

Advies groep Economische
Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 30 256 42 56
F +31 30 256 44 75
info-BenO@tno.nl

TNO-rapport

TNO-034-UT-2009-02318/A

PS-InSAR-analyse van de bodemdaling in Noordwest-Friesland

Datum	24 november 2009
Auteur(s)	Mevr. Dr. A.G. Muntendam - Bos Prof. dr. ir. R.F. Hanssen Mevr. Dr. K. van Thienen-Visser Ir. S. Samiei-Esfahany
Opdrachtgever	Ministerie van Economische zaken
Projectnummer	034.20773
Aantal pagina's	116 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2009 TNO

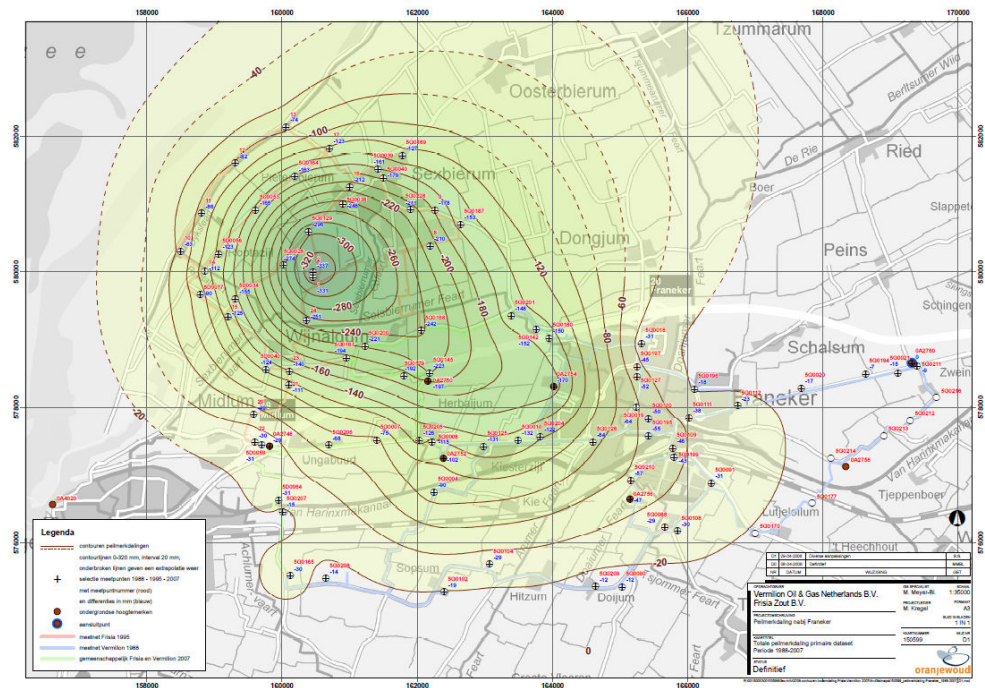
Samenvatting

Inleiding

Ten westen van Franeker wordt door Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V (Vermilion) gas gewonnen uit het Harlingen Boven Krijt (HRL) veld. Deze winning is begonnen in 1988. Frisia Zout B.V. (Frisia) wint zout uit de Barradeel en Barradeel II concessies. De winning via de BAS-1 en BAS-2 oploscavernes ten zuiden van Sexbierum is begonnen in 1995 en loopt nu ten einde. In 2004 is de BAS-3 caverne ten oosten van Sexbierum in gebruik genomen, gevolgd door de BAS-4 caverne ten zuiden van Tzummarum in 2006.

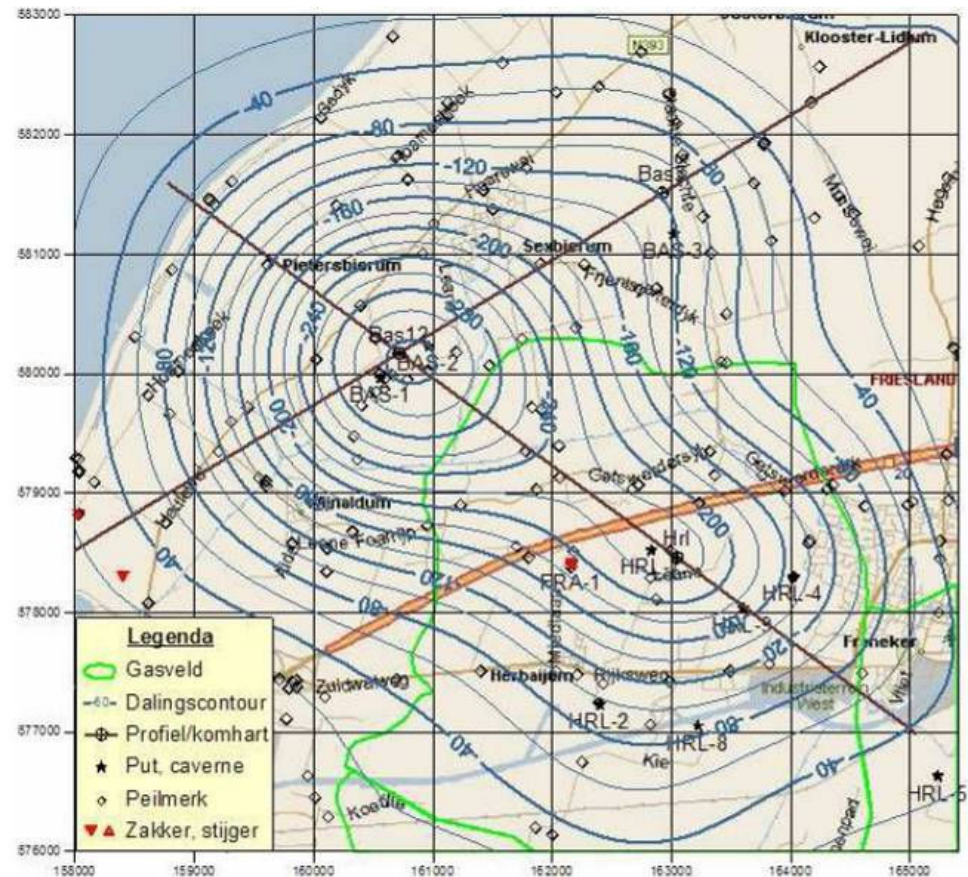
De mijnbouwwetgeving vereist van de mijnbouwonderneming een beschrijving van de te verwachten bodemdaling en metingen om de werkelijke bodemdaling te bepalen en daarmee de verwachtingen te kunnen verifiëren. De gecalibreerde prognoses zijn bepalend voor het nemen van maatregelen om schade door bodemdaling te beperken.

In 2007 heeft Oranjewoud B.V. in opdracht van Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) de omvang en vermoedelijke oorzaken van gemeten peilmerkdaling in Noordwest-Friesland op consistente wijze in beeld gebracht. Hierbij zijn de metingen van de primaire peilmerken opnieuw aangesloten op het NAP-net middels twee stabiele referentiepunten. De op deze wijze verkregen totale peilmerkdaling over 1988-2006 is geanalyseerd en vergeleken met de modelresultaten van de bodemdaling t.g.v. zoutwinning van Frisia (BECi, 2007) en van de bodemdaling t.g.v. de gaswinning van Vermilion (Vermilion, 2007). In 2008 heeft Oranjewoud deze kaart in opdracht van Vermilion en Frisia geactualiseerd met de waterpassingsmeting van 2007. Figuur a geeft de totale peilmerkdaling tussen 1988 en 2007 zoals die in de actualisatie is bepaald.



Figuur a: Totale peilmerkdaling primaire dataset tussen 1988 en 2007 (Oranjewoud, 2008)

De in de Oranjewoud studies gebruikte dataset van primaire peilmerken heeft een zeer slechte bedekking in het gebied tussen Franeker, Herbaijum en de A31. Houtenbos (2008) gebruikt in zijn analyse alle aanwezige peilmerken om de bodemdaling in Noordwest-Friesland vast te stellen (Figuur b). Hoewel de verkregen bodemdaling bij de zoutcavernes consistent is met de studie van Oranjewoud, is de daling boven de gaswinning tussen de A31 en Franeker 4 cm meer dan in de Oranjewoud studie.



Figuur b: Totaal gemeten bodemdaling over de periode 1988-2007 in mm (Houtenbos, 2008).

Aangezien de stabiliteit van de gebruikte additionele peilmerken in dit gebied ter discussie staat heeft Staatstoezicht op de Mijnen TNO de opdracht gegeven om na te gaan of “Persistent Scatterer Interferometry” (PSI) een bijdrage kan leveren aan een beter inzicht in de omvang en laterale verdeling van de bodemdaling in Noordwest-Friesland en de snelheid waarmee de bodemdaling in het gaswinningsgebied bij Franeker verloopt.

Data

Voor deze studie zijn twee InSAR radar datasets gebruikt: 53 beelden van de ERS-2 satelliet tussen 20 april 1995 en 6 oktober 2000 (track 151) en 47 beelden van de Envisat satelliet tussen 15 oktober 2003 en 3 september 2008. Deze data is onderworpen aan de nieuwe PSI verwerkingsmethode ontwikkeld aan de TU Delft om tot een optimale schatting van de bodemdaling en fase-meerduidelijkheden te komen. In de verwerkingsmethode wordt als basis uitgegaan van “steady-state” gedrag (geen of lineaire deformatie); de zogenaamde nulhypothese. Indien de ruimtelijke verdeling van datapunten of het temporele gedrag van de schattingen daartoe aanleiding geeft, of

indien a priori kennis van het zakkingsgedrag beschikbaar is, kan automatisch of manueel worden besloten om deze “nulhypothese” te verwerpen ten faveure van een aangepaste alternatieve hypothese.

De deformatie die door de satelliet aan de meetpunten (scatterers) wordt waargenomen is in de kijkrichting van deze satelliet. Doordat (i) deze kijkrichting zeer stijl is (~23 graden vanuit de verticaal), (ii) er om geotechnische redenen minimale horizontale deformatie wordt verwacht, en (iii) omdat in deze studie maar één van de twee beschikbare satellietposities is geanalyseerd, wordt deze op de verticaal geprojecteerd. Indien horizontale deformatie toch aanwezig is resulteert dit in een fout in de verticaal. Afhankelijk van de horizontale richting van de deformatievector in combinatie met de vliegrichting van de satelliet kan voor elke cm horizontale deformatie een fout van maximaal 4 mm in de geschatte verticaal worden verkregen. Deze fout kan zowel een over- als een onderschatting van het signaal zijn. Indien de horizontale beweging in het verlengde van de kijkrichting van de satelliet ligt zal de verticale beweging bij verwaarlozing van de horizontaal worden overschat. Indien de horizontale beweging tegen de kijkrichting van de satelliet ingaat, zal de verticale beweging ten gevolge van het verwaarlozen van de horizontaal worden onderschat. Parallel aan de bewegingsrichting van de satelliet treedt geen verstoring van de bepaalde verticale beweging op ten gevolge van horizontale deformatie. Indien er in de situatie bij Noordwest-Friesland sprake zou zijn van een significante horizontale deformatiecomponent, en indien de horizontale component gericht zou zijn naar het centrum van de bodemdalingskom, zou dit resulteren in een overschatting van de verticale beweging ten oosten van het midden van de bodemdalingskom en een onderschatting van de verticale beweging ten westen van de bodemdalingskom.

De peilmerkdata komen uit de DID-database (<http://www.rdnap.nl>). Voor deze studie zijn alle data tussen 1992 en 2006 gelegen binnen de coördinaten $X=156.000-170.000$ m en $Y=572.000-584.000$ m (RD-coördinaten in Nieuw-Amersfoort) gebruikt. De datadichtheid is erg verschillend tussen de verschillende meetcampagnes. Het merendeel van de campagnes beslaat maar een gedeelte van het onderzochte gebied. Alleen de secundaire waterpassingscampagnes in 1993, 1998 en 2003 en de Frisia/Vermilion campagne in 2006 hebben een voor het gehele gebied aanvaardbare datadichtheid.

Consistentie PSI en peilmerkdeling

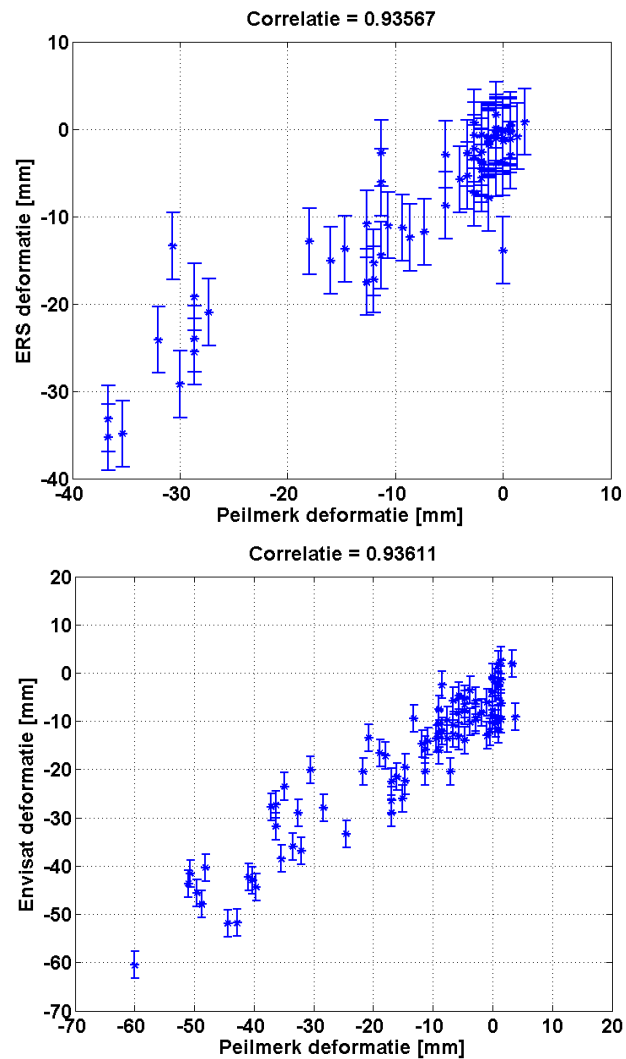
De consistentie tussen de bodembewegingen waargenomen met waterpassing en PSI is onderzocht aan de hand van laterale doorsneden door de datasets. Een kwantitatieve vergelijking is niet mogelijk omdat de PSI scatterers en de waterpassingspeilmerken niet op dezelfde locaties gemeten worden noch op hetzelfde tijdstip. In de analyse is uitgegaan van de referentiedatum (dag/maan/jaar) van de waterpassingscampagnes en de datum (dag/maand/jaar) van de gebruikte radarwaarnemingen. Gegevens van beide datasets zijn alleen beschikbaar voor de periode 1998-2000 en 2003-2006. Door slechts deze tijdvakken te gebruiken voor de vergelijking wordt het mogelijk om de twee technieken direct te vergelijken, waardoor een uitspraak over de bruikbaarheid van de radarwaarnemingen kan worden gedaan.

De analyse voor deze tijdvakken laat zien dat de consistentie tussen de radardata en de peilmerkdata erg goed is (correlatiecoëfficiënt van 0.94 voor zowel de ERS-2 (2^e orde polynoomhypothese) als de Envisat dataset; Figuur c). Wel is gebleken dat in de standaard nulhypothese fasemeerduidigheden kunnen optreden bij radarpunten in meer

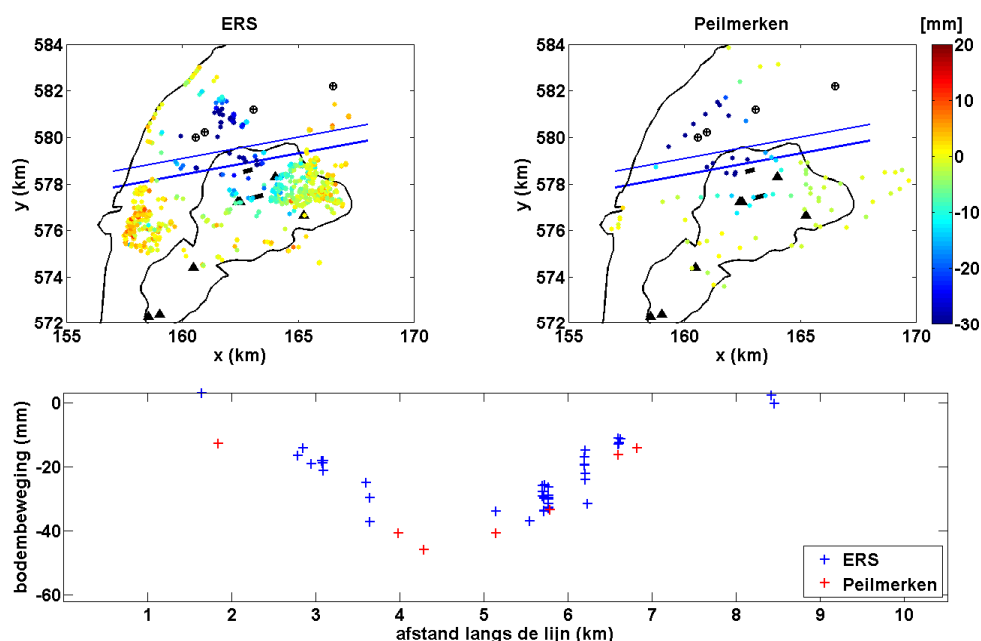
geïsoleerd liggende gebieden (in dit geval in de ERS-2 data bij Sexbierum). Het toepassen van een alternatieve hypothese om het deformatiegedrag te beschrijven (2^e orde polynoomhypothese) heeft dit probleem opgelost.

Verder is gebleken dat de beide technieken zeer complementair zijn: daar waar metingen van een van beide datasets ontbreken, kunnen observaties van de andere techniek extra informatie verschaffen over de komvorm en –diepte (Figuur d). Door deze gecombineerde aanpak kan de interpretatie van de daling significant anders zijn dan een interpretatie gebaseerd op elk van de technieken afzonderlijk.

De mogelijke over-/onderschatting van de verticale beweging ten gevolge van de verwaarlozing van horizontale beweging blijft beperkt tot de flanken van de bodemdalingskom bij Franeker en boven de zoutwinning. In de flank bij Franeker vinden we een potentiële overschatting van de deformatie met lokaal maximaal 1-2 cm. De flank bij de zoutwinning geeft een potentiële onderschatting van lokaal maximaal 1 cm.



Figuur c: Scatterplot tussen boven: waterpassing en radar (ERS 2^e orde polynoomhypothese) van de cumulatieve deformatie tussen 1998 en 2000 en onder: waterpassing en radar (Envisat) van de cumulatieve deformatie tussen 2003 en 2006.

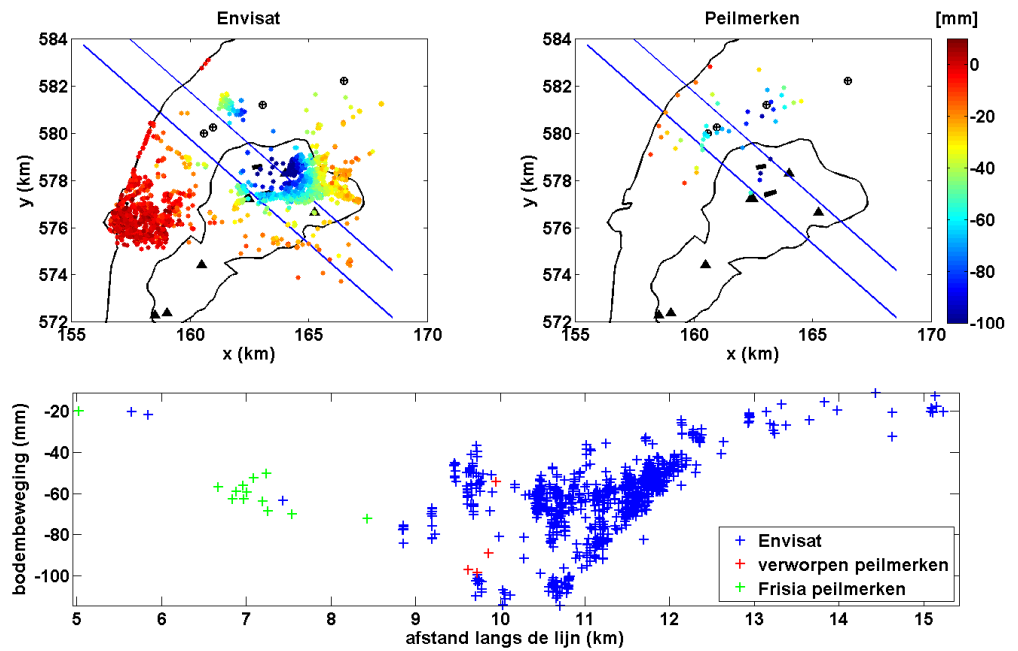


Figuur d: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese (2^e orde polynoom). Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. De peilmerken zijn gecorrigeerd voor het 7 maanden tijdsverschil onder aanname van lineaire bodembeweging.

Additionele data

Naast de data in de DID-database zijn er nog additionele peilmerken in Noordwest Friesland waarvan de hoogten in verschillende campagnes zijn gemeten. De redenen van het ontbreken van deze data in de DID-database zijn divers. Het kunnen slecht gefundeerde peilmerken of beschadigde peilmerken betreffen, maar ook later bijgeplaatste peilmerken of peilmerken welke niet in het dalingspatroon passen. Bij de inrichting van het meetnet ten behoeve van het monitoren van de zoutwinning is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van het NAP-peilmerkenregister (zoals opgenomen in de DID-database). Daarnaast is het netwerk verdicht doormiddel van het bijplaatsen van bouten in bestaande bebouwing en kunstwerken. In het gebied tussen War, Herbaijum en de A31 blijken nog enkele peilmerken te zijn welke in 2007 door SodM als “ondoelmatig” zijn aangemerkt (Oranjewoud, 2008(1); Oranjewoud, 2008(2)) daar ze instabiel gedrag leken te vertonen. Voor al deze peilmerken is de consistentie van de daling met de PSI scatterer daling bepaald.

Uit de vergelijking kan geconcludeerd worden dat de 4 peilmerken boven de gaswinning toch een realistisch beeld van de bodemdaling blijken te geven (zie Figuur e). De additionele peilmerkdada ten behoeve van de zoutwinning geven significant meer informatie over de bodemdalingsskom boven de cavernes (Figuur e). In de verdere analyse zijn dan ook alle data mee genomen.

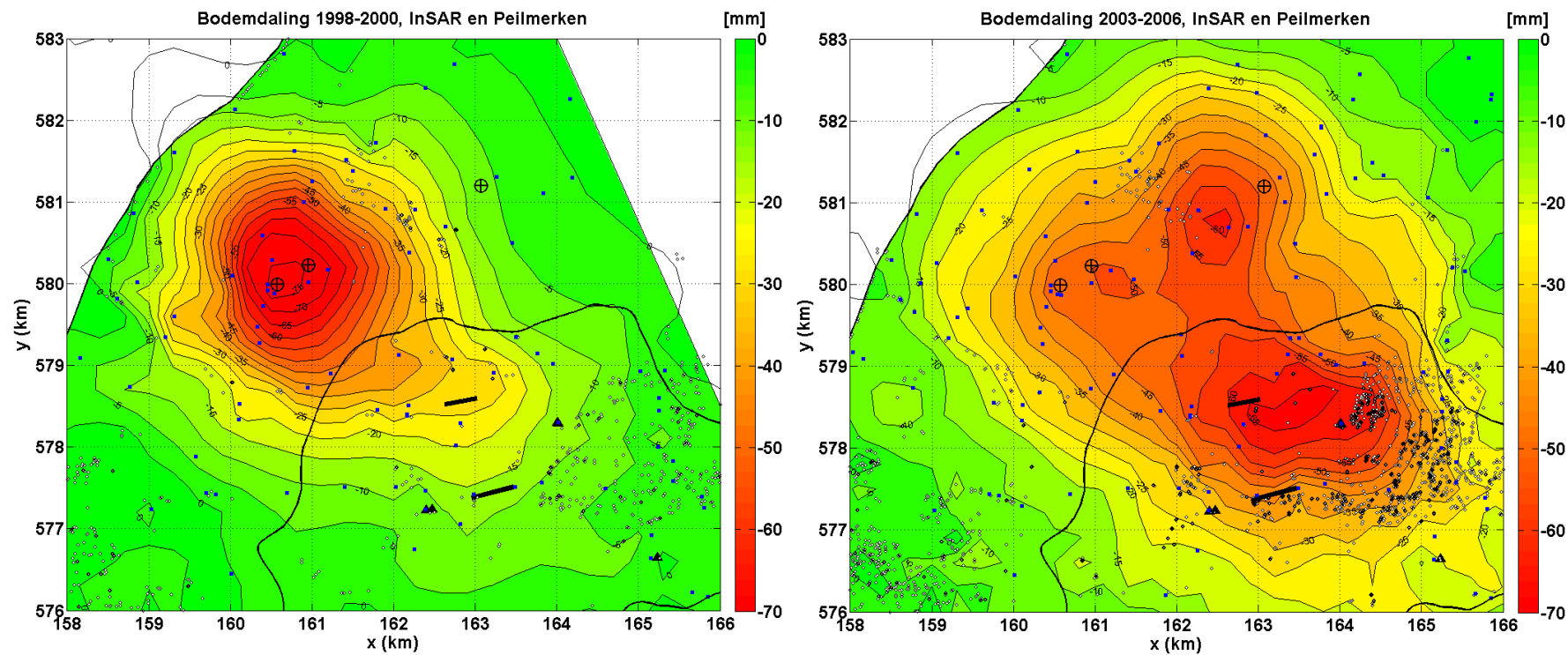


Figuur e: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2008, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 1000 m worden meegenomen. De waterpassingen zijn gecorrigeerd (lineaire interpolatie) voor verschillende begindatum (8 maanden).

Bodemdaling Noordwest-Friesland

Dalingspatroon 1988-2000 & 2003-2006

Figuur f laat voor de perioden 1998-2000 en 2003-2006 de geïntegreerde interpolatie van de PSI en peilmerkbewegingen zien. Het zwaartepunt van de daling ligt in de periode 1998-2000 bij de zoutcavernes BAS-1/2 en bedraagt ruim 7,5 cm. In de periode 2003-2006 zijn er 3 subkomen te onderscheiden: een met een daling van 5 cm net ten oosten van de BAS-2 zoutcaverne, een met een daling van ruim 6 cm ten zuidwesten van BAS-3 en een met een daling van ruim 6,5 cm tussen HRL-4 en HRL-7.



Figuur f: Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI en de peilmerken data samen voor links de periode 1998-2000 en rechts de periode 2003 en 2006. De blauwe vierkanten geven de locaties van de gebruikte peilmerken terwijl de grijze diamanten de locaties van de gebruikte PSI scatterers weergeven.

Dalingssnelheid

In Figuur g is de daling in de drie diepste punten van de totale bodemdalingsskom, nl. boven het Harlingen gasveld, boven de BAS-1/2 caverne en tussen Pietersbierum en de BAS-3 caverne, zoals die uit de peilmerken en PSI scatterers is geïnterpoleerd uitgezet tegen de tijd.

BAS-1/2 zoutcavernes

Bij de zoutcavernes van BAS-1/2 laten de PSI scatterers duidelijk de toename van de daling ten gevolge van de toenemende zoutwinning uit de cavernes zien (winning is in 1995 begonnen). Echter de geïnterpoleerde daling tussen 1998 en 2000 is duidelijk aanzienlijk minder dan de geïnterpoleerde peilmerk daling (20,9 mm/jaar versus 38,8 mm/jaar). In de periode 2003-2008 laat de geïnterpoleerde PSI daling een afname van dalingssnelheid zien naar bijna 0 mm/jaar (1,1 mm/jaar). In de periode 2003-2006 is wederom de geïnterpoleerde peilmerk daling substantieel groter dan de PSI daling. De meest waarschijnlijke verklaring voor dit verschil is het ontbreken van PSI scatterers direct boven de BAS-1/2 zoutcavernes, waardoor de daling onderschat wordt. Daarnaast zou ook de invloed van mogelijke horizontale deformatie in dit gebied kunnen leiden tot een geringe onderschatting.

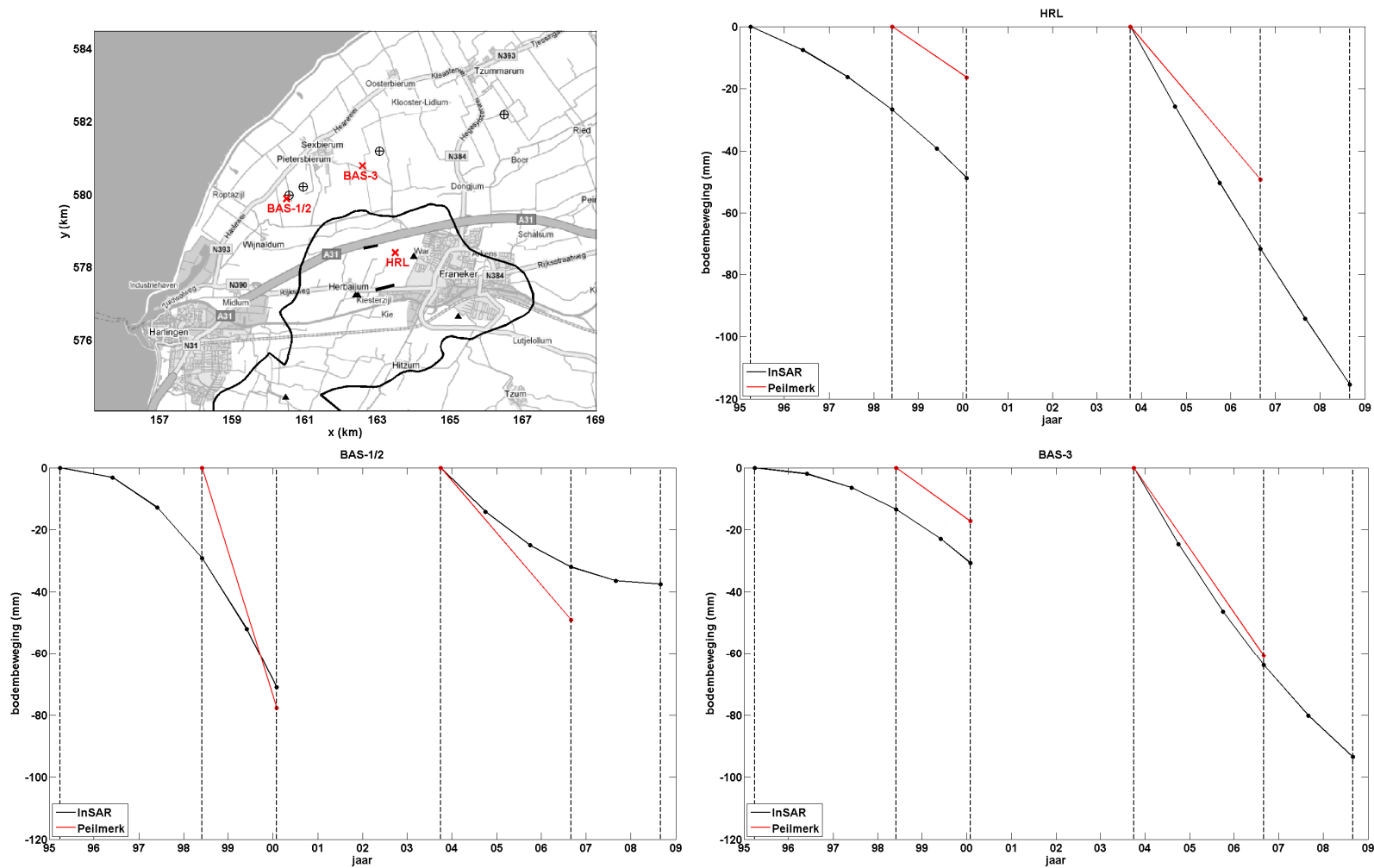
BAS-3 zoutcaverne

In beide perioden waar vergelijk tussen de geïnterpoleerde PSI en peilmerk daling mogelijk is (1998-2000 en 2003-2006) is de dalingssnelheid nagenoeg identiek (8,7 mm/jaar vs 8,6 mm/jaar voor de periode 1998-2000 en 21,3 mm/jaar vs 20,2 mm/jaar voor de periode 2003-2008). Het is dan ook redelijk om te concluderen dat het verloop van de daling in de tijd zoals die in de PSI interpolatie wordt waargenomen representatief is. Duidelijk is waar te nemen dat de daling tussen 1995 en 2000 in snelheid toeneemt (van 4,7 mm/jaar naar 8,7 mm/jaar), terwijl in de periode 2003-2008 deze dalingssnelheid juist weer afneemt (van 21,3 mm/jaar naar 14,8 mm/jaar).

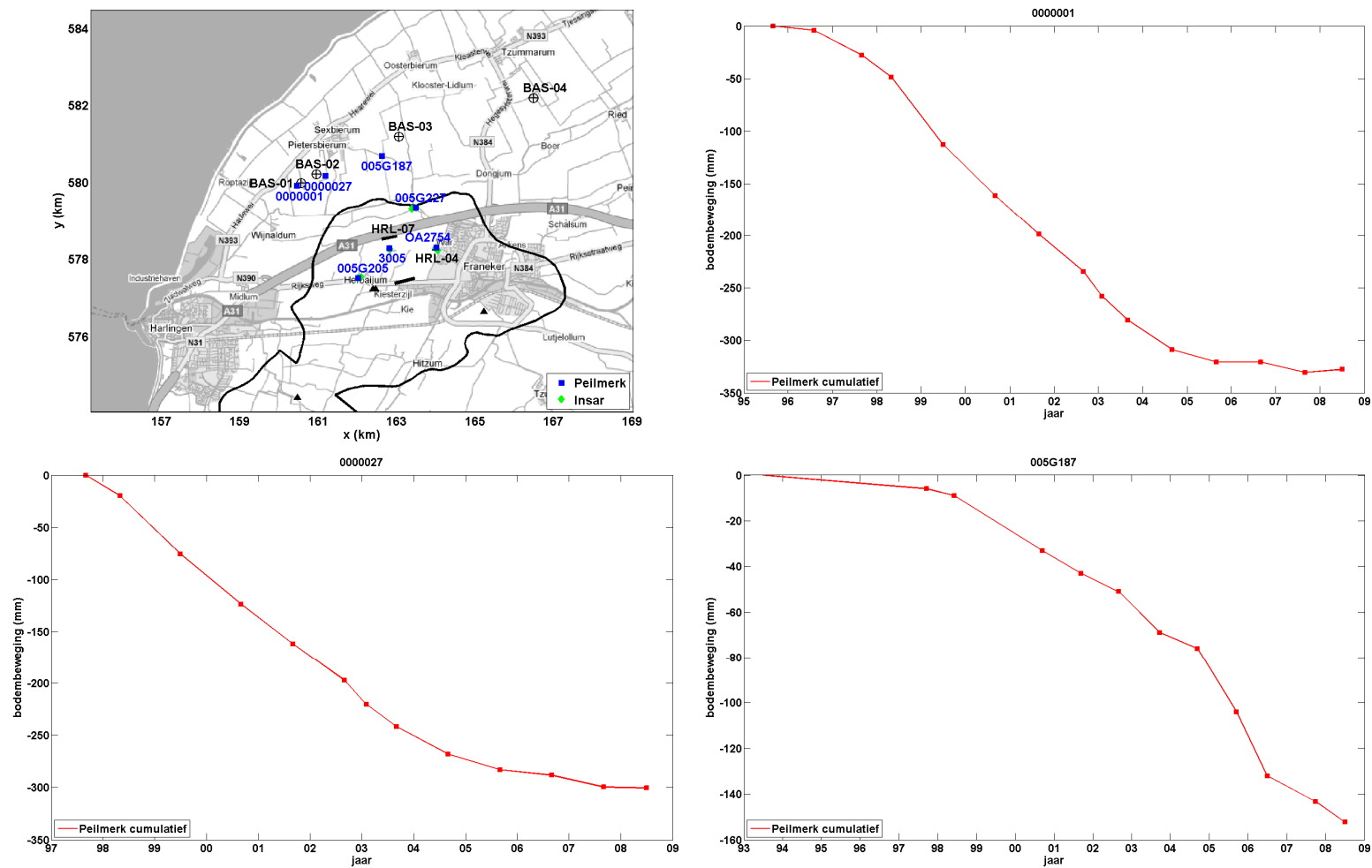
In Figuur h is de volledige tijdserie van enkele peilmerken weergegeven welke het dichtst bij de diepste punten van de interpolatiekommen boven de zoutwinning liggen. Duidelijk is te zien dat de daling bij BAS-1 (peilmerk 000001) het grootst is met ~33 cm. De daling net ten oosten van BAS-2 (peilmerk 000027) is 30 cm, terwijl de daling tussen Pietersbierum en BAS-3 (peilmerk 005G187) ruim 15 cm is. De tijdserie van peilmerk 000001 laat heel mooi het langzaam op gang komen van de bodemdaling, een lineair stuk, en een vertraging van de bodemdaling zien. Dit is te relateren aan het begin van de productie in 1995 en de zeer sterke afname van productie in 2004. Zowel bij BAS-1 als bij BAS-2 is er geen substantiële bodemdaling meer waar te nemen sinds 2006. De daling van peilmerk 05G187 neemt nog steeds redelijk lineair toe.

Harlingen gasveld

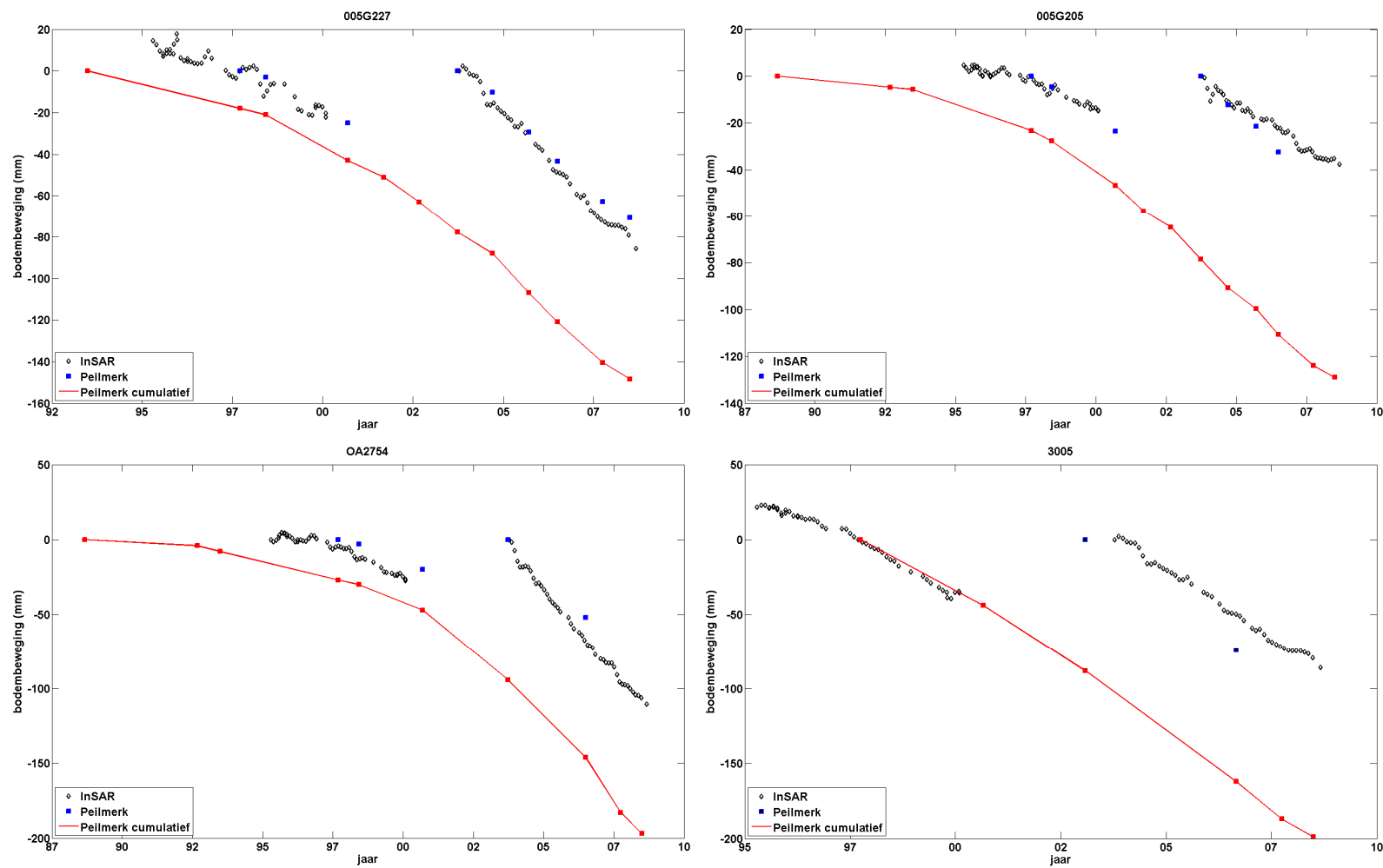
De geïnterpoleerde PSI daling (Figuur g) laat een lichte versnelling van de daling zien tussen 1995 en 2000. In de periode 1998 tot 2000 is de daling in de scatterers ~2,8 mm/jaar groter dan de daling in de peilmerken. In de periode 2003-2008 neemt de snelheid van de geïnterpoleerde daling volgens de PSI scatterers zelfs licht af (van 23,9 mm/jaar naar 21,8 mm/jaar). De geïnterpoleerde daling van de peilmerken laat echter tussen 2003 en 2006 een veel kleinere dalingssnelheid zien van 16,4 mm/jaar, een verdubbeling van de daling in eerste periode.



Figuur g: Daling vs. tijd van de geïnterpoleerde bodemdaling in de 3 diepste punten van de bodemdalingkom bij BAS-1/2, tussen Pietersbierum en BAS-3 en bij het Harlingen gasveld (HRL)



Figuur h: Volledige tijdseries van de peilmerken 000001 (bij BAS-1), 000027 (bij BAS-2) en 005G187 (tussen Pietersbierum en BAS-3).

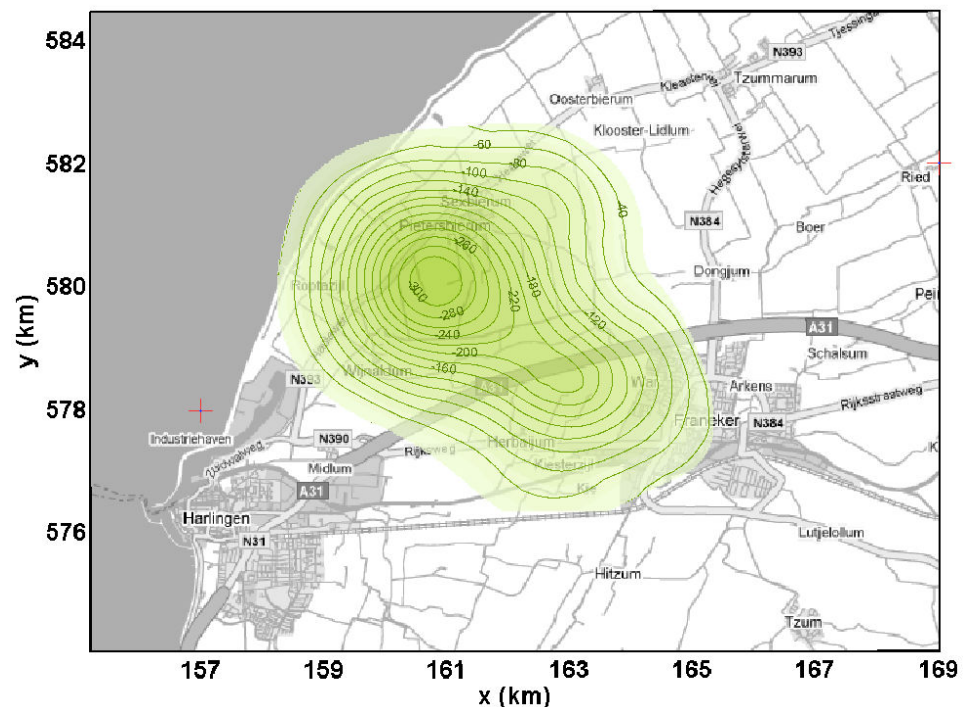


Figuur i: Volledige tijdseries van de peilmerken 005G227, 005G205, OA2754 en 3005 (rood), de daling van de nabij gelegen PSI scatterers (grijze diamanten), en de peilmerkdaling in het met de InSAR corresponderende tijdvak (blauwe vierkantjes). Locaties van de peilmerken gegeven in de kaart van Figuur h.

Figuur i laat de tijdseries van een aantal peilmerken rond het Harlingen gasveld zien samen met de daling in de meest nabij gelegen PSI scatterer. Duidelijk is te zien dat het verloop van de daling in de tijd afhankelijk is van de positie van het punt ten opzichte van het diepste punt van de kom. Het peilmerk 3005, welke gelegen is net ten zuiden van de horizontale put HRL-7 (zie locatiefiguur in Figuur g), laat een lineair verloop van de daling in de tijd zien. Het punt 0A2754 bij HRL-4 (War, Franeker), laat tot 2001 een toename in dalingsnelheid zien en vanaf 2001 een lineair verloop in de tijd. Voor het peilmerk 005G227 ligt de omslag van toename naar lineair tijdsgedrag rond 2003. Voor het meest buiten de kom gelegen peilmerk 005G205 is deze transitie moeilijk vast te stellen. De daling in deze punten is volledig consistent met de daling beschreven door de PSI scatterers. Kleine deviaties komen door het verschil in tijdstip (datum) van de metingen en de afstand tussen het peilmerk en de meest nabij gelegen scatterer.

Minimale daling Noordwest-Friesland

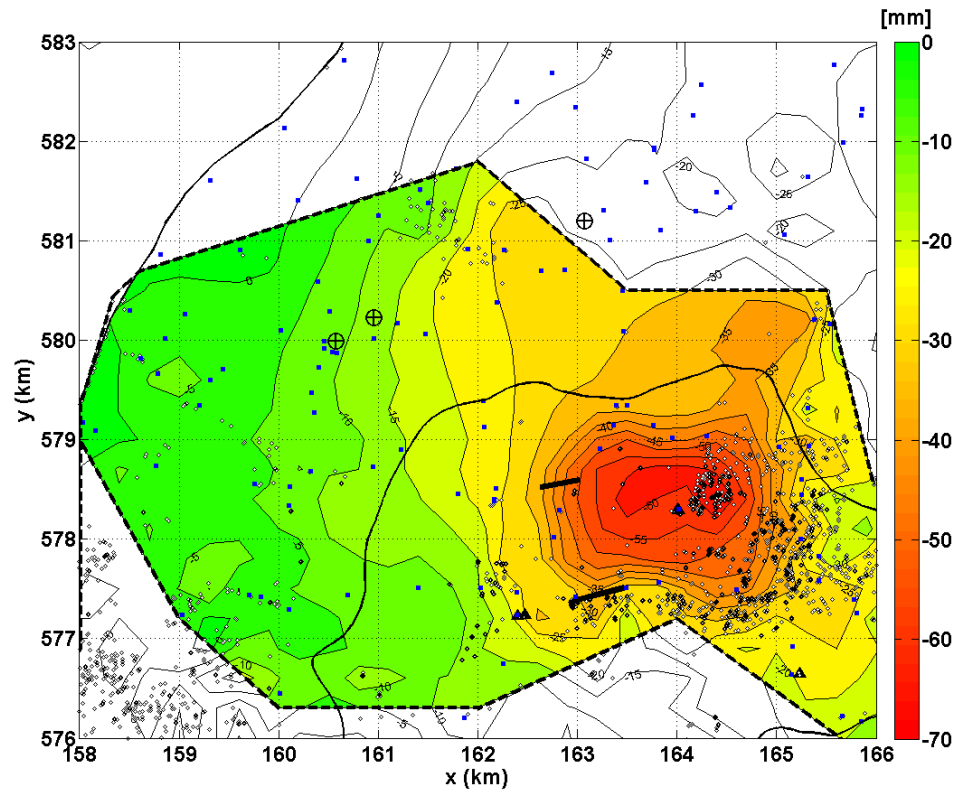
Zoals in de inleiding beschreven heeft Houtenbos (2008) op basis van alle beschikbare peilmerken een analyse van de bodemdaling tussen 1988 en 2006 gemaakt (Figuur j). Figuur k laat de geïnterpoleerde totale extra daling zien zoals die door de PSI scatterers is gemeten in de periode 1998-2008 (geïntegreerde daling – peilmerkdaling voor de perioden 1998-2000 en 2003-2006 plus de daling waargenomen in de scatterers tussen 2006 en 2008). Dit is een minimale schatting aangezien de extra daling in de periode 2000-2003 niet kon worden vastgesteld wegens afwezigheid van InSAR data. De extra daling in Figuur k bedraagt in het diepste punt 6,7 cm.



Figuur j: Totaal gemeten bodemdaling over de periode 1988-2006 in mm (Houtenbos, 2008).

