

Meetregister Noord Nederland 2014

Rapportage behorende bij de meetplannen Noord Nederland 2013 en 2014

30 juli 2015

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Documentnummer: EP201507207215

Samenvatting

Dit rapport inventariseert de in het kader van het Meetregister Noord Nederland 2014 opgeleverde meetgegevens en beschrijft de toepassing en validatie van satelliet radar interferometrie (InSAR) voor monitoring van bodemdaling. Het meetregister Noord Nederland 2014 is bedoeld als vervanging van het niet gepubliceerde meetregister Noord Nederland 2013 en bevat InSAR resultaten tot juni 2014. Zoals in het meetplan Noord Nederland 2013 vastgelegd, wordt de gerapporteerde InSAR deformatie analyse gevalideerd door in het jaar 2013 in twee kleinere gebieden verrichte waterpassingen.

Aangetoond wordt, dat én de ruimtelijke én de temporele bemonstering van InSAR waarnemingen in Noord Nederland voldoende is, om de bodemdaling door gaswinning te monitoren. De geschatte InSAR deformatie wordt per peilmerk met de resultaten van de waterpassing gecombineerd, indien een overlap in de tijd bestaat. Verder wordt een onderscheid gemaakt tussen stabiel en niet stabiel veronderstelde peilmerken met de bedoeling, dat de gerapporteerde deformatie voor instabiel veronderstelde peilmerken mogelijk niet als representatief voor de bodemdaling kan worden beschouwd.

De validatie methodieken worden in detail beschreven en de resultaten gerapporteerd, waaruit blijkt, dat met InSAR bepaalde hoogteverschillen goed overeenkomen met de resultaten van de waterpassing.

Inhoudsopgave

1	Introductie	5
2	InSAR	6
2.1	Beschikbaarheid	6
2.2	Verwerking ruwe meetgegevens	8
2.3	Na verwerking	8
2.3.1	Puntselectie.....	8
2.3.2	Conversie naar de verticaal.....	9
3	Waterpassing	10
3.1	Meetcampagnes 2013.....	10
3.2	Stabiliteitsanalyse	11
4	Combinatie	13
4.1	InSAR referentie in de ruimte	13
4.2	Aansluiting van tijdseries op elkaar	13
4.3	Virtuele peilmerklocaties	14
5	Validatie	16
5.1	Validatiemethodiek.....	16
5.2	Vergelijking van dubbel-differenties.....	16
5.3	Kwaliteit van inpassing.....	20
5.4	GPS	21
6	Conclusies en vooruitzicht	22
	Bijlagen	23
A.1	InSAR differentiestaat	23
A.2	Gecombineerde differentiestaten	24
A.3	Verschilkaarten	24
A.4	Visualisatie tijdseries peilmerken	24
A.5	Visualisatie validatie.....	25
A.6	Waterpassing	25
A.6.1	Overzicht sectie- en trajectsluitfouten	26
A.6.2	Overzicht kringsluitfouten	26
A.6.3	Resultaten eerste fase (vrije) vereffening.....	26
A.6.4	Differentiestaten.....	26
A.6.5	Kalibratie rapporten	27

B	Tijdsseries	28
B.1	Geselecteerde peilmerken	28
B.2	Opmerkingen en afwijkingen	45
B.3	GPS	47
C	Verklaring der tekens	51
D	Combinatie procedure	52
E	Precisie en betrouwbaarheid InSAR.....	55
E.1	Precisie	55
E.1.1	Atmosferische verstoringen.....	56
E.1.2	Bodembeweging door ondiepe oorzaken.....	57
E.2	Betrouwbaarheid	57
E.2.1	Meerduidigheden.....	57
E.2.2	Baanfouten en ruimtelijke trends	58
E.2.3	Ruimtelijke componenten.....	58
E.2.4	Subpixel positie	58
E.2.5	Geocodering.....	59
F	Kansmodel validatie	60
F.1	Kansmodel waterpassing	60
F.2	Kansmodel InSAR	61
	Referenties.....	62

1 **Introductie**

Nadat de bewaking van bodemdaling door gaswinning in het verleden uitsluitend op waterpassingen was gebaseerd, zijn in het kader van het meetregister Groningen 2010 (NAM, 2012) voor het eerst deformatie schattingen uit satelliet radar interferometrie (InSAR) gerapporteerd. Dit gebeurde ter vervanging van de kleine waterpassing Groningen 2011. Daarbij werd voor de validatie een steekproef-waterpassing in het Lauwersmeergebied gebruikt. De gecombineerde deformatie tijdseries uit InSAR en waterpassing werden voor het hele Groningen gasveld gevisualiseerd. Daarbij zijn InSAR meetgegevens voor de Envisat missie (2003-2010) opgeleverd. De precisie en betrouwbaarheid van InSAR, met betrekking tot de Envisat opnames, zijn in detail bediscussieerd.

Op basis van de succesvolle validatie in 2011 werd in het meetplan Noord Nederland 2013 (EP201203211039001) aangegeven, dat in het meetregister 2013 InSAR resultaten worden gerapporteerd, die worden gevalideerd aan de hand van een steekproef met waterpassingen in twee validatiegebieden. Dit meetregister ingediend in december 2013 is in de maanden opvolgend uitgebreid besproken met het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). De goedkeuring was echter nog niet rond toen al nieuwe InSAR resultaten tot juni 2014 beschikbaar kwamen. Daarom is in overleg afgesproken, om het meetregister Noord Nederland 2013 te vervangen door het meetregister Noord Nederland 2014, waarbij de voorliggende rapportage behoort.

Aanleiding voor de revisie van het oorspronkelijk ingediende meetregister waren in juni 2014 vastgestelde discontinuïteiten in de uit waterpassing en InSAR gecombineerde tijdseries. Deze waren te wijten aan de veronderstelling van een vloeiend gedrag bij de aansluiting van InSAR tijdseries op elkaar. Hiermee kon weliswaar een periode zonder InSAR opnames (2000-2003) worden overbrugd, maar de aanpak leidde tot onregelmatigheden in gevallen, waarin de aanname van een vloeiend gedrag onjuist bleek te zijn. Dergelijke aannames worden in voorliggende rapportage niet gedaan. Als daardoor voor een peilmerk een integrale combinatie niet meer mogelijk is, worden voor dat peilmerk aparte tijdseries opgeleverd.

In dit document wordt ook een overzicht gegeven van de opgeleverde stukken in relatie tot het meetregister Noord Nederland 2014. Het omvat bodemdalingsmetingen in van 1964 tot juni 2014, waaronder de InSAR missies ERS-1/2 (1992-2001), Envisat (2003-2010) en Radarsat-2 (2009-2014). Voor wat betreft de waterpassing worden metingen voor het hele rapportagegebied opgeleverd. Hierbij is mede gebruik gemaakt van de waterpassing uitgevoerd door Rijkswaterstaat.

Dit rapport begint in de hoofdstukken 2 en 3 met algemene opmerkingen over de meettechnieken InSAR en waterpassing, beschikbaarheid van data en toepasbaarheid. Hoofdstuk 4 gaat in op aandachtspunten, die bij de combinatie van tijdseries van de twee technieken een rol spelen. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de validatie geanalyseerd. In een aantal bijlagen is naast een overzicht over de opgeleverde bestanden en een gedetailleerde toelichting van verwerkingsstappen in de combinatie procedure ook uitleg gegeven over precisie en betrouwbaarheid van de Radarsat-2 deformatie schattingen.

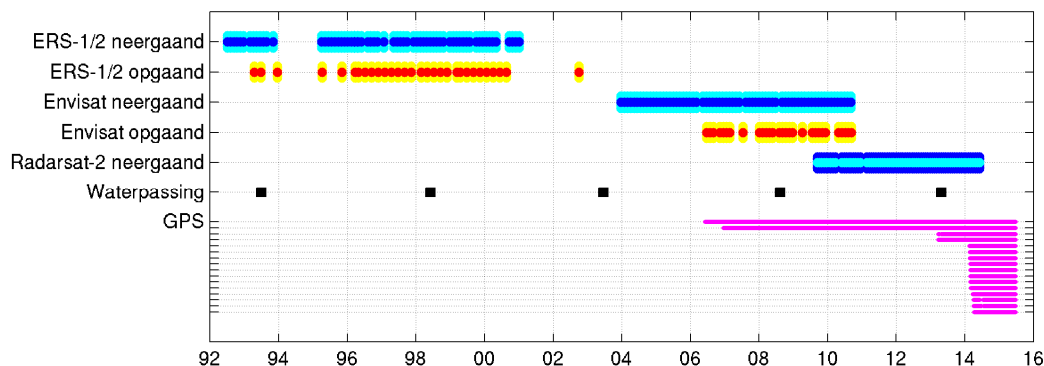
2 InSAR

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

Dit hoofdstuk geeft een overzicht over beschikbaarheid en verwerking van de InSAR data zoals aangeleverd volgens bijlage A.1. Een nadere beschrijving van de precisie en betrouwbaarheid is te vinden in bijlage E.

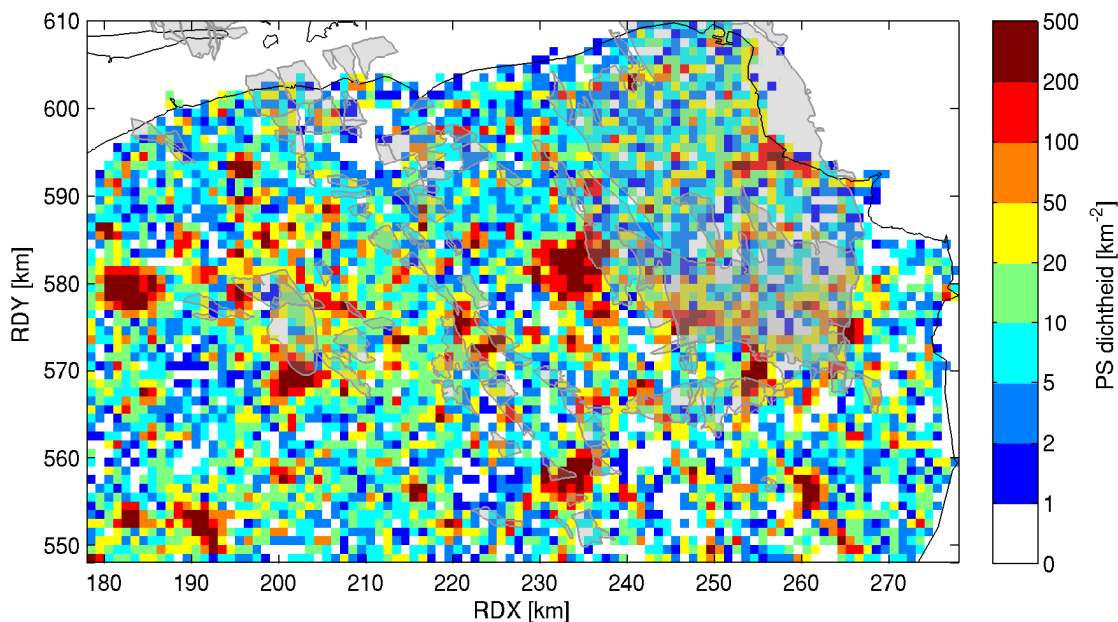
2.1 Beschikbaarheid

Van Noordoost-Nederland zijn vanaf 1992 radar beelden opgenomen door de achtereenvolgende satellietmissies ERS-1, ERS-2, Envisat, en Radarsat-2. Behalve voor Radarsat-2, bestaan opnames van zowel een neergaande als een opgaande baan. Op een neergaande baan vliegt een satelliet van het noordpoolgebied komend in richting van de evenaar en neemt gebieden ten westen van zijn vliegbaan op. Op een opgaande baan is dat andersom. Figuur 1 toont de bemonstering in de tijd.



Figuur 1: Temporele bemonstering van satelliet opnames van Noord-Nederland. Ter vergelijking zijn ook de tijdstippen van de grote waterpassingen in het diagram mee opgenomen. Daarnaast wordt de beschikbaarheid van meetgegevens van 14 permanente GPS stations in het rapportagegebied getoond.

De opname frequentie vanuit een enkele satellietbaan is 24 dagen voor Radarsat-2 en 35 dagen voor ERS en Envisat. De PS dichtheid varieert van 0-25 PS/km² in het landelijke gebied tot meer dan 100 PS/km² in het stedelijke gebied (zie Figuur 2).



Figuur 2: PS-dichtheid (aantal PS per km²) in het rapportagegebied voor de Radarsat-2 puntselectie (zie paragraaf 2.3.1). De grijze vlakken geven de NAM-gasvelden weer.

Voor de continuïteit van de monitoring is het van belang, dat satelliet missies op elkaar aansluiten. Tabel 1 toont een overzicht van alle SAR (Synthetic Aperture Radar) satelliet missies en laat zien, dat de continuïteit in de toekomst gewaarborgd is. Op lange termijn is gepland, om naar Sentinel-1 over te stappen.

Tabel 1: Overzicht over satelliet interferometrie missies en jaren van beschikbare acquisities: nominale of verlengde missieduur (donkergrijs), potentiële voortzetting van de missie (lichtgrijs), missies of missiedelen met ontbrekende of beperkte geschiktheid voor bodemdalingsmonitoring in Nederland (gearceerd). Een aangegeven opnamefrequentie van “12/3” betekent bijvoorbeeld, dat de constellatie drie satellieten omvat, waarvan ieder hetzelfde gebied om de twaalf dagen vanuit dezelfde baan kan opnemen.

Satelliet	Opname-interval [d]	Radar-frequentieband	<2000	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	>2017
ERS-1	35	C																				
JERS	44	L																				
ERS-2	35	C																				
Radarsat-1	24	C																				
Envisat	35	C																				
ALOS	46	L																				
Cosmo-Skymed 1-4	16/4	X																				
TerraSAR-X	11	X																				
Radarsat-2	24	C																				
TanDEM-X	11	X																				
Sentinel-1 a/b	12/2	C																				
PAZ	11	X																				
TerraSAR-X2	11	X																				
Radarsat Constellation	12/3	C																				

De Sentinel-1 missie omvat de satellieten Sentinel-1a en Sentinel-1b evenals mogelijke opvolgers. Sentinel-1a werd in april 2014 succesvol gelanceerd, en sinds oktober 2014 worden regelmatig opnames van Nederland gemaakt. Het is de bedoeling om de analyse van Radarsat-2 beelden nog tot 2016 voort te zetten, wanneer een toereikende overlap met Sentinel-1a bereikt is.

2.2 Verwerking ruwe meetgegevens

De ruwe meetgegevens zijn beeldbestanden, die pixelgewijs amplitude en fase van de gereflecteerde radarsignalen bevatten. Het resultaat van hun verwerking zijn deformatie tijdseries van een select aantal pixels met een consistent reflectiegedrag, de zogenoemde Persistent Scatterers (PS). De verwerkingsprocedure wordt meestal (*PS-InSAR*) *processing* genoemd en houdt in:

- Identificatie van PS (pixels met een consistent reflectiegedrag), gebaseerd op de ruwe metingen; verdere sub-selectie gebaseerd op een aantal kwaliteitscriteria.
- Oplossen van fasemeerduidigheden: Met InSAR kunnen tussen twee naburige PS en twee opeenvolgende tijdstippen alleen relatiefbewegingen worden gemeten, die kleiner zijn dan de halve golflengte (hier: $\lambda/2 = 28$ mm). Gezien de kleine bodembewegingen en de hoge opnamefrequentie stelt dit voor Noord Nederland geen probleem voor.
- Schatten en verwijderen van het atmosferisch signaal, d.w.z. ongelijkmatige vertraging van het radarsignaal door de atmosfeer: De scheiding tussen deformatie en atmosferische effecten is gebaseerd op correlatie eigenschappen. In tegenstelling tot deformatie is het atmosferisch signaal ongecorrleerd in de tijd.
- Schatten en verwijderen van een bijna lineaire ruimtelijke trend, die vooral door satellietbaanfouten wordt veroorzaakt. De schatting is gebaseerd op waarnemingen in een gebied, dat buiten de invloedssfeer van de delfstoffenwinning ligt (zie Figuur 11 op blz. 23).

De deformatietijdseries geven de verplaatsing van PS langs de kijklijn van de satelliet weer, te weten relatief in de ruimte (hier: t.o.v. een stabiel veronderstelt gebied, zie Figuur 11) en relatief in de tijd (t.o.v. de vroegste opname). Voor algemene technische details over de InSAR-verwerkingsprocedure zie bv. (van Leijen, 2014).

De hierboven beschreven PS-InSAR analyse is voor ERS en Envisat uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft als onderdeel van onderzoeksprojecten in samenwerking met de NAM. Voor Radarsat-2 is de analyse uitgevoerd door Skygeo B.V., Delft.

2.3 Na verwerking

De door een externe partij aangeleverde deformatietijdseries worden door de NAM in twee opzichten na verwerkt.

2.3.1 Puntselectie

De door InSAR gemeten bewegingen zijn niet alleen te wijten aan bodemdaling door delfstoffenwinning, maar ook aan andere, “ondiepe” effecten zoals zetting van gebouwen, veencompactie of variaties van het grondwaterpeil. Door delfstoffenwinning veroorzaakte bodemdaling is altijd door een geringe ruimtelijke variabiliteit gekenmerkt. Daarom kan veilig worden geconcludeerd, dat het bewegingsgedrag van PS met een significante relatiefbeweging t.o.v.

nabije PS duidelijk door “ondiepe” oorzaken gedomineerd is. Deze PS worden uit de dataset verwijderd.

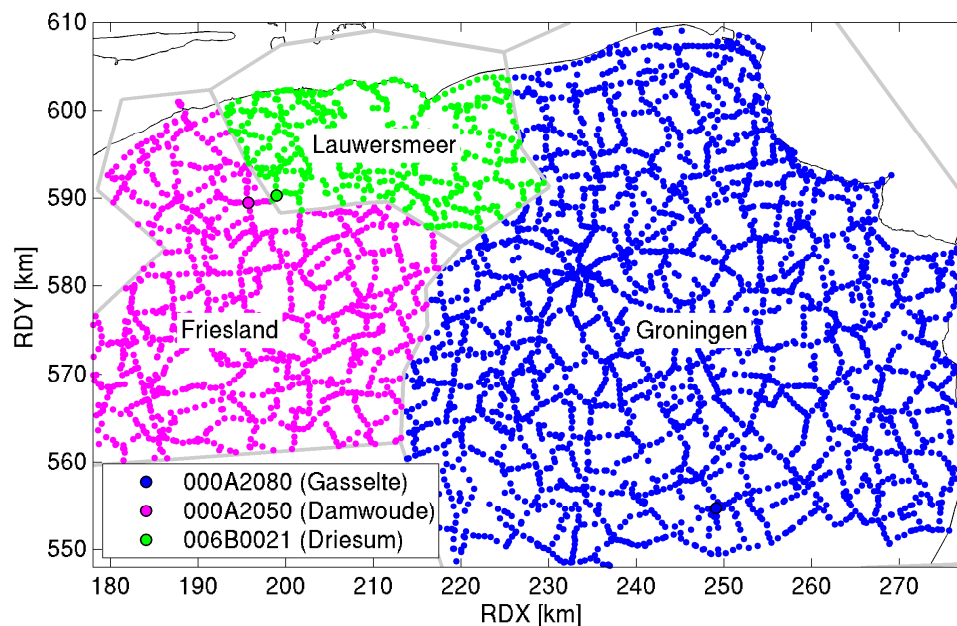
2.3.2 Conversie naar de verticaal

De InSAR deformatie is in de kijkrichting van de satelliet gemeten en kan niet direct als hoogteverandering worden beschouwd. De metingen zijn daarom naar de verticaal geconverteerd onder de aanname, dat geen horizontale beweging heeft plaatsgevonden. De horizontale bewegingen zijn echter relatief klein (vermoedelijk 2 mm/a aan de randen van het Groningse gasveld en 0 mm/a in het midden), en vanwege de steile kijkhoek is de InSAR techniek ook minder gevoelig voor horizontale dan voor verticale deformatie (zie ook beschouwing in bijlage E.2.3).

3 Waterpassing

De bodemdaling in Noord Nederland werd in het verleden uitsluitend door waterpassing gemonitord. Beginnend voor de start van de gasproductie, zijn de waterpassingen epoche-wijze vereffend ten opzichte van één referentiepunt. De resultaten worden in het kader van dit meetregister mee gerapporteerd. Waarnemingen, die op basis van de epoche-wijze vereffening als uitschieters werden geïdentificeerd, zijn verwijderd.

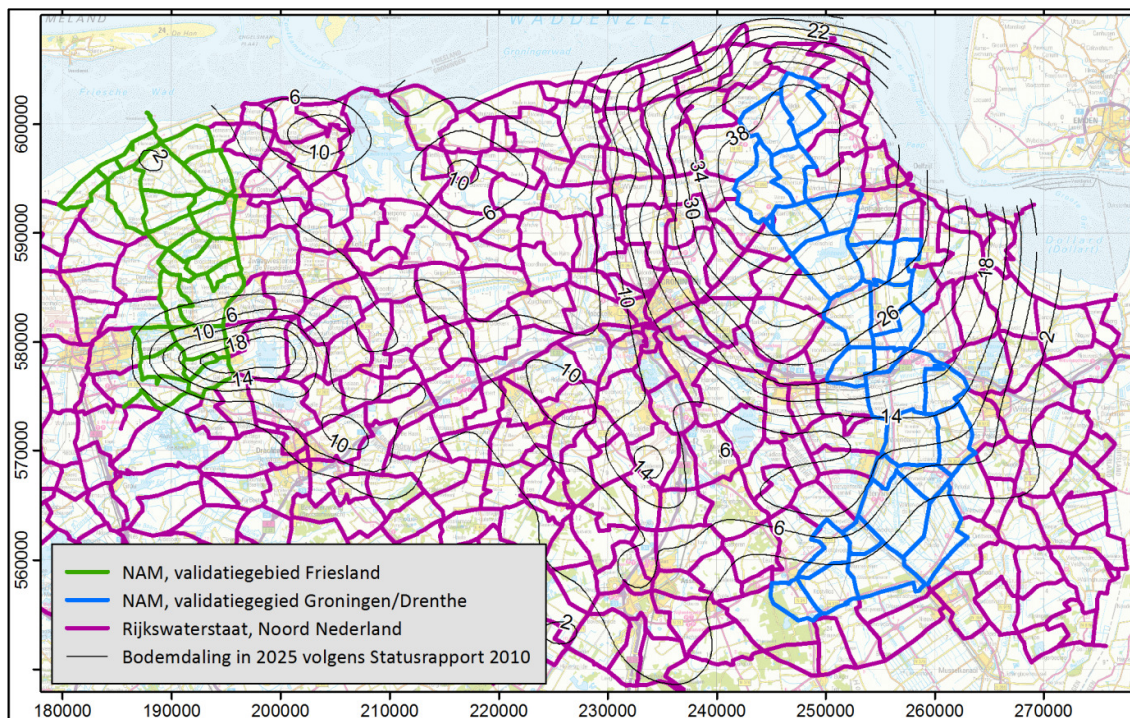
Gezien de wettelijke eisen aan meettijden en meetfrequentie in het verleden niet gelijk waren voor het hele rapportagegebied, bestaat er geen peilmerk, dat in alle meetcampagnes is meegenomen en daarom als uniek referentiepeilmerk voor alle vereffeningen kan worden gebruikt. Daarom is het rapportagegebied opgesplitst in drie deelgebieden met individuele referentiepeilmerken (zie Figuur 3), die in aparte differentiestaten worden gerapporteerd (zie bijlage A.2).



Figuur 3: Deelgebieden van het rapportagegebied, geassocieerd met verschillende referentiepunten.

3.1 Meetcampagnes 2013

In overeenstemming met het meetplan werd in 2013 InSAR als primaire meettechniek gebruikt. Ter validatie van de InSAR waarnemingen (zie hoofdstuk 5) werden door de NAM twee gebieden gewaterpast (zie Figuur 4 en bijlage A.6).

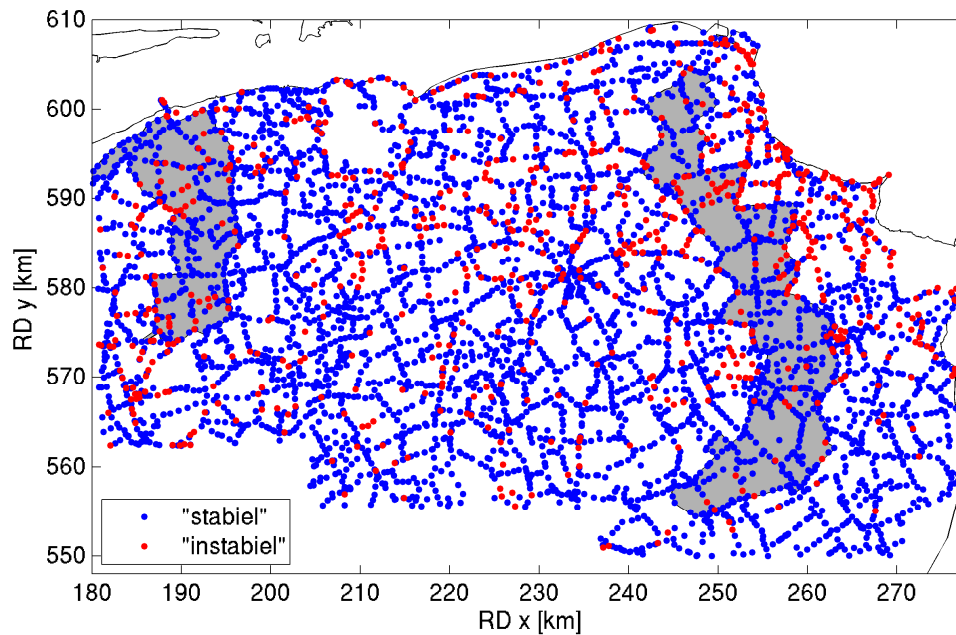


Figuur 4: Waterpassingen in Noord Nederland 2013.

