

**Meetregister bij de meetplannen**  
**Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2023**  
Rapportage van satelliet radar interferometrie  
Noord-Nederland 2023

27 oktober 2023

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Documentnummer: NAM EP202303201224

## Samenvatting

Dit document bevat het meetregister Noord-Nederland 2023 op basis van satelliet radar interferometrie. Het is tot stand gekomen in het kader van de meetplannen Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2023.

In dit meetregister worden de actuele bodemdalingmetingen van Noord-Nederland gepubliceerd. Zij zijn gebaseerd op radarbeelden, die tussen 2015 en 2023 met de Sentinel-1 satellieten zijn opgenomen en in 2023 met de Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniek zijn geprocest. Door gebruik te maken van Sentinel-1 opnames van twee banen, kon de waargenomen deformatie omgerekend worden in een verticale en een horizontale component. De verticale component is vervolgens op de locaties van waterpaspeilmerken omgerekend en daar met tijdseries van voorafgaande InSAR satellieten en bestaande waterpassingen gecombineerd. Bij de combinatie wordt rekening gehouden met een stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken en een representativiteitsclassificatie van InSAR meetpunten. Het resultaat zijn gecombineerde tijdseries uit waterpassingen tussen 1964 en 2018 en jaarlijks gemiddelde InSAR-deformatie tussen 1992 en 2023. Deze zijn berekend ten opzichte van drie verschillende referentiepeilmerken.

De waargenomen bodemdalingssnelheid loopt op tot 7 mm/a in het centrum van het Groningenveld en is minder boven de overige NAM-gasvelden.

Continuïteit voor de toekomst wordt gewaarborgd door vervangende nieuwe satellieten van de Sentinel-1 missie. Noord-Nederland wordt in 2023 en 2024 door Rijkswaterstaat gewaterpast. Het waterpasnetwerk wordt hierdoor als terugvaloptie instandgehouden.

## Inhoudsopgave

1. Introductie.....	4
1.1. Keuze meettechniek.....	4
1.2. Beschikbaarheid meetgegevens.....	5
1.2.1. Waterpassing.....	6
1.2.2. InSAR.....	6
1.2.3. GNSS .....	8
2. Waterpassingen.....	9
2.1. Opsplitsing in deelgebieden .....	9
2.2. Stabiliteitsanalyse.....	10
2.3. Instandhouding waterpasnetwerk .....	11
3. PS-InSAR .....	13
3.1. Kwaliteitsborging.....	13
3.2. Puntselectie .....	13
3.3. Resultaten.....	14
3.4. Conversie naar de verticaal en decompositie .....	16
4. Combinatie .....	17
4.1. Referentie in de ruimte .....	17
4.2. Aansluiting van tijdseries op elkaar.....	17
4.2.1. Intra-techniek combinatie InSAR.....	18
4.2.2. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken.....	18
4.2.3. Meerdere tijdseries per peilmerk.....	19
5. Conclusies en vooruitzichten.....	20
Bijlagen .....	21
A. Geleverde data .....	21
A.1. Differentiestaten InSAR.....	21
A.2. Gecombineerde differentiestaten.....	21
A.3. Stabiliteitsstaten.....	22
A.4. Kaarten met hoogteverschillen .....	22
B. Voorbeeldtijdseries .....	23
B.1. Voorbeeld peilmerken.....	23
B.2. GNSS .....	33
B.3. Verklaring der tekens .....	57
C. Combinatie procedure .....	58
Referenties .....	61

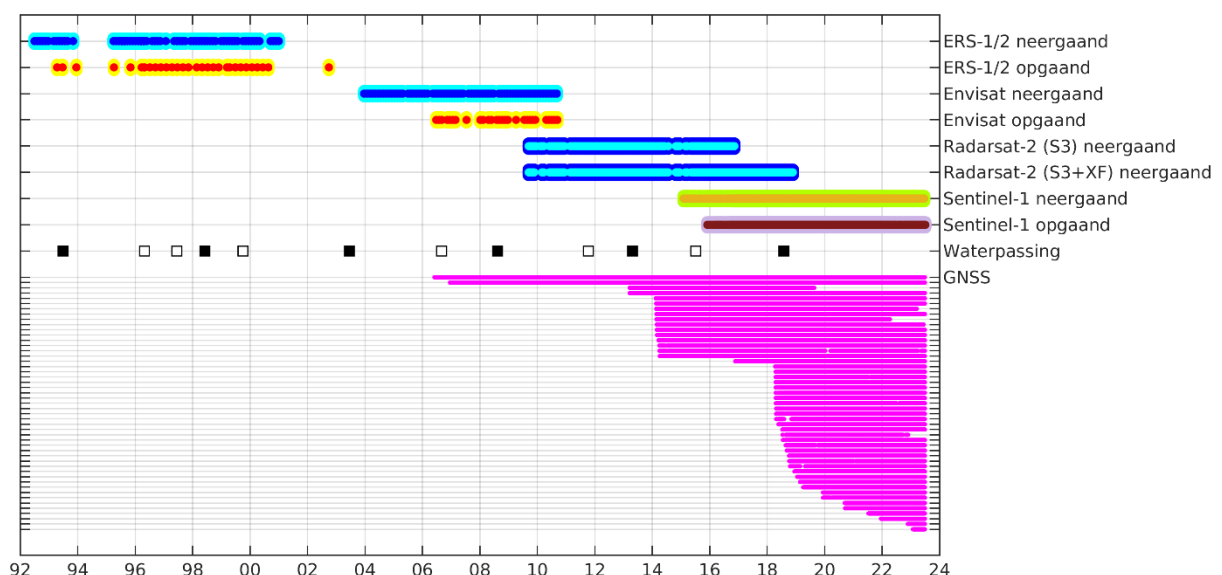
# 1. Introductie

In dit meetregister worden de resultaten van satelliet radar interferometrie gerapporteerd, waarmee uitvoering wordt gegeven aan het gestelde in artikel 31, Mijnbouwbesluit 2002, met betrekking tot de uitvoering en rapportage van metingen overeenkomstig de goedgekeurde meetplannen Noord-Nederland, Waddenzee en Groningen 2023.

Het nu voorliggende rapport vormt het officiële en openbare meetregister behorende bij de genoemde meetplannen. De gepubliceerde hoogteverschillen geven alleen een indruk van de beweging van de gemeten peilmerken. De bijdrage aan deze beweging van een enkele oorzaak en de relatie met maaiveld- en/of bodembewegingen kan men slechts afleiden met doelgerichte verdere analyses door ter zake deskundigen. Dergelijke analyses vallen buiten het kader van dit meetregister.

## 1.1. Keuze meettechniek

In het laatste meetregister Noord Nederland van 2018 (NAM, 2019a) is waterpassing als inwinningstechniek gebruikt. De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM, 2019c) heeft een addendum bij dit meetregister ingediend, waarin de rapportage van Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) metingen met Radarsat-2 voor Noord-Nederland is gedemonstreerd en gevalideerd. Later heeft NAM vanaf het meetregister Zuid-Holland 2019 (NAM, 2020a) voor de meeste rapportagegebieden op het vaste land PS-InSAR als hoofdwinningstechniek gebruikt. Daarbij is invulling gegeven aan de aspecten, die het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) van groot belang acht voor het monitoren van bodemdaling met PS-InSAR, zoals beschreven in het Annex Meetplan Zuid-Holland 2019 (NAM, 2018). In de daarin beschreven procedures en kwaliteitsborgingen wordt aangegeven, dat de ruimtelijke verdeling van de waterpaspeilmerken geschikt moet blijven voor een toekomstige waterpassing als terugvaloptie op de historische meettechniek. De instandhouding van het waterpasnetwerk van Noord-Nederland wordt verder toegelicht in paragraaf 2.3.

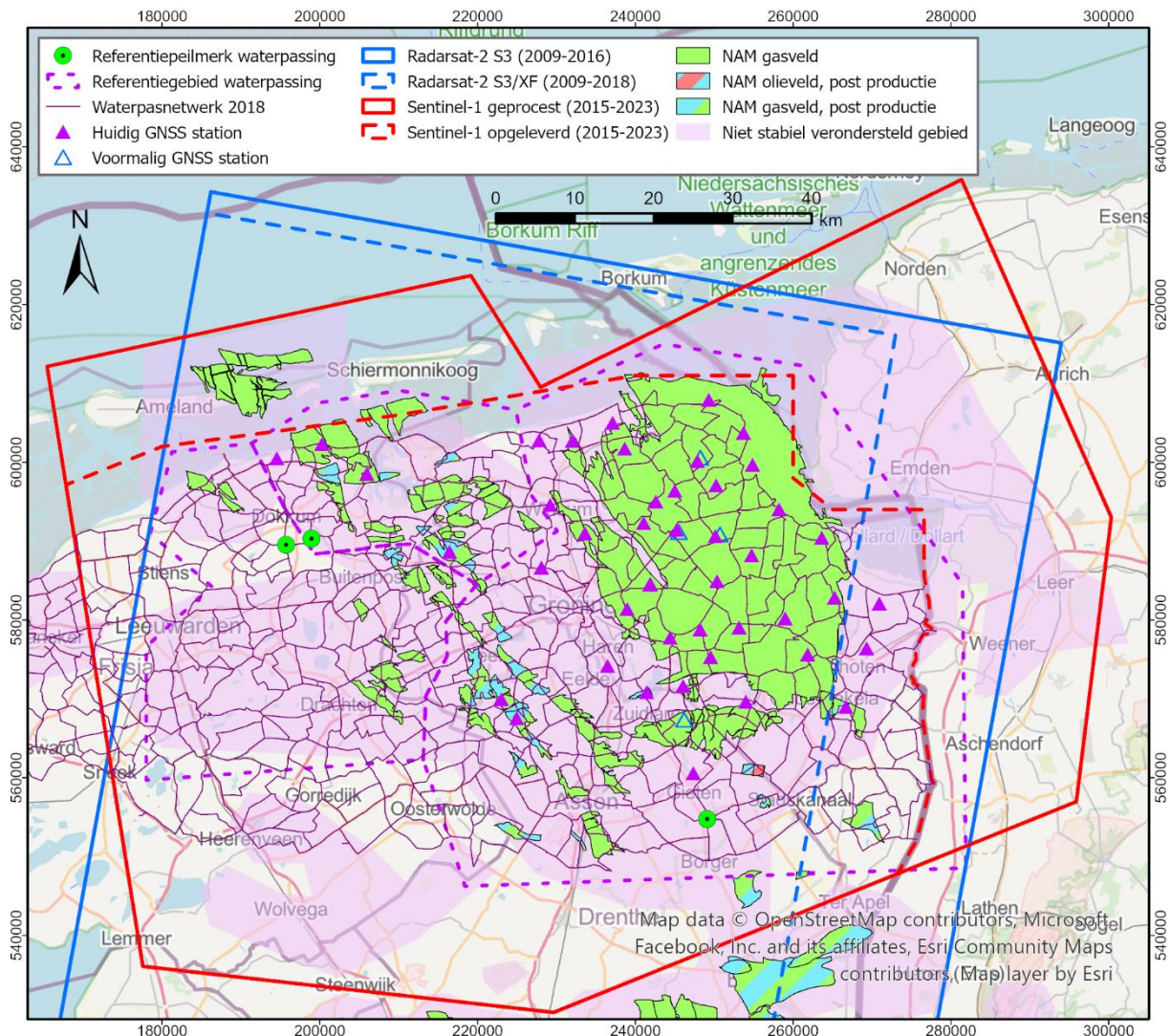


Figuur 1: Temporele bemonstering van satelliet opnames, tijdstippen van de waterpassingen en operationele tijdvakken van Global Navigation Satellite System (GNSS) stations. Gevulde vierkantjes staan voor "grote" waterpassingen, open vierkantjes staan voor "kleine" waterpassingen. Grote waterpassingen bestrijken het hele rapportagegebied, kleine waterpassingen een deel daarvan.

In het voorliggende meetregister is InSAR de hoofdwinningstechniek, gebruikmakend van radarbeelden afkomstig van de Sentinel-1 missie. De geschiktheid van InSAR-metingen met Sentinel-1 voor Noord-Nederland heeft NAM reeds in een analyserapport (NAM, 2020b) aangetoond. Daaruit is gebleken, dat de dichtheid van Sentinel-1 meetpunten voldoende is en verschillen tussen Sentinel-1 en Radarsat-2 c.q. waterpassing binnen de nauwkeurigheidsmarges vallen.

## 1.2. Beschikbaarheid meetgegevens

Figuur 1 geeft een overzicht van de bemonstering in de tijd van Noord-Nederland met bodemdalingsmetingen. De ruimtelijke bedekking van recente metingen is te zien in Figuur 2. Details over beschikbare metingen met de technieken waterpassing, InSAR en Global Navigation Satellite Systems (GNSS) zijn in de volgende paragrafen verder toegelicht. Meetgegevens van waterpassing en InSAR zijn bijgesloten in bijlage A. De rapportage van GNSS-metingen valt buiten het kader van dit meetregister. Toch worden GNSS-tijdseries samen met tijdseries van andere technieken op dezelfde locaties in bijlage B.2 getoond.



Figuur 2: Ruimtelijke bemonstering van Noord-Nederland door de geodetische meettechnieken waterpassing, InSAR en GNSS.

### 1.2.1. Waterpassing

De monitoring van bodemdaling door gaswinning in Noord-Nederland gaat terug tot de waterpassing in 1964 in Groningen. Sindsdien hebben er regelmatig, vanaf 1972 minimaal eens in de vijf jaar, waterpassingen plaatsgevonden. De eerste gerapporteerde vlakdekkende “grote”, vijfjaarlijkse waterpassing van het hele rapportagegebied is van 1987. Van 1996 tot 2015 zijn in aanvulling daarop ook “kleine” waterpassingen uitgevoerd.

De ruimtelijke bedekking van de laatste grote waterpassing van 2018 is in Figuur 2 te zien. Daarin zijn ook de drie “referentiegebieden” aangegeven, waarin de vereffende hoogteverschillen ten opzichte van drie referentiepeilmerken geïnterpreteerd dienen te worden. De opsplitsing in deelgebieden is bedoeld, om voortplantingsfouten in het waterpasnetwerk te beperken.

### 1.2.2. InSAR

Vanaf 1992 zijn radarbeelden opgenomen door de satellietmissies ERS-1/2, Envisat, Radarsat-2 en Sentinel-1. Met uitzondering van Radarsat-2 bestaan deze uit opnames van zowel een neergaande als een opgaande baan. In een neergaande baan vliegt een satelliet van het noordpoolgebied in de richting van de evenaar en neemt gebieden ten westen van zijn vliegbaan op. In een opgaande baan is dit andersom.

