

Advies groep Economische
Zaken
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-2009-02294/A

**Samenvatting van de rapportage "PS-InSAR-
analyse van de bodemdaling in Noordwest-
Friesland"**

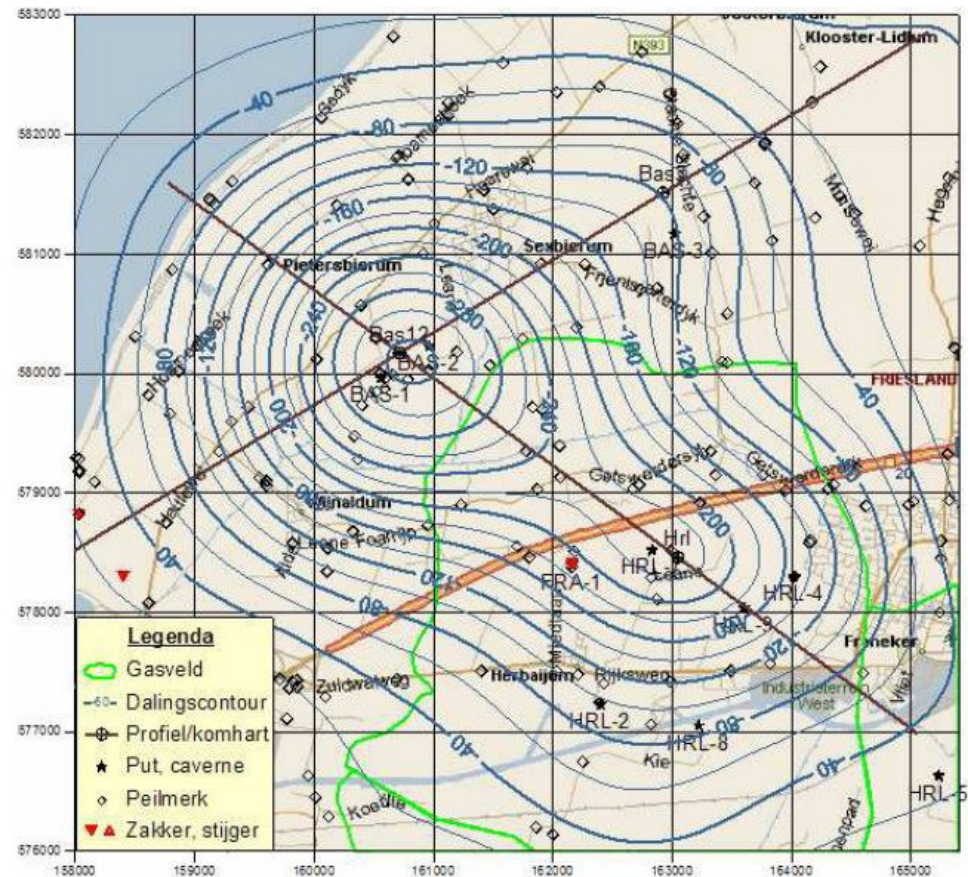
Datum	19 november 2009
Auteur(s)	Mevr. Dr. A.G. Muntendam - Bos Prof. dr. ir. R.F. Hanssen Mevr. Dr. K. van Thienen-Visser Ir. S. Samiei-Esfahany
Opdrachtgever	Ministerie van Economische zaken
Aantal pagina's	17 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	0

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.

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-meerduidigheden 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 peilmerkdaling