Figuur l geeft de totale geïnterpoleerde daling tussen 1988 en 2008 gebaseerd op de geïnterpoleerde peilmerkdaling tussen 1988 en 2006 (Houtenbos, 2008) en de geïnterpoleerde totale extra daling gemeten met de PSI scatterers tussen 1998-2000 en 2003-2008. De bodemdalingskom heeft twee duidelijke verdiepingen. De eerste is bij BAS-1/2 met een maximale diepte van 33 cm. De tweede is bij de horizontale put HRL-7 met een diepte van 26,5 cm. De schatting voor deze laatste kom is een minimale

schatting aangezien de extra daling in de periode 2000-2003 niet kon worden vastgesteld wegens afwezigheid van InSAR data.

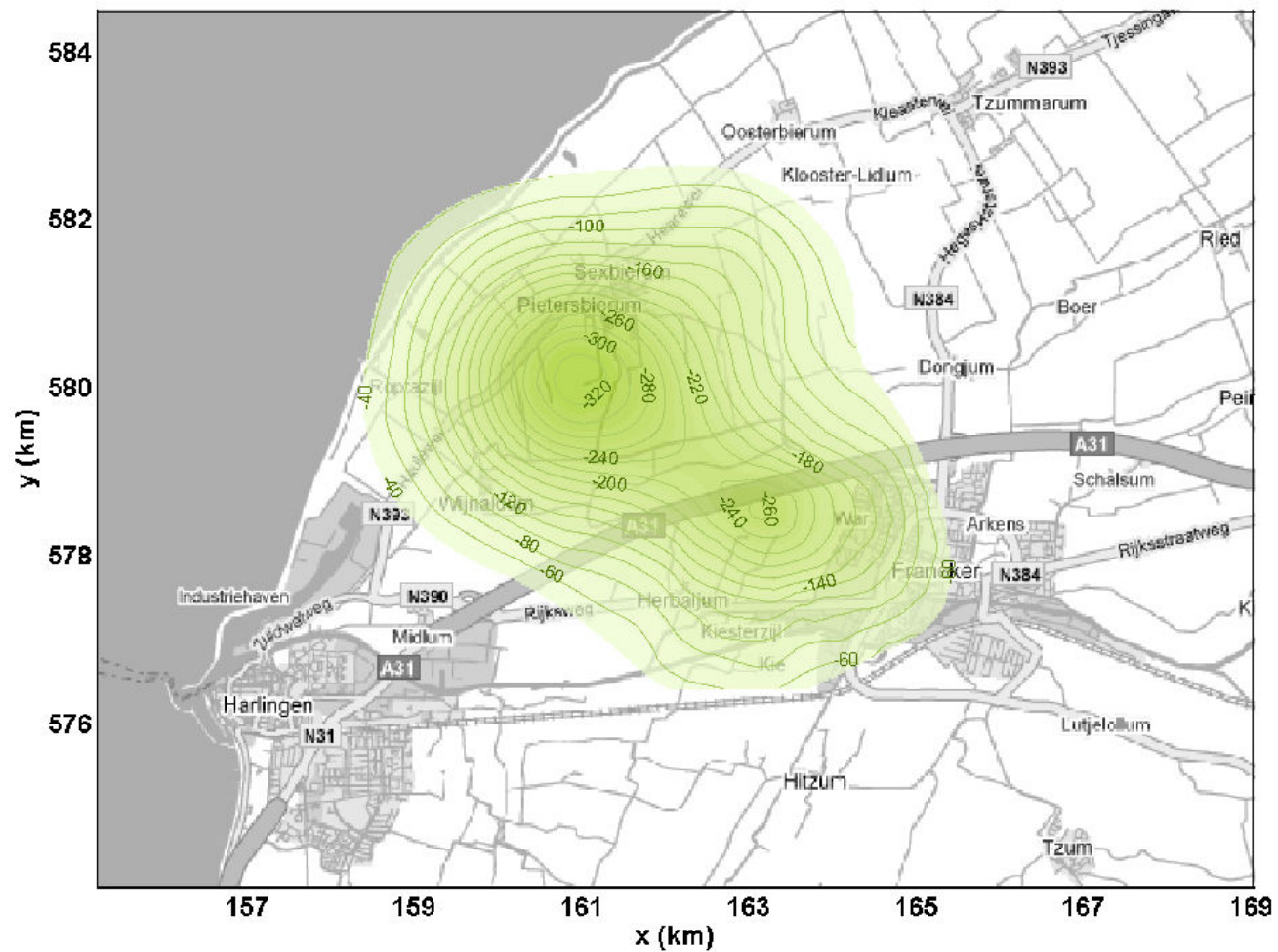


Figuur k: Geïnterpoleerde totale extra daling gemeten in de PSI scatterers in de periode 1998-2008. (houd er rekening mee dat dit een minimale schatting is aangezien de additionele daling in de periode 2000-2003 niet vastgesteld kon worden).

Conclusies

Voor Noordwest-Friesland is komen vast te staan dat in de gebieden waar voor beide datasets metingen voor handen zijn de bodembeweging waargenomen door de PSI scatterers goed overeenkomt met de bodembeweging gemeten aan de peilmerken door middel van waterpassing. Daar waar metingen van een van beide datasets ontbreken, kunnen observaties van de andere techniek extra informatie verschaffen over de komvorm en –diepte. Door een gecombineerde aanpak kan de interpretatie van de daling significant anders zijn dan een interpretatie gebaseerd op elk van de technieken afzonderlijk.

Deze gecombineerde aanpak voor Noordwest-Friesland geeft vooral extra informatie over de daling boven het Harlingen gasveld. In dit gebied wordt de bodemdaling erg goed waargenomen met de PSI techniek door de hoge dichtheid van scatterers in Franeker, Herbaijum en de A31. Door de karakteristieken van de bodemdalingsschiet in dit gebied juist de bedekking van de peilmerken te kort. In de perioden 1998-2000 en 2003-2006 laat de PSI techniek een extra daling in het diepste punt boven het gasveld van ruim 2,3 cm zien ten opzichte van de daling gemeten aan de peilmerken in dezelfde periode. Tussen 2006 en 2008 wordt door de scatterers boven het gasveld een daling van 4,5 cm waargenomen. De schatting van het diepste punt in de bodemdaling in Noordwest-Friesland tussen 1988 en 2008 is ~33 cm bij BAS-1/2. De minimale schatting van het diepste punt boven de gaswinning bij de horizontale put HRL-7 is in dezelfde periode ~26,5 cm.



Figuur 1: Totale geïnterpoleerde bodemdaling in Noordwest-Friesland tussen 1988 en 2008 gebaseerd op geïnterpoleerde peilmerkdaling tussen 1988 en 2006 en geïnterpoleerde extra daling van PSI scatterers tussen 1998-2000 en 2003-2008.

De snelheid waarmee de bodem daalt is niet constant in de tijd. Tussen 1995 en 2000 treedt in het diepste punt boven de gaswinning een duidelijke versnelling van de bodemdaling op. In de periode 2003 tot 2008 lijkt een lichte vertraging van de daling van het diepste punt op te treden. Het tijdstip waarop de dalingsnelheid boven het gasveld verandert is sterk afhankelijk van de locatie van een meetpunt ten opzichte van het diepste punt van de kom: hoe verder van het diepste punt af gelegen des te later de verandering optreedt.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	26
1.1 Algemeen	26
1.2 Achtergrond	26
2 Data	30
2.1 PS-InSAR data	30
2.2 Radar dataverwerking	31
2.3 Kwaliteit van de radarmetingen	34
2.4 Bodemstijging	34
2.5 Peilmerk data	35
3 Consistentie tussen peilmerk en PS-InSAR data	45
3.1 Overeenstemming in temporeel bereik	45
3.2 1998-2000: Peilmerk data & ERS-2 PS-InSAR data	46
3.2.1 Ruimtelijke analyse ERS-2 nulhypothese verwerking en waterpassing	46
3.2.2 Tweede fase processing ERS-2 radar data	50
3.2.3 Correlatie tussen ERS-2 PSI radarmetingen en waterpassing, periode 1998-2000	52
3.2.4 Ruimtelijke analyse ERS-2 2 ^e orde polynoom hypothese verwerking en waterpassing	53
3.2.5 Ruimtelijke analyse Envisat radar en waterpassing	56
3.2.6 Invloed van horizontale deformatie	60
3.2.7 Correlatie tussen Envisat PSI radarmetingen en waterpassingen periode 2003-2006 ...	60
3.3 Conclusies	61
4 Additionele peilmerk data	62
4.1 Additionele peilmerken ten behoeve van de zoutwinning	62
4.2 Additionele peilmerken boven gaswinning in Harlingen gasveld	63
4.3 Consistentie met de PSI data	63
5 Bodemdaling Noordwest-Friesland	67
5.1 Ruimtelijke analyse bodembeweging	67
5.1.1 Interpolatie en integratie	67
5.1.2 Ruimtelijke consistentie bodembeweging	67
5.1.3 Ruimtelijke bodembeweging 1998-2000 en 2003-2006	70
5.1.4 Ontwikkeling bodemdaling	72
5.2 Dalingssnelheid	75
5.3 Minimale bodemdaling Noordwest-Friesland	79
6 Conclusies	84
6.1 Technische conclusies	84
6.2 Bodemdaling Noordwest-Friesland	84
6.3 Tenslotte	85
7 Referenties	86
8 Ondertekening	87

A	Overzicht gebruikte data.....	88
A.1	Radar data	88
A.2	Peilmerk data	90
B	Ruimtelijke consistentie PSI en peilmerkdata in 2004 en 2005	98
C	Invloed horizontale beweging op de bodemdalings-schatting.....	103
D	Veel gestelde vragen over radar interferometrie	110

Bijlage(n)

A Overzicht gebruikte data

B Ruimtelijke consistentie PSI en peilmerkdata in 2004 en 2005

C Invloed horizontale beweging op de bodemdalings-schatting

D Veel gestelde vragen over radar interferometrie

Overzicht figuren

Figuur 1-1. Overzichtskaart van het studiegebied met het Harlingen (Chalk) gasveld als contour, de verticale putten als zwarte driehoeken en de horizontale putten als dikke zwarte lijnen. Verder zijn ook de BAS zoutcavernes aangegeven. Dezelfde symbolen zullen in alle figuren gebruikt worden.	27
Figuur 1-2: Totale peilmerkdaling primaire dataset tussen 1988 en 2007 (Oranjewoud, 2008).....	28
Figuur 1-3: Totaal gemeten bodemdaling over de periode 1988-2007 in mm (Houtenbos, 2008).	28
Figuur 2-1. Ligging van de radar satellietbeelden ('frames') over noordwest Friesland. Het gebied is vanuit twee dalende banen (links, frames 423 en 151) en twee stijgende banen (rechts, frames 29 en 258) waargenomen. Van elk beeld is een tijdserie beschikbaar vanuit de satellieten ERS-1, ERS-2 en Envisat. Het aantal beelden dat daadwerkelijk door de satellieten is opgenomen is aangegeven in Tabel 2-1.....	30
Figuur 2-2. Voorbeeld van de radarmetingen van bodemdaling (mm) tussen 1995 en 2000 (ERS-2 satelliet, ca. 800 metingen) en tussen 2003 en 2006 (Envisat satelliet, ca. 3000 metingen). De contour geeft het Harlingen gasveld aan. Duidelijk is te zien hoe het dalingsgebied zich uitbreid naar het zuidoosten.....	33
Figuur 2-3. Vermeende bodemstijging in de ERS-2 en Envisat data (boven) in millimeters en histogram van de bodembeweging (mm) in de ERS-2 en Envisat data (onder). Negatieve bodembeweging is bodemdaling en positieve bodembeweging is bodemstijging.	35
Figuur 2-4. Links: Waargenomen histogram voor de stad Harlingen aan cumulatieve deformatie (1995-2000) uit radarmetingen. Rechts: Gesimuleerde verdeling van cumulatieve deformatie van 1000 punten met een verwachtingswaarde 0 en een standaardafwijking van 2,5 mm voor elke double-difference waarneming. Hieruit volgt dat het waargenomen 'stijgingssignaal' niet als significant mag worden beschouwd, zolang het stijgingssignaal ook ruimtelijk normaal is verdeeld.	35
Figuur 2-5. De locaties van de peilmerken en de contouren van het Harlingen gasveld. Niet alle punten zijn op alle epochen waargenomen,	36
Figuur 2-6. Locatie van de peilmerken gebruikt in de primaire waterpassing in 1997 en een secundaire waterpassing voor het district Leeuwarden west in 2003. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.	37
Figuur 2-7. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Elf Petroland in 1996 en 1997. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.	38
Figuur 2-8. Locatie van de peilmerken gebruikt in de secundaire waterpassingen in 1992 en 1993. De datadichtheid in 1993 is voldoende om te gebruiken voor de bepaling van de daling in de periode voor 2000 en om een betere daling te bepalen over het gasveld. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.	39
Figuur 2-9. Locatie van de peilmerken gebruikt in de secundaire waterpassingen in 1998 en 2003. De datadichtheid in 1998 en 2003 is voldoende om te gebruiken voor de bepaling van de daling in de periode voor 2000 en om een betere daling te bepalen over het gasveld. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.	40

Figuur 2-10. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermilion in 1997 en 2000. De data dichtheid boven het Harlingen gasveld is redelijk in 2000. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de locale peilmerkbouten aan.	41
Figuur 2-11. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermilion in 2001 en 2002. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de locale peilmerkbouten aan.	42
Figuur 2-12. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermilion in 2003 en 2004. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de locale peilmerkbouten aan.	43
Figuur 2-13. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermilion in 2005 en 2006. De data dichtheid boven het Harlingen gasveld is redelijk in 2000, maar pas in 2006 echt op orde. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de locale peilmerkbouten aan.	44
Figuur 3-1: Bodemdaling (mm) geobserveerd bij de peilmerken (links) en de ERS radarpunten onder de nulhypothese (rechts) tussen 1998 en 2000.	47
Figuur 3-2. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. Merk op dat er een willekeurige verticale verschuiving tussen beide profielen bestaat, die niet fysisch geïnterpreteerd kan worden.	48
Figuur 3-3. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen. Hieruit blijkt dat het gedrag van de punten te zeer niet-lineair is in dit tijdvak, wat resulteert in fouten in de fasemeerduidigheden, zie linkerkant van het profiel bij Sexbierum, waarbij de radarmetingen exact een halve golflengte van het radarsignaal (28 mm) is verschoven. Merk op dat de differentiële verschillen in bodemdaling wel acceptabel zijn. Merk tevens op dat deze resultaten cumulatieve deformatie betreffen, dus het verschil van twee radarmetingen in de tijd. De variantie van de radardata is daarom gelijk aan de som van de varianties van de enkele metingen (Voor ERS wordt de standaardafwijking van het verschil 3.8 mm).	48
Figuur 3-4. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. De willekeurige verticale verschuiving tussen beide profielen, zoals genoemd in Figuur 3-2, kan de verticale verschuiving van de radarpunten aan de linkerzijde van het profiel niet verklaren.	49
Figuur 3-5. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen.	49
Figuur 3-6. Bodemdaling (mm) geobserveerd bij de peilmerken (links) en de radarpunten onder de 2 ^e orde polynoom hypothese verwerking (rechts) tussen 1998 en 2000.	51

- Figuur 3-7. Gebieden met vermeende bodemstijging in de opnieuw geproceste ERS-2 data (boven) en histogram van de bodembeweging (onder). Negatieve bodembeweging is bodemdaling en positieve bodembeweging is bodemstijging. Uit de analyse in paragraaf 2.4 blijkt dat deze stijging als niet-significant dient te worden aangemerkt.52
- Figuur 3-8. Scatterplot tussen waterpassingen (horizontal) en PSI radar voor de ERS tijdreeks, van de cumulatieve deformatie tussen 1998 en 2000. Rechts, initiële resultaten (nulhypothese), correlatie van 0.76. Links, resultaten onder de alternatieve (polynoom) hypothese, correlatie van 0.94. Merk op dat de foutenmarges van de waterpasmetingen niet zijn aangegeven, maar van dezelfde orde van grootte zijn als de radarmetingen (sigma 2,5 mm). 52
- Figuur 3-9. De tijdserie van de ERS radar data en de waterpassing data. Het tijdsverschil tussen de waterpassing en de ERS radar data is ongeveer 7 maanden. De correctiefactor voor dit tijdsverschil is ongeveer 15 mm voor dit peilmerkpunt.53
- Figuur 3-10. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.54
- Figuur 3-11. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese (2^e orde polynoom). Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. De peilmerken zijn gecorrigeerd voor het 7 maanden tijdsverschil onder aanname van lineaire bodembeweging voor vergelijking met Figuur 3-10.54
- Figuur 3-12. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen.55
- Figuur 3-13. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.55
- Figuur 3-14. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen2003-2006: Peilmerk data & Envisat PS-InSAR data.....56
- Figuur 3-15. . Boven: Bodemdaling geobserveerd met waterpassing van de peilmerken in de periode 2003-2006. Onder: Bodemdaling gemeten met radar voor hetzelfde tijdsinterval57
- Figuur 3-16. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.58
- Figuur 3-17. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen. De spreiding van de radardata ter

hoogte van 6–7,5 km worden veroorzaakt door de verschillen binnen de gebruikte breedte van het profiel en niet door meetonzekerheid.	58
Figuur 3-18. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.	59
Figuur 3-19. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen.	59
Figuur 3-20. Scatterplot tussen waterpassing en radar (Envisat) van de cumulatieve deformatie tussen 2003 en 2006. Merk op dat de foutenmarges van de waterpasmetingen niet zijn aangegeven, maar van dezelfde orde van grootte zijn als de foutenmarges van de radarmetingen (sigma 2,5 mm).	61
Figuur 4-1. Locaties van de extra peilmerken.	62
Figuur 4-2. a) Bodemdaling tussen 1997 en 2000 voor de DID peilmerken, de extra peilmerken van Frisia en de verworpen peilmerken van Vermilion. b) Bodemdaling tussen 2003 en 2008 voor de extra peilmerken van Frisia en de eerder instabiel veronderstelde peilmerken van Vermilion.	64
Figuur 4-3. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1997 en 2000, onder de polynoom hypothese. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 550 m worden meegenomen.	65
Figuur 4-4. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1997 en 2000, onder de polynoom hypothese. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 1000 m worden meegenomen.	65
Figuur 4-5. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2008, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 750 m worden meegenomen. De waterpassingen zijn gecorrigeerd (lineaire interpolatie) voor verschillende begindatum (8 maanden).	66
Figuur 4-6. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2008, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 1000 m worden meegenomen. De waterpassingen zijn gecorrigeerd (lineaire interpolatie) voor verschillende begindatum (8 maanden).	66
Figuur 5-1. Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI data (links) en de peilmerkdata (midden) voor de periode 1998-2000. De peilmerk locaties worden weergegeven met blauwe vierkanten en de PSI punten met grijze diamanten. De rechterfiguur geeft het verschil tussen deze interpolaties. Duidelijk is te zien dat de peilmerken 30 mm meer daling laten zien bij de zoutcavernes BAS-1/2, terwijl de PSI data 7 mm meer daling laat zien boven het Harlingen gasveld. De extra daling ten oosten van BAS-3 is in deze periode niet realistisch aangezien daar geen PSI scatterers geobserveerd zijn.	68
Figuur 5-2. Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI data (links) en de peilmerkdata (midden) voor de periode 2003-2006. De peilmerk locaties worden weergegeven met blauwe vierkanten en de PSI punten met grijze diamanten. De rechterfiguur	

geeft het verschil tussen deze interpolaties. De peilmerken laten 18,5 mm meer daling zien bij de zoutcavernes BAS-1/2, terwijl de PSI data ruim 21 mm meer daling laat zien boven het Harlingen gasveld. De extra daling ten oosten van BAS-3 is in deze periode wederom niet realistisch aangezien daar geen PSI scatterers geobserveerd zijn.	69
Figuur 5-3. Ruimtelijke verdeling van het cumulatieve verschil tussen de PSI- en peilmerkdaling over de tijdvakken 1998 - 2000 en 2003 – 2006.	70
Figuur 5-4. Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI en de peilmerkdata samen voor links de periode 1998-2000 en rechts de periode 2003 en 2006. De blauwe vierkanten geven de locaties van de gebruikte peilmerken terwijl de grijze diamanten de locaties van de gebruikte PSI scatterers weergeven.	71
Figuur 5-5. Geïnterpoleerde cumulatieve daling geobserveerd door de ERS2 satelliet aan PSI scatterers in de periode 1995 tot 2000. De grijze diamanten geven de locaties van de PSI scatterers.	73
Figuur 5-6. Geïnterpoleerde cumulatieve daling geobserveerd door de Envisat satelliet aan PSI scatterers in de periode 2003 tot 2008. De grijze diamanten geven de locaties van de PSI scatterers.	74
Figuur 5-7. Daling vs. tijd van de geïnterpoleerde bodemdaling in de 3 diepste punten van de bodemdalingkom bij BAS-1/2, tussen Pietersbierum en BAS-3 en bij het Harlingen gasveld (HRL)	76
Figuur 5-8: Volledige tijdseries van de peilmerken 000001 (bij BAS-1), 000027 (bij BAS-2) en 005G187 (tussen Pietersbierum en BAS-3).	77
Figuur 5-9: Volledige tijdseries van de peilmerken 005G227, 005G205, 0A2754 en 3005 (rood), de daling van de nabij gelegen PSI scatterers (grijze diamanten), en de peilmerkdaling in het met de InSAR corresponderende tijdvak (blauwe vierkantjes). Locaties van de peilmerken gegeven in de kaart van Figuur 5.8.	78
Figuur 5-10: Totaal gemeten bodemdaling over de periode 1988-2006 in mm (Houtenbos, 2008).	80
Figuur 5-11: Cumulatief verschil tussen de geïntegreerde daling van peilmerken en InSAR met de peilmerkdaling in de periode 1998-2000 en de geïntegreerde daling van de peilmerken en de InSAR met de peilmerkdaling in de periode 2003-2006.	80
Figuur 5-12: Geïnterpoleerde daling van de PSI scatterers tussen 2006 en 2008.	81
Figuur 5-13: Geïnterpoleerde totale extra daling gemeten in de PSI scatterers in de periode 1998-2008. (houd er rekening mee dat dit een minimale schatting is aangezien de additionele daling in de periode 2000-2003 niet vastgesteld kon worden).	81
Figuur 5-14: Totale geïnterpoleerde bodemdaling in Noordwest-Friesland tussen 1988 en 2008 gebaseerd op geïnterpoleerde peilmerkdaling tussen 1988 en 2006 en geïnterpoleerde extra daling van PSI scatterers tussen 1998-2000 en 2003-2008.	83

Overzicht tabellen

Tabel 2-1 Overzicht van beschikbare radarbeelden vanuit de verschillende tracks.

Aangegeven is het aantal beelden N dat door de satellieten is opgenomen, het tijdvak dat wordt omspannen, en de aantekening welke beelden voor onderzoeksdoeleinden beschikbaar zijn bij de TU Delft. Slechts tracks 151 (ERS) en 423 (Envisat) zijn gebruikt in deze studie. Voor de periode 1992-2001 is ook track 258 beschikbaar, maar i.v.m. de beperkte duur van dit project niet gebruikt. ERS data vanaf 2001 hebben een beperkte kwaliteit. Voor de periode 2003 tot heden (Envisat, overige tracks) is er helaas geen gebruiker die data acquisities heeft aangevraagd.31

Tabel 2-2. Waterpascampagnes beschikbaar voor het studiegebied.36

Tabel 3-1. Referentietijdstip van de gebruikte waterpascampagnes (waarschijnlijk datum afronding laatste metingen) en tijdstip van de gebruikte radarwaarnemingen. Hieruit blijkt dat voor het interval 1998-2000, de startdatum twee weken verschilt en de einddatum 7 maanden. Voor het interval 2003 verschilt de startdatum 5 weken en de einddatum 3 weken.46

1 Inleiding

1.1 Algemeen

De studie “PS-InSAR analyse van de bodemdaling in Noordwest-Friesland” is uitgevoerd door TNO B&O, Business Unit Geo-Energie en Geo-Informatie in samenwerking met TU Delft, Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, met als doel na te gaan of de techniek van “Persistent Scatterer Interferometrie” (PSI) een bijdrage kan leveren aan een beter inzicht in de snelheid waarmee de bodemdaling verloopt in het gaswinningsgebied bij Franeker en een beter inzicht in de vorm en de diepte van de dalingsschotel.

Randvoorwaarden van de studie

De begrenzingen voor het onderzoek die door SodM zijn aangegeven zijn:

- Een analyse voor het gebied (RD-coördinaten in Nieuw-Amersfoort):
X=156.000 – 170.000 m
Y=572.000 – 584.000 m
- Periode 1992-2006

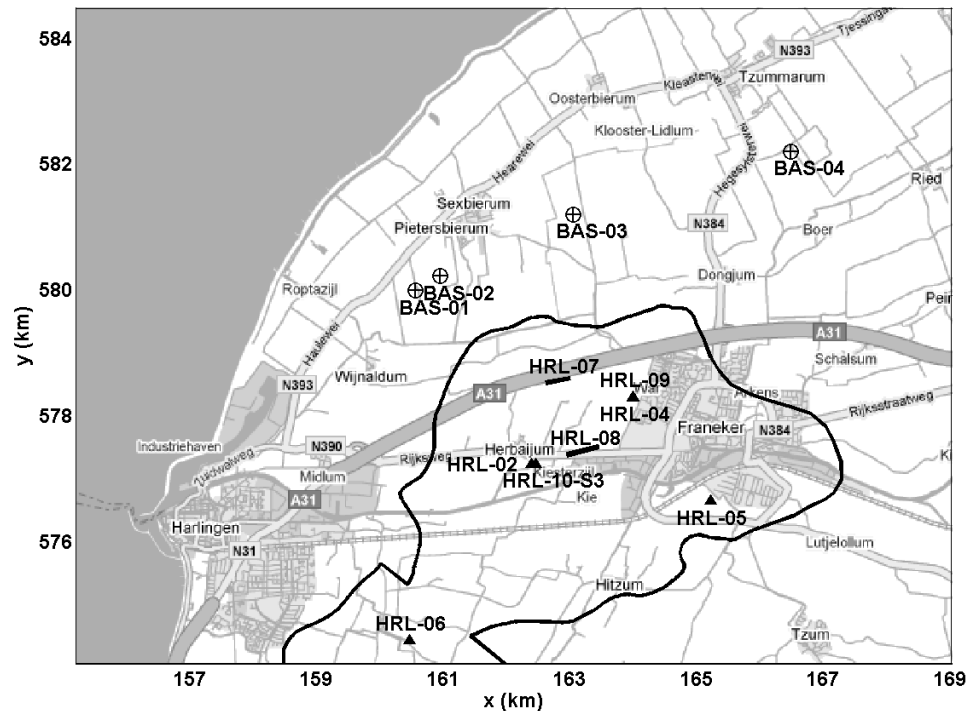
De TU Delft heeft haar beschikbare dataset van satelliet radarmetingen onderworpen aan een nieuwe PSI dataverwerkingsmethode om tot een optimale schatting van bodemdaling en fasemeerduidigheden te komen. Deze resultaten zijn vervolgens uitgezet tegen de waterpassingsmetingen van de bodemdaling en de verschillen en overeenkomsten geanalyseerd.

Hoofdstuk 2 beschrijft de verwerking van de PSI data, de kwaliteit van de radarmetingen en de reguliere peilmerkdata zoals opgenomen in de DID-database. In hoofdstuk 3 wordt de consistentie tussen de beweging geschat uit de PSI punten en de daling gemeten aan de peilmerken geanalyseerd. In hoofdstuk 4 worden de additionele data in het gebied besproken en wordt de consistentie met de PSI daling geanalyseerd. Hoofdstuk 5 geeft de analyse van de omvang, laterale verdeling en snelheid van de bodemdaling in Noordwest-Friesland. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 conclusies gegeven.

1.2 Achtergrond

Ten westen van Franeker wordt door Vermilion Oil & Gas Netherlands B.V (Vermilion) gas gewonnen uit het Harlingen Boven Krijt (HRL) veld (Figuur 1-1). Deze winning is begonnen in 1988. Frisia Zout B.V. (Frisia) wint zout uit de Barradeel en Barradeel II concessies. De winning via de BAS-1 en BAS-2 oploscavernes ten zuiden van Sexbierum is begonnen in 1995 en loopt nu ten einde. In 2004 is de BAS-3 caverne ten oosten van Sexbierum in gebruik genomen, gevolgd door de BAS-4 caverne ten zuiden van Tzummarum in 2006.

De mijnbouwwetgeving vereist een beschrijving van de te verwachten bodemdaling en metingen om de werkelijke bodemdaling te bepalen en daarmee de verwachtingen te kunnen verifiëren. De verwachtingen zijn bepalend voor maatregelen om schade door bodemdaling te beperken.

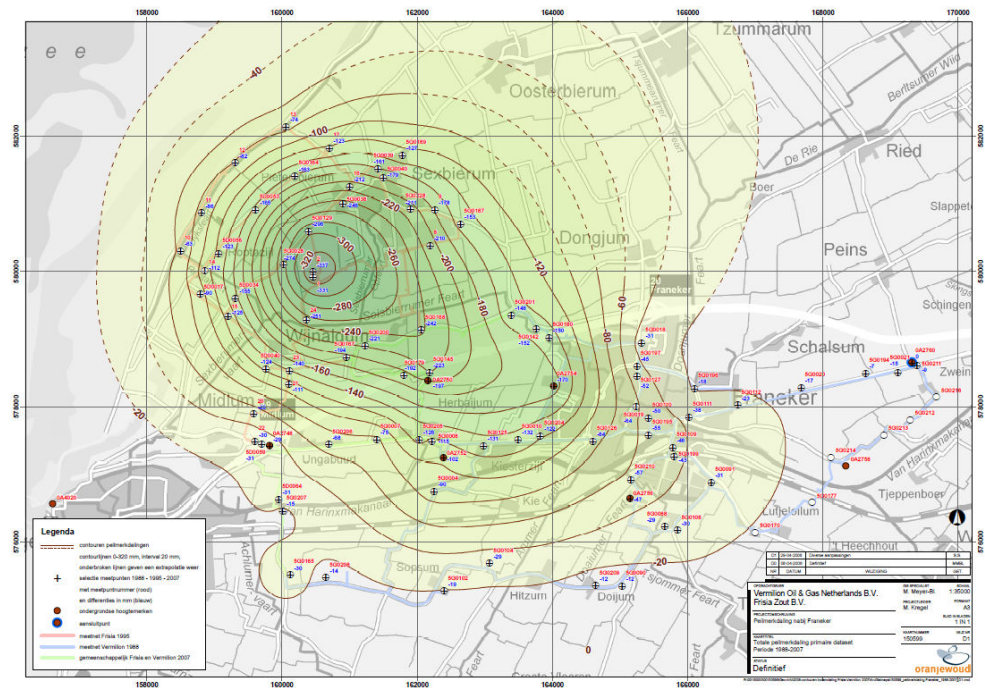


Figuur 1-1. Overzichtskaart van het studiegebied met het Harlingen (Chalk) gasveld als contour, de verticale putten als zwarte driehoeken en de horizontale putten als dikke zwarte lijnen. Verder zijn ook de BAS zoutcavernes aangegeven. Dezelfde symbolen zullen in alle figuren gebruikt worden.

In het kader van de mijnbouwwet zijn in Noordwest-Friesland sinds 1988 periodieke tweede orde nauwkeurigheidswaterpassingen over vaste peilmerken uitgevoerd. De meetresultaten zijn in de vorm van NAP hoogteveranderingen in de tijd vastgelegd in openbare meetregisters (<http://www.nlog.nl/nl/hazards/registers/registers.html>). Daarnaast zijn de hoogten van de reguliere peilmerken in deze campagnes opgenomen in de DID-database (<http://www.rdnap.nl>).

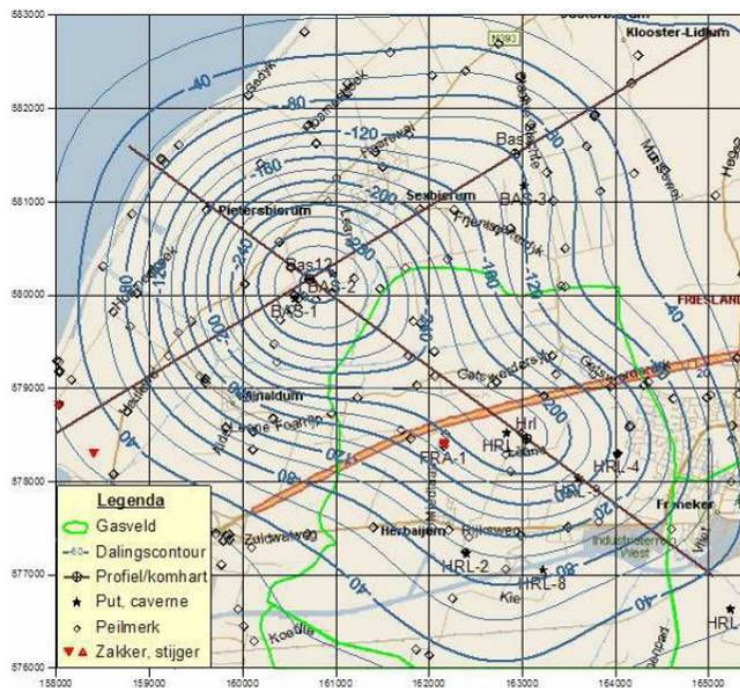
De in de meetregisters gepubliceerde hoogteverschillen geven inzicht in de totale beweging van de gemeten peilmerken, maar zijn geen directe maatstaf voor de hoeveelheid bodemdaling veroorzaakt door delfstofwinning. Naast de diepe bewegingen ten gevolge van delfstofwinning dragen ook ondiepe processen (zetting van de slappe aardlagen bijvoorbeeld ten gevolge van polderpeilverlagingen en natuurlijke klink) en de eigen beweging van het vaste object (gerelateerd aan de funderingskwaliteit van het bouwwerk) waarin het peilmerk is aangebracht bij aan de totaal gemeten peilmerkdaling.

In 2007 heeft Oranjewoud B.V. in opdracht van SodM de omvang en vermoedelijke oorzaken van gemeten peilmerkdaling in Noordwest-Friesland op consistente wijze in beeld gebracht. Hierbij zijn de metingen van de primaire peilmerken opnieuw aangesloten op het NAP-net middels twee stabiele referentiepunten. De op deze wijze verkregen totale peilmerkdaling over 1988-2006 is geanalyseerd en vergeleken met de modelresultaten van de bodemdaling t.g.v. zoutwinning van Frisia (BECi, 2007) en van de bodemdaling t.g.v. de gaswinning van Vermilion (Vermilion, 2007). In 2008 heeft Oranjewoud deze kaart in opdracht van Vermilion en Frisia geactualiseerd met de waterpassingsmeting van 2007. Figuur 1-2 geeft de totale peilmerkdaling tussen 1988 en 2007 zoals die in de actualisatie is bepaald.



Figuur 1-2: Totale peilmerkdaling primaire dataset tussen 1988 en 2007 (Oranjewoud, 2008)

De in deze studie gebruikte dataset van primaire peilmerken heeft een zeer slechte bedekking in het gebied tussen Franeker, Herbaijum en de A31. Houtenbos (2008) gebruikt in zijn analyse alle aanwezige peilmerken om de bodemdaling in Noordwest-Friesland vast te stellen (Figuur 1-3). Hoewel de verkregen bodemdaling bij de zoutcavernes consistent zijn met de studie van Oranjewoud, is de daling boven de gaswinning tussen de A31 en Franeker 4 cm meer dan in de Oranjewoud studie.



Figuur 1-3: Totaal gemeten bodemdaling over de periode 1988-2007 in mm (Houtenbos, 2008).

Aangezien de stabiliteit van de gebruikte additionele peilmerken in dit gebied ter discussie stond heeft Staatstoezicht op de Mijnen TNO de opdracht gegeven om na te gaan of “Persistent Scatterer Interferometry” (PSI) een bijdrage kan leveren aan een beter inzicht in de omvang en laterale verdeling van de bodemdaling in Noordwest-Friesland en de snelheid waarmee de bodemdaling in het gaswinningsgebied bij Franeker verloopt.

2 Data

2.1 PS-InSAR data

Voor Noordwest Friesland tussen 1992 en 2006 zijn verschillende InSAR radar datasets beschikbaar (Figuur 2-1 en Tabel 2-1). Voor deze specifieke studie zijn twee van deze datasets verwerkt. De potentiële dataset van de ERS-1 en ERS-2 satellieten (frame 151) bestaat uit 117 beelden. Hiervan zijn 53 ERS-2 beelden vanaf 20 april 1995 tot en met 6 oktober 2000 gebruikt. De potentiële dataset van Envisat (frame 423) bestaat uit 56 beelden, waarvan er 47 zijn gebruikt tussen 15 oktober 2003 en 3 september 2008. Voor beide waarnemingssets zijn dus gemiddeld 10 metingen per jaar uitgevoerd.

De overige, niet gebruikte data beslaan de eerste periode van ERS-1 (1992-1993 en 1993-1994), waarin de satelliet eerst een te korte tijdreeks bestrijkt en daarna in een andere baan om de aarde gebracht is. Door de afwezigheid van bruikbare data in die tweede periode is de temporele bemonstering onvoldoende, en is het niet mogelijk om met voldoende betrouwbaarheid deformatie te schatten over de volle tijdspanne, tenzij gebruik wordt gemaakt van additionele informatie. Daarnaast zijn er veel data beschikbaar van ERS-2 vanaf november 2000 tot heden. Aangezien de standbepaling van de satelliet na deze datum echter niet gegarandeerd is zijn deze data niet zonder extra dataverwerking te gebruiken. Deze extra dataverwerking valt buiten het bereik van dit project. Opgemerkt dient te worden dat de ontwerplevensduur van een satelliet meestal zo'n vijf jaar is. Beschikbaarheid van data langer dan deze vijf jaar dient als bonus worden gezien. (Overigens bestaat om deze reden de toekomstige Sentinel-1 missie uit een gegarandeerde serie van satellieten tot 2030, met dagelijkse waarnemingen.).



Figuur 2-1. Ligging van de radar satellietbeelden ('frames') over noordwest Friesland. Het gebied is vanuit twee dalende banen (links, frames 423 en 151) en twee stijgende banen (rechts, frames 29 en 258) waargenomen. Van elk beeld is een tijdserie beschikbaar vanuit de satellieten ERS-1, ERS-2 en Envisat. Het aantal beelden dat daadwerkelijk door de satellieten is opgenomen is aangegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Overzicht van beschikbare radarbeelden vanuit de verschillende tracks. Aangegeven is het aantal beelden N dat door de satellieten is opgenomen, het tijdvak dat wordt omspannen, en de aantekening welke beelden voor onderzoeksdoeleinden beschikbaar zijn bij de TU Delft. Slechts tracks 151 (ERS) en 423 (Envisat) zijn gebruikt in deze studie. Voor de periode 1992-2001 is ook track 258 beschikbaar, maar i.v.m. de beperkte duur van dit project niet gebruikt. ERS data vanaf 2001 hebben een beperkte kwaliteit. Voor de periode 2003 tot heden (Envisat, overige tracks) is er helaas geen gebruiker die data acquisities heeft aangevraagd.

		Track 29	Track 258	Track 423	Track151
ERS 1/2	Aantal	N=63	N=54	N=100	N=117
(‘92-heden)	Tijdvak	2000-2008	1993-2005	2000-2008	1992-2005
	Beschikbaar	ESA	TU Delft	ESA	TU Delft
Envisat	Aantal	N=4	N=8	N=56	N=2
(‘03-heden)	Tijdvak	2002-2004	2006-2007	2003-2008	2002-2003
	Beschikbaar	ESA	ESA	TU Delft	ESA

2.2 Radar dataverwerking

Een uitgebreide beschrijving van de gebruikte radardataverwerkingsmethode wordt gegeven door Hanssen (2001), Kampes (2005) en Ketelaar (2008). Een lijst met antwoorden op veel gestelde vragen wordt gegeven in de appendix van dit rapport.

De radar tijdseries zijn verwerkt volgens het single-master principe. Hierbij worden interferogrammen gegenereerd ten opzichte van een bepaalde referentie-acquisitie. Uit de 100x100 km radarbeelden wordt een uitsnede gedefinieerd die het interessegebied ruim omvat. De data worden overbemonsterd met een factor twee, waardoor een puntsafstand van circa 2 meter in de *range*-richting en 10 meter in de *azimuth*-richting wordt verkregen. De data worden met decimeter precisie ge-co-registreerd ten opzichte van het referentiebeeld. Uit de exacte efermeriden van de satellietbanen wordt gecorrigeerd voor de invloed van zowel de aardkromming als de lokale topografie.

Uit de statistiek van de radarverstrooiing wordt een initiële set potentieel coherente verstrooiers (persistent scatterers, of PS) gekozen (amplitude dispersie 0.3 voor de eerste orde kandidaten en 0.5 voor de tweede-orde kandidaten). In deze studie is deze analyse in het hart van het deformatiegebied uitgebreid tot een analyse van *alle* pixels in de beelden.

Op basis van het eerste orde netwerk van potentiële coherente PS wordt per verbindingslijn tussen twee punten (*arc*) een set parameters geschat, waaronder topografisch hoogteverschil, deformatie volgens het gekozen model onder de nul-hypothese, fasemeerduidigheden, en atmosferische signaalvertraging. Bij deze schatting per puntenpaar worden alle beschikbare waarnemingen in de tijd gebruikt. Deze schatting wordt vervolgens herhaald voor alle puntenparen in het netwerk, waarna deze wordt geïntegreerd over het gehele netwerk. Hypothesetoetsing zorgt voor het verwijderen van niet-coherente punten of lijnsegmenten. De uitkomst van deze verwerkingsstap is een schatting van het ruimtelijke verloop van de atmosferische signaalvertraging per acquisitie.

Nadat dit geschatte atmosfeersignaal is verwijderd voor alle eerste- en tweede-orde netwerk punten, wordt in de verdichtingfase opnieuw de gehele set aan parameters geschat (exclusief atmosfeer), gevolgd door toetsing. Hierbij is in de kritische delen van de verpakkingpoot elk pixel geëvalueerd. De analyse van de residuen ten opzichte van het model onder de nulhypothese (temporele ensemble coherentie) levert de uiteindelijke selectie van niet-verworpen punten.

Indien de ruimtelijke verdeling van datapunten daartoe aanleiding geeft, of indien a priori kennis van het verzakkinggedrag beschikbaar is, kan automatisch of manueel worden besloten om de nulhypothese (het zogenaamde steady-state model: geen of lineaire deformatie) te verwerpen ten faveure van een aangepaste alternatieve hypothese. Het model onder de alternatieve hypothese heeft in het algemeen meer onbekende parameters, waardoor de overtaligheid wordt verminderd.

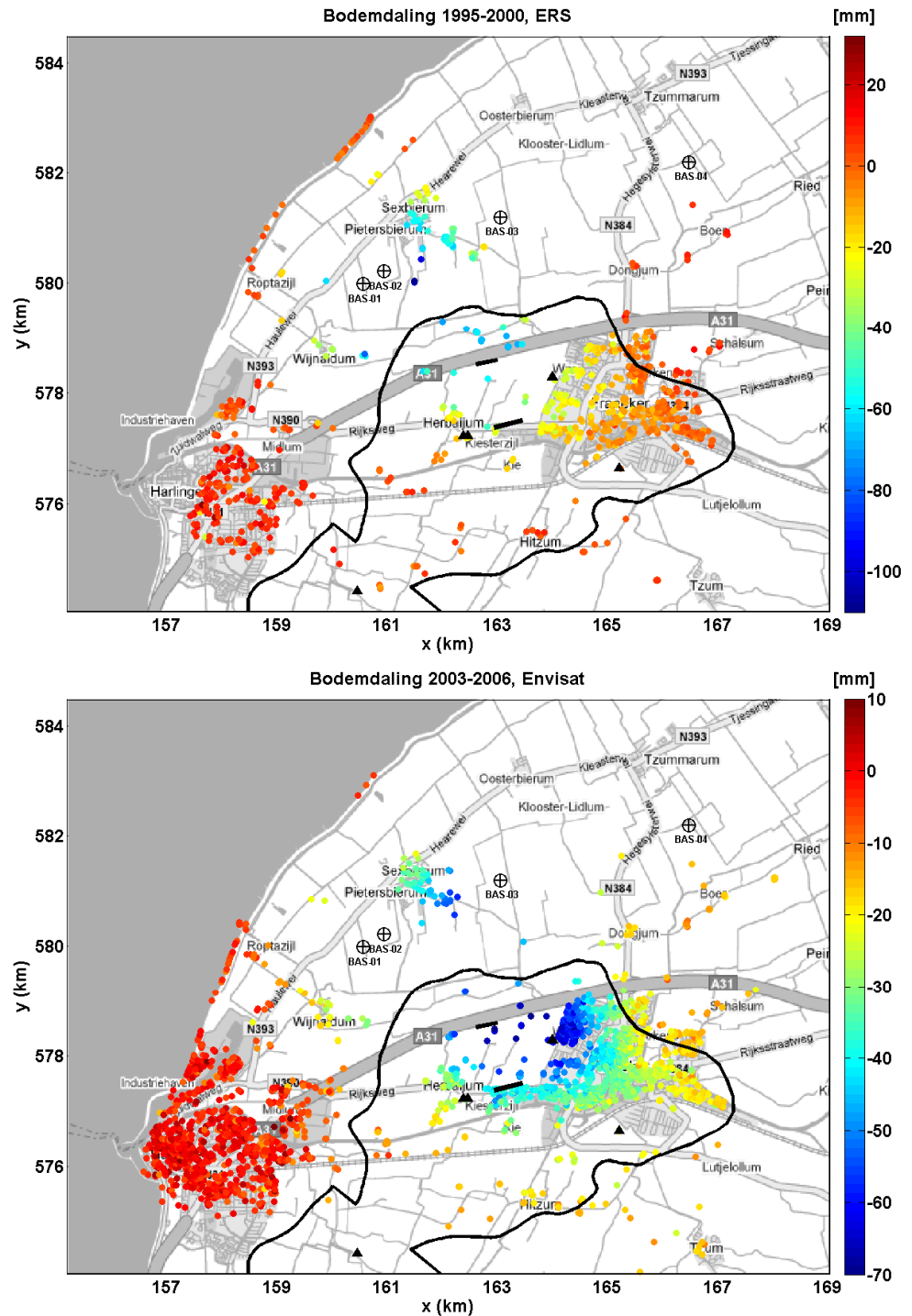
Na deze automatische verwerking is in deze studie nog een postprocessing iteratie uitgevoerd waarin blunders (onjuist geaccepteerde punten of type-2 fouten) worden geëlimineerd op basis van geofysisch/geotechnische kennis. Dit wordt toegepast aan de hand van het histogram van de geschatte topografische hoogteverschillen en van de snelheidsverschillen.

Tot slot worden alle geschatte deformaties vanuit de kijkrichting van de betreffende satelliet geprojecteerd op de verticaal, onder de aanname dat er minimale horizontale deformatie verwacht is. Dit is in overeenstemming met radarstudies in bijvoorbeeld Groningen (Ketelaar, 2008) waarbij de maximale horizontale deformatie in de orde van 1 a 2 mm/jaar bedroeg. Indien horizontale deformatie toch aanwezig is resulteert dit in een fout in de geschatte verticaal beweging. Afhankelijk van de positie van een scatterer ten opzichte van de satelliet kan voor elke cm horizontale deformatie een fout van maximaal 4 mm in de geschatte verticaal worden verkregen. Deze fout kan zowel een over- als een onderschatting van het signaal zijn. Indien de horizontale beweging in het verlengde van de kijkrichting van de satelliet ligt zal de verticale beweging bij verwaarlozing van de horizontaal worden overschat. Indien de horizontale beweging tegen de kijkrichting van de satelliet ingaat, zal de verticale beweging ten gevolge van het verwaarlozen van de horizontaal worden onderschat. Parallel aan de bewegingsrichting van de satelliet treedt geen verstoring van de bepaalde verticale beweging op ten gevolge van horizontale deformatie. Voor Noordwest-Friesland resulteert dit in een overschatting van de deformatie oosten van de het midden van de track van de satelliet en een onderschatting van de verticale beweging ten westen van de het midden van de track van de satelliet (zie Appendix D voor een uitgebreide analyse van de invloed van horizontale deformatie).

Na de bewerking van de beelden en het identificeren van permanente reflectoren bestaat de PS-InSAR ERS-2 (2^e polynoom hypothese verwerking) dataset uit ca. 800 punten terwijl de PS-InSAR Envisat dataset uit 3227 punten bestaat. Dit verschil wordt veroorzaakt door de variaties in de stabiliteit van de radarsensor van ERS-2, waardoor minder punten voldoen aan het selectie criterium voor het starten van de PSI analyse.

In Figuur 2-2 is boven de bodemdaling tussen 1995 en 2000 (66 maanden) zoals waargenomen door de ERS-2 satelliet te zien. De maximale bodemdaling is ~11 cm en bevindt zich bij de BAS-2 zoutcaverne. In de onderste figuur is de bodemdaling tussen 2003 en 2006 te zien zoals waargenomen door de Envisat satelliet. De maximale bodemdaling in dit tijdvak is 6,6 cm en deze bevindt zich in het noorden van het

Harlingen gasveld. Het verschil tussen de bodemdaling in het westen en oosten van Franeker is in deze 33 maanden ongeveer 5 cm. Dit komt overeen met een hellingsverandering van ongeveer 1 milliraad.



