aanname van een vloeiend verloop (polynoom) van de bodembeweging in de periode 2001-2003. Radarsat-2 wordt in de overlap (2009-2010) aangesloten op de berekende deformatie uit de dalende baan van Envisat.
2. De InSAR tijdserie wordt aangesloten op de waterpas tijdserie (offset).

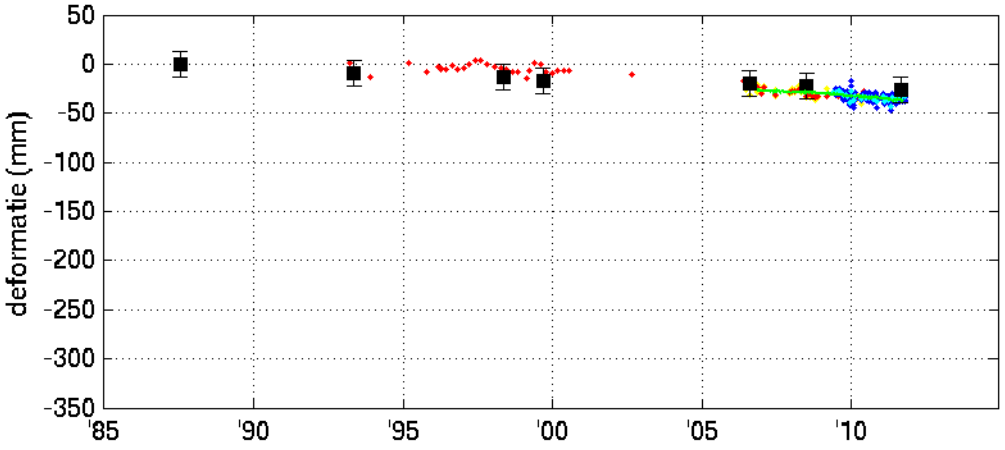
Voor de tijdseries boven het Groningen gasveld is de berekende deformatie op het eerste tijdstip van meting vervolgens nog aangesloten op de prognose.



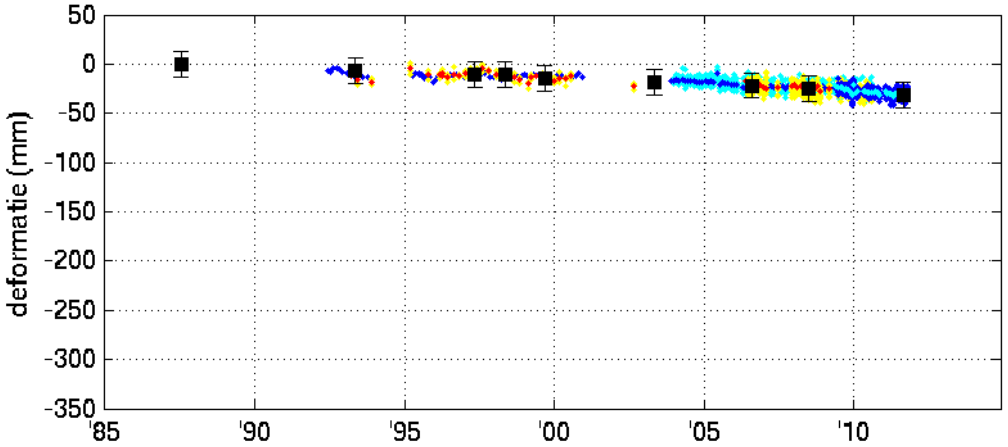
Figuur 4: Evaluatie gebieden nabij Lauwersmeer en in het Groningen bodemdalingsgebied. De contouren geven de verwachte bodemdaling in 2025 weer.



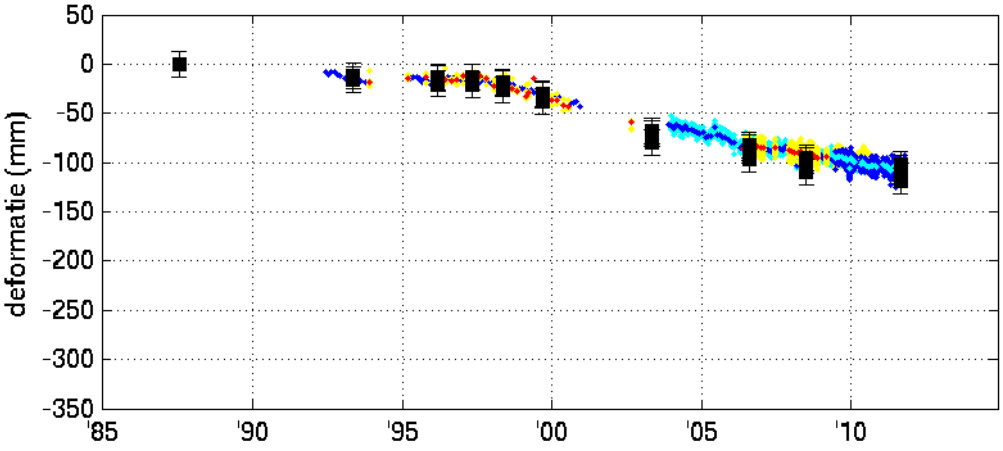
Figuur 5: A, Nes. Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen.



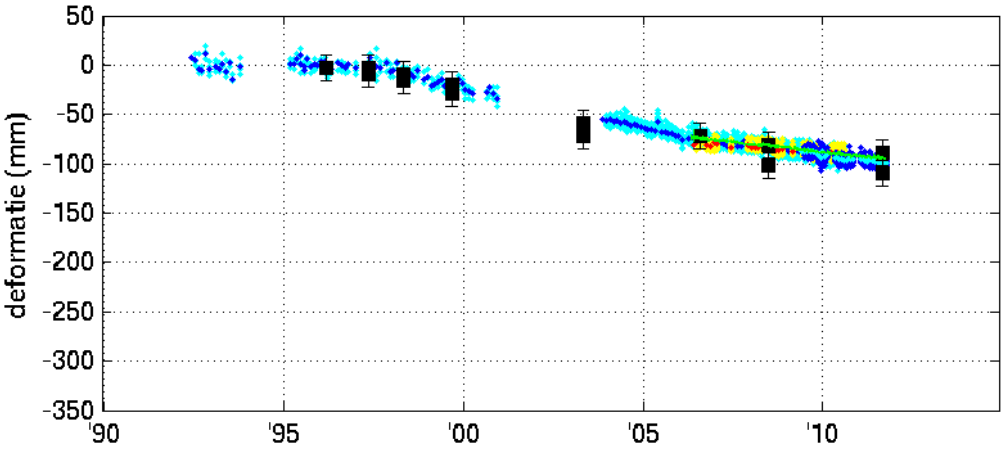
Figuur 6: B, Moddergat (locatie). Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen. Groen: GPS.



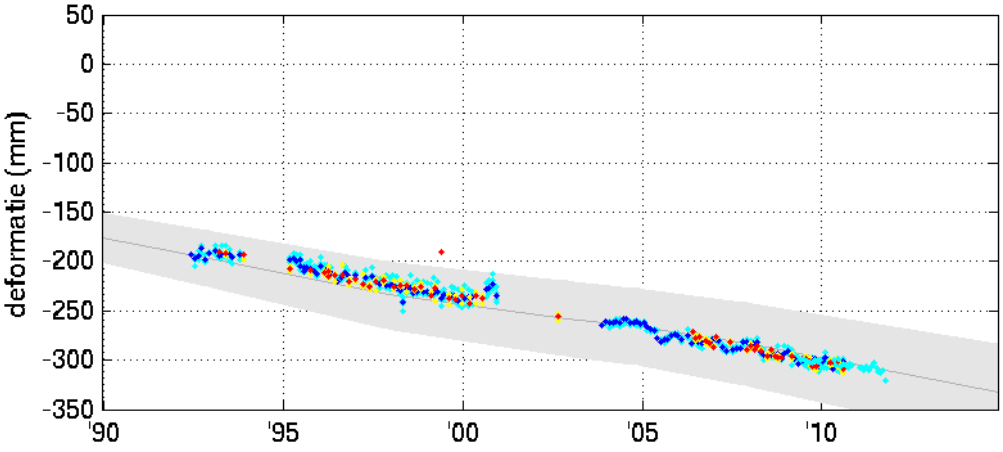
Figuur 7: C, Moddergat (dorp). Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen.