Tegelijkertijd werd door Rijkswaterstaat de rest van Noord Nederland gewaterpast. Deze metingen zijn inmiddels verwerkt (zie bijlage A.6.3) en beschikbaar, zodat het hele rapportagegebied in 2013 door waterpassingen is afgedekt. De omvattende vereffening van alle waarnemingen geeft ook voor de validatiegebieden een beter resultaat, omdat de waterpaskringen in de validatiegebieden door aanvullende waarnemingen van buiten gesteund worden. Daarom wordt uitsluitend de omvattende vereffening van het gehele netwerk gerapporteerd en gebruikt, om de InSAR waarnemingen te valideren.

3.2 Stabiliteitsanalyse

Sommige peilmerken tonen een autonoom bewegingsgedrag en kunnen daarom niet als representatief worden beschouwd voor de bodemdaling op grotere schaal. Door middel van een uitgevoerde stabiliteitsanalyse zijn peilmerken als “stabiel verondersteld” of “niet stabiel verondersteld” geclassificeerd (zie Figuur 5), en de classificatie staat in de opgeleverde differentiestaten (zie bijlage A.2) vermeld.



Figuur 5: Stabiliteitsanalyse van waterpas-peilmerken. 85 % van de geanalyseerde peilmerken worden als “stabiel” geclassificeerd; In grijs: validatiegebieden 2013.

Behalve de fysieke stabiliteit wordt bij de analyse ook met niet gedetecteerde identificatiefouten rekening gehouden, die optreden, als in een of meetcampagne een verkeerd peilmerk wordt geobserveerd. In tegenstelling tot gewoonlijke meetfouten kunnen dit soort fouten in het kader van de epoche-wijze vereffening niet worden gedetecteerd en qua grootte oplopen tot meer dan een meter. Omdat het niet mogelijk is, identificatiefouten gebaseerd op uitsluitend objectieve criteria te onderscheiden van feitelijke bodemdaling, worden deze zoals in het verleden niet verwijderd en wél gerapporteerd. Dat geeft aanleiding, om de definitie van “niet stabiel verondersteld” uit te breiden naar “peilmerk is fysiek instabiel” of tijdserie bevat significante uitschieters”. Voor het gemak is in het vervolg echter alleen sprake van “stabiele” en “instabiele” peilmerken.

Meetreeksen van instabiel geclassificeerde peilmerken moeten dus met de grootste zorg worden geïnterpreteerd, omdat deze niet gedetecteerde, maar buitengewoon significante meetfouten kunnen bevatten. Dat kan ook tot gevolg hebben, dat de aansluiting van InSAR aan de waterpassing in sommige gevallen tot onbruikbare resultaten leidt (zie Figuur 31 op blz. 45).

De stabiliteitsaanname is gebaseerd op een ruimte-tijd analyse van alle waarnemingen tussen 1964 en 2013, waarbij een peilmerk als stabiel wordt beschouwd, als de geschatte afwijking van de door naburige peilmerken bepaalde trend steeds kleiner is dan 20 mm. Daarboven worden ook peilmerken als instabiel geclassificeerd, die in verband staan met geschatte waarnemingsfouten, identificatiefouten en temporele discontinuïteiten (“verstoringen”) vanaf 20 mm of afwijkende dalingssnelheden ten opzichte van de ruimtelijke trend met geschatte waarden vanaf 2 mm/a.

4 Combinatie

Bij een overstap naar InSAR moeten de metingen van waterpassing en InSAR met elkaar worden gecombineerd, om de historische tijdseries te kunnen voortzetten.

Door waterpassing en InSAR worden niet dezelfde meetpunten waargenomen (peilmerken versus Persistent Scatterers). Om een combinatie mogelijk te maken, wordt aangenomen, dat de gemiddelde beweging van alle PS binnen een straal van 500 m rond een peilmerk gelijk is aan de beweging van het peilmerk zelf. Zodoende worden InSAR tijdseries in de peilmerk-gewijs tijdseries van waterpassingen geïntegreerd en in een gecombineerde differentiestaat gerapporteerd (zie bijlage A.2). Aandachtspunten zoals referentie, koppeling van tijdseries en congruentie van peilmerk- en PS locaties worden in het vervolg nader geadresseerd.

4.1 InSAR referentie in de ruimte

Om de InSAR metingen met de waterpassing te kunnen combineren of vergelijken, moet een identieke ruimtelijke referentie gewaarborgd zijn. Daarom wordt op de InSAR deformatie tijdseries nog de volgende datumtransformatie uitgevoerd, voordat zij met waterpasdata worden gecombineerd: De mediaan van de tijdseries van alle PS binnen een straal van 1 km rond het referentiepeilmerk van de waterpassing (mediaan in de ruimte, berekend per epoeche) wordt van de tijdseries van alle PS in het rapportagegebied afgetrokken. Verondersteld, dat de gemiddelde beweging van de PS in de nabijheid van het referentiepeilmerk gelijk is aan de beweging van het peilmerk zelf, heeft de resulterende InSAR deformatie dezelfde ruimtelijke referentie als de waterpassing.

4.2 Aansluiting van tijdseries op elkaar

Om tijdseries van waterpassing en InSAR op elkaar aan te sluiten, moeten peilmerken en geassocieerde PS tegelijkertijd zijn waargenomen. Vervolgens kan uit de differenties op alle tijdstippen van gelijktijdige waarneming een onderlinge offset worden geschat en toegepast.

Van tevoren moeten echter waarnemingen van verschillende InSAR satellieten onderling worden gecombineerd. Alleen waarnemingen van ERS-1 en ERS-2, die vanuit precies dezelfde baan zijn gemaakt, kunnen direct worden gecombineerd op basis van de ruwe meetgegevens. Waarnemingen van de overige satellieten en opnames van verschillende banen kunnen alleen worden gecombineerd (aangesloten) op het niveau van berekende deformatie tijdseries. Zoals bij de aansluiting van InSAR aan de waterpassing wordt hier ook uit de differenties in de overlappende periode een onderlinge offset geschat en toegepast.

Omdat tussen ERS-1/2 en Envisat een overlappende periode ontbreekt (zie Figuur 1 op blz. 6), is een aansluiting zonder aanname van een vloeiend gedrag niet mogelijk. Omdat deze aanname in sommige delen van het rapportagegebied niet aanvaardbaar is, is in tegenstelling tot een eerdere rapportage (NAM, 2012) ervoor gekozen, de deformatiemetingen van ERS-1/2 en Envisat/Radarsat-2 als aparte tijdseries te beschouwen en geen onderlinge aansluiting voor te nemen. Deze keuze heeft de volgende consequenties:

- Voor peilmerken, die tussen 1992 en 2000 voor het laatst zijn waargenomen, worden één of twee aparte tijdseries aangeleverd (waterpassing/InSAR tot 2000 en InSAR vanaf 2003).
- Voor peilmerken, die na 2003 voor het eerst zijn waargenomen, worden één of twee aparte tijdseries aangeleverd (InSAR 1992 tot 2000 en waterpassing/InSAR vanaf 2003).
- Voor peilmerken, die voor 1992 zijn vervallen, worden één tot drie aparte tijdseries aangeleverd (waterpassing, InSAR 1992 tot 2000 en InSAR vanaf 2003).

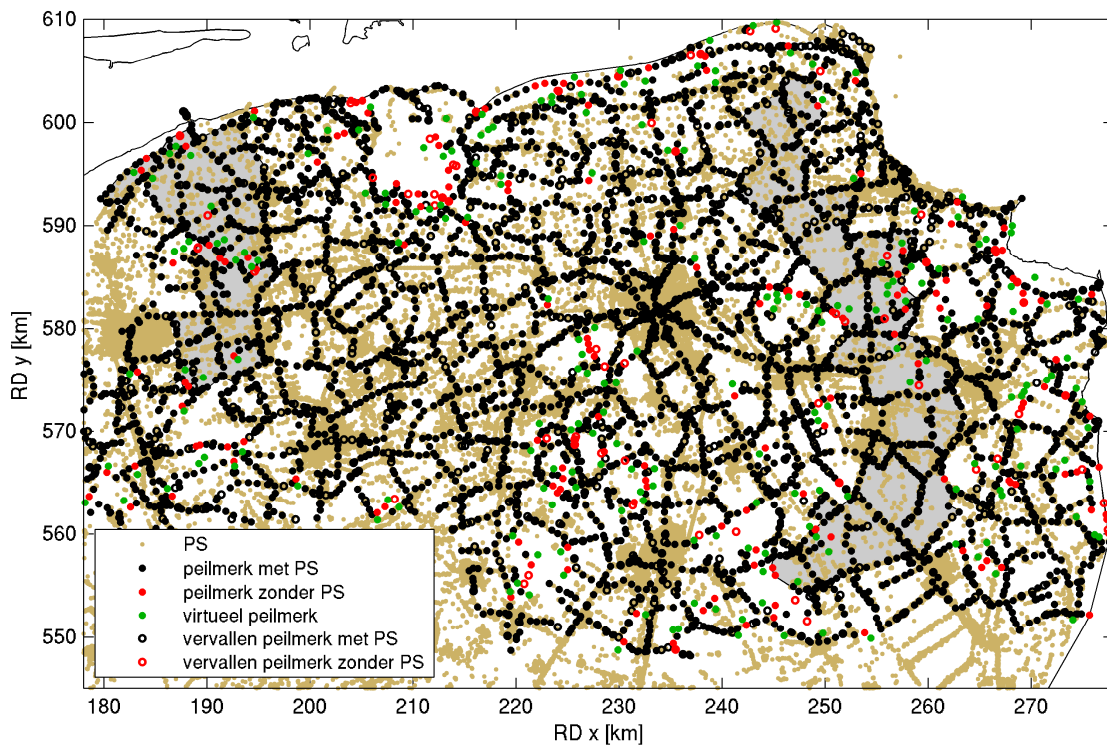
De combinatie procedure is in detail beschreven in bijlage D.

4.3 Virtuele peilmerklocaties

De bemonstering van het rapportagegebied met peilmerken en PS is niet congruent, d.w.z. dat er peilmerken bestaan, waarbij binnen een straal van 500 m de PS ontbreken. Er zijn ook gebieden met PS-bedekking, waar niet is gewaterpast (zie Figuur 6). Aangezien deformatie tijdseries per peilmerk worden gerapporteerd, kan op grond van ontbrekende PS in de onmiddellijke omgeving van sommige peilmerk locaties geen InSAR deformatie voor 2013 worden gerapporteerd. Dit betreft ongeveer 3,6 % van de niet vervallen peilmerken in het overlappend gebied met de InSAR beelden.

Door het rapporteren van InSAR op peilmerk locaties is de dichtheid van bodemdalingsmetingen dus kleiner dan door waterpassing zou kunnen worden behaald. Om dit tekort te compenseren, worden op verzoek van SodM voor alle peilmerken zonder Radarsat-2 PS binnen een straal van 500 m, indien mogelijk, zogenoemde virtuele peilmerklocaties, gedefinieerd. Deze mogen niet verder dan 2 km van het corresponderende fysieke peilmerk verwijderd zijn, en er moeten binnen een straal van 500 m PS bestaan, die tevens buiten een buffer van eveneens 500 m rond alle andere peilmerken liggen. Op deze virtuele locaties, die alleen voor 0,5 % van alle niet vervallen peilmerken in het met de InSAR beelden overlappend gebied niet konden worden gedefinieerd, wordt uitsluitend InSAR deformatie van de nabije PS gerapporteerd. Virtuele peilmerk locaties zijn in de bijgevoegde bestanden door het achtervoegsel “v” aan het peilmerknummer gekenmerkt.

Met inachtneming van de virtuele peilmerk locaties is dus de bedekking door InSAR bijna even dicht als die van waterpassing. Echter, de schijnbaar geringere dichtheid heeft vooral te maken met het rapporteren per peilmerk. De volledige InSAR deformatie wordt PS gewijs met een adequate dekking (zie Figuur 2) aanvullend gerapporteerd (zie bijlage A.1).



Figuur 6: Ruimtelijke verdeling van InSAR Persistent Scatterers (Radarsat-2), peilmerken met minimaal 1 PS binnen een straal van 500 m, peilmerken zonder PS binnen deze straal en virtuele peilmerklocaties. Door niet gevulde kringen gemarkeerde peilmerken zijn vervallen.

5 Validatie

De InSAR resultaten voor Noord-Nederland worden gevalideerd aan de hand van waterpassing in de twee validatiegebieden “Groningen/Drenthe” en “Friesland” (zie Figuur 4). Daarbij worden alleen stabiel veronderstelde peilmerken gebruikt (zie paragraaf 3.2), zodat de validatie van InSAR metingen zo min mogelijk verstoord wordt door tekortkomingen van de waterpassing. De validatie wordt verder beperkt tot de InSAR missies Envisat en Radarsat-2, omdat het tijdsgat tussen ERS-1/2 en Envisat (zie Figuur 1) niet zonder, niet valideerbare, aannames kan worden overbrugd. Aangezien de Envisat opnames in december 2003 zijn begonnen, komen de waterpassingen uit de jaren 2003, 2008 en 2013 in aanmerking voor de validatie.

5.1 Validatiemethodiek

Er zijn een aantal uitdagingen bij een strenge validatie. Ten eerste zijn alle metingen met welke techniek dan ook relatief ten opzichte van elkaar. Peilmerken kunnen dus niet los van elkaar kunnen worden beschouwd, en de validatie moet bijvoorbeeld paarsgewijs gebeuren. Verder zijn de metingen statistisch niet onafhankelijk van elkaar. Een strenge validatie zou daarom betekenen, dat alle metingen simultaan zouden moeten worden getoetst met één allesomvattende uitslag voor het hele validatiegebied.

Het nadeel van deze meest strenge aanpak is, dat hij weinig transparant is. Complexiteit, onzekerheden en onvolmaaktheden van het onderliggende kansmodel maken de toetsing ingewikkeld en de uitkomst weinig begrijpelijk. Er is bovendien geen mogelijkheid, om uitspraken over individuele peilmerken te maken. Daarom is ervoor gekozen, de hoogteverschillen van alle peilmerken ten opzichte van één uniek referentiepeilmerk individueel te toetsen. Er worden dus in ruimte en tijd gedifferentieerde hoogteverschillen (dubbel-differenties) uit waterpassing en InSAR met elkaar vergeleken. Bij deze manier van toetsen wordt er één toetsgrootte per peilmerk berekend, en overeenkomst van de twee meettechnieken kan worden geconcludeerd, als deze toetsgrootte beneden een grenswaarde valt.

Er zijn echter ook nadelen verbonden aan deze aanpak. Gezien correlaties tussen peilmerken worden verwaarloosd, kan het gebeuren, dat overeenkomst tussen de twee meettechnieken voor de dubbel-differenties van twee peilmerken ten opzichte van het referentiepeilmerk wél kan worden geconcludeerd maar niet voor de dubbel-differentie tussen de twee peilmerken onderling. Het tegenovergestelde is ook mogelijk: Onregelmatigheden bij de waarneming van het referentiepeilmerk kunnen de toetsen van alle peilmerken in gelijke mate verstoren.

5.2 Vergelijking van dubbel-differenties

De met waterpassing en InSAR gemeten hoogteverschillen worden in ruimte en tijd (dus dubbel) gedifferentieerd en met elkaar vergeleken in twee validatiegebieden (Groningen/Drenthe en Friesland) en voor twee validatietijdvakken (2003-2013 en 2008-2013). Daarbij wordt per validatiegebied een uniek referentiepeilmerk gebruikt. De dubbel-differenties uit waterpassingen kunnen direct uit de epoche-wijze vereffeningen worden afgeleid. De dubbel-differenties uit InSAR worden op dezelfde manier berekend als de in de opgeleverde differentiestaten gerapporteerde jaarlijks gemiddelde InSAR deformatie (zie hoofdstuk 4 en bijlage A.2). In tegenstelling tot de

differentiestaten wordt de hier gebruikte InSAR deformatie precies op de gemiddelde tijdstippen van de waterpassingen berekend, zoals gevisualiseerd in Figuur 40 (zie blz. 53).

De statistische toetsing wordt dus uitgevoerd voor alle dubbel-differenties van stabiele peilmerken binnen de validatiegebieden. De aantallen per validatiegebied en validatietijdvak verschillen (zie Tabel 2), omdat niet alle peilmerken op alle tijdstippen met beide technieken zijn waargenomen. De definitie van een dubbel-differentie DD tussen peilmerk i en het referentiepeilmerk ref voor het tijdvak t_1 - t_2 is gebaseerd op individuele hoogtes H als volgt:

$$DD_{ref,i}^{t_1,t_2} = (H_i^{t_2} - H_{ref}^{t_2}) - (H_i^{t_1} - H_{ref}^{t_1}) .$$

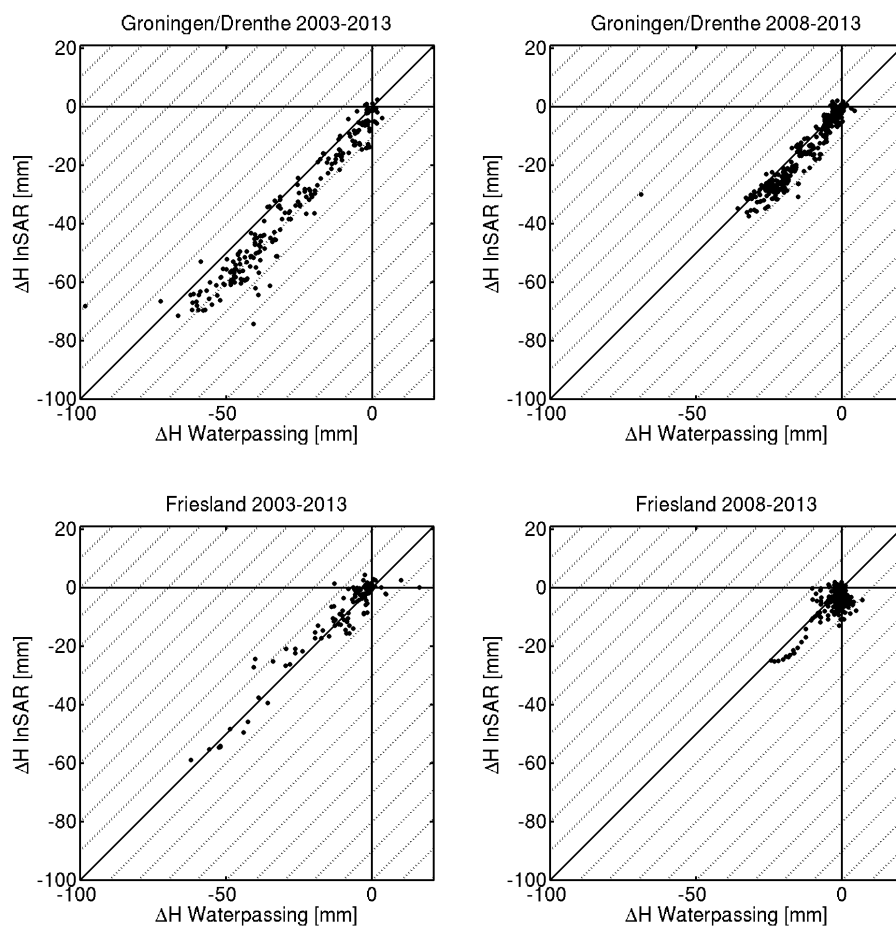
Met de corresponderende standaarddeviaties (zie bijlage F) kan statistisch worden getoetst, of de hoogteverschillen significant van elkaar afwijken. De hiervoor toepasbare toetsgrootheid:

$$T = \frac{DD_{PS} - DD_{WP}}{\sqrt{\sigma_{DD_{WP}}^2 + \sigma_{DD_{PS}}^2}} \sim N(0,1)$$

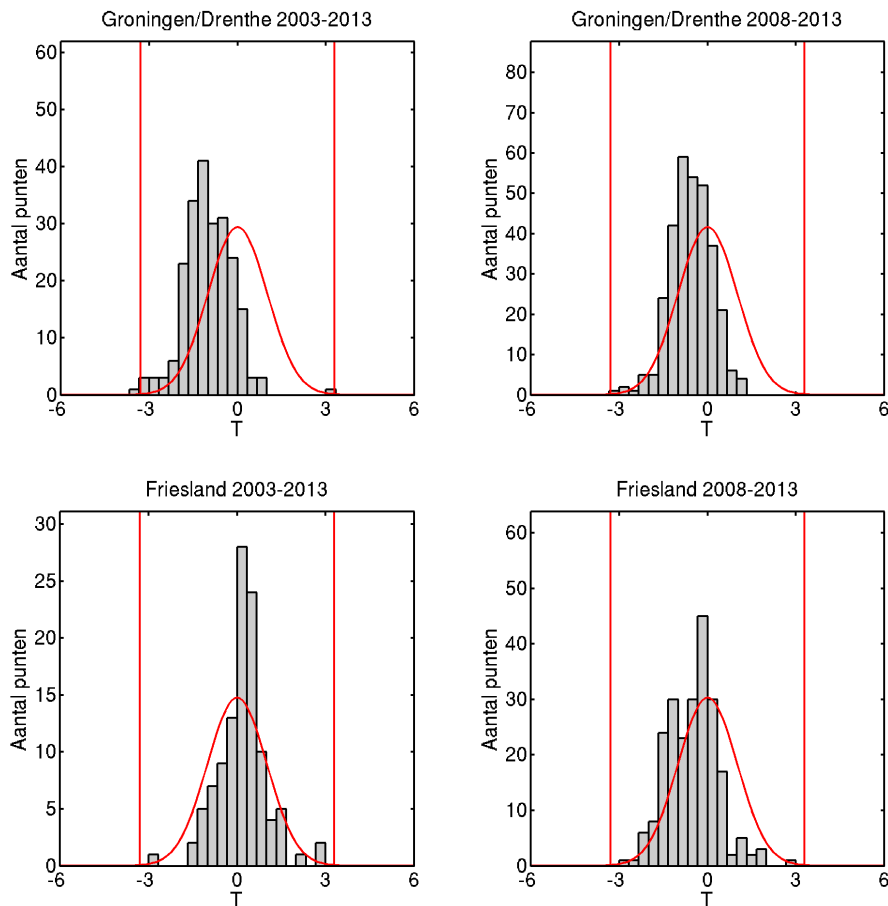
met dubbeldifferenties uit waterpassing (WP) en InSAR (PS) is standaard-normaal verdeeld, indien de waarnemingen zelf normaal verdeeld zijn. Door dit te veronderstellen, wordt een significante afwijking vastgesteld, als de toetsgrootheid buiten het interval $[-3,29; 3,29]$ komt te liggen. Significant betekent hier, dat, indien geen sprake is van een afwijking, in slechts 0,1 % van de gevallen een foutieve conclusie wordt getrokken. De resultaten van de vergelijking zijn te vinden in Tabel 2 en Figuur 7. De toetsresultaten zijn gevisualiseerd in Figuur 8.

Tabel 2: Vergelijking van dubbel-differenties en evaluatie van toetsgrootheden.

Validatiegebied	Groningen/Drenthe		Friesland	
Referentiepeilmerk	000A2080 (Gasselte)		000A2050 (Damwoude)	
Tijdvak	2003-2013	2008-2013	2003-2013	2008-2013
Aantal dubbel-differenties	221	314	111	228
$ \Delta H_{PS} - \Delta H_{WP} > 1,0 \text{ cm}$	57	4	4	7
$ \Delta H_{PS} - \Delta H_{WP} > 1,5 \text{ cm}$	14	2	2	0
$ \Delta H_{PS} - \Delta H_{WP} > 2,0 \text{ cm}$	5	1	0	0
$ T > 3,29$	1	1	0	0



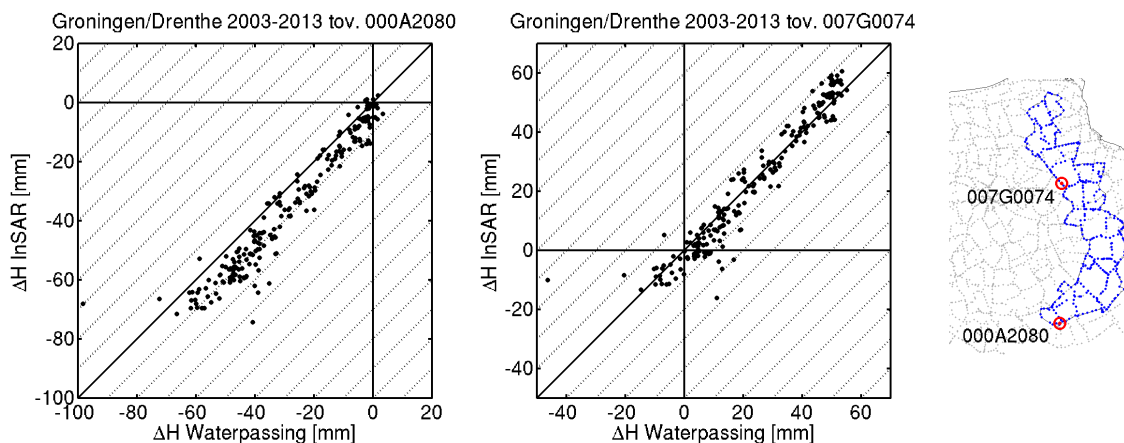
Figuur 7: Vergelijking van hoogteverschillen uit waterpassing en InSAR voor de twee validatiegebieden Friesland en Groningen/Drenthe, de twee tijdvakken 2003-2013 en 2008-2013.