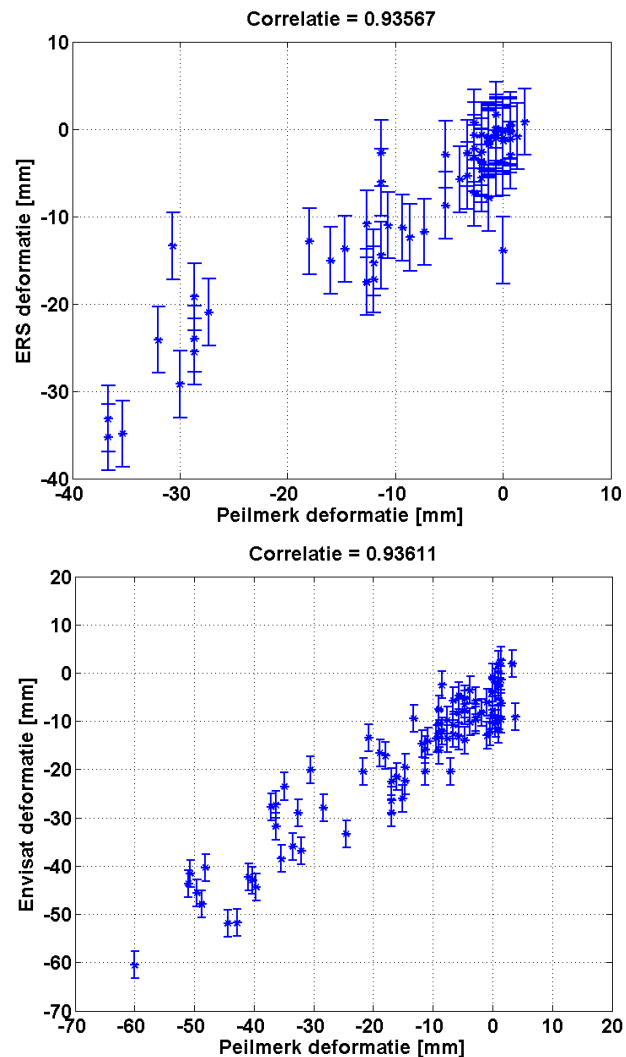
De consistentie tussen de bodembewegingen waargenomen met waterpassing en PSI is onderzocht aan de hand van laterale doorsneden door de datasets. Een kwantitatieve vergelijking is niet mogelijk omdat de PSI scatterers en de waterpassingspeilmerken niet op dezelfde locaties gemeten worden noch op hetzelfde 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

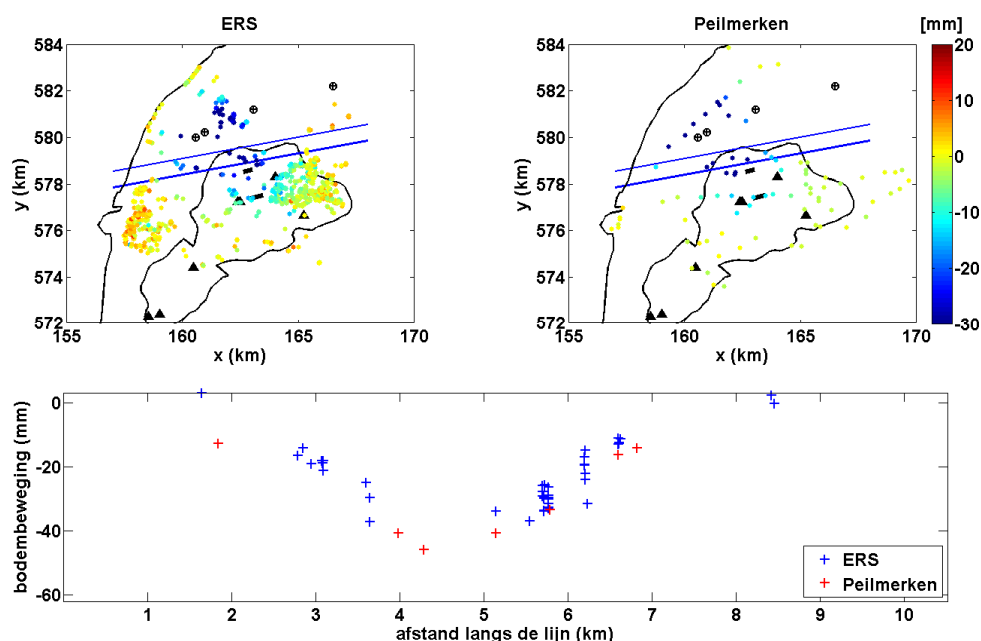
geïsoleerd liggende gebieden (in dit geval in de ERS-2 data bij Sexbierum). Het toepassen van een alternatieve hypothese om het deformatiegedrag te beschrijven (2^e orde polynoomhypothese) heeft dit probleem opgelost.

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.