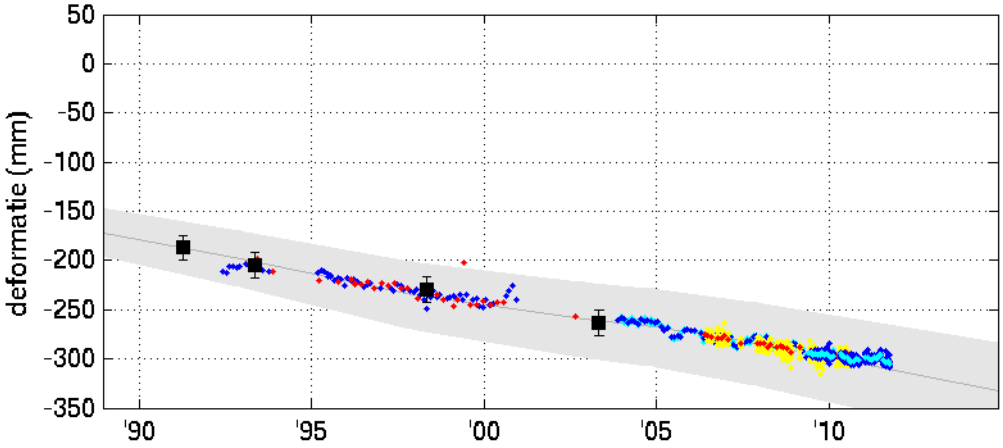
Figuur 8: D, Anjum (dorp). Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen.



Figuur 9: E, Anjum (locatie). Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen. Groen: GPS.



Figuur 10: F, Groningen, meest dalende gebied prognose (I). Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. De grijze band geeft de marge van de prognose aan binnen het evaluatiegebied, inclusief de onzekerheid.



Figuur 11: G, Groningen, meest dalende gebied prognose (II). Licht- en donkerblauw: PS tijdseries dalende baan en gemiddelde. Geel en rood: PS tijdseries klimmende baan en gemiddelde. Zwart: hoogteverschillen waterpassingen. De grijze band geeft de marge van de prognose aan binnen het evaluatiegebied, inclusief de onzekerheid.

In alle evaluatiegebieden komt de berekende bodembeweging uit waterpassingen, GPS, en InSAR overeen binnen de precisie marges.

4 Validatie

4.1 InSAR validatie methodieken

Bij InSAR wordt enkel de fractionele fase waargenomen; het gehele aantal golflengten is onbekend. Omdat het systeem van waarnemingsvergelijkingen hierdoor onderbepaald is, is de betrouwbaarheid van berekende deformatie geodetisch gezien afhankelijk van:

- de afstand tussen de meetpunten (scatterers),
- de temporele bemonstering,
- de verwachte deformatie gradiënt in ruimte en tijd.

De spatio-temporele frequentie van InSAR waarnemingen in combinatie met de lage bodemdalingssnelheden in noord Nederland zorgen ervoor dat het bodemdalingssignaal voldoende bemonsterd wordt.

Om verdere overtalligheid in de monitoring in te bouwen zijn er de volgende mogelijkheden:

1. overbemonstering van het bodemdalingssignaal in ruimte en tijd,
2. bemonstering door tijdseries uit meerdere onafhankelijke overlappende satellietbanen.

Eveneens kan de betrouwbaarheid van de InSAR resultaten aangetoond worden door de volgende validatie methodieken:

1. Een steekproef gebied laten processen door een ander, daarvoor gecertificeerd, bedrijf.
2. Een steekproef gebied valideren met een andere onafhankelijke meettechniek.
3. Aangetoonde overeenkomst met een andere onafhankelijke meettechniek op basis van historische data (bij ongewijzigd winningsplan, of waarbij een herzien winningsplan geen effect heeft op het verloop van de bodembeweging).

Bij al deze drie validatie opties, moet rekening worden gehouden met de nauwkeurigheid van de betrokken meettechniek(en).

Zoals in paragraaf 1 wordt beschreven, is in dit geval gekozen om een steekproef gebied te valideren met een andere onafhankelijke meettechniek. De InSAR resultaten voor Groningen worden gevalideerd aan de hand van de waterpassing en de continue GPS metingen in het Lauwersmeergebied.

4.2 Waterpassing Lauwersmeergebied

Voor de waterpassingen is een vrije netwerk vereffening uitgevoerd per epoche (met de software MOVE3). Per epoche is getest op uitschieters, maar identificatiefouten en autonome bewegingen van peilmerken kunnen niet worden gedetecteerd. In de vrije netwerk vereffening wordt één peilmerk als basis vastgehouden.

De laatste waterpassing is uitgevoerd in 2011; de resultaten zijn gerapporteerd in het meetregister (NAM, 2012).

4.3 Referentie in ruimte en tijd

De waarnemingen in de waterpassing zijn de hoogteverschillen tussen peilmerken, die in opeenvolgende epochen gemeten worden. Na een geodetische vereffenings- en toetsingsprocedure in de tijd, worden de berekende hoogtes gerapporteerd ten opzichte van een referentie epoche (nulmeting) en een referentie peilmerk. Het referentie peilmerk voor het Lauwersmeergebied is 006B0021, gesitueerd in de kerk van Driesum. Het referentie peilmerk voor het Groningen gasveld is het ondergrondse merk bij Gasselte, 000A2080. De coördinaten

van deze referentie punten staan in Tabel 2. Ze liggen op een onderlinge afstand van ongeveer 60 kilometer.

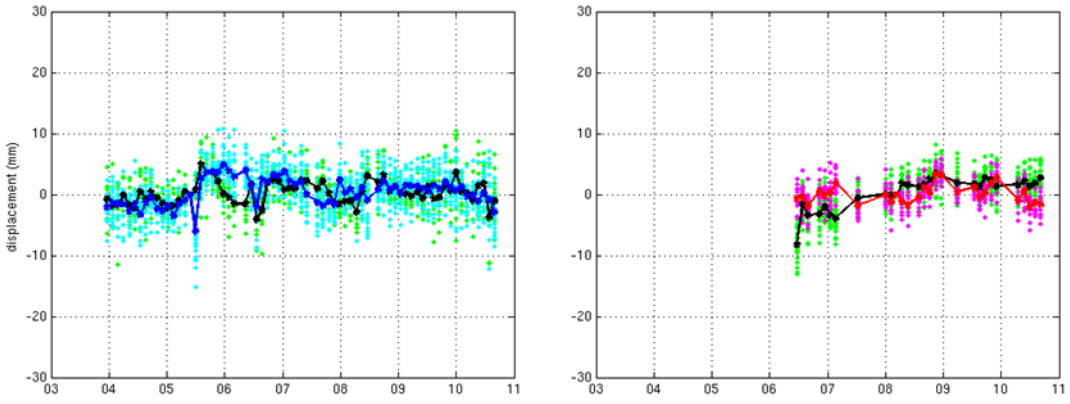
	X-coordinaat (m)	Y-coordinaat (m)
000A2080	249080	554750
006B0021	198930	590320

Tabel 2: Coordinaten (RD, m) van de referentiepunten 006B0021 (Lauwersmeergebied) en 000A2080 (Groningen).

Ook InSAR is een relatieve techniek, zowel in ruimte als in tijd. In de InSAR processing wordt een 'master' beeld gekozen als referentie. Deze wordt dusdanig gekozen dat de temporele en geometrische decorrelatie zoveel mogelijk wordt beperkt. Voor de rapportage van de berekende deformatie per opname tijdstip, wordt de referentie in tijd geconverteerd naar het eerste tijdstip van bemonstering.

In de PS-InSAR processing wordt het referentiepunt in het midden van het beeld gekozen. In feite maakt het niet uit welk referentiepunt wordt gekozen. Bij het verwijderen van ruimtelijke trends uit de deformatie in de post-processing wordt de referentie impliciet het gemiddelde van de beweging in het stabiel verondersteld gebied. Daarom is het eigenlijk niet nodig om vervolgens nog een keer naar een ander referentiepunt te transformeren, tenzij de berekende deformatie op een zeer lokaal niveau wordt geëvalueerd.

Figuur 12 toont de berekende deformatie uit InSAR binnen een straal van 1 kilometer van de referentiepeilmerken 000A2080 en 006B0021, zowel voor de dalende als de klimmende baan. De standaard afwijking van de berekende deformatie rond de nullijn is ongeveer 3 millimeter. Het maakt dus niet uit of 006B0021 of 000A280 als referentie worden gekozen. Na het verwijderen van ruimtelijke trends uit de InSAR data zijn de resultaten consistent over een groot gebied. Bij de klimmende baan is te zien dat de InSAR tijdserie rondom 000A2080 begint met een kleine 'uitschieter'. Dit heeft echter wel een gevolg voor de snelheid, die is hierdoor 1.5 mm/jaar, terwijl de snelheden uit de andere tijdseries rond 0.2 mm/jaar liggen.