Figuur 8: Toetsgrootheden ter vergelijking van hoogteverschillen uit waterpassing en InSAR voor de twee validatiegebieden Groningen/Drenthe en Friesland evenals de twee tijdvakken 2003-2013 en 2008-2013. Deze histogrammen visualiseren in feite de relatieve afwijkingen in hoeveelheden van de standaardafwijking.

Uit de statistische beschouwing blijkt een goede overeenkomst tussen de twee meettechnieken. Bijna alle toetsgrootheden zijn kleiner dan de kritieke waarde 3,29, waaruit volgt, dat de afwijkingen statistisch niet significant zijn. Behalve voor het validatiegebied Groningen/Drenthe, tijdvak 2003-2013, zijn bovendien de meeste afwijkingen kleiner dan 1 cm (zie Tabel 2).

Het is opvallend, dat in het validatiegebied Groningen/Drenthe de uit InSAR bepaalde hoogteverschillen tussen 2003 end 2013 systematisch minder lijken te groeien dan de gewaterpaste en een kwart van de afwijkingen groter is dan 1 cm. Dit heeft te maken met de keuze van het referentiepunt. Gezien het om de vergelijking van in de tijd gedifferentieerde hoogteverschillen gaat, is het niet noodzakelijk, om een referentiepunt in een stabiel gebied te kiezen. Worden bijvoorbeeld dubbel-differenties ten opzichte van het arbitrair gekozen peilmerk 007G0074 berekend (zie Figuur 9), valt geen systematische afwijking meer te herkennen, en slechts 12 van de 221 afwijkingen zijn groter dan 1 cm.



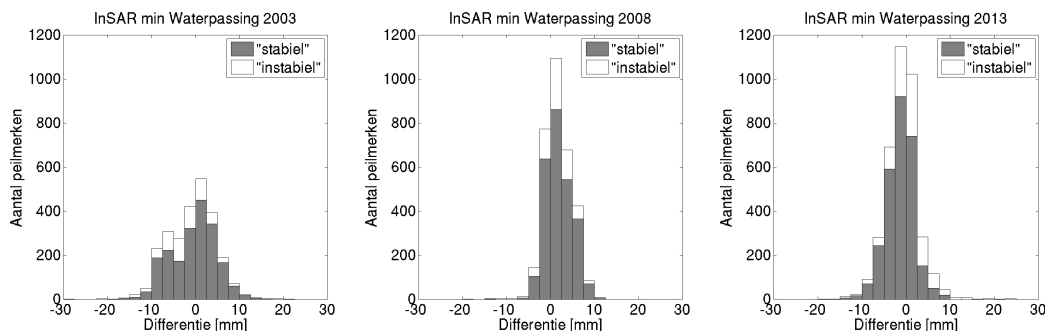
Figuur 9: Vergelijking van hoogteverschillen uit waterpassing en InSAR voor het validatiegebied Groningen/Drenthe, het tijdvak 2003-2013 en twee verschillende referentiepunten: 000A2080 en 007G0074.

De keuze van het bij de vorming van de dubbel-differenties gekozen referentiepeilmerk kan het totaalbeeld van de afwijkingen dus significant beïnvloeden. Dit heeft ermee te maken, dat bij een peilmerk-gewijze vergelijking ruimtelijke correlaties buiten beschouwing blijven. Deze kunnen in beide technieken optreden en zijn te wijten aan ruimtelijke foutenvoortplanting in een waterpasnetwerk of filtering van de atmosferische contributie (zie bijlage E.1.1). Daarom lijken de dubbel-differenties in sommige gebieden van het validatiegebied een consistente offset ten opzichte van andere gebieden te hebben. Een dergelijke offset is geen indicatie voor een onregelmatigheid maar wel door het kansmodel verklaarbaar. Dit zou ook kunnen optreden bij de vergelijking van twee onafhankelijke reeksen van waterpassingen.

In de Figuren 7 en 9 valt in het validatiegebied Groningen/Drenthe een peilmerk op met een buitengewoon grote afwijking van 30 mm (2003-2013) en 38 mm (2008-2013). Deze wordt geadresseerd in bijlage B.2 (zie Figuur 34).

5.3 Kwaliteit van inpassing

De hierboven gepresenteerde vergelijking is dusdanig, dat alleen de InSAR hoogteverschillen zelf worden gevalideerd maar niet de inpassing van InSAR in de gecombineerde tijdseries. Om aan te tonen, dat de combinatie procedure tot consistente tijdseries leidt, geeft Figuur 10 een overzicht over de residu's van de aansluiting volgens de in bijlage D beschreven procedure.



Figuur 10: Residu's van de aansluiting van de peilmerk-gewijs InSAR tijdseries aan de waterpassing (zie ook Figuur 40 op blz. 53).

In 2003 is de afwijking van de berekende en ingepaste InSAR deformatie ten opzichte van de waterpassing bij 3,5 % op stabiel veronderstelde peilmerken groter dan 1 cm (2008: 0,3 %, 2013: 0,8 %). De grotere afwijking in 2003 is verklaarbaar door de manier van inpassen door middel van extrapolatie van de InSAR deformatie met een periode van een half jaar kijkend naar het verleden (zie Figuur 40 op blz. 53). Bij één enkel stabiel verondersteld peilmerk is de afwijking in 2003 groter dan 2 cm (2008: geen peilmerk, 2013: 1 peilmerk). De maximale afwijking op stabiel veronderstelde peilmerken is 21 mm. Daaruit kan worden geconcludeerd, dat de kwaliteit van inpassing voldoende is, om de continuïteit van de tijdseries in adequate mate te waarborgen.

5.4 GPS

In het meetplan is aangegeven, dat ook permanente GPS stations worden gebruikt, om de InSAR metingen te valideren. Op dit moment zijn 14 monitoringstations in het rapportagegebied geïnstalleerd (zie Figuur 35 op blz. 48): Twee zijn geïnstalleerd in 2006, twee in 2013 en tien in 2014. De metingen van de in 2014 geplaatste stations hebben minder dan vier maanden overlap met InSAR en zijn daarom niet geschikt voor een validatie (zie Figuur 1 op blz. 6). Daarom komen alleen de vier oudere stations (Anjum, Moddergat, Ten Post en Veendam) voor de validatie in aanmerking.

Zoals bij de vergelijking met de waterpassing wordt voor PS binnen een straal van 500 m rond de GPS stations verondersteld, dat hun beweging gelijk is aan de beweging van de GPS antenne. Voor het station Moddergat ontbreken PS binnen deze straal, zodat geen vergelijking mogelijk is. Een vergelijking tussen GPS en waterpassing is eveneens niet mogelijk, omdat geen peilmerk dichterbij 500 m bij een GPS station ligt.

Gezien de kleine hoeveelheid aan validatiepunten en de complexiteit van de kansmodellen van én InSAR én GPS is voor een uitsluitend grafische vergelijking gekozen. In bijlage B.3 worden de gecombineerde tijdseries van InSAR en GPS getoond. Uit de grafieken blijkt, dat de met deze twee technieken gemeten deformatie in goede overeenkomst is.

6 Conclusies en vooruitzicht

De resultaten van de validatie, InSAR met waterpassing, bevestigen dat met InSAR een met de waterpassing vergelijkbare nauwkeurigheid te behalen is. De ruimtelijke dichtheid in Noord-Nederland is minimaal vergelijkbaar met de waterpassing en daarom voldoende, om de diepe bodemdaling te monitoren, en de temporele dichtheid is aanzienlijk hoger.

Zowel voor waterpassing als InSAR geldt, dat vanwege versturende effecten zoals zetting van gebouwen en veencompactie niet voor elk punt de gemeten deformatie representatief is voor de diepe bodemdaling. Voordeel van InSAR is, dat het vaak van de grote hoeveelheid aan PS kan profiteren, waarbij de invloed van autonome bewegingen op de gemiddelde deformatie van meerdere punten beperkt is. Bij waterpassing worden soms significante autonome bewegingen gedetecteerd, hoewel de meeste peilmerken in goed gefundeerde bouwwerken geplaatst zijn. Bovendien kunnen identificatiefouten in de meting tot een waargenomen instabiel gedrag bijdragen, omdat epoche-wijze vereffeningen deze niet kunnen detecteren.

Op dit moment moeten 15 % van de gerapporteerde peilmerken voor twee mogelijke redenen als onbetrouwbaar worden beschouwd: Of zij tonen een autonoom (d.w.z. niet representatief) bewegingsgedrag, of er is in het veld in minimaal één meetcampagne een ander peilmerk waargenomen, dat niet bij het peilmerknnummer past. Voorlopig is ervoor gekozen, om deze peilmerken als “instabiel” te classificeren en mee te rapporteren, omdat zij onontbeerlijk bleken, om de bodemdaling boven sommige gasvelden (bv. Grootegast) te monitoren. Een bij een instabiel verondersteld peilmerk behorende meetreeks zou dus individueel moeten worden bekeken, voordat zij voor uitspraken over de bodemdaling kan worden gebruikt.

Voor de toekomst is het de bedoeling, de stabiliteitsanalyse dusdanig te optimaliseren, dat minder peilmerken vanwege een identificatiefout in een enkele meetcampagne globaal als onbetrouwbaar (“instabiel”) moeten worden beschouwd en uitspraken over betrouwbaarheid ook op het niveau van een individuele meting kunnen worden gemaakt. Daarnaast wordt gewerkt aan een verbeterd kansmodel voor én waterpassing én InSAR.

De hogere temporele dichtheid van InSAR biedt de mogelijkheid om jaarlijks de geactualiseerde deformatie schattingen te rapporteren. Op termijn zal van de Radarsat-2 monitoring worden overgestapt naar beelden van de ESA satellieten Sentinel-1a en Sentinel-1b. Sentinel-1a is in april 2014 gelanceerd, en in oktober 2014 is met de opbouw van een nieuwe tijdserie van Noord-Nederland begonnen, die aan de Radarsat-2 tijdserie kan worden aangesloten.

Bijlagen

A Geleverde data

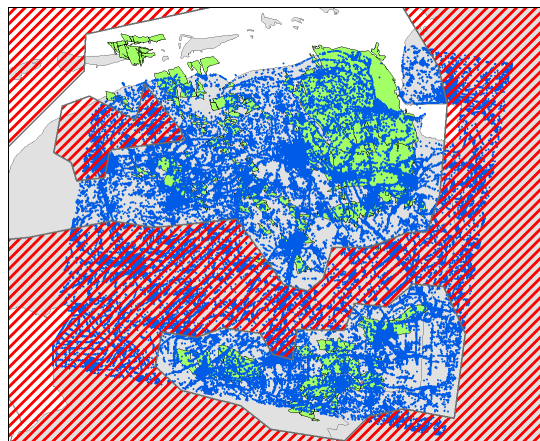
Het meetregister Noord Nederland 2014 bevat naast dit rapport een aantal digitaal opgeleverde bestanden. Deze zijn in deze bijlage gespecificeerd.

A.1 InSAR differentiestaat

De resultaten van de InSAR analyse (Radarsat-2, 2009-2014) per epoche zijn aangeleverd in de vorm van een differentiestaat naast toelichting in een “leesme” bestand:

```
radarsat2_desc_groningen_nl_vertical_201409.zip  
radarsat2_desc_groningen_nl_vertical_201409.txt  
radarsat2_desc_groningen_nl_vertical_201409.leesme.txt
```

De differentiestaat omvat tijdseries met de naar de verticaal geconverteerde deformatie schattingen (zie paragraaf 2.3.2) van alle geselecteerde PS (zie paragraaf 2.3.1). Op het tijdstip van de eerste opname is de deformatie op nul gezet. De referentie in ruimte is de gemiddelde deformatie van een stabiel verondersteld gebied (zie Figuur 11).



Figuur 11: Stabiel verondersteld gebied, dat voor de originele InSAR resultaten de referentie in de ruimte vormt. De definitie is gebaseerd op ligging van de gasvelden (NAM-gasvelden hier in groen), bestaande geomechanische modellen en indicaties uit bestaande geodetische waarnemingen. N.B.: Dit gebied stelt níét de referentie van met waterpassing gecombineerde InSAR tijdseries voor (paragrafen 4 en 5 evenals bijlagen A.2, A.3, A.4, A.5, B.1 en B.2); de referentie van met waterpassing gecombineerde differentiestaten en visualisatieplaatjes is altijd het referentiepeilmerk van de waterpassing (zie paragraaf 4.1).

A.2 Gecombineerde differentiestaten

Voor het hele rapportagegebied zijn differentiestaten met gecombineerde tijdseries uit waterpassen en InSAR opgeleverd, waarbij de InSAR deformatie schattingen in de tijdseries van de waterpas peilmerken geïntegreerd zijn. Het gebied is onderverdeeld in drie deelgebieden met verschillende referentiepeilmerken, die bij de aparte differentiestaten horen (zie Figuur 3 op blz. 10). De betekenis van de kolommen is in een “leesme” bestand verklaard. Zie bestanden:

```
differentiestaten.zip  
000A2050_1964-01-01_NoordNederland2014.csv  
000A2080_1964-01-01_NoordNederland2014.csv  
006B0021_1964-01-01_NoordNederland2014.csv  
00000000_1964-01-01_NoordNederland2014.leesme.csv
```

De differentiestaten bevatten tijdseries voor alle peilmerken, die tenminste twee keer zijn aangemeten. De combinatie met InSAR volgt de in bijlage D toegelichte procedure.

De InSAR tijdseries per peilmerk worden berekend als mediaan van de individuele tijdseries van alle (dus minimaal één) PS binnen een straal van 500 m. Om de hoeveelheid aan data te beperken en de precisie te verhogen, worden niet alle beschikbare waardes geïntegreerd, maar alleen de gemiddelde deformatie voor gedefinieerde, opeenvolgende tijdvakken van een jaar. Indien binnen een tijdvak minder dan drie InSAR acquisities plaatsvonden, wordt de gemiddelde deformatie als onvoldoende betrouwbaar beschouwd en daarom niet gerapporteerd.

A.3 Verschilkaarten

De gerapporteerde differenties tussen 2008 en 2013 uit InSAR en waterpassing zijn voor de drie deelgebieden (zie Figuur 3 op blz. 10) in kaart gebracht:

```
Meetregister_NoordNederland_2014_deel_Friesland.pdf  
Meetregister_NoordNederland_2014_deel_Groningen.pdf  
Meetregister_NoordNederland_2014_deel_Lauwersmeer.pdf
```

A.4 Visualisatie tijdseries peilmerken

Voor alle peilmerken in het rapportagegebied zijn grafieken opgeleverd, die de gecombineerde tijdseries van waterpassing en InSAR visualiseren:

```
visualisatie.zip  
{peilmerknummer}_{referentiepeilmerk}.png
```

De gebruikte symboliek is toegelicht in bijlage C. De combinatie van tijdseries en meettechnieken volgt de in bijlage D beschreven procedure. Figuur 3 (zie blz. 10) laat de indeling van het rapportagegebied in drie deelgebieden zien, waarop de toewijzing aan een referentiepeilmerk is gebaseerd.

Bij ieder plaatje hoort een overzichtskaart, waarop de locatie van het peilmerk met een magenta gekleurde punt is gemarkeerd. Verder worden de locaties van alle peilmerken binnen het deelgebied als zwarte punten getoond.

A.5 Visualisatie validatie

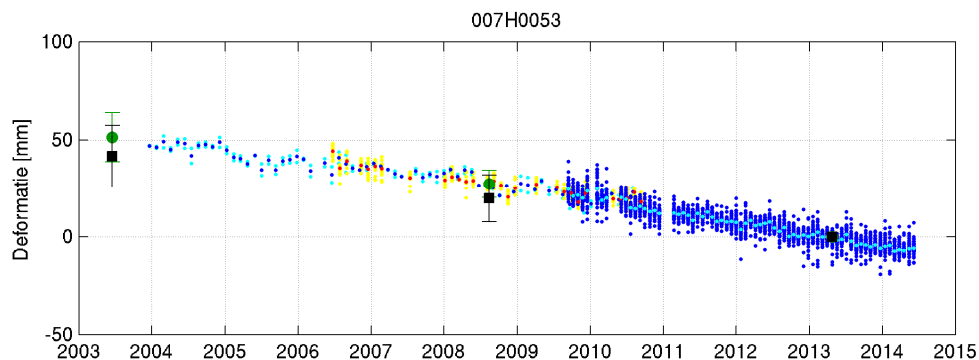
Om de ter validatie gebruikte data te visualiseren, zijn plaatjes voor alle peilmerken in de twee validatiegebieden opgeleverd, die tussen 2003 en 2013 ten minste twee keer zijn gewaterpast (428 peilmerken in Groningen/Drenthe en 294 peilmerken in Friesland):

```
validatie.zip  
{peilmerknnummer}_{referentiepeilmerk}.png
```

De gebruikte symboliek is toegelicht in bijlage C.

Niet alle peilmerken zijn in de validatie meegenomen. Zo zijn niet stabiel veronderstelde peilmerken (gekenmerkt door witte in plaats van zwarte vierkantjes) evenmin meegenomen als peilmerken, die niet met beide meettechnieken zowel in het begin als in het eind van het respectievelijk validatietijdvak zijn waargenomen.

Om de foutenbalken voor de twee validatietijdvakken (2003-2013 en 2008-2013) in één grafiek te kunnen tonen, is voor deze grafieken van de algemene combinatie procedure (zie bijlage D) afgeweken (zie Figuur 12). De waterpassing van 2013 is als referentie in de tijd gekozen, en de foutenbalken geven de standaarddeviatie van de verandering van het ruimtelijk hoogteverschil ten opzichte van 2013 aan. De InSAR tijdseries zijn onderling gecombineerd zoals aangegeven in de algemene combinatie procedure. Voor de aansluiting aan de waterpassing worden uitsluitend de metingen van 2013 gebruikt. De weergegeven deformatie is dus voor beide meettechnieken per definitie nul in 2013.



Figuur 12: Voorbeeld van de visualisatie van de ter validatie gebruikte data voor een arbitrair gekozen peilmerk.

A.6 Waterpassing

In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd van de waterpassing in de validatiegebieden Groningen/Drenthe en Friesland, die volgens het meetplan door de NAM zijn uitgevoerd (zie Figuur 4). Daarnaast wordt ook het verwerkingsprotocol van de integrale vereffening van heel Noord Nederland opgeleverd, waarbij de aanvullende waterpassingen door Rijkswaterstaat zijn meegenomen. Voor rapportage en validatie worden uitsluitend de resultaten van de integrale vereffening gebruikt.

A.6.1 Overzicht sectie- en trajectsluitfouten

In de bijgevoegde bestanden wordt op trajectnummer volgorde een overzicht gegeven van alle gemeten secties met de daarbij geconstateerde sectie- en trajectsluitfouten:

```
waterpassing.zip  
overzicht_sectie_en_trajectsluitfouten_friesland.txt  
overzicht_sectie_en_trajectsluitfouten_groningendrenthe.txt
```

Ter vergelijking zijn de toleranties in de laatste kolom vermeld. Alle secties en trajecten voldoen aan de eisen zoals genoemd in de besteisen van RWS-DID voor secundair optische waterpassingen.

A.6.2 Overzicht kringsluitfouten

Voor de twee validatiegebieden zijn overzichten over kringsluitfouten samengesteld, berekend door MOVE3. Zie bestanden:

```
waterpassing.zip  
overzicht_kringsluitfouten_friesland.txt  
overzicht_kringsluitfouten_groningendrenthe.txt
```

A.6.3 Resultaten eerste fase (vrije) vereffening

De resultaten van de eerste fase vereffening zijn opgeleverd én voor de twee validatiegebieden én voor heel noord Nederland. Zie bestanden:

```
waterpassing.zip  
vrijevereffening_friesland.txt  
vrijevereffening_groningendrenthe.txt  
vrijevereffening_noordnederland.txt
```

In de vereffeningen van de door de NAM uitgevoerde waterpassingen in de validatiegebieden Groningen/Drenthe en Friesland zijn alle W-toetsen geaccepteerd. In de vereffening van heel Noord Nederland is de W-toets voor een tiental secties niet geaccepteerd. Deze secties komen zijn onderdeel van twee aparte trajecten, en het falen van de W-toetsen is daarom mogelijk het resultaat van slechts twee uitschieters. Het is ervoor gekozen, om deze secties niet te verwijderen, omdat zij door Rijkswaterstaat zijn geaccepteerd en de grenswaarde slechts nipt is overschreden. Daarbij moet worden opgemerkt, dat in een netwerk met 5500 waarnemingen (met $\alpha = 0,1\%$) statistisch gezien al 5,5 goede waarnemingen als uitschieter worden geïdentificeerd, hoewel de metingen in orde zijn.