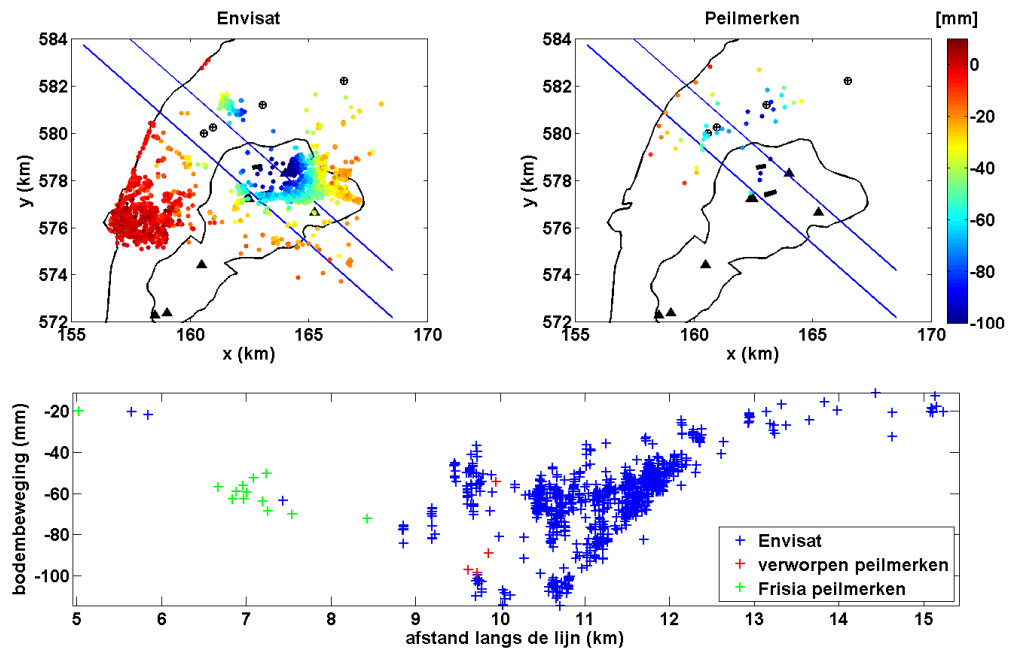


Figuur d: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 1998 en 2000, onder de alternatieve hypothese(2^e orde polynoom). Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en PSI in een band met een breedte van ca 350 m worden meegenomen. De peilmerken zijn gecorrigeerd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