Figuur 12: Gemiddelde deformatie schattingen van alle PS binnen straal van een kilometer van peilmerk 000A2080 (zwart) en peilmerk 006B0021 (blauw, rood), voor de dalende (links) en klimmende (rechts) baan.

4.4 Evaluatie toetsgrootheden sluittermen

De vergelijking tussen de bodembeweging berekend uit InSAR en waterpasmetingen is gedaan op bestaande peilmerk locaties, voor de periode 2006-2011.

Om de berekende deformatie uit InSAR en waterpassingen direct te kunnen vergelijken, is de deformatie uit InSAR geconverteerd van de satelliet kijkrichting naar de verticaal, onder de aanname dat er geen horizontale deformatie is. De fout die gemaakt wordt door de horizontale component te verwaarlozen ligt in de orde van 1 mm/jaar. Dit is in de orde van de precisie van de berekende deformatie, maar geeft wel aan dat een combinatie van beelden uit de klimmende en dalende banen krachtiger is, zowel voor de betrouwbaarheid als de oplosbaarheid van ruimtelijke componenten. Als alternatief zou gekeken kunnen worden naar de mogelijkheid om door projectie van de bodemdalingsprognose naar de satelliet kijkrichting een directe vergelijking te maken met de deformatie berekend uit InSAR waarnemingen. In dat geval zou met een tijdserie uit één satellietbaan kunnen worden volstaan om de consistentie tussen metingen en bodemdalingsprognose aan te tonen.

De overeenkomst tussen de berekende deformatie uit waterpassingen en InSAR wordt op twee manieren bepaald: door middel van de correlatie coëfficiënt en de toetsgrootheden (NAM, 2008).

De correlatie coëfficiënt geeft de lineaire samenhang aan tussen de berekende deformatie uit InSAR en de waterpassingen. Alhoewel de correlatie coëfficiënt een goede indicatie geeft van de overeenkomst tussen beide technieken, is deze invariant voor schaal en offset. Daarom worden tevens de geodetische toetsgrootheden bepaald en vergeleken met hun theoretische verdeling.

De toetsgrootheden worden berekend uit de sluittermen, $\underline{t}$, tussen de deformatie schattingen $\underline{d}_{PSI}$ en $\underline{d}_{lev}$ van beide technieken en hun precisie (Q_y):

$$\underline{t} = B^T \underline{y} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{d}_{PSI} \\ \underline{d}_{lev} \end{bmatrix} \quad ; \quad Q_y = \begin{bmatrix} \sigma_{PSI}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{lev}^2 \end{bmatrix}.$$

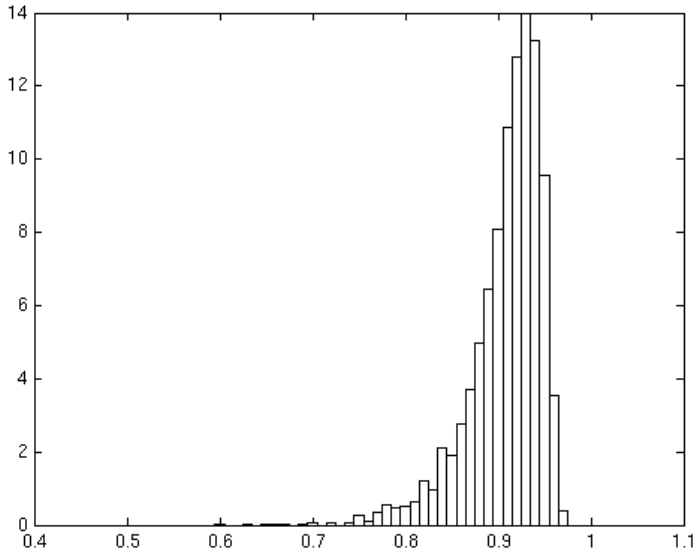
De histogrammen van de toetsgrootheden worden vergeleken met hun theoretische chi-kwadraat verdeling.

$$\underline{T}_{q=1} = \underline{t}^T Q_t^{-1} \underline{t} \quad \sim \chi^2(1,0).$$

De toetsgrootheden worden per evaluatie locatie bepaald. Dit houdt in dat in het evaluatie gebied per peilmerk locatie de bodembeweging uit InSAR berekend wordt op basis van het gewogen gemiddelde van alle PS binnen een straal van 500 m. De standaardafwijking van de berekende deformatie uit InSAR heeft twee componenten: de meetprecisie en het effect van kleine systematische effecten, waarbij rekening wordt gehouden met de correlatie tussen de deformatie schattingen. In het onderzoeksproject 2009-2013 wordt gewerkt aan een uniforme precisiebeschrijving (Samiei Esfahany, 2011).

De temporele data dichtheid van InSAR is veel groter dan die van de waterpassingen. Hiervan wordt gebruik gemaakt door een constante bodemdalingssnelheid te bepalen voor de periode 2006-2011. De berekende deformatie heeft dan een hogere precisie dan wanneer het verschil tussen de deformatie op een begin en eind tijdstip zou worden berekend. Omdat de aanname van lineaire snelheid slechts bij benadering geldt in het Lauwersmeergebied (bepaalde velden zijn in de periode 2006-2011 in productie genomen), is de berekende deformatie op basis van zowel een constante snelheid als het verschil tussen twee tijdstippen met de resultaten van de waterpassingen vergeleken.

Voor de waterpas techniek wordt de deformatie per peilmerk bepaald uit het verschil in hoogte tussen de epochen 2006 en 2011, die als ongecorreleerd worden beschouwd. Zowel de waterpas als de InSAR techniek hebben een bepaalde nauwkeurigheid. Dit betekent dat de correlatie coëfficiënt tussen onafhankelijke waterpassingen niet gelijk is aan 1. De te behalen correlatie coëfficiënt kan door middel van simulaties worden bepaald, waarbij waterpasmetingen tussen peilmerken worden gegenereerd op basis van de bodemdalingsprognose voor het Lauwersmeer gebied en de precisie van de waterpassingen (1 mm/√km). Figuur 13 geeft aan dat een correlatie tussen de 0.6 en 0.95 te verwachten is. Dit is de te verwachten correlatie enkel op basis van de meetprecisie; er is geen rekening gehouden met de fysiek verschillende meetpunten en eventuele peilmerk instabiliteit. Dat de te verwachten correlatie lager ligt dan voor het Groningen gasveld over een periode van 5 jaar komt doordat de te verwachten bodembeweging in het Lauwersmeergebied lager is (de signaal-ruis verhouding ligt lager).



Figuur 13: Verdeling van de verwachten correlatie uit onafhankelijke waterpassingen in het Lauwersmeergebied op basis van de meetprecisie.

Zoals is aangegeven in paragraaf 4.3, worden de resultaten getoond voor de volgende ruimtelijk referenties:

I. Geen additionele basistransformatie.
II. Transformatie naar het gemiddelde PS gedrag in een straal van 1 kilometer rond het peilmerk 006B0021 (kerk Driesum).
III. Transformatie naar het gemiddelde PS gedrag in een straal van 1 kilometer rond het peilmerk 000A2080 (ondergrondse merk Gasselte).