Figuur 2-2. Voorbeeld van de radarmetingen van bodemdaling (mm) tussen 1995 en 2000 (ERS-2 satelliet, ca. 800 metingen) en tussen 2003 en 2006 (Envisat satelliet, ca. 3000 metingen). De contour geeft het Harlingen gasveld aan. Duidelijk is te zien hoe het dalingsgebied zich uitbreid naar het zuidoosten.

2.3 Kwaliteit van de radarmetingen

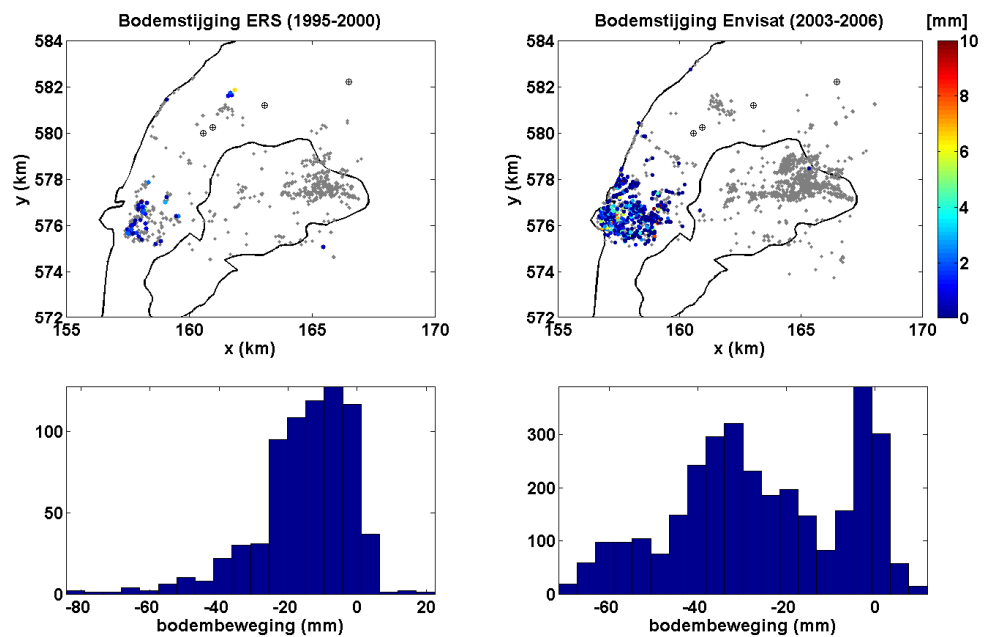
De kwaliteit van de radarmetingen is intrinsiek verschillend voor elk meetpunt. Radarreflecties kunnen immers afkomstig zijn van veel verschillende objecten in het terrein, met verschillende fysische en reflectie-eigenschappen. Daarnaast is de kwaliteit van de geschatte parameters afhankelijk van het aantal beschikbare radaracquisities en hun verdeling in de tijd, en van de gesteldheid van het radarinstrument. De kwaliteit is voor deze datasets empirisch geschat door de standaardafwijking van honderden metingen in Harlingen te gebruiken, onder de aanname dat Harlingen niet beïnvloed wordt door significante bodembeweging. Hieruit volgt dat de standaardafwijking van een enkele deformatieschatting 2,7 mm is voor de ERS dataset, en 2,1 mm voor de Envisat dataset. (Ter vergelijking: de kwaliteit van de uiteindelijk vereffende hoogtemeting met waterpassing wordt geschat op 2,5 mm).

2.4 Bodemstijging

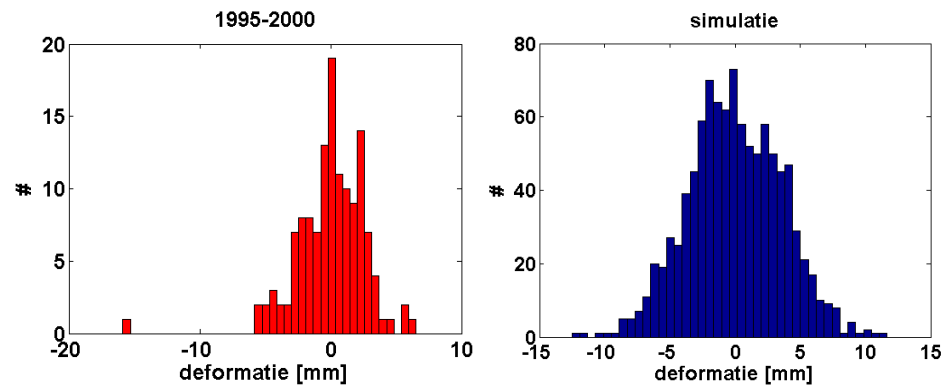
Wanneer uit alle meetpunten alleen die punten worden geselecteerd met een positieve waarde suggereren zowel de ERS-2 als de Envisat PS-InSAR data ook gebieden met bodemstijging (Figuur 2-3). Bij zowel de ERS-2 als de Envisat dataset lijkt de bodemstijging daarbij geconcentreerd in Harlingen. Indien aangenomen wordt dat de intrinsieke standaardafwijking van de radar deformatieschattingen rond de 2,5 mm ligt is het echter statistisch te verklaren dat een gebied dat stabiel is, en wordt gekenschetst door honderden meetpunten, een standaard-normaalverdeling kent waarbij zowel dalings- als stijgingspunten kunnen worden gevonden¹. Figuur 2-4 demonstreert dit principe door het waargenomen deformatiehistogram van alleen de stad Harlingen te vergelijken met een gesimuleerde set van 1000 waarnemingen met een verwachtingswaarde nul en een standaardafwijking van 2,5 mm. De conclusie is dan ook dat het ogenschijnlijke stijgingssignaal niet-significant is, en het histogram juist een bevestiging betekent van de stabiliteit van Harlingen.

De ERS-2 data, onder de nulhypothese van lineaire deformatie, laat ook een bodemstijgingssignaal van 1,5 cm zien voor enkele punten in Sexbierum (zie Figuur 2-3). Deze stijging zou voort kunnen komen uit een oplossing waarvan de fasemeerduidigheden onvoldoende betrouwbaar is. In dit geval, waarbij het gaat om een geïsoleerde groep punten die relatief ver verwijderd zijn van omgevingspunten is de betrouwbaarheid van de fasemeerduidigheden schatting beperkt. (Om deze reden wordt het signaal ook onder een alternatieve hypothese getoetst).

¹ Dit is eenvoudig in te zien door het verschil van twee waarden, beide met een standaardafwijking van 2,5 mm, te nemen. Zelfs bij een stabiel punt zal de waargenomen cumulatieve deformatie van een deel van de punten dan de +4 mm overschrijden.



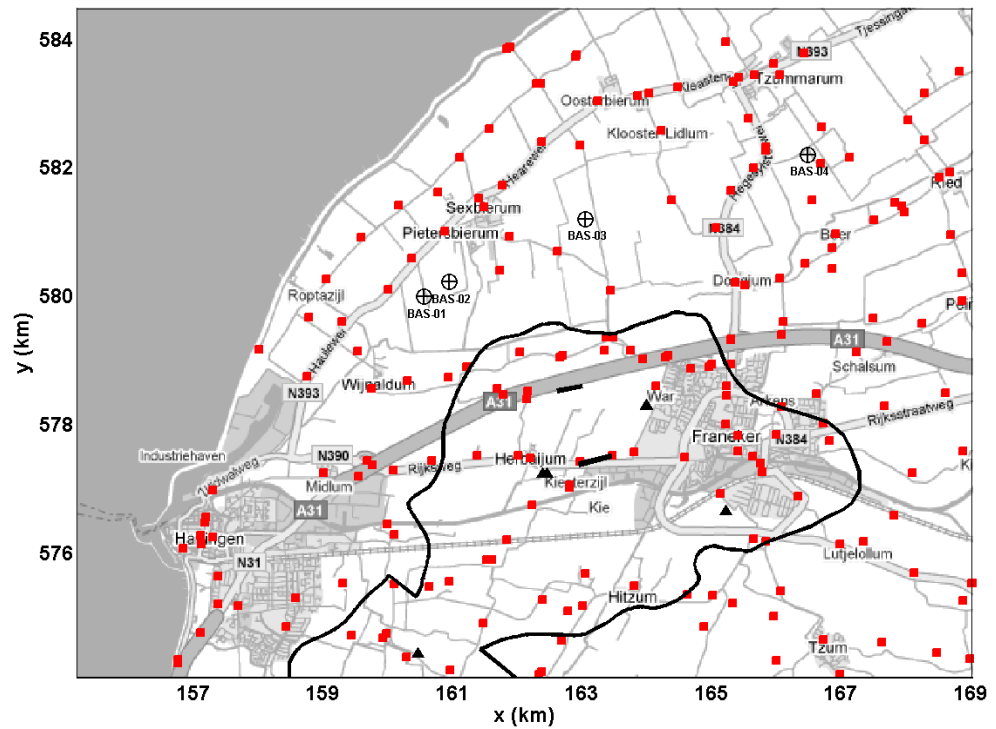
Figuur 2-3. Vermeende bodemstijging in de ERS-2 en Envisat data (boven) in millimeters en histogram van de bodembeweging (mm) in de ERS-2 en Envisat data (onder). Negatieve bodembeweging is bodemdaling en positieve bodembeweging is bodemstijging.



Figuur 2-4. Links: Waargenomen histogram voor de stad Harlingen aan cumulatieve deformatie (1995-2000) uit radarmetingen. Rechts: Gesimuleerde verdeling van cumulatieve deformatie van 1000 punten met een verwachtingswaarde 0 en een standaardafwijking van 2,5 mm voor elke double-difference waarneming. Hieruit volgt dat het waargenomen 'stijgingssignaal' niet als significant mag worden beschouwd, zolang het stijgingssignaal ook ruimtelijk normaal is verdeeld.

2.5 Peilmerk data

De peilmerk data komen uit de DID-database. Deze database is onderverdeeld in 765 kaartbladen die gezamenlijk heel Nederland beslaan. De data voor deze studie, die de bodemdalingkom van het gasveld Harlingen en de zoutcavernes van Barradeel beslaan, zijn gelegen in de kaartbladen 5D, 5E, 5F, 5G, 5H, 10B, 10E, en 10F. Voor deze TNO studie hebben we alle peilmerk data gebruikt tussen 1992 en 2006. Figuur 2-5 laat de locaties van de, in totaal 263, peilmerken zien samen met de locatie van het Harlingen (Chalk) gasveld.



Figuur 2-5. De locaties van de peilmerken en de contouren van het Harlingen gasveld. Niet alle punten zijn op alle epochen waargenomen,

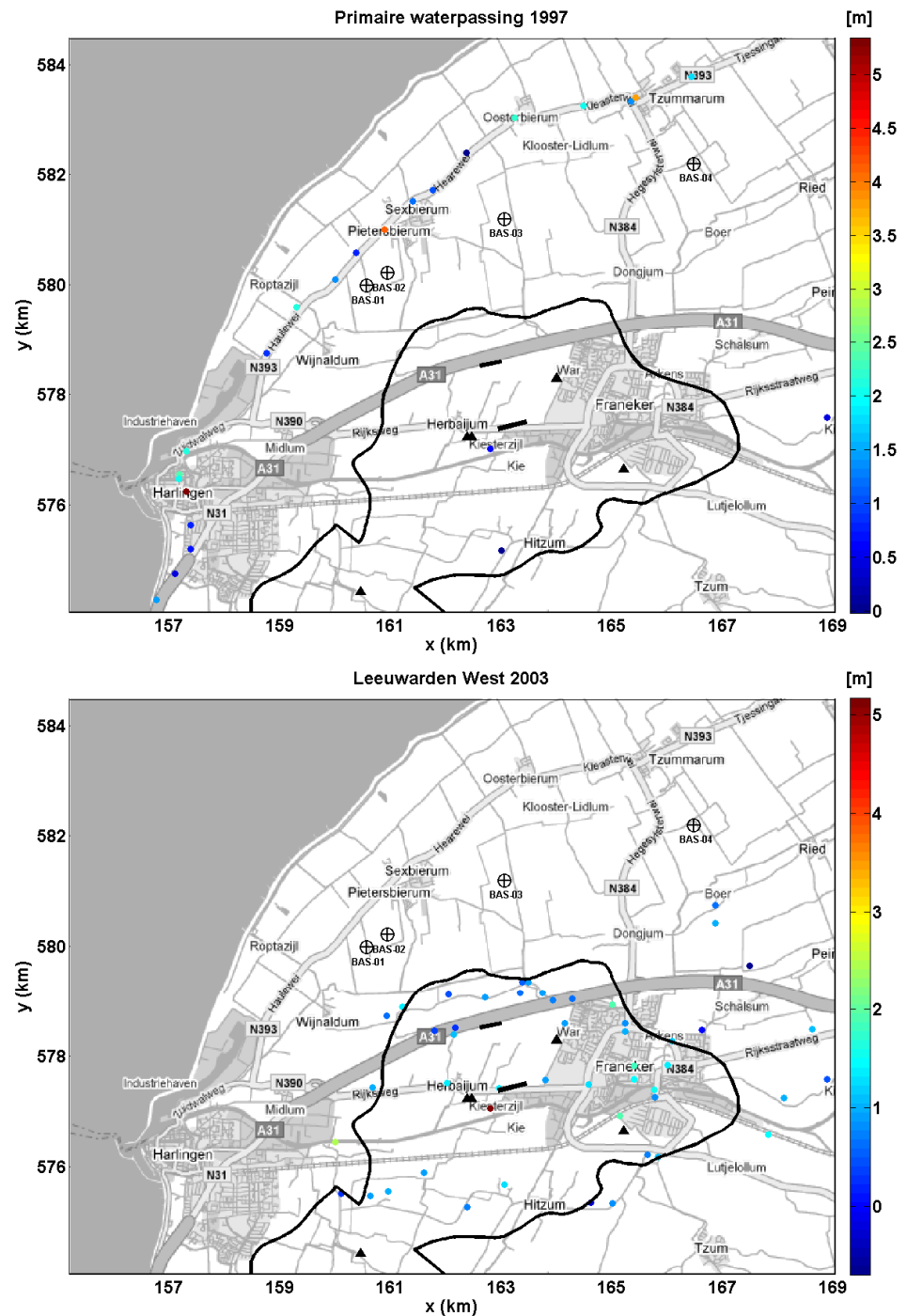
Tabel 2-2. Waterpascampagnes beschikbaar voor het studiegebied.

Registratie datum	waterpassing
04-09-1992	Secondaire waterpassing
28-06-1993	Secondaire waterpassing
22-03-1996	Elf Petroland
23-03-1997	Primaire waterpassing
09-09-1997	Elf Petroland
17-09-1997	Frisia/Vermilion
05-06-1998	Secondaire waterpassing
11-09-2000	Frisia/Vermilion
31-08-2001	Frisia/Vermilion
01-09-2002	Frisia/Vermilion
13-04-2003	Leeuwarden West
12-07-2003	Secondaire waterpassing
24-09-2003	Frisia/Vermilion
12-09-2004	Frisia/Vermilion
14-09-2005	Frisia/Vermilion
01-07-2006	Frisia/Vermilion
Sept. 2007	Leeuwarden West (niet beschikbaar)*

- *Deze waterpassing is gebruikt door Houtenbos (2008), maar was niet beschikbaar in deze studie*

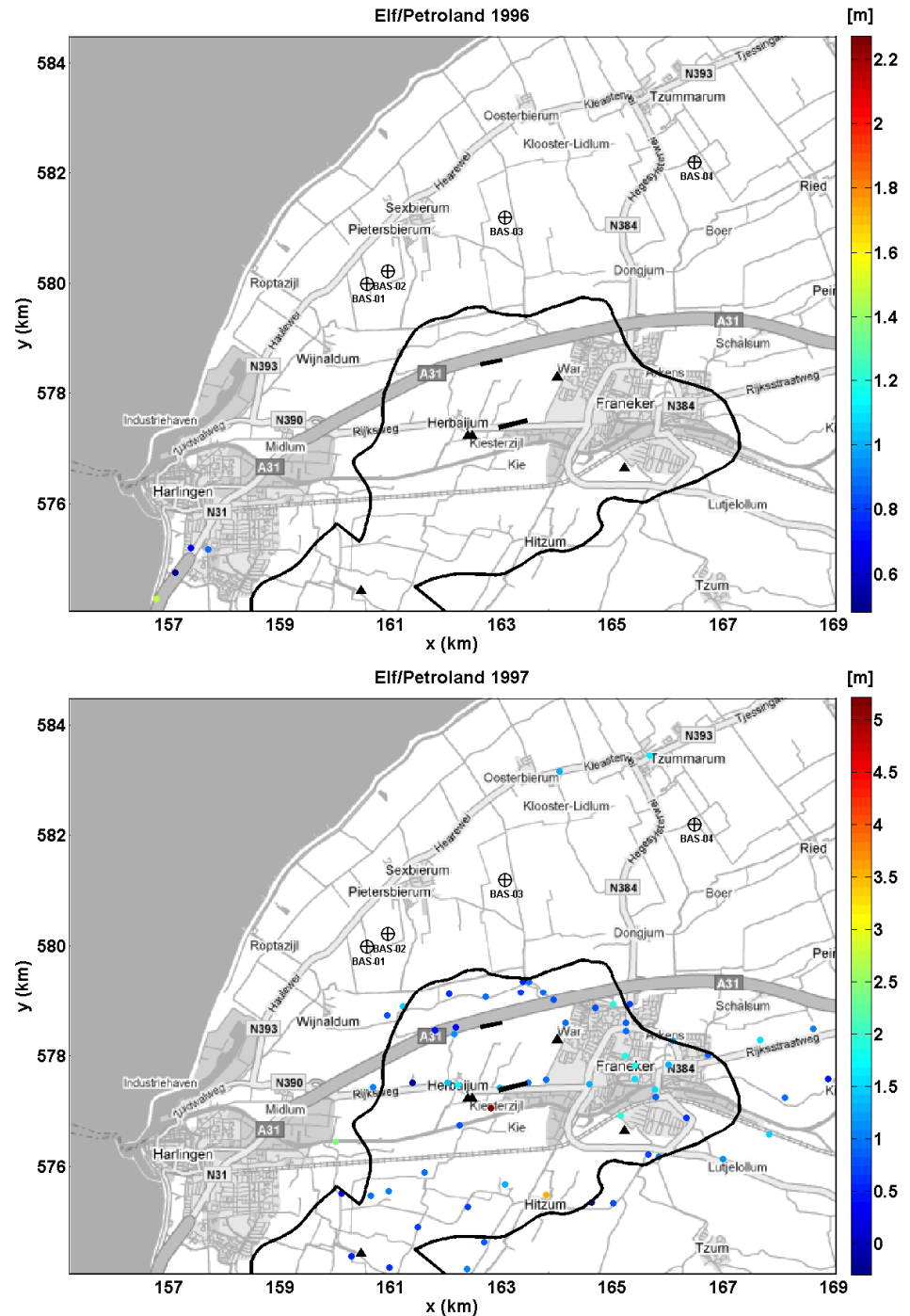
De waterpassingen zijn uitgevoerd in 1992, 1993, 1996, 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 en 2006 (zie Tabel 2-2). Er is één primaire waterpassing gemeten in 1997 (Figuur 2-6). Elf Petroland heeft in 1996 en 1997 peilmerken ingemeten boven het

Harlingen gasveld (zie Figuur 2-7) en Leeuwarden-West in 2003 (zie Figuur 2-6). Verder zijn er secundaire waterpassingen geweest in 1992, 1993, 1998 en 2003 (Figuur 2-8 en Figuur 2-9). Tenslotte hebben Frisia & Vermilion in 1997, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 en 2006 peilmerken ingemeten rond het gasveld en de Barendseel zoutcavernes (Figuur 2-10 - Figuur 2-13).

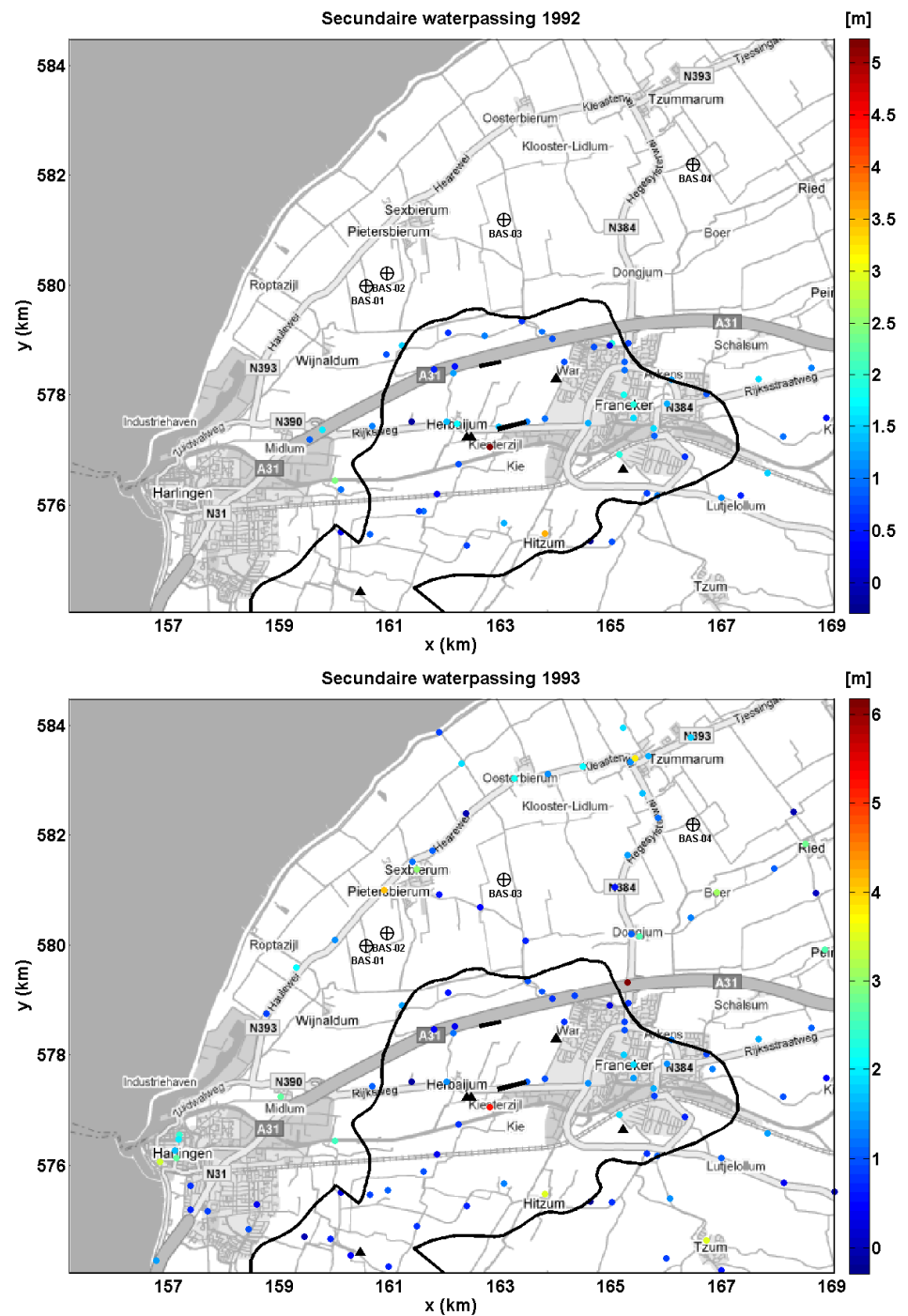


Figuur 2-6. Locatie van de peilmerken gebruikt in de primaire waterpassing in 1997 en een secundaire waterpassing voor het district Leeuwarden west in 2003. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.

De datadichtheid is erg verschillend tussen de verschillende meetcampagnes. Het merendeel van de campagnes beslaat maar een gedeelte van het onderzochte gebied. Alleen de secundaire waterpassingscampagnes in 1993, 1998 en 2003 en de Frisia/Vermilion campagne in 2006 hebben een voor het hele gebied aanvaardbare datadichtheid.

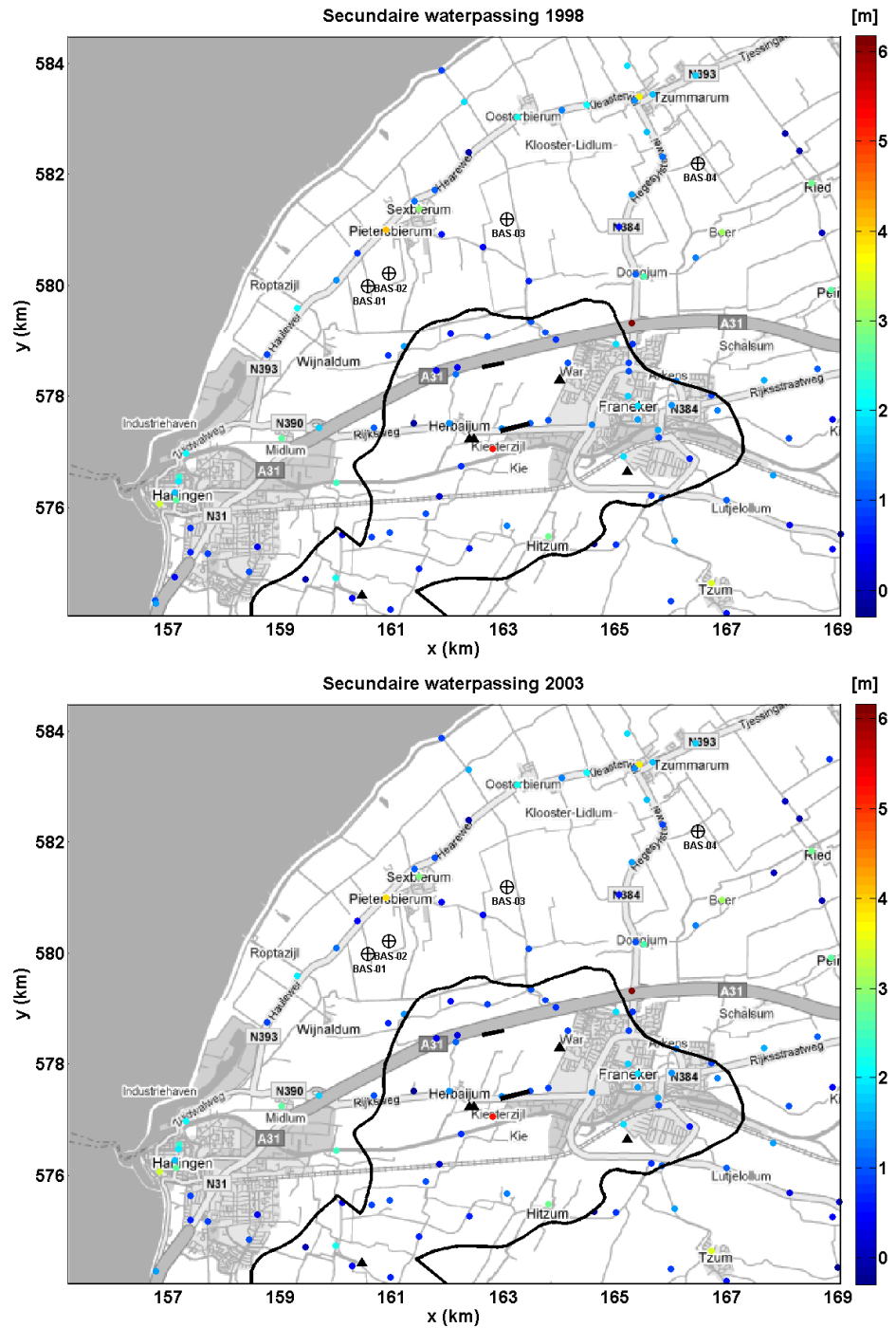


Figuur 2-7. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Elf Petroland in 1996 en 1997. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkboten aan.

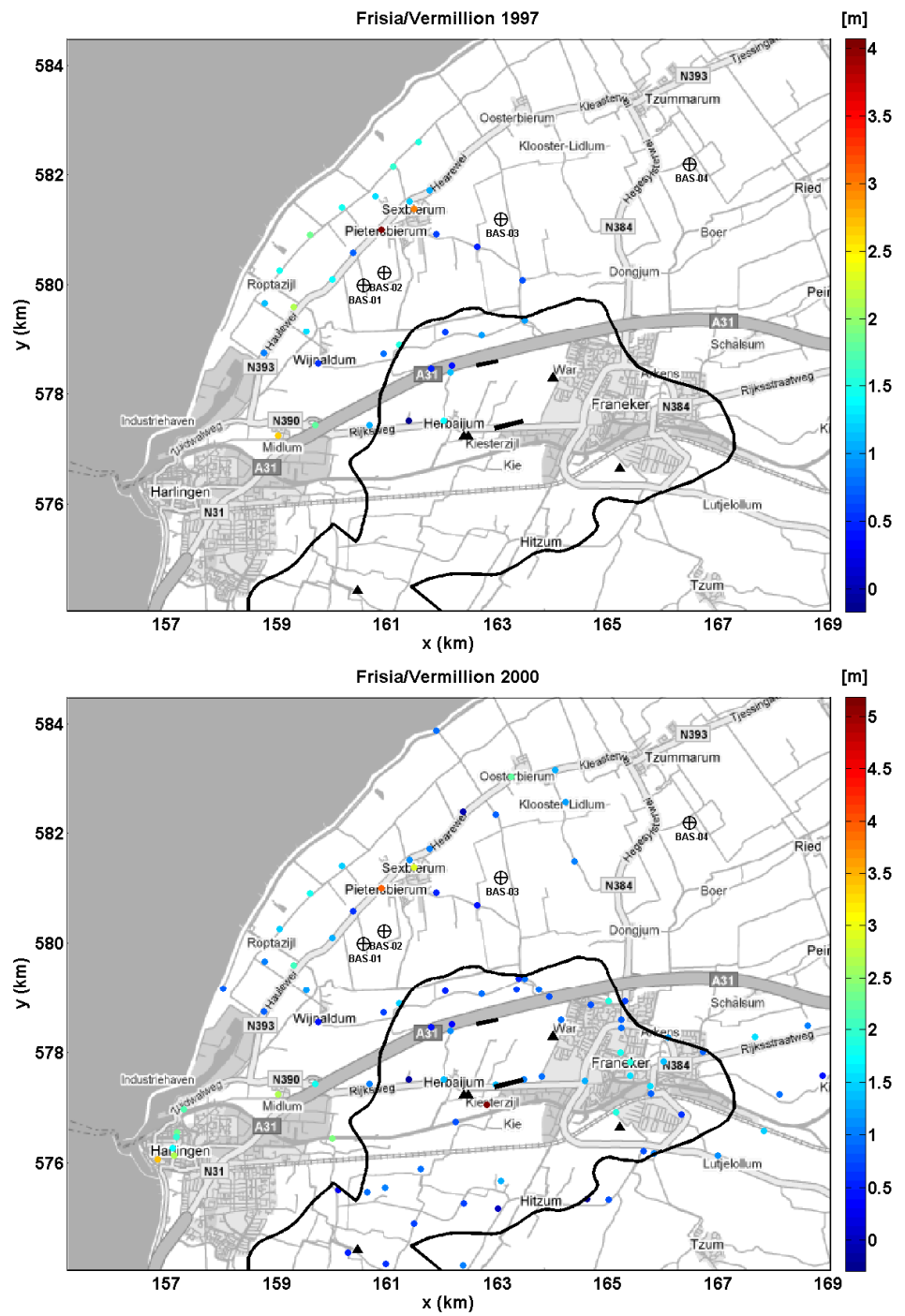


Figuur 2-8. Locatie van de peilmerken gebruikt in de secundaire waterpassingen in 1992 en 1993. De datadichtheid in 1993 is voldoende om te gebruiken voor de bepaling van de daling in de periode voor 2000 en om een betere daling te bepalen over het gasveld. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.

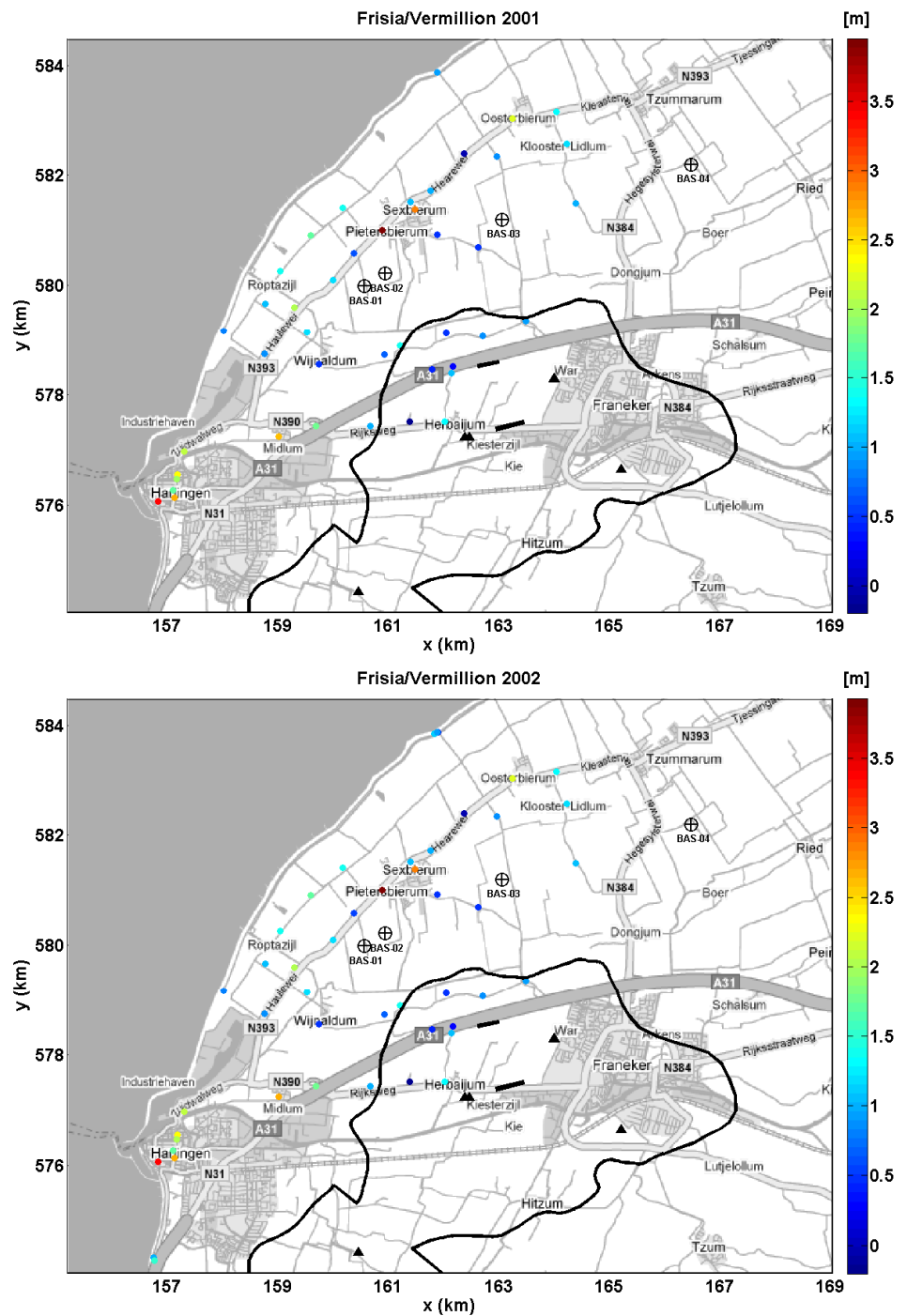
Alle hoogten gemeten bij de peilmerken zijn gerefereerd aan nieuw NAP. De standaardafwijking van de hoogtemetingen met waterpassing ligt rond de 2,5 mm.



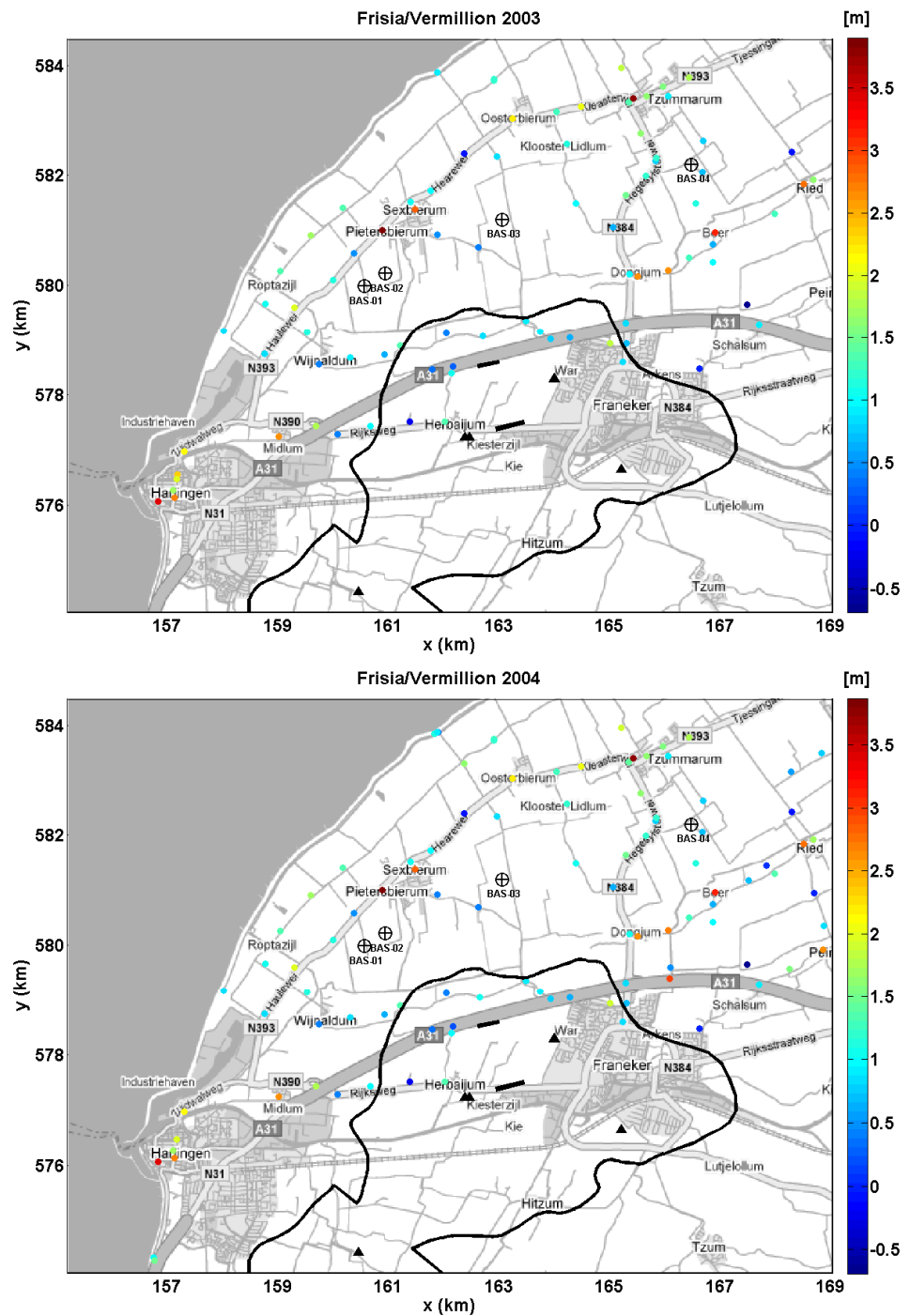
Figuur 2-9. Locatie van de peilmerken gebruikt in de secundaire waterpassingen in 1998 en 2003. De datadichtheid in 1998 en 2003 is voldoende om te gebruiken voor de bepaling van de daling in de periode voor 2000 en om een betere daling te bepalen over het gasveld. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.



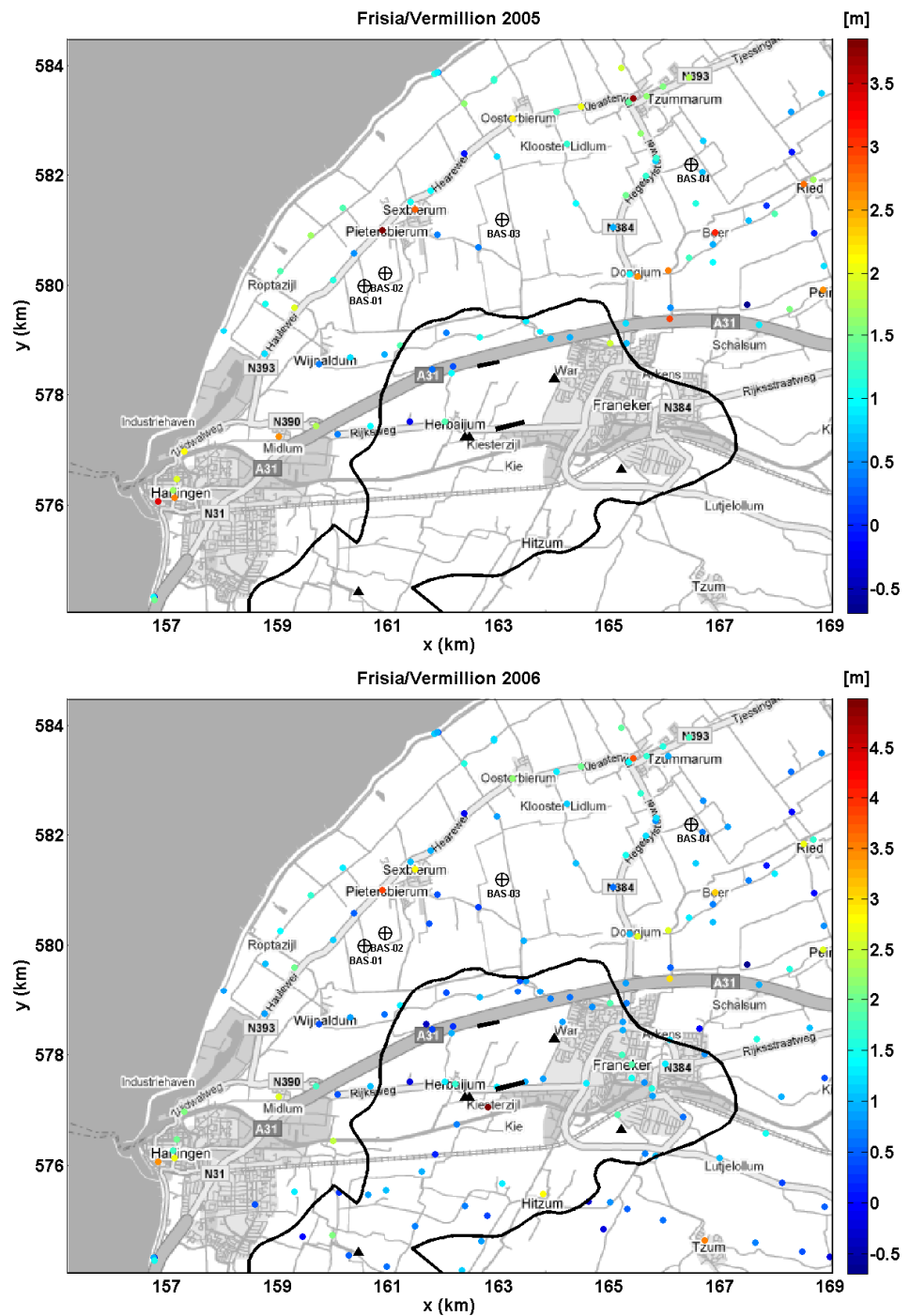
Figuur 2-10. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermilion in 1997 en 2000. De data dichtheid boven het Harlingen gasveld is redelijk in 2000. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkboten aan.



Figuur 2-11. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermillion in 2001 en 2002. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.



Figuur 2-12. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermillion in 2003 en 2004. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkbouten aan.



Figuur 2-13. Locatie van de peilmerken gebruikt in de waterpassingen voor Frisia en Vermillion in 2005 en 2006. De data dichtheid boven het Harlingen gasveld is redelijk in 2000, maar pas in 2006 echt op orde. De aangegeven hoogten (m) geven de gemeten hoogten van de lokale peilmerkboten aan.

3 Consistentie tussen peilmerk en PS-InSAR data

In dit hoofdstuk wordt de consistentie tussen de bodembewegingen waargenomen met waterpassing en InSAR satelliet data onderzocht. Een kwantitatieve vergelijking is niet mogelijk omdat de PSI scatterers en de waterpassingspeilmerken niet op dezelfde locaties gemeten worden noch op hetzelfde tijdstip. InSAR punten zijn gereflecteerd van een weg of gebouw, min of meer per toeval, terwijl waterpassingen gemeten worden door middel van bouten die aan structuren gekoppeld zijn. Verder wordt InSAR bijna instantaan op een bepaalde dag en tijd gemeten terwijl de waterpassingscampagnes gedurende enkele maanden kunnen worden uitgevoerd. Tijdens deze campagnes duurt de deformatie voort, hetgeen leidt tot sluitfouten en vereffening noodzakelijk maakt. Vanwege deze discrepanties in ruimte en tijd gebruiken wij vooral kwalitatieve (visuele) vergelijkingen tussen de InSAR en de waterpassingen.

Voor de vergelijking is het belangrijk om te beseffen dat ondiepe bodemdaling zoals compactie van veen en klei een bijdrage aan de gemeten daling geven. PSI scatterers vinden hun oorsprong in zowel een reflectie van een weg als van een goed gefundeerd gebouw. In het geval een scatterer veroorzaakt wordt door een reflectie van een weg kan de beweging van dit punt ook ten dele een ondiepe oorzaak hebben. Peilmerken worden gemeten door middel van bouten die aan objecten vastzitten. Deze objecten zijn in principe goed op de pleistocene zandlagen gefundeerd. Echter door negatieve kleef of verkeerde plaatsing van de peilmerken kan niet worden uitgesloten dat ondiepe bodemdaling een bijdrage aan de gemeten daling levert. Door de consistentie tussen PSI- en waterpassingsmetingen te onderzoeken kan de ondiepe daling niet worden uitgesloten. Wel kan vast worden gesteld of beide methoden dezelfde totale daling waarnemen. Alleen op basis van modellen van de ondergrond, waarin de verschillende processen worden gekwantificeerd is ontrafeling van de verschillende oorzaken van bodemdaling mogelijk. Deze ontrafeling van oorzaken vormt geen onderdeel van deze studie.

In dit hoofdstuk, wordt de peilmerkdaling met de PSI daling vergeleken door middel van laterale doorsneden door de datasets. Eerst voor de ERS data, waar we aantonen dat twee verwerkingsstappen nodig zijn (onder de nulhypothese en de alternatieve hypothese), en welke gevolgen het zou hebben indien deze tweetraps benadering niet zou zijn gevolgd. Daarna voor de Envisat data.

3.1 Overeenstemming in temporeel bereik

Voor het vergelijken van de PSI data met de waterpassingsdata is het noodzakelijk dat er naar dezelfde tijdsinterval wordt gekeken. Voor ERS-2 zijn data verwerkt tussen 1995 en 2000. In deze periode zijn alleen waterpassingen beschikbaar in 1998 en in 2000. Het is dan ook alleen mogelijk om de daling tussen 1998 en 2000 voor peilmerken en radar te vergelijken. Voor de Envisat dataset zijn jaarlijkse waterpassingen beschikbaar naast de radar data voor de periode 2003-2006. Voor de vergelijking is het belangrijk dat het exacte tijdstip (de datum) van de waterpassing wordt gebruikt, aangezien de deformatie in het gebied meerdere centimeters per jaar kan bedragen, waardoor grote verschillen met de radardata kunnen ontstaan (Zie Tabel 3-1).

Tabel 3-1. Referentietijdstip van de gebruikte waterpascampagnes (waarschijnlijk datum afronding laatste metingen) en tijdstip van de gebruikte radarwaarnemingen. Hieruit blijkt dat voor het interval 1998-2000, de startdatum twee weken verschilt en de einddatum 7 maanden. Voor het interval 2003 verschilt de startdatum 5 weken en de einddatum 3 weken.