A.6.4 Differentiestaten

De in bijlage A.2 genoemde gecombineerde differentiestaten bevatten voor 2013 de resultaten van een omvattende vereffening van alle waterpassingen in heel Noord Nederland. Daarnaast zijn ook differentiestaten met de vereffeningsresultaten van de validatiegebieden opgeleverd, waarin de aanvullende waarnemingen door Rijkswaterstaat niet zijn meegenomen. De betekenis van de kolommen is in een “leesme” bestand verklaard. Zie bestanden:

```
waterpassing.zip  
000A2050__1900-01-01_SodM_Poly_GF2013_Frie.csv  
000A2080__1900-01-01_SodM_Poly_GF2013_Gron.csv  
00000000__1900-01-01_SodM_Poly_GF2013_leesme.txt
```

A.6.5 Kalibratie rapporten

De kalibratie rapporten van het gebruikte instrumentarium en baken zijn in het volgende bestand verzameld:

waterpassing.zip

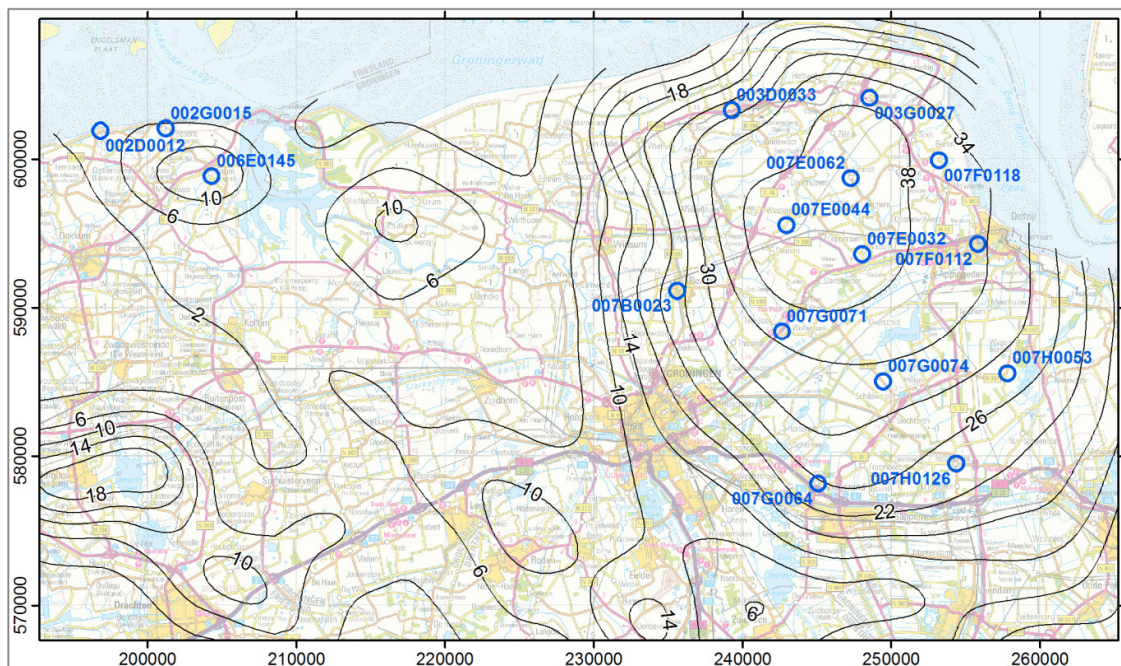
Calibratie_Meetapparatuur_GRN_FRL2013.zip

B Tijdséries

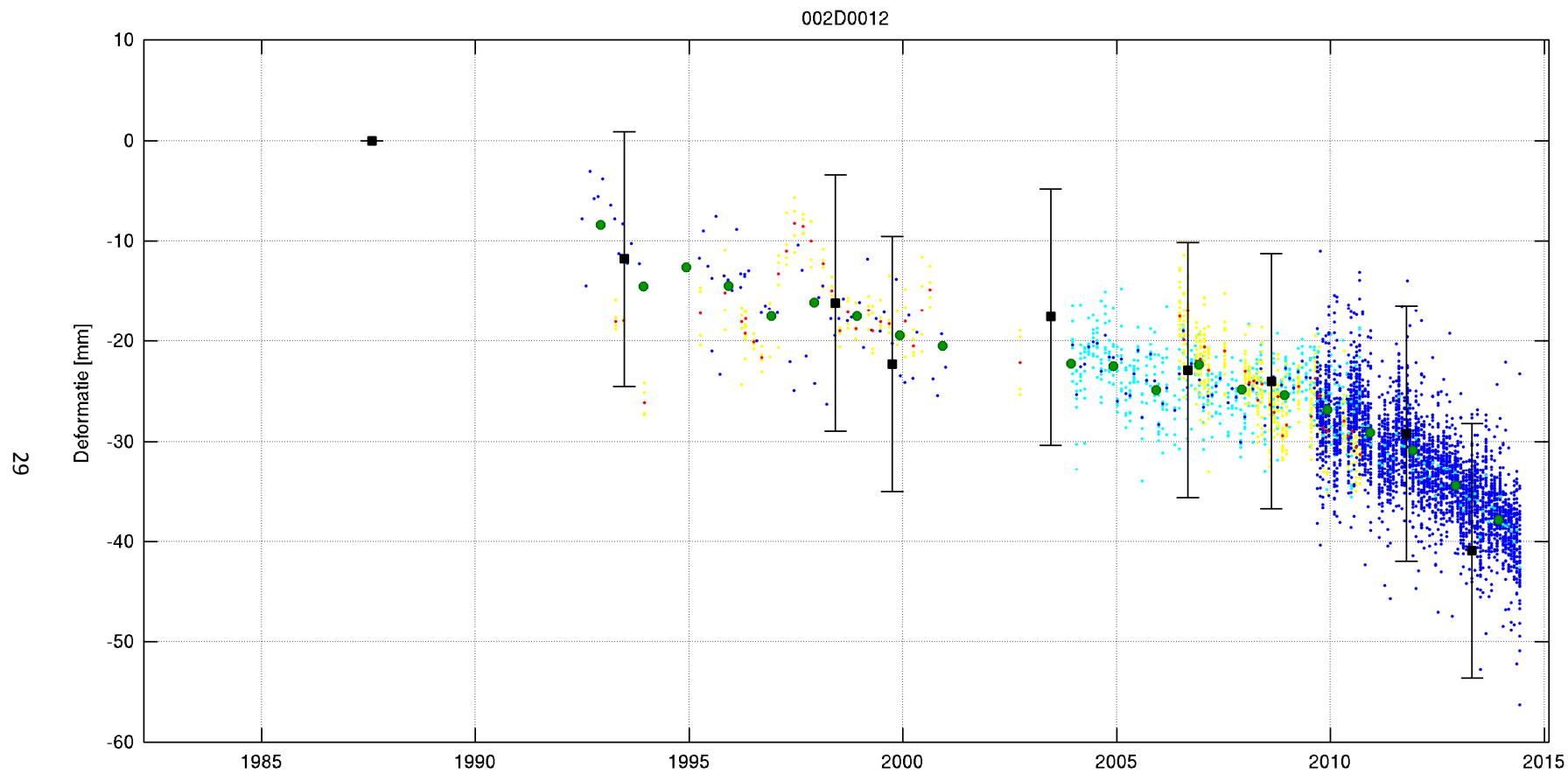
In deze bijlage zijn een aantal grafieken met tijdséries verzameld.

B.1 Geselecteerde peilmerken

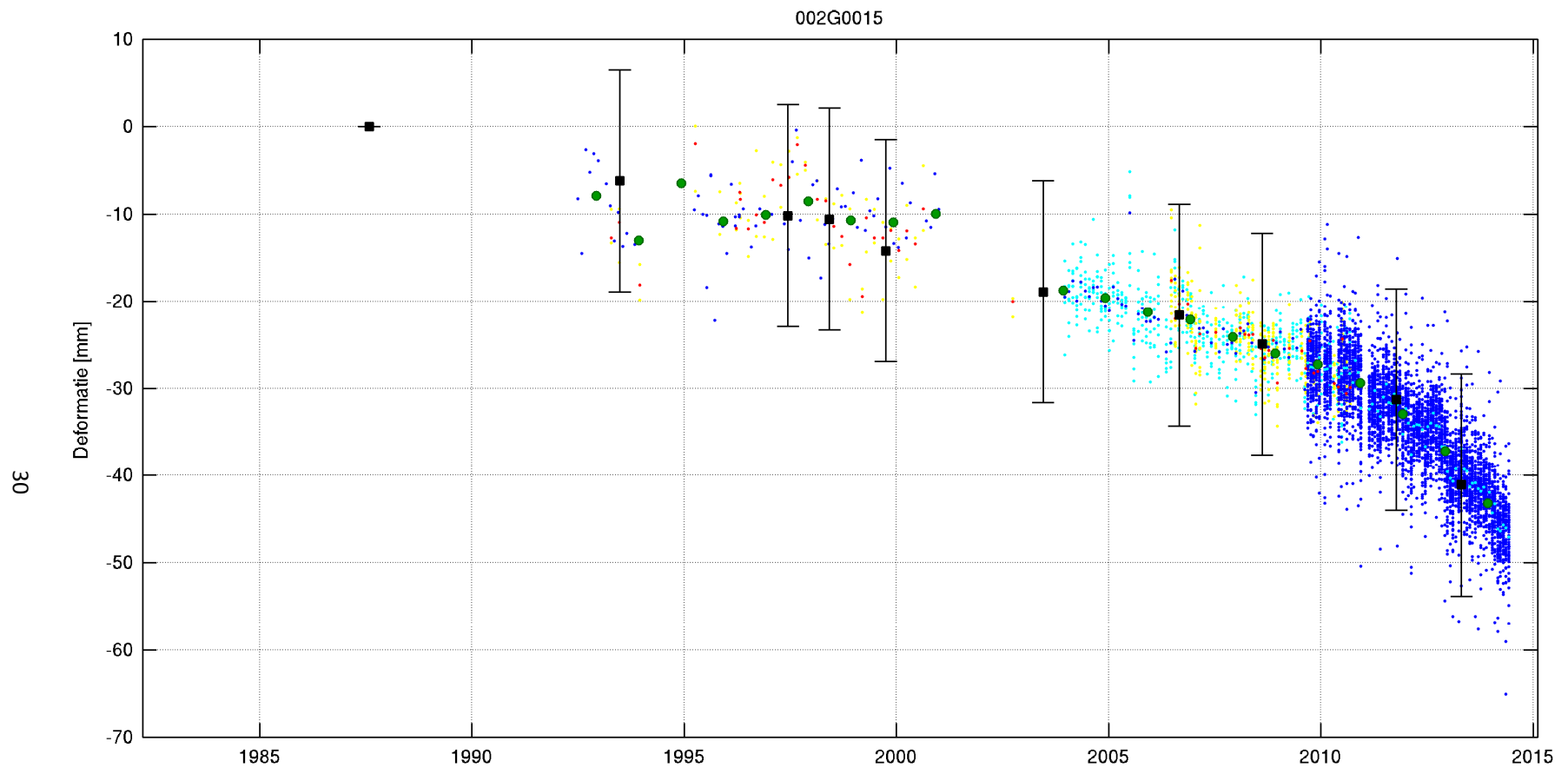
Op de volgende bladzijden worden de deformatie tijdséries van 16 geselecteerde peilmerken (zie Figuur 13) getoond, om een eerste indruk te geven over de resultaten van de combinatie van waterpassing en InSAR in het kader van dit meetregister. Grafieken met de deformatie tijdséries van alle peilmerken in het rapportagegebied zijn in vorm van beeldbestanden meegeleverd (zie bijlage A.3).



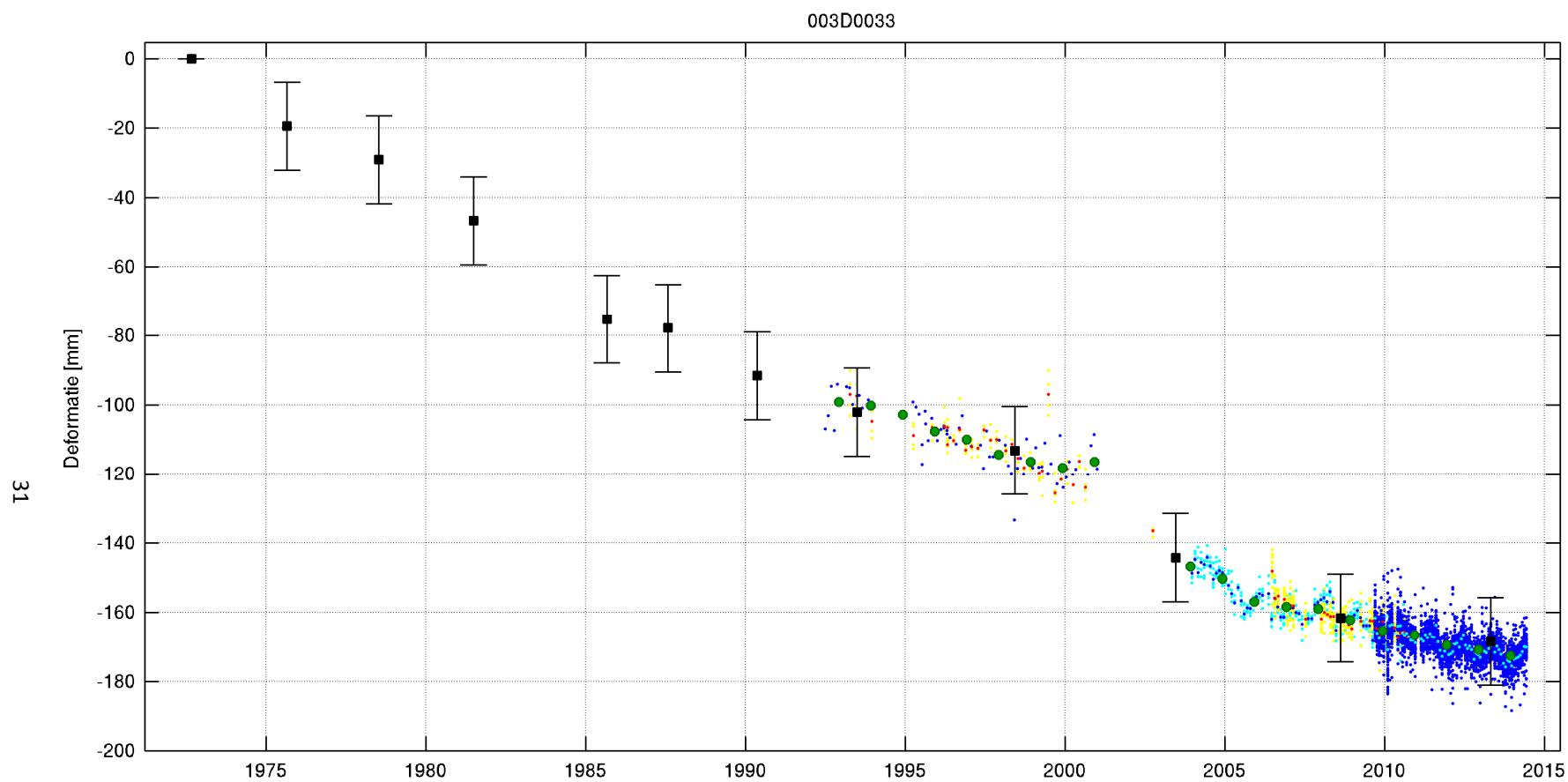
Figuur 13: Geselecteerde peilmerken; de blauwe cirkels geven een straal van 500 m rond de peilmerklocaties aan.



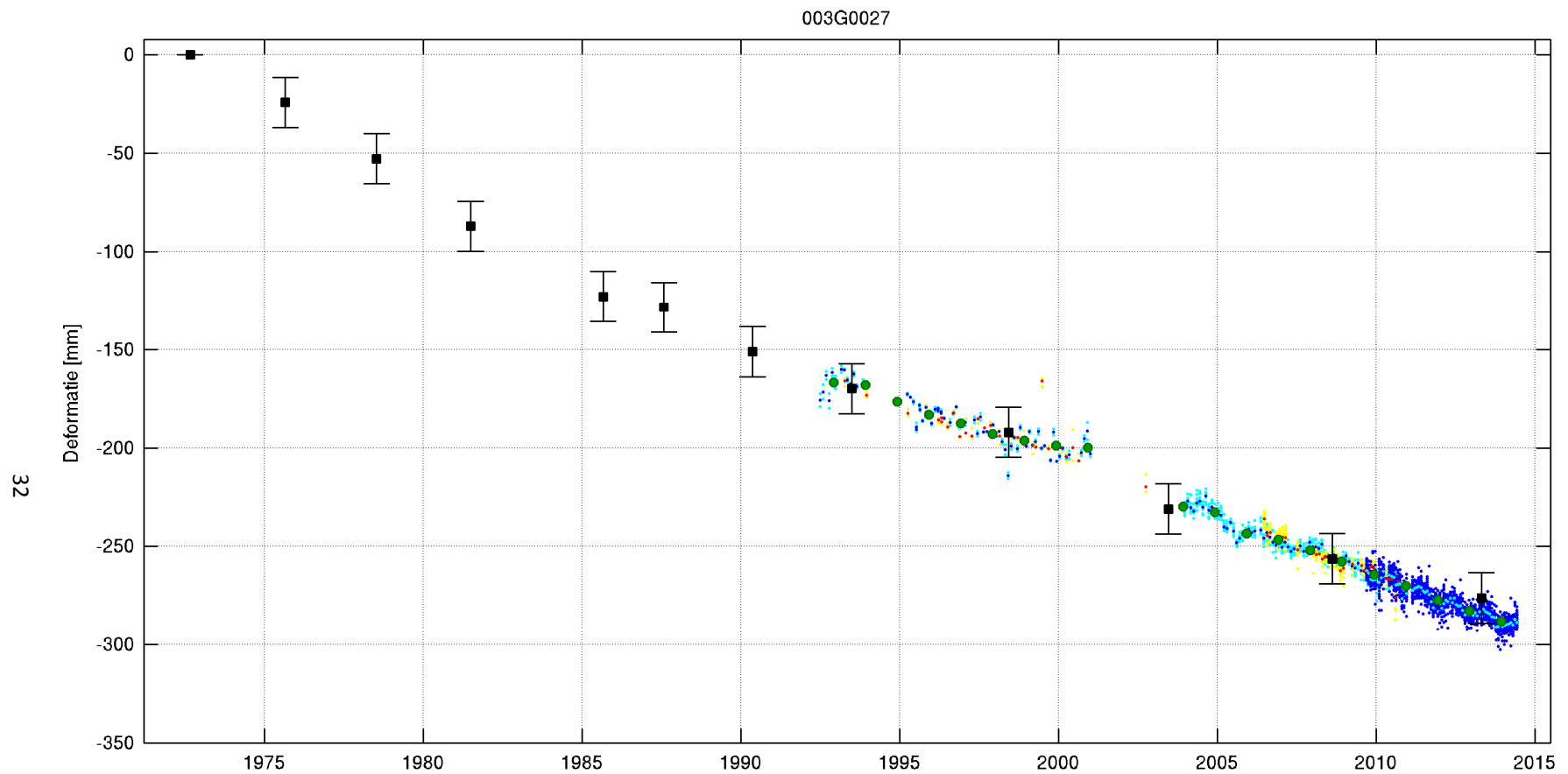
Figuur 14: Verticale beweging van peilmerk 002D0012 ten opzichte van referentiepeilmerk 006B0021 sinds 1987. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



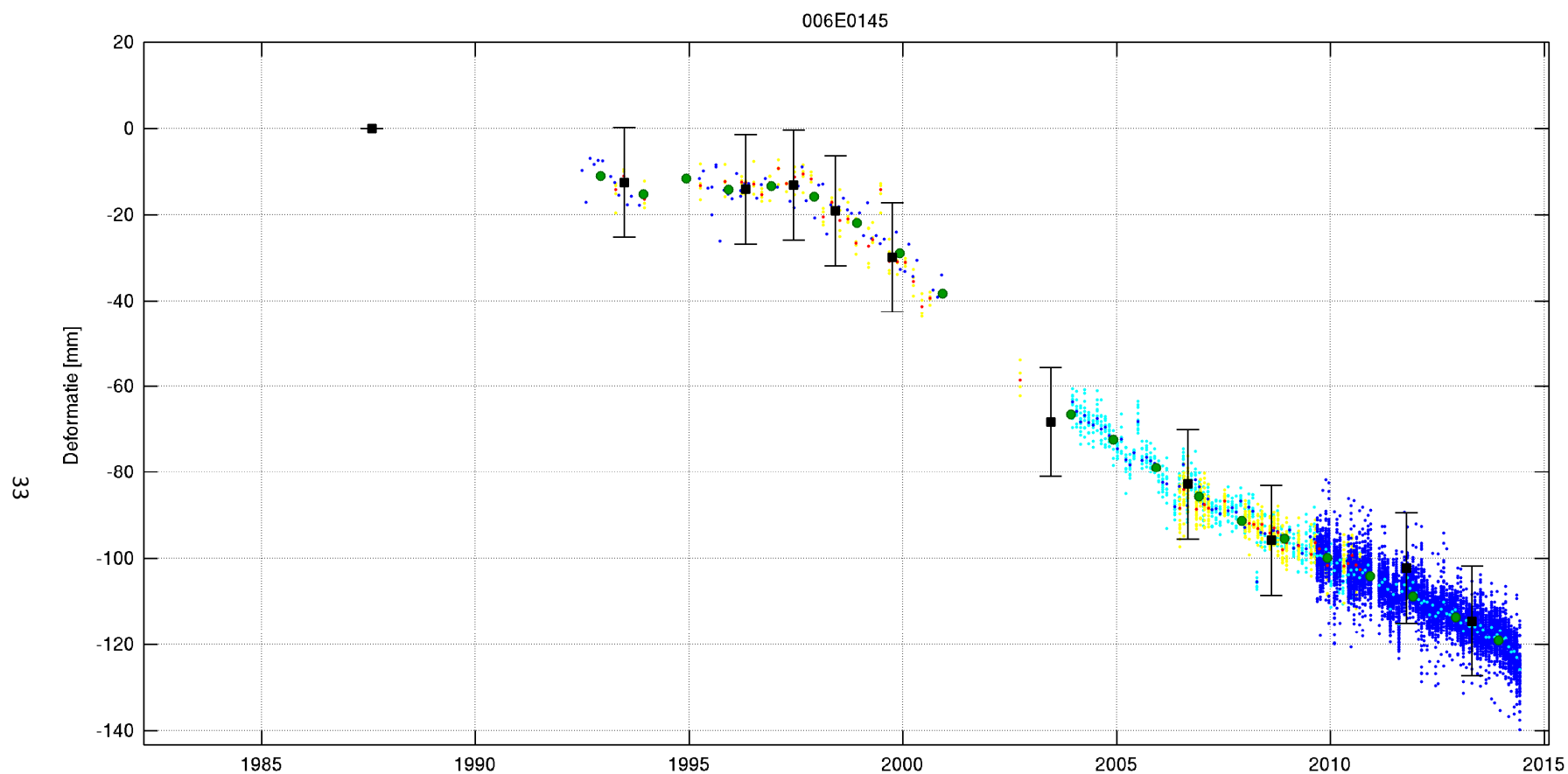
Figuur 15: Verticale beweging van peilmerk 002G0015 ten opzichte van referentiepeilmerk 006B0021 sinds 1987. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



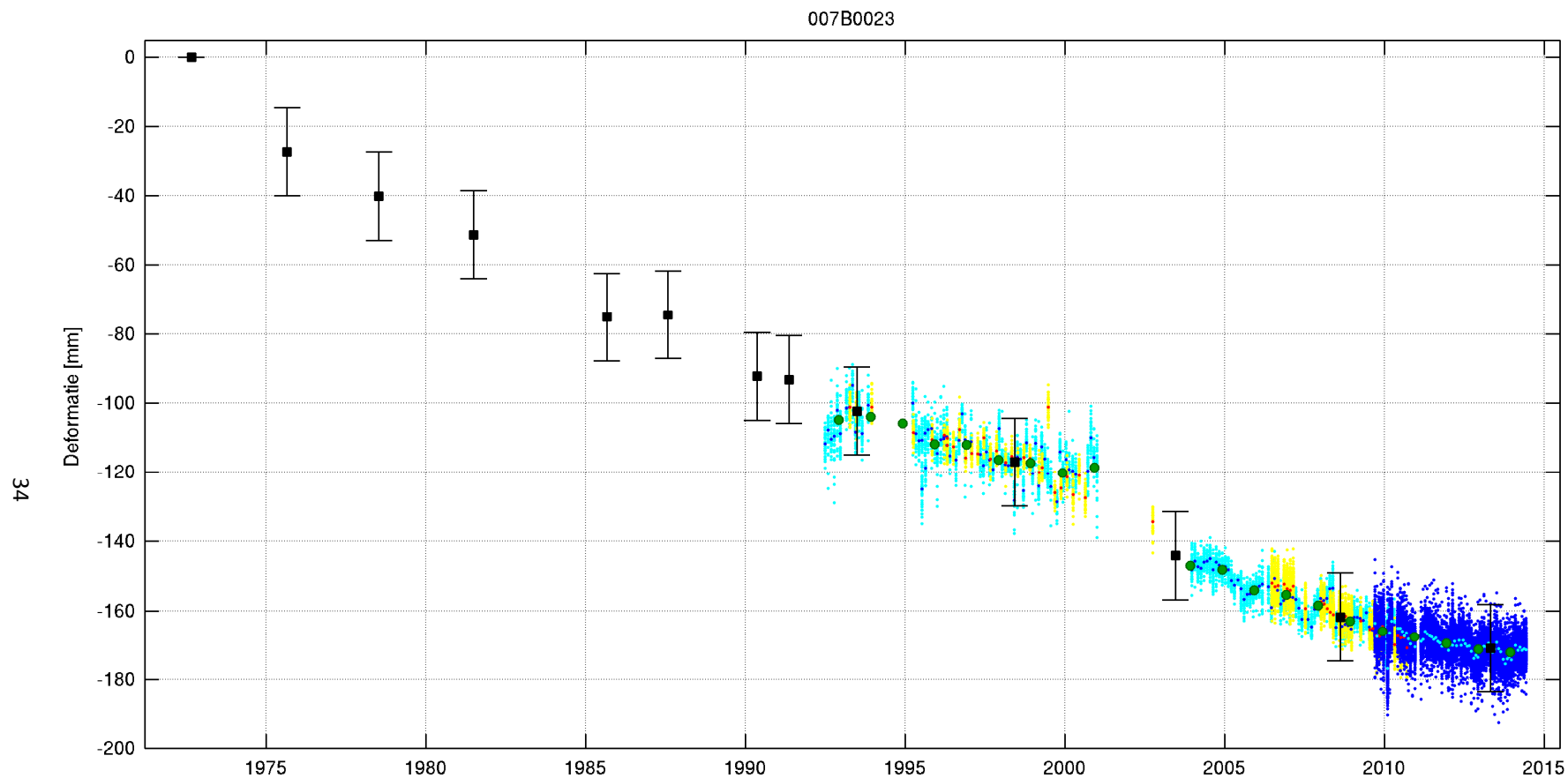
Figuur 16: Verticale beweging van peilmerk 003D0033 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1972. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