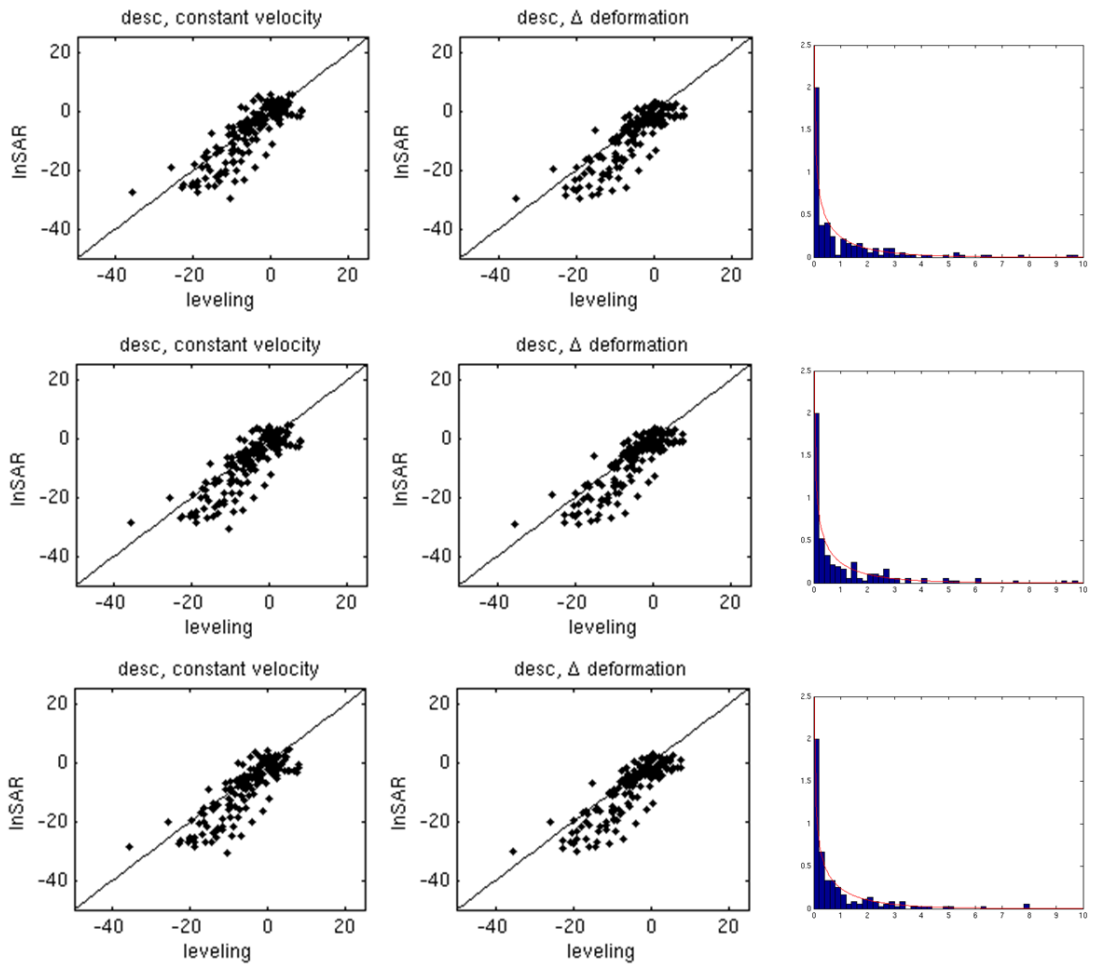
Tabel 3 toont de gemiddelde standaardafwijking van de deformatie (mm) in de periode 2006-2011 voor de verschillende referenties.

Referentie	waterpassen	Envisat dalende baan	Envisat klimmende baan
Geen transformatie		3.3	4.0
006B0021	3.7	3.2	4.1
000A2080		3.4	4.1

Tabel 3: Precisie deformatie (mm) uit InSAR en waterpassen voor de periode 2006-2011.

Figuur 14 toont de correlatie en de toetsgrootheden voor de berekende deformatie tussen 2006 en 2011 uit de dalende baan. De toetsgrootheden zijn alleen berekend op peilmerklocaties waarop zowel Envisat (tot eind 2010) als Radarsat-2 waarnemingen (vanaf medio 2009) beschikbaar waren.

De verschillende referenties in ruimte geven dezelfde resultaten, en de toetsgrootheden passen bij hun theoretische verdeling. De correlatie tussen InSAR en waterpassen is 85%, en komt overeen met wat uit onafhankelijke waterpassingen kan worden behaald (waarbij nog geen rekening is gehouden met fysiek verschillende meetpunten en mogelijke peilmerkinstabiliteit).



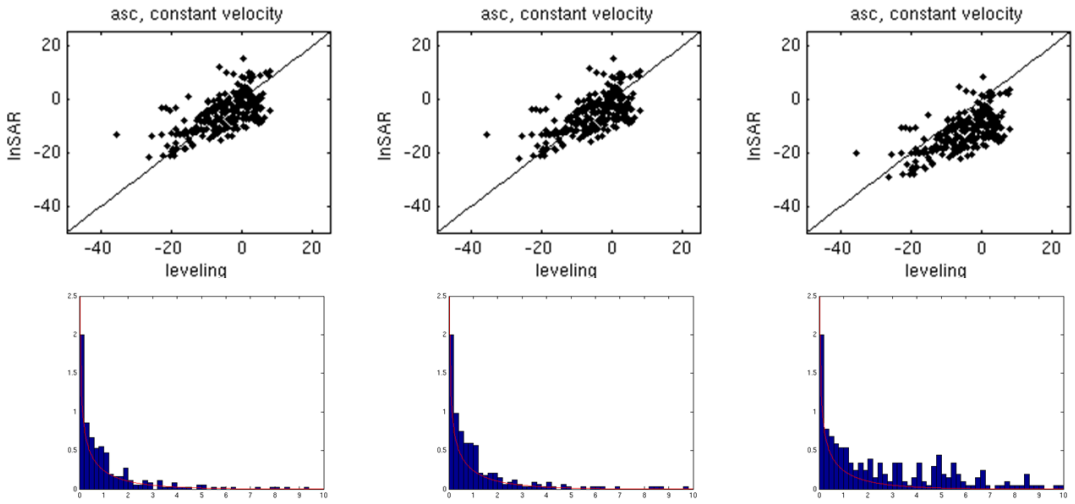
Figuur 14: Correlatie tussen berekende deformatie uit de dalende baan (Envisat en Radarsat-2) en waterpassen in de periode 2006-2011 (links – op basis van constante snelheid, midden – verschil tussen twee tijdstippen) en de toetsgrootheden met hun theoretische verdeling (rechts). De referentie in ruimte is als volgt: geen additionele basistransformatie (boven), referentie 006B0021 (midden), referentie 000A2080 (onder). De correlatie coefficient is 0.85.

Figuur 15 toont de correlatie tussen berekende deformatie uit de klimmende baan (Envisat) en de waterpassingen. Omdat alleen tot september 2010 Envisat opnamen beschikbaar zijn, is een extrapolatie uitgevoerd op basis van de aanname van een constante snelheid in de periode 2006-2011. De overeenkomst tussen InSAR en waterpassen is minder dan voor de dalende baan, maar voor de referenties I en II passen de toetsgrootheden bij hun theoretische verdeling. Na

basistransformatie naar het gemiddelde PS gedrag binnen een straal van 1 kilometer rond peilmerk 000A2080, vertoont de deformatie uit InSAR een offset van 7 mm ten opzichte van de waterpassingen. Op basis van de resultaten in Figuur 12 was dit te verwachten. Deze offset van 7 mm komt terug in alle toetsgrootheden, waardoor ze systematisch iets hoger zijn. Hierbij dient te worden opgemerkt dat het waterpasnetwerk wel een lokaal referentiepunt heeft, en dat dergelijke afwijkingen door foutenvoortplanting in waterpasnetwerken over afstanden van 60 kilometer ook van deze orde zijn. De correlatie tussen berekende deformatie uit de klimmende baan met waterpassen is 67%, en ligt op de grens van wat te verwachten is uit onafhankelijke waterpassingen.

Verder is bekeken of het het onbinden in ruimtelijke componenten een significante verbetering geeft voor de overeenkomst tussen InSAR en waterpassen. Dit blijkt niet het geval te zijn, de correlatie is 84%.

De overeenkomst tussen InSAR en waterpassen is iets minder voor de klimmende baan, in vergelijking met de dalende baan. Dit is verklaarbaar door de kleinere tijdserie (effect op nauwkeurigheid van de berekende atmosferische verstoringen), en de twee time gaps van een half jaar (effect op de oplosbaarheid van de meerduidigheden). Dit laatste is overigens te voorkomen door het veiligstellen van opnamen vanuit operationeel oogpunt.



Figuur 15: Correlatie tussen berekende deformatie uit de klimmende baan en waterpassen in de periode 2006-2011 (boven – op basis van constante snelheid) en de toetsgrootheden met hun theoretische verdeling (onder). De referentie in ruimte is als volgt: geen addtionele basistransformatie (links), referentie 006B0021 (midden), referentie 000A2080 (rechts). De correlatie coefficient is 0.67.

Over het geheel genomen kan worden geconcludeerd dat de nauwkeurigheid van de berekende deformatie uit InSAR vergelijkbaar is met die uit waterpassingen. Zoals de tijdseries in paragraaf 3 aangeven, geeft de hoge temporele bemonstering meer inzicht in de ontwikkeling van de bodembeweging. Alle overige tijdseries in de evaluatie gebieden in het validatie gebied zijn als figuren aangeleverd (zie Appendix A).

5 Conclusies

- De resultaten van de steekproef validatie tonen aan dat met InSAR een vergelijkbare nauwkeurigheid te behalen is ten opzichte van waterpassing.
- Om de continuïteit en de kwaliteit van monitoring van bodembeweging met InSAR te waarborgen is het wel van belang dat:
    - de aannames in de InSAR processing expliciet worden beschreven,
    - de mogelijk foutenbronnen en hun effect op de berekende deformatie worden beschreven,
    - er een overlap in tijd is tussen opeenvolgende satellietmetingen zodat de deformatie tijd series op elkaar kunnen worden aangesloten,
    - indien horizontale bewegingen een significant effect hebben op de verticale beweging, is bemonstering vanuit twee verschillende kijkhoeken nodig (klimmende en dalende baan),
    - geanticipeerd wordt op toekomstige satellietmissies aangezien een tijdserie van SAR beelden moet worden opgebouwd.