	Radar	Δt	Waterpassing	Δt
1998-2000	19-JUN-1998		05-JUN-1998	
	03-FEB-2000	20 mnd	11-SEP-2000	27 mnd
2003-2006	15-OCT-2003		24-SEP-2003	
	26-JUL-2006	33 mnd	01-JUL-2006	33 mnd

3.2 1998-2000: Peilmerk data & ERS-2 PS-InSAR data

3.2.1 Ruimtelijke analyse ERS-2 nulhypothese verwerking en waterpassing

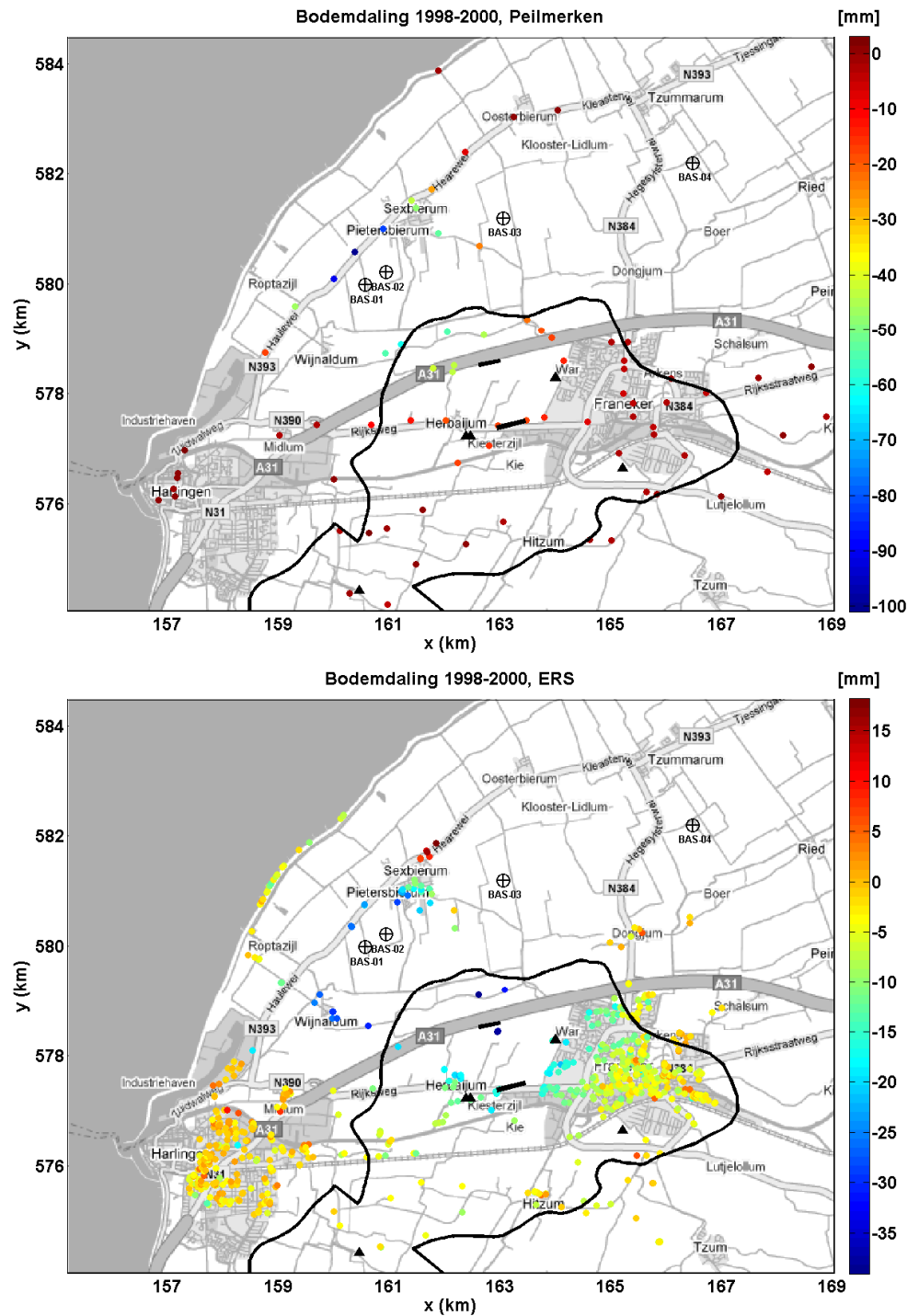
Onder de nulhypothese van lineaire deformatie worden resultaten verkregen als in Figuur 3-1. Hierin worden de bewegingen van de waterpaspeilmerken en de radarpunten getoond tussen 1998 en 2000.

De maximale bodemdaling voor de peilmerken in deze periode is 10,1 cm en ligt bij de Barradeel zoutcavernes BAS-1/2. Voor de radarpunten is de maximale bodemdaling 3,9 cm en bevindt zich in het noordwesten van het Harlingen gasveld.

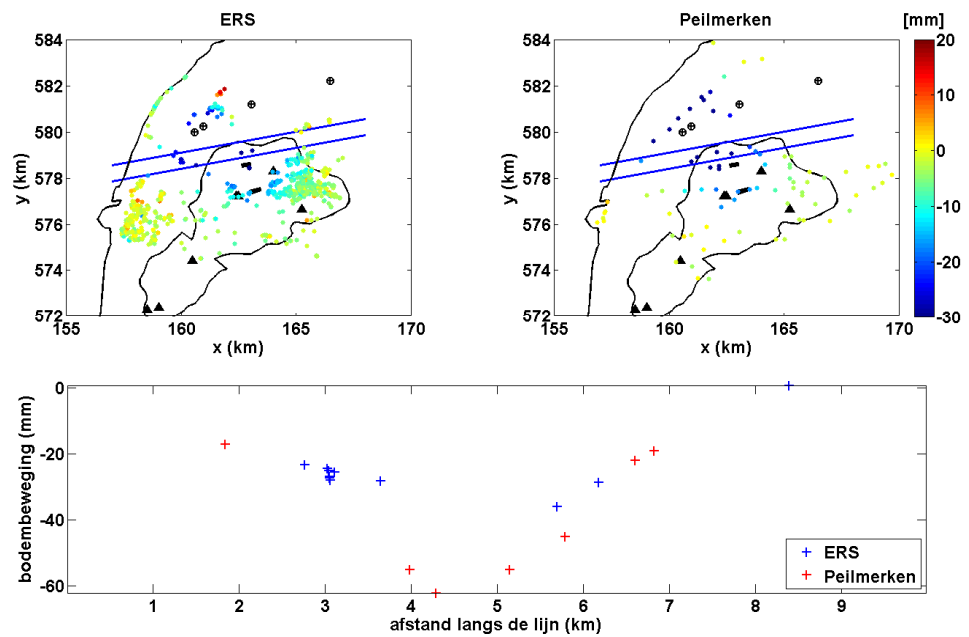
Figuur 3-2 tot Figuur 3-5 laten vier doorsneden door de ERS-2 radarpunten (nulhypothese) en de peilmerk data geobserveerd tussen 1998 en 2000 zien.

De doorsneden in Figuur 3-2 en Figuur 3-5 door het Harlingen gasveld laten een goede overeenkomst zien tussen beide datasets. De doorsnede in Figuur 3-2 laat zien dat in de radar data waarnemingen in bepaalde gebieden ontbreken waar wel peilmerkdata zijn en vice versa. Hierdoor kunnen verschillen ontstaan in de interpretatie van de komvorm en -diepte. In dit geval zou een interpretatie van de radarpunten een maximale komdiepte tussen 1998 en 2000 van ~3,5 cm geven, terwijl de interpretatie van de peilmerkdata op een maximale komdiepte in de doorsneden van ruim 6 cm zou uitkomen. Daarbij zou het diepste punt voor de peilmerkdata in de interpretatie van deze doorsnede ook westelijker komen te liggen dan voor de radar data.

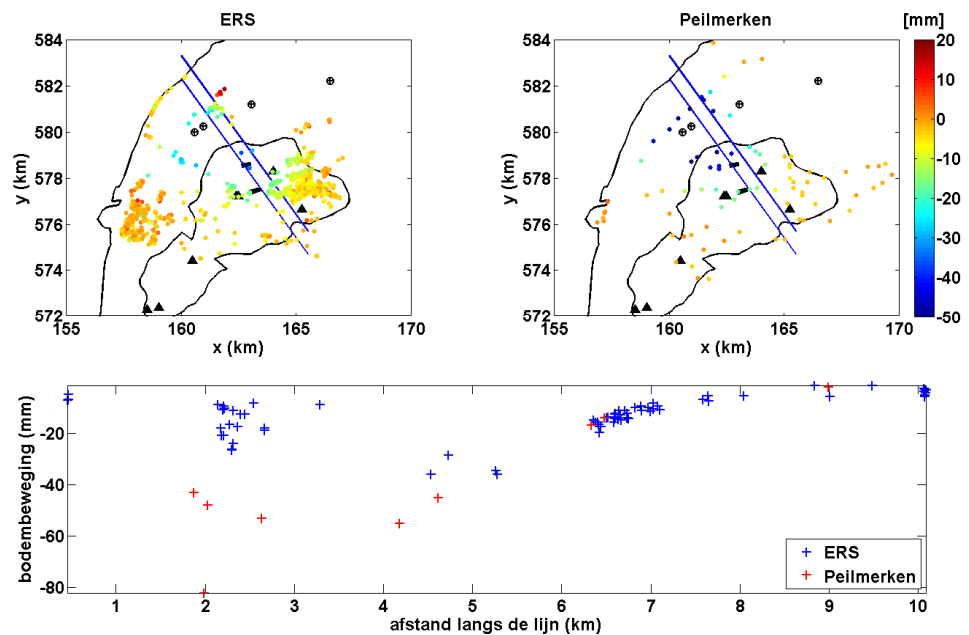
De doorsneden in Figuur 3-3 en Figuur 3-4 laten in het noordoosten bij Sexbierum een slechte overeenkomst tussen de radar en de peilmerkdata zien. Uit de verschillen blijkt duidelijk dat de radarresultaten onder de nulhypothese het bodemdalingssignaal significant onderschatten. In dit geval, waarbij het gaat om een geïsoleerde groep punten bij Sexbierum die relatief ver verwijderd is van omgevingspunten is de betrouwbaarheid van de fasemeerduidigheden schatting beperkt. Hierdoor volgen de punten wel goed het differentiële verloop van de bodemdalingsskom, maar zijn ze exact 28 mm (30 mm verticaal) in de kijkrichting naar de satelliet verschoven. Omdat dit ook blijkt uit de residuen tussen waarnemingen en het lineaire model, die te groot zijn om geaccepteerd te worden, wordt de nulhypothese verworpen. Dit geeft aanleiding tot het berekenen van nieuwe resultaten op basis van een alternatieve hypothese, waarbij een 2^e orde polynoom wordt gebruikt om het deformatiegedrag te beschrijven teneinde de meerduidigheden op te lossen. Deze resultaten worden getoond in de volgende paragraaf (paragraaf 3.2.2).



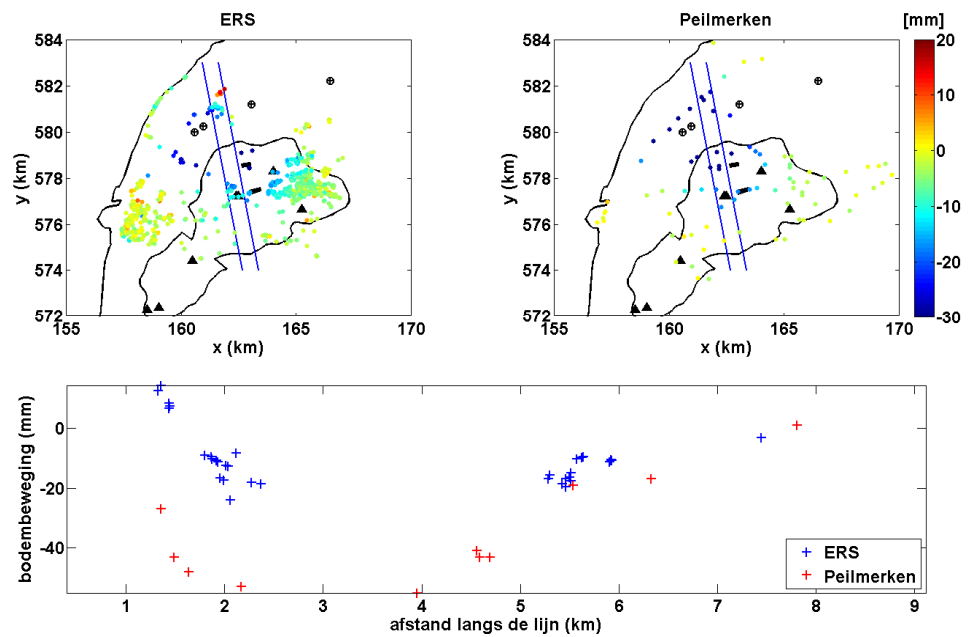
Figuur 3-1: Bodemdaling (mm) geobserveerd bij de peilmerken (links) en de ERS radarpunten onder de nulhypothese (rechts) tussen 1998 en 2000.



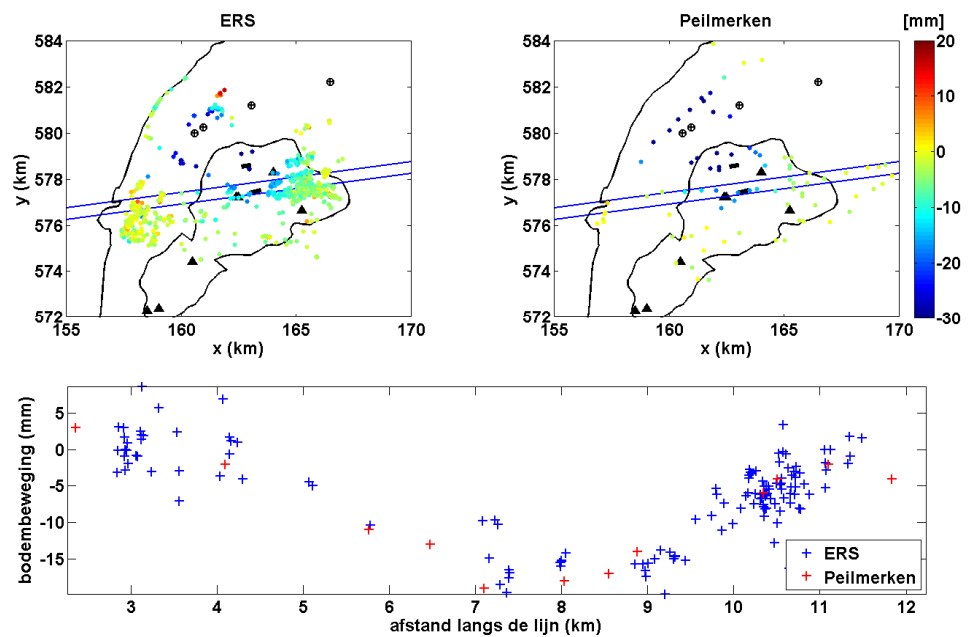
Figuur 3-2. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. Merk op dat er een willekeurige verticale verschuiving tussen beide profielen bestaat, die niet fysisch geïnterpreteerd kan worden.



Figuur 3-3. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen. Hieruit blijkt dat het gedrag van de punten te zeer niet-lineair is in dit tijdvak, wat resulteert in fouten in de fasemeerduidigheden, zie linkerkant van het profiel bij Sexbierum, waarbij de radarmetingen exact een halve golflengte van het radarsignaal (28 mm) is verschoven. Merk op dat de differentiële verschillen in bodemdaling wel acceptabel zijn. Merk tevens op dat deze resultaten cumulatieve deformatie betreffen, dus het verschil van twee radarmetingen in de tijd. De variantie van de radardata is daarom gelijk aan de som van de varianties van de enkele metingen (Voor ERS wordt de standaardafwijking van het verschil 3.8 mm).



Figuur 3-4. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. De willekeurige verticale verschuiving tussen beide profielen, zoals genoemd in Figuur 3-2, kan de verticale verschuiving van de radarpunten aan de linkerzijde van het profiel niet verklaren.



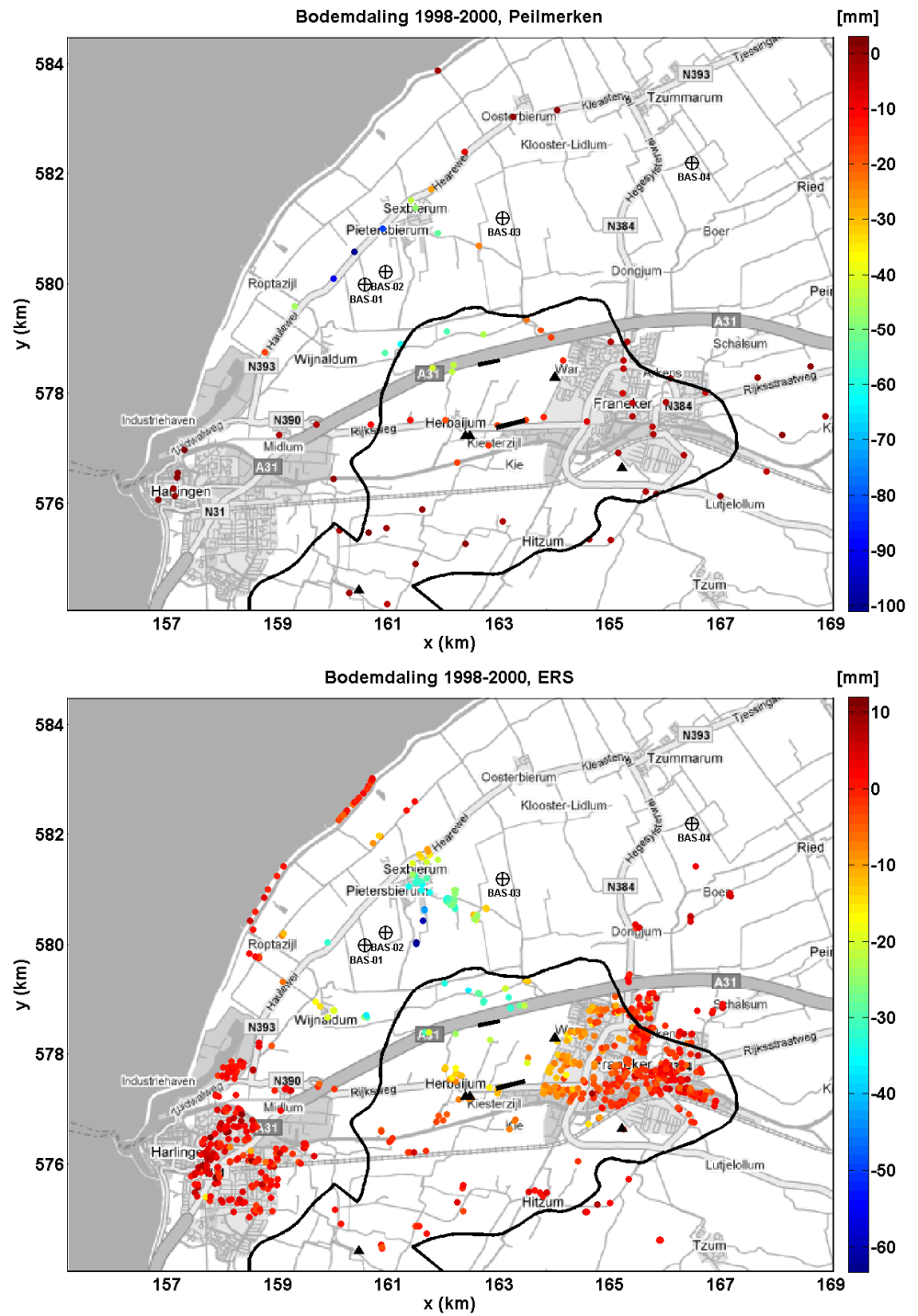
Figuur 3-5. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen.

3.2.2 *Tweede fase processing ERS-2 radar data*

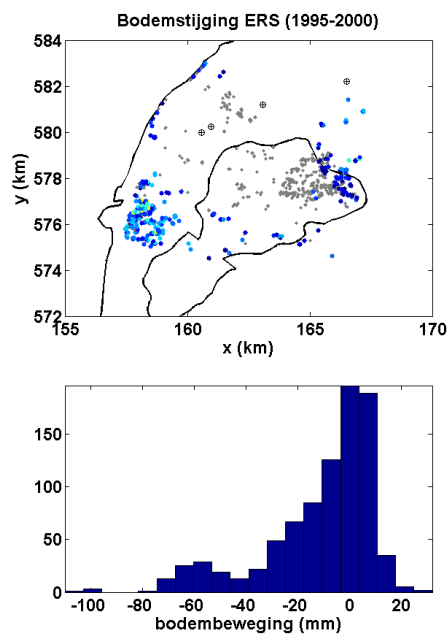
Uit de standaard analyse in de vorige paragraaf blijkt dat een hogere orde deformatiemodel dient te worden gebruikt om de complexe deformatie in het gebied goed te kunnen schatten. De reden dat het initiële lineaire model wordt verworpen is de slechte schatbaarheid van de fasemeerduidigheden. Het 2^e orde polynoommodel onder de alternatieve hypothese, vermindert het voorkomen van slecht schatbare meerduidigheden. Uit de residuenevaluatie analyse tussen de (radar)metingen en het 2^e orde polynoommodel volgt dat deze hypothese wordt geaccepteerd. Een ander gevolg van de schatting onder de alternatieve hypothese is dat meer coherente radarpunten worden gevonden, een stijging van 15 procent, van ca. 700 naar ca. 800 punten in het studiegebied.

Figuur 3-6 laat de nieuwe vergelijking met de peilmerkdata zien. Deze figuur toont aan dat radarmetingen zijn verkregen op locaties waar geen waterpaspunten voorhanden zijn. De distributie van meetpunten is vergelijkbaar tussen beide datasets. Dit is verklaarbaar aangezien peilmerken meestal in bestaande infrastructuur worden aangebracht en radardata ook meestal direct gerelateerd zijn aan bestaande infrastructuur, doorgaans bebouwing en wegen. Daar waar veel bebouwing aanwezig is loopt de punt dichtheid van de radarmetingen op tot meer dan 100 per vierkante kilometer. In de analyse onder de nulhypothese, zie Figuur 3-2 tot Figuur 3-5, is ook duidelijk dat coherente punten kunnen worden gemist, waardoor delen van een profiel wel waterpaspeilmerken bevatten maar geen radarmeetpunten. Ook het omgekeerde komt voor. In dit geval onderschat de radar dataset ten gevolge hiervan de maximale komdiepte: een maximale komdiepte zou ~3,5 cm geven, terwijl de interpretatie van de peilmerk data op een maximale komdiepte van ruim 6 cm zou uitkomen. Daarbij zou het diepste punt voor de peilmerk data in de interpretatie van deze doorsnede ook westelijker komen te liggen dan voor de radar data. Dit probleem is echter opgelost na de verwerking onder de alternatieve hypothese. Hierdoor is zowel locatie als orde van grootte vergelijkbaar, terwijl veel meer metingen beschikbaar komen.

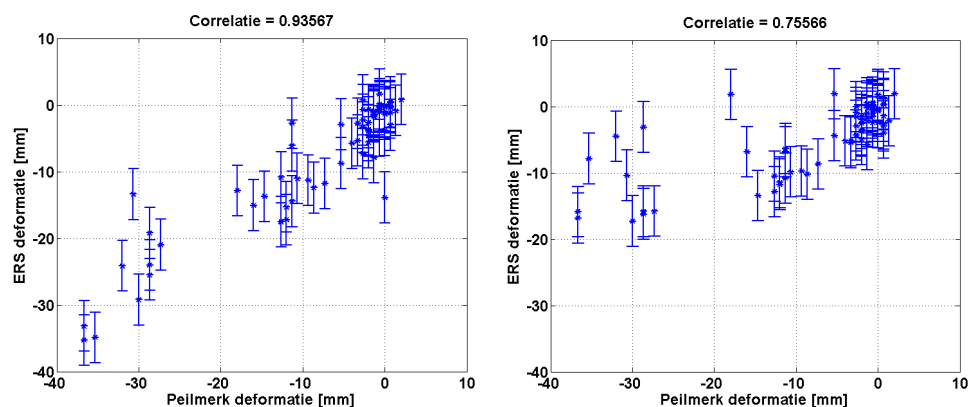
Figuur 3-7 laat zien dat de vermeende bodemstijging in Sexbierum in de nieuwe processing verdwenen is. De bodemstijging is nu vooral zichtbaar in Harlingen, net als voor de Envisat data. Zoals aangetoond in paragraaf 2.4 is dit stijgsignaal echter niet significant, en dient dit afhankelijk van het gebruikte referentiepunt te worden geïnterpreteerd.



Figuur 3-6. Bodemdaling (mm) geobserveerd bij de peilmerken (links) en de radarpunten onder de 2^e orde polynoom hypotheese verwerking (rechts) tussen 1998 en 2000.



Figuur 3-7. Gebieden met vermeende bodemstijging in de opnieuw geproceste ERS-2 data (boven) en histogram van de bodembeweging (onder). Negatieve bodembeweging is bodemdaling en positieve bodembeweging is bodemstijging. Uit de analyse in paragraaf 2.4 blijkt dat deze stijging als niet-significant dient te worden aangemerkt.



Figuur 3-8. Scatterplot tussen waterpassingen (horizontal) en PSI radar voor de ERS tijdreeks, van de cumulatieve deformatie tussen 1998 en 2000. Rechts, initiële resultaten (nulhypothese), correlatie van 0.76. Links, resultaten onder de alternatieve (polynoom) hypothese, correlatie van 0.94. Merk op dat de foutenmarges van de waterpasmetingen niet zijn aangegeven, maar van dezelfde orde van grootte zijn als de foutenmarges van de radarmetingen (sigma 2,5 mm).

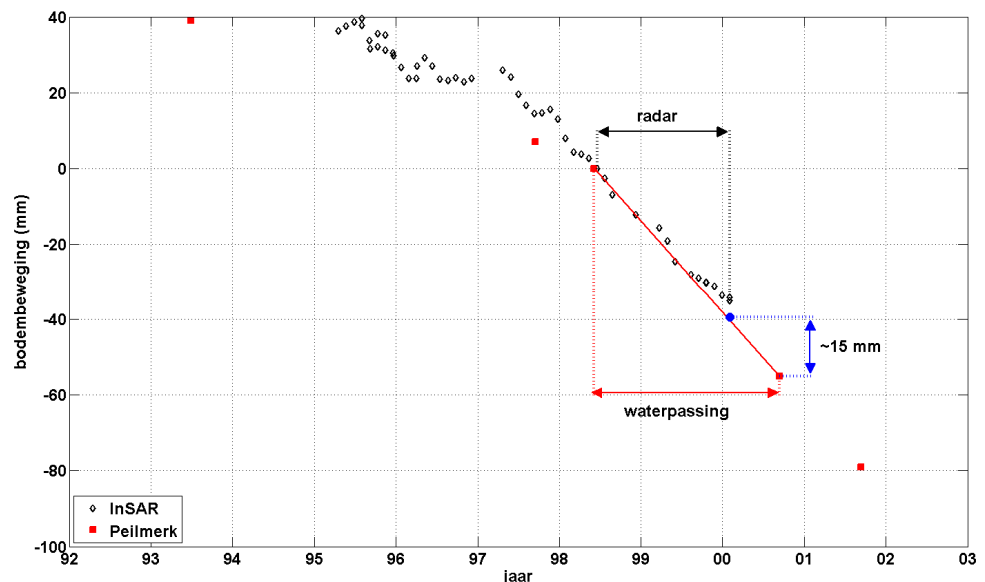
3.2.3 *Correlatie tussen ERS-2 PSI radarmetingen en waterpassing, periode 1998-2000*
 Wanneer de PSI radarmetingen ruimtelijk worden geïnterpoleerd (kriging) naar de locaties van de waterpassingen, op de tijdstippen van de twee beschikbare waterpascampagnes (1998 en 2000), kan de correlatiecoëfficiënt tussen beide meetmethoden worden bepaald.

Figuur 3-8 geeft de scatterplots van de beide meetmethoden, links de alternatieve (polynoom)hypothese, en rechts de primaire nulhypothese, en daardoor nog steeds

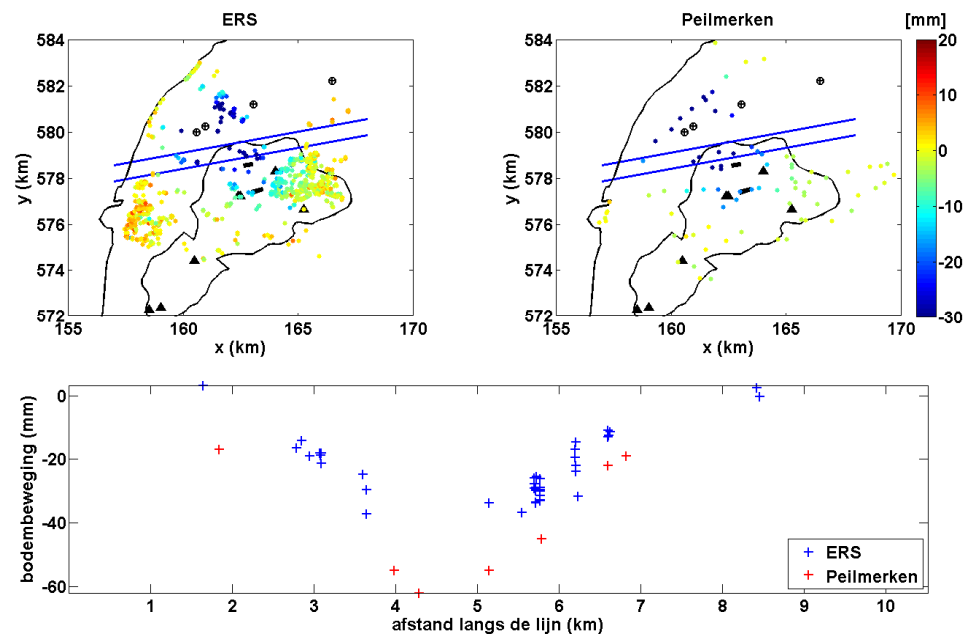
behept met fasemeerduidigheden. De correlatiecoëfficiënt stijgt van 0.76 onder de verworpen nulhypothese naar 0.94 onder de alternatieve hypothese. Uit eerder onderzoek (Ketelaar, 2008) is gebleken dat 0.94 de praktisch maximaal haalbare correlatie is. Met andere woorden; zelfs indien een waterpassing zou worden herhaald is een hogere correlatie tussen twee waterpassingen bijna niet mogelijk. Voor de berekening van de correlatiecoëfficiënten is de deformatie berekend uit de waterpassingen lineair in de tijd geïnterpoleerd naar de betreffende radar acquisitie datum.

3.2.4 *Ruimtelijke analyse ERS-2 2^e orde polynoom hypothese verwerking en waterpassing*
 Figuur 3-10 tot Figuur 3-14 laten de vergelijking zien tussen de peilmerkdta en de ERS-2 data onder de alternatieve (2^e orde polynoom) hypothese. De peilmerken laten een grotere daling zien, veroorzaakt door een discrepantie in de tijd waarop data beschikbaar is. De peilmerken bestrijken de periode van 5 juni 1998 tot 11 september 2000, terwijl de ERS-2 data waargenomen is in de periode 19 juni 1998 tot 4 februari 2000 (zie Figuur 3-9). Na februari 2000 zijn er geen bruikbare radarbeelden beschikbaar voor de ERS-2 satelliet. In Figuur 3-9 is duidelijk te zien dat de discrepantie van 7 maanden een overschatting van de peilmerken geeft van ongeveer 10-15 mm (berekend onder aanname van lineaire deformatie). Deze discrepantie is afhankelijk van de deformatiesnelheid van het peilmerkpunt. Figuur 3-11 laat de gecorrigeerde beweging van de peilmerken zien langs dezelfde doorsnede als Figuur 3-10. De grotere daling van de peilmerken voor correctie komt overeen met het verzet tussen de daling in de ERS-2 data en de peilmerken waargenomen in Figuur 3-10.

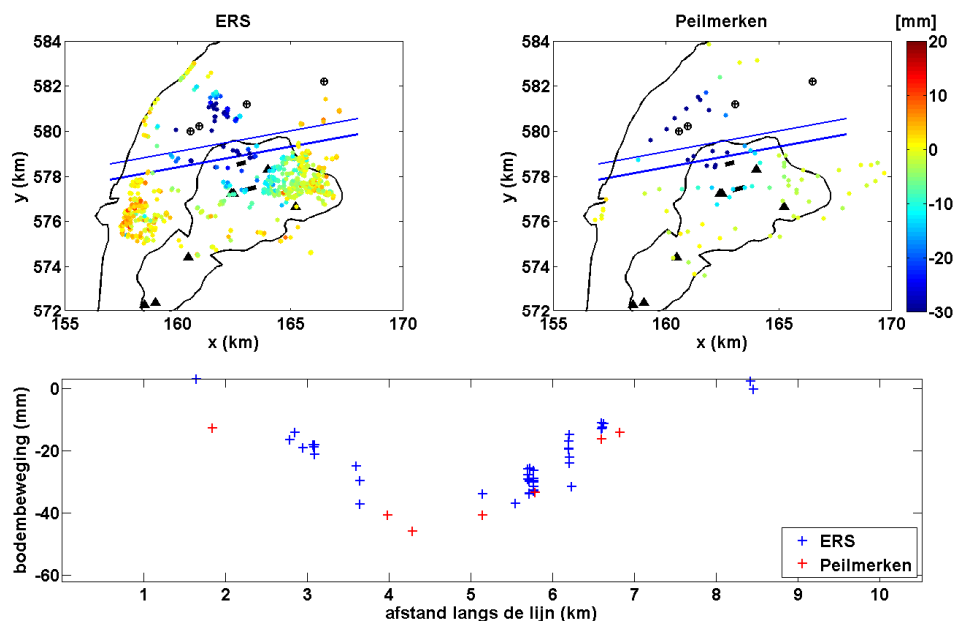
Echter, de aanname van lineaire deformatie is een benadering en in werkelijkheid is het verschil in bodembeweging over de 7 maanden moeilijk achteraf vast te stellen. Daarom laten we in de doorsneden de vergelijking zien tussen de data. In de interpretatie wordt rekening gehouden met de tijdsdiscrepantie van 7 maanden tussen de twee methoden.



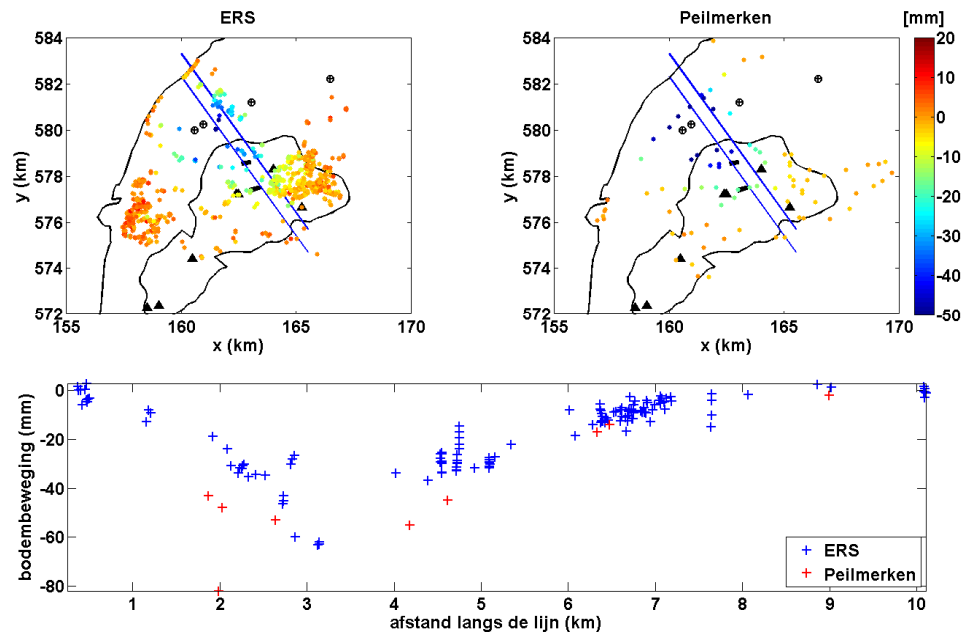
Figuur 3-9. De tijdserie van de ERS radar data en de waterpassing data. Het tijdsverschil tussen de waterpassing en de ERS radar data is ongeveer 7 maanden. De correctiefactor voor dit tijdsverschil is ongeveer 15 mm voor dit peilmerkpunt.



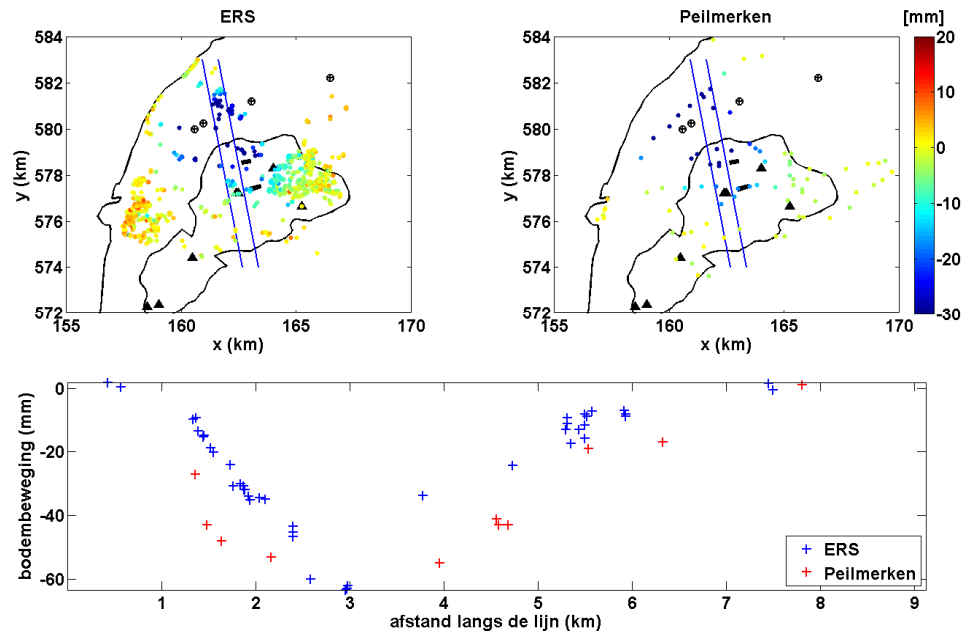
Figuur 3-10. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



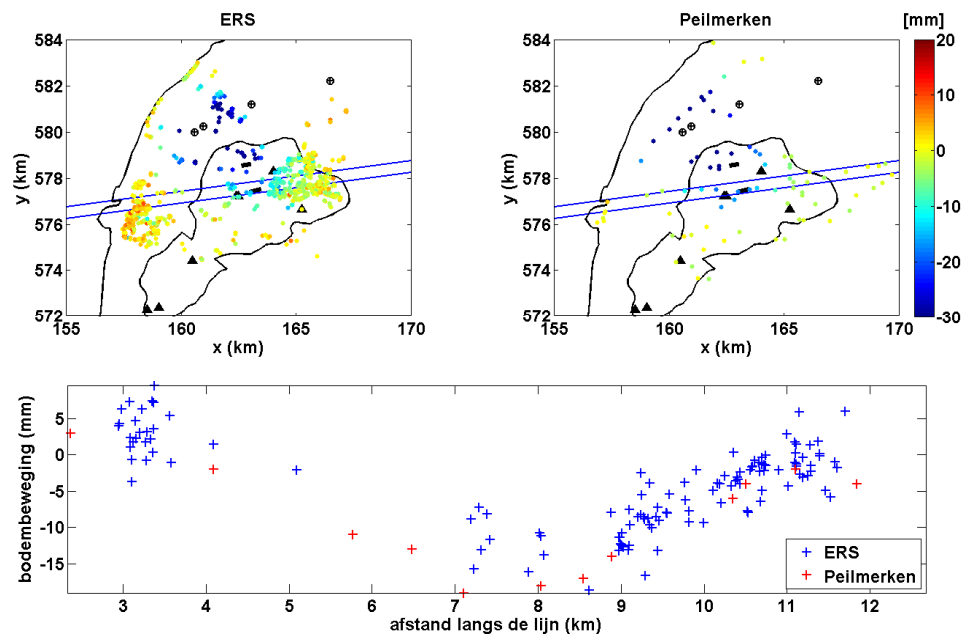
Figuur 3-11. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese (2° orde polynoom). Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. De peilmerken zijn gecorrigeerd voor het 7 maanden tijdsverschil onder aanname van lineaire bodembeweging voor vergelijking met Figuur 3-10.



Figuur 3-12. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen.



Figuur 3-13. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



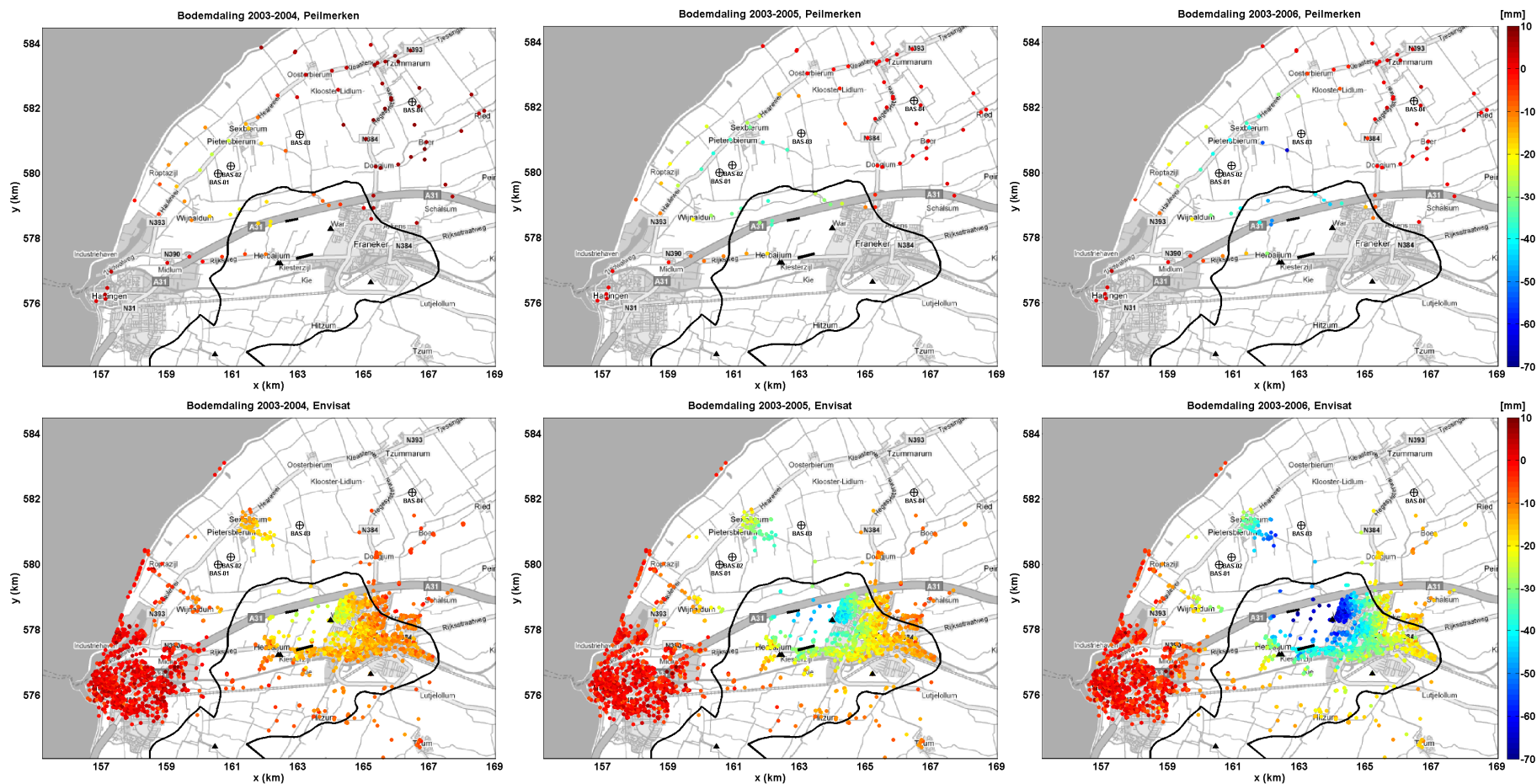
Figuur 3-14. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen 2003-2006: Peilmerk data & Envisat PS-InSAR data

3.2.5 Ruimtelijke analyse Envisat radar en waterpassing

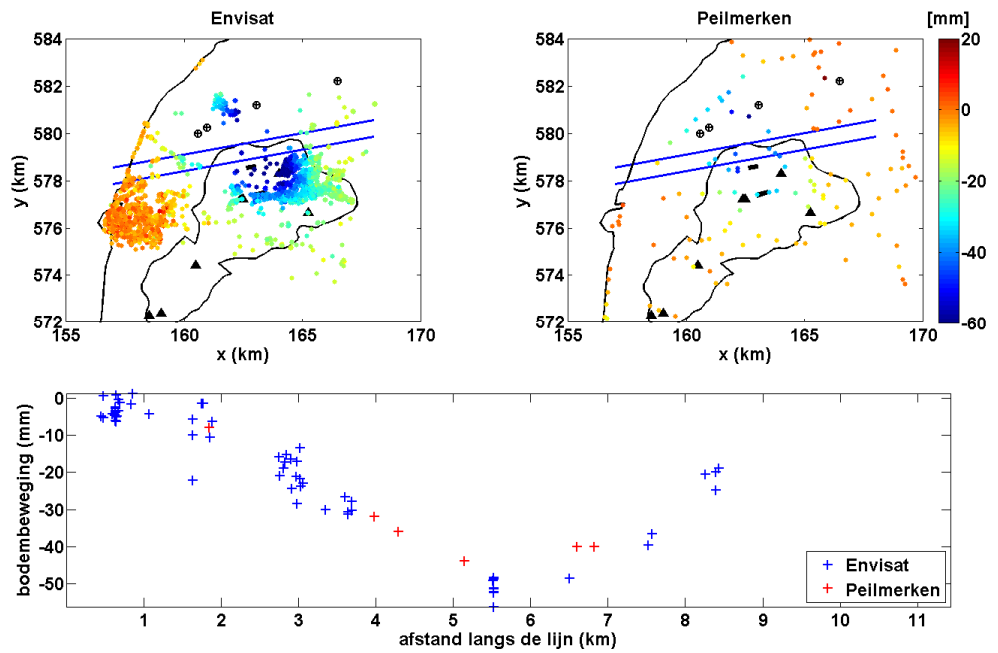
In Figuur 3-15 wordt de bodemdaling in de jaren 2004, 2005 en 2006 ten opzichte van 2003 weergegeven, links waterpassing, rechts met radar. De maximale bodemdaling in de peilmerken tussen 2003 en 2006 is 6,2 cm tegen 6,6 cm in de radardata. Het diepste punt in de peilmerk data is meer ten zuidoosten gelegen van het diepste punt van de bodemdalingkom over 1998-2000, tussen het Harlingen gasveld en de Barradeel zoutcavernes. Het diepste punt in de radardata is echter nog verder naar het zuidoosten gelegen boven het noordwesten van het Harlingen gasveld. Hier geeft de peilmerk data slechts een daling van ~4,5 cm. Doordat de hoeveelheid radarpunten in de bebouwde kom van Franeker zeer groot is, bestaat er weinig onzekerheid over de juistheid van deze data.

Figuur 3-16 tot Figuur 3-19 laten doorsneden zien van de Envisat data en de peilmerk data waargenomen tussen 2003 en 2006. Dezelfde doorsneden voor de tijdsintervallen 2003-2004 en 2003-2005 en een analyse van de consistentie in deze doorsnede tussen de peilmerk en radar data zijn gegeven in Appendix II. De conclusies uit deze analyse zijn hier meegenomen.

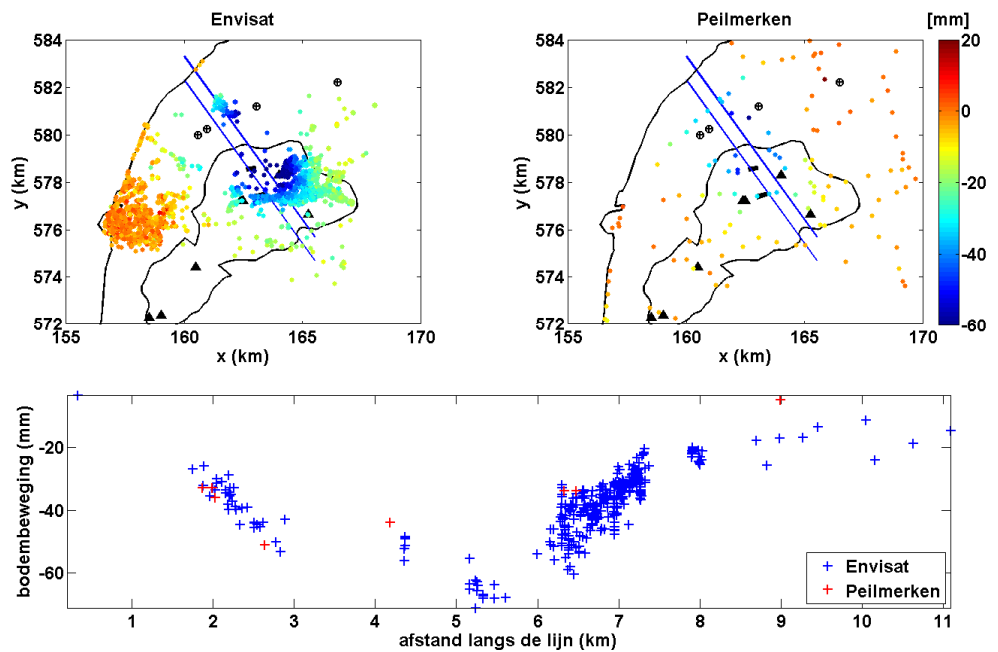
In Figuur 3-16 wordt een doorsnede van de bodemdaling over het gasveld van Harlingen tot Franeker gegeven. De Envisat en peilmerk data komen goed overeen in het westen. In het oosten laat de peilmerk data minder daling zien dan de Envisat data, maar het verschil is relatief klein en valt nog binnen de spreiding in de radar waarnemingen.