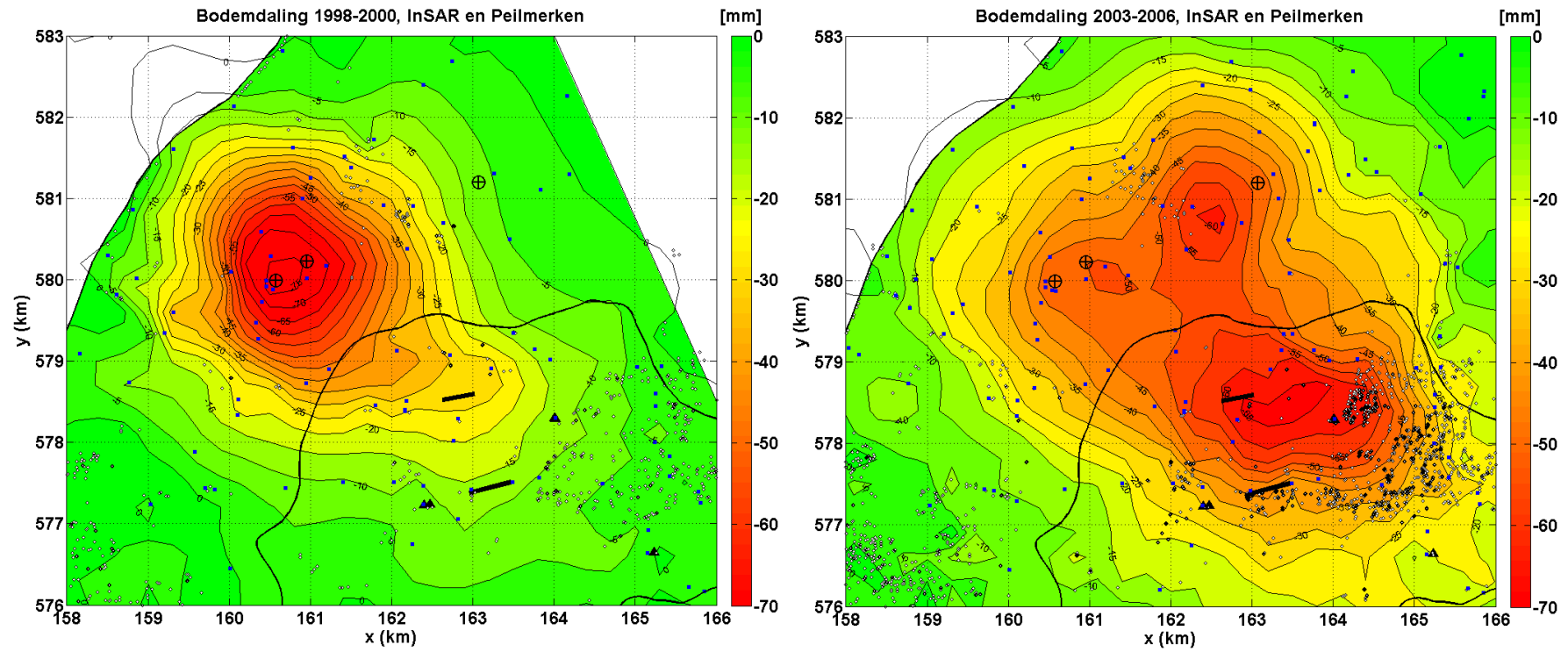


Figuur e: Bodemdaling (mm) geobserveerd met radar (links) en waterpassingen (rechts) tussen 2003 en 2008, onder de nulhypothese van lineaire deformatie. Daaronder een profiel waarin alle peilmerken en radarpunten in een band met een breedte van ca 1000 m worden meegenomen. De waterpassingen zijn gecorrigeerd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

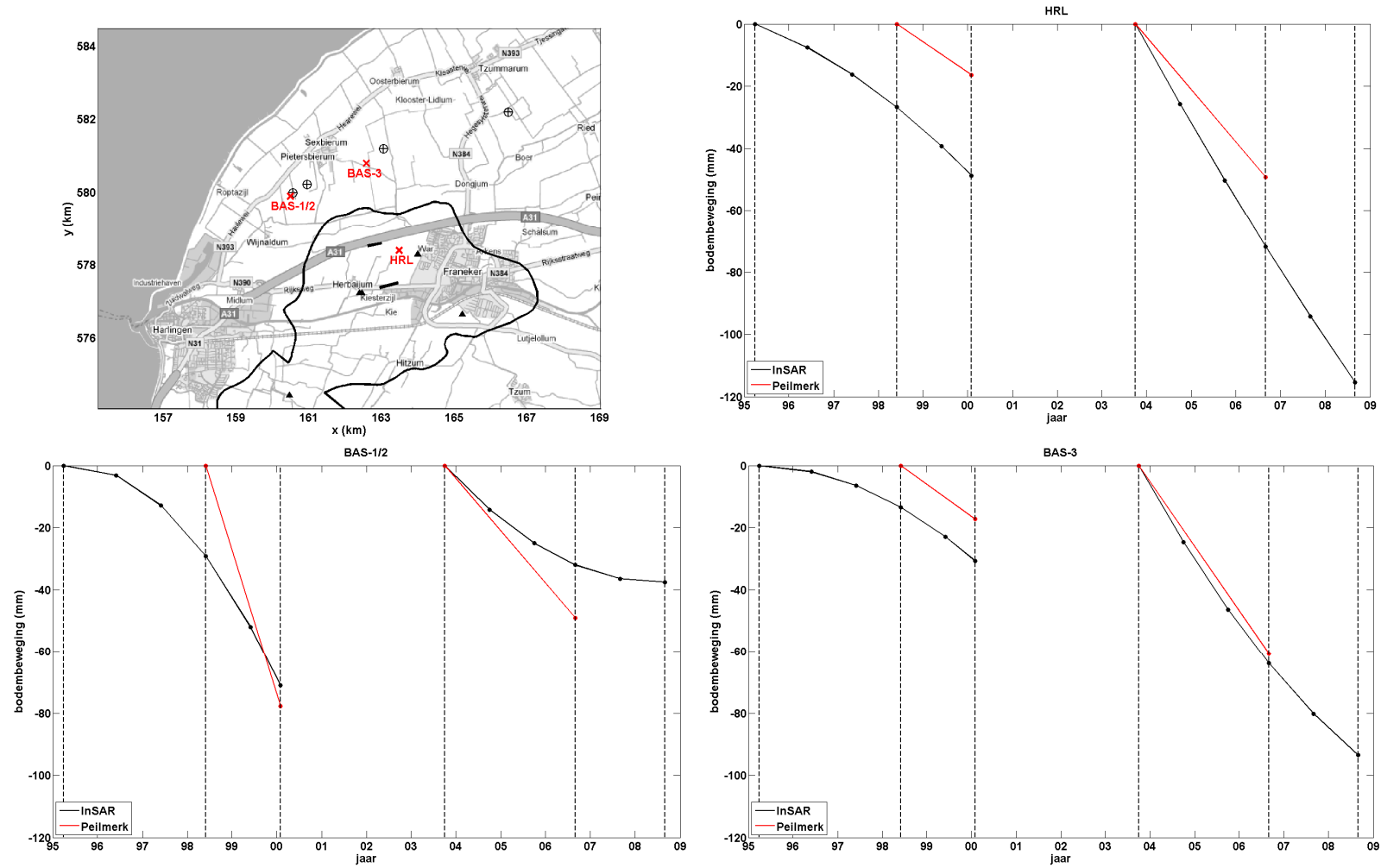
BAS-3 zoutcaverne

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).