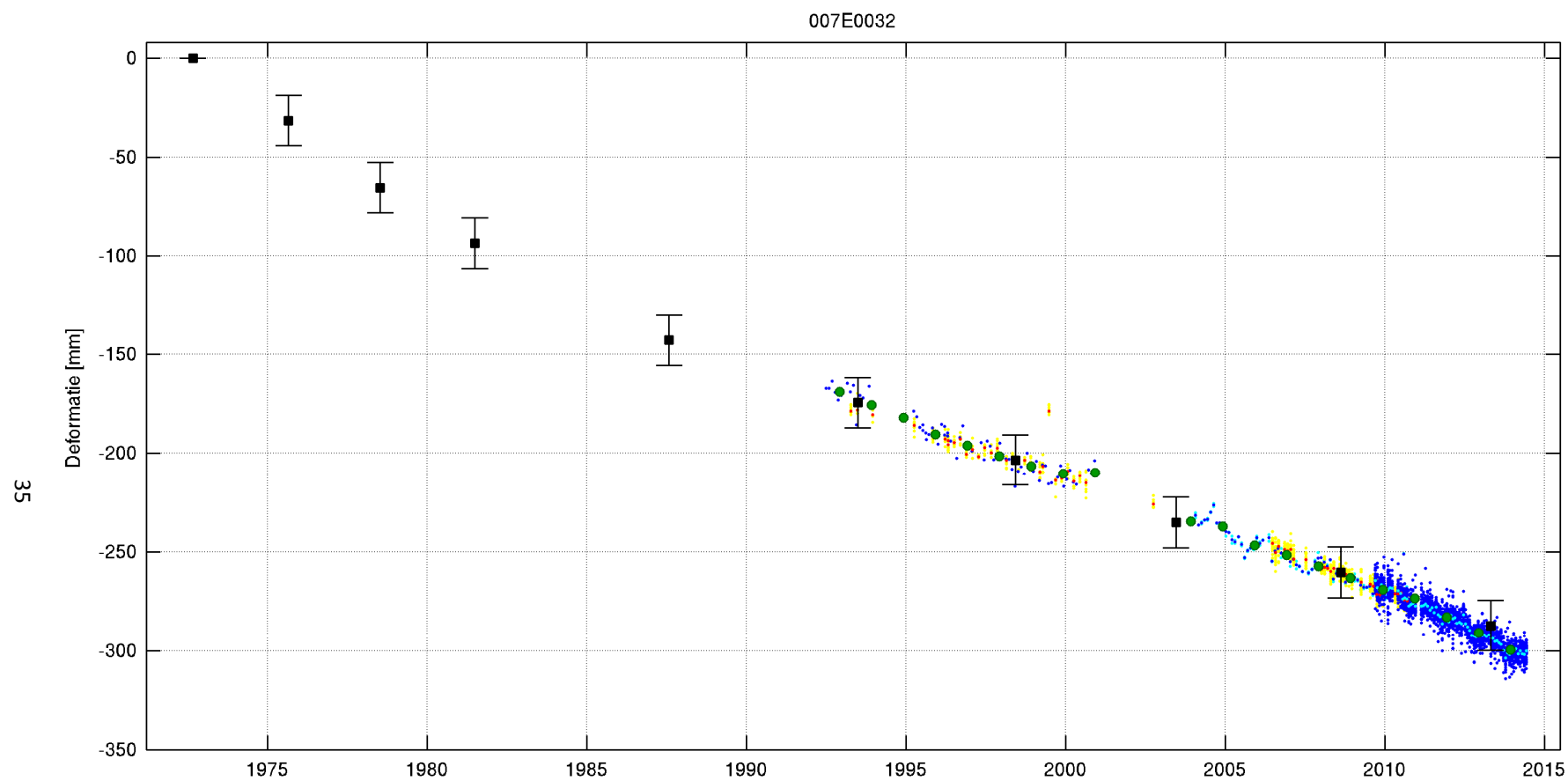
Figuur 17: Verticale beweging van peilmerk 003G0027 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1972. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



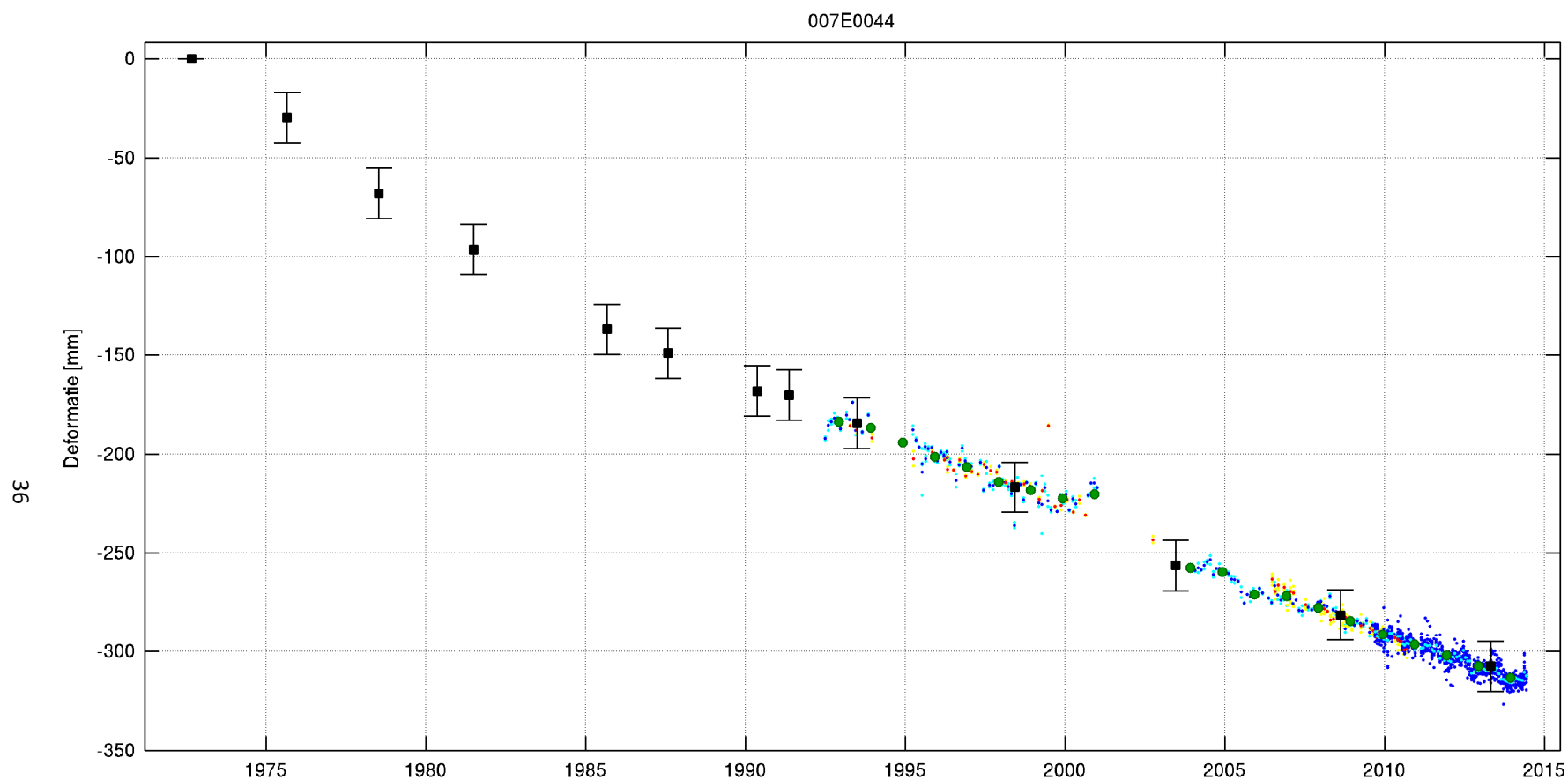
Figuur 18: Verticale beweging van peilmerk 006E0145 ten opzichte van referentiepeilmerk 006B0021 sinds 1987. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



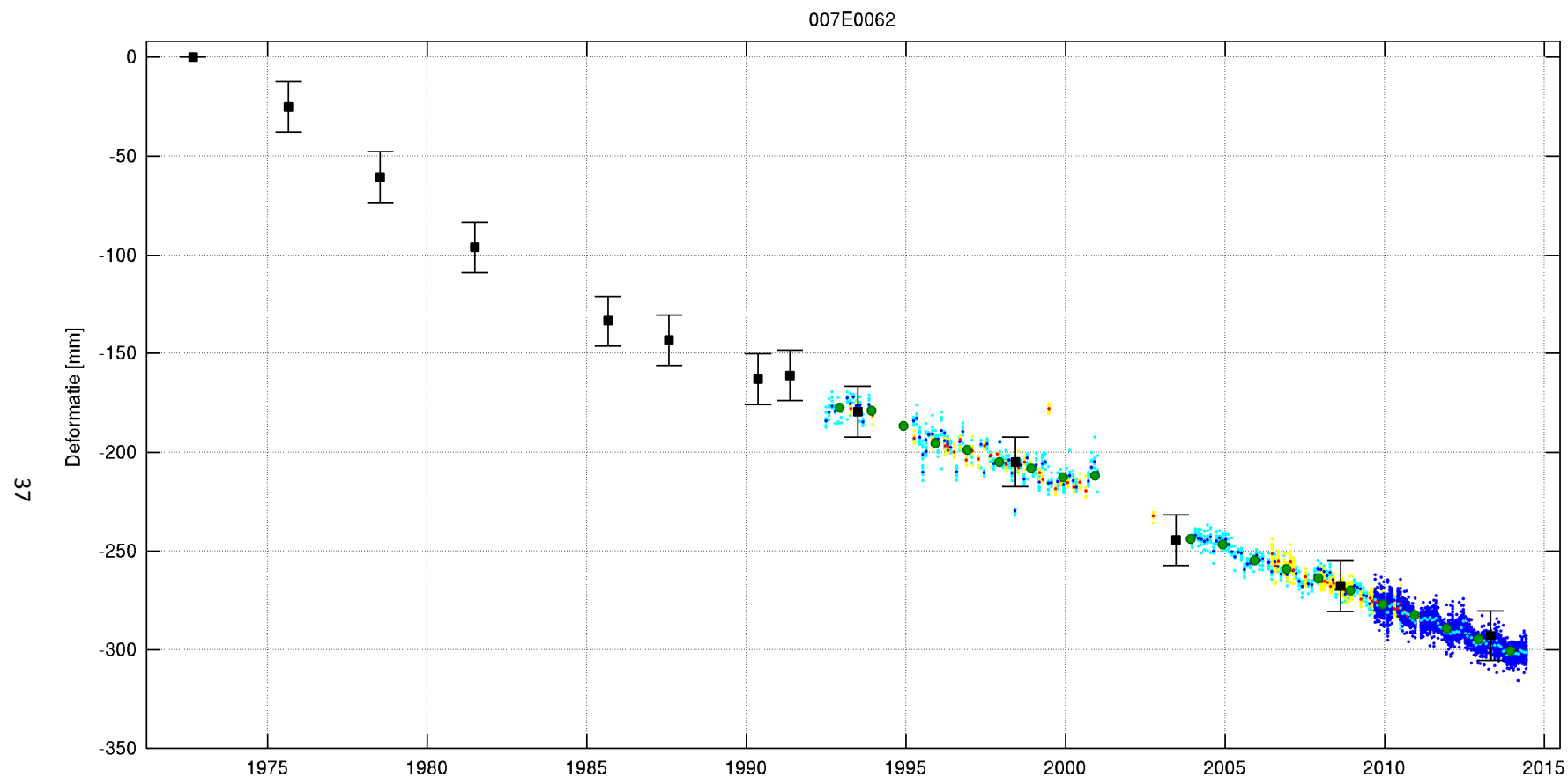
Figuur 19: Verticale beweging van peilmerk 007B0023 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1972. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



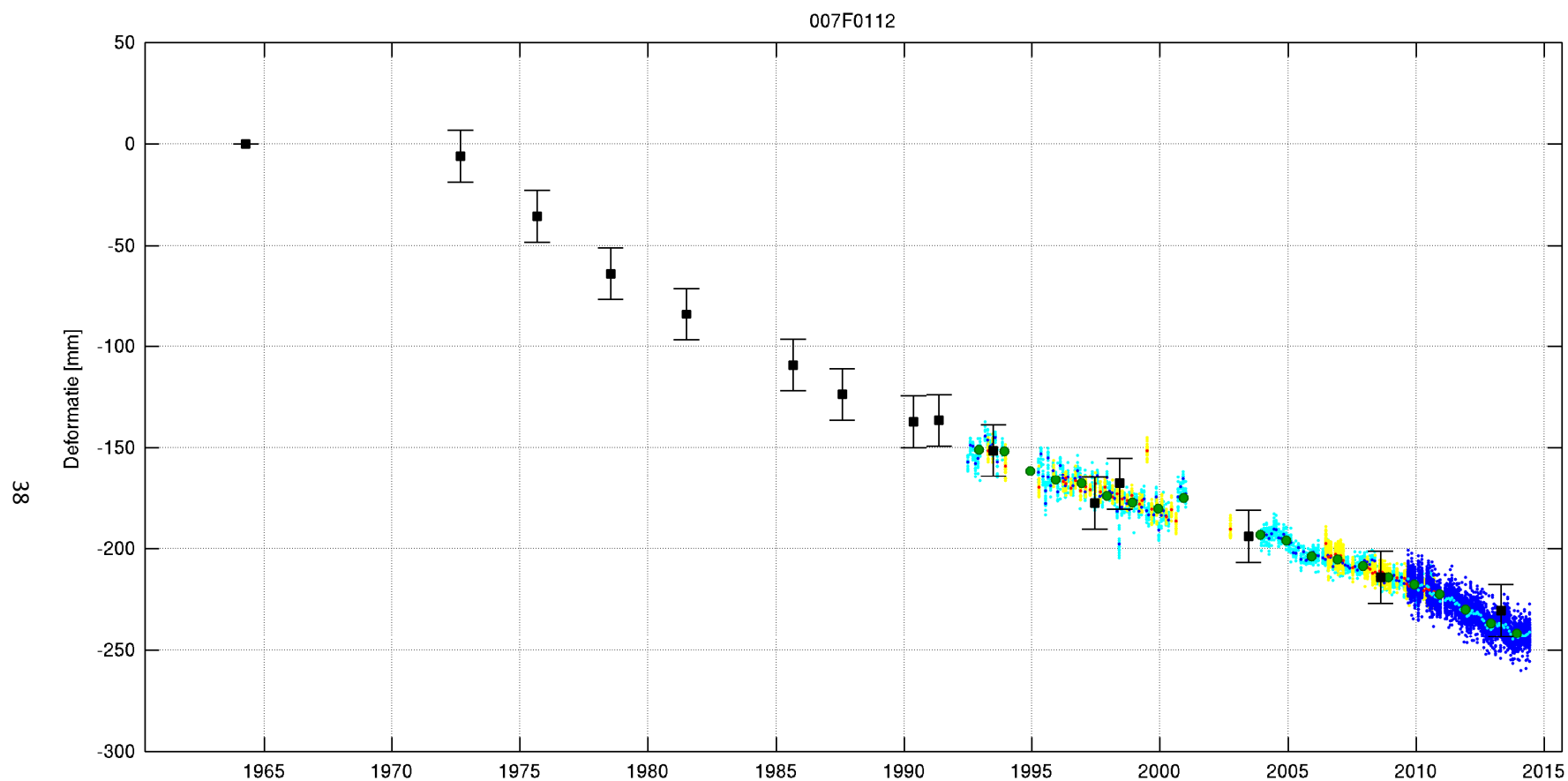
Figuur 20: Verticale beweging van peilmerk 007E0032 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1972. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



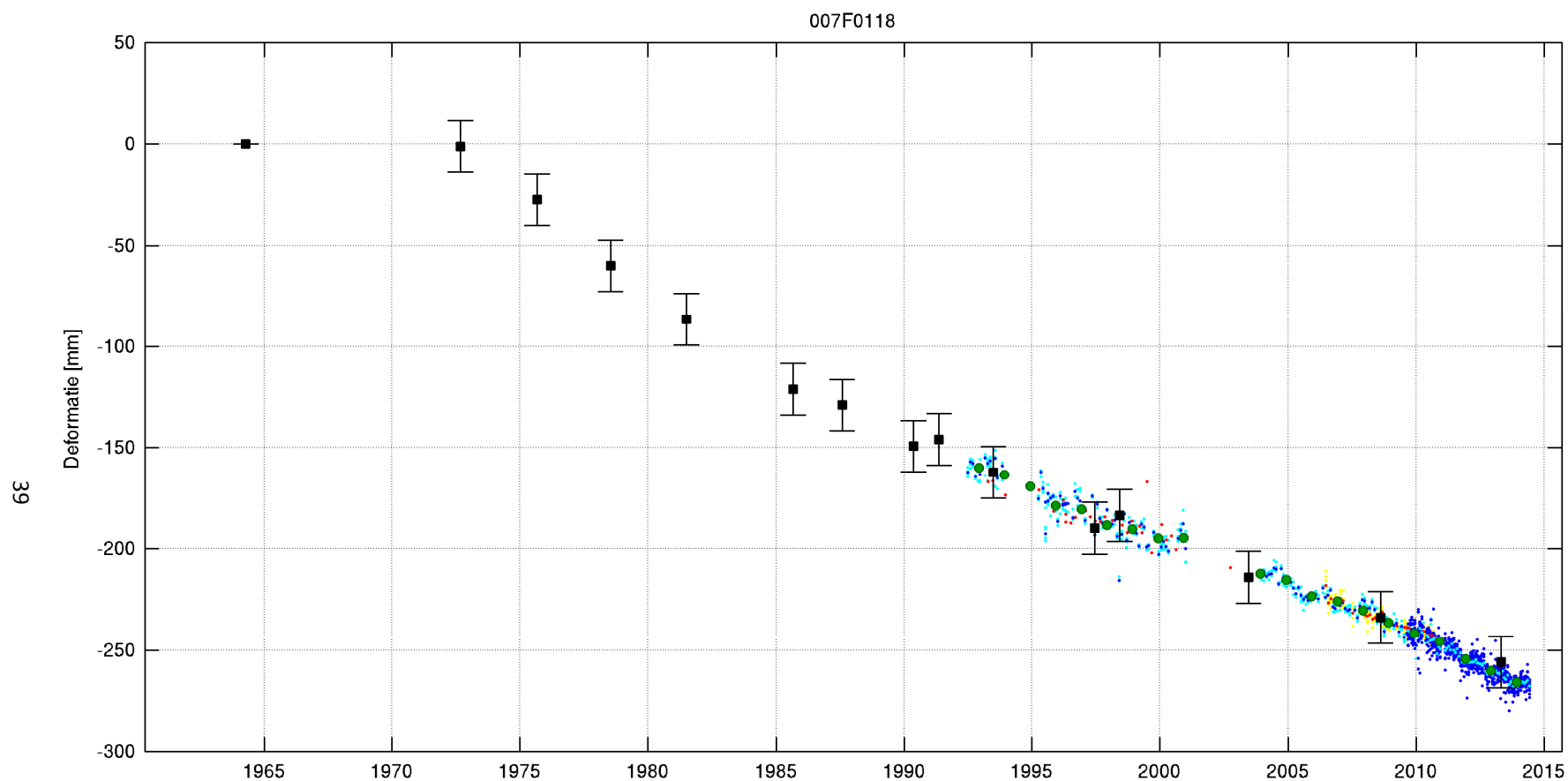
Figuur 21: Verticale beweging van peilmerk 007E0044 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1972. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



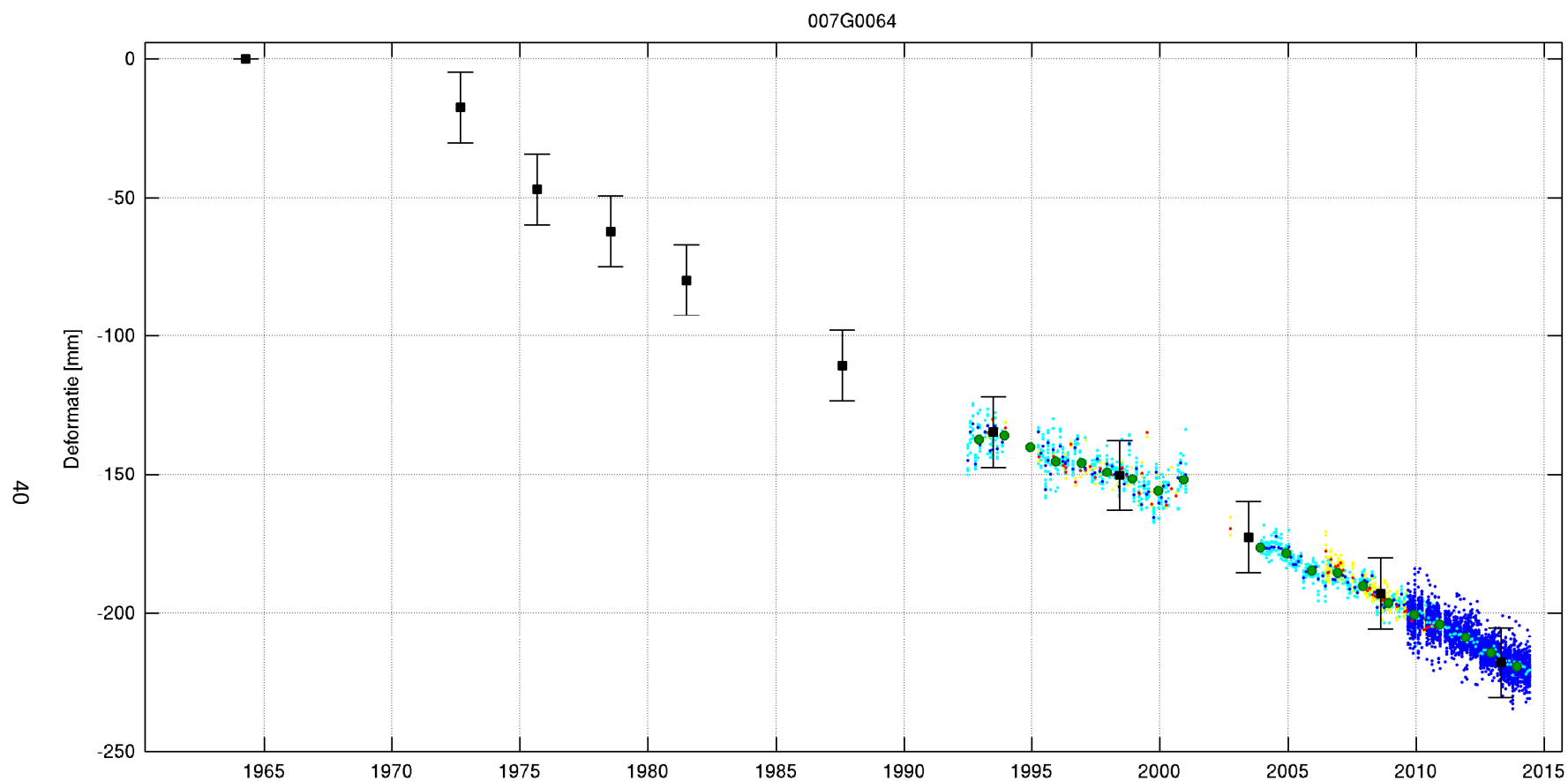
Figuur 22: Verticale beweging van peilmerk 007E0062 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1972. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



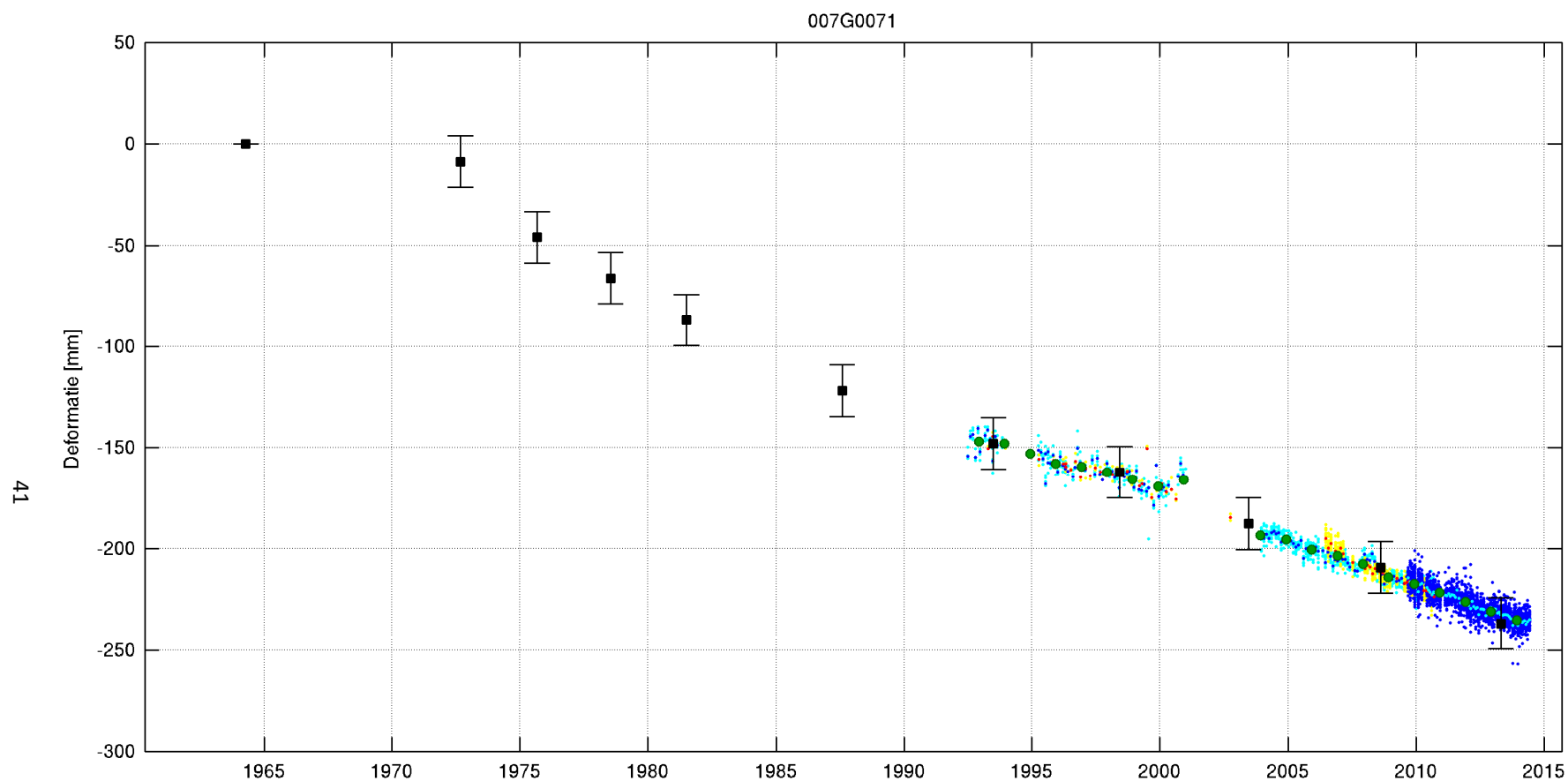
Figuur 23: Verticale beweging van peilmerk 007F0112 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