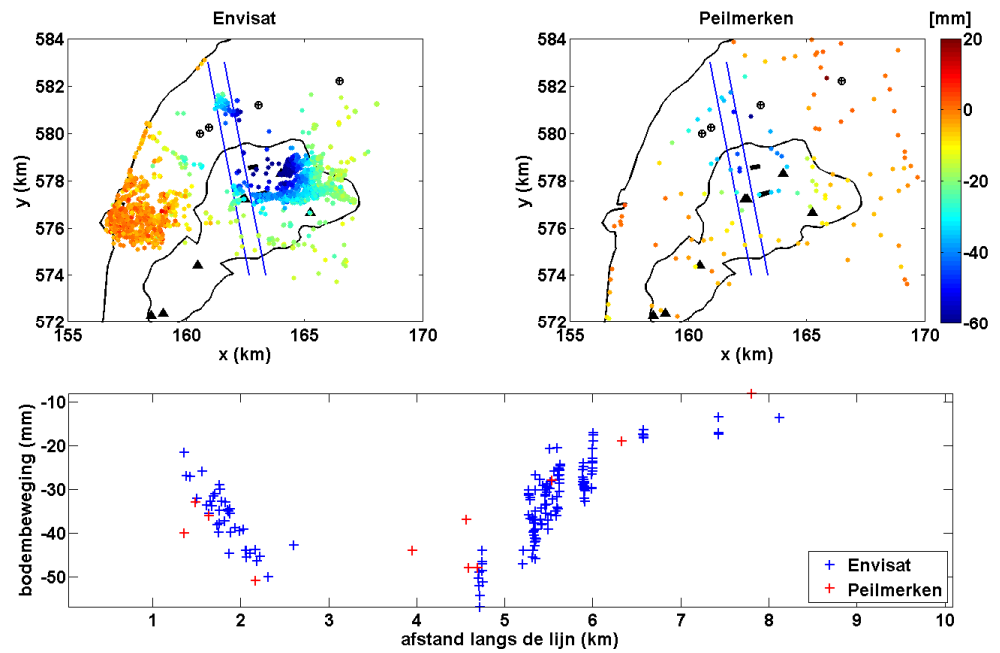
Figuur 3-15. .. Boven: Bodemdeling geobserveerd met waterpassing van de peilmerken in de periode 2003-2006. Onder: Bodemdeling gemeten met radar voor hetzelfde tijdsinterval



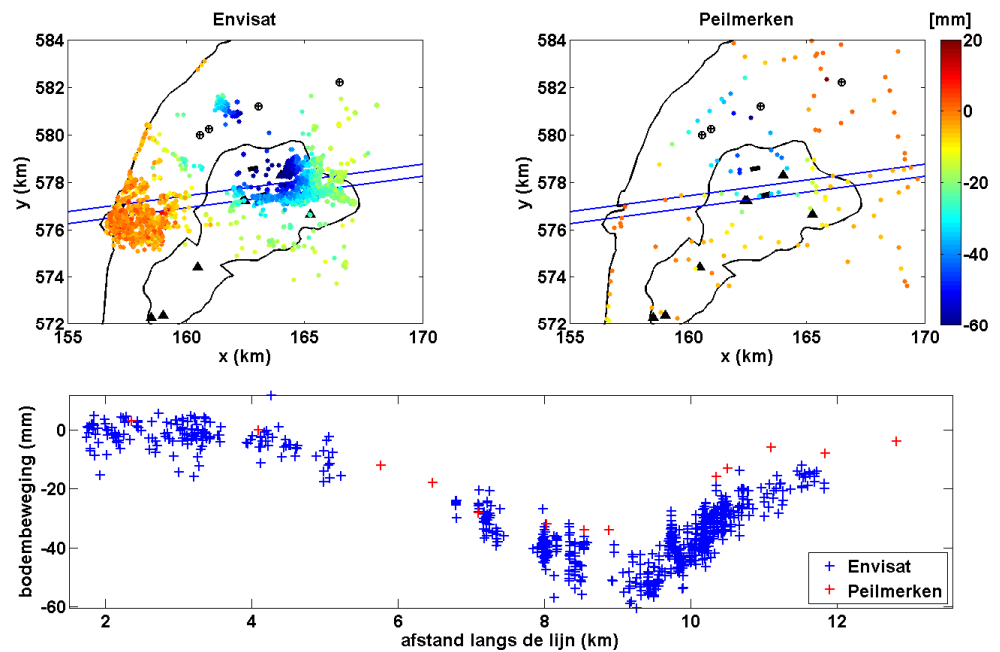
Figuur 3-16. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



Figuur 3-17. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen. De spreiding van de radardata ter hoogte van 6–7,5 km worden veroorzaakt door de verschillen binnen de gebruikte breedte van het profiel en niet door meetonzekerheid.



Figuur 3-18. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



Figuur 3-19. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2006, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen.

Doorsneden door Sexbierum in het noorden (Figuur 3-17 en Figuur 3-18) laten ook een goede overeenkomst zien tussen de Envisat PS-InSAR en peilmerk data. In deze doorsneden is goed te zien dat de peilmerk data geen waarnemingen in het diepste punt van de bodemdaling heeft. De peilmerkdata in de doorsnede van Figuur 3-17 op 6 km afstand liggen aan de rand van het gebied dat meegenomen is in de doorsnede en gaan niet door het diepste punt van de InSAR data. Daarnaast is in Figuur 3-17 te zien dat de radar data de kom in tweeën deelt. Daar waar de peilmerkmetingen bij Franeker afvlakken om vervolgens het diepste punt van de kom bij de Barradeel zoutcavernes te leggen, laat de radar data duidelijk een verdere verdieping van de kom bij Franeker zien, noordwestwaarts gevolgd door een ondieper gedeelte van de kom.

De doorsnede van Figuur 3-19 laat een sterke asymmetrie van de bodemdalingskom ten gevolge van de gaswinning zien. De kom is steil bij Franeker en meer geleidelijk naar Harlingen toe.

3.2.6 *Invloed van horizontale deformatie*

Zoals in sectie 2.2 is beschreven is de deformatie waargenomen in de kijkrichting van de InSAR satelliet geprojecteerd op de verticaal onder de aanname dat horizontale bewegingen verwaarloosbaar zijn. Ook is toen vastgesteld dat indien horizontale deformatie wel aanwezig is we voor elke cm horizontale beweging een fout van maximaal 4 mm in de bepaalde verticale beweging introduceren. Of we de verticale beweging onder- of overschatten is afhankelijk van de kijkrichting van de satelliet (zie sectie 2.2).

De verhouding tussen de horizontale en verticale bewegingen op een bepaald punt in de flank van een bodemdalingskom is gelijk aan de verhouding tussen de afstand van dit punt ten opzichte van het diepste punt van de flank en de diepte waarop het reservoir gelegen is (Geertsema, 1972). De verticale bewegingen zijn het grootst in de flank van de kom, waar de gradiënt het sterkst is. Het diepste punt kent geen horizontale beweging en buiten de flank reduceert de verticale beweging tot 0, waardoor ook de horizontale beweging verdwijnt.

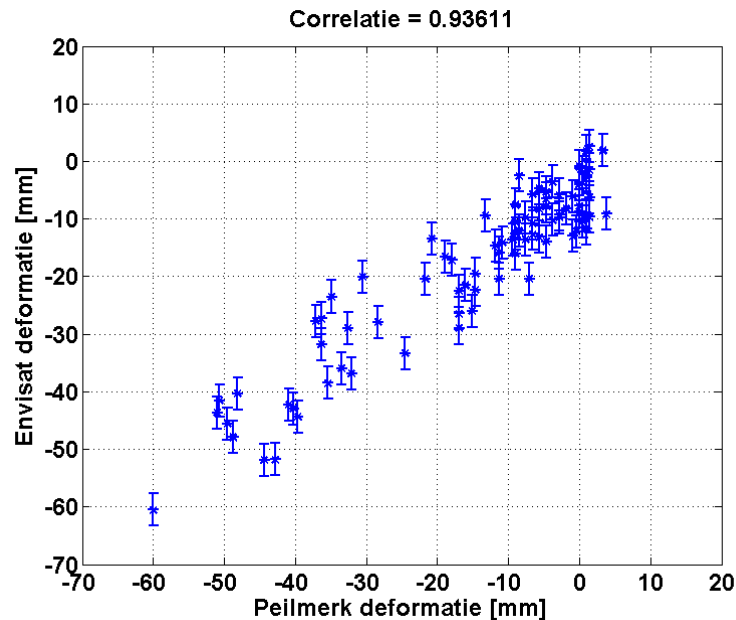
De doorsnede in Figuur 3-17 is nagenoeg loodrecht op de bewegingsrichting van de Envisat satelliet. Gegeven het feit dat het Harlingen gasveld is gelegen op een diepte van 1km leiden we een mogelijke maximale overschatting van de verticale beweging bij Franeker van 16 mm af. De waargenomen misfit tussen de PSI en peilmerkdaling is 11 mm. De zoutwinning in de Barradeel zoutcavernes vindt plaats op een diepte van 2,7 km. Dit leidt tot een mogelijke onderschatting van de verticale beweging met maximaal 7,5 mm. De waargenomen misfit tussen de PSI en peilmerkdaling is 6,5 mm.

Geconcludeerd kan worden dat voor de periode 2003-2006 de overschatting van de verticale bewegingen ten gevolge van het verwaarlozen van de horizontale deformatie maximaal 1-2 cm extra daling boven de gaswinning in Franeker geven. De horizontale bewegingen in de flank van de bodemdalingskom boven de zoutwinning geven in deze periode een maximale onderschatting van de verticale bewegingen van minder dan 1 cm. Let op: het diepste punt van de bodemdalingskom kent geen verticale bewegingen en dus ook geen mischatting van de verticale beweging in de PSI data.

3.2.7 *Correlatie tussen Envisat PSI radarmetingen en waterpassingen periode 2003-2006*

Wanneer de PSI radarmetingen ruimtelijk worden geïnterpoleerd (kriging) naar de locaties van de waterpassingen, op de tijdstippen van de eerste en laatste

waterpascampagnes (2003 en 2006), kan de correlatiecoëfficiënt tussen beide meetmethoden worden bepaald. Figuur 3-20 geeft de scatterplot van de beide meetmethoden. De correlatiecoëfficiënt is 0.94, nagenoeg het maximaal haalbare (zie sectie 3.2.3).



Figuur 3-20. Scatterplot tussen waterpassing en radar (Envisat) van de cumulatieve deformatie tussen 2003 en 2006. Merk op dat de foutenmarges van de waterpasmetingen niet zijn aangegeven, maar van dezelfde orde van grootte zijn als de foutenmarges van de radarmetingen (sigma 2,5 mm).

3.3 Conclusies

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat de consistentie tussen de radardata en de peilmerkdata goed is. Gebleken is dat voor dit specifieke zakkingsignaal, en met deze ruimtelijke en temporele bemonstering, onder de standaard nulhypothese fasemeerduidigheden kunnen optreden bij radarpunten in meer geïsoleerd liggende gebieden. Het toepassen van een alternatieve hypothese om het deformatiegedrag te beschrijven (2^e orde polynoomhypothese) heeft deze meerduidigheden opgelost.

Verder is gebleken dat daar waar metingen van een van beide datasets ontbreken, observaties van de andere techniek extra informatie kan verschaffen over de komvorm en –diepte. Door deze gecombineerde aanpak kan de interpretatie van de daling significant anders zijn dan een interpretatie gebaseerd op elk van de technieken afzonderlijk. Het strekt dan ook ter aanbeveling om daar waar meerdere databronnen aanwezig zijn (Envisat radar, waterpassing, GPS, etc.) alle data te gebruiken in de analyse van de bodembeweging.

De over-/onderschatting van de verticale bewegingen ten gevolge van horizontale deformatie is lokaal en maximaal 1-2 cm (overschatting) in de flank van de bodemdalingskom bij Franeker en maximaal 1 cm (onderschatting) in de flank van de bodemdalingskom boven de zoutwinning bij BAS-1/2.

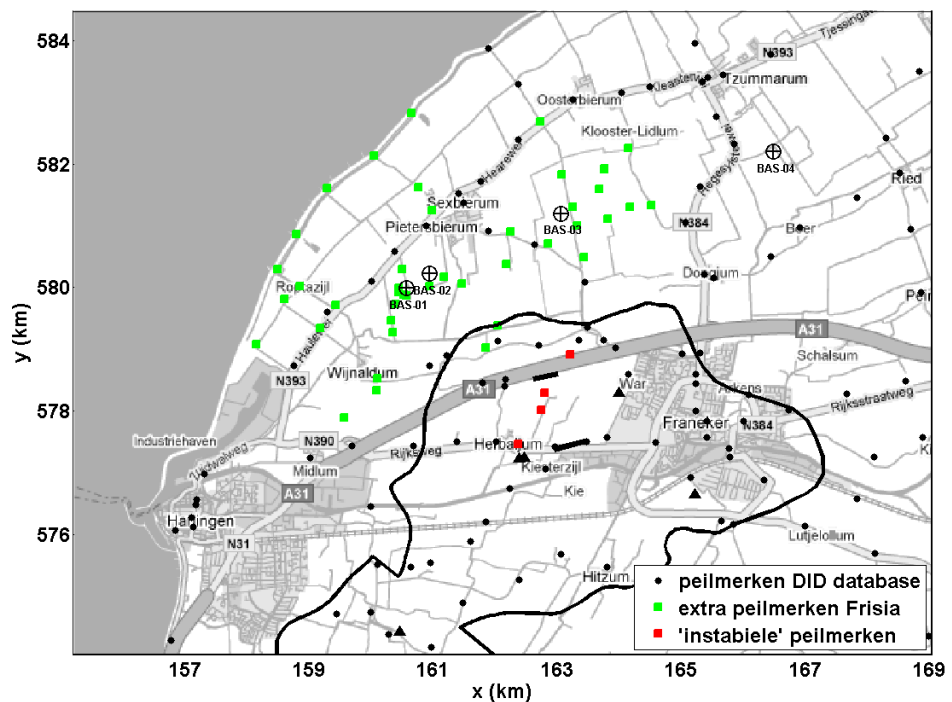
4 Additionele peilmerk data

Naast de data in de DID-database zijn er nog additionele peilmerken in Noordwest Friesland waarvan de hoogten in verschillende campagnes zijn gemeten. De redenen van het ontbreken van deze data in de DID-database zijn divers. Het kunnen slecht gefundeerde peilmerken of beschadigde peilmerken betreffen, maar ook later bijgeplaatste peilmerken of peilmerken welke niet in het dalingspatroon passen.

In dit hoofdstuk gaan we in op twee series van peilmerken welke niet in de DID-database zijn opgenomen: de extra peilmerken welke door Frisia ten behoeve van het monitoren van de zoutwinning zijn geplaatst en 4 peilmerken boven de gaswinning in het Harlingen gasveld (Figuur 4-1). Hierbij zal uitgebreid worden stilgestaan bij de consistentie van deze data met de PSI data.

4.1 Additionele peilmerken ten behoeve van de zoutwinning

Bij de inrichting van het meetnet ten behoeve van het monitoren van de zoutwinning is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van het NAP-peilmerkenregister (zoals opgenomen in de DID-database). Daarnaast is het netwerk verdicht doormiddel van het bijplaatsen van bouten in bestaande bebouwing en kunstwerken. In Figuur 4-1 worden de locaties van deze bouten weergegeven (In Tabel A7, Appendix A.2 worden de locatiecoördinaten weergegeven). De hoogtemetingen van deze bouten zijn weergegeven in Tabel A8, Appendix A.2. Duidelijk is te zien dat de bouten vooral in de nabijheid van de cavernes een verdichting van het NAP-peilmerkenregister geven. Daarnaast geven ze additionele informatie ten westen van de BAS-1/2 cavernes.



Figuur 4-1. Locaties van de extra peilmerken.

4.2 **Additionele peilmerken boven gaswinning in Harlingen gasveld**

In het gebied tussen War, Herbaijum en de A31 blijken nog enkele peilmerken te zijn waarvoor de hoogten in de campagnes voor Vermilion zijn ingemeten (Tabel A5 & A6, Appendix A.2), maar die in de DID-database ontbreken (Figuur 4-1). Deze peilmerken zijn in 2007 door SodM als “ondoelmatig” aangemerkt (Oranjewoud, 2008(1); Oranjewoud, 2008(2)) daar ze instabiel gedrag leken te vertonen. Peilmerken zijn instabiel als de belasting de draagkracht van de grond op funderingsniveau overtreft. Het is voor deze peilmerken niet aangetoond dat dit ook daadwerkelijk het geval is. Bijvoorbeeld, peilmerk 3005 zit in een 150 jaar oude boerderij. Aangenomen mag worden dat belasting en draagvermogen inmiddels in evenwicht zijn, maar de boerderij vertoont wel aanzienlijke scheuren waarvan het niet bij voorbaat duidelijk is welke invloed deze hebben op de stabiliteit van het peilmerk.

Peilmerken kunnen ook instabiliteit lijken te vertonen als ze te sterk afwijken van het model dat de daling beschrijft. Het is echter in dit geval ook mogelijk dat het model de daadwerkelijke daling niet goed weergeeft. Door gebruik te maken van extra informatie, in deze studie daling waargenomen met PSI, kan worden vastgesteld wat de oorzaak is van het schijnbare instabiele gedrag van deze peilmerken.

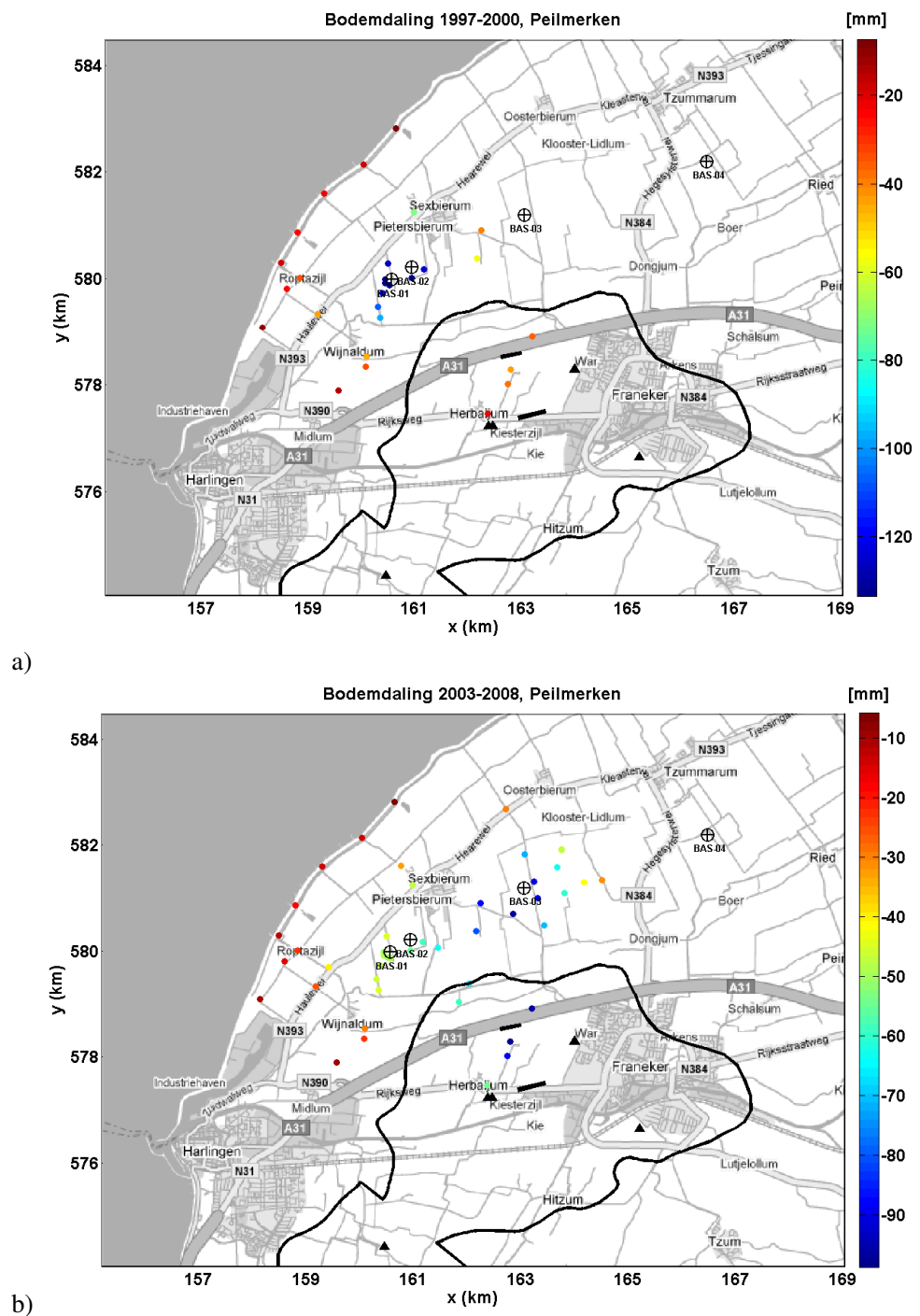
4.3 **Consistentie met de PSI data**

Analoog aan de analyse in Hoofdstuk 3 wordt ook voor deze additionele data de consistentie met de PSI data onderzocht. Aangezien in Hoofdstuk 3 al is komen vast te staan dat de overeenkomst tussen de DID-database peilmerken en de PSI data goed is, zal in onderstaande analyse de PSI data leidend zijn.

Voor de additionele peilmerken kan de bodembeweging in de tijdvakken 1997-2000 en 2003-2008 direct met de PSI data worden vergeleken (er is geen verschil in observatiedatum). De bodembeweging van de peilmerken in deze tijdvakken is weergegeven in Figuur 4-2. Meteen valt de sterke daling op bij de BAS-1/2 cavernes tussen 1997 en 2000 (bijna 13 cm) en bij BAS-3 tussen 2003 en 2008 (bijna 10 cm). In dit laatste tijdvak is de daling in 3 van de 4 punten boven het gasveld vergelijkbaar met de daling bij BAS-3.

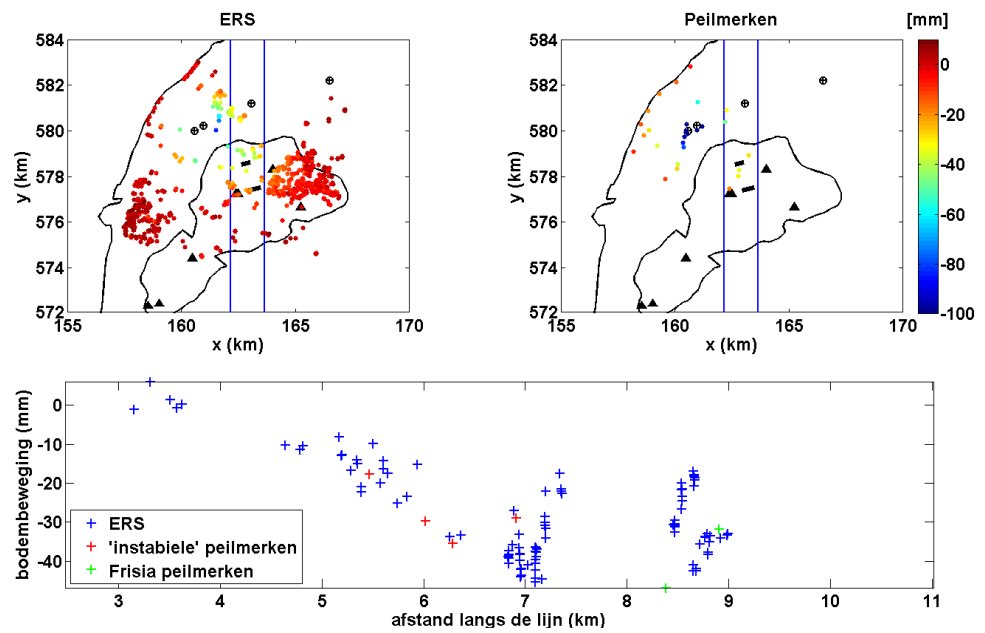
In Figuur 4-3 en Figuur 4-4 zijn twee doorsneden weergegeven van de additionele peilmerkdata en de ERS PSI data voor het tijdvak 1997-2000. De noord-zuid doorsnede in Figuur 4-3 doorkruist zowel het gasveld als de zoutwinning bij BAS-3, terwijl de doorsnede in Figuur 4-4 door de gaswinning en de zoutwinning bij BAS-1/2 gaat. Te zien is dat de daling van peilmerken zowel boven het gasveld als bij de BAS-3 zoutcaverne zeer goed overeenkomt met de daling van de PSI punten. Bij de BAS-1/2 cavernes vullen de peilmerken een gat in de PSI bedekking. Duidelijk is dat InSAR het diepste punt van de bodemdalingskom ten gevolge van de zoutwinning mist.

Figuur 4-5 en Figuur 4-6 geven dezelfde doorsneden voor de additionele peilmerken en de Envisat PSI data tussen 2003 en 2008. Wederom is de fit boven zowel de gaswinning als de zoutwinning erg goed.

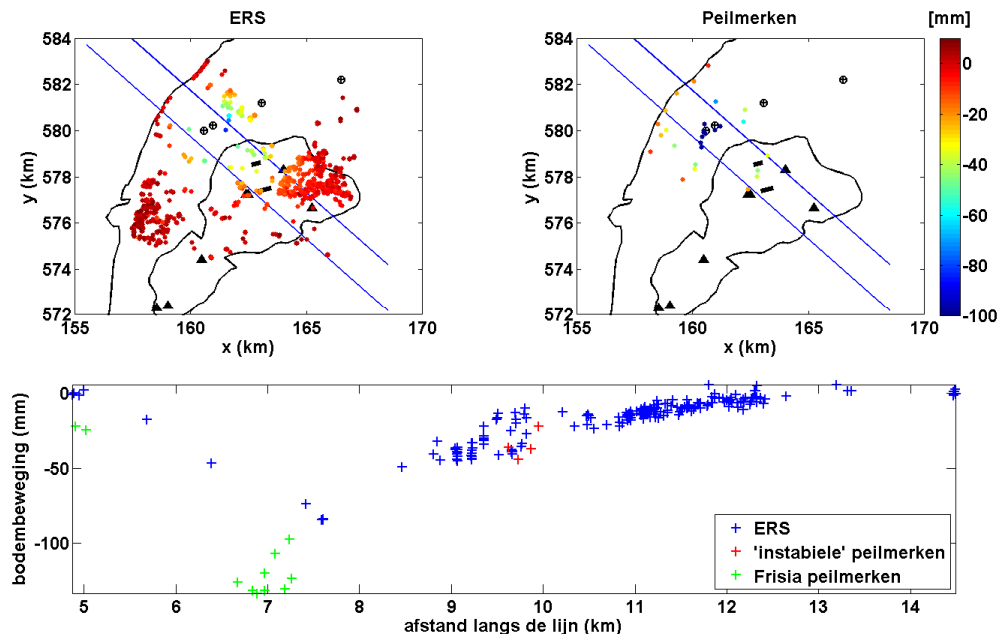


Figuur 4-2. a) Bodemdaling tussen 1997 en 2000 voor de DID peilmerken, de extra peilmerken van Frisia en de verworpen peilmerken van Vermilion. b) Bodemdaling tussen 2003 en 2008 voor de extra peilmerken van Frisia en de eerder instabiel veronderstelde peilmerken van Vermilion.

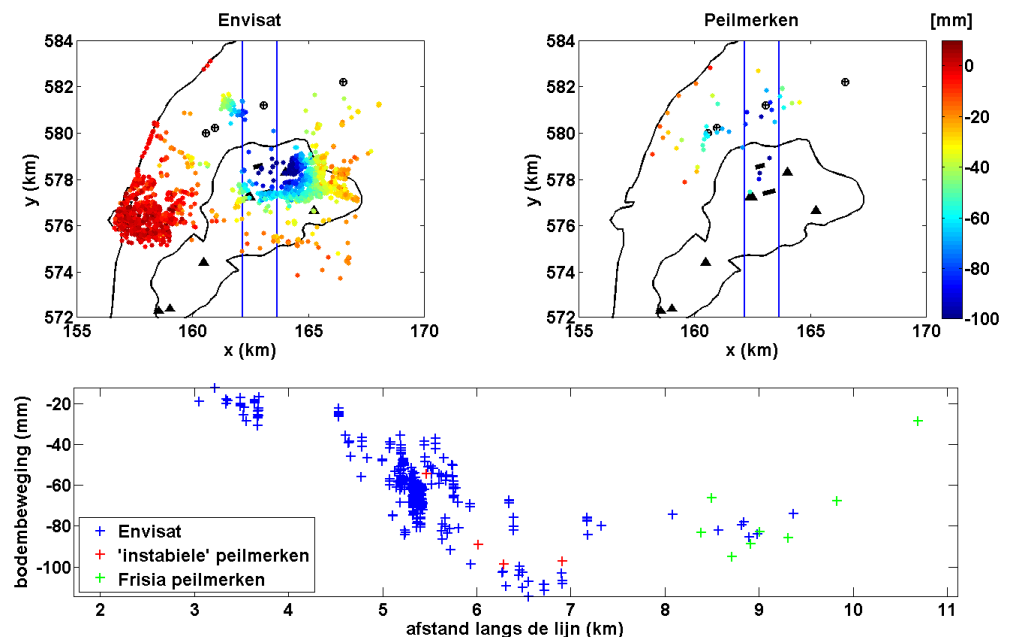
Geconcludeerd kan worden dat de 4 peilmerken boven de gaswinning toch een realistisch beeld van de bodemdaling blijken te geven. De additionele peilmerkdada ten behoeve van de zoutwinning geven significant meer informatie over de bodemdalingsskom boven de cavernes. In de verdere analyse zullen dan ook alle data mee worden genomen.



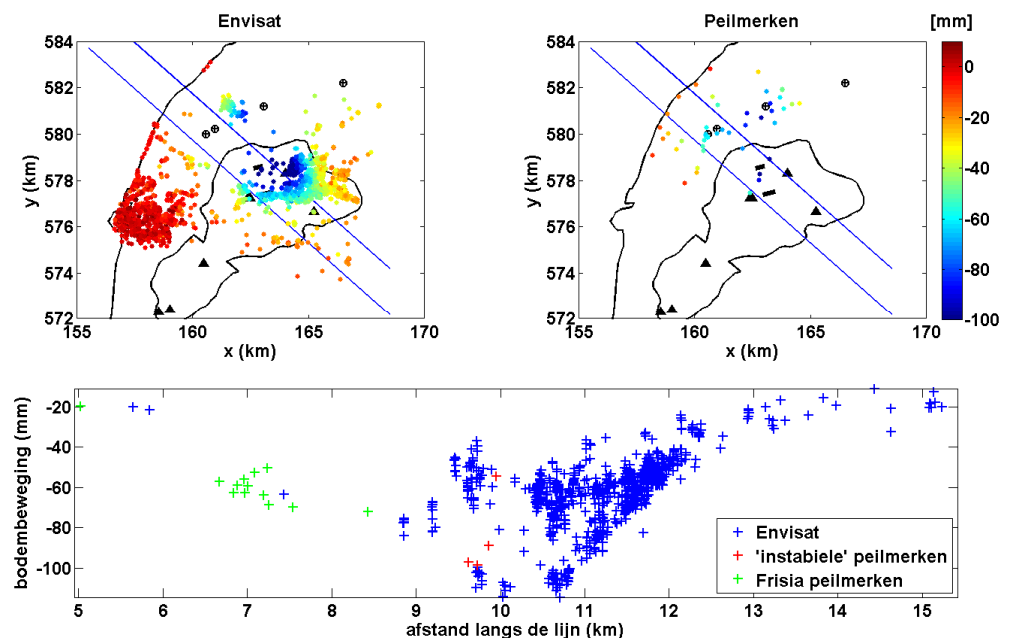
Figuur 4-3. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1997 en 2000, onder de polynoom hypothese. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 550 m worden meegenomen



Figuur 4-4. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1997 en 2000, onder de polynoom hypothese. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 1000 m worden meegenomen



Figuur 4-5. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2008, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 750 m worden meegenomen. De waterpassingen zijn gecorrigeerd (lineaire interpolatie) voor verschillende begindatum (8 maanden).



Figuur 4-6. Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2008, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 1000 m worden meegenomen. De waterpassingen zijn gecorrigeerd (lineaire interpolatie) voor verschillende begindatum (8 maanden).

5 Bodemdaling Noordwest-Friesland

5.1 Ruimtelijke analyse bodembeweging

5.1.1 *Interpolatie en integratie*

De interpolatie noodzakelijk om de bodemdalingkaarten te maken en tijdreeksen te interpoleren zijn op de volgende manier gemaakt. In stap 1 is in de tijd een tweede orde polynoom geschat voor zowel elk radarmeetpunt als elk waterpaspunt. Voor de waterpassing zijn alleen die punten meegenomen die voldoende meetpunten in de tijd hebben in de verschillende perioden om een temporele interpolatie (afschatten van de tweede orde polynoom) mogelijk te maken. In de tweede stap wordt de temporele interpolatie aan de hand van de geschatte 2^e orde polynoom uitgevoerd. In de derde stap worden de resultaten van de tweede stap ruimtelijk geïnterpoleerd naar een ruimtelijk grid. De interpolatie geschied via kriging (Abramowitz en Stegun, 1972).

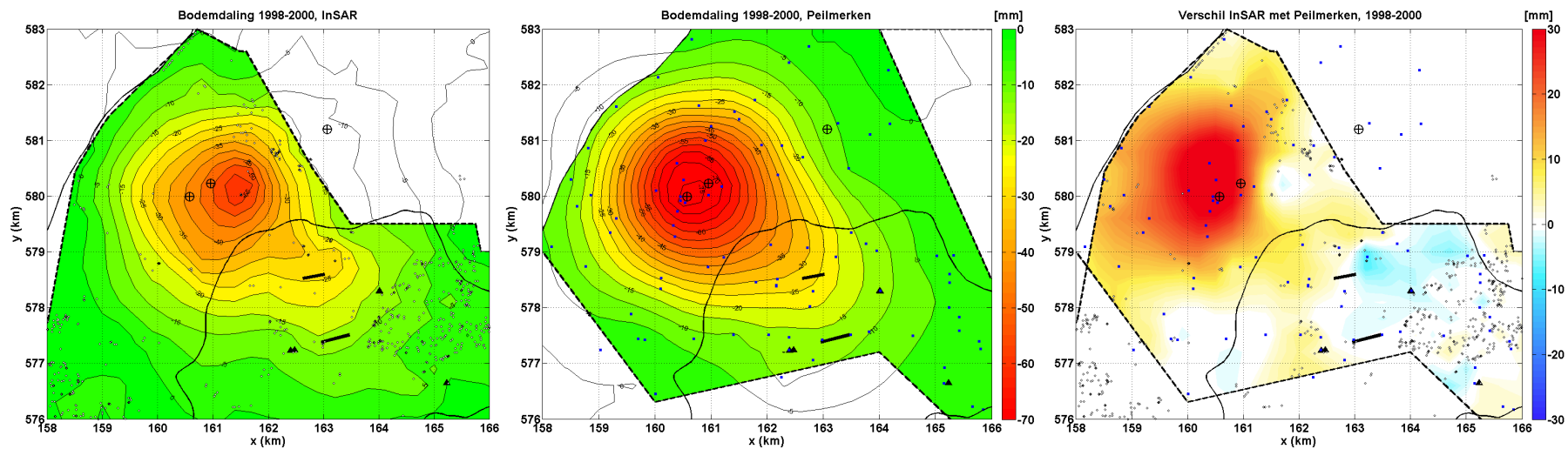
Men dient er rekening mee te houden dat de contourlijnen op de kaarten niet overal in het gebied even nauwkeurig zijn vast te stellen door gebrek aan voldoende dichtheid van het meetnet.

5.1.2 *Ruimtelijke consistentie bodembeweging*

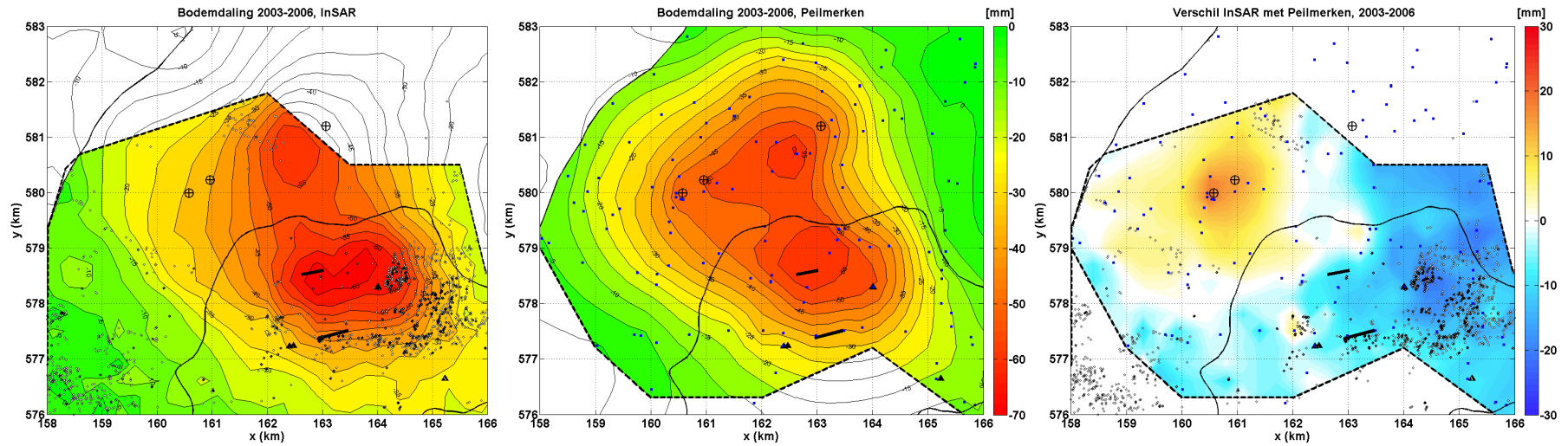
In Figuur 5-1 en Figuur 5.2 zijn voor de perioden 1998-2000 en 2003-2006 de ruimtelijke interpolaties van de peilmerkbeweging en de PSI beweging weergegeven. Daarnaast is ook het verschil tussen deze ruimtelijke interpolaties gegeven. De gebieden waar de data geëxtrapoleerd wordt zijn wit weergegeven. De geëxtrapoleerde contourlijnen zijn wel weergegeven. In de verschilfiguren is alleen voor de gebieden waar beide datasets een goede bedekking hebben een verschil bepaald.

In beide perioden laten de peilmerken meer daling zien bij de BAS-1/2 zoutcavernes. In 5 jaar tijd laten de peilmerken 48,5 mm meer daling zien dan de PSI scatterers: tussen 1998 en 2000 is het verschil in beweging 30 mm, in de periode 2003-2006 is dit verschil 18,5 mm. De oorzaak van dit verschil is de beperkte ruimtelijke bedekking van PSI scatterers in dit gebied, waardoor de daling in deze scatterers wordt geëxtrapoleerd. De peilmerkbekking in dit gebied is goed.

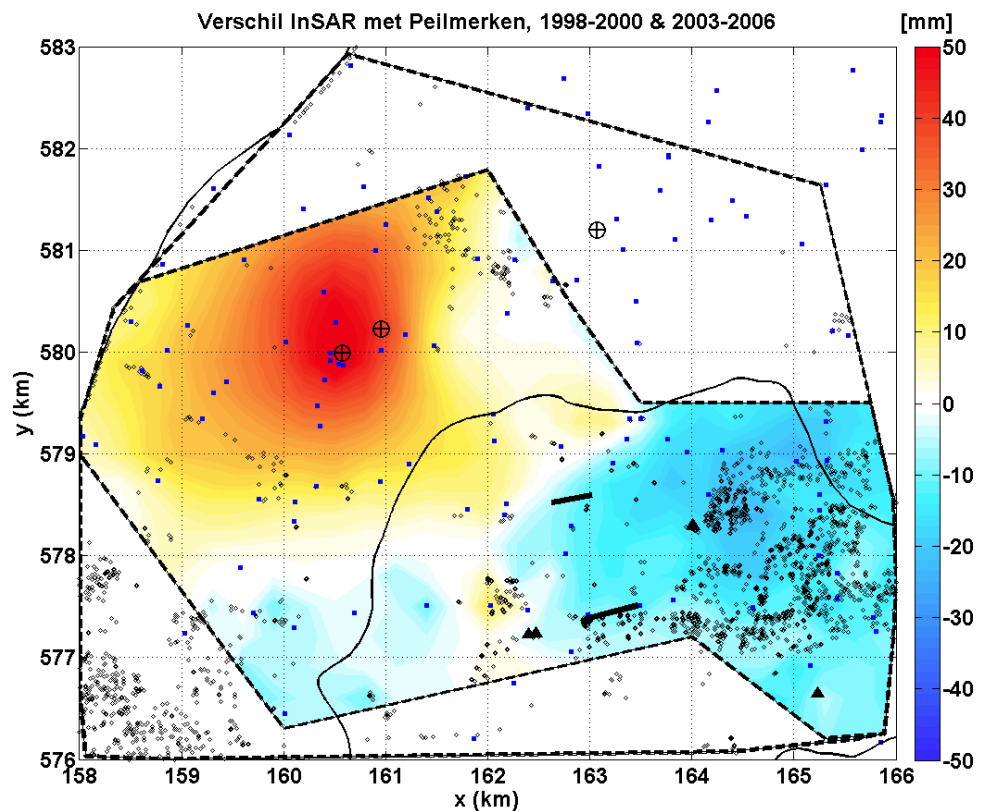
Boven het Harlingen gasveld laten de PSI scatterers juist meer daling zien dan de peilmerken (Figuur 5-1 en Figuur 5.2). De positie van het maximum van dit verschil is niet stabiel in de tijd zoals bij de BAS-1/2 cavernes, maar verschuift lateraal. In de periode 1998-2000 zien we een maximale extra daling van 7 mm net ten noorden van de put HRL-7. Tussen 2003 en 2006 ligt het maximale verschil tussen de PSI en de peilmerken ten oosten van HRL-4 (onder War) en bedraagt ruim 21 mm. Boven het gasveld is de ruimtelijke bedekking van de PSI scatterers juist aanzienlijk beter dan de ruimtelijke bedekking van de peilmerken.



Figuur 5-1. Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI data (links) en de peilmerkdata (midden) voor de periode 1998-2000. De peilmerk locaties worden weergegeven met blauwe vierkanten en de PSI punten met grijze diamanten. De rechterfiguur geeft het verschil tussen deze interpolaties. Duidelijk is te zien dat de peilmerken 30 mm meer daling laten zien bij de zoutcavernes BAS-1/2, terwijl de PSI data 7 mm meer daling laat zien boven het Harlingen gasveld. De extra daling ten oosten van BAS-3 is in deze periode niet realistisch aangezien daar geen PSI scatterers geobserveerd zijn.



Figuur 5-2. Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI data (links) en de peilmerkdata (midden) voor de periode 2003-2006. De peilmerk locaties worden weergegeven met blauwe vierkanten en de PSI punten met grijze diamanten. De rechterfiguur geeft het verschil tussen deze interpolaties. De peilmerken laten 18,5 mm meer daling zien bij de zoutcavernes BAS-1/2, terwijl de PSI data ruim 21 mm meer daling laat zien boven het Harlingen gasveld. De extra daling ten oosten van BAS-3 is in deze periode wederom niet realistisch aangezien daar geen PSI scatterers geobserveerd zijn.



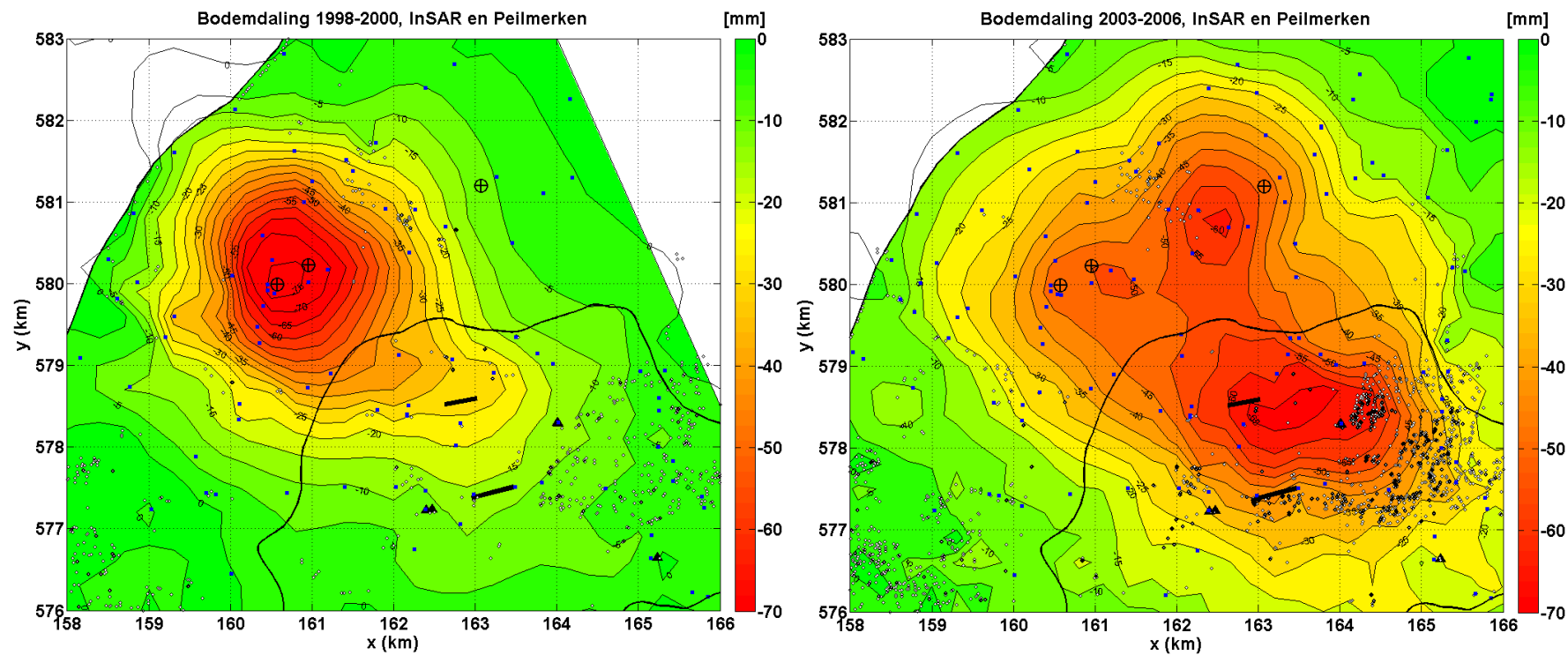
Figuur 5-3. Ruimtelijke verdeling van het cumulatieve verschil tussen de PSI- en peilmerk daling over de tijdvakken 1998 - 2000 en 2003 - 2006.

Figuur 5-3 laat de ruimtelijke verdeling van het cumulatieve verschil tussen de PSI en peilmerk daling over beide tijdvakken zien. Zoals verwacht laten de peilmerken een additionele daling van bijna 5 cm zien bij de BAS-1/2 zoutcavernes, terwijl de PSI data in deze 5 jaar samen een additionele daling van 2,3 cm onder de wijk WAR in Franeker geven.

Geconcludeerd kan worden dat een slechte ruimtelijke bedekking van bodemdalingmetingen aanleiding kan geven tot een significante onderschatting van de bodemdaling.

5.1.3 Ruimtelijke bodembeweging 1998-2000 en 2003-2006

Figuur 5.4 laat voor de perioden 1998-2000 en 2003-2006 de geïntegreerde interpolatie van de PSI en peilmerkbewegingen zien. Het zwaartepunt van de daling ligt in de periode 1998-2000 bij de zoutcavernes BAS-1/2 en bedraagt ruim 7,5 cm. In de periode 2003-2006 zijn er 3 subkomen te onderscheiden: een met een daling van 5 cm net ten oosten van de BAS-2 zoutcaverne, een met een daling van ruim 6 cm ten zuidwesten van BAS-3 en een met een daling van ruim 6,5 cm tussen HRL-4 en HRL-7.



Figuur 5-4. Geïnterpoleerde bodemdaling van de PSI en de peilmerken data samen voor links de periode 1998-2000 en rechts de periode 2003 en 2006. De blauwe vierkanten geven de locaties van de gebruikte peilmerken terwijl de grijze diamanten de locaties van de gebruikte PSI scatterers weergeven.

5.1.4 *Ontwikkeling bodemdaling*

Figuur 5-5 en Figuur 5-6 laten de ontwikkeling van de bodemdaling in Noordwest – Friesland in de tijdvakken 1995-2000 en 2003-2008 gebaseerd op interpolatie van de PSI scatterer daling zien in jaarlijkse intervallen. De gebieden waar de gecontourde daling is gebaseerd op extrapolatie is wit gelaten. De contouren zijn wel weergegeven. Opgemerkt dient te worden dat de PSI data geen ruimtelijke bedekking hebben in het gebied Wijnaldum, Roptazijl, Pietersbierum en Herbaijum (zie Figuur 1-1 voor geografische locaties van de plaatsen). De contourlijnen in dit gebied zijn dan ook niet nauwkeurig vast te stellen, maar komen door middel van extrapolatie tot stand, en een gedetailleerde interpretatie is niet realistisch.