  Tegelijkertijd dient het netwerk van waterpas peilmerken met enige regelmaat gecontroleerd te worden. Dit netwerk dient geschikt te blijven als terugval optie bij uitval van satellieten.
- Om de betrouwbaarheid van InSAR aan te tonen zijn er de volgende mogelijkheden:
  1. overbemonstering van het bodemdalingssignaal in ruimte en tijd,
  2. bemonstering door tijdseries uit meerdere onafhankelijke satellietbanen,
  3. InSAR processing van een steekproef door een ander, daarvoor gecertificeerd, bedrijf,
  4. het valideren van een steekproef gebied met een onafhankelijke meettechniek,
  5. het aantonen van overeenkomst met een onafhankelijke meettechniek op basis van historische data (bij ongewijzigd productiebeleid volgens winningsplan).

  In dit geval is gekozen voor het valideren van een steekproef gebied met onafhankelijke meettechnieken (waterpassen, GPS). De intentie van NAM is om deze opzet ook in 2013 toe te passen in het gebied dat in noord Nederland door InSAR wordt gemonitord.
- De visualisaties van de tijdseries boven het Groningen gasveld tonen aan dat er geen significante afwijkingen zijn van de prognose volgens (NAM, 2010). De InSAR techniek biedt mogelijkheid om de bodembeweging regelmatig te updaten en potentiële afwijkingen nauwlettend te monitoren.
- InSAR is een veilige techniek. Door een grotere inzet van deze techniek kunnen risico’s door meten langs drukke wegen aanzienlijk worden gereduceerd.

Appendix A Geleverde data

1. Berekende deformatie uit Envisat waarnemingen

De relatieve double-difference deformatie (mm) uit de InSAR processing (geconverteerd naar de verticaal) in de vorm van een differentiestaat.

Envisat_desc_NL.txt
Envisat_asc_NL.txt

Formaat:

puntnummer, X-coördinaat(RD,m), Y-coördinaat(RD,m), berekende deformatie per opname tijdstip (mm)

N.B.: omdat het relatieve deformatie betreft, kan de gerapporteerde deformatie van de klimmende en de dalende baan op hetzelfde tijdstip niet direct met elkaar worden vergeleken. Op het tijdstip van de eerste opname is de deformatie op 0 gezet. Voor de klimmende baan is dit in 2006; voor de dalende baan in 2003. De verschillen in de deformatie *tussen* twee tijdstippen kunnen wel met elkaar vergeleken (alhoewel de opname data verschillen).

2. Tijdseries validatiegebied

Visualisaties van de deformatie tijdseries (mm) op basis van waterpassen, InSAR en GPS voor het validatiegebied. De evaluatiegebieden hebben een afmeting van 500 bij 500 m.

3. Tijdseries Groningen gasveld

Visualisaties van de deformatie tijdseries (mm) van InSAR en waterpassen in vergelijking met de prognose (status rapport 2010) voor het Groningen gasveld. De evaluatiegebieden hebben een afmeting van 2 bij 2 km.

Uit de waterpasresultaten zijn autonome dalers verwijderd. Alleen de peilmerken die op basis van de gemeten hoogteverschillen naar naburige punten als ‘stabiel’ konden worden aangemerkt, zijn afgebeeld in de tijdseries.

Opgemerkt dient te worden, dat de bodemdalingskom van het Groningen gasveld in het zuiden overlapt met twee kleinere bodemdalingskommen als gevolg van de zoutwinning in Veendam en Heiligerlee. Hier zal de bodemdaling afwijking van de prognose van de bodemdaling als gevolg van de gaswinning.

Appendix B Precisie en betrouwbaarheid

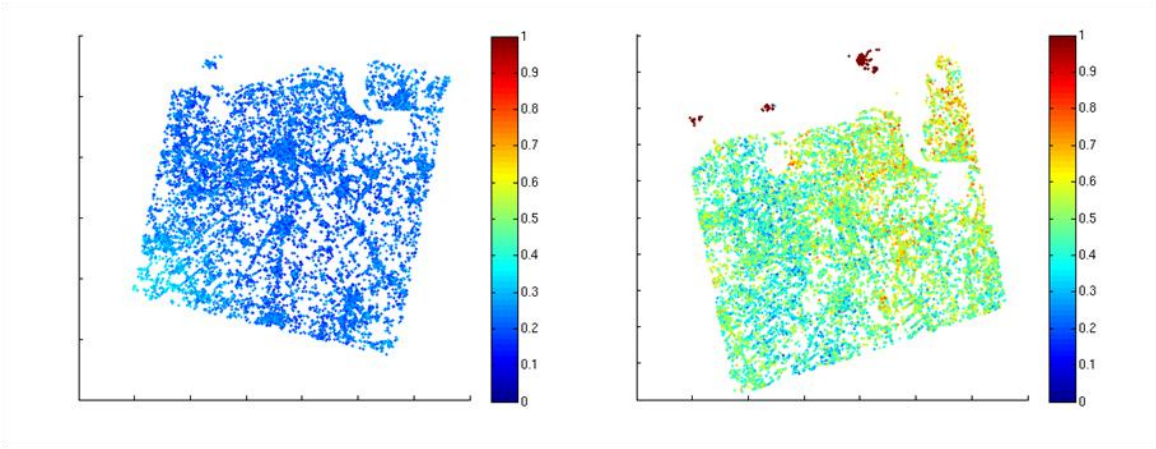
Deze paragraaf geeft een beschrijving van de precisie en betrouwbaarheid van de berekende bodembeweging op basis van InSAR, alsmede de wijze van PS selectie.

1. Precisie

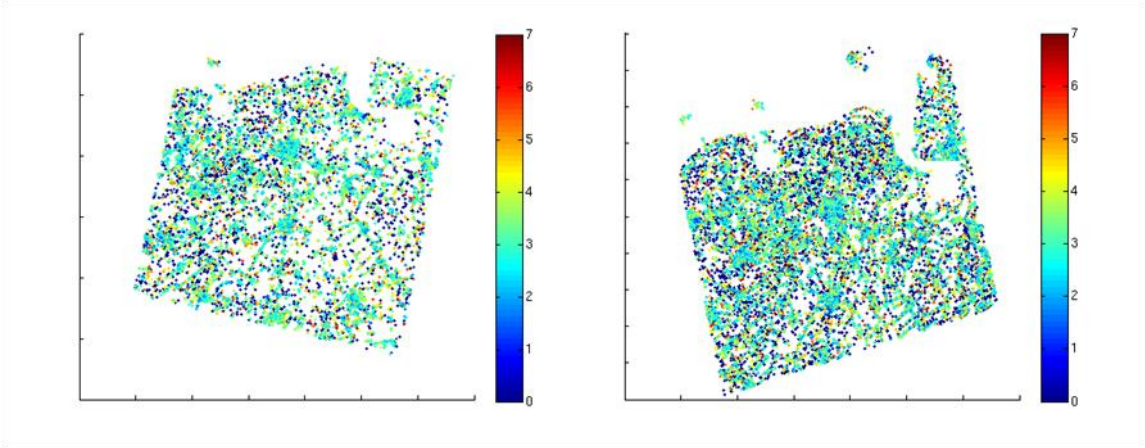
Wat betreft de precisie wordt een onderscheid gemaakt tussen eerste orde PS en twee orde PS. De eerste orde PS zijn de objecten met de hoogste precisie. Ze zijn geselecteerd op basis van hun consistente reflectiepatroon, op basis van de genormaliseerde amplitude dispersie (standaard afwijking van de sterkte van de reflectie in de tijd gedeeld door de gemiddelde reflectie), die gerelateerd is aan de precisie van de fasewaarnemingen. De fasewaarnemingen van de eerste orde PS worden gebruikt om de atmosferische verstoringen te schatten. Vervolgens wordt het PS netwerk verdicht met tweede orde PS.

Figuur 16 en Figuur 17 tonen de precisie van de bodemdalingssnelheden ten opzichte van het centrale referentie punt in mm/jaar en de relatieve precisie van berekende deformatie per epoche in mm voor Envisat.

De relatieve precisie van de berekende deformatie (per epoche) in stedelijke gebied met een hoge PS dichtheid is ≤3 mm. In landelijke gebieden is de relatieve precisie afhankelijke van de afstanden tussen de PS, en varieert tussen de 3 en 7 mm. De precisie van de snelheden zijn redelijk consistent, alhoewel ze iets aflopen naarmate de afstand tot het referentiepunt groter wordt, vergelijkbaar met waterpassen. Deze precisie houdt geen rekening met mogelijk kleine systematische effecten, en de representativiteit van de deformatie voor het bodembewegingssignaal waarin men geïnteresseerd is.