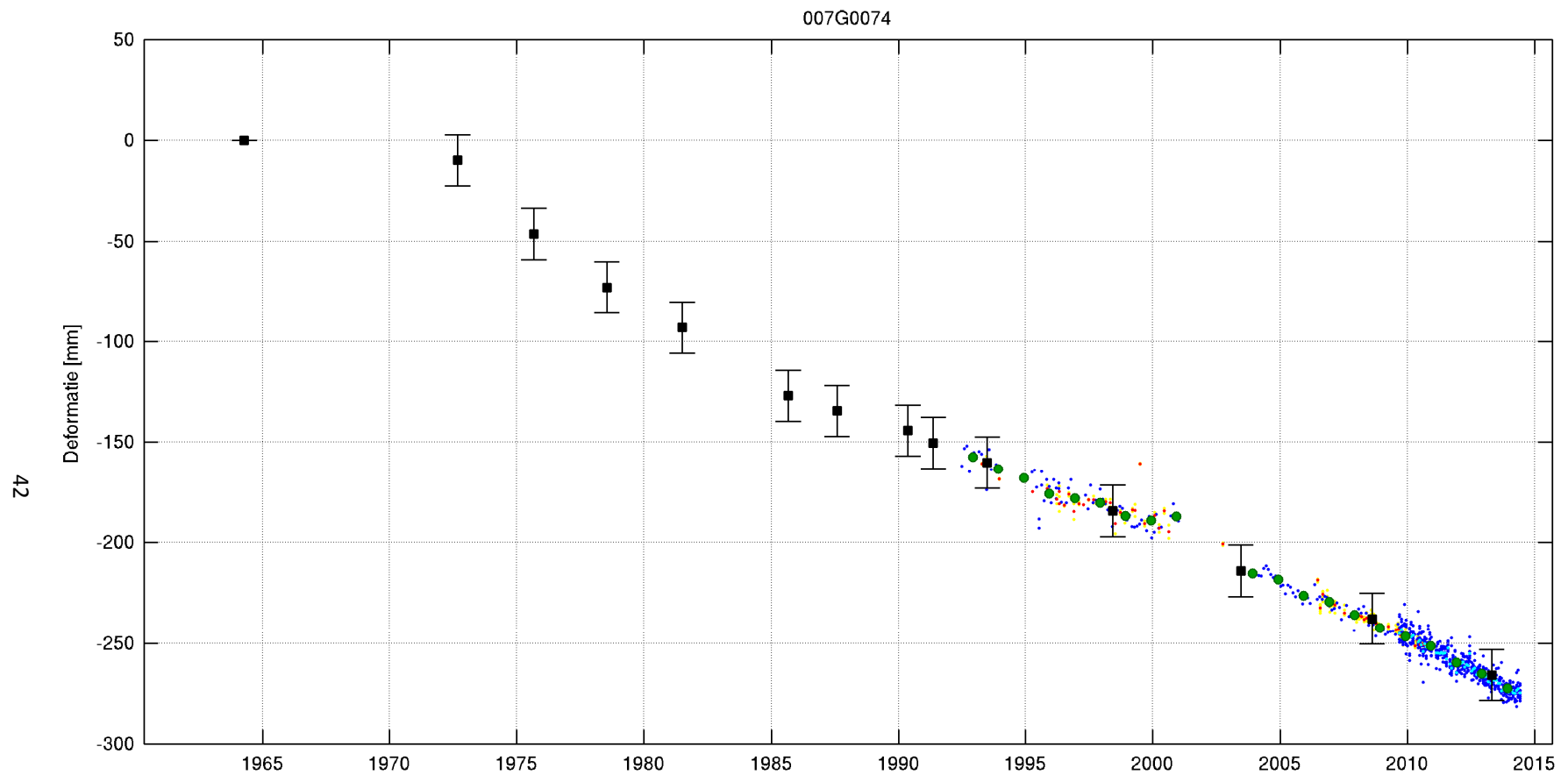
Figuur 24: Verticale beweging van peilmerk 007F0118 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



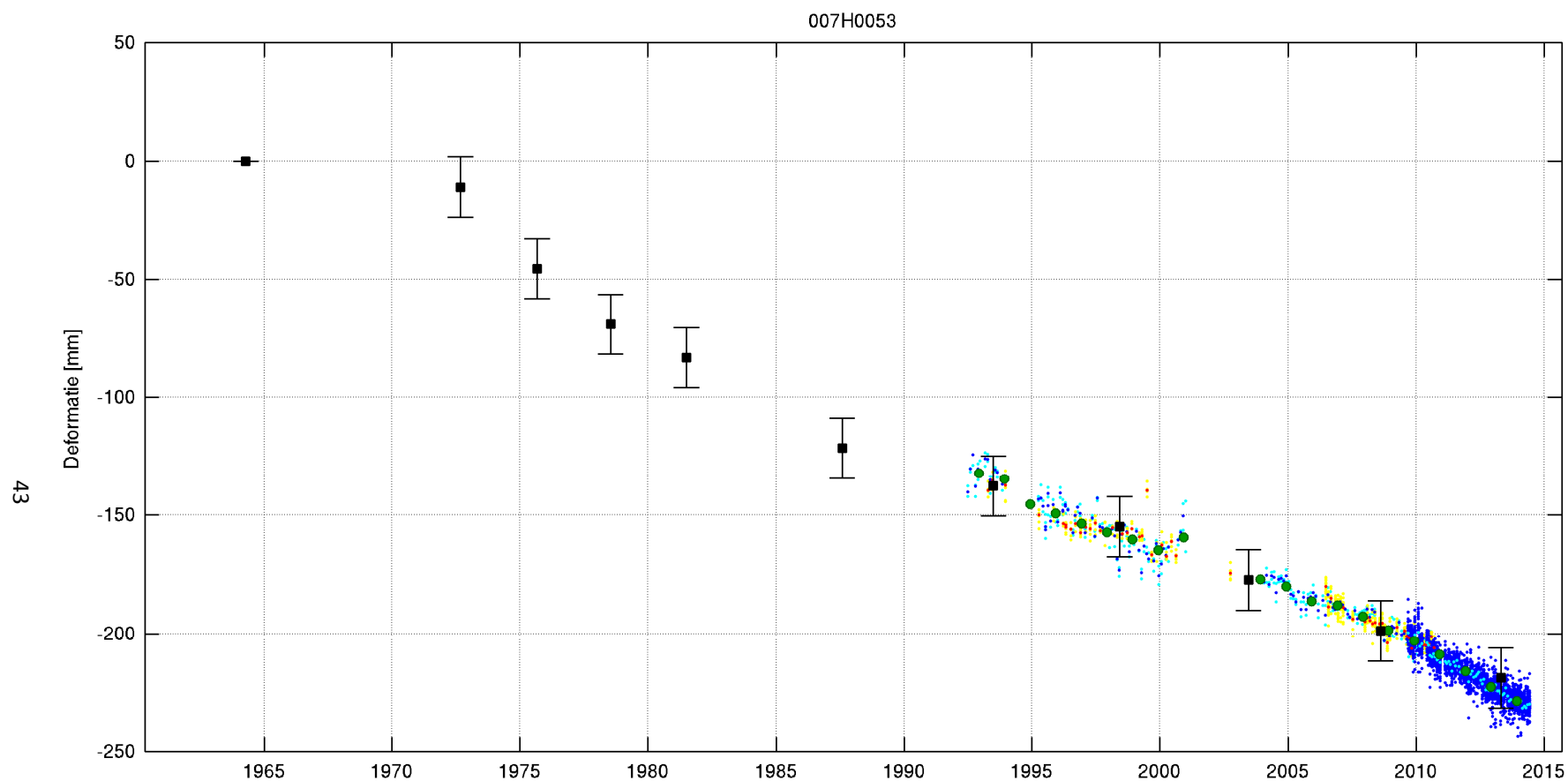
Figuur 25: Verticale beweging van peilmerk 007G0064 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



Figuur 26: Verticale beweging van peilmerk 007G0071 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.



Figuur 27: Verticale beweging van peilmerk 007G0074 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.

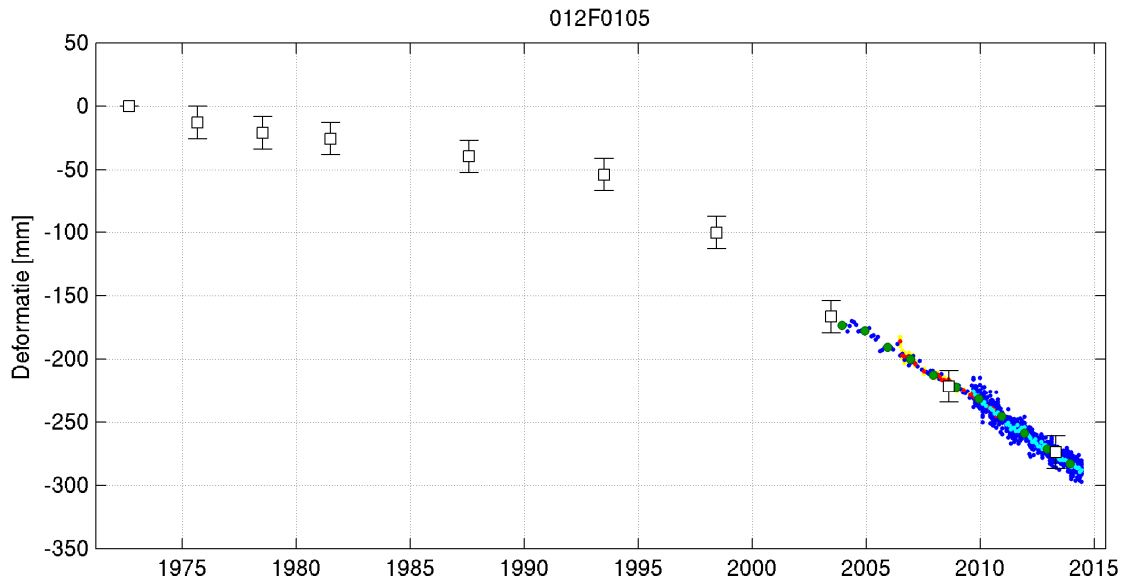


Figuur 28: Verticale beweging van peilmerk 007H0053 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.

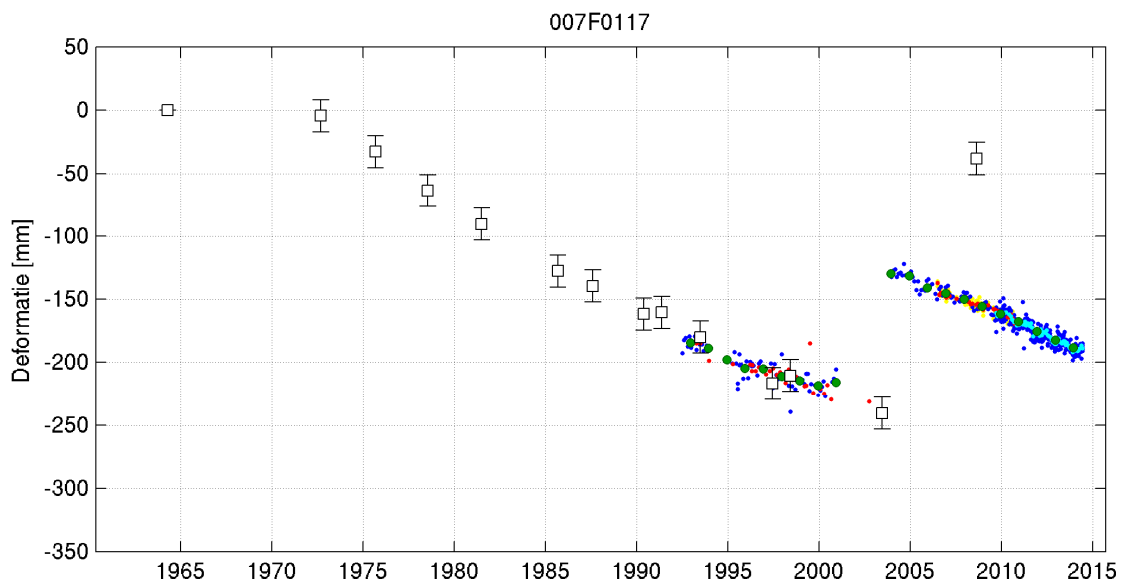
Figuur 29: Verticale beweging van peilmerk 007H0126 ten opzichte van referentiepeilmerk 000A2080 sinds 1964. Een verklaring der tekens is te vinden op bladzijde 51.

B.2 Opmerkingen en afwijkingen

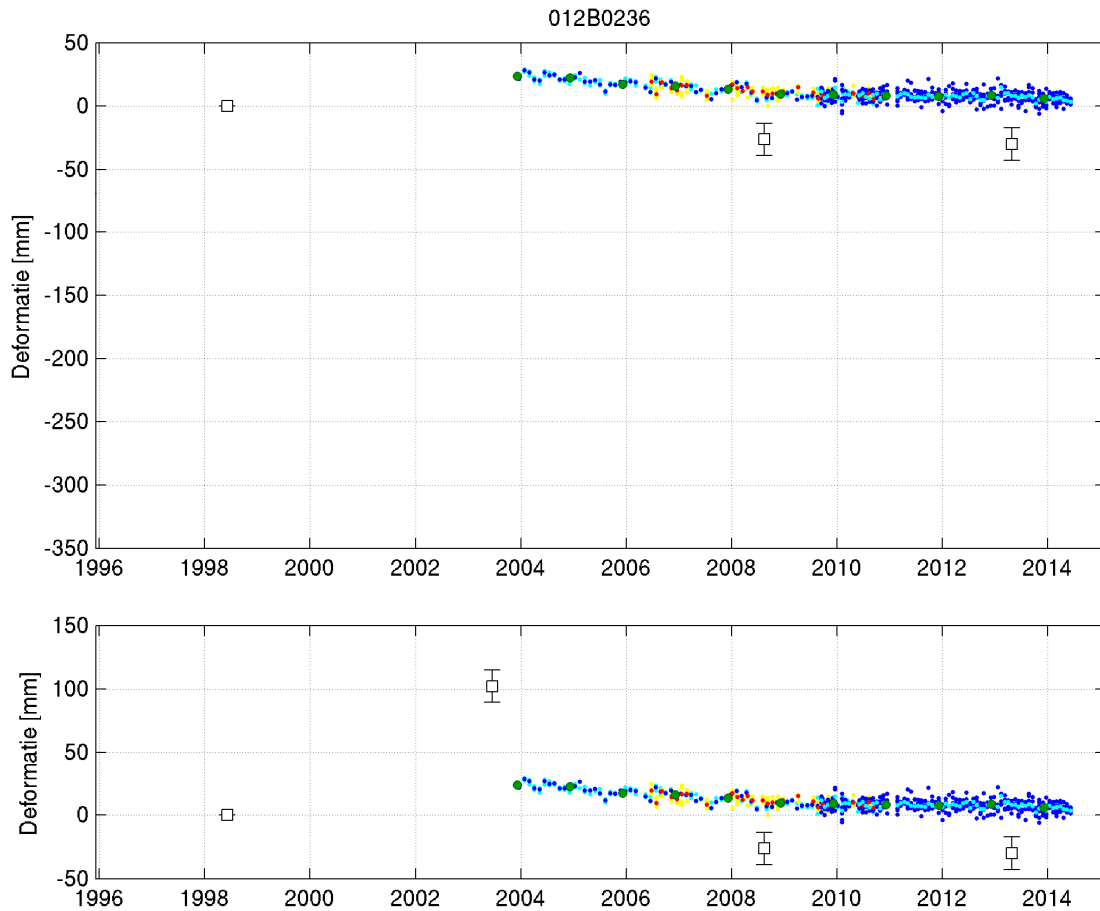
Deze bijlage bevat een aantal behulpzame opmerkingen voor de interpretatie van de in bijlage A.3 meegeleverde tijdseries.



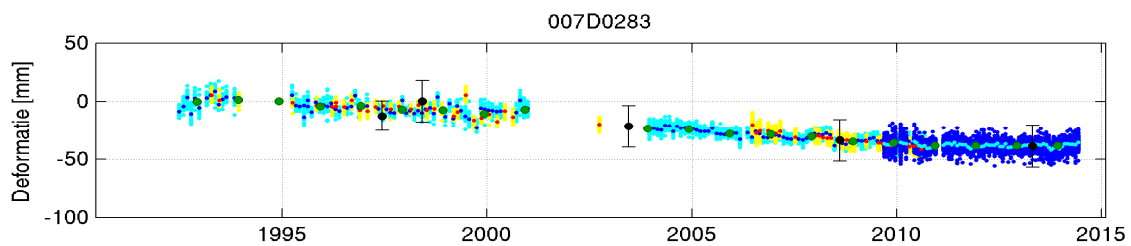
Figuur 30: De tijdseries van als “instabiel” geclassificeerde peilmerken (zie paragraaf 3.2) zijn in minimaal één epoeche niet representatief van de door de omgevende peilmerken bepaalde lokale trend. Gezien deze classificatie de tijdseries van nabije peilmerken mee beschouwd, is het afwijkend bewegingsgedrag niet noodzakelijk in de grafieken herkenbaar. Instabiel veronderstelde peilmerken zijn door witte in plaats van zwarte vierkantjes (rondjes) gekenmerkt. Dit peilmerk ligt in de invloedssfeer van de zoutwinning te Veendam, die de bodemdaling op lokale schaal beïnvloed.



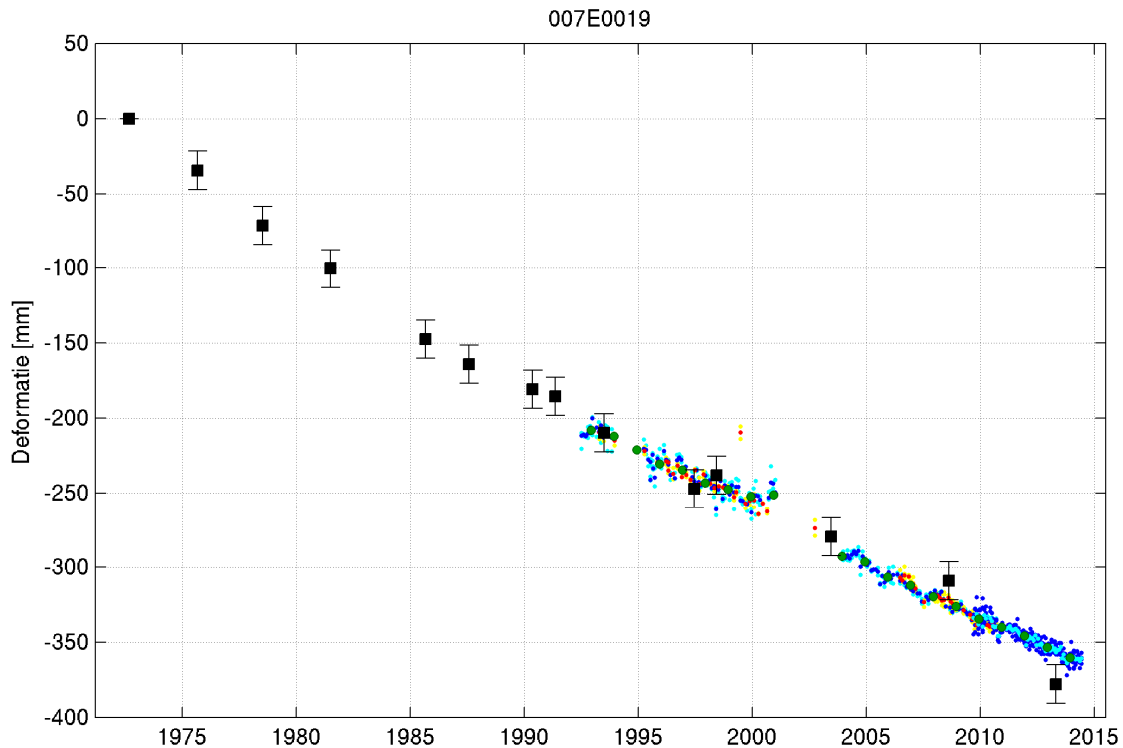
Figuur 31: Hier werd ogenschijnlijk in 2008 een verkeerd peilmerk waargenomen. Ook al lijkt dit hier vrij duidelijk, zijn dit soort uitschieters niet uit de data verwijderd, omdat er geen helemaal objectieve manier is, om zij van échte bodemdaling te onderscheiden. Een mogelijke consequentie is een onbetrouwbare aansluiting van de InSAR tijdserie. Daarmee moet bij instabiel veronderstelde peilmerken (wit vierkantje/rondje) altijd rekening worden gehouden.



Figuur 32: In de bovenste grafiek lijkt de aansluiting van InSAR fout te zijn gegaan. Zoals in de onderste grafiek te zien, is deze beïnvloed door een uitschieter in de waterpassing van 2003, die buiten het vaste bereik valt, dat in de grafieken wordt getoond. Terwijl de combinatie formeel correct is, is de tijdserie in zijn geheel onbetrouwbaar. Daarmee moet in het geval van niet stabiel veronderstelde peilmerken (wit vierkantje/rondje) altijd rekening worden gehouden.



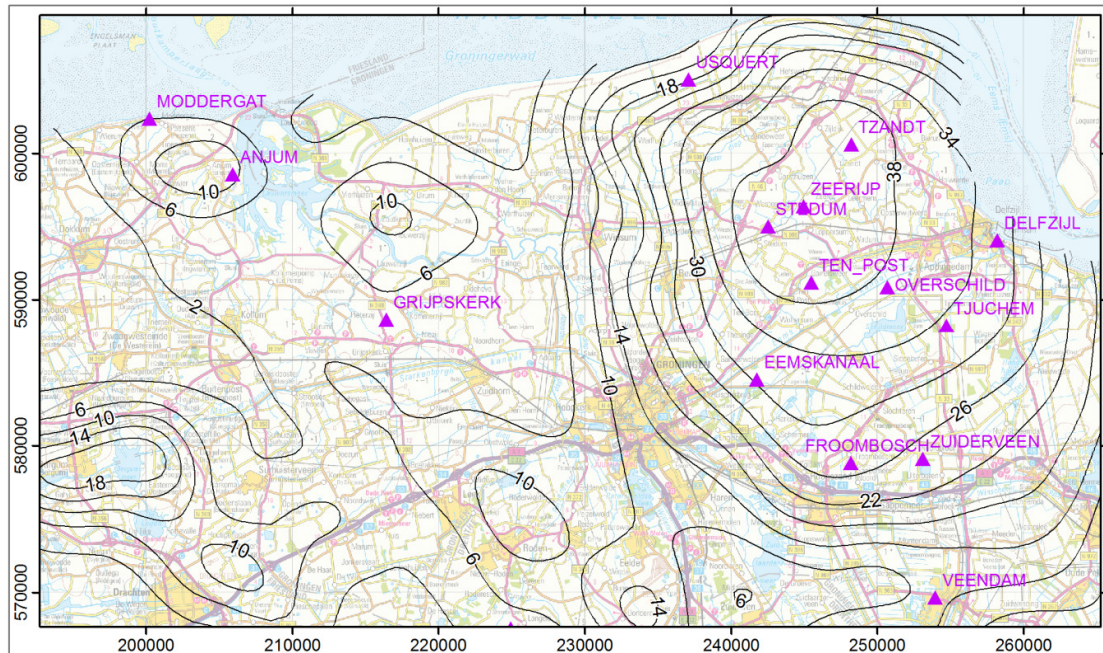
Figuur 33: Als er InSAR waarnemingen bestaan, die ouder zijn dan de vroegste waterpassing, worden de gecombineerde tijdseries in de grafieken niet op de eerste waterpassing maar op het gemiddelde van het eerste jaar van InSAR waarnemingen op nul gesteld. Dit wordt gekenmerkt door de waterpassingen met een rondje in plaats van een vierkantje weer te geven.