1995-2000

In dit tijdvak lijkt het diepste punt te ontstaan net ten oosten van de BAS-2 caverne. Daarnaast lijkt in 1997 zich een tweede kom te vormen net ten noorden van Wijnaldum, welke later een uitstulping van de primaire kom bij BAS-2 wordt. Deze daling ligt echter in het eerder aangegeven gebied tussen Wijnaldum, Roptazijl, Pietersbierum en Herbaijum, waarbinnen de contourlijnen niet nauwkeurig zijn vast te stellen. Een meer gedetailleerdere observatie van de kommen laat ook zien dat deze niet bepaald worden door de daling van een scatterer, maar door de continuering van een trend ingezet door scatterers ten noorden, respectievelijk ten zuiden van de twee “kommen”.

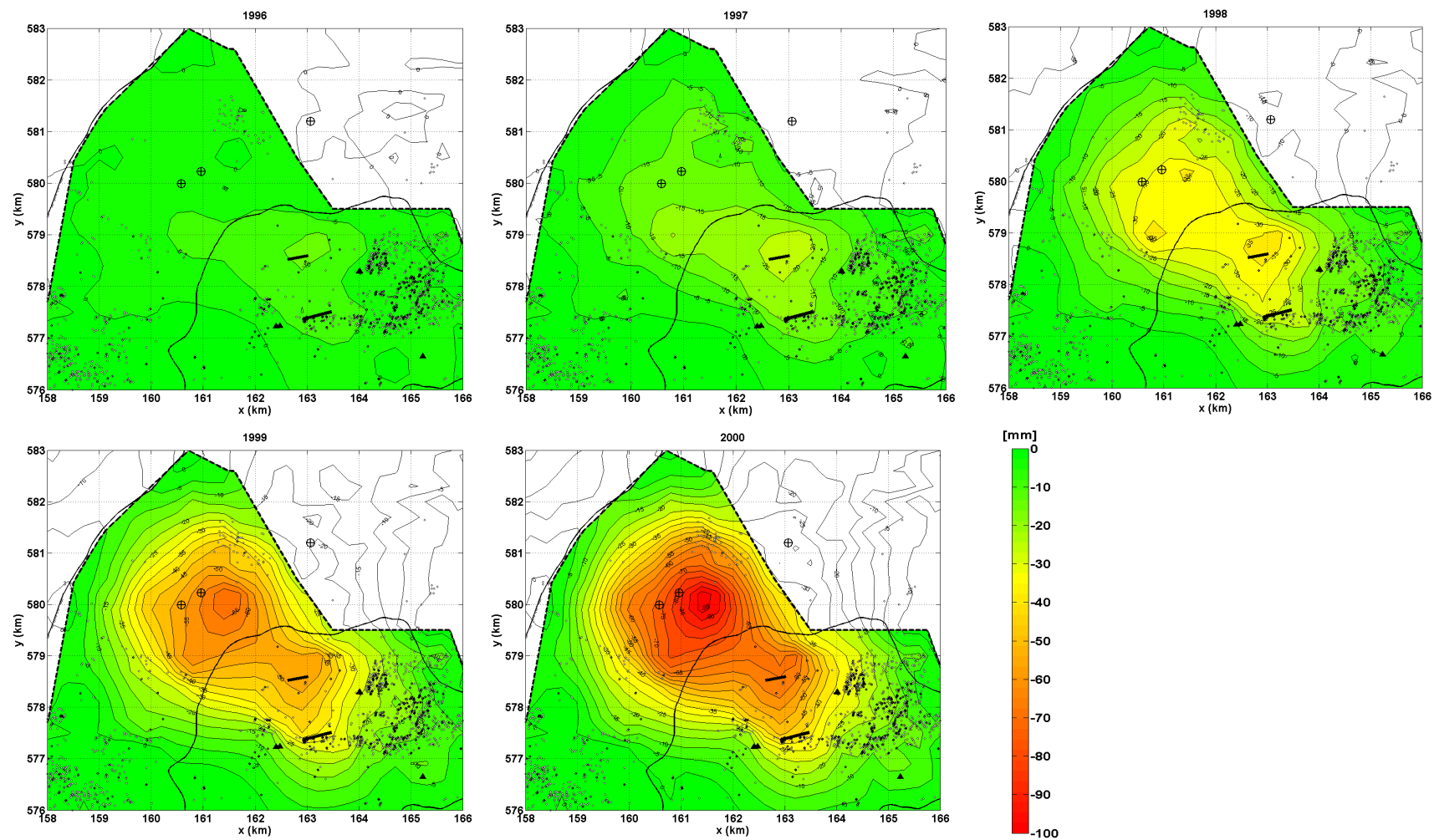
Eerder hebben we al laten zien dat de geïntegreerde interpolatie tussen 1998 en 2000 in Figuur 5.4 het diepste punt van de bodemdalingsskom tussen BAS-1 en BAS-2, ongeveer een kilometer west-zuidwestelijker legt. In deze geïntegreerde interpolatie ontbreekt ook de uitstulping richting Wijnaldum (zie Figuur 1-1 voor locatie van Wijnaldum). Hieruit wordt duidelijk dat de aanwezigheid van peilmerkmetingen in het gebied waar de PSI geen data heeft de trend van de interpolatie significant aanpast. Geconcludeerd moet dan ook worden dat de ontwikkeling van de bodemdaling zoals in Figuur 5-5 geïnterpoleerd wordt voor het gebied tussen Wijnaldum, Roptazijl, Pietersbierum en Herbaijum minder betrouwbaar is.

Boven het Harlingen gasveld is door de aanwezigheid van Herbaijum, Franeker en de A31 wel voldoende PSI data aanwezig om een goede interpolatie te maken. Tussen 1995 en 2000 is te zien dat het zwaartepunt van de daling boven de gaswinning ligt net ten noorden van put HRL-7 met een zuidwaartse uitstulping richting HRL-8. De daling breidt zich in de tijd langzaam naar het westen en zuiden toe uit. Daarnaast is te zien dat ook de gradiënt van de rand van de kom in de loop van de tijd toeneemt.

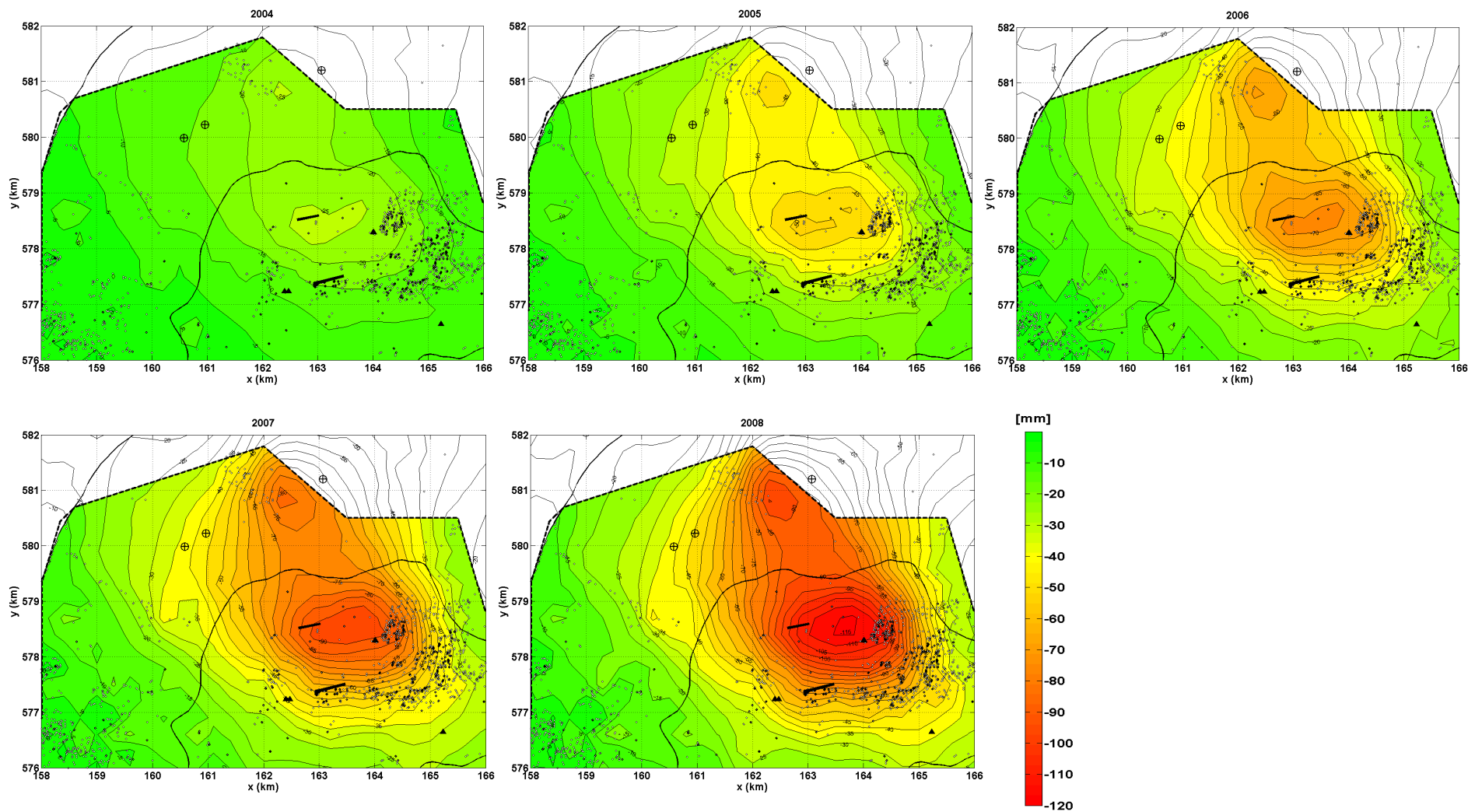
2003-2008

Tussen 2003 en 2008 is de ontwikkeling van 2 kommen te waar te nemen: een ten oosten van Pietersbierum en een tussen de putten HRL-7 en HRL-4. Beide kommen zijn in gebieden met een goede ruimtelijke bedekking van scatterers. De contourlijnen zijn dan ook nauwkeurig vast te stellen.

De kom ten oosten van Pietersbierum verdiept zonder laterale verplaatsing. De gradiënt aan de kant van Pietersbierum lijkt sneller toe te nemen dan de gradiënt ten noorden en westen van de kom. De contourlijnen van deze laatste gradiënten zijn echter weer minder nauwkeurig vast te stellen door het gebrek aan ruimtelijke bedekking van PSI scatterers. Naar het zuiden staat de kom in directe verbinding met de kom boven de gaswinning.



Figuur 5-5. Geïnterpoleerde cumulatieve daling geobserveerd door de ERS2 satelliet aan PSI scatterers in de periode 1995 tot 2000. De grijze diamanten geven de locaties van de PSI scatterers.



Figuur 5-6. Geïnterpoleerde cumulatieve daling geobserveerd door de Envisat satelliet aan PSI scatterers in de periode 2003 tot 2008. De grijze diamanten geven de locaties van de PSI scatterers.

De kom boven de gaswinning ligt in 2004 zuidelijker dan in 2000 en wel ten zuid-zuidoosten van HRL-7. Het diepste punt van de kom verplaatst zich door de jaren naar het oosten om in 2008 tussen HRL-7 en HRL-4 terecht te komen. De uitstulping naar HRL-8 is in dit tijdvak verdwenen. Wederom neemt de gradiënt langs de rand van de kom zeer sterk toe.

De geïntegreerde interpolatie in Figuur 5.4 laat voor de periode 2003-2006 een duidelijk derde uitdieping van de kom zien ten oosten van BAS-2. Deze derde verdieping in de totale kom veroorzaakt ook een uitstulping van de kom naar het westen. Door gebrek aan scatterers in dit gebied wordt deze derde verdieping in de kom en de daar ten gevolge van zijnde uitstulping in cumulatieve daling van Figuur 5-6 gemist. Waaruit opnieuw blijkt dat een gecombineerde analyse van peilmerk en PSI data de meest betrouwbare resultaten geeft.

5.2 Dalingssnelheid

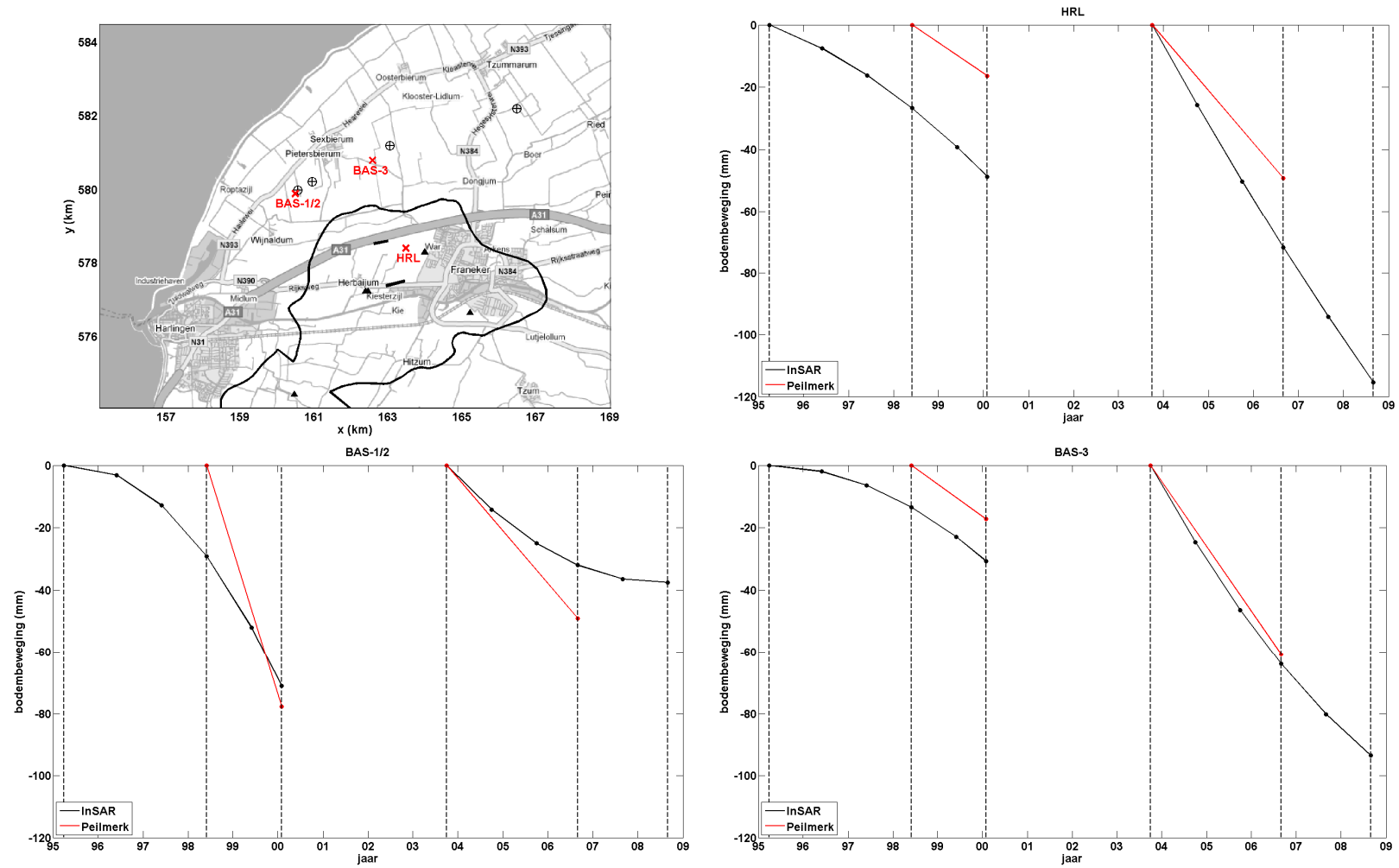
In Figuur 5-7 is de daling in de drie diepste punten van de totale bodemdalingssom, nl. boven het Harlingen gasveld, boven de BAS-1/2 caverne en tussen Pietersbierum en de BAS-3 caverne, zoals die uit de peilmerken en PSI scatterers is geïnterpoleerd uitgezet tegen de tijd.

BAS-1/2 zoutcavernes

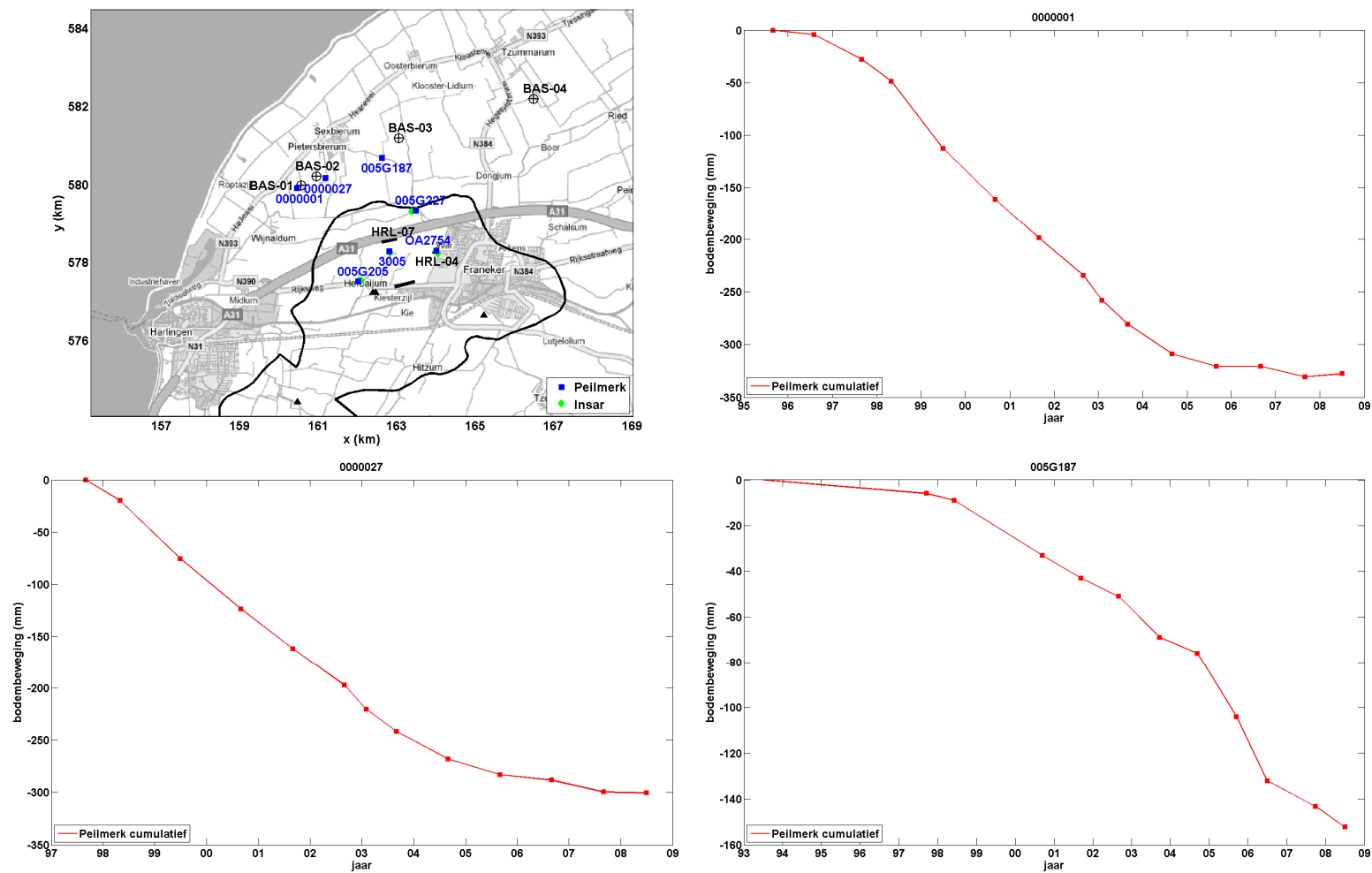
Bij de zoutcavernes van BAS-1/2 laten de PSI scatterers duidelijk de toename van de daling ten gevolge van de toenemende zoutwinning uit de cavernes zien (winning is in 1995 begonnen). Echter de geïnterpoleerde daling tussen 1998 en 2000 is duidelijk aanzienlijk minder dan de geïnterpoleerde peilmerk daling (20,9 mm/jaar versus 38,8 mm/jaar). In de periode 2003-2008 laat de geïnterpoleerde PSI daling een afname van dalingsnelheid zien naar bijna 0 mm/jaar (1,1 mm/jaar). In de periode 2003-2006 is wederom de geïnterpoleerde peilmerkdaling substantieel groter dan de PSI daling. Zoals eerder aangegeven is dit een direct gevolg van het ontbreken van PSI scatterers direct boven de zoutcavernes, waardoor de daling onderschat wordt.

BAS-3 zoutcaverne

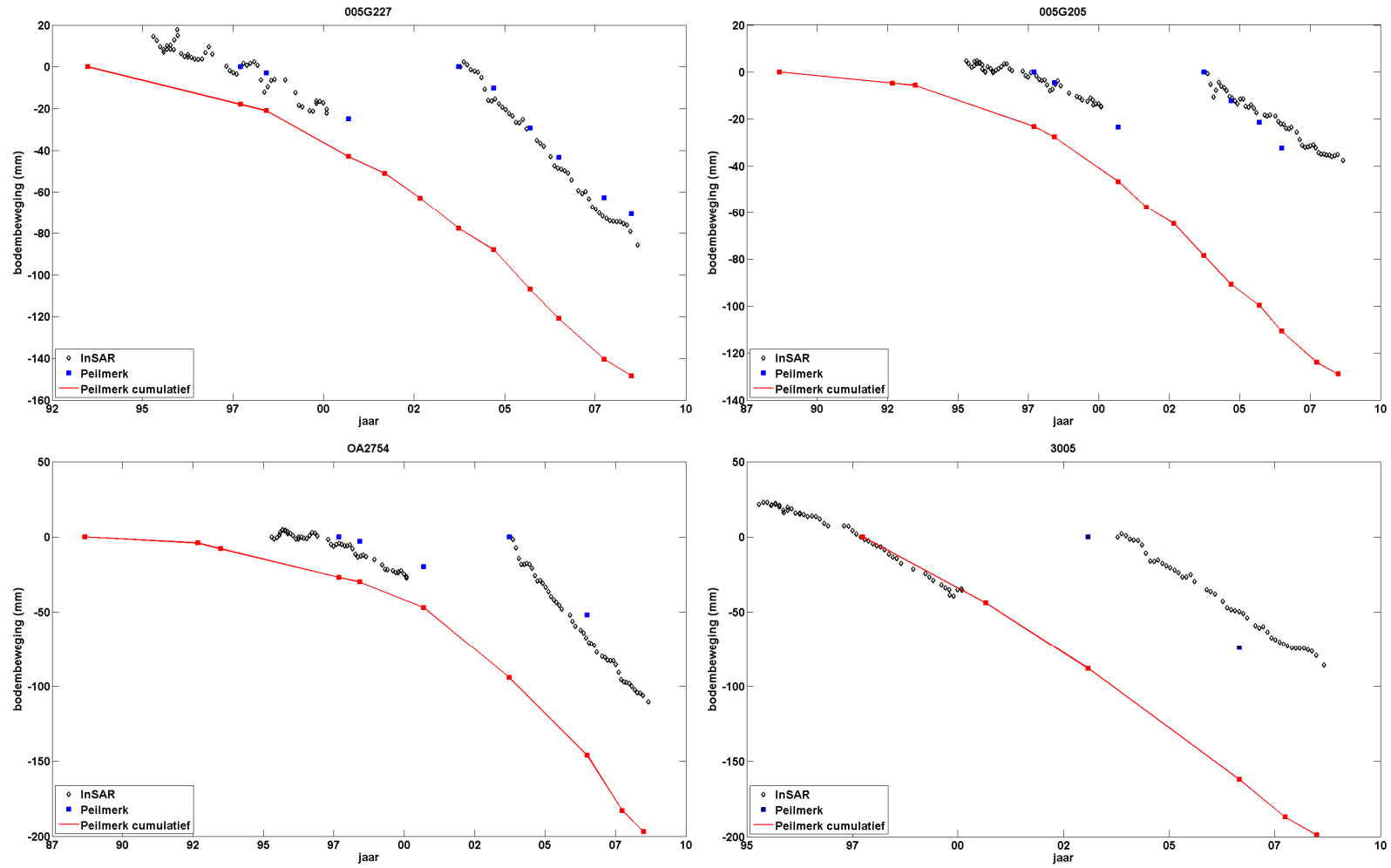
In beide perioden waar vergelijk tussen de geïnterpoleerde PSI en peilmerkdaling mogelijk is (1998-2000 en 2003-2006) is de dalingsnelheid nagenoeg identiek (8,7 mm/jaar vs 8,6 mm/jaar voor de periode 1998-2000 en 21,3 mm/jaar vs 20,2 mm/jaar voor de periode 2003-2008). Het is dan ook redelijk om te concluderen dat het verloop van de daling in de tijd zoals die in de PSI interpolatie wordt waargenomen representatief is. Duidelijk is waar te nemen dat de daling tussen 1995 en 2000 in snelheid toeneemt (van 4,7 mm/jaar naar 8,7 mm/jaar), terwijl in de periode 2003-2008 deze dalingsnelheid juist weer afneemt (van 21,3 mm/jaar naar 14,8 mm/jaar).



Figuur 5-7. Daling vs. tijd van de geïnterpolerde bodemdaling in de 3 diepste punten van de bodemdalingkom bij BAS-1/2, tussen Pietersbierum en BAS-3 en bij het Harlingen gasveld (HRL)



Figuur 5-8: Volledige tijdsree van de peilmerken 000001 (bij BAS-1), 000027 (bij BAS-2) en 005G187 (tussen Pietersbierum en BAS-3).



Figuur 5-9: Volledige tijdseries van de peilmerken 005G227, 005G205, OA2754 en 3005 (rood), de daling van de nabij gelegen PSI scatterers (grijze diamanten), en de peilmerkdaling in het met de InSAR corresponderende tijdvak (blauwe vierkantjes). Locaties van de peilmerken gegeven in de kaart van Figuur 5.8.

In Figuur 5-8 is de volledige tijdserie van enkele peilmerken weergegeven welke het dichtst bij de diepste punten van de interpolatiekommen boven de zoutwinning liggen. Duidelijk is te zien dat de daling bij BAS-1 (peilmerk 000001) het grootst is met ~33 cm. De daling net ten oosten van BAS-2 (peilmerk 000027) is 30 cm, terwijl de daling tussen Pietersbierum en BAS-3 (peilmerk 005G187) ruim 15 cm is. De tijdserie van peilmerk 000001 laat heel mooi het langzaam op gang komen van de bodemdaling, een lineair stuk, en een vertraging van de bodemdaling zien. Dit is te relateren aan het begin van de productie in 1995 en de zeer sterke afname van productie in 2004. Zowel bij BAS-1 als bij BAS-2 is er geen substantiële bodemdaling meer waar te nemen sinds 2006. De daling van peilmerk 05G187 neemt nog steeds redelijk lineair toe.

Harlingen gasveld

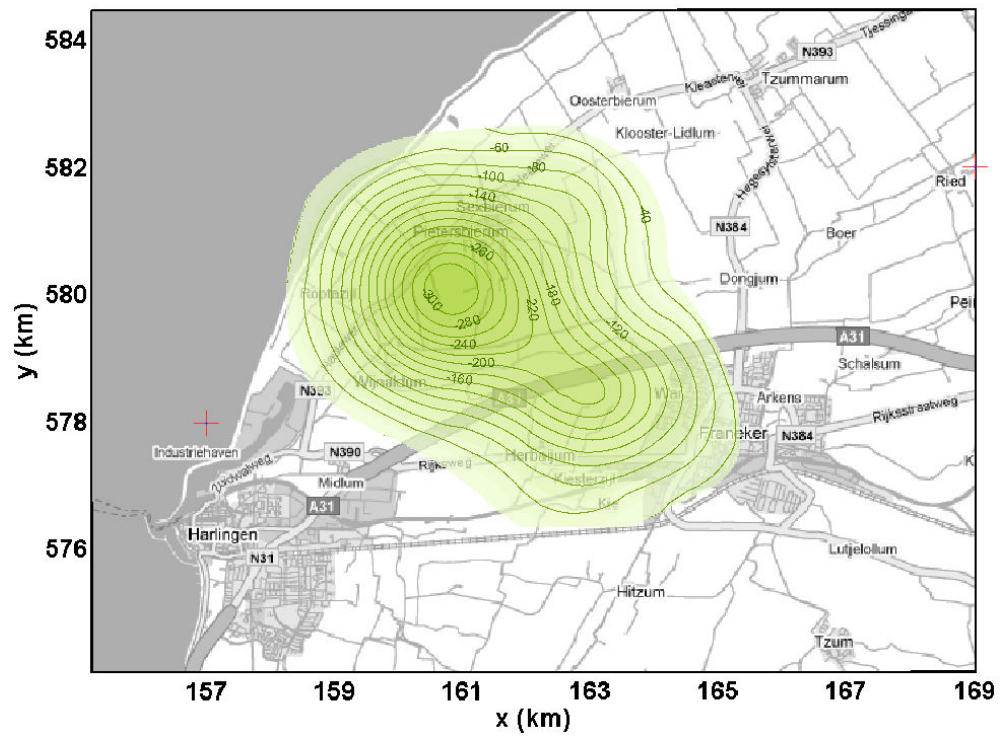
De geïnterpoleerde PSI daling (Figuur 5-7) laat een lichte versnelling van de daling zien tussen 1995 en 2000. In de periode 1998 tot 2000 is de daling in de scatterers ~2,8 mm/jaar groter dan de daling in de peilmerken. In de periode 2003-2008 neemt de snelheid van de geïnterpoleerde daling volgens de PSI scatterers zelfs licht af (van 23,9 mm/jaar naar 21,8 mm/jaar). De geïnterpoleerde daling van de peilmerken laat echter tussen 2003 en 2006 een veel kleinere dalingsnelheid zien van 16,4 mm/jaar, een verdubbeling van de daling in eerste periode.

Figuur 5-9 laat de tijdseries van een aantal peilmerken rond het Harlingen gasveld zien samen met de daling in de meest nabij gelegen PSI scatterer. Duidelijk is te zien dat het verloop van de daling in de tijd afhankelijk is van de positie van het punt ten opzichte van het diepste punt van de kom. Het peilmerk 3005, welke gelegen is net ten zuiden van HRL-7 (zie locatiefiguur in Figuur 5-8), laat een lineair verloop van de daling in de tijd zien. Het punt 0A2754 onder War, Franeker, laat tot 2001 een toename in dalingsnelheid zien en vanaf 2001 een lineair verloop in de tijd. Voor het peilmerk 005G227 ligt de omslag van toename naar lineair tijdsgedrag rond 2003. Voor het meest buiten de kom gelegen peilmerk 005G205 is deze transitie moeilijk vast te stellen. De daling in deze punten is volledig consistent met de daling beschreven door de PSI scatterers. Kleine deviaties komen door het verschil in datum van de metingen en de afstand tussen het peilmerk en de meest nabij gelegen scatterer.

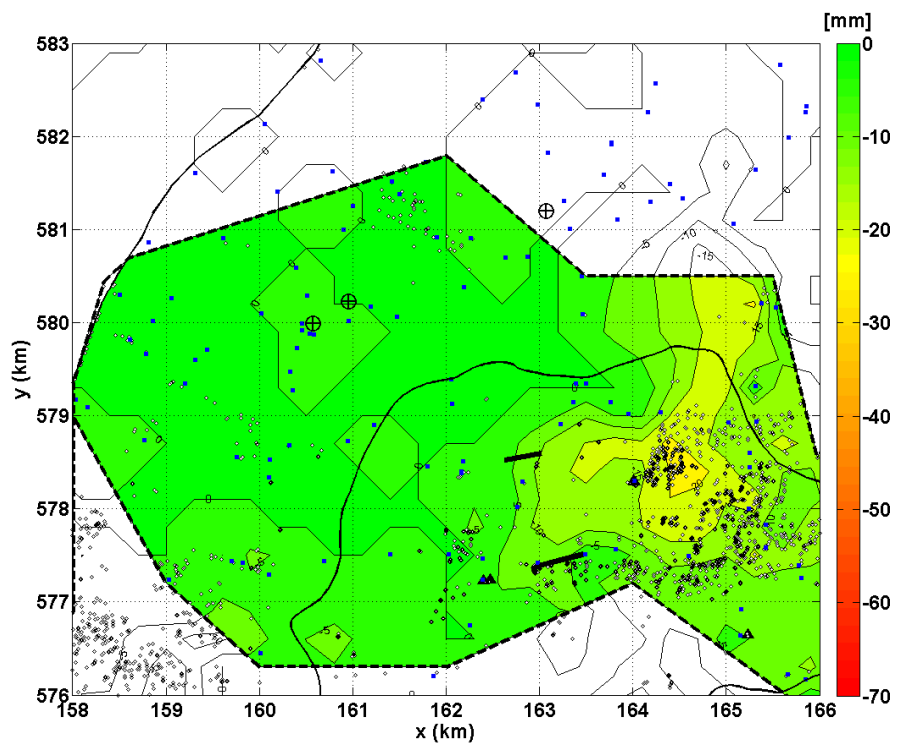
5.3 Minimale bodemdaling Noordwest-Friesland

Zoals in de inleiding beschreven heeft Houtenbos (2008) op basis van alle beschikbare peilmerken een analyse van de bodemdaling tussen 1988 en 2006 gemaakt (Figuur 5-10). Voor de perioden 1998-2000 en 2003-2006 is echter in deze studie vast komen te staan dat de InSAR data boven de gaswinning van Harlingen 2,3 cm extra daling laten zien (Figuur 5-11). Om tot een goede bepaling van de minimale bodemdaling boven de gaswinning te komen zou deze daling bij de peilmerkdaling moeten worden opgeteld.

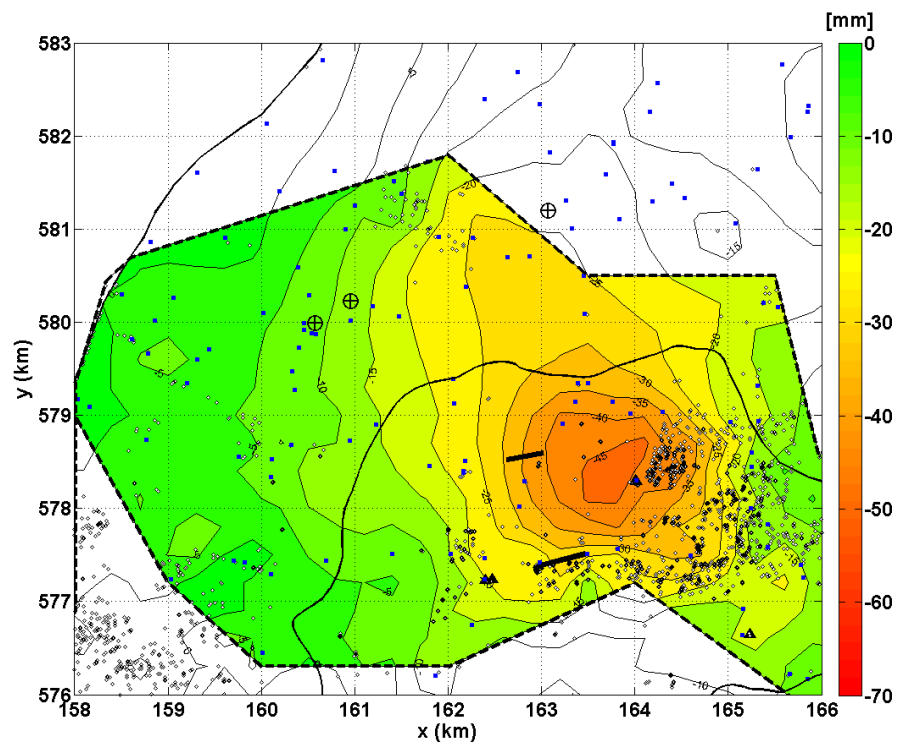
Daarnaast laat de InSAR ook in de periode 2006-2008 nog extra daling van ruim 6,5 cm boven de gaswinning zien (Figuur 5-12). De daling boven de zoutwinning van BAS-1/2 is minimaal (~1-1,5 cm). Hoewel hier een slechte ruimtelijke bedekking van de PSI scatterers is, komt dit overeen met de daling zoals waargenomen in de peilmerken (Figuur 5-8, sectie 5.2). Figuur 5-13 laat de geïnterpoleerde totale extra daling zien zoals die door de PSI scatterers is gemeten in de periode 1998-2008. Dit is een minimale schatting aangezien de extra daling in de periode 2000-2003 niet kon worden vastgesteld wegens afwezigheid van InSAR data. De extra daling in Figuur 5-13 bedraagt in het diepste punt 6,7 cm.



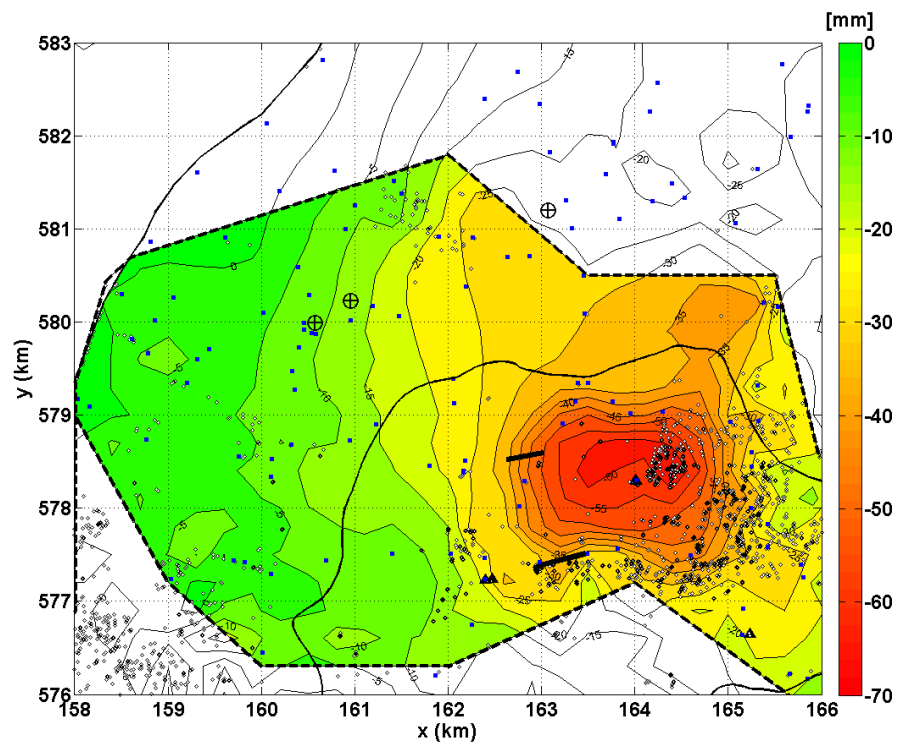
Figuur 5-10: Totaal gemeten bodemdaling over de periode 1988-2006 in mm (Houtenbos, 2008).



Figuur 5-11: Cumulatief verschil tussen de geïntegreerde daling van peilmerken en InSAR met de peilmerk daling in de periode 1998-2000 en de geïntegreerde daling van de peilmerken en de InSAR met de peilmerk daling in de periode 2003-2006.

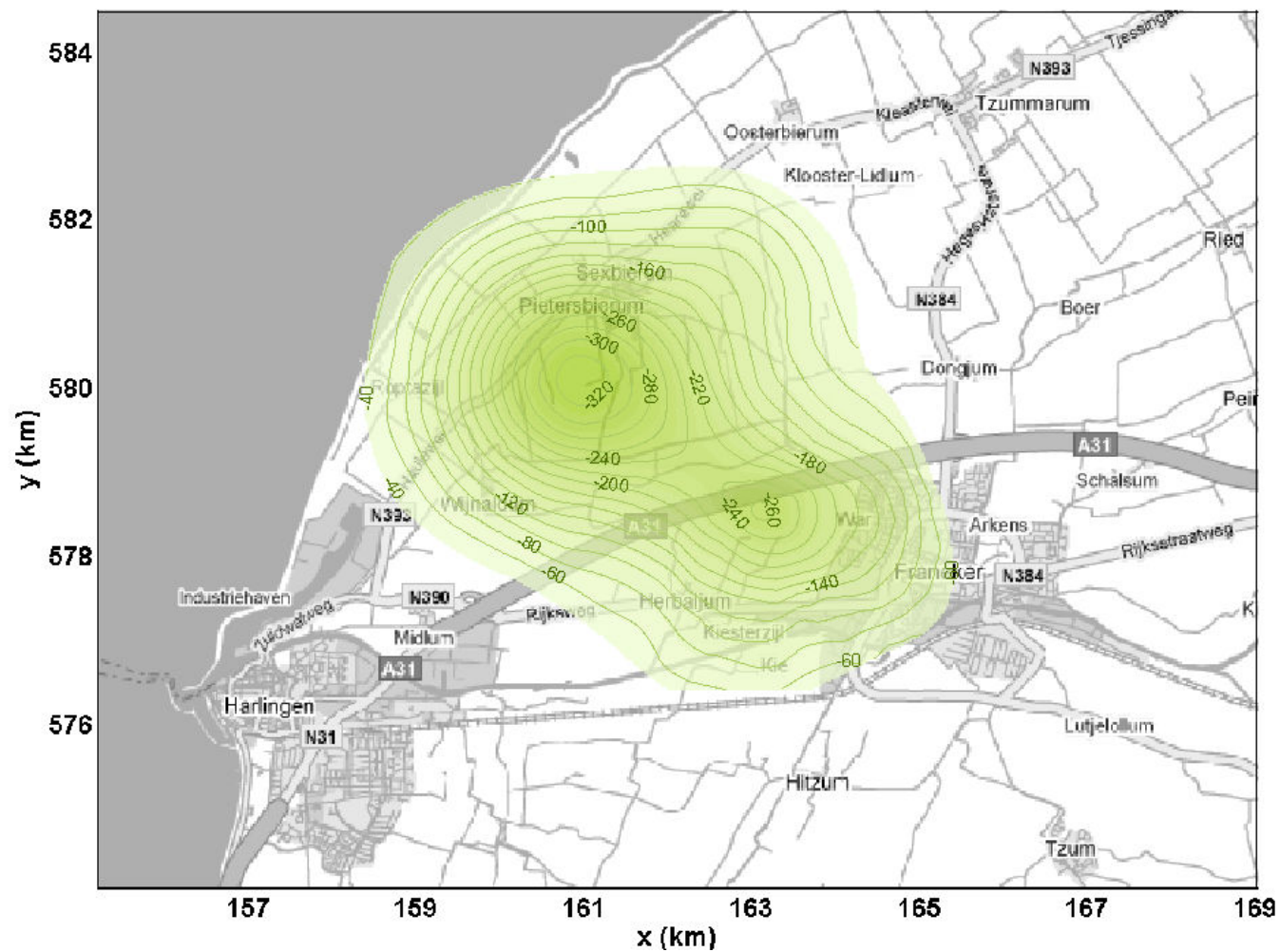


Figuur 5-12: Geïnterpoleerde daling van de PSI scatterers tussen 2006 en 2008.



Figuur 5-13: Geïnterpoleerde totale extra daling gemeten in de PSI scatterers in de periode 1998-2008.
(houd er rekening mee dat dit een minimale schatting is aangezien de additionele daling in de periode 2000-2003 niet vastgesteld kon worden).

Figuur 5-14 geeft de totale geïnterpoleerde daling tussen 1988 en 2008 gebaseerd op de geïnterpoleerde peilmerkdaling tussen 1988 en 2006 (Houtenbos, 2008) en de geïnterpoleerde totale extra daling gemeten met de PSI scatterers tussen 1998-2000 en 2003-2008. De bodemdalingskom heeft twee duidelijke verdiepingen. De eerste is bij BAS-1/2 met een maximale diepte van 33 cm. De tweede is bij HRL-7 met een diepte van 26,5 cm. Dit is een minimale schatting aangezien de extra daling in de periode 2000-2003 niet kon worden vastgesteld wegens afwezigheid van InSAR data.



Figuur 5-14: Totale geïnterpoleerde bodemdaling in Noordwest-Friesland tussen 1988 en 2008 gebaseerd op geïnterpoleerde peilmerkaling tussen 1988 en 2006 en geïnterpoleerde extra daling van PSI scatterers tussen 1998-2000 en 2003-2008.

6 Conclusies

6.1 Technische conclusies

- Deze studie toont aan dat radar interferometrie een ruimtelijk willekeurig gedistribueerde set waarnemingspunten vergaart. Deze is qua ruimtelijke bemonstering niet afgestemd aan het verwachte deformatiesignaal, zoals wel mogelijk bij specifieke in-situ metingen zoals waterpassingen². Toch is in deze studie aangetoond dat het geschatte deformatiesignaal nagenoeg gelijk is aan dat van de waterpassingen (Correlatie 0,94 voor zowel ERS (2^e orde polynoom hypothese) als Envisat). Wel is gebleken dat in de standaard nulhypothese fasemeerduideligheden kunnen optreden bij radarpunten in meer geïsoleerd liggende gebieden. Het toepassen van een alternatieve hypothese om het deformatiegedrag te beschrijven (2^e orde polynoomhypothese) heeft dit probleem opgelost.
- Het feit dat de radarmetingen in principe vanuit vier verschillende tracks kunnen plaatsvinden, geeft een ongekende mogelijkheid van redundantie: onafhankelijke sets meetpunten die zowel ruimtelijk, temporeel als fysisch onafhankelijk zijn. Dit is met terrestrische methoden economisch niet te realiseren. De huidige gebruikte radarmeetsets bestaan uit ca 10 'meetcampagnes' per jaar. Gebruik makend van het potentieel van de huidige satelliet (Envisat) zou dat zelfs 40 metingen per jaar kunnen zijn.

6.2 Bodemdaling Noordwest-Friesland

- De bodemdaling boven de zoutwinning in BAS-1/2 en BAS-3 is goed waargenomen door de peilmerken. De PSI techniek vindt hier te weinig scatterers om de daling te kunnen monitoren.
- De bodemdaling boven de gaswinning wordt juist erg goed waargenomen met de PSI techniek door de hoge dichtheid van scatterers in Franeker, Herbaijum en de A31. Door de karakteristieken van de bodemdalingsschiet in dit gebied juist de bedekking van de peilmerken te kort.
- In de perioden 1998-2000 en 2003-2006 laat de PSI techniek een extra daling in het diepste punt boven het gasveld van ruim 2,3 cm zien ten opzichte van de daling gemeten aan de peilmerken in dezelfde periode.
- Tussen 2006 en 2008 wordt door de scatterers boven het gasveld een daling van 4,5 cm waargenomen.
- Tussen 1995 en 2000 treedt een duidelijke versnelling van de bodemdaling in het diepste punt boven de gaswinning op. In de periode 2003 tot 2008 lijkt een lichte vertraging van de daling van het diepste punt op te treden.
- Het tijdstip waarop de dalingssnelheid boven het gasveld veranderd is sterk afhankelijk van de locatie van een meetpunt ten opzichte van het diepste punt van de kom: Hoe verder van het diepste punt af gelegen des te later de verandering optreedt.

² Hierbij dient opgemerkt te worden dat ook bij waterpassingen en GPS metingen meestal gebruik wordt gemaakt van trajecten langs wegen en infrastructuur, waardoor ook deze in het algemeen en niet-homogene bemonstering kent. Desalniettemin is het hierbij in principe wel mogelijk om een bemonstering te verkrijgen die nauw is afgestemd op het te verwachten deformatiesignaal.

- De daling boven de zoutwinning in BAS-1/2 komt vanaf 1995 langzaam op gang en neemt toe in snelheid tot 1998. Vanaf 2004 neemt de dalingsnelheid juist weer af. Dit is direct te relateren aan de sterke vermindering van productie in de cavernes.
- De daling tussen Pietersbierum en de BAS-3 caveerne vertoont hetzelfde gedrag als de daling boven de BAS-1/2 cavernes. Hier komt de productie echter pas in 2003 op gang en neemt de dalingsnelheid toe tot 2000. Sinds 2006 neemt de dalingsnelheid heel voorzichtig weer iets af.
- De schatting van de diepste punten in de bodemdaling in Noordwest-Friesland tussen 1988 en 2008 is ~33 cm bij BAS-1/2. De minimale schatting van het diepste punt boven de gaswinning bij de horizontale put HRL-7 is in dezelfde periode ~26,5 cm.

6.3 Tenslotte

- Daar waar metingen van een van beide datasets ontbreken, kunnen observaties van de andere techniek extra informatie verschaffen over de komvorm en – diepte. Door een gecombineerde aanpak kan de interpretatie van de daling significant anders zijn dan een interpretatie gebaseerd op elk van de technieken afzonderlijk.

7 Referenties

Abromowitz, M. and Stegun, I. (1972), **Handbook of Mathematical Functions**, Dover publications, New York.

BECi (2007), **Analysis of leveling survey September 2006 v3**.

Geertsema, J. (1972), **Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs**, SPE 3730, SPE-AIME European Spring Meeting, Amsterdam.

Hanssen, R.F. (2001), **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 pp.

Houtenbos, A.P.E.M. (2008), **Bodemdalingsanalyse NW-Friesland 1988-2007, Precisie en betrouwbaarheid uit geodetische metingen**.