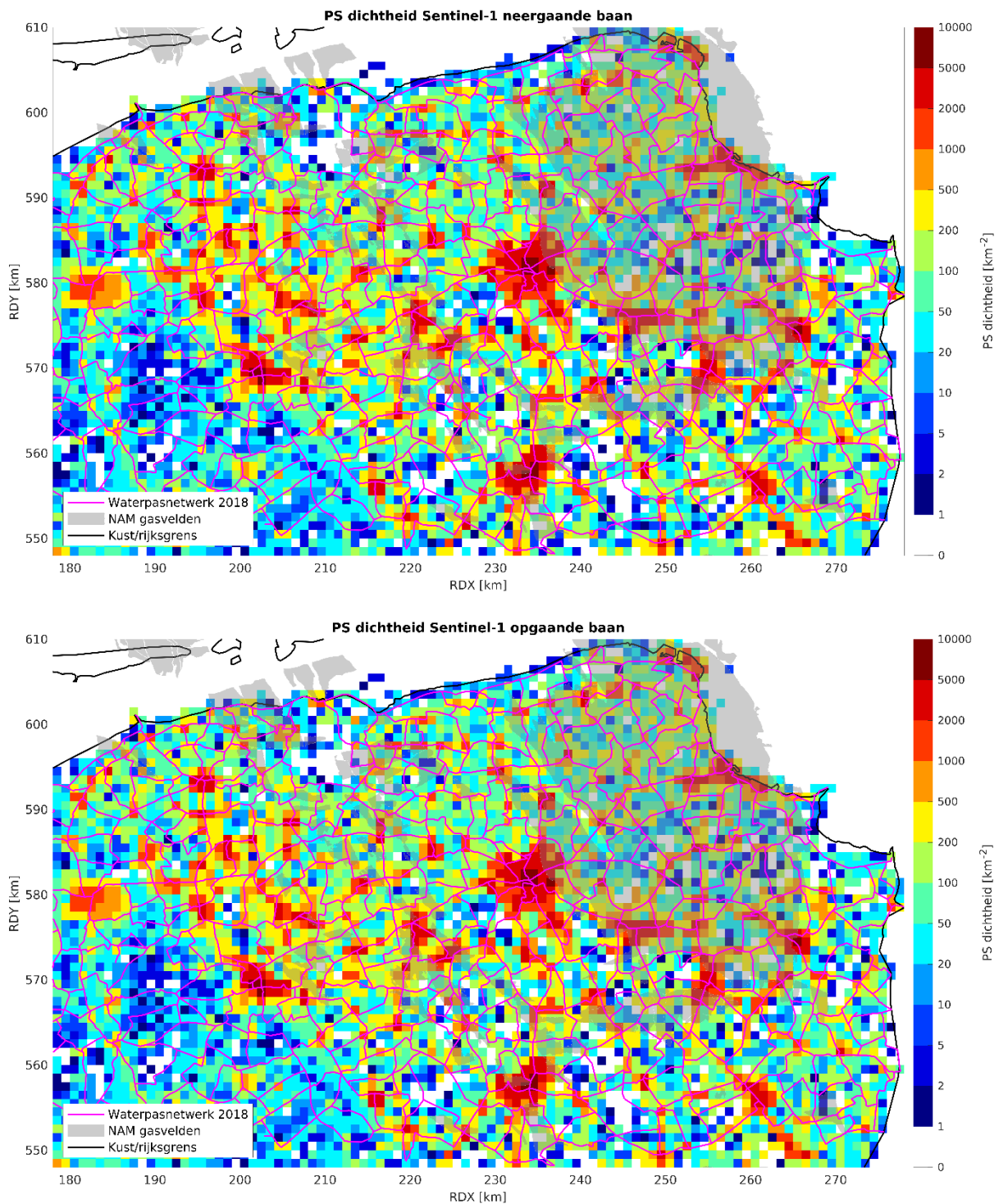
Van Radarsat-2 zijn twee analyseresultaten beschikbaar, die qua bedekking in tijd (zie Figuur 1) en ruimte (zie Figuur 2) verschillen. Dit heeft te maken met het in 2016 veranderde opnamebeleid van de satellietbeheerder. Tot november 2016 werden beelden in de standaard stand 3 (S3) opgenomen, en het rapportagegebied was ook in het oosten helemaal bedekt tot aan de Duitse grens. Sinds november 2016 wordt de Extra Fine (XF) stand gebruikt, waaraan een andere indeling van opnamekaders verbonden is. Een gezamenlijke InSAR-verwerking van beelden van voor en na november 2016 is daarom alleen in het overlappende gebied mogelijk, dat in Figuur 2 met een blauw kader gekenmerkt is. De resultaten hiervan zijn in het addendum bij het meetregister Noord-Nederland 2018 (NAM, 2019c) gerapporteerd.

In dit meetregister is de bedekking in de tijd echter door de nieuwe metingen met Sentinel-1 al gewaarborgd. Daarom is wat betreft Radarsat-2 ervoor gekozen, in plaats van de gecombineerde verwerking uit S3 en XF, de dataset gebaseerd op alleen S3 te gebruiken en aan te leveren (zie Bijlage A.1). Deze reikt tot 2016 maar bedekt het hele rapportagegebied. De overlap in de tijd met de Sentinel-1 datasets is voldoende voor een aansluiting van tijdseries. Door combinatie van Radarsat-2 en Sentinel-1 kan zo een volledige bedekking in ruimte en tijd van 2009 tot 2023 gerealiseerd worden.

Het opname interval vanuit een enkele satellietbaan is 35 dagen voor ERS en Envisat, 24 dagen voor Radarsat-2 en 12 dagen voor Sentinel-1. Tussen september 2016 en december 2021 bestond de Sentinel-1 constellatie tijdelijk uit twee satellieten, Sentinel-1A en Sentinel-1B, waardoor om de zes dagen een nieuwe opname beschikbaar kwam. Het streefinterval van zes dagen zal met Sentinel-1C opnieuw worden bereikt. Deze satelliet staat klaar en zodra problemen met de lanceringsraket opgelost zijn zal deze gelanceerd worden.

De punt dichtheid van Sentinel-1 varieert per baan van 0-100 PS/km<sup>2</sup> in het landelijke gebied tot meer dan 1000 PS/km<sup>2</sup> in het stedelijke gebied (zie Figuur 3). De ruimtelijke bedekking is dichter dan met waterpassing en GNSS, zelfs dichter dan met Radarsat-2 (NAM, 2020b) en voldoende voor de doelstelling van dit meetregister. Opvallend zijn een aantal “witte vlekken” met nagenoeg geen PS. Dat

zijn in het algemeen natuurgebieden, waar sowieso ook weinig peilmerken te vinden zijn. Zowel PS als ook peilmerken zijn buiten bebouwde gebieden voornamelijk langs de wegen en andere infrastructuur te vinden.



Figuur 3: Sentinel-1 PS-dichtheid in het rapportagegebied voor neergaande en opgaande baan. Aangegeven wordt het aantal representatieve PS per vierkant van  $1 \text{ km}^2$ , waarbij in paragraaf 3.1 wordt uitgelegd, wat onder representativiteit wordt verstaan.

### 1.2.3. GNSS

Tegenwoordig bevatten de meetplannen 44 permanente GNSS-stations, waarvan de verticale beweging driemaandelijks aan SodM wordt gerapporteerd.

De twee oudste stations zijn in 2006 boven de velden Moddergat en Anjum geïnstalleerd. De monitoring werd in 2013 uitgebreid met twee en in 2014 met nog eens tien monitoringstations boven het Nederlandse deel van het Groningenveld. Eveneens in 2014 kwamen er twee stations boven de gasopslagen Norg en Grijpskerk bij. In 2016 werd een nieuw station boven het veld Ternaard geplaatst. Vanaf 2018 werden de meetplannen uitgebreid met 28 geïntegreerde monumenten voor GNSS, waterpassing en InSAR, zogenoemde Integrated Geodetic Reference Stations (IGRS). Beginnend met Ten Post in 2019 zijn in verband met de afbouw van de productielocaties in Groningen inmiddels vijf GNSS-stations niet meer operationeel, waarvan vier door nieuwe stations zijn vervangen (Ten Post, 't Zandt, Eemskanaal, Overschild), waaronder één IGRS (Ten Post). Op het vijfde station (Zuidlaarderveen) zijn de radarreflectoren nog wel aanwezig; de GNSS is niet meer operationeel vanwege het wegvallen van de stroomvoorziening.

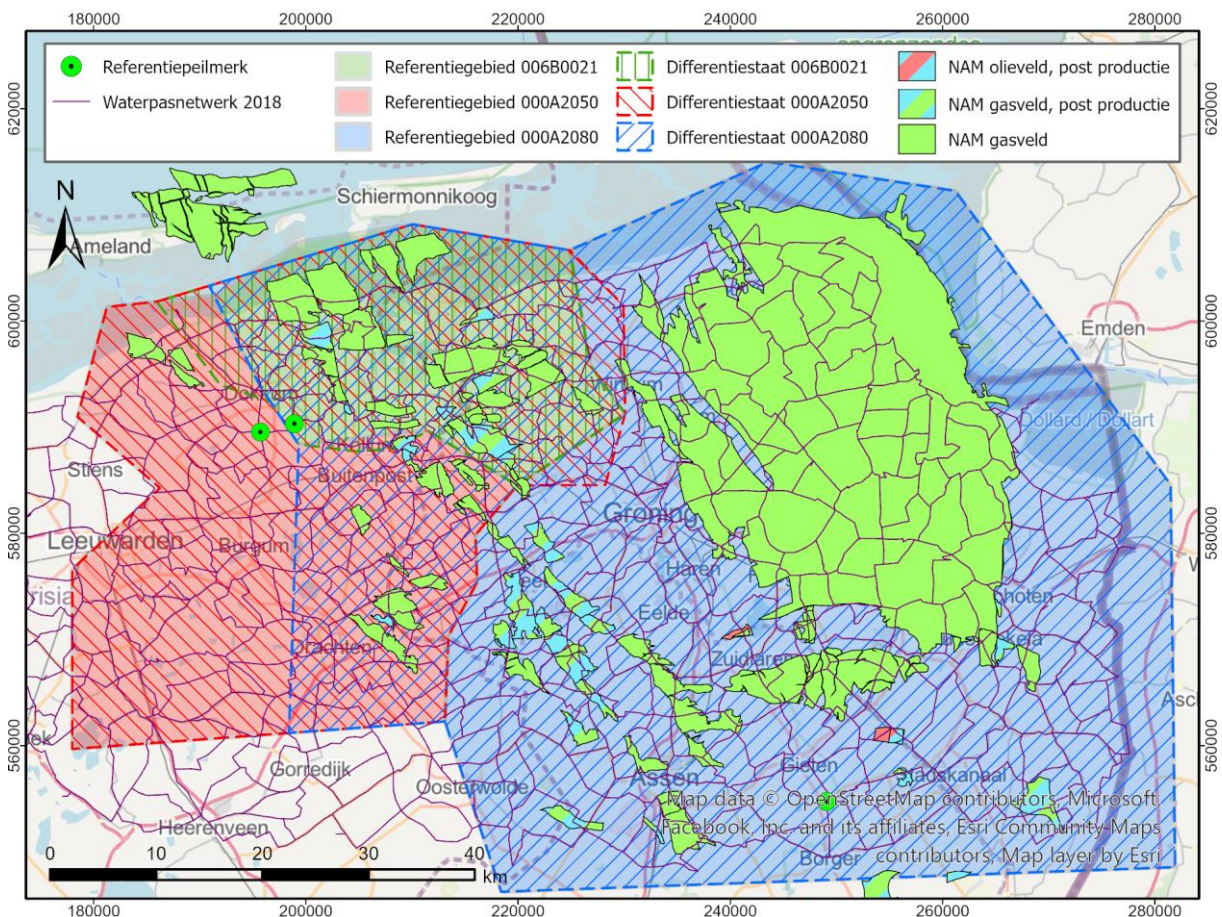


## 2. Waterpassingen

Er worden in dit meetregister geen nieuwe waterpassingen gerapporteerd. Echter, er zijn noemenswaardige aandachtspunten met betrekking tot bestaande waterpassingen (paragraaf 2.1), de veronderstelde stabiliteit van peilmerken (paragraaf 2.2) en de instandhouding van het waterpasnetwerk (paragraaf 2.3).

### 2.1. Opsplitsing in deelgebieden

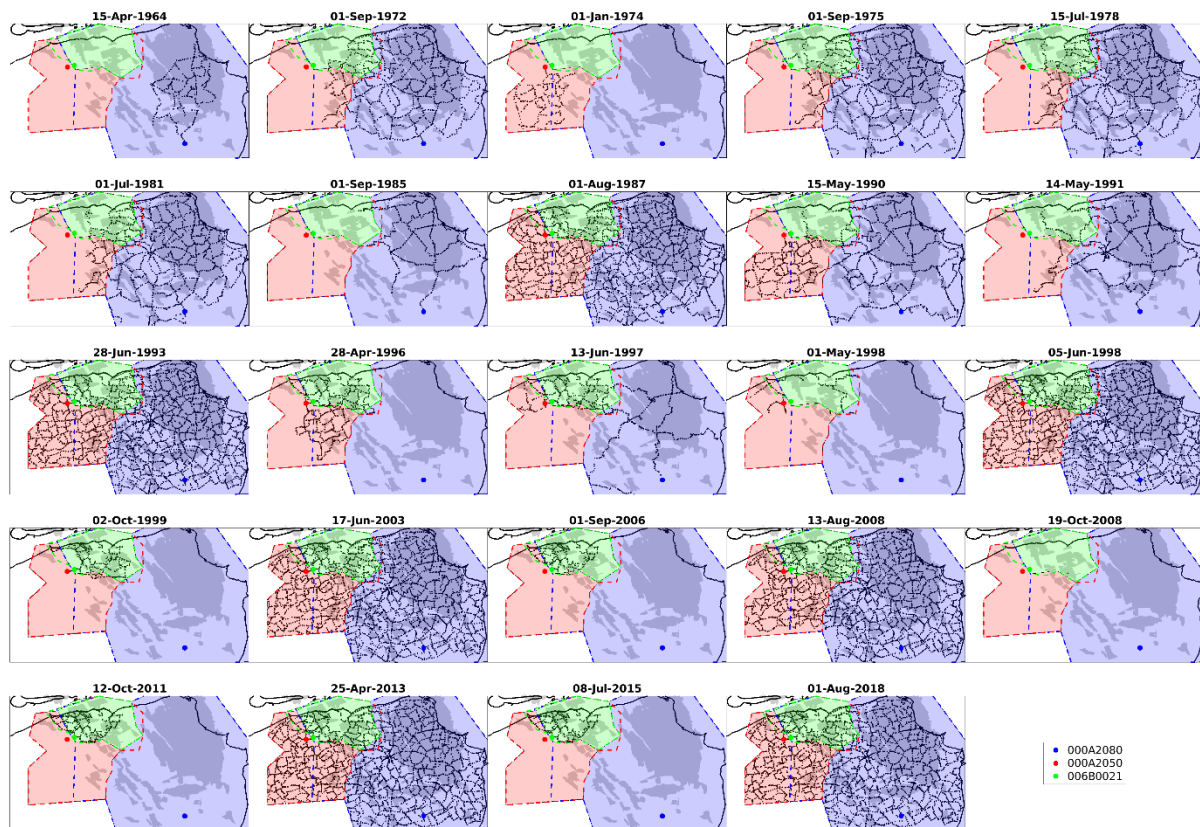
De nauwkeurigheid van gewaterpaste hoogteverschillen neemt af met toenemende afstand van het referentiepeilmerk. Daarom is het rapportagegebied in eerdere meetregisters in drie referentiegebieden opgesplitst, zodat de afstand tot het respectievelijke referentiepeilmerk beperkt blijft. Bij de opsplitsing is rekening gehouden met de ligging van de gasvelden. De gebiedsgrenzen verlopen nooit door een gasveld heen, en velden, die bij een toepassing in het algemeen gezamenlijk worden beschouwd, liggen bij voorkeur in hetzelfde referentiegebied. De niet-overlappende referentiegebieden zijn te zien als gekleurde vlakken in Figuur 4.



Figuur 4: Referentiegebieden en deelgebieden, waarop de opgeleverde differentiestaten beperkt zijn.

De opsplitsing van de differentiestaten in niet-overlappende deelgebieden, zorgt ervoor, dat voortplantingsfouten in het netwerk beperkt blijven en dat elk peilmerk in exact één differentiestaat voorkomt. Deze aanpak heeft echter ook het nadeel, dat niet alle metingen gerapporteerd kunnen worden. Figuur 5 laat zien hoe in het verleden met variërende netwerkconfiguraties is gewaterpast.

Metingen in referentiegebieden, waarvan het referentiepeilmerk in dezelfde meetcampagne niet is waargenomen, zijn dan in géén differentiestaat opgenomen.



Figuur 5: Netwerkconfiguraties in Noord-Nederland door de jaren heen.

Op recent verzoek van SodM (email d.d. 13 januari 2022) dienen nu alle metingen vanaf de nulmeting aanwezig te zijn in de opgeleverde differentiestaten. Om dit verzoek na te komen, worden de differentiestaten nu met overlap gerapporteerd, zoals aangegeven door de gearceerde gebieden in Figuur 4. Dit heeft de volgende consequenties:

- Een peilmerk is nu in minimaal één en maximaal drie differentiestaten te vinden.
- Álle metingen zijn nu in minimaal één differentiestaat te vinden.
- De keuze van een differentiestaat voor een bepaalde toepassing is niet meer eenduidig. De gebruiker wordt geadviseerd, zich middels de referentiegebieden volgens Figuur 4 te oriënteren.

## 2.2. Stabiliteitsanalyse

In dit meetregister is met een eerder gepubliceerde stabiliteitsclassificatie van de waterpaspeilmerken (NAM, 2019b) rekening gehouden. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen *stabiel*, *deels stabiel* en *niet stabiel* veronderstelde peilmerken:

**Stabiel (verondersteld):** De gehele tijdserie van hoogteverschillen wordt representatief geacht voor de diepe bodemdaling. Er is geen duidelijke indicatie voor significante autonome peilmerk-beweging of significante meetfouten in de tijdserie.