Figuur 16: Precisie berekende snelheden (mm/jaar) ten opzichte van het referentie punt (midden) voor de dalende (links) en klimmende (rechts) baan. De precisie van de snelheden in de dalende baan is hoger, omdat de periode langer is en het aantal beelden groter is (atmosferische verstoringen kunnen nauwkeuriger worden bepaald en verwijderd).



Figuur 17: Precisie deformatie (per epoche, mm) ten opzichte van het dichtstbijzijnde PS uit het eerste orde netwerk voor de dalende (links) en klimmende (rechts) baan.

2. Betrouwbaarheid

Satellietbeelden

Alle opnamen zijn beoordeeld op mogelijke onnauwkeurigheden in de satellietbanen en de kwaliteit van de coregistratie met het 'master' beeld. Hierdoor zijn uit de tijdseries van de dalende en de klimmende baan respectievelijk 2 en 1 beelden verwijderd, wat nauwelijks effect heeft op de eindresultaten.

Systematische effecten

Naast de precisie moet rekening worden gehouden met systematische effecten en parameters die niet meegeschat worden in het mathematisch model (zoals de subpixel positie), die de nauwkeurigheid beïnvloeden (Ketelaar, 2009). Tabel 1 geeft een overzicht van deze effecten. De onnauwkeurigheid in de satelliet banen veroorzaakt een trend in de resultaten over een groot gebied. Het effect van de subpixel positie in azimuth kan worden gereduceerd door een middeling van naburige scatterers uit te voeren, ervan uitgaande dat de subpixel positie willekeurig verdeeld is.

Parameter	**Effect op snelheid**
Subpixel positie, azimuth	0-0.5 mm/jaar
Subpixel positie, range	-
Sidelobe waarnemingen	-
Banen, σ 8 cm across track (ERS)	+/- 0.5 mm/jaar over 100 km
Banen, σ 5 cm radial (ERS)	+/- 1 mm/jaar over 100 km

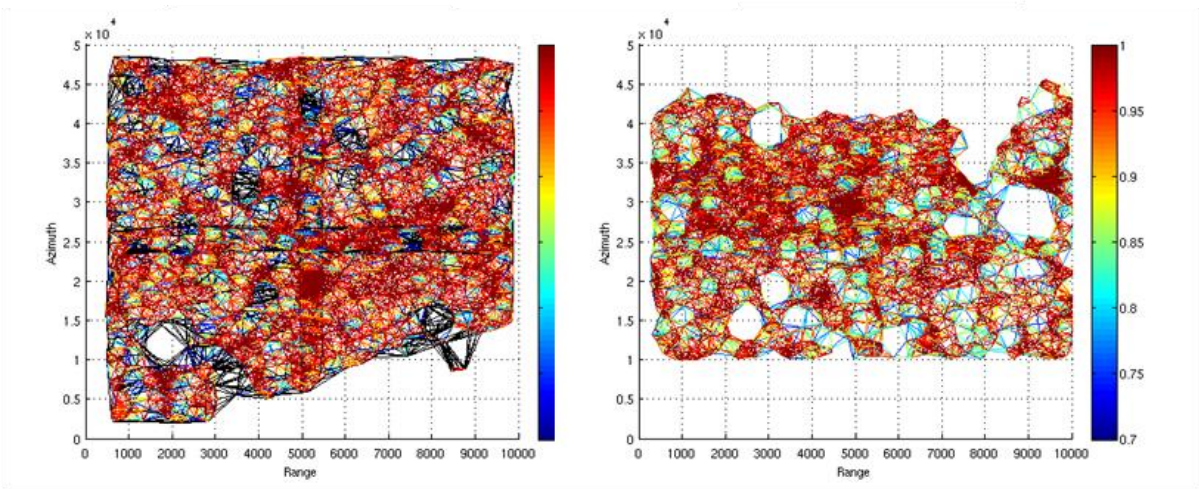
Tabel 4: Effect van systematische fouten en kleine onnauwkeurigheden op de berekende snelheid.

Meerduidigheden

Verder kunnen de meerduidigheden in de fasewaarnemingen mogelijk fouten introduceren (alleen de fractionele fase kan worden gemeten, niet het aantal gehele golflengten). De meerduidigheid in de berekende deformatie houdt in, dat deze een geheel aantal keren de halve golflengte (bij C-band ongeveer 28 mm) hoger of lager kan liggen. Naarmate het

bodembewegingssignaal beter bemonsterd wordt in ruimte en tijd, en de fase waarnemingen preciezer zijn, kunnen de atmosferische verstoringen beter worden geschat en verwijderd, en zal de correcte oplosbaarheid van de meerduidigheden toenemen. De oplosbaarheid van de meerduidigheden wordt geparameteriseerd als ‘success rate’, welke een waarde aanneemt tussen 0 en 1 (correcte oplossing). Figuur 18 toont de oplosbaarheid van de meerduidigheden in het eerste orde netwerk. Alhoewel een 100% correcte oplossing niet kan worden gegarandeerd in landelijke gebieden, is de ‘success rate’ van de oplossing voor de overgrote meerderheid van de basislijnen ~1. Bij lange basislijnen liggen de ‘success rates’ lager, maar in werkelijkheid zullen deze hoger zijn, omdat een netwerk toetsing wordt uitgevoerd en foutieve basislijnen worden verwijderd.

Voor de gasvelden in noord Nederland speelt met name de ruimtelijke dichtheid een rol. Omdat het bodemdalingssignaal in de orde van mm/jaar ligt, is de temporele bemonstering ten opzichte van de meerduidigheid (28 mm) dusdanig, dat in de tijd de oplosbaarheid zeer hoog is.



Figuur 18: Oplosbaarheid meerduidigheden (‘success rates’) in het eerste orde PS netwerk voor de dalende (links) en klimmende (rechts) baan. Hier worden de ‘success rates’ per basislijn tussen twee PS weergegeven. Voor het overgrote deel van de basislijnen kunnen de meerduidheden correct worden opgelost (de ‘success rates’ zijn 1).

Atmosferische verstoringen en residuele deformatie

Het aantal beelden van de verschillende satelliet tracks varieert. Dit heeft gevolgen voor de precisie van de berekende deformatie, door de manier waarop atmosferische verstoringen in PS-InSAR bepaald worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat atmosferisch signaal ongecorreleerd is in de tijd. De atmosfeer in de ‘master’ acquisitie van de tijdserie wordt berekend uit het gemiddelde van de interferogrammen. Hierdoor is de schatting van het atmosferisch signaal in een kleine tijdserie vaak minder nauwkeurig. De dalende baan van Envisat bevat aanzienlijk meer opnames (68) dan de klimmende baan (29), en daardoor kunnen de atmosferische verstoringen in de klimmende baan minder nauwkeurig worden bepaald.

Na verwijdering van het atmosferisch signaal van het ‘master’ beeld worden de residuele PS faseverschillen van de overige beelden gesplitst in atmosferisch signaal en residuele deformatie (dit is de niet-lineaire defromatie in geval van een lineair model). Het is hierbij van belang dat de temporele correlatielengte dusdanig wordt gekozen, dat er geen residueel deformatie signaal weggefilterd wordt. Dit is te vergelijken met de lengte van een ‘moving-average window’. Is de lengte van het window klein, dan blijft alle residuele deformatie behouden, maar zal door het relatief lage aantal beelden in de middeling het atmosferisch signaal minder goed gefilterd

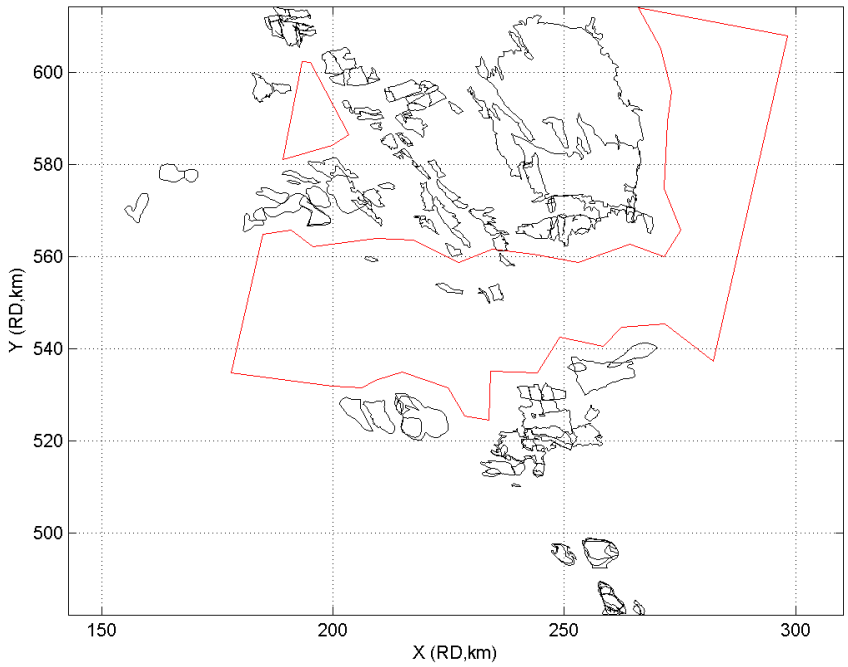
worden. Is de lengte van het ‘moving-average window’ te lang, dan is het risico aanwezig dat residuele deformatie onterecht verwijderd wordt.