Kampes, B. M. (2005), **Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique**, Springer, Berlin, 211 pp.

Ketelaar, V.B.H. (2008), **Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques**, Springer, Berlin, 280 pp.

Oranjewoud (2007), **Peilmerkdaling nabij Franeker in de periode 1988-2006**.

Oranjewoud (2008)[1], **Meetregister bij het meetplan Barradeel en Barradeel II, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Barradeel en Barradeel II 2007**, in opdracht van Frisia Zout B.V.

Oranjewoud (2008)[2], **Meetregister bij het meetplan Leeuwarden West, Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing 2007**, in opdracht van Vermilion Oil and Gas Netherlands B.V.

Vermilion Oil and Gas Netherlands B.V. (2007), **Subsidence study – Harlingen upper Cretaceous (Chalk) Reservoir**, Addendum September 2007.

8 Ondertekening

Utrecht, 24 november 2009

TNO Bouw en Ondergrond

Barthold Schroot
Afdelingshoofd

Mevr. Dr. A.G. Muntendam-Bos
Auteur

A Overzicht gebruikte data

A.1 Radar data

ERS-2 data zijn alle vanuit de dalende baan waargenomen, dat is rond 10:33 UTC, corresponderend met 11:33 lokale tijd (12:33 lokale zomertijd).

Tabel A1: : De gebruikte ERS data

Orbit (ERS1/2)	Date	Btemp
19678	20-APR-1995	-1.9205
20179	25-MAY-1995	-1.8247
20680	29-JUN-1995	-1.7288
21181	03-AUG-1995	-1.6329
01508	04-AUG-1995	-1.6301
21682	07-SEP-1995	-1.5370
2009	08-SEP-1995	-1.5342
22183	12-OCT-1995	-1.4411
02510	13-OCT-1995	-1.4384
22684	16-NOV-1995	-1.3452
03011	17-NOV-1995	-1.3425
23185	21-DEC-1995	-1.2493
03512	22-DEC-1995	-1.2466
23686	25-JAN-1996	-1.1534
24187	29-FEB-1996	-1.0575
24688	04-APR-1996	-0.9616
05015	05-APR-1996	-0.9589
25189	09-MAY-1996	-0.8658
06017	14-JUN-1996	-0.7671
26191	18-JUL-1996	-0.6740
07019	23-AUG-1996	-0.5753
07520	27-SEP-1996	-0.4795
08021	01-NOV-1996	-0.3836
08522	06-DEC-1996	-0.2877
10526	25-APR-1997	0.0959
11027	30-MAY-1997	0.1918
11528	04-JUL-1997	0.2877
12029	08-AUG-1997	0.3836
12530	12-SEP-1997	0.4795
13031	17-OCT-1997	0.5753
13532	21-NOV-1997	0.6712
14033	26-DEC-1997	0.7671
14534	30-JAN-1998	0.8630
15035	06-MAR-1998	0.9589
15536	10-APR-1998	1.0548
16037	15-MAY-1998	1.1507

16538	19-JUN-1998	1.2466
17039	24-JUL-1998	1.3425
17540	28-AUG-1998	1.4384
19043	11-DEC-1998	1.7260
20546	26-MAR-1999	2.0137
21047	30-APR-1999	2.1096
21548	04-JUN-1999	2.2055
22550	13-AUG-1999	2.3973
23051	17-SEP-1999	2.4932
43225	21-OCT-1999	2.5863
23552	22-OCT-1999	2.5890
24053	26-NOV-1999	2.6849
24554	31-DEC-1999	2.7808
44728	03-FEB-2000	2.8740
25055	04-FEB-2000	2.8767
10025 (Master)	21-MAR-1997	0

De gebruikte Envisat radar data zijn allen vanuit de dalende baan opgenomen. Het tijdstip van opname is ongeveer 10:03 UTC, dat is 11:03 lokale tijd (of 12:03 zomertijd).

Tabel A2: De gebruikte Envisat data

Envisat	Date	Btemp
08493	15-OCT-2003	-2.0137
08994	19-NOV-2003	-1.9178
09495	24-DEC-2003	-1.8219
09996	28-JAN-2004	-1.7260
10497	03-MAR-2004	-1.6301
10998	07-APR-2004	-1.5342
11499	12-MAY-2004	-1.4384
12000	16-JUN-2004	-1.3425
12501	21-JUL-2004	-1.2466
13002	25-AUG-2004	-1.1507
13503	29-SEP-2004	-1.0548
14004	03-NOV-2004	-0.9589
14505	08-DEC-2004	-0.8630
15006	12-JAN-2005	-0.7671
15507	16-FEB-2005	-0.6712
16008	23-MAR-2005	-0.5753
16509	27-APR-2005	-0.4795
17010	01-JUN-2005	-0.3836
17511	06-JUL-2005	-0.2877
18012	10-AUG-2005	-0.1918
19515	23-NOV-2005	0.0959
20016	28-DEC-2005	0.1918
20517	01-FEB-2006	0.2877

21519	12-APR-2006	0.4795
22020	17-MAY-2006	0.5753
22521	21-JUN-2006	0.6712
23022	26-JUL-2006	0.7671
23523	30-AUG-2006	0.8630
24024	04-OCT-2006	0.9589
24525	08-NOV-2006	1.0548
25527	17-JAN-2007	1.2466
26028	21-FEB-2007	1.3425
26529	28-MAR-2007	1.4384
27030	02-MAY-2007	1.5342
27531	06-JUN-2007	1.6301
28032	11-JUL-2007	1.7260
28533	15-AUG-2007	1.8219
29034	19-SEP-2007	1.9178
29535	24-OCT-2007	2.0137
30036	28-NOV-2007	2.1096
30537	02-JAN-2008	2.2055
31038	06-FEB-2008	2.3014
31539	12-MAR-2008	2.3973
32040	16-APR-2008	2.4932
32541	21-MAY-2008	2.5890
33042	25-JUN-2008	2.6849
34044	03-SEP-2008	2.8767
19014	19-OCT-2005	0

A.2 Peilmerk data

Tabel A3: Coördinaten van de peilmerken gebruikt in de vergelijking met de InSAR

id	x-coord (km)	y-coord (km)	id	x-coord (km)	y-coord (km)
005D3	156.8500	576.0700	005G171	168.1400	575.6900
005D4	157.1200	576.2700	005G177	167.8400	576.5800
005D5	157.1900	576.4800	005G179	161.8000	578.4600
005D7	157.3200	576.9800	005G180	163.9500	579.0200
005D12	159.0300	577.2400	005G184	169.1500	578.9700
005D15	158.7700	578.7400	005G187	162.6400	580.7000
005D34	159.3100	579.6000	005G189	161.7800	581.7200
005D37	157.1400	576.1300	005G194	168.6300	578.4900
005D38	157.2000	576.5600	005G195	165.4200	577.5800
005D59	159.7000	577.4400	005G196	166.1000	578.2700
005G2	168.9000	575.2600	005G197	165.2500	578.6000
005G4	162.2500	576.7500	005G198	162.8200	577.0600
005G7	161.4000	577.5100	005G199	165.8000	577.2600
005G10	163.4900	577.5100	005G200	161.2300	578.9000
005G18	165.3200	578.9400	005G203	164.1600	578.6000
005G19	165.2400	578.0000	005G204	163.8200	577.5700

005G20	167.6800	578.2800	005G205	162.0300	577.5100
005G21	169.1100	578.5100	005G206	160.6900	577.4400
005G22	169.9900	578.7000	005G207	160.0100	576.4500
005G27	168.8800	579.9200	005G208	160.6500	575.4700
005G28	160.0200	580.1000	005G209	164.6400	575.3500
005G32	165.3800	580.2100	005G210	165.1600	576.9200
005G33	165.5300	580.1600	005G211	169.3900	578.6100
005G34	166.4600	580.5000	005G212	169.2900	577.8000
005G35	166.9300	580.9700	005G213	168.9000	577.5800
005G38	160.9000	581.0000	005G214	168.1200	577.2500
005G39	161.4200	581.5200	005G216	169.6800	578.1400
005G40	161.5000	581.3800	005G217	165.0200	578.9300
005G45	168.5300	581.8500	005G219	162.1600	578.4000
005G52	163.2600	583.0400	005G220	161.6200	575.8900
005G53	164.5000	583.2500	005G221	162.3900	582.4000
005G54	165.4400	583.4000	005G224	168.3100	582.4200
005G57	165.2300	583.9600	005G227	163.5000	579.3500
005G88	165.6600	576.2200	005G228	161.9000	580.9200
005G90	165.0300	575.3400	005G230	165.6800	583.4400
005G91	166.3500	576.8800	005G231	164.0500	583.1500
005G92	165.3100	581.6400	005G234	163.8200	575.4800
005G93	165.8600	582.3200	005G235	161.8600	576.2000
005G101	160.9700	575.5500	005G260	168.7100	580.9500
005G102	162.4000	575.2700	005G272	168.8500	583.5000
005G104	163.0700	575.6800	005G273	167.8500	581.4500
005G108	165.8500	576.1700	005G274	162.3800	583.3000
005G109	165.7800	577.3900	005G275	163.4600	580.0900
005G110	165.4200	577.8300	010B43	156.6400	572.1800
005G111	166.0200	577.8400	010B44	158.4400	572.7000
005G112	166.7400	578.0200	010B45	158.8400	572.5200
005G113	165.0800	581.0600	010B106	156.7800	574.2800
005G115	165.3600	583.3300	010B107	156.7000	573.8100
005G116	166.4500	583.7800	010B108	156.6600	573.2900
005G125	162.9800	577.4200	010B109	156.6200	572.7800
005G126	164.6000	577.4900	010B110	156.5600	572.2300
005G127	165.2500	578.4500	010B124	159.4600	574.7100
005G129	160.3900	580.5900	010B132	159.5400	572.2600
005G132	161.9000	583.8700	010B146	160.0000	574.7400
005G135	165.5800	582.7700	010E72	161.7100	573.6200
005G138	169.1600	579.2200	010E79	166.7400	574.6500
005G142	163.7600	579.1500	010E115	161.4900	574.9000
005G143	163.3600	579.1500	010E132	161.2500	573.6800
005G145	162.1800	578.5100	010E173	160.3000	574.3800
005G165	160.1200	575.5100	010E183	160.9800	574.1800
005G167	160.9500	578.7300	010E195	169.1500	573.8400
005G168	162.0600	579.1300	010E196	169.2400	573.6300
005G169	162.7200	579.0700	010E202	169.0000	574.3500
005G170	167.0000	576.1400			

Tabel A4: Bodemdaling van de peilmerken gebruikt voor de vergelijking met de InSAR data

id	1998	2000	Δ (2000-1998)	2003	2006	Δ (2006-2003)
005D3	3.3990	3.4000	0.0010	3.3980	3.3990	0.0010
005D4	1.7180	1.7170	-0.0010	1.7170	1.7170	0.0000
005D5	2.0080	2.0090	0.0010	2.0080	2.0080	0.0000
005D7	2.1070	2.1100	0.0030	2.1070	2.1100	0.0030
005D12	2.6610	2.6590	-0.0020	2.6520	2.6520	0.0000
005D15	0.8740	0.8570	-0.0170	0.8300	0.8220	-0.0080
005D34	2.1140	2.0680	-0.0460	2.0050	1.9860	-0.0190
005D37	2.6910	2.6920	0.0010	2.6920	2.6930	0.0010
005D38	2.3520	2.3520	0.0000	2.3500		
005D59	1.8070	1.8040	-0.0030	1.7930	1.7880	-0.0050
005G2	0.4690			0.4640	0.4620	-0.0020
005G4	0.7560	0.7390	-0.0170	0.7140	0.6950	-0.0190
005G7	-0.1750	-0.1880	-0.0130	-0.2110	-0.2290	-0.0180
005G10	1.0340	1.0170	-0.0170	0.9810	0.9470	-0.0340
005G18	0.7270	0.7240	-0.0030	0.7150	0.7070	-0.0080
005G19	1.7700	1.7640	-0.0060	1.7490	1.7330	-0.0160
005G20	1.5680	1.5670	-0.0010	1.5620	1.5580	-0.0040
005G21	0.9880	0.9880	0.0000	0.9840	0.9780	-0.0060
005G22	0.6730				3.8130	
005G27	2.6370			2.6320	2.6330	0.0010
005G28	1.3460	1.2560	-0.0900	1.1460	1.1180	-0.0280
005G32	1.0210			1.0140	1.0140	0.0000
005G33	2.6210			2.6160	2.6160	0.0000
005G34	1.2950			1.2910	1.2930	0.0020
005G35	3.1140			3.1090	3.1110	0.0020
005G38	4.0660	3.9840	-0.0820	3.8870	3.8540	-0.0330
005G39	1.1550	1.1120	-0.0430	1.0540	1.0210	-0.0330
005G40	2.9770	2.9290	-0.0480	2.8650	2.8290	-0.0360
005G45	2.7520			2.7500	2.7520	0.0020
005G52	2.2290	2.2290	0.0000	2.2220	2.2150	-0.0070
005G53	2.0630			2.0530	2.0500	-0.0030
005G54	3.7800			3.7750	3.7750	0.0000
005G57	1.8890			1.8830	1.8840	0.0010
005G88	0.7360	0.7340	-0.0020	0.7250	0.7160	-0.0090
005G90	0.7850	0.7830	-0.0020	0.7820	0.7770	-0.0050
005G91	0.6190	0.6160	-0.0030	0.6090	0.6020	-0.0070
005G92	1.5020			1.4950	1.4960	0.0010
005G93	1.1910			0.9060	1.1870	0.2810
005G101	1.0160	1.0150	-0.0010	1.0070	1.0000	-0.0070
005G102	0.7060	0.7070	0.0010	0.7000	0.6920	-0.0080
005G104	1.3200	1.3180	-0.0020	1.3080	1.3000	-0.0080
005G108	1.0660	1.0650	-0.0010	1.0550	1.0460	-0.0090
005G109	1.5780	1.5740	-0.0040	1.5630	1.5530	-0.0100
005G110	1.8670	1.8630	-0.0040	1.8510	1.8380	-0.0130
005G111	1.3360	1.3340	-0.0020	1.3240	1.3180	-0.0060
005G112	0.8270	0.8230	-0.0040	0.8150	0.8070	-0.0080
005G113	0.6020			0.5980	0.5940	-0.0040

005G115	1.3780			1.3740	1.3750	0.0010
005G116	1.7600			1.7590	1.7610	0.0020
005G125	1.3830	1.3650	-0.0180	1.3310	1.2990	-0.0320
005G126	1.3140	1.3060	-0.0080	1.2850	1.2620	-0.0230
005G127	0.9760	0.9710	-0.0050		0.9440	
005G129	0.7200	0.6190	-0.1010	0.5050	0.4720	-0.0330
005G132	0.9160	0.9150	-0.0010	0.9080	0.9090	0.0010
005G135	1.6430			1.6410	1.6410	0.0000
005G138	1.0080			1.0020	1.0020	0.0000
005G142	0.9600	0.9410	-0.0190	0.9000	0.8600	-0.0400
005G143		0.6600	0.6600		0.5580	
005G145	0.3610	0.3180	-0.0430	0.2520	0.2040	-0.0480
005G165	0.2520	0.2490	-0.0030	0.2400	0.2370	-0.0030
005G167	0.7770	0.7220	-0.0550	0.6460	0.6140	-0.0320
005G168	0.5810	0.5260	-0.0550	0.4440	0.4000	-0.0440
005G169	0.9640	0.9190	-0.0450	0.8490		
005G170	1.0860	1.0860	0.0000	1.0810	1.0760	-0.0050
005G171	0.3150			0.3080	0.3020	-0.0060
005G177	1.4990	1.4950	-0.0040	1.4910	1.4850	-0.0060
005G179	0.4650	0.4240	-0.0410	0.3620	0.3250	-0.0370
005G180	0.8010	0.7830	-0.0180	0.7430	0.7010	-0.0420
005G184	1.4890			1.4880	1.4890	0.0010
005G187	0.4870	0.4630	-0.0240	0.4270	0.3640	-0.0630
005G189	1.0390	1.0120	-0.0270	0.9760	0.9360	-0.0400
005G194	1.0600	1.0600	0.0000	1.0570	1.0530	-0.0040
005G195	1.5120	1.5090	-0.0030	1.4950	1.4820	-0.0130
005G196	1.2290	1.2280	-0.0010	1.2230	1.2190	-0.0040
005G197	0.8590	0.8540	-0.0050	0.8430	0.8320	-0.0110
005G198	5.2020	5.1860	-0.0160	5.1570		
005G199	0.8530	0.8500	-0.0030	0.8390	0.8280	-0.0110
005G200	1.4910	1.4290	-0.0620	1.3440	1.3080	-0.0360
005G203	0.9310	0.9170	-0.0140	0.8840	0.8500	-0.0340
005G204	0.9310	0.9170	-0.0140	0.8840	0.8500	-0.0340
005G205	1.3810	1.3620	-0.0190	1.3260	1.2980	-0.0280
005G206	1.0410	1.0300	-0.0110	1.0090	0.9970	-0.0120
005G207	2.4400	2.4400	0.0000	2.4340	2.4320	-0.0020
005G208	0.9060	0.9080	0.0020	0.9010	0.8960	-0.0050
005G209	-0.2930	-0.2940	-0.0010	-0.2970	-0.3030	-0.0060
005G210	1.9070	1.9040	-0.0030	1.8890	1.8730	-0.0160
005G211	1.0800	1.0770	-0.0030	1.0730	1.0720	-0.0010
005G212	0.8650	0.8640	-0.0010	0.8610	0.8590	-0.0020
005G213	0.4350	0.4330	-0.0020	0.4300	0.4260	-0.0040
005G214	0.9860	0.9860	0.0000	0.9820	0.9770	-0.0050
005G216	1.1510	1.1520	0.0010	1.1500	1.1500	0.0000
005G217	1.9030	1.9010	-0.0020	1.8790	1.8630	-0.0160
005G219	1.1380	1.0950	-0.0430	1.0300	0.9820	-0.0480
005G220	0.9570	0.9580	0.0010	0.9500	0.9410	-0.0090
005G221	-0.0340	-0.0420	-0.0080	-0.0610	-0.0880	-0.0270
005G224	-0.0550			-0.0570	-0.0560	0.0010

005G227	0.9790	0.9570	-0.0220	0.9190	0.8790	-0.0400
005G228	0.5750	0.5220	-0.0530	0.4500	0.3990	-0.0510
005G230	1.6440			1.6410	1.6430	0.0020
005G231	1.2980	1.2980	0.0000	1.2930	1.2910	-0.0020
005G234	2.8150			2.8060	2.7990	-0.0070
005G235	0.1320			0.1180	0.1090	-0.0090
005G260				-0.0510	-0.0500	0.0010
005G272				0.7590	0.7580	-0.0010
005G273				0.0720	0.0690	-0.0030
005G274				1.5970	1.5930	-0.0040
005G275				1.0030	0.9660	-0.0370
010B43	0.5570			0.5570	0.5450	-0.0120
010B44	2.0880			2.0780	2.0740	-0.0040
010B45	1.9930			1.9790	1.9730	-0.0060
010B106	1.4770			1.4760	1.4760	0.0000
010B107	1.4070			1.4040	1.4030	-0.0010
010B108	1.2970			1.2920	1.2880	-0.0040
010B109	1.2050			1.1990	1.1910	-0.0080
010B110	1.2950			1.2910	1.2830	-0.0080
010B124	-0.0260			-0.0360	-0.0370	-0.0010
010B132	2.2650			2.2550	2.2530	-0.0020
010B146	2.1370			2.1280	2.1250	-0.0030
010E72	0.6930	0.6890	-0.0040	0.6770	0.6730	-0.0040
010E79	3.5380			3.5350	3.5320	-0.0030
010E115	0.7140	0.7150	0.0010	0.7050	0.7000	-0.0050
010E132	1.0940	1.0950	0.0010	1.0830	1.0770	-0.0060
010E173	0.4970	0.4960	-0.0010	0.4790	0.4680	-0.0110
010E183	0.6480	0.6440	-0.0040	0.6330	0.6320	-0.0010
010E195	0.3750			0.3770	0.3770	0.0000
010E196	0.3480			0.3490	0.3490	0.0000
010E202				-0.2230	-0.2300	-0.0070

Tabel A5: Coördinaten van de verworpen peilmerken van Vermilion.

id	x-coord (km)	y-coord (km)
3001	163.225	578.909
3003	162.386	577.465
3005	162.817	578.29
3006	162.76	578.02

Tabel A6: Bodemdaling van 1997 tot 2008 van de verworpen peilmerken van Vermilion.

id	okt-97	sep-00	feb-03	sep-06	okt-07	jul-08
3001	1.466	1.430	1.390	1.319	1.292	1.281
3003	1.068	1.046	1.025	0.986	0.971	0.964
3005	0.540	0.496	0.452	0.378	0.353	0.341
3006	0.383	0.346	0.309	0.243	0.222	0.209

Tabel A7: Coördinaten van de extra peilmerken van Frisia.

id	x-coord (km)	y-coord (km)	id	x-coord (km)	y-coord (km)
1	160.46	579.921	36	160.51	580.293
2	160.458	579.992	39	160.54	579.88
8	162.19	580.381	49	164.16	582.264
9	162.26	580.909	50	164.19	581.298
10	158.5	580.302	51	163.83	581.106
11	158.81	580.865	52	163.45	580.495
12	159.31	581.604	53	163.26	581.31
13	160.06	582.137	55	162.74	582.686
14	158.86	580.014	56	160.78	581.62
15	159.2	579.342	62	159.44	579.713
16	161	581.252	63	160.58	579.869
20	159.58	577.888	66	164.53	581.337
21	160.1	578.336	67	163.77	581.912
23	160.11	578.529	68	163.77	581.93
24	160.36	579.276	69	161.47	580.065
27	161.19	580.176	70	162.05	579.389
28	160.96	580.02	71	162.87	580.71
29	158.16	579.087	72	163.33	581.006
30	158.61	579.815	73	163.09	581.828
32	160.66	582.817	74	163.69	581.591
33	160.4	579.73	78	161.86	579.027
35	160.33	579.471			

Tabel A8: Bodemdaling van 1995 tot 2008 van de extra peilmerken van Frisia.

id	sep-95	aug-96	sep-97	mei-98	jul-99	sep-00	sep-01	sep-02	feb-03	sep-03	sep-04	sep-05	sep-06	sep-07	jul-08
1	0.8417	0.8374	0.8138	0.7929	0.7291	0.6804	0.6429	0.6074	0.5836	0.5611	0.5328	0.5211	0.5211	0.511	0.514
2	0.9839	0.9772	0.9516	0.9307	0.8689	0.8201	0.7818	0.7451	0.7212	0.6979	0.6696	0.6577	0.6576	0.6468	0.648
8	1.1979	1.1975	1.1873	1.1789	1.152	1.1292	1.1109	1.0926	1.077	1.0622	1.0487	1.0246	1.0067	0.9884	0.982
9	0.9469	0.9477	0.939	0.9341	0.915	0.8996	0.8862	0.8724	0.8605	0.8475	0.8376	0.8127	0.7907	0.7684	0.76
10	1.0562	1.0561	1.0507	1.0443	1.0363	1.0334	1.0248	1.0167	1.0103	1.0087	1.0032	0.999	1.0024	0.9931	0.996
11	1.4069	1.4053	1.3982	1.3927	1.3794	1.3737	1.3634	1.3531	1.3452	1.3407	1.3362	1.3291	1.3314	1.321	1.323
12	1.4325	1.4302	1.4216	1.4177	1.4043	1.3993	1.3915	1.3801	1.3737	1.3675	1.3648	1.3579	1.3579	1.3509	1.354
13	1.3487	1.3464	1.3388	1.3341	1.3227	1.3199	1.3116	1.3021	1.2956	1.2906	1.2892	1.2796	1.2812	1.2747	1.277
14	2.2196	2.2172	2.2071	2.1995	2.1839	2.1725	2.1616	2.1486	2.1405	2.1332	2.123	2.1145	2.1176	2.1077	2.11
15	2.0928	2.0928	2.0835	2.0753	2.0569	2.0402	2.029	2.012	2.0028	1.9959	1.9846	1.974	1.9769	1.9677	1.97
16	0.6696	0.6674	0.6527	0.6419	0.6077	0.581	0.5568	0.533	0.5168	0.5042	0.4848	0.4738	0.47	0.4574	0.457
20	-0.9473	-0.947	-0.9513	-0.9554	-0.9627	-0.9651	-0.9698	-0.9771	-0.9831	-0.9845	-0.9856	-0.9938	-0.99	-0.9959	-0.994
21	0.8492	0.8484	0.8381	0.8323	0.8159	0.8043	0.7945	0.7804	0.7689	0.7623	0.7547	0.7437	0.7448	0.7379	0.74
23	0.0931	0.0934	0.0845	0.0765	0.0553	0.0386	0.0252	0.0072	-0.0042	-0.0167	-0.0275	-0.0383	-0.0382	-0.0465	-0.046
24	-0.529	-0.53	-0.5461	-0.5633	-0.6068	-0.6435	-0.6715	-0.7022	-0.7224	-0.7372	-0.7603	-0.7719	-0.7712	-0.7802	-0.781
27			0.4623	0.4424	0.3867	0.3386	0.3006	0.265	0.2419	0.2207	0.1943	0.1794	0.1741	0.1629	0.162
28			0.629	0.6068	0.5482	0.4982	0.4569	0.4218	0.3966	0.3761	0.3486	0.3347	0.333	0.3237	0.322
29			0.835	0.8331	0.8284	0.8257	0.8209	0.8138	0.8115	0.8099	0.8056	0.8015	0.8049	0.7982	0.801
30			1.4688	1.4638	1.4531	1.4442	1.4376	1.4275	1.4224	1.4163	1.4113	1.4042	1.408	1.3978	1.401
32			-0.0271	-0.0315	-0.0377	-0.0344	-0.0384	-0.0421	-0.0488	-0.0501	-0.0482	-0.0539	-0.052	-0.0588	-0.056
33			-0.3957	-0.4166	-0.4708	-0.5156	-0.5519	-0.5856	-0.6097	-0.628	-0.6548	-0.6661	-0.6651	-0.6746	-0.675
35			-0.208	-0.2263	-0.2747	-0.315	-0.346	-0.3783	-0.4007	-0.4169	-0.4424	-0.4532	-0.4526	-0.462	-0.462
36			0.2161	0.1954	0.1371	0.0898	0.0514	0.0164	-0.006	-0.0282	-0.0547	-0.0662	-0.0656	-0.0765	-0.073
39			1.2464	1.2259	1.1644	1.1147	1.0759	1.0386	1.0144	0.9919	0.9636	0.9511	0.9504	0.9403	0.941
49				-0.7568	-0.756	-0.7551	-0.752	-0.7543	-0.7577	-0.7588	-0.7531	-0.76	-0.7639	-0.7774	
50				0.7708	0.7689	0.7703	0.7733	0.7707	0.7669	0.7646	0.7705	0.7586	0.7477	0.7292	0.723
51				-0.7133	-0.7157	-0.7147	-0.7126	-0.7163	-0.7197	-0.7228	-0.7177	-0.7358	-0.7546	-0.7762	-0.783

52				1.0044	0.9984	0.9979	0.997	0.9912	0.9852	0.9817	0.9825	0.9625	0.9432	0.9199	0.912
53				-0.0753	-0.0816	-0.0821	-0.0842	-0.089	-0.0948	-0.0991	-0.0997	-0.1254	-0.1521	-0.1799	-0.19
55				-0.5594	-0.5589	-0.5591	-0.5601	-0.5644	-0.5668	-0.5686	-0.5672	-0.5672	-0.5818	-0.5943	-0.598
56				1.1997	1.1773	1.1602	1.143	1.1269	1.1138	1.1046	1.0912	1.0823	1.0819	1.0712	1.072
62					1.6197	1.6003	1.5819	1.5576	1.5447	1.5394	1.5201	1.5097	1.5099	1.502	1.499
63					1.2245	1.176	1.1373	1.1012	1.0767	1.0551	1.0275	1.016	1.0156	1.0062	1.007
66								0.6043	0.6013	0.5977	0.605	0.595	0.5888	0.5743	0.567
67								0.8801	0.8774	0.8745	0.878	0.8647	0.8509	0.8328	0.827
68								0.6158	0.6138	0.6078	0.6132	0.5992	0.585	0.5657	0.561
69								0.8424	0.8198	0.8018	0.7762	0.7608	0.7546	0.7407	0.739
70								-0.5005	-0.5166	-0.5323	-0.5508	-0.5683	-0.5775	-0.5945	-0.599
71								0.6273	0.6193	0.6101	0.6064	0.5784	0.5511	0.5243	0.513
72								-0.0507	-0.0578	-0.0623	-0.0623	-0.087	-0.1135	-0.1408	-0.15
73								0.5798	0.576	0.5724	0.573	0.5527	0.5315	0.5079	0.501
74								-0.1544	-0.1593	-0.1627	-0.1586	-0.1765	-0.1957	-0.2176	-0.226
78										-0.5215	-0.5384	-0.555	-0.5622	-0.5774	-0.581

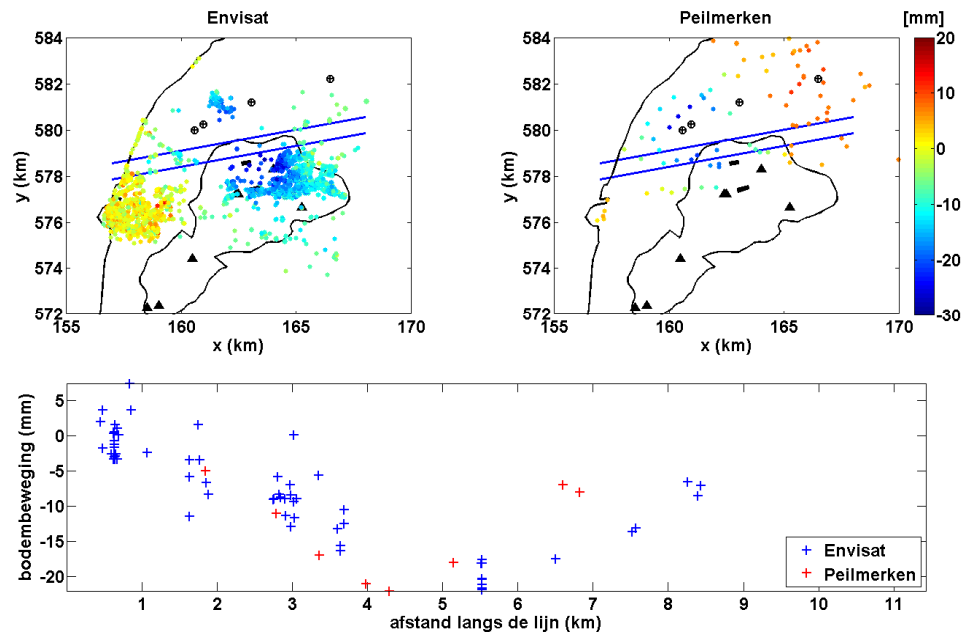
B Ruimtelijke consistentie PSI en peilmerkdata in 2004 en 2005

Figuur B-1 tot Figuur B-4 laten de doorsneden zien van de Envisat data en de peilmerkdata van 2003 tot 2004. Figuur B-5 tot Figuur B-8 laten de doorsneden zien van de Envisat data en de peilmerkdata tussen 2003 en 2005. In de vergelijking van 2003-2004 en 2003-2005 is het aantal peilmerkpunten beperkt tot het noorden van het studiegebied. Hierdoor kan de asymmetrie van de bodemdalingkom bij Franeker (Figuur B-2, Figuur B-4 voor 2003 tot 2004 en Figuur B-6, Figuur B-8 voor 2003-2005) niet worden geobserveerd in de peilmerkdata.

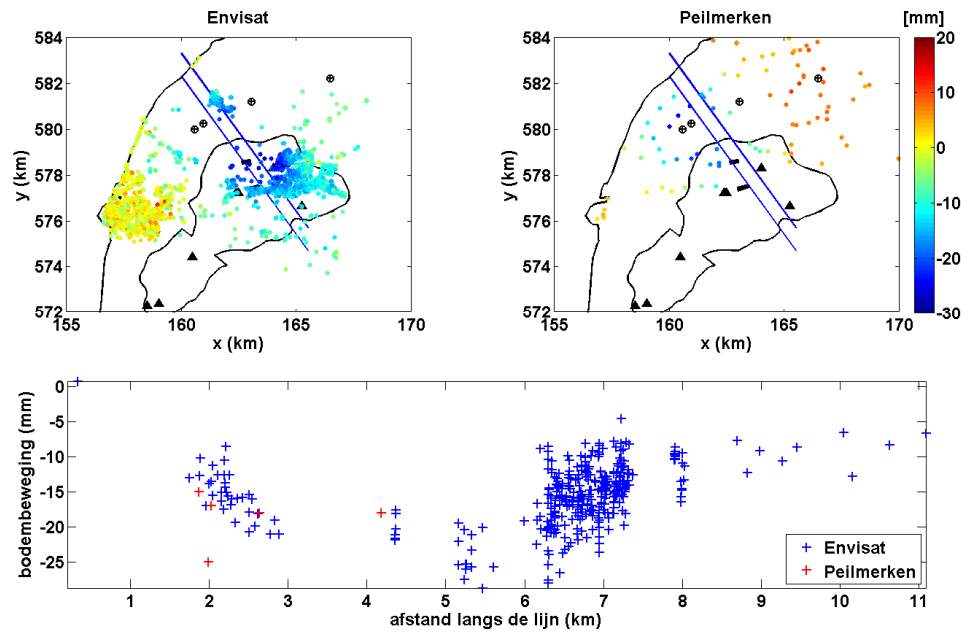
Figuur B-1 en Figuur B-5 laten een doorsnede door het gasveld van Harlingen tot Franeker zien. In Figuur B-1 laat de peilmerkdata een lichte onderschatting zien van de bodemdaling in het westen. Het verschil met de Envisat data is echter zeer klein en valt binnen de onzekerheid van de metingen. In het oosten laten twee peilmerkpunten een groot verschil zien met de Envisat data. Figuur B-5 laat een sterkere onderschatting zien in het westen terwijl de twee peilmerkpunten in het oosten nu overeenkomen met de Envisat data. De onderschatting van de Envisat data in het westen die hier wordt waargenomen voor de periodes 2003-2004 en 2003-2005 is echter verdwenen in de vergelijking voor de periode 2003-2006.

Figuur B-2 en Figuur B-3 laten doorsneden door Sexbierum zien voor de periode 2003-2004. Ze laten een goede overeenkomst zien tussen de Envisat data en de peilmerkdata. Het peilmerkpunt op 2 km afstand in Figuur B-2, dat een grote daling laat zien (25 mm) die niet overeenkomt met de Envisat data, ligt veel dichterbij de BAS-1 en BAS-2 zoutcavernes dan de Envisat data. Het peilmerkpunt in Figuur B-3 op ongeveer 6 km afstand ligt aan de rand van het gebied dat meegenomen is in de doorsnede.

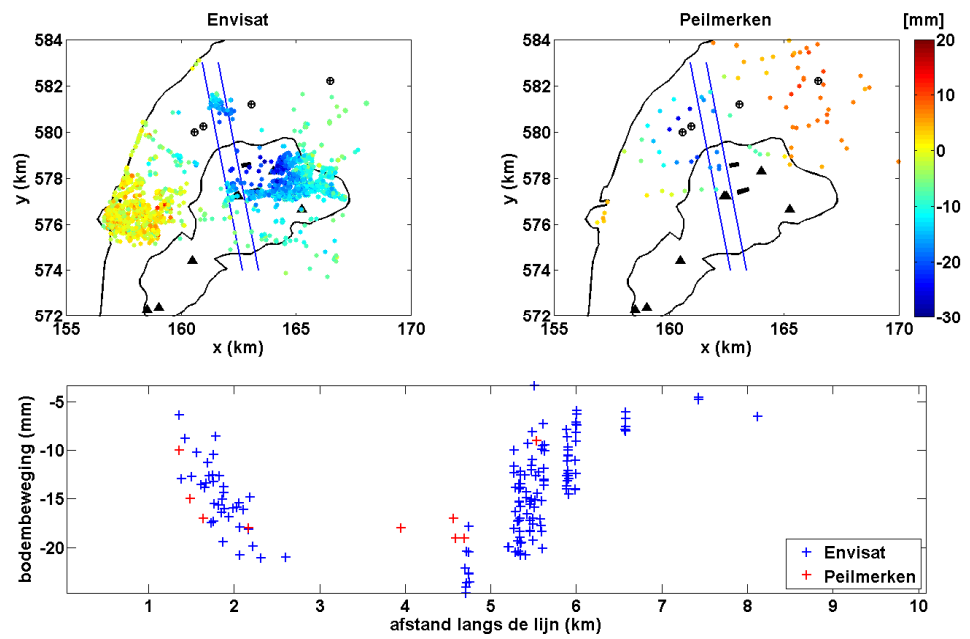
Figuur B-6 en Figuur B-7 laten dezelfde doorsneden door Sexbierum zien voor de periode 2003-2005. Bij Sexbierum laten beide doorsneden een onderschatting van de Envisat data met de peilmerkdata zien. Deze onderschatting is niet aanwezig in de 2003-2006 periode. De onderschatting van de Envisat data in deze twee doorsneden en die in Figuur B-5 in het westen is gedeeltelijk te verklaren doordat de Envisat punten het verschil over 22 maanden geven en de peilmerkpunten het verschil over 24 maanden. Dit geeft een onderschatting van de Envisat data van 2-4 mm.



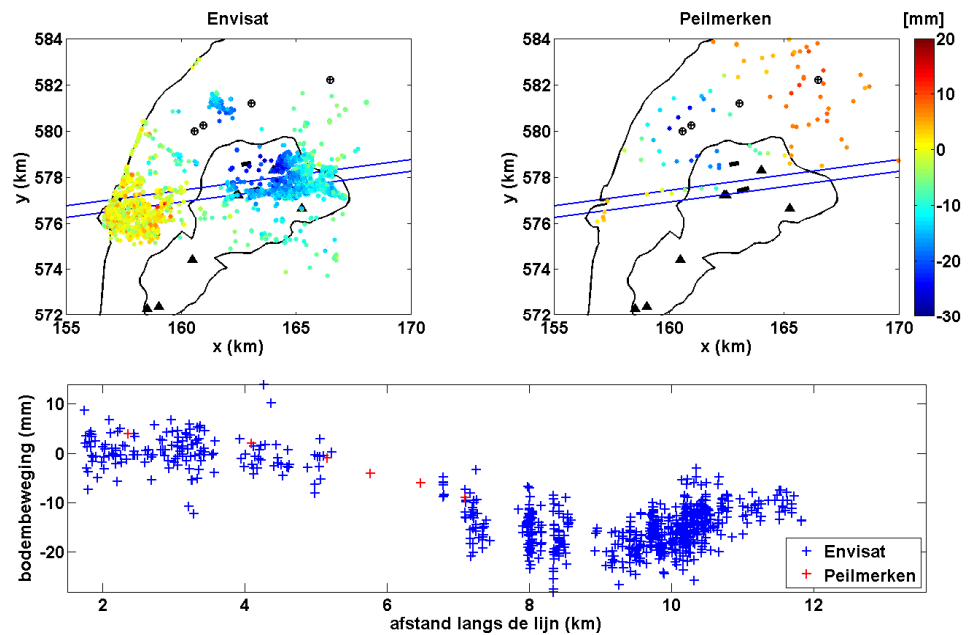
Figuur B-1: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2004, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



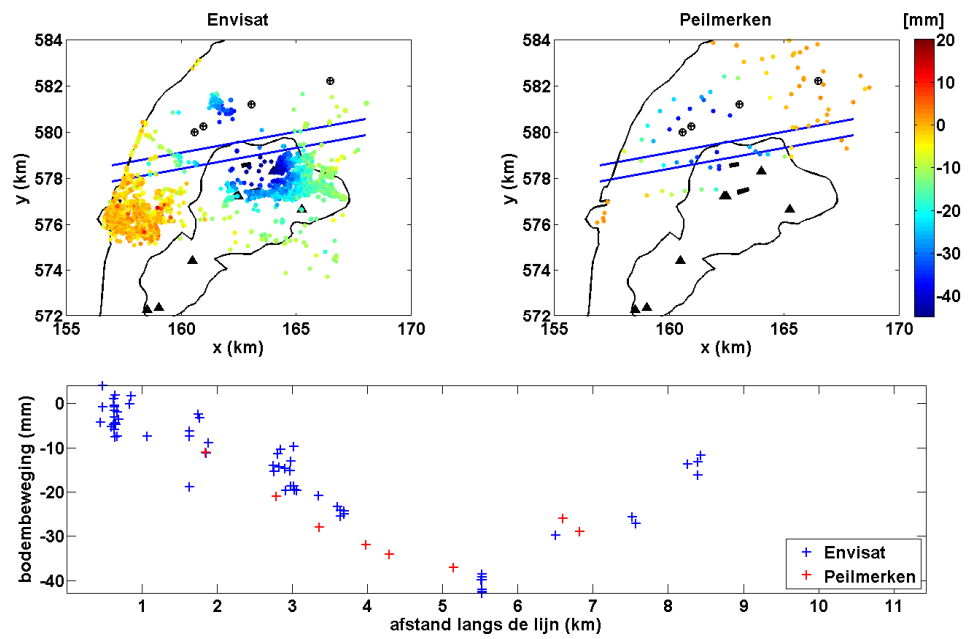
Figuur B-2: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2004, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen.



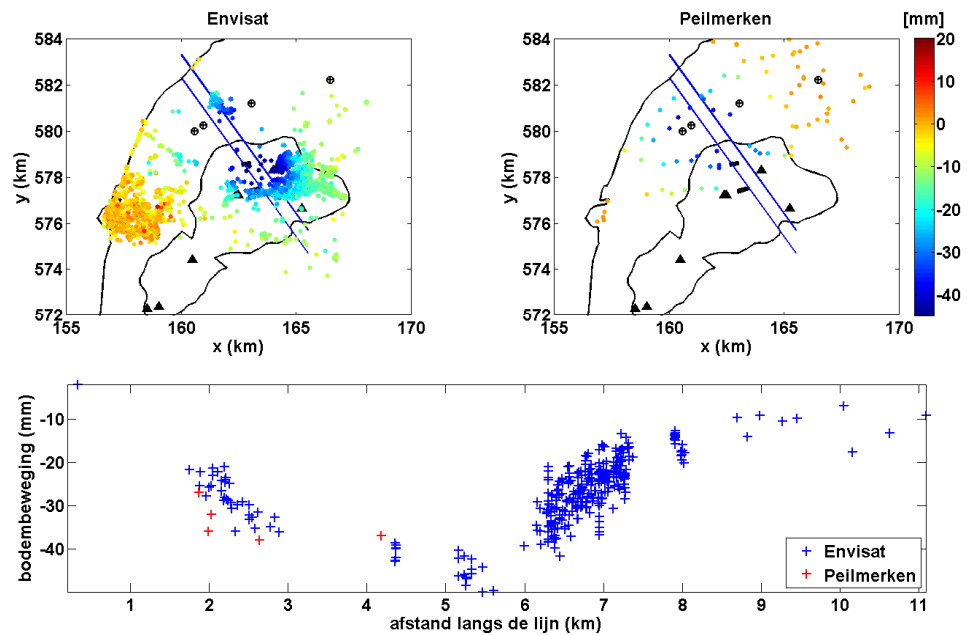
Figuur B-3: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2004, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



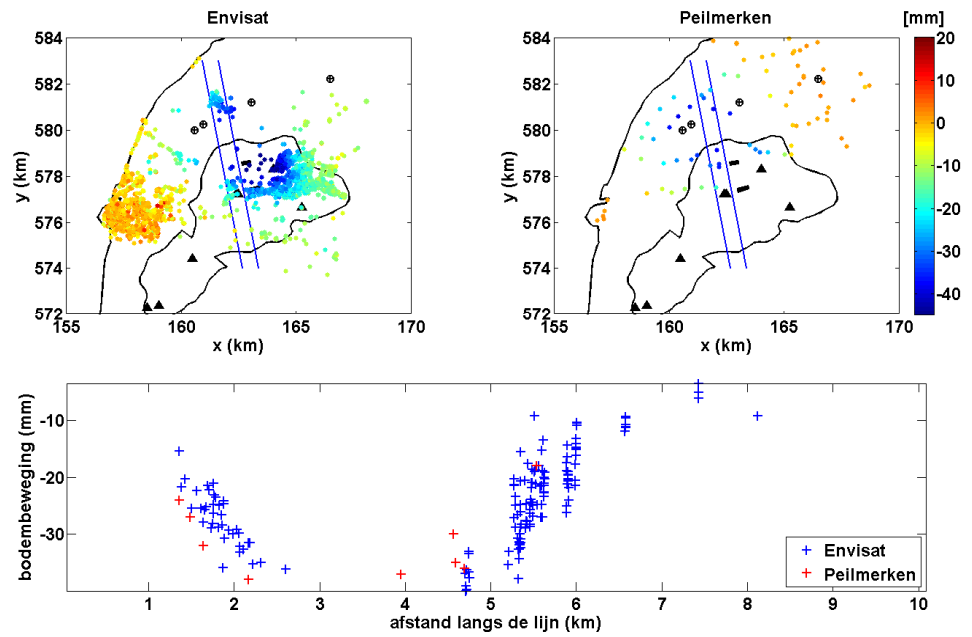
Figuur B-4: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2004, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen.



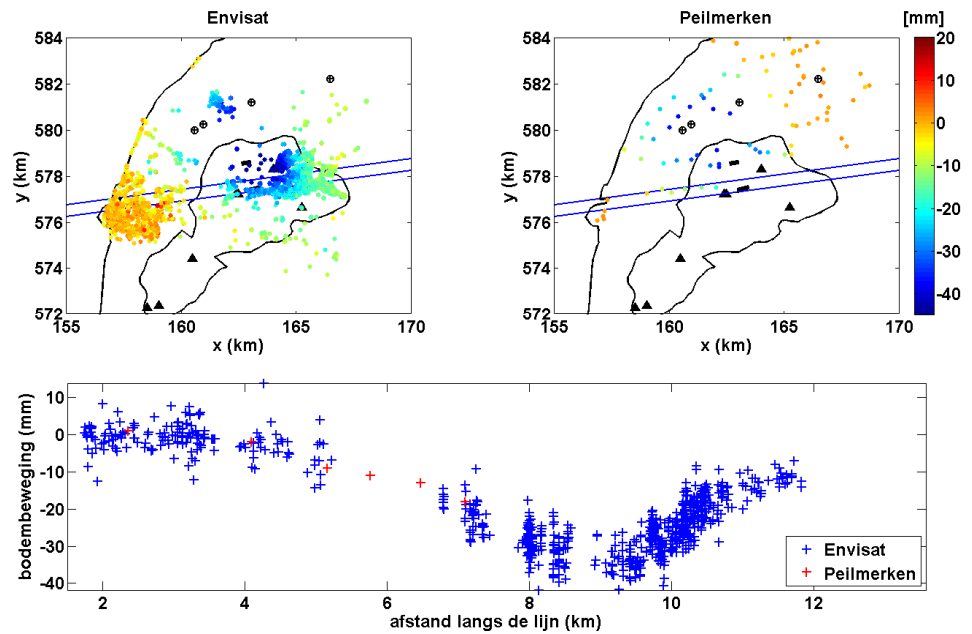
Figuur B-5: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2005, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.



Figuur B-6: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2005, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 500 m worden meegenomen.



Figuur B-7: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2005, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen.

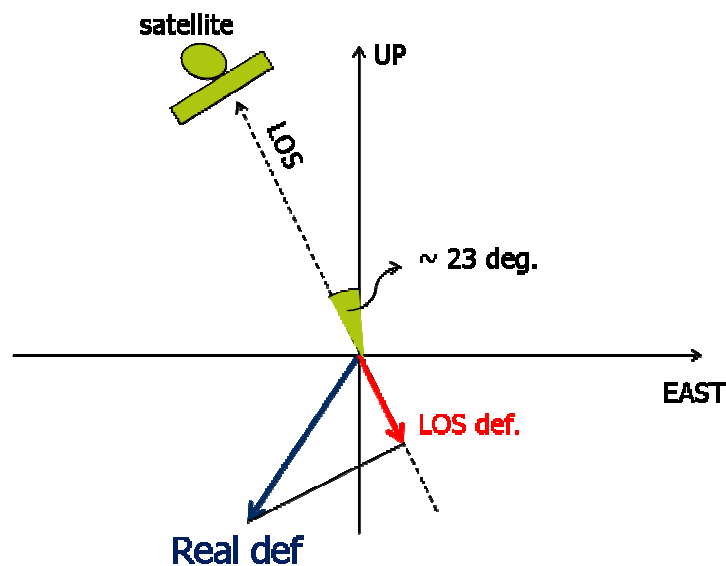


Figuur B-8: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2005, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 250 m worden meegenomen.