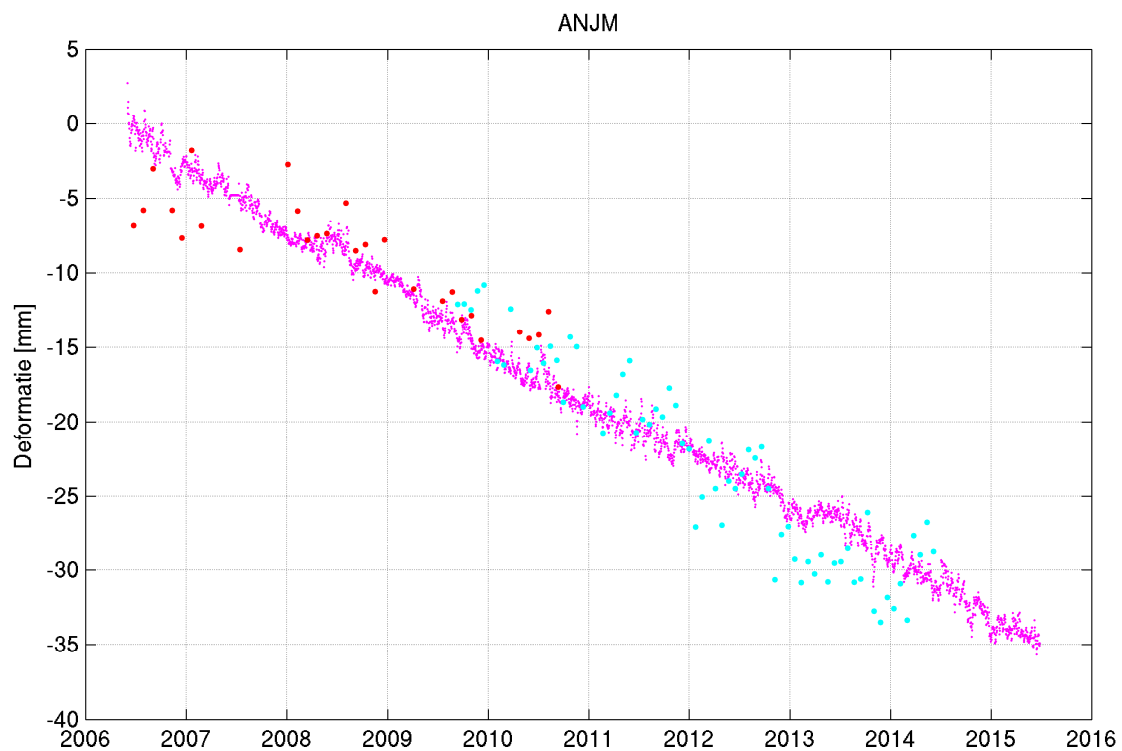
Figuur 34: Bij peilmerk 007E0019 komen waterpassing en InSAR in de laatste jaren niet goed overeen, zodat bij de validatie in hoofdstuk 5 afwijkingen van 30 mm (2003-2013) en 38 mm (2008-2013) worden geconstateerd. Het peilmerk zit in de muur van de 348 jaar oude kerk te Lellens (Ten Post). Van alle InSAR satellieten zijn meerdere PS op omliggende gebouwen beschikbaar en de peilmerkbeweging wordt door omliggende peilmerken niet bevestigd. Vandaar is er geen voor de hand liggende verklaring van de afwijkingen. Toch is het opmerkelijk, dat de kerk in 2003 wegens bouwvalligheid werd gesloten en in 2010 na restauratie is heropend. Tegen deze achtergrond lijkt een verstoring van het peilmerk zelf niet onwaarschijnlijk.

B.3 GPS

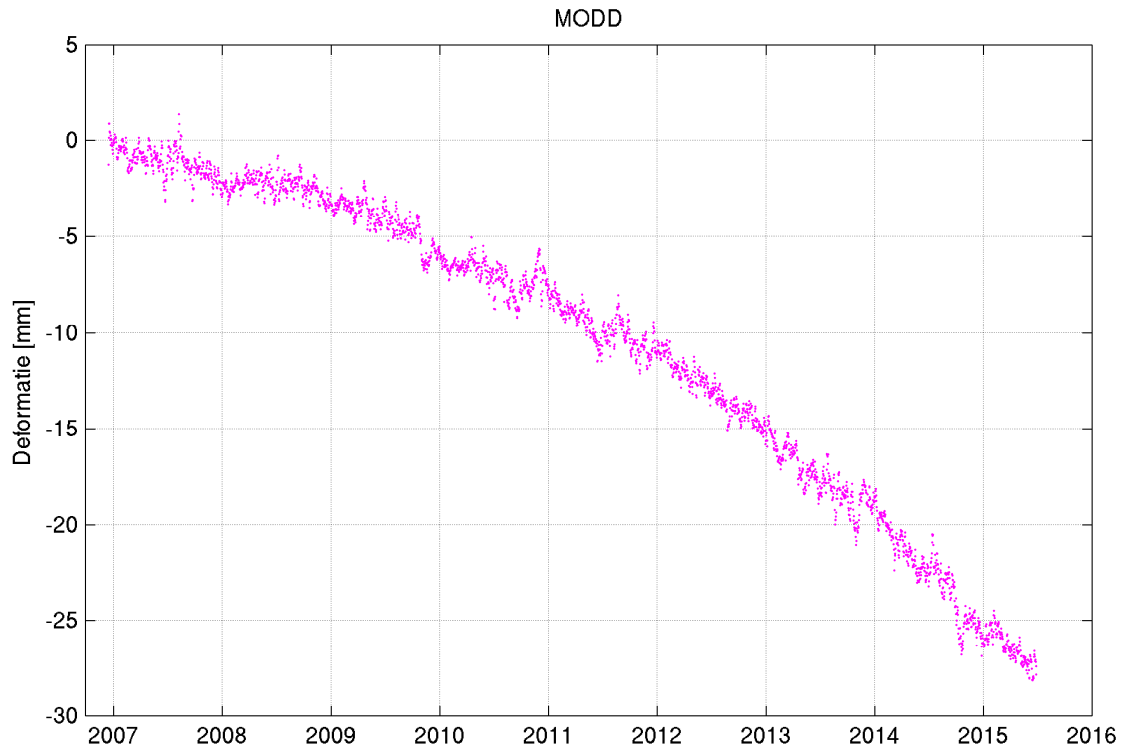
Op de volgende bladzijden worden de deformatie tijdseries van de vier GPS stations getoond, die ter validatie van InSAR in aanmerking komen (zie paragraaf 5.4). De onderlinge aansluiting van de tijdseries uit InSAR en GPS volgt de in bijlage D toegelichte combinatie procedure.



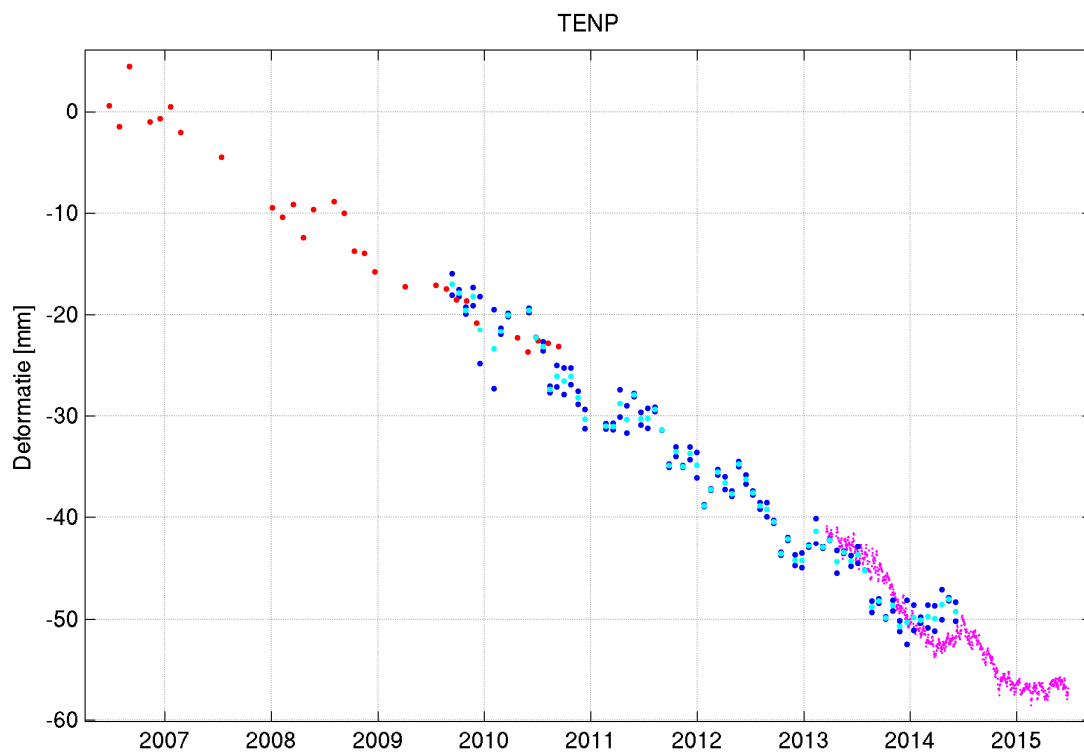
Figuur 35: In het rapportagegebied zijn 14 GPS stations geplaatst: twee in 2006 (Anjum, Moddergat), twee in 2013 (Ten Post, Veendam) en de rest in 2014.



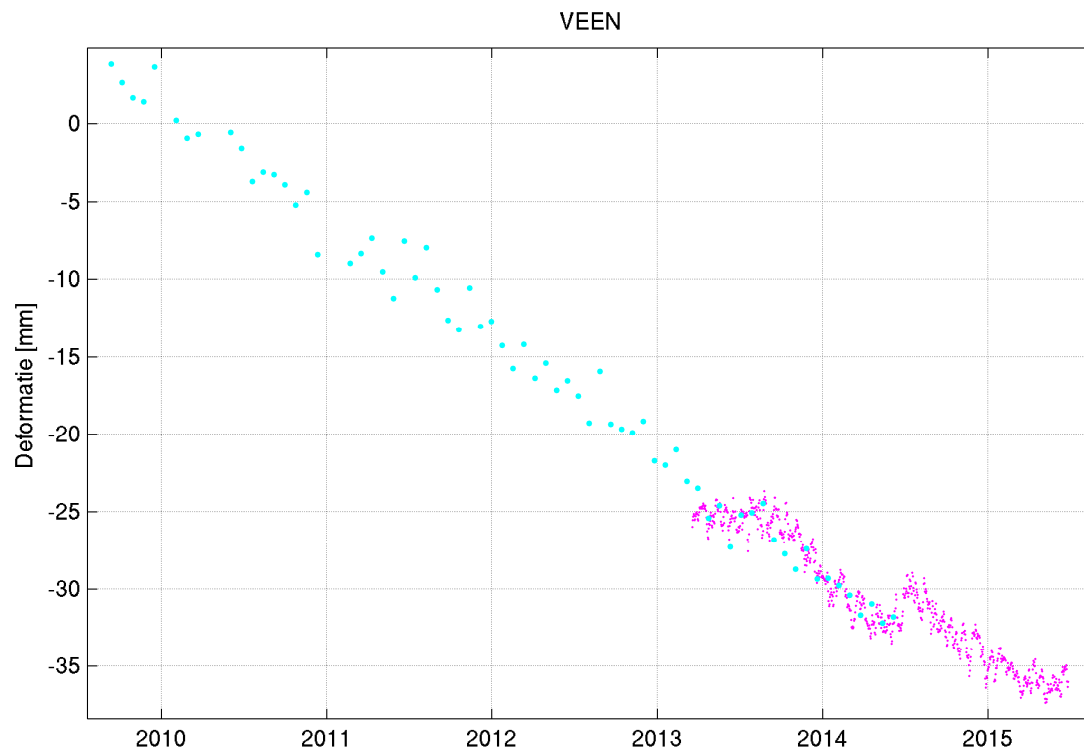
Figuur 36: Vergelijking van de GPS tijdserie (in magenta) op station Anjum met de gecombineerde InSAR tijdserie van alle PS binnen een straal van 500 m. Dat zijn 1 PS voor Envisat (opgaande baan; in rood) en 1 PS voor Radarsat-2 (neergaande baan; in lichtblauw).



Figuur 37: Visualisatie van de GPS tijdserie op station Moddergat. Er zijn geen PS binnen een straal van 500 m.



Figuur 38: Vergelijking van de GPS tijdserie (in magenta) op station Ten Post met de gecombineerde InSAR tijdserie van alle PS binnen een straal van 500 m. Dat zijn 1 PS voor Envisat (opgaande baan; in rood) en 2 PS voor Radarsat-2 (neergaande baan; in donkerblauw, mediaan in lichtblauw).



Figuur 39: Vergelijking van de GPS tijdserie (in magenta) op station Veendam met de gecombineerde InSAR tijdserie van alle PS binnen een straal van 500 m. Dat is 1 PS voor Radarsat-2 (neergaande baan; in lichtblauw).

C Verklaring der tekens

De symbolen in de visualisatieplaatjes hebben de volgende betekenis:

Tabel 3: Verklaring der tekens

Symbol	Uitleg	Betreft tijdvak
	Waterpassing: hoogteverschil t.o.v. de vroegste waarneming op het peilmerk; met 3σ -foutenbalken; stabiel verondersteld peilmerk (zie paragraaf 3.2)	1964-2013
	Waterpassing: hoogteverschil t.o.v. de vroegste waarneming op het peilmerk; met 3σ -foutenbalken; niet stabiel verondersteld peilmerk (zie paragraaf 3.2)	1964-2013
	Waterpassing: hoogteverschil t.o.v. het begin van een gekoppelde InSAR tijdserie; met 3σ -foutenbalken; stabiel verondersteld peilmerk (zie paragraaf 3.2)	1972-2013
	Waterpassing: hoogteverschil t.o.v. het begin van een gekoppelde InSAR tijdserie; met 3σ -foutenbalken; niet stabiel verondersteld peilmerk (zie paragraaf 3.2)	1972-2013
	ERS-1/2, neergaande baan, individuele PS	1992-2000
	ERS-1/2, neergaande baan, mediaan	1992-2000
	ERS-1/2, opgaande baan, individuele PS	1993-2002
	ERS-2/1, opgaande baan, mediaan	1993-2002
	Envisat, neergaande baan, individuele PS	2003-2010
	Envisat, neergaande baan, mediaan	2003-2010
	Envisat, opgaande baan, individuele PS	2006-2010
	Envisat, opgaande baan, mediaan	2006-2010
	Radarsat-2, neergaande baan, individuele PS	2009-2014
	Radarsat-2, neergaande baan, mediaan	2009-2014
	Jaarlijks gemiddelde InSAR deformatie	1992-2013
	Dagelijks gemiddelde GPS deformatie	2006-2015
	Scheidingslijn tussen twee tijdseries, die wegens gebrek aan continuïteit niet aan elkaar kunnen worden gekoppeld	

Foutenbalken: Voor de waterpas-netwerken werden in het verleden gedeeltelijk afwijkende referentiepunten gekozen. Daarom is het niet mogelijk, de standaardafwijking van het hoogteverschil in de tijd uit de standaardafwijkingen van de vereffende hoogtes in verschillende epochen af te leiden. Voor weergave van de foutenbalken wordt daarom een simpel model gehanteerd. Alleen voor de visualisatie van de peilmerk-gewijze validatie (zie bijlage A.5) geldt een uitzondering (zie bijlage F): Een gewaterpast hoogteverschil t.o.v. een referentiepeilmerk heeft een standaardafwijking van 3 mm. Daaruit volgt een standaardafwijking van 4,2 mm voor een dubbel-differentie, d.w.z. hoogteverschil in én ruimte én tijd ($3\sigma = 12,7$ mm). Bij waterpassingen van peilmerken, die in de eerste getoonde epoche niet zijn gewaterpast (gevisualiseerd door cirkels) en daarom op InSAR zijn aangesloten, is de standaardafwijking op een sommatie van twee onafhankelijk veronderstelde hoogteverschillen in de tijd gebaseerd ($1\sigma = 6$ mm, $3\sigma = 18$ mm).

Aparte tijdseries: Indien voor een gebied tijdseries zonder overlap in de tijd bestaan, worden deze niet gecombineerd en in het plaatje door een dikke, gestippelde zwarte lijn van elkaar gescheiden (zie paragraaf 4.2).

Absolute daling: Opgemerkt moet worden, dat de gevisualiseerde deformatie niet in alle gevallen als absolute daling kan worden geïnterpreteerd. Dit is alleen mogelijk, indien tijdseries vroeger beginnen dan de gasproductie. (Voor een gebied boven het Groningen veld betekent dit bijvoorbeeld, dat het peilmerk in de waterpassing van 1964 moet zijn meegenomen.) Indien een tijdserie later begint, kan de gevisualiseerde deformatie alleen relatief in de tijd worden geïnterpreteerd.

D Combinatie procedure

Om verschillende tijdseries van waterpassing, InSAR en/of GPS op elkaar aan te sluiten, wordt de hieronder beschreven combinatie procedure toegepast. Deze is toegepast voor de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2) en de visualisatie van de gecombineerde deformatie per peilmerk (bijlagen A.3 en B.1) of GPS station (bijlage B.3).

Met combinatie is in deze context de schatting van onderlinge offsets van individuele tijdseries en de toepassing op deze tijdseries bedoeld. Omdat alle tijdseries opeenvolgend in beschouwing worden genomen, worden in de achtergrond een of meerdere “gecombineerde tijdseries” van gemiddelde en/of samengevoegde individuele tijdseries gebruikt. Deze zijn echter uitsluitend een hulpmiddel binnen de combinatie procedure en niet onderdeel van het eindresultaat.

1. Combinatie van InSAR-tijdseries van verschillende banen (opgaand/neergaand) en opeenvolgende satellietmissies

- a. De één na vroegst beginnende InSAR tijdserie wordt op de vroegst beginnende InSAR tijdserie aangesloten. De onderlinge offset wordt bepaald als gemiddelde van de volgende differenties binnen het overlappend tijdvak:
 - i. deformatie van de tweede tijdserie min de, op de acquisitietijdstippen van de tweede tijdserie, lineair geïnterpoleerde, deformatie van de eerste tijdserie
 - ii. deformatie van de eerste tijdserie min de, op de acquisitietijdstippen van de eerste tijdserie, lineair geïnterpoleerde deformatie van de tweede tijdserie
- b. Alle waarnemingen van deze twee tijdseries vormen een gecombineerde InSAR tijdserie.
- c. Later beginnende tijdseries worden chronologisch opeenvolgend volgens dezelfde methodiek op de gecombineerde InSAR tijdserie aangesloten. De waarnemingen van de nieuw aangesloten tijdseries worden vervolgens in de gecombineerde InSAR tijdserie geïntegreerd.
- d. De stappen a tot en met c worden voor groepen van InSAR tijdseries zonder overlap in de tijd onafhankelijk van elkaar uitgevoerd.

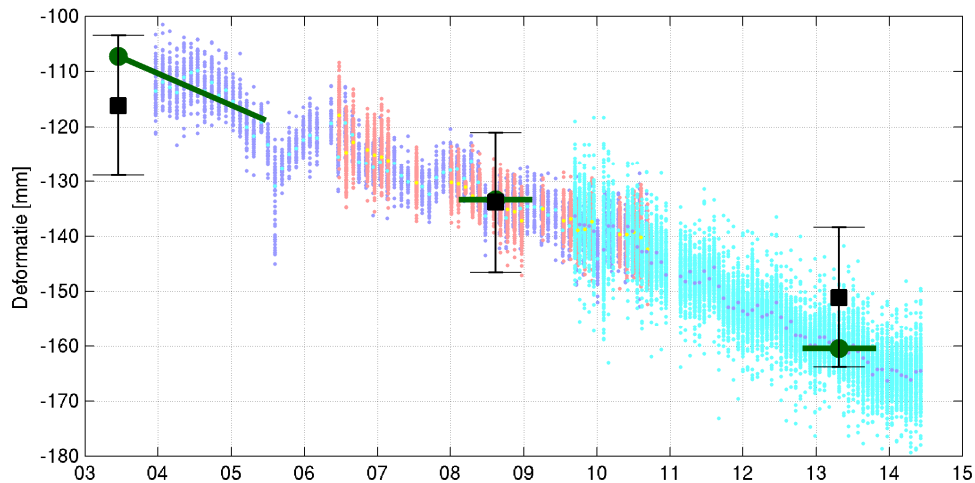
2. Aansluiting van GPS op InSAR (uitsluitend van toepassing op bijlage B.3)

- a. De GPS tijdserie wordt op dagelijks gemiddelde gereduceerd.
- b. De GPS tijdserie wordt op de gecombineerde InSAR tijdserie aangesloten, indien deze bestaat. De onderlinge offset wordt bepaald als gemiddelde van de differenties tussen de deformatie van de GPS tijdserie op de acquisitiedagen van de InSAR tijdserie en de deformatie van de InSAR tijdserie binnen het overlappend tijdvak.
- c. Alle GPS waarnemingen en de gecombineerde InSAR tijdserie vormen een gecombineerde InSAR/GPS tijdserie.

3. Aansluiting van InSAR/GPS op waterpassing

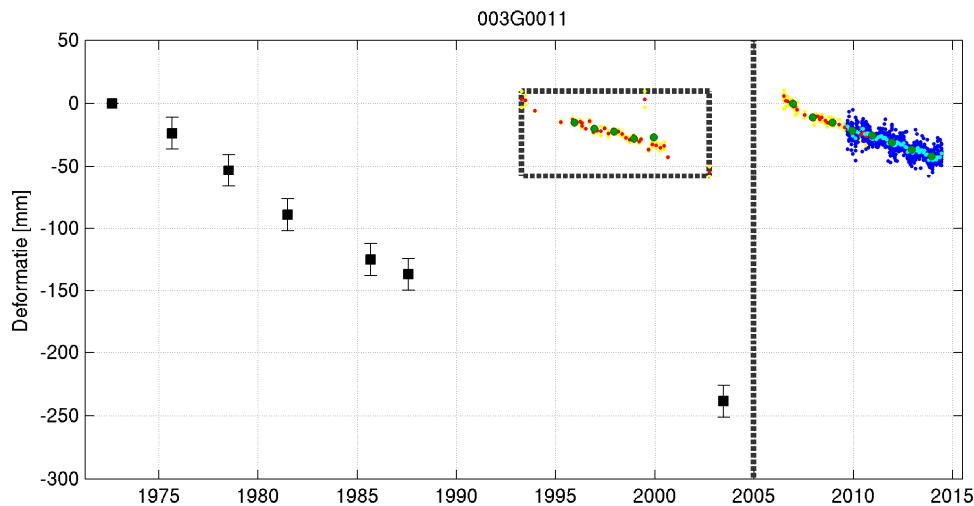
- a. Ter schatting van de onderlinge offset wordt voor ieder tijdstip van waterpassing binnen het overlappend tijdvak een gemiddelde InSAR/GPS deformatie berekend. Deze is het gemiddelde van de gecombineerde InSAR/GPS tijdserie binnen een tijdvak van een half jaar vóór en ná het tijdstip van de waterpassing. De offset t.o.v. de waterpassing wordt vervolgens bepaald als differentie tussen deze gemiddelde waarden en de gecombineerde waterpas tijdserie.

- b. Voor de grote waterpassing 2003 wordt bij wijze van uitzondering een andere aansluitingsmethodiek toegepast. Vanwege het tijdsgat van een half jaar tussen de waterpassing medio 2003 en de eerste acquisitie door Envisat in december 2003 wordt de InSAR deformatie een half jaar naar het verleden geëxtrapoleerd. Dit gebeurt met behulp van een lineaire trend die uit de eerste anderhalf jaar van de InSAR tijdserie wordt geschat (zie Figuur 40).



Figuur 40: Aansluiting van een InSAR tijdserie op de waterpassing tussen 2003 en 2013. De representatieve InSAR deformatie wordt als gemiddelde over maximaal een jaar berekend. Alleen in 2003 vindt bij wijze van uitzondering een lineaire extrapolatie van een half jaar plaats.

- c. Het is mogelijk, dat de tijdseries van InSAR/GPS en waterpassing in de tijd wel overlappen maar binnen het overlappend tijdvak geen waterpassingen uitgevoerd zijn. Dat is bijvoorbeeld het geval, als een peilmerk voor en na, maar niet tijdens een InSAR missie is waargenomen. In deze gevallen worden waterpassing en InSAR in de differentiëestaat niet gecombineerd en los van elkaar gerapporteerd, om geen mogelijk onjuiste aanname van een vloeiend gedrag te maken (zie Figuur 41).



Figuur 41: Omdat peilmerk 003G0011 niet is waargenomen tussen 1987 en 2003, kunnen de ERS waarnemingen van 1993-2002 niet aan uit de waterpassing afgeleide tijdserie worden aangesloten. De zwarte rechthoek geeft aan, dat deze twee meetreeksen apart dienen te worden beschouwd. Hetzelfde geldt voor de InSAR waarnemingen vanaf 2006, die geen overlap hebben met de waterpassingen tot 2003.