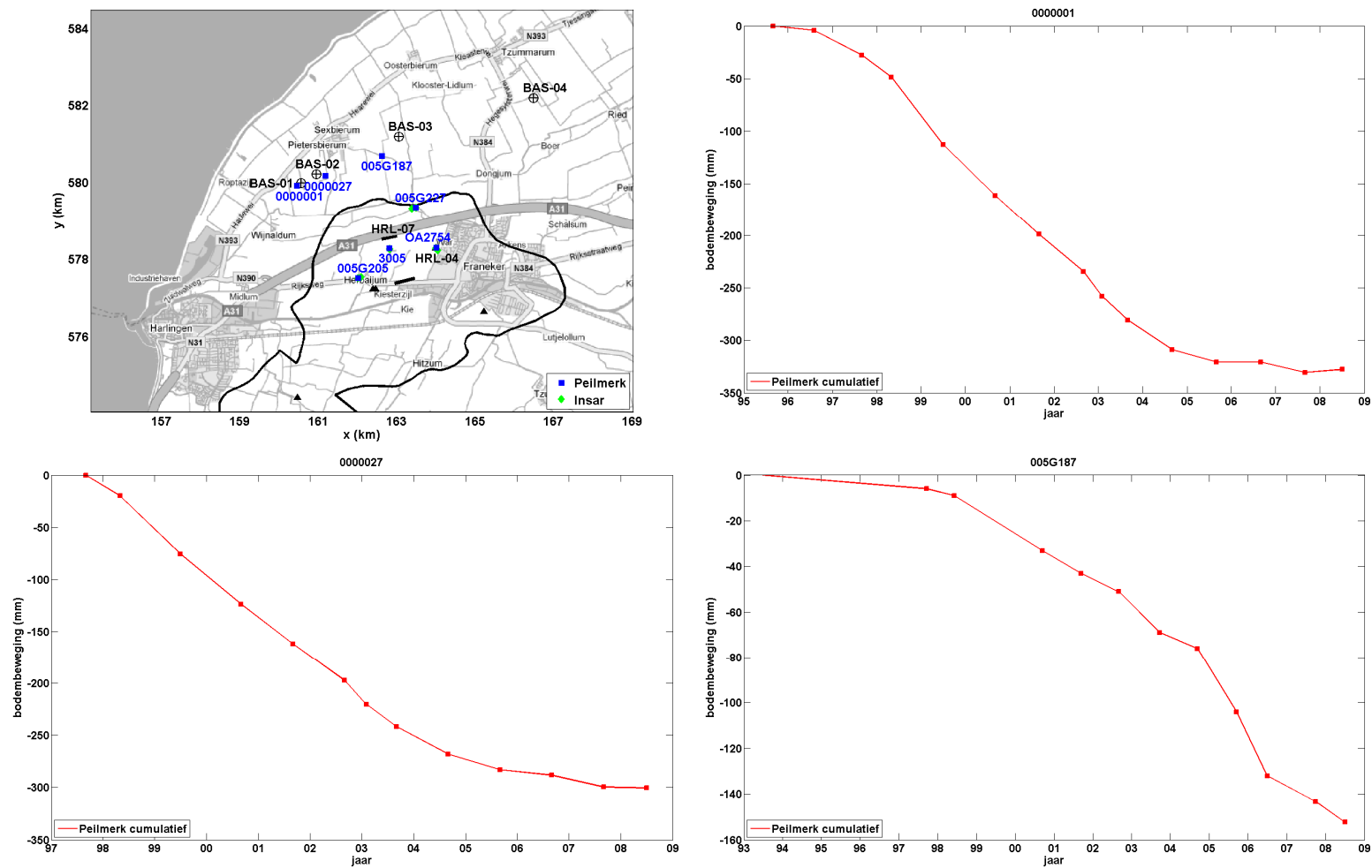
In Figuur h is de volledige tijdserie van enkele peilmerken weergegeven welke het dichtst bij de diepste punten van de interpolatiekommen boven de zoutwinning liggen. Duidelijk is te zien dat de daling bij BAS-1 (peilmerk 000001) het grootst is met ~33 cm. De daling net ten oosten van BAS-2 (peilmerk 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