C Invloed horizontale beweging op de bodemdalings-schatting

Deformatie van de bodem kan worden beschreven met een deformatievector in drie dimensies, met orthogonale componenten in de oostelijke, noordelijke en verticale richting. Met de interferometrische radar methodiek is het slechts mogelijk om de projectie van deze 3D vector op een vector in de richting van de satelliet te schatten. Dat betekent dat de beweging in de andere richtingen onbepaald is. Deze gevoeligheid is vergelijkbaar met die van waterpassing, waarbij ook slechts één component van de beweging kan worden geschat: de verticale beweging. De nulruimte van de waterpassing wordt opgespannen door de twee horizontale eenheidsvectoren in oostelijke en noordelijke richting.

Het verschil tussen beide technieken is echter dat (i) door de scheve kijkrichting van de radar deze zowel voor een horizontale als een verticale deformatiecomponent gevoelig is, en (ii) dat in het geval van deze studie het voornamelijk de verticale component is die van belang geacht wordt. Gevolg hiervan is dat met één waarneming en drie onbekenden het probleem onderbepaald is, en deze onbekenden dus niet uniek kunnen worden geschat, zie Figuur C-1.



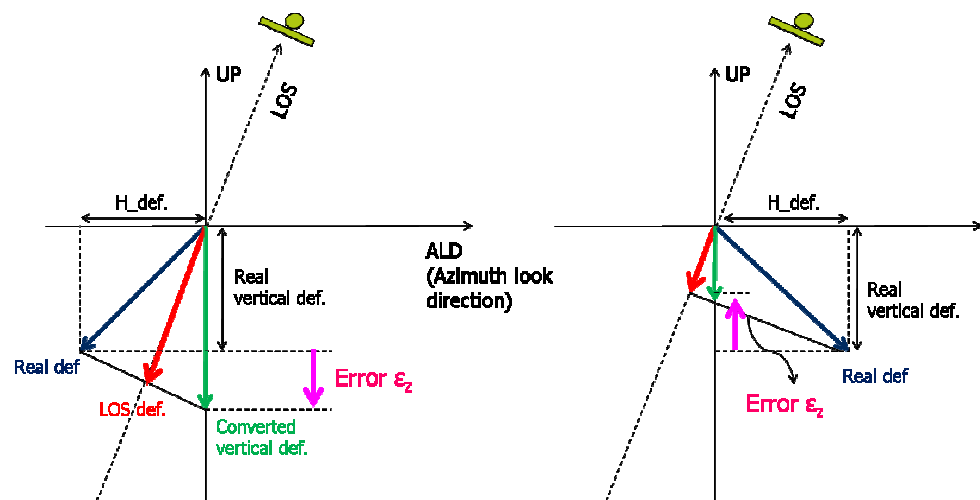
Figuur C-1: Projectie van een deformatievector (Real def) met een component in oostelijke en verticale component op de kijkrichting van de satelliet (line-of-sight; LOS).

De optimale oplossing van dit probleem is het combineren van onafhankelijke tijdseries radarwaarnemingen, ieder opgenomen vanuit een andere geometrie (vanuit de zogenaamde klimmende en dalende satellietbanen). Op deze manier kan de ontbinding van de vector plaatsvinden. Doordat satellietbanen sterk noord-zuid georiënteerd zijn, is het in de praktijk zo dat door combinatie van klimmende en dalende banen vooral de verticale en de oostelijke component schatbaar zijn, terwijl de gevoeligheid voor de noordelijke component van de deformatievector zeer beperkt is.

Doordat de kijkhoek van de satelliet zeer stijl is (ongeveer 23 graden ten opzichte van de verticaal, zie Figuur C-1), is in deze studie initieel aangenomen dat de horizontale

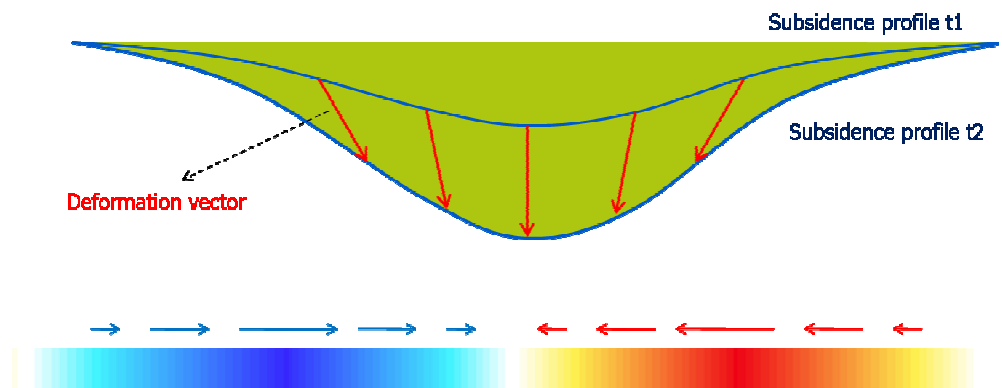
component van de deformatie verwaarloosbaar is. Op deze wijze kan de deformatie in de kijkrichting direct worden ontbonden op de verticaal.

Indien er nu verschillen waargenomen worden tussen de radar- en de waterpassingsmetingen dient te worden nagegaan of deze aanname van puur verticale deformatie houdbaar is. Immers, indien er wel sprake zou zijn van een additionele horizontale component, dan zal dit een invloed hebben op de geschatte verticale beweging. Deze invloed is nul wanneer de horizontale beweging parallel aan de vliegrichting van de satelliet plaatsvindt, en maximaal wanneer deze daar loodrecht op staat. De maximale absolute fout door het verwaarlozen van een horizontale deformatie van ζ millimeter is $\zeta \tan(i) \sin(\alpha-h)$, waarbij i de lokale kijkrichting van de satelliet is, ongeveer 23 graden voor de gebruikte ERS en Envisat beelden, α de azimut hoek van de horizontale deformatievector, en h de lokale heading van de satellietbaan. Praktisch betekent dit dat de maximale absolute fout in de verticale deformatie circa 40% van de horizontale verplaatsing kan zijn. Figuur C-2 toont de invloed van abusievelijk niet meegenomen horizontale beweging op de bodemdalingschatting. Hieruit blijkt dat een bodemdaling zal worden overschat wanneer de horizontale deformatiecomponent van de satelliet af gericht is, en zal worden onderschat wanneer de horizontale deformatiecomponent richting de satelliet wijst.



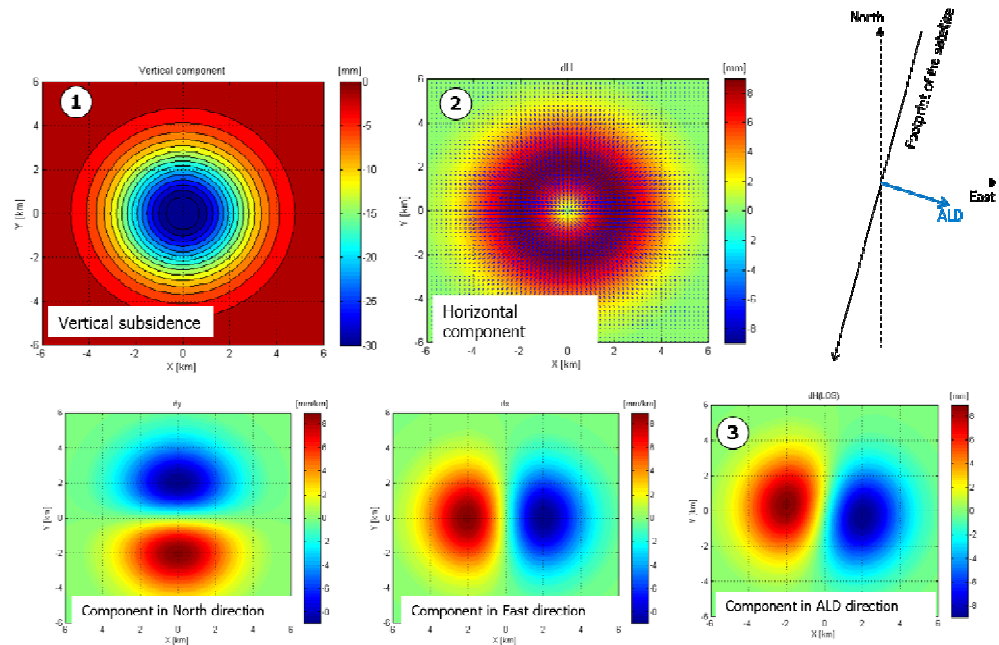
Figuur C-2: Invloed van een niet-meegenomen horizontale bewegingscomponent op de schatting van de bodemdaling. Links een deformatie met een horizontale component in het verlengde van de kijkrichting ('van de satelliet af'). De werkelijke (blauwe) vector wordt geprojecteerd op de kijkrichting (rode LOS vector). Abusievelijk aangenomen dat er geen horizontale bewegingscomponent is wordt de LOS vector op de verticaal afgebeeld (groene component). In vergelijking met de werkelijke verticale bewegingscomponent leidt dit dus tot een overschatting van de bodemdaling. Rechts; deformatie met een horizontale component in de richting van de satelliet ('naar de satelliet toe'). De werkelijke (blauwe) vector wordt geprojecteerd op de kijkrichting (rode LOS vector). Abusievelijk aangenomen dat er geen horizontale bewegingscomponent is wordt de LOS vector op de verticaal afgebeeld (groene component). In vergelijking met de werkelijke verticale bewegingscomponent leidt dit dus tot een onderschatting van de bodemdaling.

Om de relevantie van de horizontale component op de bodemdalingschatting te bepalen dient de horizontale component bekend te zijn, zowel qua grootte als qua locatie ten opzichte van de bodemdalingkom. Aangezien dit meestal niet het geval is, dienen aannames te worden gedaan.



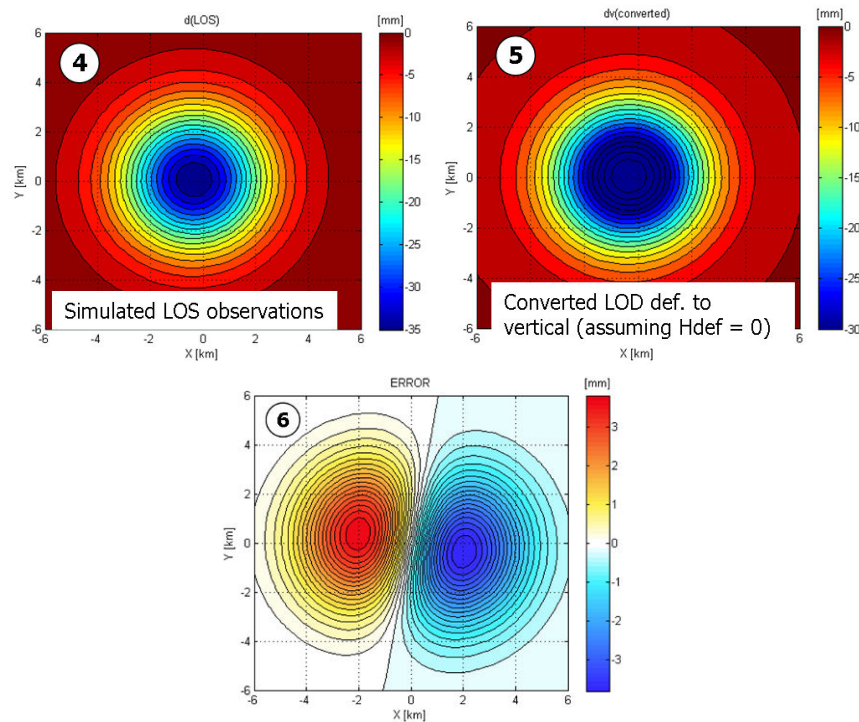
Figuur C-3: Model van een bodemdalingkom, met voortschrijdende bodemdaling tussen tijdstip t1 en t2. Hieruit is duidelijk dat de horizontale bewegingscomponent nul is op het diepste punt van de kom en bij de randen van de kom, en dat deze maximaal is halverwege de kom.

Onder de aanname van een ideale bodemdalingkom zoals in Figuur C-3 wordt de maximale centripetaal gerichte horizontale deformatie verwacht op de locatie waar de kromming van de bodemdalingkom het grootst is, ongeveer halverwege de kom. Dit is de locatie waar de hellingshoek het steilst is. Deze situatie is onderzocht door een bodemdalingkom te simuleren, zie Figuur C-4. In subfiguur (1) is de verticale deformatie getoond, waarbij de dichtheid van de isolijnen aangeeft hoe gekromd het oppervlak is. Dit betekent dat de maximale horizontale component op deze locatie is, zie subfiguur (2), waarbij de richting van de horizontale component met vectoren is aangegeven, en de magnitude met de kleur. Subfiguur (3) toont de horizontale component in de richting van de satelliet, de *azimuth look direction* (ALD) in de schets rechtsboven.



Figuur C-4: Model van een bodemdalingkom in bovenaanzicht. (1) verticale component. (2) horizontale component met magnitude (kleur) en richting (vectoren). (3) waargenomen horizontale component in de kijkrichting van de satelliet.

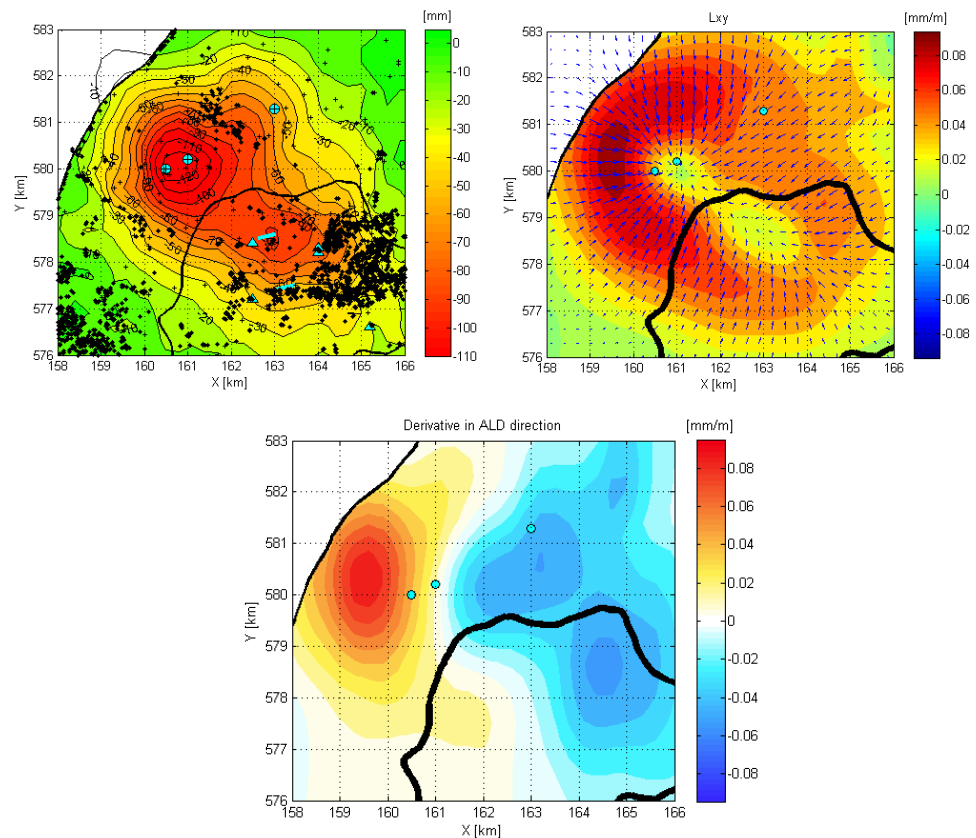
Vervolgens wordt de totale deformatie geprojecteerd op de kijkrichting van de satelliet, zie Figuur C-5, subfiguur (4). In subfiguur (5) wordt het waargenomen LOS signaal abusievelijk alleen aan verticale deformatie toegeschreven, en in subfiguur (6) wordt getoond welke fout hierbij gemaakt zou worden. Deze fout is qua vorm dubbel-niervormig, en heeft voor deze dalende satellietbaan een overschatting aan de oostkant en een onderschatting aan de westkant van de bodemdalingkom tot gevolg. De magnitude van de fout wordt in dit geval direct bepaald door de magnitude van de gesimuleerde horizontale component. In de praktijk kennen we deze magnitude nog niet, en is dus slechts een uitspraak te doen over de vorm van het foutsignaal.



Figuur C-5: Projectie van de bodemdaling (verticale) en de horizontale componenten in de kijkrichting van de satelliet (4). Dit is het signaal zoals het waargenomen zou worden door de satelliet. Subfiguur (5) toont het geschatte verticale signaal onder de abusievelijke aanname dat er geen horizontale deformatie zou zijn. In subfiguur (6) wordt vervolgens getoond welke fout hierbij gemaakt zou worden in de schatting van de verticale beweging.

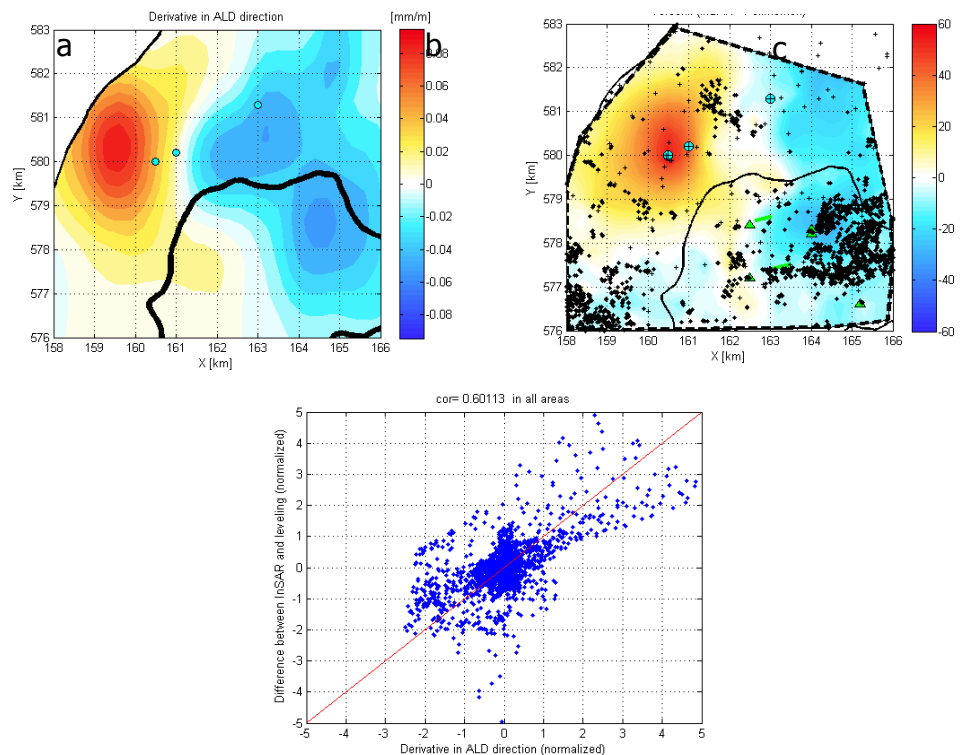
Onder de aanname van Kratzsch (1983) wordt gesteld dat de horizontale deformatie afhangt van de tilt (eerste ruimtelijke afgeleide) van het terrein. Hieruit volgt dat de verwachte horizontale component in het centrum van de kom en buiten de invloedssfeer nul zal zijn. De maximale horizontale deformatie treedt op daar waar de eerste afgeleide maximaal is.

Ook al wordt dus waarschijnlijk een kleine fout gemaakt in de geschatte verticale deformatie, deze kan beschouwd worden als een initiële schatting. Hierdoor is dus ook een initiële schatting van de gradiëntvector beschikbaar, zowel qua relatieve magnitude als qua richting. Uit deze gradiënt, in combinatie met de satellietgeometrie kan dus worden geschat hoe de horizontale deformatie verdeeld zal zijn. Deze schatting wordt getoond in Figuur C-6.



Figuur C-6: Links: het uit InSAR en waterpassingen geïnterpoleerde deformatiesignaal, waarbij bij InSAR de aanname van puur verticale deformatie is gedaan. Rechts: eerste afgeleide van het linkerbeeld, zowel qua magnitude (kleur) als richting (vector). Onder; projectie van de horizontale component in de azimuth look direction, (de horizontale projectie van de kijkrichting van de satelliet).

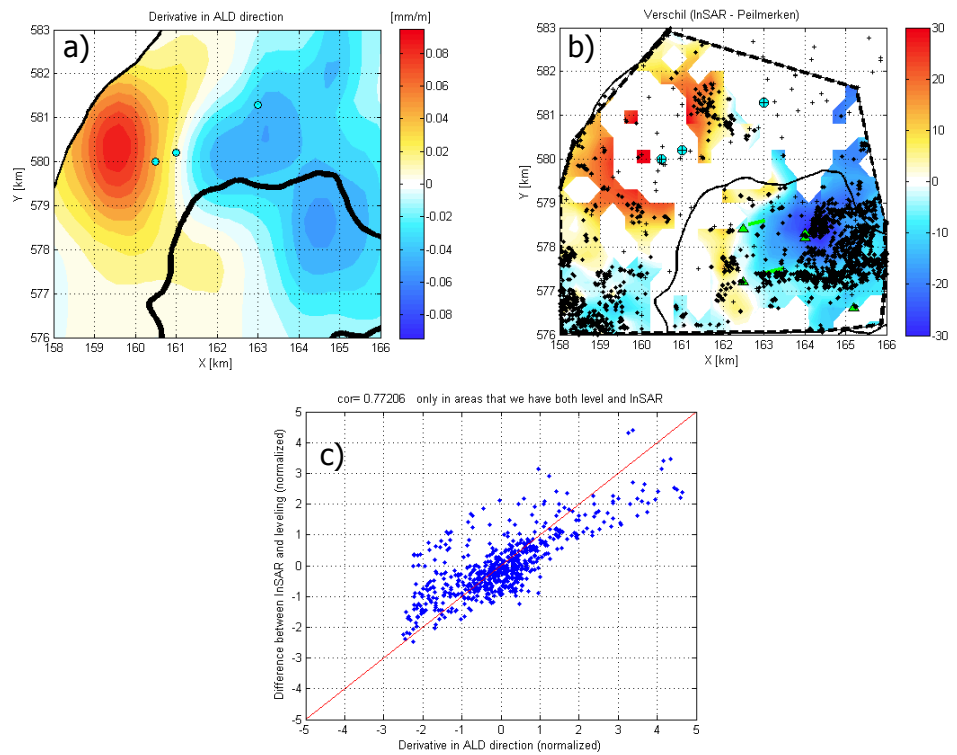
Het is van belang te onderstrepen dat hiermee slechts de vorm en de locatie, en niet de absolute grootte van de horizontale deformatie wordt geschat. Deze vorm is nu echter wel te vergelijken met de vorm van het verschilsignaal tussen de waterpassingen en InSAR. Indien de vorm en locatie van het horizontale signaal een grote mate van overeenkomst zou tonen met het verschilsignaal tussen waterpassing en InSAR, dient verder onderzocht te worden in hoeverre horizontale deformatie hiervan de oorzaak kan zijn. Deze vergelijking wordt getoond in Figuur C-7. In a) en b) worden respectievelijk de verwachte horizontale component (vorm en locatie), en het geïnterpoleerde verschilsignaal tussen InSAR en waterpassing getoond. De beide signalen hebben een opmerkelijke mate van overeenkomst in vorm en locatie, waaruit het vermoeden ontstaat dat het niet-meeschatten van de horizontale deformatie een mogelijke oorzaak kan zijn van de verschillen tussen beide technieken. Om dit verschil iets kwantitatiever te maken wordt in Figuur C-7c een scatterplot tussen beide technieken getoond, waaruit een correlatiecoëfficiënt van 0.6 volgt.



Figuur C-7: a) De invloed van een mogelijke horizontale deformatiecomponent op de InSAR bodemdalingsschatting, zie Figuur C-6 (rechts). b) Het verschil signaal tussen InSAR (stippen) en waterpassing (kruisen). c) Scatterplot van beide signalen, met een correlatiecoëfficiënt van 0.60.

Vermoed kan worden dat de interpolatie van de beide slecht bemonsterde signalen een rol zou kunnen spelen in de verschillen. Om deze reden is bovenstaande analyse nogmaals herhaald, waarbij slechts locaties waarbij zich zowel radar- als waterpassingspunten in elkaars nabijheid bevonden, zie Figuur C-8. Door deze extra vergelijking wordt de correlatie tussen beide signalen nog sterker, met een correlatiecoëfficiënt van 0.77.

De conclusie van deze korte analyse is dat de verschillen die in deze studie zijn gevonden tussen resultaten van waterpassing en radar deels kunnen worden verklaard uit de aanname dat de radar slechts verticale deformatie waarneemt. Deze aanname zou abusievelijk kunnen zijn. Aanbevolen wordt hier bij de geofysisch/geotechnische interpretatie van de signalen rekening mee te houden en onderzoek te doen naar (i) de fysieke waarschijnlijkheid en geomechanische oorzaken van horizontale deformatie, (ii) de hiervoor benodigde geofysische constanten en hun waarde in de regio Noordwest Friesland, en (iii) de geometrische ontbinding van horizontale en verticale deformatie uit de zogenaamde cross-heading en naburige satellietbanen.



Figuur C-8: a) De invloed van een mogelijke horizontale deformatiecomponent op de InSAR bodemdalingsschatting, zie Figuur C-6 (rechts). b) Het verschil signaal tussen InSAR (stippen) en waterpassing (kruisen), alleen getoond rond die locaties waar zich zowel InSAR- als waterpaspunten bevinden. Hierdoor wordt de invloed van interpolatiefouten sterk verminderd. c) Scatterplot van beide signalen, met een correlatiecoëfficiënt van 0.77.

D Veel gestelde vragen over radar interferometrie

Vergeleken met de traditionele geodetische methoden om bodembeweging vast te stellen, zoals waterpassing en tachymetrie, lijken de methoden met satellietradar vrij exotisch. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat de metingen slecht ‘tastbaar’ te maken zijn, aangezien er meestal geen fysiek aanwijsbare meetpunten te zien zijn in het veld. Dit in tegenstelling tot b.v. waterpassing, tachymetrie, of GNSS metingen, die gebruik maken van fysieke peilmerken: meetbouts in infrastructuur, ondergrondse peilmerken, meetspijkers, etc.

Indien belangrijke beslissingen gebaseerd worden op de uitkomsten van dit soort nieuwe technieken is het daarom van belang er voldoende vertrouwen in te hebben. De gebruikte radartechnologie, de verwerkings- schattings- en toetsingsprocedures, de fysieke eigenschappen van de reflectie en propagatie van elektromagnetische golven zijn te diepgaand om zowel beknopt als bevredigend te behandelen. Hiervoor wordt verwezen naar een serie publicaties van de Delftse onderzoeksgroep (Hanssen, 2001; Kampes, 2005; Ketelaar, 2008).

Om deze reden is hier gekozen voor een bespreking van een aantal veel gestelde vragen. In deze korte uiteenzetting wordt achtereenvolgens in eenvoudige bewoordingen uitgelegd wat de kern van de satellietradarmethoden is, welke begrippen hierin van belang zijn, en hoe de data dienen te worden geïnterpreteerd. Ook zullen begrippen zoals precisie en betrouwbaarheid in deze context kort worden besproken. Doordat bondigheid en een sterke focus op de relevante kernbegrippen belangrijk zijn, zal deze uiteenzetting nooit voor ieder bevredigend zijn. In die gevallen wordt verwezen naar bovengenoemde literatuur met daarin een groot aantal verwijzingen naar internationale literatuur. Een aantal meest gestelde vragen zijn de volgende.

1. Hoe verschilt radar van conventionele satellietfoto's?
2. Een radar van een schip of vliegveld is bekend. Hoe worden die hoge resolutieafbeeldingen gemaakt?
3. Wat zijn scatterers?
4. In hoeverre verschilt InSAR van de traditionele geodetische technieken?
5. Wat wordt bedoeld met de (fase)meerduidigheden in de InSAR metingen?
6. Hoe moeten de opmerkingen mbt de kijkrichting van de satelliet worden geïnterpreteerd?
7. Wat wordt bedoeld met de hypothesetoetsing en waarom is dat nodig?
8. Wanneer wordt de nulhypothese verworpen? (temporeel gedrag, ruimtelijke distributie[arclength], manueel verwerpen)
9. De metingen zijn 'relatief'. Wat betekent dan een deformatiesnelheid van 0 mm/jaar in de producten?
10. Hoe wordt het referentiepunt gekozen, en wat is de fysieke interpretatie daarvan?
11. Kunnen de metingen 'absoluut' gemaakt worden, om ze aan NAP te linken?
12. De gedetecteerde meetpunten zijn meestal afkomstig van 'harde objecten' zoals gebouwen, masten of andere infrastructuur. Ook deze gebouwen kunnen veranderen, dus hoe betrouwbaar zijn die meetpunten eigenlijk?
13. Soms wordt er gesproken over verzakking, soms over verplaatsing in de kijkrichting van de satelliet. Wat is juist?
14. Hoe is het mogelijk dat vanaf 800 km hoogte zo'n precisie wordt gehaald (millimeters per jaar)?

15. Welke horizontale resolutie heeft de sensor?
16. Gesteld wordt dat je met deze satelliettechniek terug in de tijd kunt kijken. Geldt dat overal, en tot hoever terug kan worden gekeken?
17. Klopt het dat de techniek niet werkt wanneer de deformatie te groot is?

1. Hoe verschilt radar van conventionele satellietfoto's?

Luchtfoto's, zoals bijvoorbeeld getoond in Google Earth, zijn algemeen bekend en geaccepteerd. In feite worden deze beelden gevormd door weerkaatst zonlicht dat wordt opgevangen door een sensor, de camera. Radarbeelden verschillen hiervan doordat ze worden waargenomen met een veel langere golflengte, waardoor deze ongehinderd door bewolking heen kan. Verder neemt de radar geen weerkaatst zonlicht waar, maar fungeert deze zelf als bron van de straling door pulsen uit te zenden, die op het aardoppervlak weerkaatsen. Tot slot meet de radar de tijdsduur tussen zenden en ontvangen van de puls, waardoor deze afstand meet. Luchtfoto's kunnen geen afstand bepalen en zijn gevoelig voor richtingen, onder invloed van de lens. Dit is het kernpunt waardoor radarbeelden informatie kunnen leveren over afstanden of afstandsveranderingen (deformaties), terwijl optische instrumenten dat niet kunnen.

2. Een radar aan boord van een schip is bekend. Dit levert geen mooie beelden. Hoe worden die hoge resolutieafbeeldingen gemaakt?

Inderdaad geeft een radarpuls eigenlijk een-dimensionale informatie. Immers, we sturen de puls weg en nemen vervolgens de reflecties als functie van de tijd waar. Indien een punt verder weg is van de radar zal de reflectie later arriveren. De stap naar een 2D plaatje wordt eenvoudigweg mogelijk doordat de satelliet beweegt in haar baan om de aarde. Alle civiele radarsatellieten bewegen grofweg in noord-zuid georiënteerde banen. Door de 1D reflectieprofielen voor opeenvolgende pulsen te combineren is het mogelijk om een 2D beeld te creëren. Dat beeld ziet er op het eerste gezicht uit als een soort zwart-wit foto. Het is echter een totaal ander principe, doordat afstanden in plaats van richtingen worden waargenomen.

3. Wat zijn scatterers?

Het begrip *scatterer* komt van *scattering*, het vermogen van een object of een samenstelling van objecten om onder invloed van een elektromagnetisch veld zelf een elektromagnetisch veld te veroorzaken. De meest toepasselijke maar niet gebruikelijke Nederlandse termen zijn 'verstrooier' en 'verstrooiing'. In de context van de radarinterferometrie is in feite elke resolutiecel een scatterer. De aard van de scattering is zeer afhankelijk van de eigenschappen van het terrein. Zo zal een zeer 'glad' terrein (glad relatief tot de radar golflengte) speculair reflecteren, waardoor er weinig tot geen signaal terugkomt bij de satelliet. Ander terrein is 'ruw' en verstrooit in alle richtingen. Voor de interferometrische toepassingen is het van belang dat de scatter-karakteristieken van een object of resolutiecel niet significant veranderen tussen opeenvolgende radaropnamen. We noemen dit type scatterers *coherent*. Wanneer een punt coherent blijft, zelfs tussen veel opeenvolgende radaropnamen, dan noemen we het *persistent*, vandaar de term *persistent scatterers*, afgekort tot PS.

4. In hoeverre verschilt InSAR van de traditionele geodetische technieken?

Alhoewel ook InSAR beschouwd kan worden als een geodetische techniek, zijn er een aantal verschillen met de conventionele geodetische technieken. Zo is de exacte locatie van het meetpunt niet bekend, we spreken vaak van het *effectieve scattering centrum*, waarvan we wel weten dat het punt gedurende opeenvolgende metingen hetzelfde blijft. Een ander verschil is dat traditionele geodetische netwerken worden ontworpen, waarbij het doel van de metingen van tevoren bekend is. Meetpunten worden dus daar

geïnstalleerd waar het nodig is, gegeven de a priori verwachtingen van de deformatie. Bij de radar wordt een toevalsnetwerk gebruikt, gevormd door de toevallig aanwezige coherente scatterers. Dit betekent dat afhankelijk van de locatie een bepaald fenomeen voldoende of onvoldoende wordt bemonsterd. Daar waar bij conventionele technieken het fysieke meetpunt kan worden bekeken en eventueel worden verworpen—bijvoorbeeld omdat men ziet dat het meetpunt verstoord is, of geen relatie heeft met de beweging die men wil observeren—voorafgaand aan de meting. Bij de radar dient deze evaluatie achteraf te geschieden, en moet uit de data worden beoordeeld of een punt relevant is of niet. Een ander belangrijk verschil is dat men bij de conventionele metingen een vermoeden van deformatie moet hebben op een bepaalde locatie. Zonder zo'n vermoeden zou het veel te kostbaar zijn om metingen uit te (laten) voeren. Bij de radar worden de metingen sowieso uitgevoerd (zolang beeldacquisities worden aangevraagd), waardoor het ook mogelijk is om deformatie op het spoor te komen op locaties waar dit niet verwacht werd. Andere verschillen zitten bijvoorbeeld in de kosten van de data, de complexiteit van de dataverwerking, de ontbinding van de deformatievector, en de mogelijkheid tot onafhankelijke validatie door gebruik te maken van verschillende opnamegeometrieën.

5. Wat wordt bedoeld met de (fase)meerduidigheden in de InSAR metingen?

De interferometrische metingen worden gevormd door faseverschillen te analyseren van scatterers op verschillende locaties en verschillende momenten in de tijd. Deze fase wordt gemeten als een reëel getal begrensd tussen de waarden $-\pi$ en π . Het meten van een groter fase verschil is niet mogelijk, omdat een hoek groter dan π zal worden afgebeeld (*gewrapped*) in het basisinterval tussen $-\pi$ en π . Hierdoor ontstaat een meerduidigheid in de data. Deze meerduidigheden in de fase data kunnen doorwerken in meerduidigheden in de geschatte hoogte en/of de geschatte verplaatsing van de scatterer. Het oplossen van de meerduidigheden kan slechts op een pragmatisch-heuristische manier, door gebruik te maken van verschillen tussen punten op korte afstand van elkaar (aangenomen dat het faseverschil daartussen klein zal zijn) of van verschillen tussen een punt waargenomen op verschillende tijdstippen (aangenomen dat het temporele faseverschil klein zal zijn). Indien geen punten gevonden kunnen worden op relatief korte afstand van elkaar, en/of punten die met korte tijdsintervallen zijn waargenomen, daalt de betrouwbaarheid van de meerduidighedenschattting. Merk op dat dit niet betekent dat de kwaliteit van de meting minder is. Het probleem is soms op te lossen door gebruik te maken van een overlappende radartijdserie (een locatie in Nederland wordt meestal vanuit vier onafhankelijke richtingen bemonsterd) of door bepaalde a priori kennis van het probleem mee te nemen in de schatting.

6. Hoe moeten de opmerkingen mbt de kijkrichting van de satelliet worden geïnterpreteerd?

De radar meet slechts veranderingen in één richting: de kijkrichting tussen de satellietradar en de betreffende resolutiecel op de grond. Een deformatievector die een andere richting op wijst zal worden geprojecteerd op de kijkrichting, waardoor een gedeelte van de deformatie niet schatbaar is. Door gebruik te maken van klimmende, dalende, en naastgelegen satellietbanen, in combinatie met bepaalde aannames afhankelijk van de casus, kan de deformatie meestal wel in 3D worden geschat.

7. Wat wordt bedoeld met de hypothesetoetsing en waarom is dat nodig?

Beschouwd als een conventioneel schattingsprobleem is de meest elementaire meting een zogenaamde double-difference meting. De verschillen tussen twee 'pixels' (scatterers) op twee momenten in de tijd worden beschouwd. Zo'n double-difference is dus één meting. Voor deze ene meting zijn er echter een flink aantal onbekenden, zoals het hoogteverschil, de verplaatsing, de atmosfeer, en de faseambigüiteit. Het probleem is dus sterk onderbepaald. Dit kan worden opgelost doordat herhaalde metingen hetzelfde hoogteverschil zouden moeten detecteren, een tijdsafhankelijke verplaatsing,

een temporeel onafhankelijke atmosfeer, en een spatiotemporeel gecorreleerde meerduidigheid. Door in plaats van een verplaatsing per epoche de parameters van een functie door de verplaatsingen te schatten wordt het aantal parameters sterk gereduceerd. In deze aanpak moeten we dus in eerste instantie aannemen dat het verplaatsingsgedrag met zo min mogelijk parameters kan worden beschreven. Dit zorgt immers voor de maximale redundantie in de schatting. Het meest eenvoudige model is dan ook een lineair *steady-state* model: verwacht wordt dat een punt hetzij niet beweegt, hetzij op een eenparige wijze, lineair in de tijd. Deze aanname van *steady-state* beweging noemen we de nul-hypothese. De werkelijke metingen zullen nooit perfect aan zo'n geïdealiseerd model voldoen. De afwijkingen (residuen) tussen de metingen en het model kunnen aanleiding zijn om te herevalueren of de *steady-state* aanname (nul-hypothese) fysisch acceptabel is. Om dat kwantitatief te bepalen wordt er een alternatieve hypothese geïntroduceerd, meestal een model met een wat meer variabel tijdsgedrag, bijvoorbeeld een tweede-orde polynoom. In de hypothesetoetsing wordt bekeken welk van de twee hypothesen het meest waarschijnlijk is om de data te verklaren. De nulhypothese kan dus worden verworpen ten faveure van de alternatieve hypothese. Dit betekent echter niet dat de alternatieve hypothese perfect is; hij is slechts beter dan de nulhypothese, gegeven de data. Tot slot dient te worden opgemerkt dat het gebruik van een modelhypothese slechts van belang is voor het correct schatten van de fasemeerduidigheden. Zodra deze schatting heeft plaatsgevonden worden de individuele verplaatsingen bepaald.

8. Wanneer wordt de nulhypothese verworpen?

De nulhypothese zal worden verworpen indien de beweging van het punt sterk afwijkt van een lineair *steady-state* proces. Dit kan ook worden veroorzaakt doordat de verbindingen tussen de coherente scatterers te lang zijn.

9. De metingen zijn 'relatief'. Wat betekent dan een deformatiesnelheid van 0 mm/jaar in de producten?

Alle metingen moeten inderdaad ten opzichte van elkaar worden geïnterpreteerd, aangezien het vanuit de ruimte niet mogelijk is om vast te stellen welk punt als stabiel verondersteld mag worden. De interpretatie is dus altijd: "hoe beweegt punt A ten opzichte van punt B."

Toch moeten de resultaten in getallen worden weergegeven. Om die reden moet er ergens een *referentiepunt* gekozen worden. Voor dat referentiepunt is dan de deformatiesnelheid per definitie 0 mm/jaar. De beweging van alle andere punten binnen een analyse is dan relatief tot het referentiepunt.

Voorbeeld:

In een analyse staat bij punt A: -3 mm/jaar, en bij punt B: -2 mm/jaar. De getallen -3 en -2 zijn dus afhankelijk van het gekozen referentiepunt (met dus een bepaalde onzekerheid). Wat wel gesteld kan worden is dat punt A ten opzichte van punt B -1 mm/jaar beweegt.

10. Hoe wordt het referentiepunt gekozen, en wat is de fysische interpretatie daarvan?

Voor de radaranalyse is de keuze van het referentiepunt willekeurig, voor de dataverwerking en de snelheidsschatting is deze keuze immers niet relevant. Deze keuze heeft dus geen invloed op de onzekerheid van de relatieve resultaten. Voor de fysische interpretatie is deze keuze echter wel degelijk relevant. Wanneer een bewegend (b.v. verzakkend) punt wordt gekozen als referentiepunt, dan lijkt dat punt in de resultaten immers stil te staan. Zonder fysische voorkennis van het type radarreflectie, de regio, en de (geo)fysische en geotechnische processen die daar spelen, is het

onmogelijk om een absoluut stabiel referentiepunt te kiezen. Dit is een zeer belangrijk gegeven bij het interpreteren van de data, aangezien het gemakkelijk tot misverstanden kan leiden!

Om toch niet al te rare getallen te krijgen proberen we desalniettemin om misverstanden door een verkeerd gekozen referentiepunt zoveel mogelijk te voorkomen. Om die reden kiezen we bijvoorbeeld het gemiddelde van een flink aantal punten in een stabiel verondersteld gebied als referentiepunt. Overleg met experts kan in deze veronderstelling verstandig zijn.

NB. Merk op dat deze veronderstelling niet verschillend is van b.v. waterpassing, waar ook stabiele referentiepunten verondersteld worden. Hoewel bij waterpassing meestal meer fysieke informatie van het referentiepunt beschikbaar is, berusten alle schattingen toch op deze veronderstelling, en zijn ze ook 'relatief' te interpreteren.

11. Kunnen de metingen 'absoluut' gemaakt worden, om ze aan NAP te linken?

In theorie is dit mogelijk, door gebruik te maken van radarreflectoren, waarvan de exacte locatie van het radarreflectiepunt bekend is. Hierbij moet echter onderscheid gemaakt worden tussen twee grootheden: (i) de momentane absolute hoogte van het punt, bijvoorbeeld in het NAP stelsel, en (ii) de momentane absolute dalingssnelheid (dus absolute hoogteverandering van het punt ten opzichte van het NAP nulpunt).

Ad (i): de hoogte van het radarpunt is slechts tot op het niveau van een meter, of iets beter, te bepalen. De deformatie wordt dan ook niet geschat door de hoogten op verschillende tijdstippen met elkaar te vergelijken; die precisie zou veel te slecht zijn. Zelfs wanneer een perfecte radarreflector dus (middels waterpassing of GPS) qua hoogte aan het NAP zou kunnen worden gekoppeld, dan nog zouden de instantane hoogten van alle andere meetpunten niet op mm niveau beschikbaar zijn.

Ad (ii): Wanneer de (verzakings)snelheid van het radarpunt ook bekend zou zijn in het NAP systeem (dus in mm/jaar, niet in mm) dan is een koppeling mogelijk. In de praktijk zijn er echter (a) vrijwel geen NAP punten waarvan de deformatie wekelijks wordt bepaald ten opzichte van het NAP-nulniveau, dienen (b) de benodigde radarreflectoren voor meerdere jaren gegarandeerd ongestoord te blijven, en is het (c) zeer lastig om de fysieke link tussen de radarreflectorhoogte en de hoogte van het waterpas/GPS punt te maken.

Kort gezegd dient de waarde van een link aan het NAP kritisch te worden overwogen. Net zoals GPS metingen in een ander referentiesysteem (het 'datum') worden opgenomen dan waterpassingen, zo worden ook radarmetingen in een ander datum opgenomen. In de meeste gevallen gaat het echter om veranderingen van punten in de tijd, en daarbij is het absolute datum niet relevant. (Niemand is geïnteresseerd in hoever het meetpunt exact van het middelpunt van de aarde af ligt)

12. De gedetecteerde meetpunten zijn meestal afkomstig van 'harde objecten' zoals gebouwen, masten of andere infrastructuur. Ook deze gebouwen kunnen veranderen, dus hoe betrouwbaar zijn die meetpunten eigenlijk?

Heel betrouwbaar. De techniek werkt zo dat alleen geschatte deformaties kunnen worden verkregen voor reflecties die gedurende het tijdsinterval niet veranderen in hun radarsignatuur. Grote veranderingen resulteren in een verandering van het radarsignaal, waardoor geen betrouwbare schatting mogelijk is. Juist de locaties waar geen metingen

worden verkregen, terwijl deze de omstandigheden (ondergrond of type begroeiing) soortgelijk zijn, zijn aan verandering onderhevig. Met andere woorden: de punten worden niet manueel geselecteerd door b.v. harde objecten uit te kiezen, maar juist door het criterium van ongestoorde radarsignatuur.

13. Soms wordt er gesproken over verzakking, soms over verplaatsing in de kijkrichting van de satelliet. Wat is juist?

Met gegevens vanuit 1 satellietbaan kan geen uitspraak worden gedaan over de absolute richting van de deformatievector. Slechts de projectie van deze vector in de kijkrichting van de satelliet wordt gemeten. 'Verplaatsing' is hier dan ook een beter woord. Indien de analyse echter vanuit verschillende satelliet-kijkrichtingen wordt gedaan, worden meerdere projecties gemeten. Hieruit is vervolgens een uitspraak te doen over de absolute richting van de deformatievector, en kan (verticale) verzakking worden onderscheiden van b.v. afschuiving of horizontale deformatie.

14. Hoe is het mogelijk dat vanaf 800 km hoogte zo'n precisie wordt gehaald (millimeters, of millimeters per jaar)?

Dat komt doordat de afstand niet relevant is voor de meettechniek. De basis van de metingen ligt in het gebruik van de interferometrische fase. Doordat de fase van de elektromagnetische golf met voldoende precisie kan worden gemeten, maakt het niet uit hoe lang de afgelegde afstand is. Daarnaast is het van belang dat het relatieve parameters betreft: de absolute afstand is helemaal niet zo goed bekend.

15. Welke horizontale resolutie heeft de sensor?

Dit is afhankelijk van de gebruikte satelliet en het radarinstrument aan boord. Daarnaast is het afhankelijk van de hoek waaronder de radar naar het aardoppervlak kijkt. ERS en Envisat hebben een grondresolutie van circa 5 bij 23 meter, en een bemonstering van ongeveer 4 bij 20 meter. TerraSAR-X heeft een variabele resolutie, meestal gebruiken we 3 bij 3 meter. In deze discussie is het echter van belang te onderstrepen dat bij radarbeelden de resolutie anders geïnterpreteerd dient te worden dan bij optische beelden. Binnen een radar-resolutiecel van 4 bij 20 meter kan het een object met de afmetingen van minder dan een meter zijn dat het dominante aandeel vormt in de reflectie. Bijvoorbeeld: een lantaarnpaal bestrijkt een veel kleiner gebied dan 4 bij 20 meter, maar kan soms toch een bruikbare reflectie leveren.

16. Gesteld wordt dat je met deze satelliettechniek terug in de tijd kunt kijken. Geldt dat overal, en tot hoever terug kan worden gekeken?

Voor deze techniek is het van belang niet slechts met één of enkele beelden te werken, maar met een groot aantal. Dit is nodig omdat vooral de waterdampverdeling in de atmosfeer anders een te dominante invloed op de schattingen zou hebben. Zo'n serie moet vanuit een beperkt gezichtspunt in de ruimte worden waargenomen, dus het is meestal niet mogelijk om verschillende sensoren met verschillende baanparameters te combineren. Conclusie is dat dus dient te worden gekeken naar de specifieke satellietmissie. ERS-1 gaat terug tot 1992, maar is gedurende vooral de jaren 1993 en 1994 soms in een andere baan gebracht. Hierdoor vallen er als het ware 'gaten' in de tijdseries, die soms tot problemen leiden. ERS-2 start in 1995 en is nog steeds operationeel, alhoewel de beelden na medio 2000 met verschillende problemen te kampen hebben. Envisat is gestart in 2003 en zal tot eind 2010 operationeel zijn. Radarsat-1 is vanaf 1995 operationeel en inmiddels opgevolgd door Radarsat-2. TerraSAR-X is sinds 2007 operationeel. Zolang de beelden zijn opgenomen is het mogelijk de data terug in de tijd te analyseren.

17. Klopt het dat de techniek niet werkt wanneer de deformatie te groot is?

Deze vraag is niet in deze algemeenheid te beantwoorden, aangezien het antwoord afhankelijk is van een aantal omstandigheden. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om veranderingen van vele meters met grote precisie te meten zolang de radarsignatuur van het aardoppervlak niet veranderd. Dit is b.v. het geval bij instantane grote bewegingen (b.v. aardbevingen of snelle aardverschuivingen), of bij grote maar langzame bewegingen in droge en ongestoorde gebieden. Daarnaast hangt het ook af van frequentie van het gebruikte radarinstrument. Een belangrijk element in de discussie is het schatten van de fasemeerduidigheden: het aantal gehele fasecycli dat in de data zit. De schatbaarheid van de fasemeerduidigheden is afhankelijk van onder andere (i) de afstand tussen de meetpunten in relatie tot de sterkte van het deformatiesignaal en het atmosfeersignaal, (ii) de tijdsintervallen tussen de metingen in relatie tot de deformatiesnelheid, (iii) de gebruikte radarfrequentie, (iv) a priori kennis van het te verwachten spatiotemporele gedrag van de deformatie. Ook in de Nederlandse situatie is het antwoord op de vraag dus complex.