**Deels stabiel (verondersteld):** Eén of meerdere delen van de tijdserie worden representatief geacht voor de diepe bodemdaling. In deze delen is er geen duidelijke indicatie voor significante autonome peilmerkbeweging of significante meetfouten in de tijdserie.

**Niet stabiel (verondersteld):** De tijdserie geldt NIET als representatief voor de diepe bodemdaling, omdat er een significante autonome beweging is geconstateerd.

Peilmerken worden als deels stabiel geclassificeerd, wanneer er in de corresponderende tijdseries identificatiefouten of verstoringen zijn geconstateerd:

**Identificatiefout:** kennelijke uitschieter van de waargenomen peilmerkbeweging in één meet-epoche. Identificatiefouten kunnen alleen in de context van een reeks opeenvolgende meetcampagnes worden gedetecteerd. In het algemeen is de oorzaak een peilmerkverwisseling (menselijke fout), vandaar de benaming.

**Verstoring:** plotselinge sprong in de waargenomen beweging van een peilmerk. Verstoringen kunnen alleen in de context van een reeks opeenvolgende meetcampagnes worden gedetecteerd. De oorzaak is een permanente en meestal antropogene hoogteverandering van het peilmerk, bijvoorbeeld door verkeer of werkzaamheden.

- Wordt in een meetepoche een identificatiefout gedetecteerd, dan moet deze epoche buiten beschouwing worden gelaten, terwijl de rest van de tijdserie als betrouwbaar kan worden beschouwd.
- Wordt in een tijdserie een verstoring gedetecteerd, moet de tijdserie in twee worden gesplitst. De aparte delen vóór en ná de verstoring moeten als onafhankelijk van elkaar worden beschouwd.

Door de vastlegging van overlappende deelgebieden, zoals beschreven in paragraaf 2.1, worden er metingen gerapporteerd, die in eerdere meetregisters niet voorkwamen. Daardoor is de structuur van de differentiestaten veranderd ten opzichte van het addendum bij het meetregister Noord-Nederland 2018 (NAM, 2019c). Als gevolg zijn ook de stabiliteitsstaten bijgewerkt, waarin de resultaten van de stabiliteitsanalyse in bijlage A.3 worden gepresenteerd. Er is N.B. geen nieuwe stabiliteitsanalyse uitgevoerd, er is alleen informatie over peilmerken en waarnemingen aangevuld, die in (NAM, 2019c) niet gerapporteerd waren.

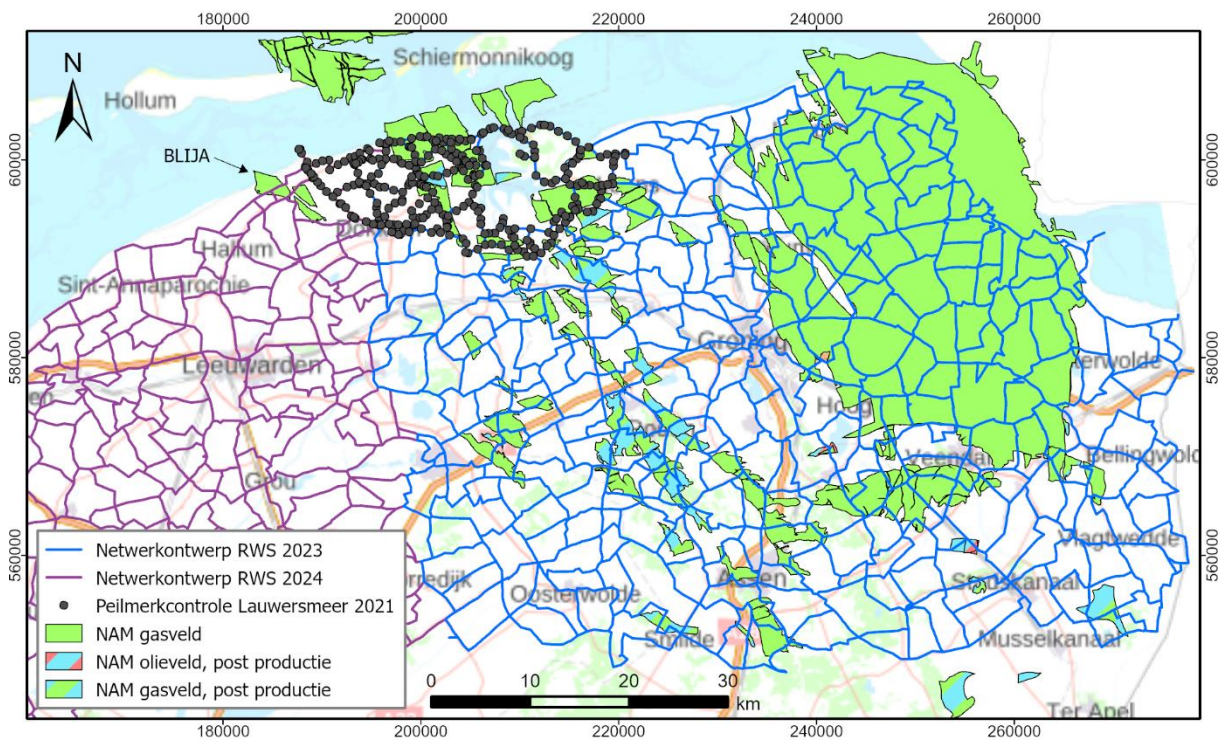
### 2.3. Instandhouding waterpasnetwerk

Het meetplan Zuid-Holland 2019 was de voortrekker voor alle meetplannen in de afgelopen jaren, waarin voor InSAR als enige of hoofdwinningstechniek is gekozen. SodM heeft met deze keuze ingestemd onder de voorwaarde, dat NAM duidelijk maakt, “dat succesvol is voorzien in een aantal belangrijke punten” (brief d.d. 20 november 2018). Hieronder valt “de blijvende beschikbaarheid van tenminste een representatief deel van het waterpasnetwerk om op terug te vallen”.

NAM heeft hieraan invulling gegeven door het Annex Meetplan Zuid-Holland 2019 (NAM, 2018). Daarin committeert zich NAM, om “minimaal eens in de vijf jaar ... het waterpasnetwerk [Zuid-Holland] binnen een buffer, gelijk aan de reservoirdiepte, rond zijn gas- en olievelden [te] controleren”. Dit

interval werd later na overleg met SodM (email d.d. 25 oktober 2021) van vijf na zes jaar verhoogd, om beter aan het rapportageinterval van drie jaar aan te sluiten.

De voor Zuid-Holland gemaakte toezeggingen zijn voor NAM ook leidend, om de instandhouding van het waterpasnetwerk in Noord-Nederland te waarborgen. Na de laatste waterpassing van het hele netwerk zijn peilmerken in het Lauwersmeergebied al in het kader van het meetregister Lauwersmeer 2021 (NAM, 2021) gecontroleerd. Verder zal Rijkswaterstaat (RWS) in de jaren 2023 en 2024 het hele netwerk volgens de planning in Figuur 6 opnieuw waterpassen. Daardoor kan worden gegarandeerd, dat het waterpasnetwerk boven de gasvelden na vijf jaar (c.q. na zes jaar boven het Blijaveld) in stand gehouden wordt.



*Figuur 6: Planning waterpassingen in Noord-Nederland door Rijkswaterstaat (RWS) in 2023 en 2024 en peilmerkcontrole door de NAM in het kader van het meetregister Lauwersmeer 2021 (NAM, 2021). Achtergrondkaart: Basisregistratie Topografie, Kadaster.*

Een aanvullende peilmerkcontrole door de NAM is dus niet nodig, om invulling te geven aan de principes van het Annex Meetplan Zuid-Holland 2019.

### 3. PS-InSAR

De ruwe InSAR 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 deformatietijdseries geven de verplaatsing van PS langs de kijklijn van de satelliet weer; relatief in de ruimte (t.o.v. een stabiel verondersteld gebied, zie Figuur 2) en relatief in de tijd (t.o.v. de vroegste opname).

De verwerking is voor ERS en Envisat uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft als onderdeel van onderzoeksprojecten in samenwerking met de NAM. Voor Radarsat-2 en Sentinel-1 is de analyse uitgevoerd door Skygeo B.V., Delft. De door de externe partijen aangeleverde deformatietijdseries hebben een kwaliteitscontrole doorlopen (paragraaf 3.1) en zijn door NAM na-verwerkt met betrekking tot puntselectie (paragraaf 3.2) en conversie naar de verticaal (paragraaf 3.3). Een overzicht van de resultaten wordt als kaart met dalingssnelheden gepresenteerd in paragraaf 3.3.

#### 3.1. Kwaliteitsborging

De uit de radarbeelden afgeleide tijdseries ondergaan een reeks kwaliteitscontroles. Bijzondere aandacht wordt besteed aan de correcte oplossing van de fasemeerduidigheden. InSAR-tijdseries hebben namelijk een meerduidigheid van een halve golflengte oftewel 28 mm. Bij voldoende bemonstering in en ruimte en tijd kan deze met een hoge betrouwbaarheid worden opgelost.

In verband met een plotselinge versnelling van de bodemdaling in het zoutwinningsgebied bij Veendam in 2018 bleken de fasemeerduidigheden in een beperkt gebied met standaardmethodes in de eerste iteratie niet correct opgelost. Er moest extra aandacht aan een correcte oplossing worden besteed, waardoor NAM SodM om uitstel van de oplevertermijn van het meetregister heeft verzocht (email d.d. 7 september 2023).

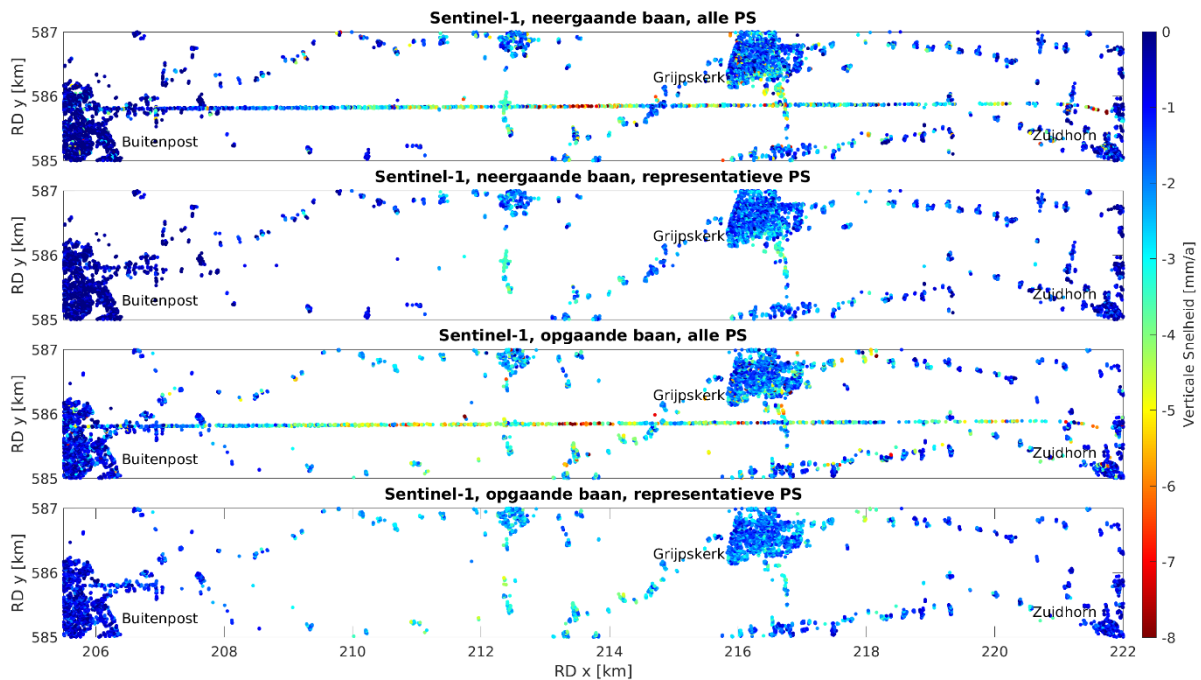
De geconstateerde bodembewegingssnelheid is nog steeds zeer klein ten opzichte van het opnameinterval van zes c.q. twaalf dagen. Daarom bestaat er geen twijfel over de betrouwbaarheid van de uiteindelijke resultaten. Alleen de methodiek moest worden verfijnd, om het correcte resultaat te bereiken.

#### 3.2. Puntselectie

De berekende deformatie uit InSAR is niet zonder meer representatief voor de bodembeweging als gevolg van delfstoffenwinning. De beweging van de PS is mogelijk een superpositie van deformatie als gevolg van verschillende oorzaken (instabiele fundering, ondiepe en diepe compactie). Ook kan het verschil tussen directe en indirecte reflecties een rol spelen. Daarom is een selectie van representatieve PS gemaakt, waarvan de deformatie met naburige punten in overeenstemming is.

Deze overeenstemming wordt beoordeeld aan de hand van het glijdend gemiddelde over de deformatie-tijdserie van een individuele PS (middeling over negen opeenvolgende opnames). Dit wordt vergeleken met een referentietijdserie, die per epoeche de mediaan (in ruimte) van het glijdende gemiddelde (in tijd) over de tijdseries van naburige PS bevat. Criteria voor overeenstemming zijn een maximaal verschil in lineaire bewegingssnelheid van 1,5 mm/a en dat de bandbreedte van epoche-wijze afwijkingen niet groter is dan 14 mm.

Deze methode veronderstelt, dat de meerderheid van de naburige PS representatief is voor de diepe bodemdaling. Dat is in het algemeen een valide aanname – behalve in de omgeving van de spoorlijn Groningen-Leeuwarden tussen Zuidhorn en Buitenpost. Op deze lijn zijn veel PS waargenomen, die structureel harder lijken te zakken dan de PS in de onmiddellijke omgeving (zie Figuur 7). Ook op het spoor zelf is er een afwisseling van al dan niet dalende punten. Daarom mag ervan uit worden gegaan, dat de spoorlijn onderhevig is aan significante ondiepe bodemdaling. De corresponderende PS zijn gebaseerd op hun ligging handmatig als niet representatief verklaard. Daardoor wordt niet alleen een correcte classificatie van de PS op de spoorlijn bereikt, dit komt ook ten goede aan de geautomatiseerde beoordeling van de PS in de omgeving van de spoorlijn.



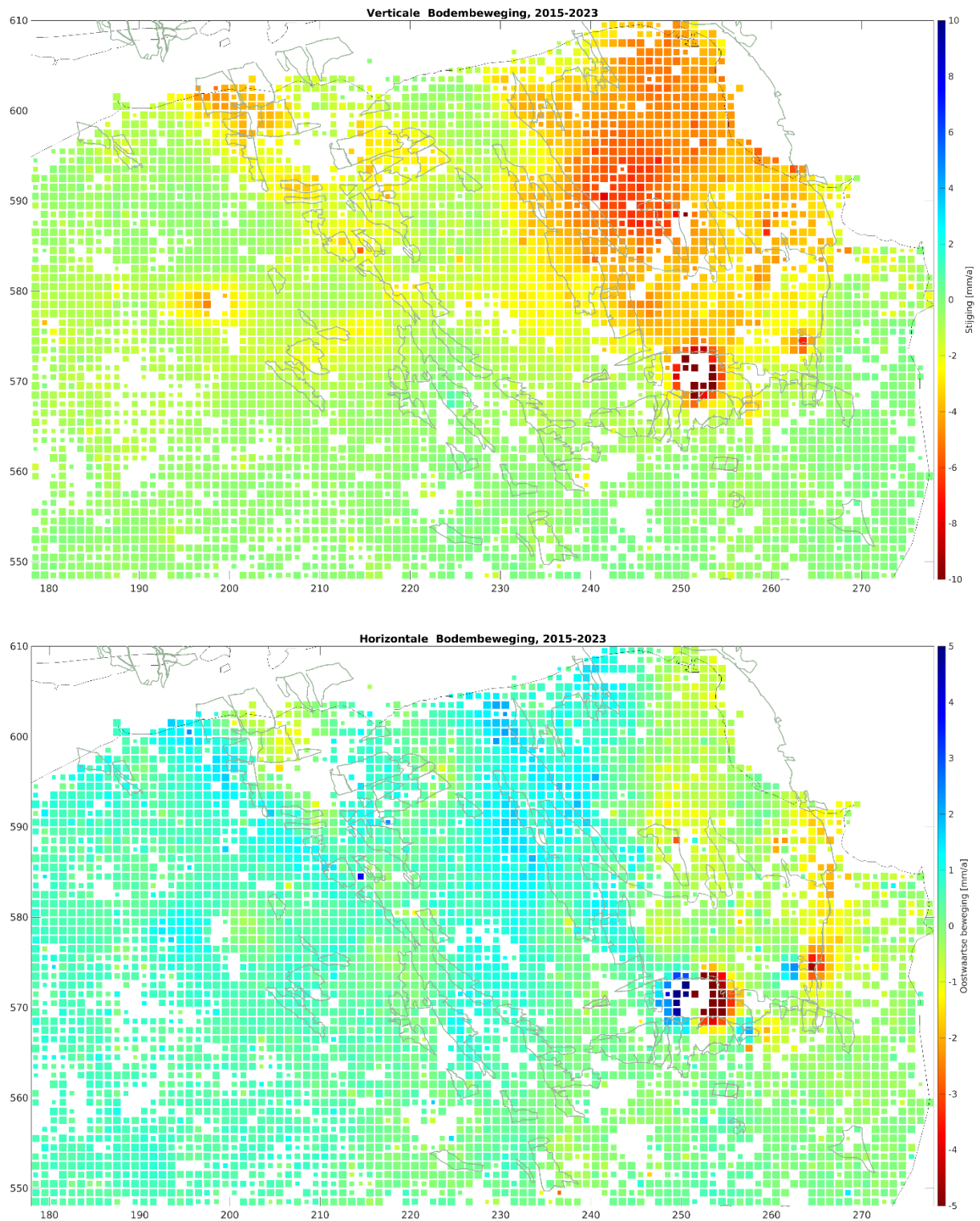
Figuur 7: Classificatie van representatieve PS-selectie in het gebied van de spoorlijn tussen Zuidhorn en Buitenpost. De punten op het spoor zelf zijn handmatig als niet representatief geclassificeerd.