Om te voorkomen dat bij het verwijderen van de atmosfeer ook (residueel) deformatie signaal wordt verwijderd, wordt de correlatie lengte van de bodemdalingssignaal in de tijd relatief laag gehouden (1 jaar). Het gevolg hiervan is, dat de precisie van de berekende deformatie wat lager is, maar dat temporele variaties worden behouden. In de klimmende baan leidde dit echter tot uitschieters bij de opname in juli 2007, welke een ‘time gap’ heeft van respectievelijk 5 en 6 maanden met de voorgaande en opvolgende opname. Dit komt omdat er tijdens het onderzoeksproject in de periode 2003-2007 voorrang werd gegeven aan andere partijen, die data in een andere opname modus wensten. De processing van de Envisat tijdserie uit de klimmende baan is daarom opnieuw uitgevoerd met een correlatie lengte van 3 jaar voor het bodemdalingssignaal. Het veiligstellen van opnamen in de juiste, consistente, modus heeft in de afgelopen jaren vanuit operationeel oogpunt prioriteit gekregen, waardoor grote ‘time gaps’ na 2007 zijn voorkomen.

Ruimtelijke trends

Uit de analyse van meerdere tracks is gebleken, dat er over een afstand van 100 kilometer ruimtelijke trends in de deformatie(snelheden) kunnen zitten. De ruimtelijke trends zijn bij Envisat groter dan bij ERS.
Aangezien een enkele InSAR track een gebied van 100 bij 100 kilometer beslaat, is het mogelijk om de ruimtelijk trends te schatten uit de data zelf. Voorwaarde hiervoor is dat het merendeel van het door de InSAR track bedekte gebied stabiel is, of dat stabiel veronderstelde regio’s kunnen worden geïdentificeerd. De trends in de berekende deformatie voor Envisat en Radarsat-2 zijn bepaald op basis van de gemarkeerde gebieden in Figuur 19 (waarbij een toetsingsprocedure wordt uitgevoerd, zodat gebieden die toch dalen niet worden meegenomen in de berekening). Een verbetering van het verwijderen van de trends in de Radarsat-2 resultaten zou in de toekomst mogelijk nog kunnen worden gehaald uit het expliciet schatten van baanfouten.

De aanwezigheid van trends is overigens niet beperkt tot InSAR: ook de hoogtes uit waterpassingen kunnen onderhevig zijn aan ruimtelijke trends door foutenvoortplanting in het waterpasnetwerk.



Figuur 19: Het rood omlijnde gebied is het stabiel veronderstelde gebied dat gebruikt is om eventuele trends uit de berekende deformatie uit InSAR te verwijderen.

Multi-track analyse

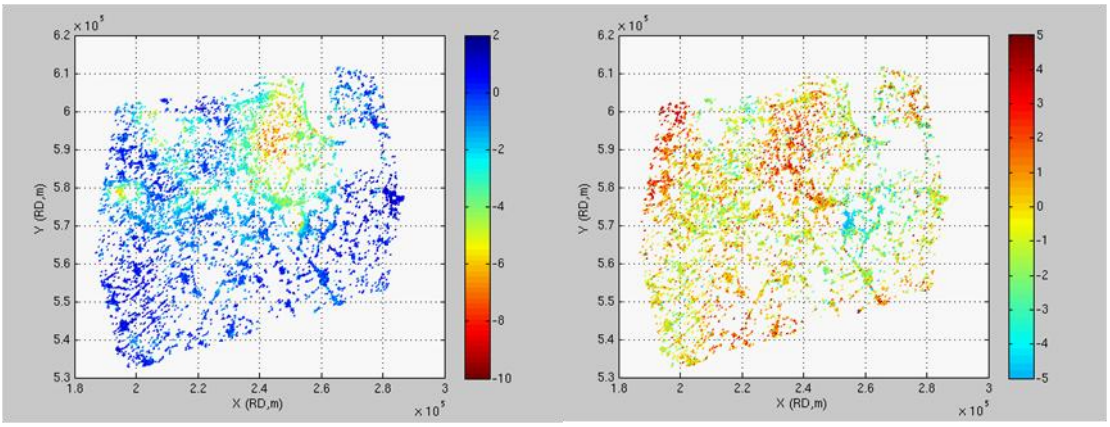
Het gebruik van meerdere tijdseries uit onafhankelijke overlappende satellietbanen geeft een mogelijkheid om de resultaten te valideren. Het verschil tussen de snelheden uit de klimmende en dalende baan van Envisat heeft een standaardafwijking van 1.5 mm/jaar, waarbij snelheden in de straal van 1 km zijn gemiddeld. Indien alleen naar gebieden buiten de invloedssfeer van de gaswinning wordt gekeken, is de standaardafwijking van het verschil in snelheden tussen de klimmende en dalende baan 0.6 mm/jaar.

Ruimtelijke componenten

Behalve ter verhoging van de betrouwbaarheid kunnen onafhankelijke tijdseries uit banen met een verschillende kijkhoek ook worden gebruikt om te ontbinden in een horizontale en verticale component. Figuur 20 toont de ontbinding van de snelheden uit de klimmende en dalende baan van Envisat, op locaties van naburige scatterers. De horizontal component is in de kijkrichting van de klimmende baan. Door de verschillende monitoringsperiodes van de klimmende baan (2006-2010) en de dalende baan (2003-2010) kunnen er kleine afwijkingen zijn in gebieden waar de snelheden niet constant kunnen worden verondersteld. De berekende horizontale bewegingen liggen in de orde van enkele millimeters per jaar. Een soortgelijk patroon als in Figuur 20 is ook voor ERS berekend (Ketelaar, 2009).

Het effect van een horizontale beweging op de deformatie in de kijkrichting van de satelliet schaalt met de sinus van de invalshoek. Bij een horizontale beweging van 3 mm/jaar en een invalshoek van 23º (Envisat) is het verschil 1 mm/jaar. In deze orde ligt de fout die gemaakt wordt door deformatie in de kijkrichting te converteren naar de verticaal zonder meeneming van de horizontale deformatie. Op basis van de locatie van de kom kan worden bepaald of het over- of onderschatting betreft. Om de consistentie tussen metingen en bodemdalingsprognose aan te tonen, zou als alternatief gekeken kunnen worden naar de mogelijkheid om door projectie van de

bodemdalingsprognose naar de satelliet kijkrichting een directe vergelijking te maken met de deformatie berekend uit InSAR. Hierdoor zou met een tijdserie uit één satellietbaan kunnen worden volstaan, en worden er bovendien geen fouten geïntroduceerd door conversie naar ruimtelijke componenten.



Figuur 20: Ontbinding van de berekende snelheden (mm/jaar) uit de Envisat waarnemingen in verticale richting (links) en horizontale richting (rechts, kijkrichting van de klimmende baan).

Geocoding

Om de geografische locatie te berekenen, zijn de berekende PS hoogtes nodig. Tijdens de processing van de interferogrammen is de interferometrische bijdrage ten gevolg van het SRTM (Shutlle Radar Topography Mission) hoogte model verwijderd . De residuele hoogte van iedere PS ten opzichte van het referentie punt wordt in de PS processing berekend, en heeft een precisie van 0.5-1 m. Om vervolgens de ellipsoidische hoogte van alle PS punten te kunnen berekenen, is tevens de ellipsoidische hoogte van het referentiepunt nodig. Deze wordt samengesteld uit de geschatte hoogte ten opzichte van het maaiveld uit de residuele hoogtes uit de PS processing, en hoogte van het maaiveld bepaald uit laser altimetrie data (Actueel Hoogtebestand Nederland).

De precisie van de geografische locatie van de PS is een combinatie van de resolutie (10x2 m voor Envisat bij een oversampling factor van 2) en het effect van de onzekerheid in de ellipsoïdische hoogte van de PS (1-2 m). De nauwkeurigheid van de geografische locatie van de PS zal daarom in de orde van 10-20 m liggen.