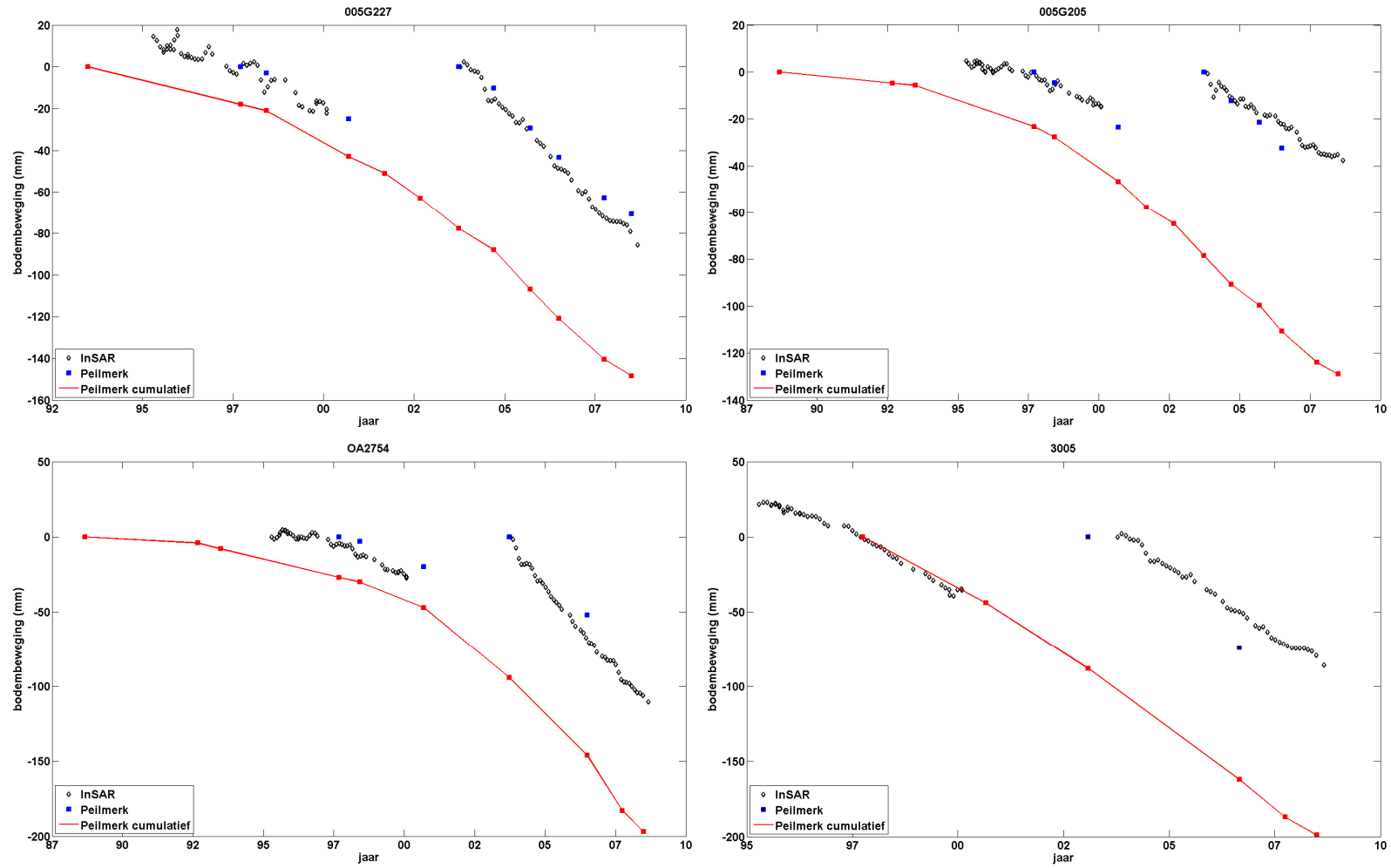
De geïnterpoleerde PSI daling (Figuur g) laat een lichte versnelling van de daling zien tussen 1995 en 2000. In de periode 1998 tot 2000 is de daling in de scatterers ~2,8 mm/jaar groter dan de daling in de peilmerken. In de periode 2003-2008 neemt de snelheid van de geïnterpoleerde daling volgens de 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).