Deze representativiteit van de individuele PS is in de aangeleverde InSAR differentiestaat (bijlage A.1) in een aparte kolom gekenmerkt. Voor de gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) zijn alleen representatieve PS gebruikt.

### 3.3. Resultaten

Figuur 8 laat uit de Sentinel-1 data bepaalde lineaire bodembewegingssnelheden zien. Daarvoor zijn de deformatiemetingen, die in de kijklijn van de satelliet gemaakt zijn, omgerekend naar een verticale component en een horizontale component in oost-west richting.

De bodemdaling boven het Groningenveld loopt op tot 7 mm/a in het centrum van de dalingskom. In het zoutwinningsgebied van Veendam wordt een (niet-lineaire) daling tot ongeveer 30 mm/a waargenomen. Verder daalt de bodem boven het gasveld Nes tot 5 mm/a en in mindere mate boven de overige NAM-gasvelden. Daarnaast zijn er gebieden met bodemdaling boven het gasveld Tietjerk en bij de zoutwinning in Heiligerlee (beide niet van NAM).



*Figuur 8: Bodembewegingssnelheid afgeleid uit de decompositie van de Sentinel-1-tijdseries vanuit neergaande en opgaande baan in verticale en horizontale component. De decompositie is telkens uitgevoerd voor alle als representatief beschouwde PS binnen vierkanten van 1x1 km<sup>2</sup>. De grootte van een vierkant is een indicatie voor het aantal PS uit de baan met het kleinere aantal. Grotere vierkanten zijn dus gebaseerd op meer metingen en daarmee betrouwbaarder dan kleinere vierkanten.*

InSAR is minder gevoelig voor horizontale dan voor verticale bodembeweging. Zo is de horizontale beweging van 2 mm/a aan de randen van het Groningenveld nauwelijks ruisoverstijgend. Aan de randen van de dalingskom boven Veendam worden horizontale snelheden tot 12 mm/a waargenomen. Het typische patroon van een oostwaartse beweging aan de westkant en een westwaartse

beweging aan de oostkant van een dalingskom is ook boven andere winningsgebieden te zien. Voor het hele rapportagegebied met uitzondering van zoutwinningsgebieden kan 2 mm/a als conservatieve bovengrens voor horizontale bewegingen worden aangenomen.

### 3.4. Conversie naar de verticaal en decompositie

De InSAR-deformatie is in de kijkrichting van de satelliet gemeten en kan niet direct als hoogteverandering worden beschouwd. Er zijn twee mogelijkheden, om hiermee om te gaan:

1. Kijklijn-deformaties gemeten vanuit dalende en klimmende baan worden omgerekend in verticale en horizontale (oost-west) bewegingen. Hiervoor zijn wel opnames vanuit twee banen nodig.
2. Projectie van de kijklijn-deformatie naar de verticaal onder de aanname, dat geen horizontale beweging plaatsvindt. Waar deze aanname niet klopt, wordt wel een fout geïntroduceerd.

In dit meetregister (d.w.z. in de gecombineerde differentiestaten, bijlage A.2) is op de Sentinel-1 metingen een decompositie toegepast en de verticale component gebruikt voor de combinatie met andere metingen. Alleen wanneer er in de nabijheid van een peilmerk slechts PS vanuit één baan beschikbaar zijn, worden de metingen volgens de tweede methode naar de verticaal geconverteerd. Dat is bij slechts 1,3 % van de in 2018 waargenomen peilmerken het geval.

Ook op de metingen van alle andere satellieten wordt de tweede methode toegepast. Bij Radarsat-2 zijn slechts opnames vanuit één baan beschikbaar, en daarmee is geen decompositie mogelijk. Bij Envisat is met opnames vanuit de neergaande baan een langer tijdvak afgedekt dan met opnames vanuit de opgaande baan. Bij toepassing van een decompositie zouden de metingen tussen 2003 en 2006 niet gebruikt kunnen worden. Bij ERS is de toegevoegde waarde van een decompositie als gevolg van lagere punt dichtheid en opnamefrequentie beperkt.

Met behulp van de in paragraaf 3.3 waargenomen snelheden kan een inschatting van de maximale fout worden gemaakt, die bij de tweede methode door verwaarlozing van horizontale bewegingen ontstaat. Afhankelijk van de bewegingsrichting kan de verticale component worden over- of onderschat. Uitgaand van een maximale horizontale beweging van 2 mm/a is deze fout gebaseerd op de respectievelijke opnamegeometrieën 1,0 mm/a voor ERS/Envisat, 1,5 mm/a voor Radarsat-2 en 1,7 mm/a voor Sentinel-1. Alleen in de zoutwinningsgebieden is de fout aanzienlijk hoger: tot 9,0 mm/a gebaseerd op een horizontale snelheid van 12 mm/a.

Voor de volledigheid moet worden opgemerkt, dat ook bij een decompositie volgens methode 1 een fout wordt geïntroduceerd, wanneer er een horizontale bodembeweging in noord-zuid richting optreedt. Bij 2 mm/a beweging in noord-zuid richting is de fout maximaal 0,3 mm/a in de verticale en 0,1 mm/a in de horizontale component. In de zoutwinningsgebieden zijn dat maximaal 1,6 mm/a (verticaal) c.q. 0,4 mm/a (horizontaal).



## 4. Combinatie

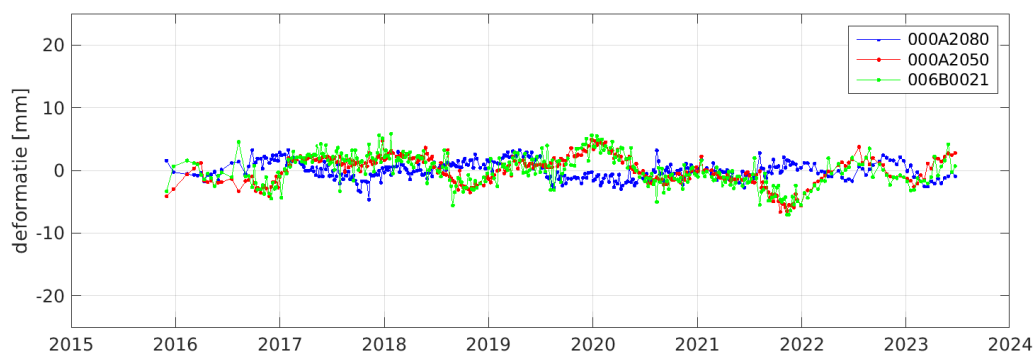
Om met behulp van InSAR metingen de bodemdaling op de langere termijn te kunnen aangeven, moeten deze met waterpassingen gecombineerd worden. De zodanig voortgezette historische tijdseries worden in gecombineerde differentiestaten opgeleverd (bijlage A.2).

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. Op deze manier worden InSAR-tijdseries in de peilmerk-gewijze tijdseries van waterpassingen geïntegreerd. Bij slechts 0,7 % van de in 2018 waargenomen peilmerken is een voortzetting van de tijdseries met Sentinel-1 waarnemingen niet mogelijk, omdat er geen PS in de omgeving beschikbaar zijn. (Voor Radarsat-2 zijn dat 2,8 %.)

Aandachtspunten zoals ruimtelijke referentie en koppeling van tijdseries worden in dit hoofdstuk toegelicht.

### 4.1. Referentie in de ruimte

De gerapporteerde hoogteverschillen van beide meettechnieken zijn relatief in de ruimte. Voor de waterpassingen is aangenomen, dat de respectievelijke referentiepeilmerken niet bewegen, terwijl de InSAR-deformatiemetingen aan een stabiel verondersteld referentiegebied (het complement van het niet stabiel veronderstelde gebied in Figuur 2 op bladzijde 5) gerelateerd zijn. De combinatie van de hoogteverschillen uit waterpassing en InSAR gebeurt onder de aanname, dat het referentiepeilmerk geen autonome beweging vertoont en dat het InSAR-referentiegebied ook daadwerkelijk stabiel is. Een indicatie, dat deze aanname klopt, is, dat de mediaan-tijdseries van representatieve PS binnen een straal van 1 km rond de referentiepeilmerken geen residuele deformatie vertonen (zie Figuur 9).



*Figuur 9: Gemiddelde tijdseries (mediaan) van representatieve PS binnen een straal van 1 km rond de referentiepeilmerken.*

### 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 waarnemingen een onderlinge offset worden geschat en toegepast. Van tevoren moeten echter waarnemingen van verschillende InSAR satellieten onderling gecombineerd worden. Bij de aansluiting wordt ook rekening gehouden met de resultaten van de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (zie paragraaf 2.2). Indien bij waterpaspeilmerken niet-stabiliteit, verstoringen of identificatiefouten zijn geconstateerd, dan kan dat net zoals bij een ontbrekende overlap van

opeenvolgende InSAR missies ertoe leiden, dat per peilmerk meer dan één tijdserie wordt gerapporteerd. Details hierover zijn in grote lijnen in de volgende sub-paragrafen toegelicht. De volledige combinatie procedure is in detail beschreven in bijlage C.

#### 4.2.1. Intra-techniek combinatie InSAR

Waarnemingen van ERS-1 en ERS-2, die vanuit precies dezelfde baan zijn gemaakt, zijn al direct gecombineerd op basis van de ruwe meetgegevens. Waarnemingen van de overige satellieten en opnames van verschillende banen kunnen alleen worden gecombineerd op het niveau van berekende deformatie tijdseries. Daarbij worden de Sentinel-1-tijdseries van neergaande en opgaande baan door middel van een decompositie in een tijdserie met verticale deformatie omgerekend (methode 1 in paragraaf 3.4). Bij ERS-1/2, Envisat en Radarsat-2 worden de tijdseries onder de aanname, dat geen horizontale deformatie plaatsvindt, naar de verticaal geprojecteerd (methode 2).

Uit de differenties in de overlappende periode tussen de individuele tijdseries wordt een onderlinge offset geschat en toegepast. Omdat tussen ERS-1/2 en Envisat een overlappende periode ontbreekt (zie Figuur 1 op blz. 4), is een aansluiting zonder aanname van een vloeiend gedrag niet mogelijk. Deze aanname is echter in sommige delen van het rapportagegebied niet aanvaardbaar. Daarom worden de deformatiemetingen van ERS-1/2 aan de ene kant en Envisat/Radarsat-2/Sentinel-1 aan de andere kant als aparte tijdseries beschouwd, en er wordt geen onderlinge aansluiting gedaan.

#### 4.2.2. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken

In de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (paragraaf 2.2) wordt een deel van de peilmerken als niet stabiel verondersteld. Dat betekent, dat de op deze peilmerken gemeten deformatie als niet representatief wordt beschouwd voor de bodemdaling door delfstofwinning. Waterpas-tijdseries van niet stabiele peilmerken worden daarom niet met InSAR-tijdseries gecombineerd. In plaats daarvan wordt de op de peilmerklocatie (en binnen een straal van 500 m daaromheen) gemeten InSAR-deformatie als aparte tijdserie gerapporteerd.

Daarnaast is ook “deels stabiel verondersteld” een mogelijke uitkomst van de stabiliteitsanalyse. Dat betreft peilmerken, waarop identificatiefouten en/of verstoringen zijn geconstateerd. Waterpas-metingen, die als identificatiefouten zijn geïdentificeerd, worden bij de onderlinge aansluiting met InSAR-tijdseries niet gebruikt. In het zeldzame geval, dat er alleen identificatiefouten in het overlappende tijdvak tussen twee op elkaar aan te sluiten tijdseries zijn, vindt geen aansluiting plaats, en de tijdseries worden apart gerapporteerd.

Tijdseries van peilmerken met geconstateerde verstoringen zijn alleen representatief, wanneer de delen voor en na de verstoring afzonderlijk worden beschouwd. Een InSAR-tijdserie kan daarom, mits er overlap bestaat, aan de waterpassingen voor óf na de verstoring worden aangesloten, maar niet aan waterpassingen voor én na de verstoring tegelijk. Om de meeste waarde uit de gecombineerde dataset te halen, worden waterpas-tijdseries bij verstoringen in twee delen gesplitst, zodat de InSAR-deformatie met alle delen van de waterpas-tijdserie tot representatieve tijdseries kan worden gecombineerd. Dat heeft tot gevolg, dat InSAR-tijdseries dubbel gerapporteerd worden, wanneer deze met waterpassingen voor en na een verstoring overlappen.

De classificatie in al dan niet of deels stabiel veronderstelde peilmerken is overgenomen in de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2). Afwijkend daarvan zijn tijdseries van deels stabiel veronderstelde peilmerken, die bij verstoringen zijn opgesplitst en geen identificatiefouten bevatten,

als stabiel gekenmerkt. Tijdseries, die alleen InSAR-deformatie bevatten zijn tevens altijd als *stabiel* gekenmerkt, omdat deze uitsluitend op representatieve PS (zie paragraaf 3.2) zijn gebaseerd.

#### 4.2.3. Meerdere tijdseries per peilmerk

Voor een aantal peilmerken worden in de gecombineerde differentiestaat dus meerdere tijdseries gerapporteerd. Daarvoor zijn de volgende redenen te bedenken:

- De tijdserie van waterpassingen heeft geen overlap met InSAR-tijdseries.
- Er zijn twee InSAR-tijdseries zonder onderlinge overlap, die ook niet door waterpassingen op (deels) stabiel veronderstelde peilmerken kunnen worden verbonden.
- Het peilmerk is niet stabiel verondersteld, daarom wordt de InSAR-tijdserie niet op de waterpassing aangesloten.
- Het peilmerk is deels stabiel verondersteld, en alle waarnemingen in het overlappend tijdvak met InSAR zijn als identificatiefouten geïdentificeerd.
- Het peilmerk is deels stabiel verondersteld, en bevat geconstateerde verstoringen, waar de tijdserie in delen is opgesplitst.

De verschillende bij een peilmerk behorende tijdseries zijn met suffixen op het peilmerknummer gekenmerkt (XXXXXXX, XXXXXXXa, XXXXXXXb, ...). De benaming volgt de chronologische volgorde van de eerste waarneming per tijdserie.

## 5. Conclusies en vooruitzichten

Voor het rapportagegebied Noord-Nederland is in 2023 InSAR als primaire meettechniek gebruikt. De InSAR-deformatie metingen zijn berekend uit een Sentinel-1 dataset in de periode van 2015-2023 en met overlap aangesloten op de voorgaande Radarsat-2-tijdseries, eerdere InSAR missies en historische waterpassingen. Bij de aansluiting is rekening gehouden met de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (NAM, 2019b) en een classificatie van Persistent Scatterers (PS) als al dan niet representatief (paragraaf 3.2).