Radarsat-2

Bij de processing van de Radarsat-2 data zijn er moeilijkheden naar voren gekomen op de volgende gebieden:

- nauwkeurigheid van de satellietbanen,
- selectie van PS kandidaten op basis van amplitude dispersie.

De selectie van PS kandidaten en de sterkte van het eerste orde netwerk van PS wordt nog nader geanalyseerd. Naast de amplitude dispersie wordt ook de magnitude van de reflectie gebruikt, wat goede eerste resultaten oplevert. In de geleverde visualisatie van de tijdseries is de berekende deformatie uit Radarsat-2 waarnemingen al opgenomen.

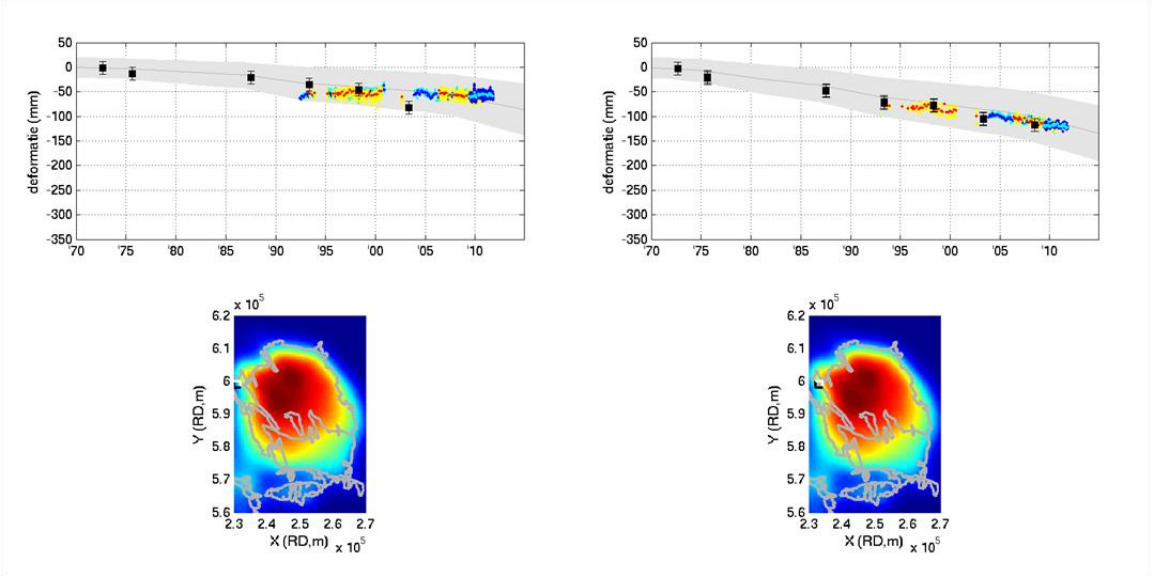
3. PS selectie

De berekende deformatie uit InSAR is niet zonder meer representatief voor de bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning. Alle consistente reflectoren (PS) worden als meetpunten gedetecteerd, en hun beweging is mogelijk een superpositie van deformatie als gevolg van verschillende oorzaken (instabiele fundering, ondiepe en diepe compactie). Ook kan het verschil tussen directe en indirecte reflecties een rol spelen. In (Ketelaar, 2009) worden verschillende mogelijkheden gegeven om PS te selecteren die representatief zijn voor de diepe bodembeweging. In de vergelijking tussen bodemdaling berekend uit waterpassen en InSAR voor het Groningen gasveld wordt een goede overeenkomst behaald, indien PS worden geselecteerd op basis van ruimtelijke correlatie. Ook in deze analyse zijn daarom de PS geselecteerd waarvan de deformatie met naburige punten in overeenstemming is. Hiertoe is eerst de variabiliteit van de berekende snelheden in clusters van naburige punten bepaald. Voor de neergaande baan van Envisat leverde dit een variabiliteit van 0.6 mm/jaar op (1-sigma), voor de opgaande baan 0.75 mm/jaar. Vervolgens is een 2-sigma criterium toegepast om PS met afwijkende snelheden ten opzichte van naburige punten te deselecteren (dus met een verschil in snelheid groter dan 1.2 en 1.5 mm/jaar ten opzichte van het gemiddelde).

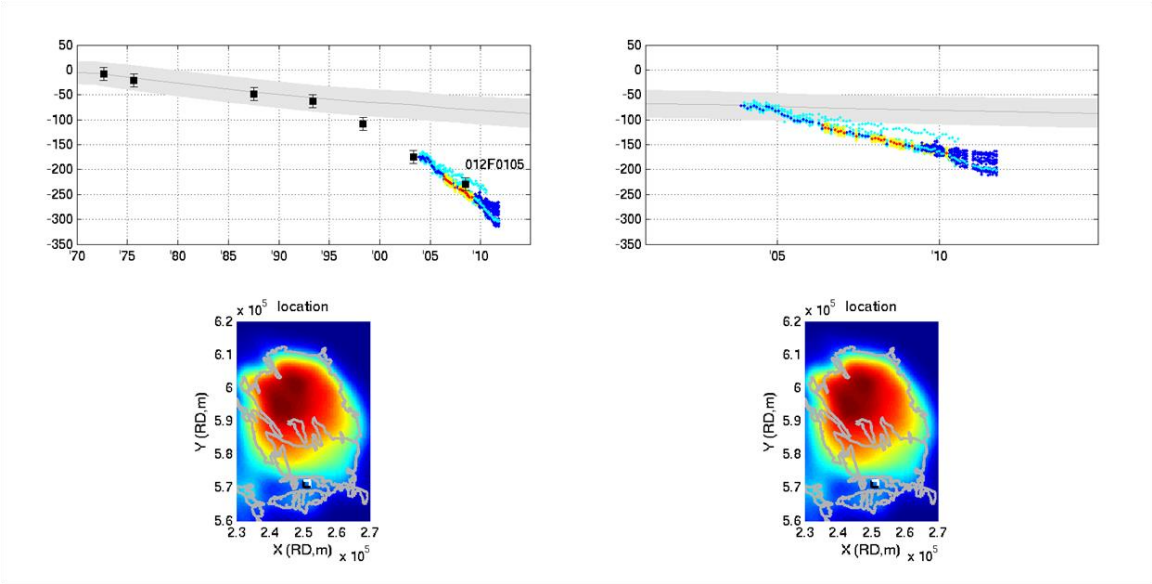
Ook de tijdseries zijn beoordeeld op ruimtelijke consistentie ten opzichte van het gemiddelde van naburige punten. Hierbij zijn PS verwijderd waarbij epochen voorkwamen met afwijkingen van de berekende deformatie die groter waren dan een kwart van de golflengte (14 mm).

Appendix C Interpretatie van afwijkende tijdseries

Deze paragraaf geeft een toelichting voor tijdseries boven het Groningen gasveld waarbij prognose, waterpassen, en InSAR niet volledig in overeenstemming zijn.



Figuur 21: InSAR en waterpassen komen in de laatste periode niet overeen (links). Er kan nog geen uitsluitsel worden gegeven of dit aan het waterpas peilmerk of de InSAR tijdserie (aansluiting tussen ERS en Envisat/Radarsat-2) ligt. De tijdseries in een naburig evaluatie gebied zijn wel in overeenkomst (rechts).



Figuur 22: In dit gebied vindt zoutwinning plaats. Hierdoor wijkt de berekende deformatie af van de prognoses van bodemdaling als gevolg van gaswinning. Omdat de zoutwinning in een relatief klein gebied plaats vindt, is er tevens een groot verloop van de bodemdaling in het evaluatiegebied van 2 bij 2 km. Dit verklaart de grotere spreiding, die voornamelijk zichtbaar is bij Radarsat-2 (en ook in naburige evaluatie gebieden).

Referenties

(NAM, 2008)
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (2008), Bodemdaling Groningen op basis van InSAR waarnemingen 1993-2008, EP200805220295

(Ketelaar, 2009)
Ketelaar, V. (2009), Satellite radar interferometry – subsidence monitoring techniques, Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-402-09427-9

(NAM, 2010)
NAM (2010), Bodemdaling door Aardgaswinning – NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe, september 2010, EP201006302236

(Samiei Esfahany, 2011)
Samiei Esfahany S. and Hanssen R.F., Time-Series InSAR: An Integer Least-Squares Approach for Distributed Scatterers, Proceedings of Fringe 2011, September 2011, Frascati, Italy.

(NAM, 2012)
NAM (2012), Meetregister bij het meetplan Waddenzee – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassen Lauwersmeer 2011, EP201201207051