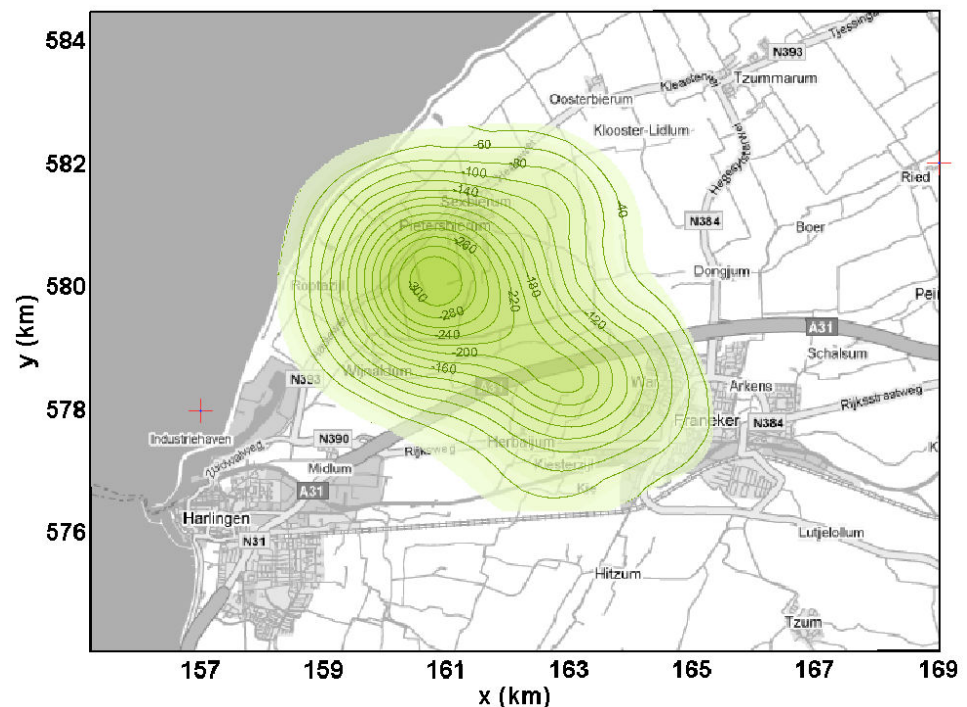


Figuur i: Volledige tijdseries van de peilmerken 005G227, 005G205, OA2754 en 3005 (rood), de daling van de nabij gelegen PSI scatterers (grijze diamanten), en de peilmerkdaling in het met de InSAR corresponderende tijdvak (blauwe vierkantjes). Locaties van de peilmerken gegeven in de kaart van Figuur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

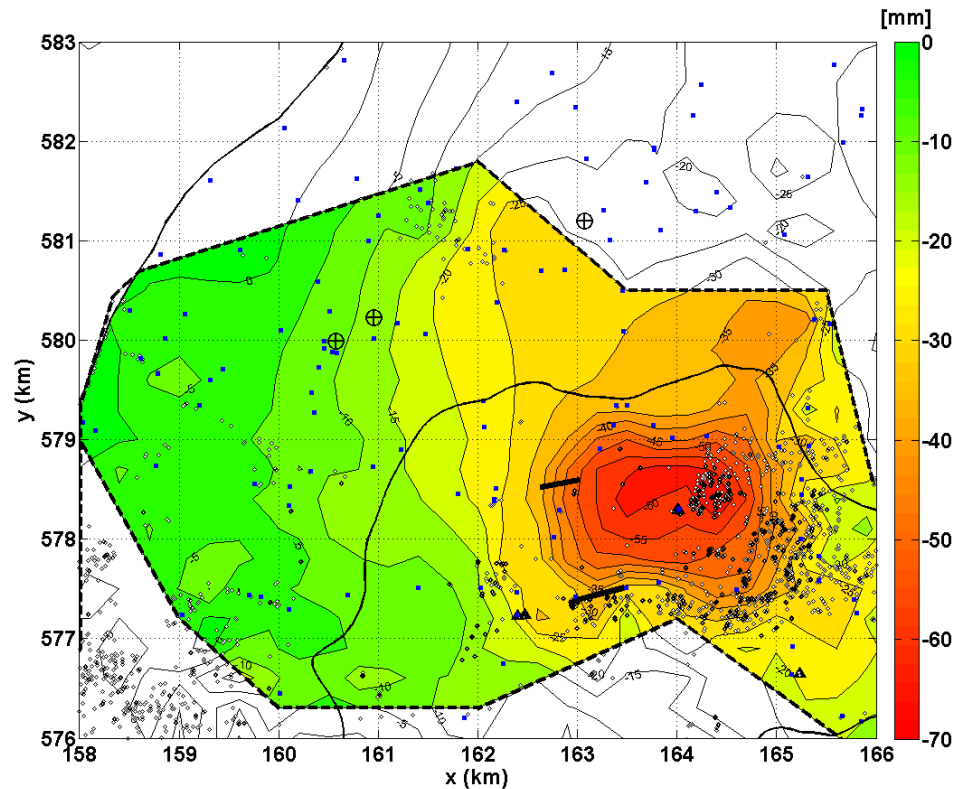
Zoals in de inleiding beschreven heeft Houtenbos (2008) op basis van alle beschikbare peilmerken een analyse van de bodemdaling tussen 1988 en 2006 gemaakt (Figuur j). Figuur k laat de geïnterpoleerde totale extra daling zien zoals die door de PSI scatterers is gemeten in de periode 1998-2008 (geïntegreerde 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 bodemdaling kom 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.