De bemonstering van Noord-Nederland met Sentinel-1 PS is beter dan met Radarsat-2 PS en daarmee ook beter dan met waterpaspeilmerken. De hoge punt dichtheid maakt de InSAR techniek robuust ten opzichte van autonome bewegingen van meetpunten. Ook de temporele dichtheid van Sentinel-1 waarnemingen is hoger dan bij Radarsat-2 en aanzienlijk hoger dan met de vijfjaarlijkse waterpassingen. Het gedetailleerde verloop in de tijd is onder andere inzichtelijk in de visualisaties van tijdseries op voorbeeld locaties (bijlage B.1).

De waargenomen bodemdalingssnelheid loopt op tot 7 mm/a in het centrum van het Groningenveld en is minder boven de overige gasvelden. Het zoutwinningsgebied van Veendam, dat zich qua bodemdaling binnen de invloedssfeer van NAM-gasvelden bevindt, vormt een uitzondering met een maximum van ongeveer 30 mm/a. De InSAR resultaten komen binnen de nauwkeurigheidsmarges goed overeen met waterpassen en GNSS (bijlage B).

De Europese Sentinel-1 missie is voor de lange termijn ontworpen. Tegenwoordig is alleen de Sentinel-1A satelliet operationeel, nadat Sentinel-1B in december 2021 is uitgevallen. Continuïteit blijft door de geplande lancering van Sentinel-1C gewaarborgd, en ook Sentinel-1D staat al gereed. Indien continuïteit met InSAR monitoring door onvoorziene omstandigheden toch niet mogelijk is, kan alsnog worden teruggevallen op het bestaande waterpasnetwerk. Een groot deel daarvan wordt in 2023 door Rijkswaterstaat gewaterpast, en het resterende deel staat voor 2024 op de planning (paragraaf 2.3).

Toekomstige uitdagingen zitten in de InSAR analyse en in de puntselectie. Doordat de Sentinel-1-tijdseries steeds langer worden, moet op termijn rekening worden gehouden met PS, die maar een deel van de tijd een consistent reflectiegedrag vertonen. Denk bijvoorbeeld aan nieuwbouw of sloop van huizen. Door deze punten mee te nemen en het gebruik op het geldige tijdvak te beperken kan gewaarborgd worden, dat de punt dichtheid bij langer wordende tijdseries niet achteruitgaat.

Ook de selectie van representatieve punten zal moeten worden geoptimaliseerd. De huidige classificatie veronderstelt, dat het bewegingsgedrag van de meerderheid van alle PS in een gebied representatief is voor de diepe bodemdaling. Onder meer door de opkomst van zonneparken, zijn er steeds meer gebieden met een hoge dichtheid van PS met autonoom bewegingsgedrag; waar de huidige methode haar grenzen bereikt. Ook al is de invloed op het meetregister zeer beperkt, zal in de toekomst de robuustheid van de classificatie moeten worden verbeterd.

## Bijlagen

### A. Geleverde data

Het meetregister Noord-Nederland 2023 bevat naast dit rapport een aantal digitaal opgeleverde bestanden, waarnaar vanuit deze bijlage wordt verwezen.

#### A.1. Differentiestaten InSAR

De resultaten van de InSAR processing (Radarsat-2 2009-2016 en Sentinel-1 2015-2023), zoals verkregen en na-verwerkt volgens hoofdstuk 3, zijn aangeleverd in de vorm van zip-gecomprimeerde differentiestaten naast toelichting in een “leesme”-bestand:

```
InSAR_Radarsat-2_desc_MR_Noord-Nederland_2023.zip
InSAR_Sentinel-1_asc_MR_Noord-Nederland_2023.zip
InSAR_Sentinel-1_desc_MR_Noord-Nederland_2023.zip

InSAR_MR_Noord-Nederland_2023.leesme.txt
```

De differentiestaten bevatten één tijdserie per PS met de naar de verticaal geconverteerde deformatie schattingen (volgens methode 2 in paragraaf 3.4). Voor elke PS is aangegeven, of de tijdserie als representatief wordt beschouwd of niet (zie paragraaf 3.2). 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 2 op blz. 5).

#### 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 (zie hoofdstuk 4). De betekenis van de kolommen is in een “leesme”-bestand verklaard. Zie bestanden:

```
000A2050_1974-01-01_MR_Noord-Nederland_2023.csv
000A2080_1964-04-15_MR_Noord-Nederland_2023.csv
006B0021_1987-08-01_MR_Noord-Nederland_2023.csv

00000000_MR_Noord-Nederland_2023.leesme.txt
```

Het rapportagegebied is onderverdeeld in drie deelgebieden met verschillende referentiepeilmerken. De drie differentiestaten omvatten de respectievelijke referentiegebieden plus een overlap volgens Figuur 4. De overlap maakt het mogelijk, dat alle waarnemingen uit het verleden kunnen worden gerapporteerd (zie toelichting in paragraaf 2.1). De gebruiker wordt geadviseerd, de keuze van de differentiestaat op de referentiegebieden volgens Figuur 4 te baseren.

De combinatie met InSAR volgt de in bijlage C 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.

Omdat de laatste opname vanuit de opgaande baan op 21 juni 2023 plaatsvond (bij de neergaande baan was dat 5 juli), wordt de jaarlijks gemiddelde deformatie telkens op 21 december van elk jaar tot en met 2022 aangegeven.

### A.3. Stabiliteitsstaten

De resultaten van de stabiliteitsanalyse zijn in drie stabiliteitsstaten aangeleverd en in een “leesme”-bestand toegelicht:

```
sta_nn2018v3_000A2050.csv
sta_nn2018v3_000A2080.csv
sta_nn2018v3_006B0021.csv
sta_nn2018v3.leesme.txt
```

Het jaartal geeft aan, dat de analyse gebaseerd is op waterpassingen tot en met 2018. Vanwege de overlappend gedefinieerde referentiegebieden bevatten deze bestanden meer peilmerken en waarnemingen op peilmerken ten opzichte van de in (NAM, 2019b) gepubliceerde stabiliteitsstaten. Dit verschil wordt kenbaar gemaakt door de toevoeging “v3”, ook al is de onderliggende stabiliteitsanalyse dezelfde.

### A.4. Kaarten met hoogteverschillen

De met InSAR en waterpassing gemeten hoogteverschillen van de afgelopen drie jaar zijn per peilmerklocatie vergelijkend in kaart gebracht:

```
Kaart_MR_Noord-Nederland_2023_000A2050_Friesland_2018-2022.pdf
Kaart_MR_Noord-Nederland_2023_000A2080_Groningen_2018-2022.pdf
Kaart_MR_Noord-Nederland_2023_006B0021_Lauwersmeer_2018-2022.pdf
Kaart_MR_Noord-Nederland_2023_006B0021_Lauwersmeer_2020-2022.pdf
```

Voor de deelgebieden Friesland (referentiepeilmerk 000A2050 in Damwoude) en Groningen (referentiepeilmerk 000A2080 in Gasselte) laat telkens één kaart de hoogteverschillen tussen augustus 2018 en december 2022 zien. Omdat voor het deelgebied Lauwersmeer (referentiepeilmerk 006B0021 in Driesum) ook in 2021 een meetregister is ingediend, zijn twee kaarten aangeleverd met de hoogteverschillen van 08/2018-12/2022 en 12/2020-12/2022.

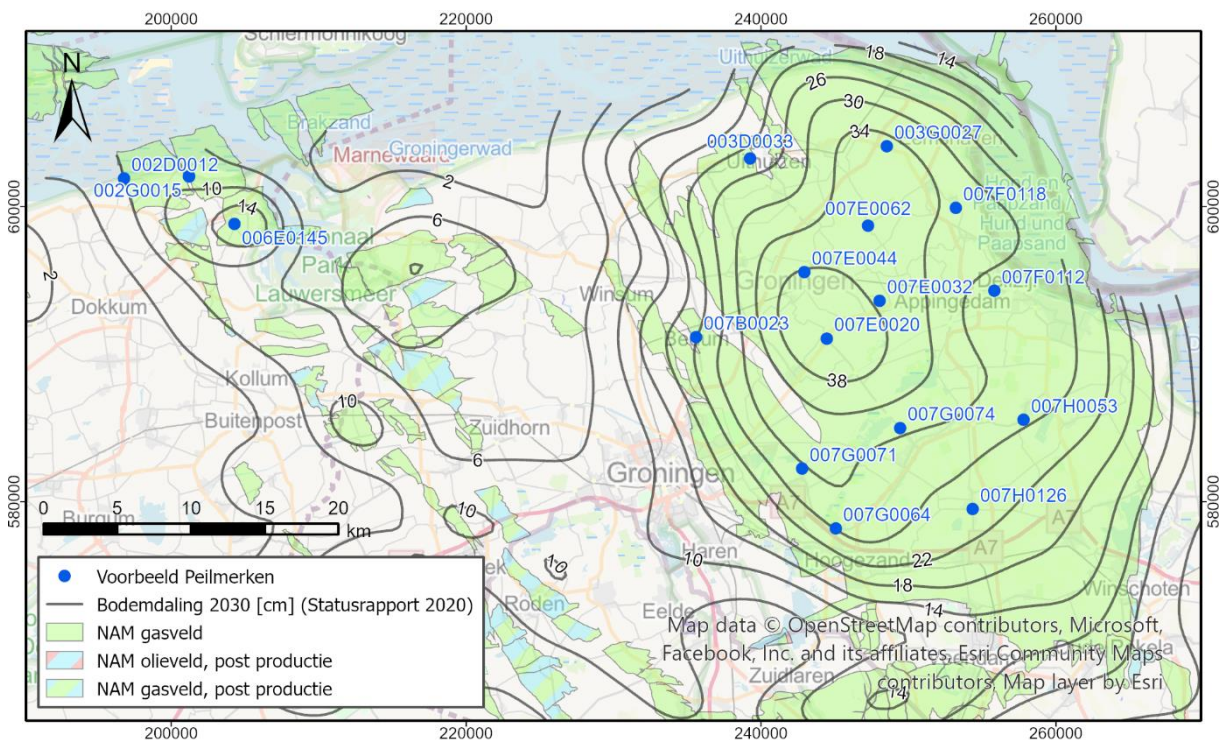
Voor een overzichtelijk beeld worden alleen hoogteverschillen op peilmerken getoond, die in 2018 zijn gewaterpast. Zelfs met deze inperking kunnen niet alle peilmerknummers en hoogteverschillen worden getoond, wanneer peilmerken dicht bij elkaar liggen.

## B. Voorbeeldtijdsreeksen

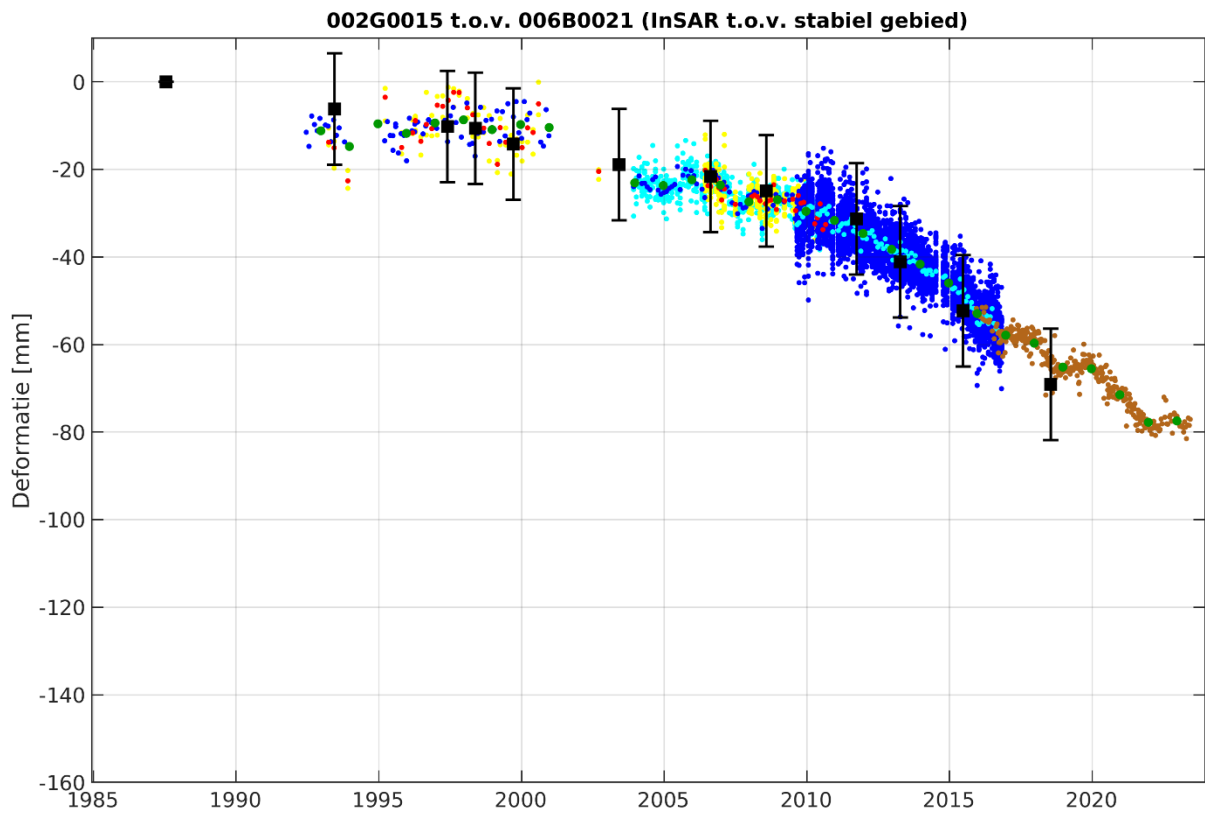
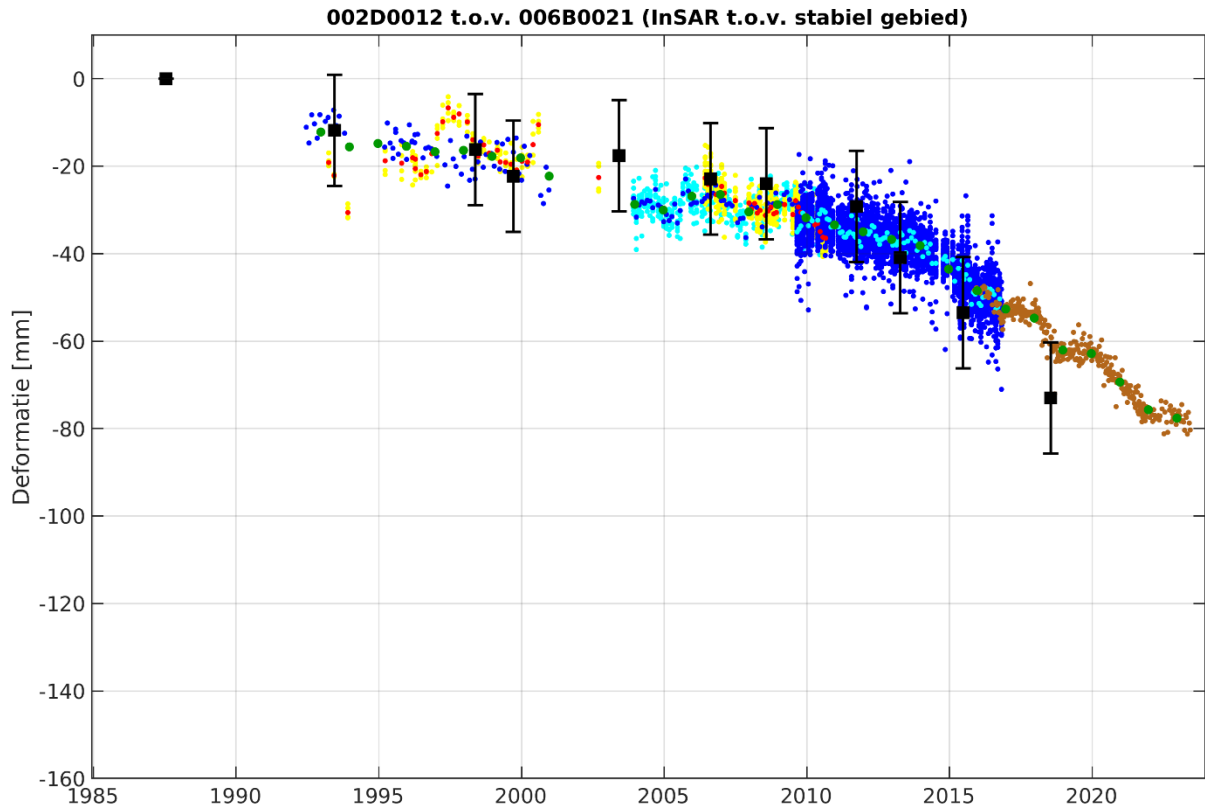
In deze bijlage zijn een aantal grafieken met tijdsreeksen van voorbeeld peilmerken (bijlage B.1) en GNSS stations (bijlage B.2) verzameld. Een verklaring der tekens is in bijlage B.3 te vinden.