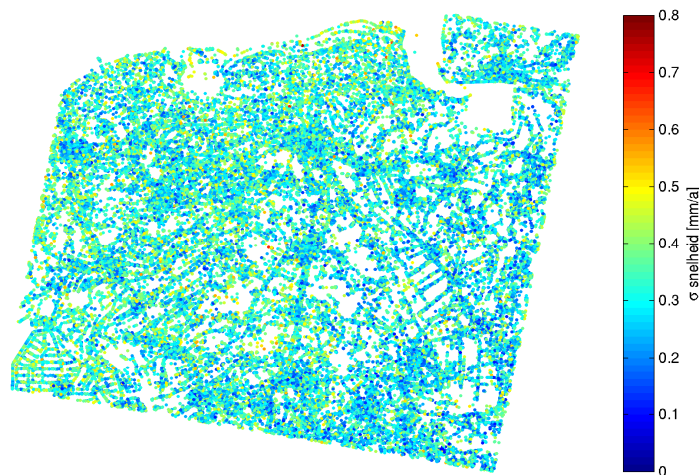
4. **Vastlegging van absolute waarden:** Gezien InSAR tijdseries geen absolute hoogteverschillen ten opzichte van het referentiepeilmerk maar alleen veranderingen weergeven, wordt de gemiddelde deformatie binnen het eerste jaar van deze tijdseries op nul gesteld. Voor met waterpassingen geïntegreerde tijdseries is deze stap niet nodig en wordt met betrekking tot de differentiestaten ook niet toegepast. Wat de visualisatieplaatjes betreft, komt echter het absolute hoogteverschil ten opzichte van het referentiepeilmerk arbitrair over en heeft geen toegevoegde waarde voor de interpretatie. Daarom is in alle grafieken het begin van een tijdserie op nul gesteld zoals volgt:
 - a. Indien de tijdserie een stabiel verondersteld peilmerk (zie paragraaf 3.2) bevat, wordt de vroegste waterpassing op nul gesteld.
 - b. Zo niet, dan wordt onderzocht, of binnen de het eerste jaar van de gecombineerde tijdserie GPS waarnemingen beschikbaar zijn. In dit geval wordt de gemiddelde deformatie van alle GPS waarnemingen binnen de eerste 25 dagen van de GPS tijdserie op nul gesteld.
 - c. Zo niet, dan wordt onderzocht, of binnen het eerste jaar van de gecombineerde tijdserie InSAR waarnemingen beschikbaar zijn. In dit geval wordt de gemiddelde deformatie van alle InSAR waarnemingen binnen het eerste jaar van de InSAR tijdserie op nul gesteld.
 - d. Anders wordt de vroegste waarneming op het niet stabiel verondersteld peilmerk op nul gesteld.

E Precisie en betrouwbaarheid InSAR

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de precisie en betrouwbaarheid van de berekende bodembeweging op basis van InSAR waarnemingen en de wijze van PS selectie. De focus wordt gelegd op de Radarsat-2 missie; omdat een betrouwbaarheidsanalyse van Envisat al eerder werd gerapporteerd (NAM, 2012).

E.1 Precisie

Om een indruk van de precisie van een InSAR deformatie schattingen te krijgen, kan uit de residu's ten opzichte van de "echte" deformatie een standaardafwijking worden geschat. Gezien de echte beweging van de PS niet bekend is, kan, om een eerste indruk te krijgen, een lineair gedrag als benadering worden aangenomen (zie Figuur 42).



Figuur 42: Standaardafwijking van de geschatte snelheden, geschat uit residu's ten opzichte van een lineaire trend. Deze maat is geschikt, om de kwaliteit van PS onderling te vergelijken, maar het geeft niet goed de feitelijke onzekerheid van de metingen weer.

Deze standaardafwijkingen zijn meestal kleiner dan 0,5 mm/a en onderschatten de totale onzekerheid van de meting op grote schaal aanzienlijk. Dat heeft te maken met verwaarlozing van uit de processing voortkomende correlaties, die voor een groot deel aan de filtering van het atmosferisch signaal te wijten zijn (zie paragraaf E.1.1). Een ander aspect, dat mee in beschouwing moet worden genomen, zijn autonome bewegingen van de PS. Deze beïnvloeden niet de precisie van de InSAR meting zelf maar verminderen de nauwkeurigheid waarmee door gaswinning veroorzaakte bodemdaling kan worden vastgesteld (zie paragraaf E.1.2).

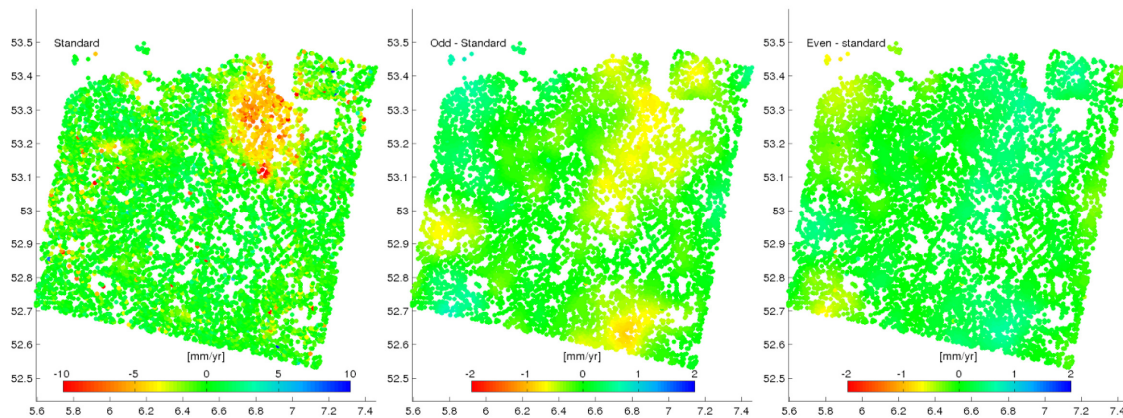
Rekening houdend met deze effecten, kan een standaardafwijking van 0,5-2 mm/a over vijf jaar als voorzichtige benadering van de nauwkeurigheid van uit InSAR tijdseries geschatte snelheden van de bodemdaling door gaswinning worden aangezien. Daaruit volgt een standaardafwijking van een enkele waarneming in de orde van 5-10 mm. Het moet echter worden opgemerkt, dat de nauwkeurigheid van een uit InSAR bepaald hoogteverschil van veel factoren afhangt, zoals

tijdsverschil tussen twee metingen, afstand tussen twee PS (of tussen PS en referentiepunt/-gebied), tijdvak voor middeling in de tijd en aantal PS voor middeling in de ruimte. De waarde van een algemene nauwkeurigheidsopgave voor InSAR is daarom beperkt.

E.1.1 Atmosferische verstoringen

Omdat de ruwe InSAR waarnemingen door atmosferische effecten verstoord zijn, moet de contributie van de atmosfeer tijdens de processing worden gescheiden en vervolgens worden afgetrokken. Omdat het atmosferisch signaal in tegenstelling tot de deformatie ongecorrleerd is in de tijd, kan diens contributie uit de deformatie tijdseries van de PS gefilterd worden. De nauwkeurigheid van de scheiding tussen deformatie en atmosferisch signaal verbetert naarmate het aantal opnames toeneemt. Gezien de scheiding nooit perfect is moet altijd rekening worden gehouden met residuele artefacten in de InSAR deformatie, die afkomstig zijn van atmosferische verstoringen.

Om de orde van grootte van residuele atmosferische verstoringen in de geschatte deformatie in te kunnen schatten, zijn ter controle twee aanvullende PS-InSAR analyses uitgevoerd, telkens met de helft van alle radarbeelden: een processing met de beelden met oneven nummers en een processing met de beelden met even nummers. De resultaten laten afwijkingen van tot 1 mm/a ten opzichte van de processing met alle beelden zien met een ruimtelijke correlatielengte van 10-20 km (zie Figuur 43). De afwijkingen van de twee controles ten opzichte van elkaar lopen op tot 2 mm/a. Opgemerkt moet worden, dat de twee controles maar op de helft van de beelden gebaseerd en daarom minder nauwkeurig zijn. Uiteindelijk wordt 1 mm/a een geschikte inschatting geacht van de maximale bijdrage van atmosferische verstoringen tot de onzekerheid van InSAR deformatie schattingen (gebaseerd op een reeks van 68 radarbeelden, opgenomen binnen een tijdvak van vijf jaar). Deze bijdrage zal continu kleiner worden, naarmate meer beelden beschikbaar komen, die een langer tijdsinterval bedekken.



Figuur 43: Beoordeling van residuele atmosferische verstoring van de Radarsat-2 processing resultaten gebaseerd op verschillende selecties van radarbeelden. Links: geschatte snelheden in de kijkrichting van de satelliet gebaseerd op alle beschikbare beelden 2009-2014 (standaard processing), midden: afwijkingen van de snelheden t.o.v. de standaard processing als alleen de beelden met oneven nummers worden gebruikt, rechts: afwijkingen van de snelheden t.o.v. de standaard processing als alleen de beelden met even nummers worden gebruikt.

Deze foutenbron is ruimtelijk gecorreleerd, wat betekent, dat zijn invloed op het onderlinge hoogteverschil van naburige PS verwaarloosbaar is. Voor langere afstanden moet er wel rekening mee worden gehouden. Het is echter niet mogelijk, om deze onzekerheid uit de deformatie

tijdseries zelf te schatten. Daarvoor zou een ruimtelijk model van de bodemdaling moeten worden aangenomen, dat niet met voldoende nauwkeurigheid beschikbaar is.

E.1.2 Bodembeweging door ondiepe oorzaken

Om met InSAR te bepalen, hoeveel bodembeweging door gaswinning wordt veroorzaakt, moet naast de onzekerheid van de meting zelf ook met een tweede component rekening worden gehouden: Meetpunten (hier: PS) zijn onderhevig aan autonome bewegingen, veroorzaakt door bijvoorbeeld zetting van gebouwen en infrastructuur, veranderingen van het grondwaterpeil of veencompactie. Deze onzekerheidscomponent wordt groter naarmate de afstand tussen twee metingen in de tijd toeneemt, en ook een afhankelijkheid van de ruimtelijke afstand is mogelijk. Een aanvullende afhankelijkheid van lokale omstandigheden zoals de grondsoort lijkt waarschijnlijk.

Een aantal onderzoeken hebben parametrische modellen bepaald, die de onzekerheid van “ondiepe” bodembeweging op hoogteverschillen uit waterpassing kwantificeren. Voor een tijdsinterval van 10 jaar bedraagt de standaardafwijking van een gewaterpast hoogteverschil volgens het voor een fries kustgebied bepaalde model van Samiei-Esfahany en Bähr (2015) 6,1 mm. Landelijke modellen van Houtenbos (2001) gaan telkens van een standaardafwijking van 2,3 mm of 1,1 mm uit. Het kan worden verwacht, dat de autonome beweging van de meest stabiele PS met die van waterpas-peilmerken vergelijkbaar is.

E.2 Betrouwbaarheid

In deze paragraaf worden effecten geadresseerd, die het potentieel hebben, om InSAR resultaten systematisch te verstoren. Dat kan, omdat zij vanwege hun geaardheid niet in het kansmodel van InSAR kunnen worden meegenomen, of omdat zij als verwaarloosbaar worden beschouwd.

E.2.1 Meerduidigheden

Omdat met InSAR alleen de fractionele fase en niet het aantal gehele golflengten kan worden gemeten, kunnen verkeerd opgeloste meerduidigheden in de fasewaarnemingen mogelijk fouten introduceren. De meerduidigheid in de berekende deformatie houdt in, dat deze een geheel aantal keren de halve golflengte (Radarsat-2: 28 mm) hoger of lager kan liggen. Naarmate het bodembewegingssignaal beter bemonsterd wordt in ruimte en tijd, en de fase waarnemingen preciezer zijn, kunnen de atmosferische verstoringen beter worden geschat en verwijderd en zal de correcte oplosbaarheid van de meerduidigheden toenemen.

Voor de gasvelden in Noord-Nederland speelt met name de ruimtelijke dichtheid een rol. Omdat het bodemdalingssignaal in de orde van enkele mm/a ligt, is de temporele bemonstering ten opzichte van de meerduidigheid (28 mm) dusdanig, dat in de tijd de oplosbaarheid zeer hoog is. Ook al kunnen in ruimte en tijd geïsoleerde oplossingsfouten af en toe optreden, is hun invloed op de gerapporteerde bodemdaling vanwege middelvorming over meerdere opnames verwaarloosbaar klein. Het optreden van in ruimte en tijd gecorreleerde oplossingsfouten is gezien de punt dichtheid in het rapportagegebied bijna onmogelijk. Een controle op sluitfouten waarborgt de kwaliteit van de oplossing.

E.2.2 Baanfouten en ruimtelijke trends

De baanbepaling van Radarsat-2 is duidelijk onnauwkeuriger dan bij eerdere satellieten zoals ERS en Envisat, en de effecten van baanfouten kunnen oplopen tot meer dan een decimeter in de gemeten deformatie. Daarom is het noodzakelijk, om een desbetreffende correctie toe te passen, die deze effecten volledig elimineert.

Het door baanfouten veroorzaakte foutsignaal is bijna lineair in de ruimte en kan in het onderhavige geval door een lineaire trend voldoende nauwkeurig worden benaderd. Daarom wordt ter correctie van de waarnemingen in alle individuele beelden een ruimtelijke trend geschat en vervolgens afgetrokken. Om daardoor de deformatiemeting zelf niet te verstoren, worden ter schatting van de trend uitsluitend waarnemingen uit een stabiel verondersteld gebied gebruikt (zie Figuur 11).

Het nadeel van deze aanpak is, dat hij gebaseerd is op een stabiliteitsaanname in het referentiegebied. Deze kan echter als relatief betrouwbaar worden beschouwd, omdat in het gekozen gebied geen gasvelden liggen en ook in het verleden geen metingen op significante deformatie wezen. De problematiek van een stabiele referentie is trouwens geen specifiek probleem van de InSAR techniek. Ook bij een deformatieanalyse door waterpassing moeten één of meerdere punten als referentie worden gekozen.

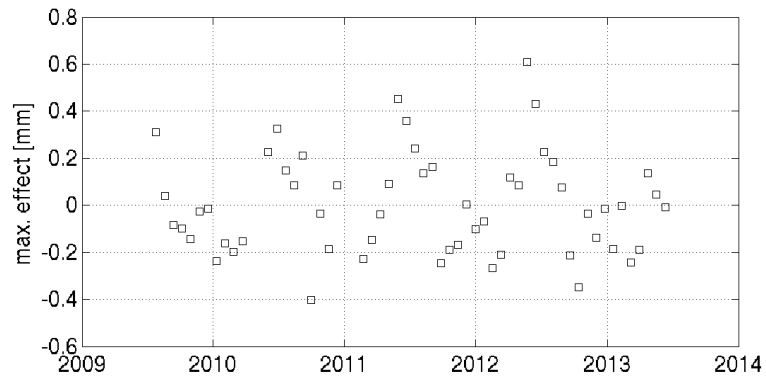
E.2.3 Ruimtelijke componenten

Behalve voor verhoging van precisie en betrouwbaarheid, kunnen onafhankelijke tijdseries uit banen met een verschillende kijkhoek ook worden gebruikt om te ontbinden in een horizontale en verticale component. Deze optie bestaat voor Radarsat-2 niet, omdat vanwege belangenconflicten met gebruikers van maritieme toepassingen geen opnames vanuit een opgaande baan boven Noord Nederland mogelijk zijn. Daarom wordt voor de verwerking van de metingen aangenomen, dat de grond alleen in verticale richting verplaatst. Deze aanname is zeker een goede benadering van de realiteit, maar er moet rekening worden gehouden met een door het niet-meenemen van horizontale bewegingen geïntroduceerde fout.

De kijklijn van Radarsat-2 heeft in het midden van het beeld een invalshoek van 34° ten opzichte van de verticaal. Voor wat betreft de sensitiviteit, betekent dit, dat een verticale beweging met een factor van 0,83 naar de kijklijn wordt vertaald, terwijl voor horizontale bewegingen een factor van maximaal 0,56 geldt. Een horizontale component van 2 mm/a vertaald dus naar een gemeten beweging van 1,1 mm/a in de kijkrichting en kan door de daaropvolgende conversie naar de verticaal een afwijking van 1,3 mm/a veroorzaken. Omdat de verwachte horizontale deformatie klein is, is de hierdoor gemaakte fout beperkt. Voor de Sentinel missie wordt verwacht, dat weer continu opnames van én een opgaande én een neergaande baan beschikbaar zullen zijn.

E.2.4 Subpixel positie

Als een PS zich niet precies in het centrum van een pixel bevindt, kan dit een systematisch effect op de geschatte deformatie hebben, die afhankelijk is van de subpixel positie in vluchtrichting en kleine variaties in de oriëntering van de Radar antenne. Het effect is maximaal voor een subpixel positie van een halve pixel. Figuur 44 laat zien, dat dit maximaal mogelijke effect op de verticale deformatie tijdserie kleiner is dan 1 mm. Verder is er geen systematisch patroon herkenbaar, en de invloed op de geschatte bodemdalingssnelheid wordt verder afgezwakt door het verwerken van gemiddelde tijdseries van naburige PS met verschillende subpixel posities.



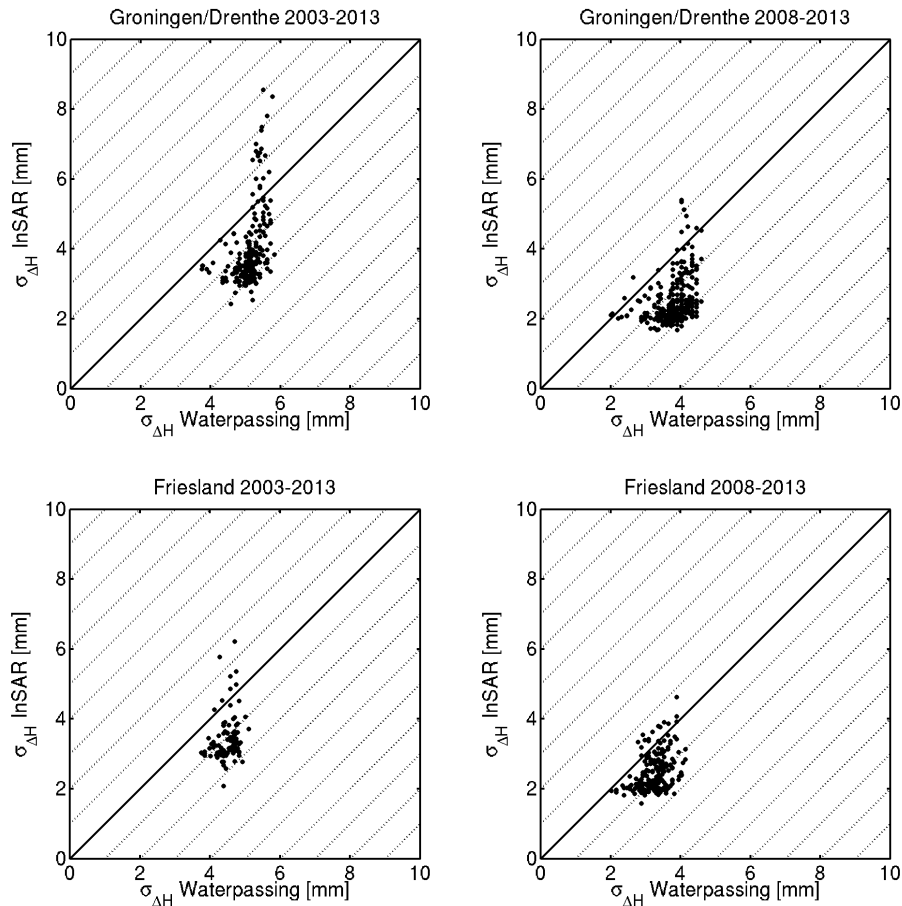
Figuur 44: Maximaal mogelijk effect van de subpixel positie op de geschatte verticale deformatie. De berekening volgens Ketelaar (2009) is gebaseerd op een pixelgrootte in vluchtrichting van 2,5 m bij een oversampling factor van 2.

E.2.5 Geocodering

De precisie van de geografische locatie van de PS is een combinatie van de resolutie (12,5 m x 2,5 m voor Radarsat-2 bij een oversampling factor van 2) en het effect van de onzekerheid in de ellipsoïdische hoogte van de PS (1-2 m). De nauwkeurigheid van de geografische locatie van de PS zou daarom beter zijn dan 20 m, wat door visuele vergelijking van PS-patronen en ligging van huizen in bebouwde gebieden kan worden bevestigd. Voor het meten van de diepe bodemdaling is dat voldoende nauwkeurig.

F Kansmodel validatie

Om te kunnen beoordelen, of afwijkingen tussen waterpassing en InSAR significant zijn, moet voor beide technieken een kansmodel worden aangenomen. Daaruit worden standaardafwijkingen van de in ruimte en tijd gedifferentieerde hoogteverschillen bepaald, die voor de validatie in hoofdstuk 5 worden gebruikt (zie Figuur 45). In deze bijlage worden de onderliggende kansmodellen voor waterpassing en InSAR toegelicht.



Figuur 45: Vergelijking van standaardafwijkingen van hoogteverschillen uit waterpassing en InSAR voor de twee validatiegebieden Friesland en Groningen/Drenthe en de twee tijdvakken 2003-2013 en 2008-2013. De standaardafwijkingen voor 2003-2013 zijn groter vanwege de langere tijdsafstand en de extrapolatie van de InSAR deformatie in 2003 (zie Figuur 40).

F.1 Kansmodel waterpassing

Het kansmodel voor waterpassingen bevat twee componenten: meetonzekerheid en autonome peilmerkbewegingen. De meetonzekerheid is gebaseerd op het model, dat de standaardafwijking van een oorspronkelijke trajectmeting evenredig is met de lengte van het traject. Dit model wordt gekalibreerd in de epoche-wijze vereffeningen.

Onder autonome peilmerkbewegingen worden hier alle verplaatsingen van het peilmerk verstaan, die niet aan de gasproductie te wijten zijn, vooral veroorzaakt door zetting van gebouwen. Zij worden gemodelleerd door de ruimtelijk ongecorreleerde component van het door Samiei-Esfahany en Bähr (2015) voorgestelde model voor in ruimte en tijd gedifferentieerde hoogteverschillen:

$$\sigma^2 = 0,148 \frac{\text{mm}^2}{\text{a}^{1,688}} \cdot \Delta t^{1,688}$$

met de variantie σ^2 en het tijdsverschil Δt . Ruimtelijk ongecorreleerd betekent daarbij, dat nabije peilmerken onafhankelijk van elkaar bewegen. Het model ziet ook een component voor ruimtelijk gecorreleerde bewegingen voor, aan die nabije peilmerken in gelijke onderhevig zijn. Deze hoeft echter niet in beschouwing te worden genomen, omdat het effect op peilmerken en PS identiek is en in de directe vergelijking van waterpassing en InSAR opheft. De modelparameters worden realistisch geacht voor het validatiegebied Friesland, omdat zij in een studiegebied werden bepaald, dat daarmee deels overlapt. Voor het validatiegebied Groningen zijn zij mogelijk te pessimistisch vanwege de gemiddeld hardere grond.

F.2 Kansmodel InSAR

Gezien een strikt kansmodel voor InSAR weliswaar in ontwikkeling maar nog niet beschikbaar is, wordt een empirisch model aangenomen. De standaardafwijkingen worden per peilmerk afgeleid uit de residu's ten opzichte van een functioneel model, dat het hoogteverschil in ruimte en tijd schat, gebaseerd op de individuele InSAR dubbel-differenties per PS en per epoche. Daarbij wordt rekening gehouden met de selectie van PS binnen een straal van 500 m rond een peilmerk, de middeling in de tijd binnen een tijdvak van een jaar en de extrapolatie in 2003 (zie Figuur 40 op blz. 53), een simultane schatting van de offsets tussen Envisat (op-/neergaand) en Radarsat-2, en algebraïsche correlaties van dubbel-differenties.

Dit kansmodel houdt impliciet rekening met autonome bewegingen van nabije PS ten opzichte van elkaar, omdat een uit InSAR bepaald hoogteverschil voor een peilmerk in het algemeen gebaseerd is op meerdere PS. Met residuele atmosferische verstoringen (zie paragraaf E.1.1) kan niet volledig worden rekening gehouden, omdat de onderlinge hoogteverschillen van nabije PS niet gevoelig zijn voor ruimtelijk gecorreleerde signaalcomponenten.

Referenties

Houtenbos, A., F. Kenselaar (2001): Peilmerk hoogte variaties – stochastische analyse van peilmerkbeweging in Nederland. Rapport, Technische Universiteit Delft.

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

van Leijen, F. (2014): Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory. Publications on Geodesy 86, Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-informatie (NCG), Delft.

NAM (2012): Bodemdaling Groningen – satelliet radar interferometrie. Rapportage behorende bij het meetplan Groningen 2010. NAM rapport EP201203202214.

Samiei-Esfahany, S., H. Bähr (2015): Research and Development Project for Geodetic Deformation Monitoring – contribution to the research project: “Long-term study on anomalous time-dependent subsidence in the Wadden Sea Region”. NAM rapport EP201505216980.