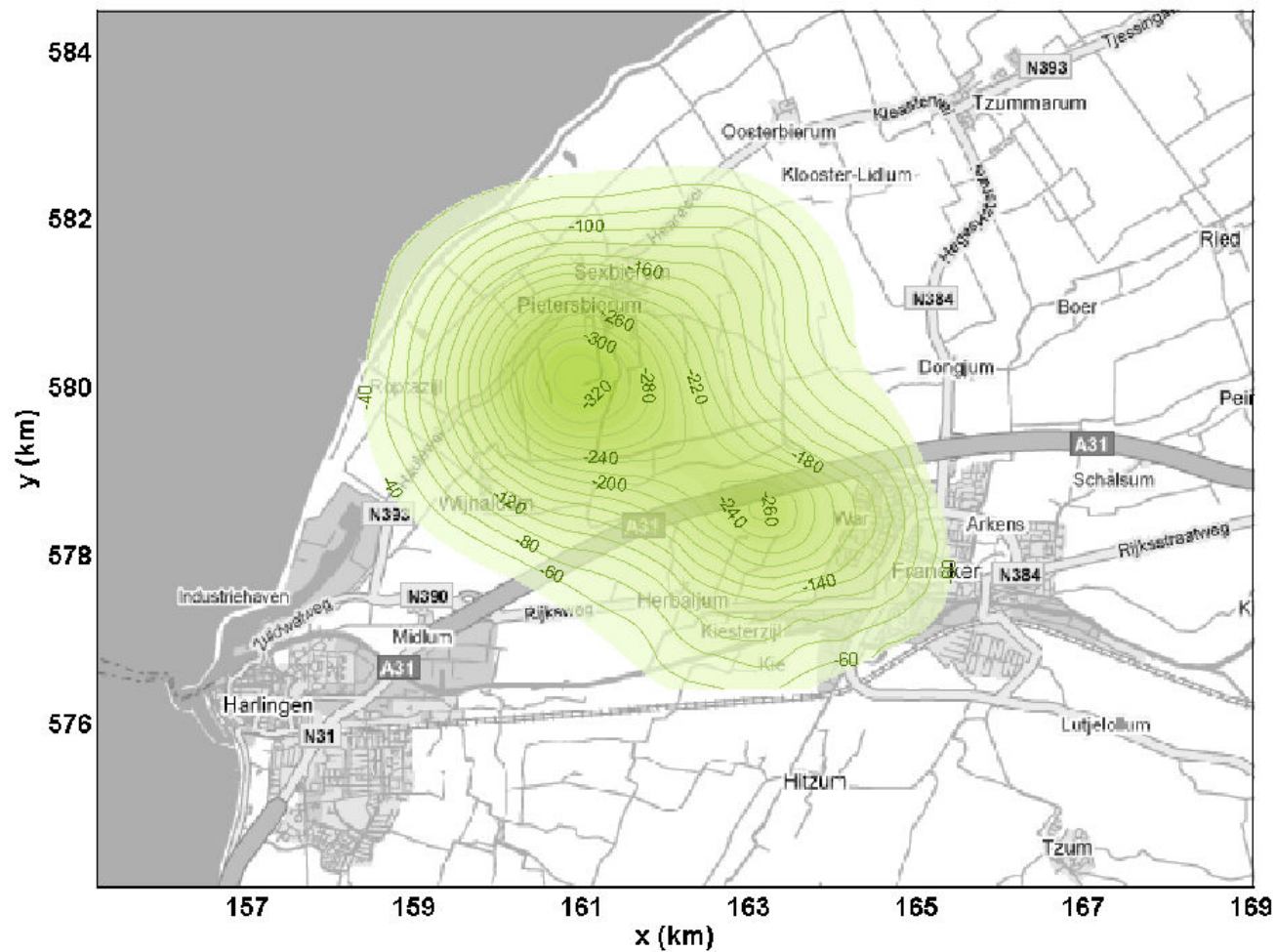


Figuur k: Geïnterpoleerde totale extra daling gemeten in de PSI scatterers in de periode 1998-2008. (houd er rekening mee dat dit een minimale schatting is aangezien de additionele daling in de periode 2000-2003 niet vastgesteld kon worden).

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.