### B.1. Voorbeeld peilmerken

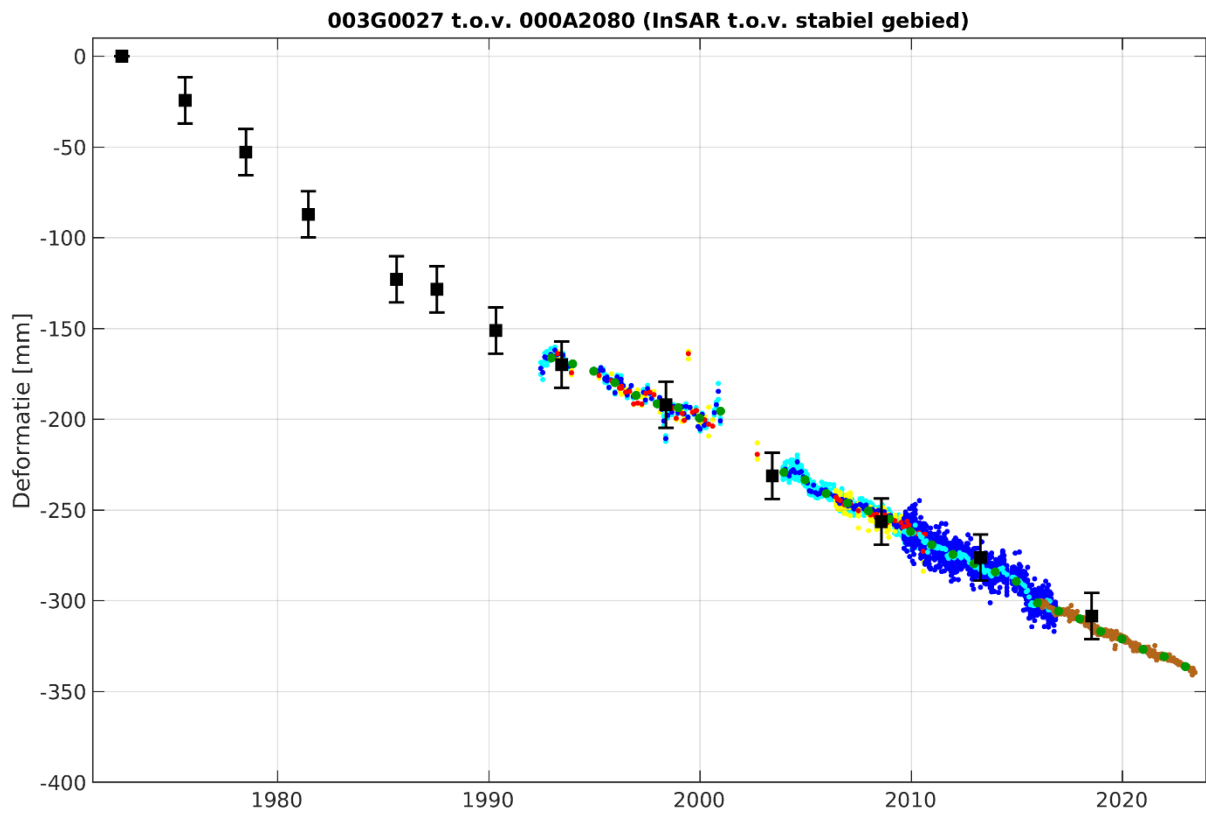
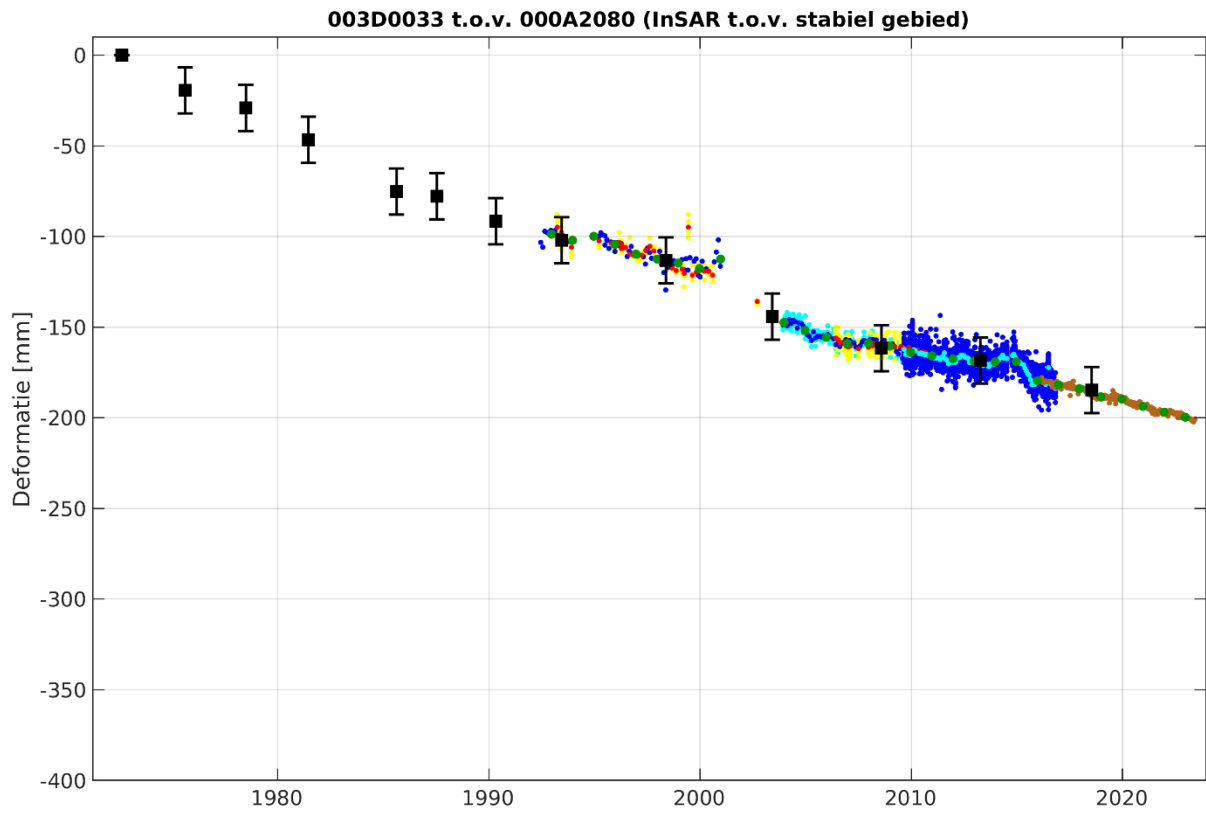
Op de volgende bladzijden worden de deformatie-tijdsreeksen van 17 voorbeeld peilmerken getoond, om een indruk te geven over de resultaten van de combinatie van waterpassing en InSAR in het kader van dit meetregister. De peilmerkselectie is in Figuur 10 in kaart gebracht en is dezelfde als in het addendum InSAR bij het meetregister Noord-Nederland 2018 (NAM, 2019c). De onderlinge aansluiting van de tijdsreeksen op elkaar volgt de in bijlage C toegelichte combinatie procedure.

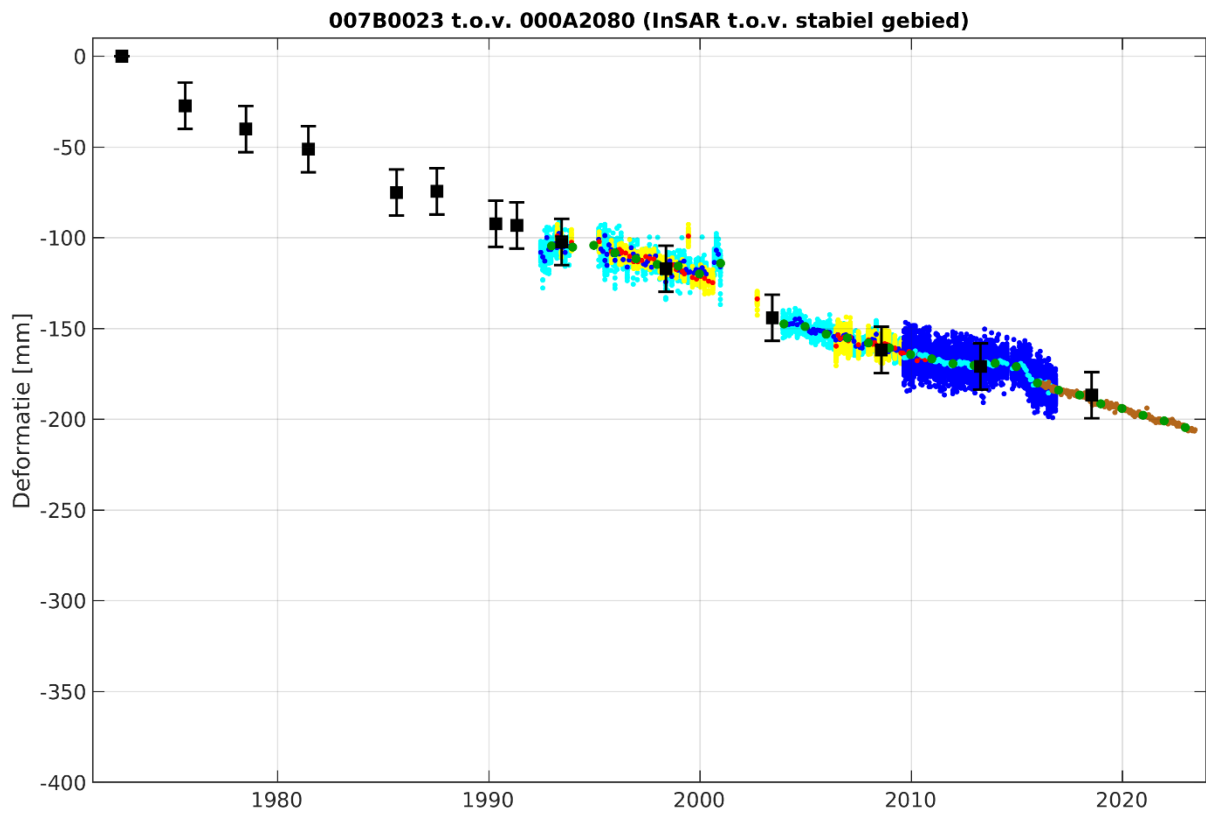
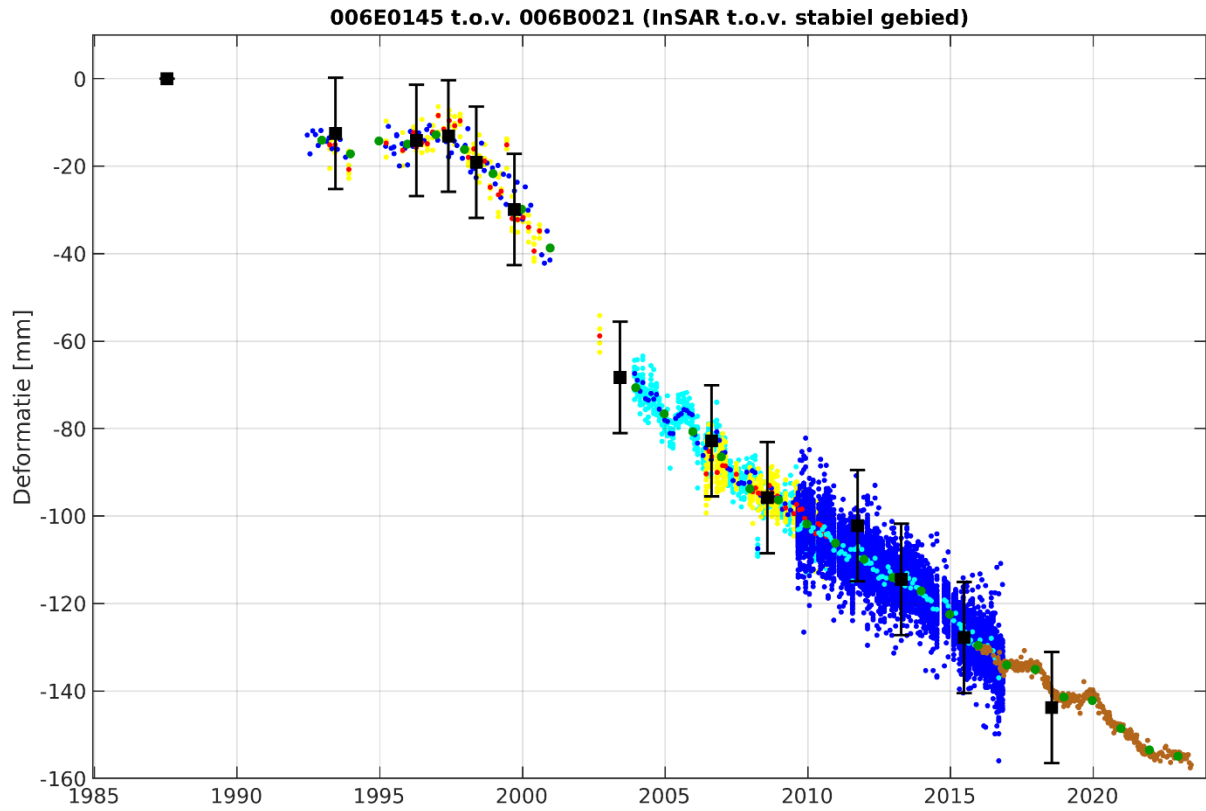


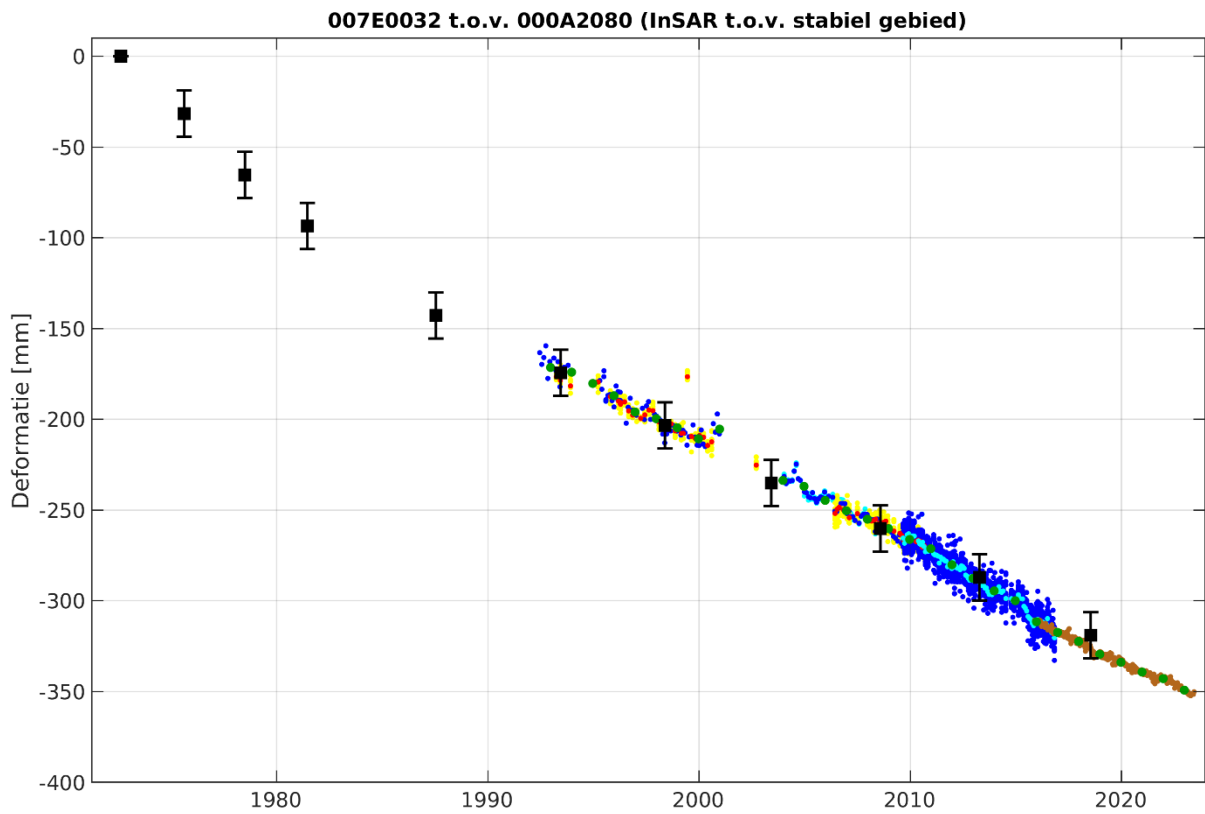
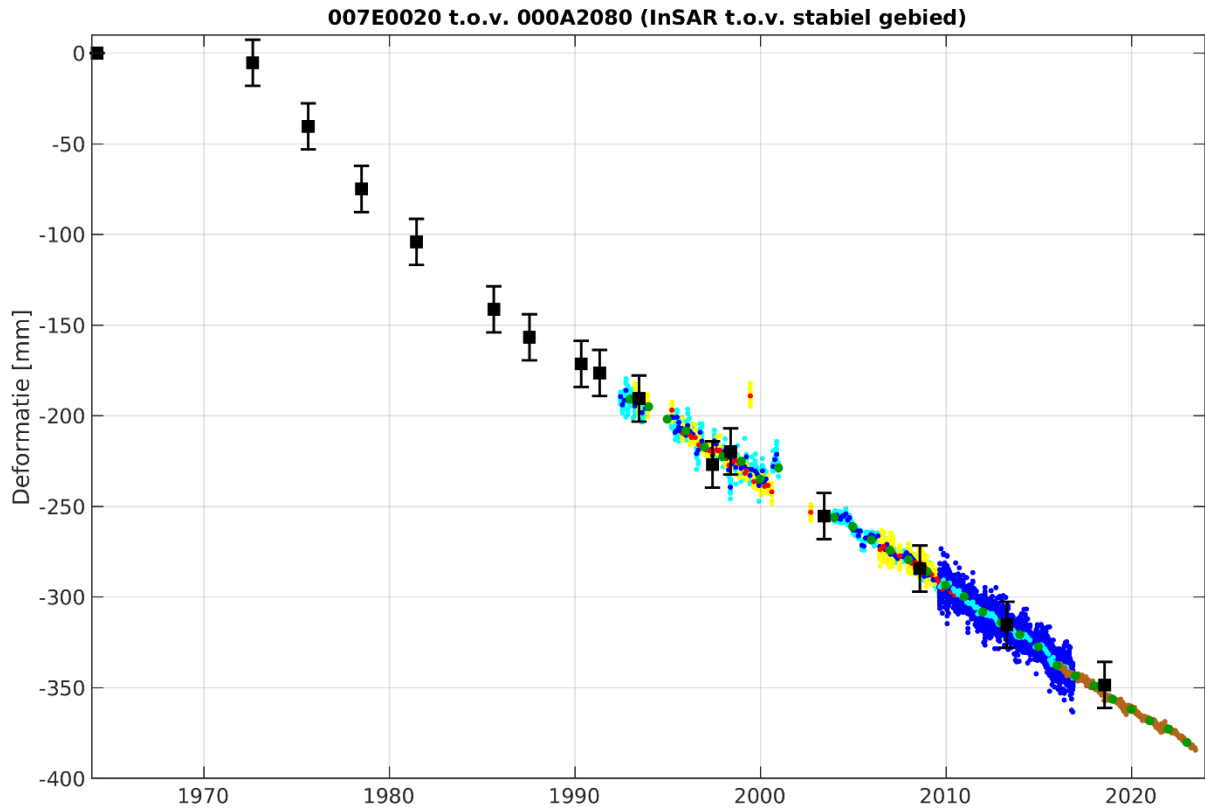
Figuur 10: Voorbeeld peilmerken.

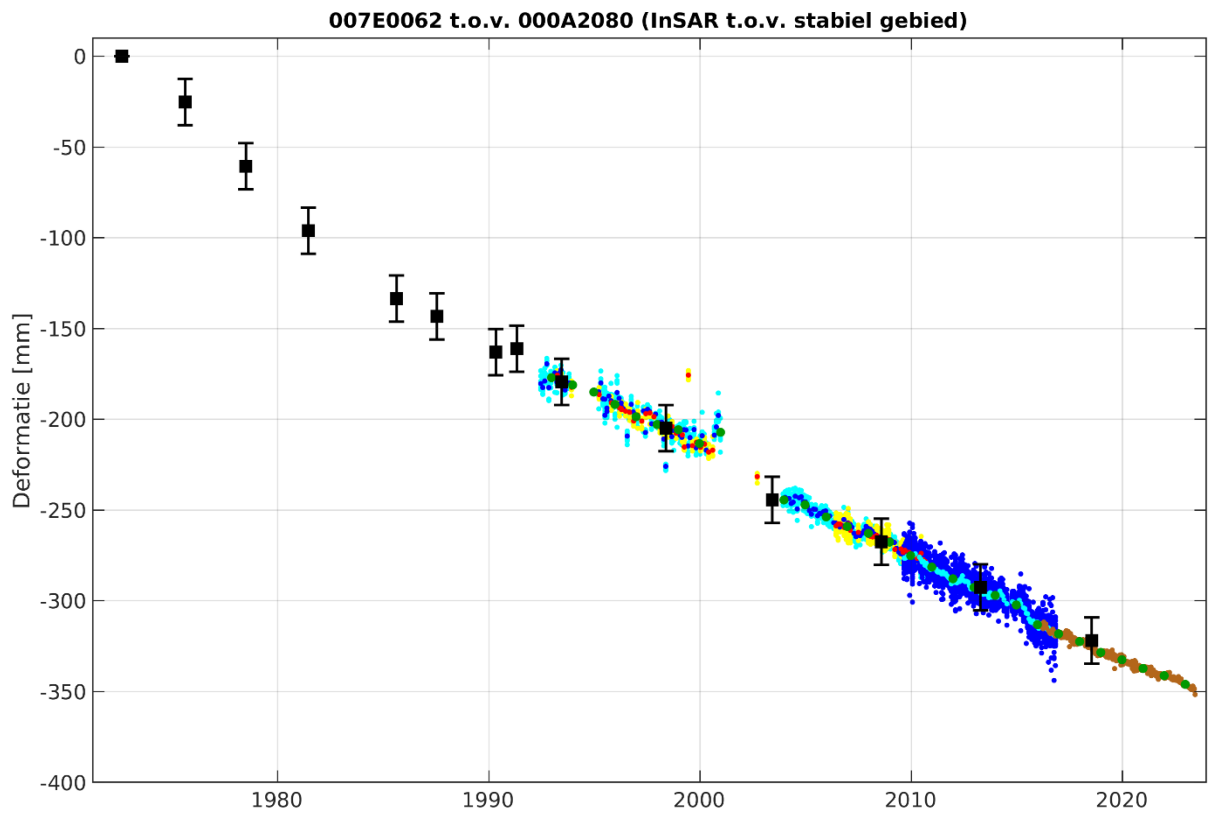
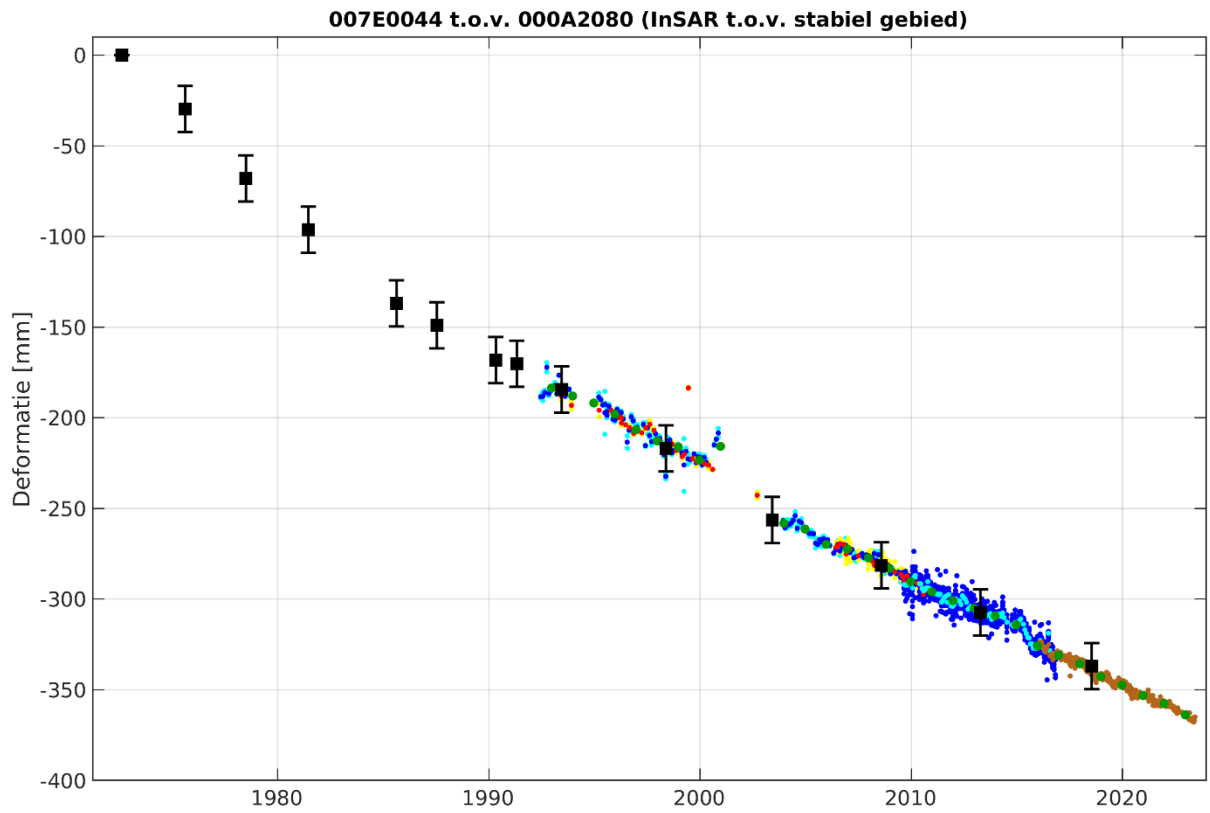


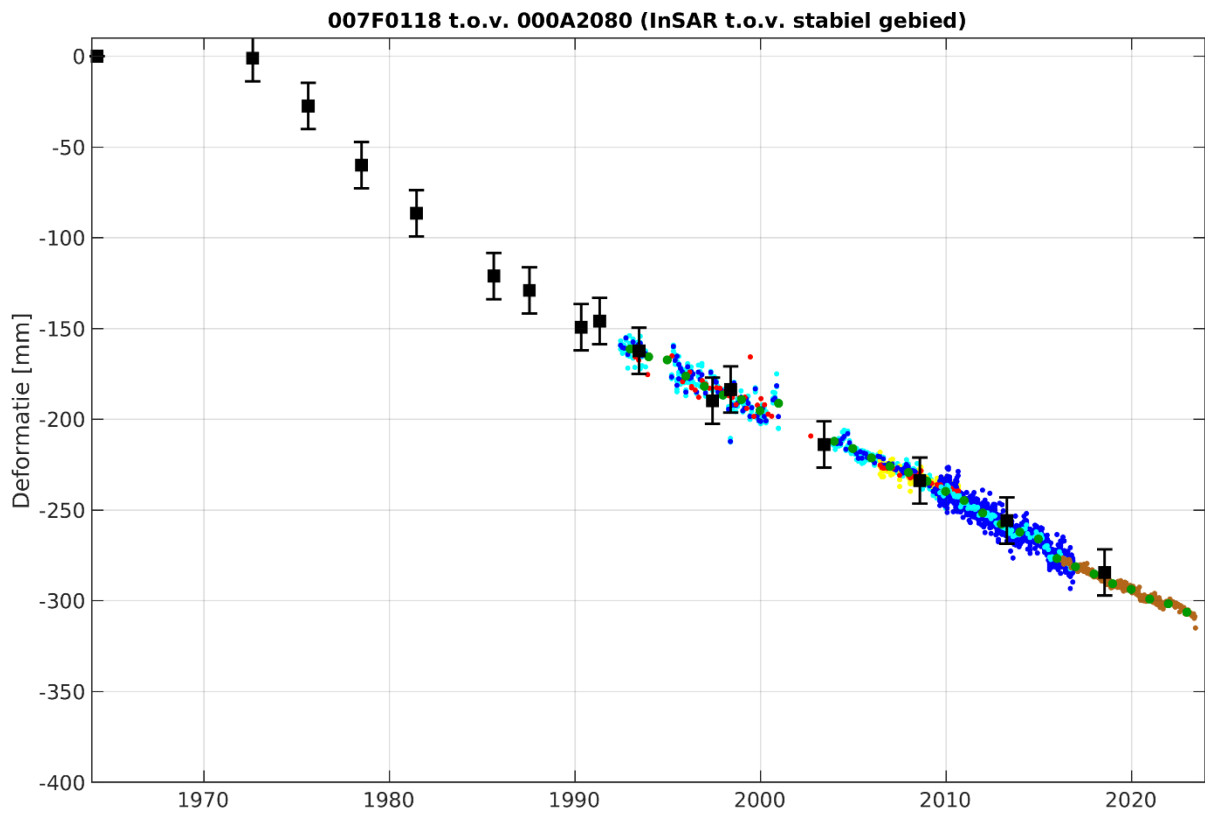
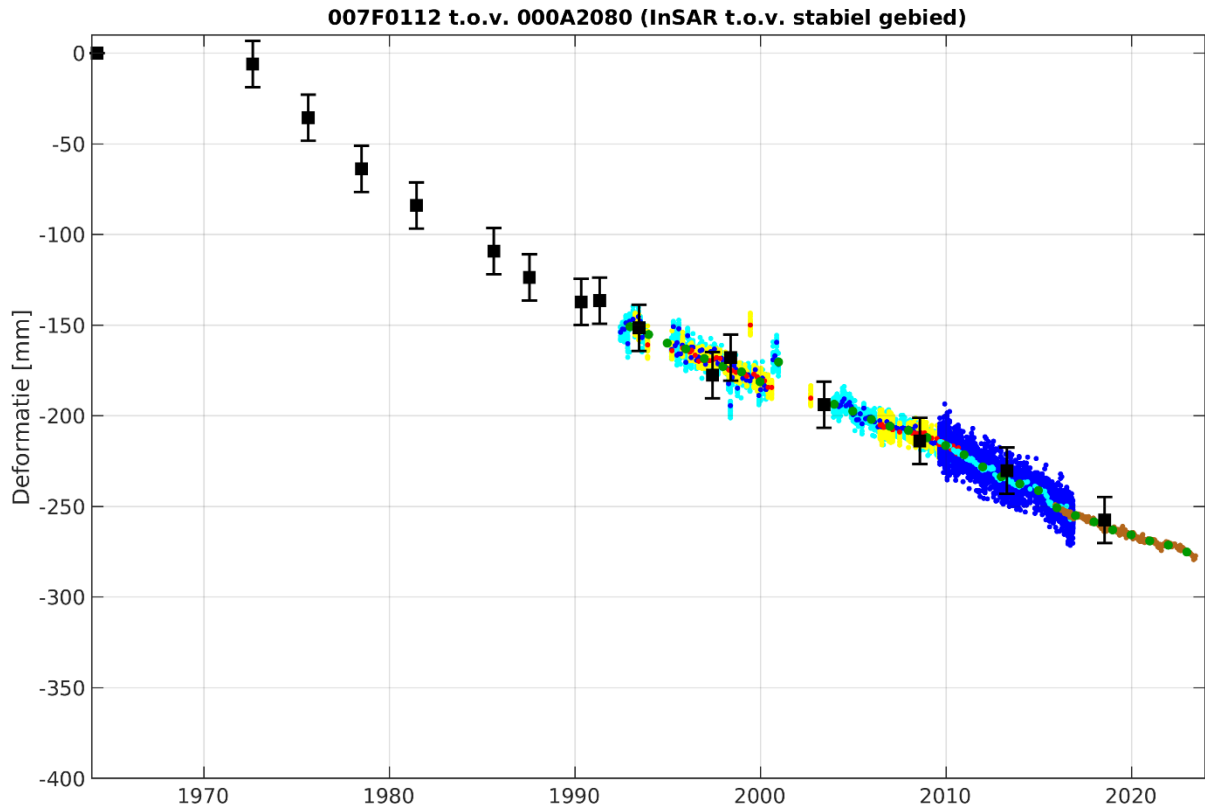


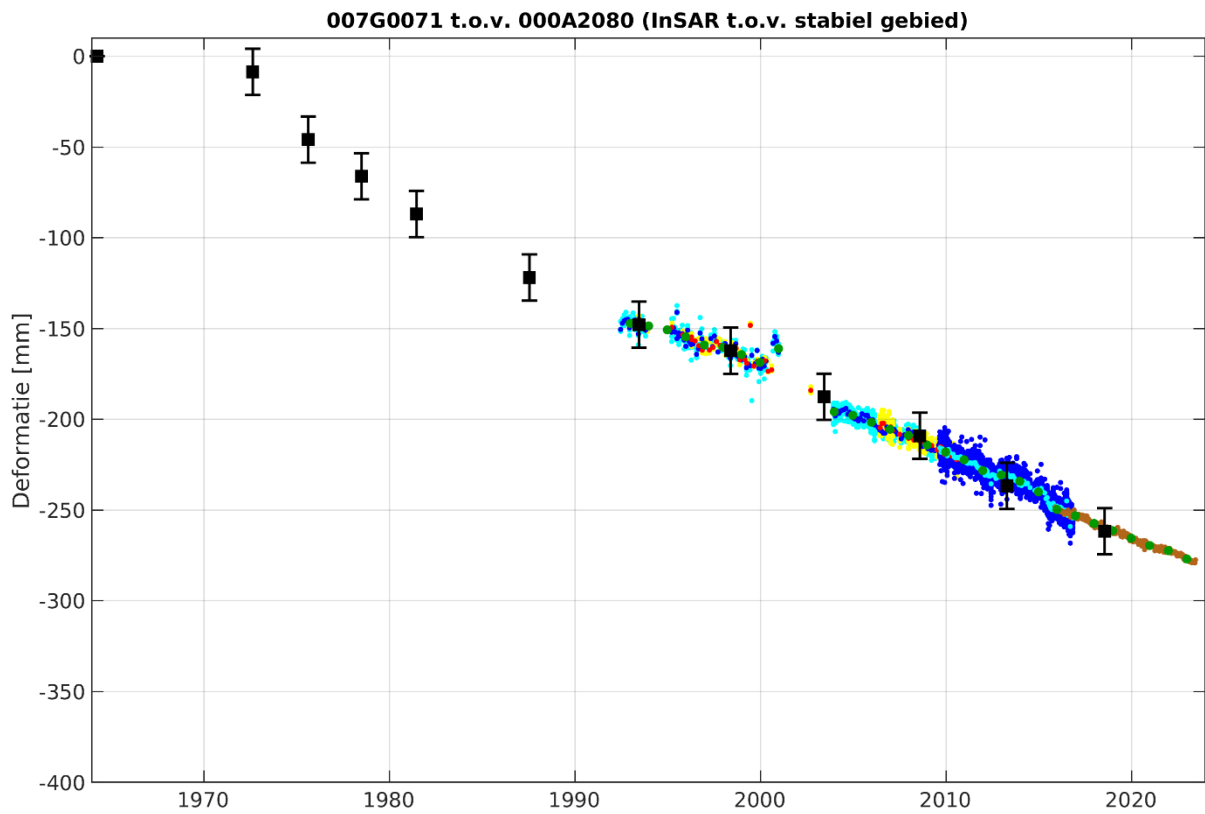
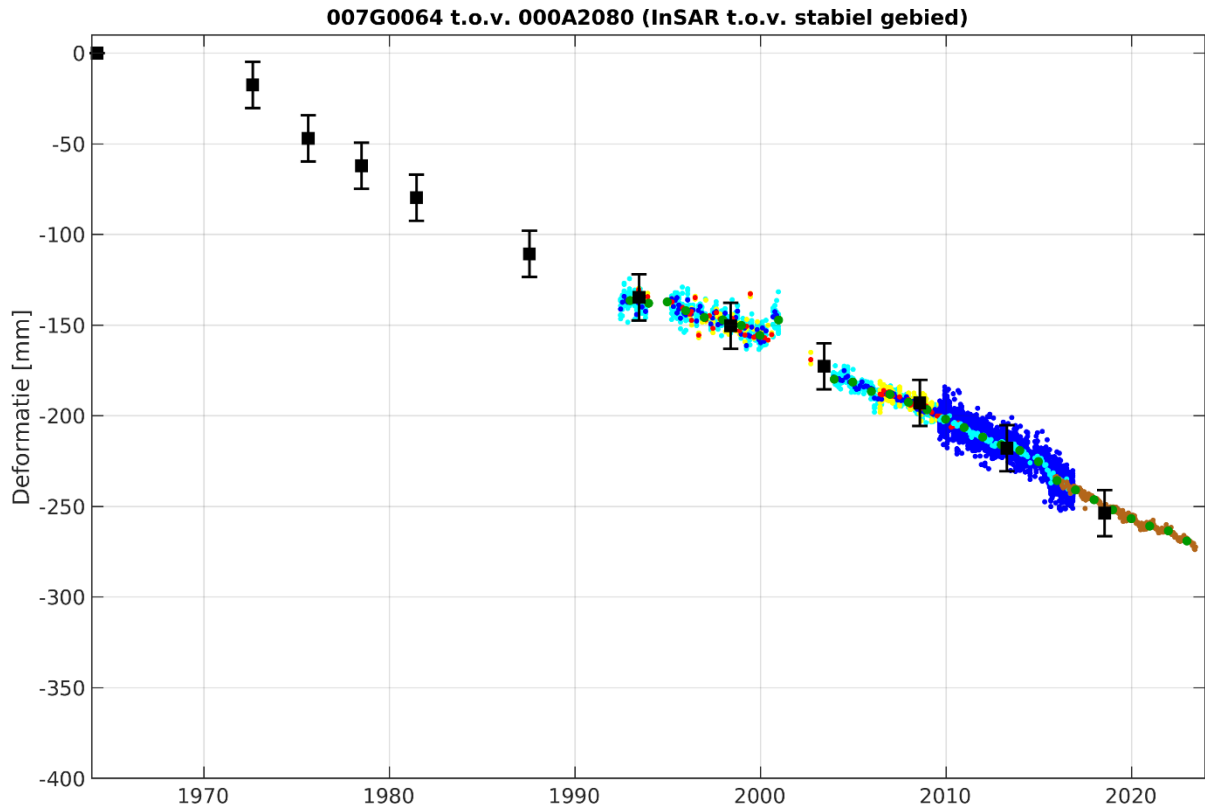


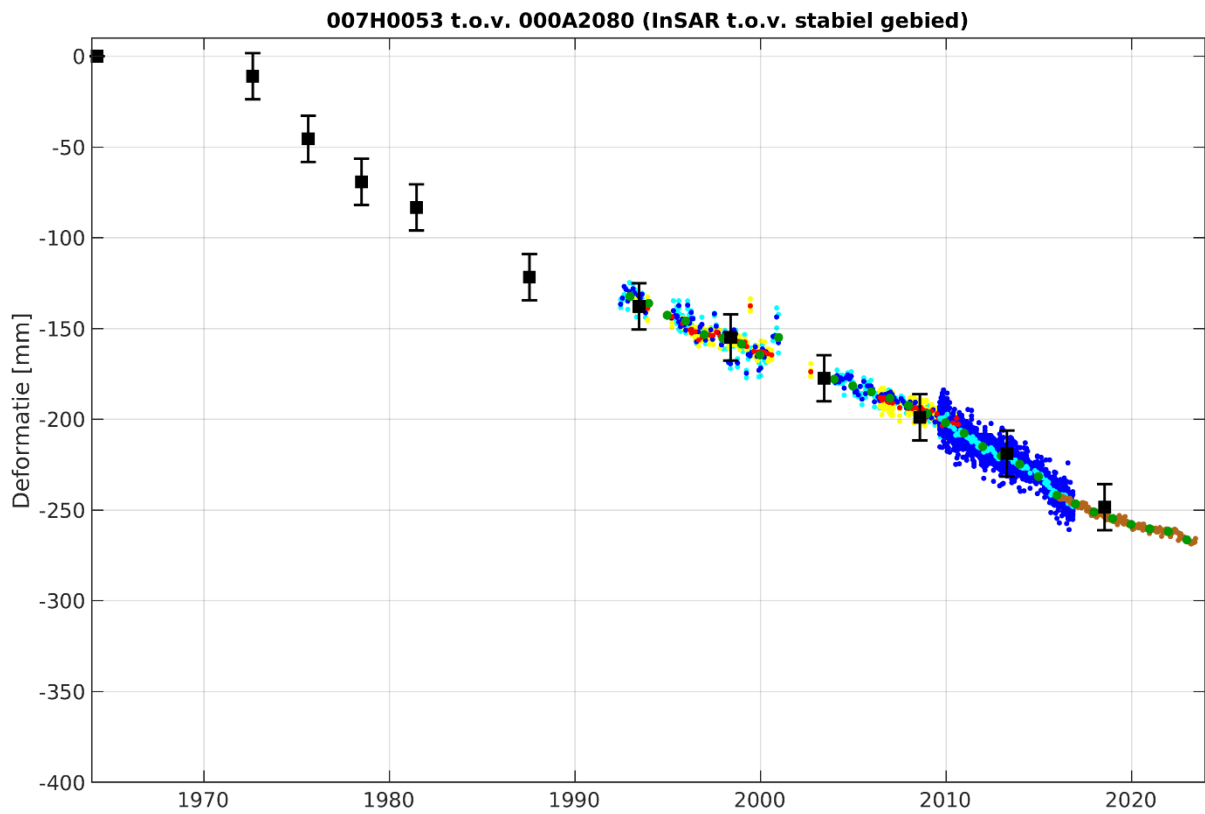
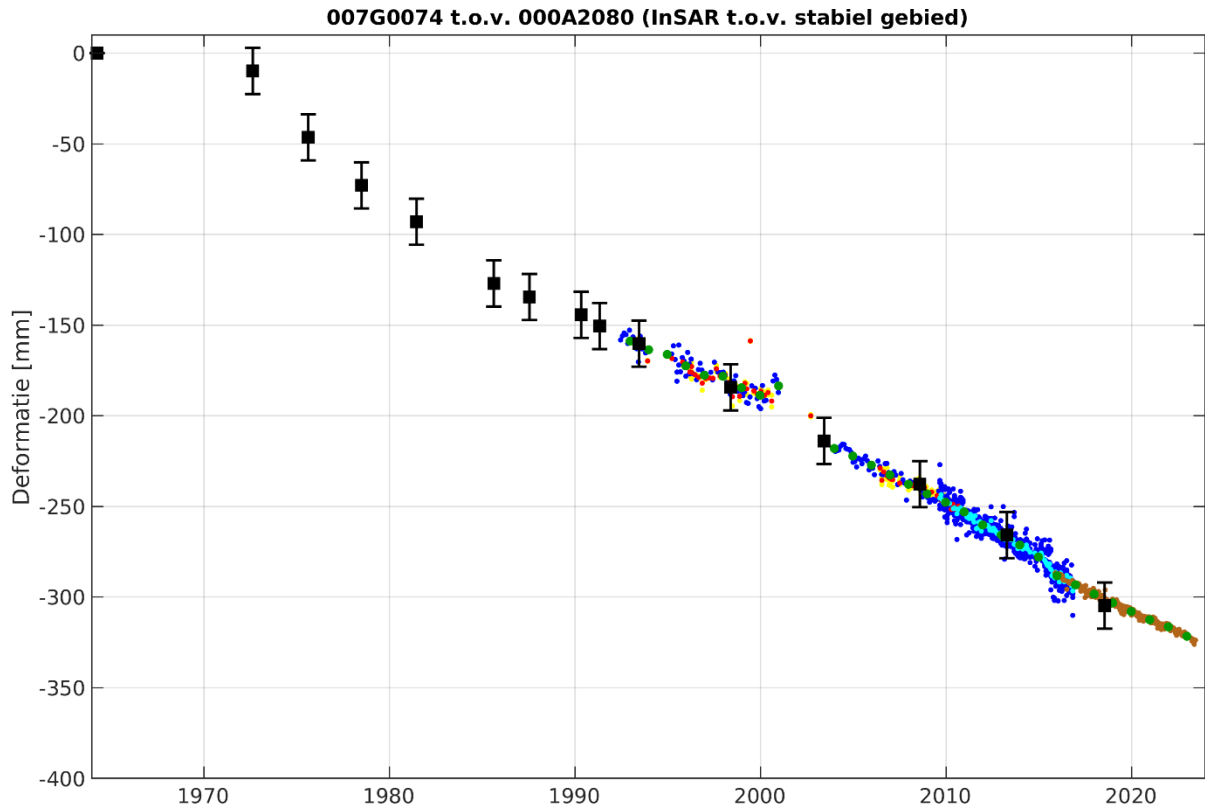


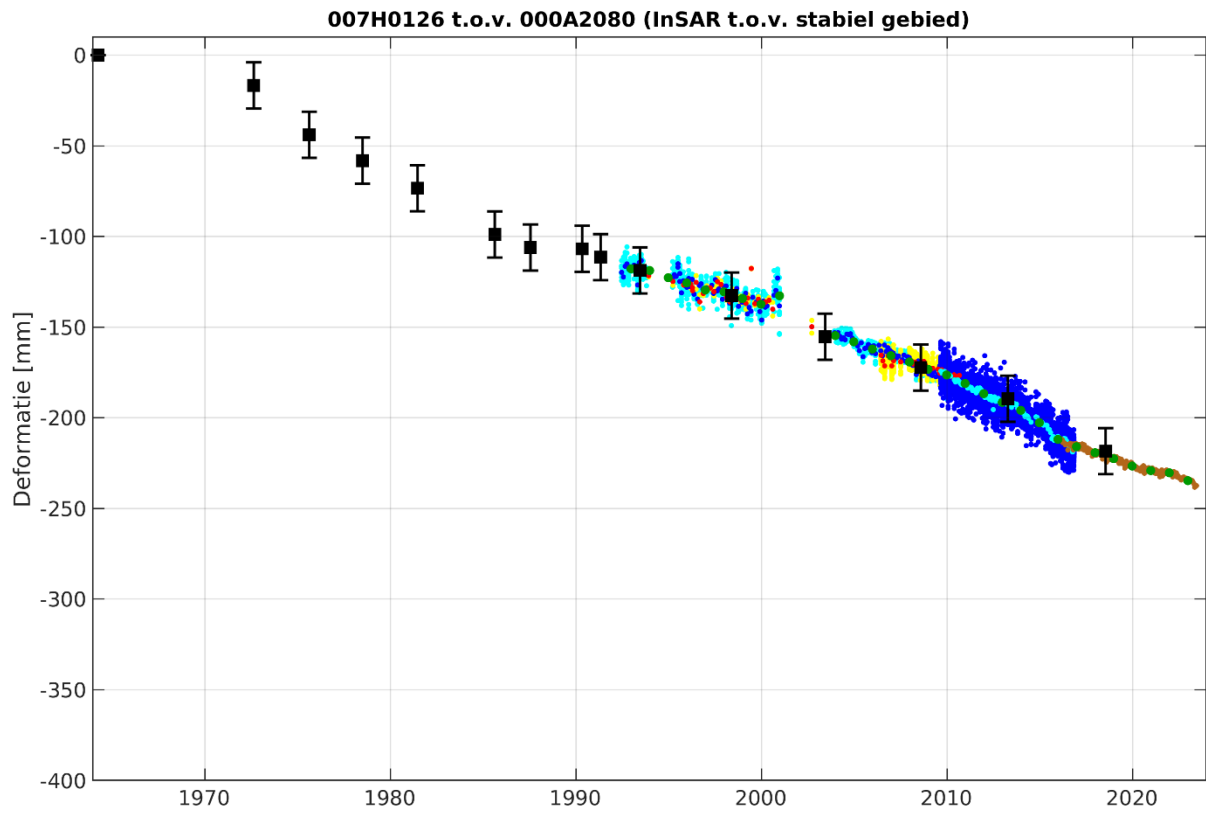








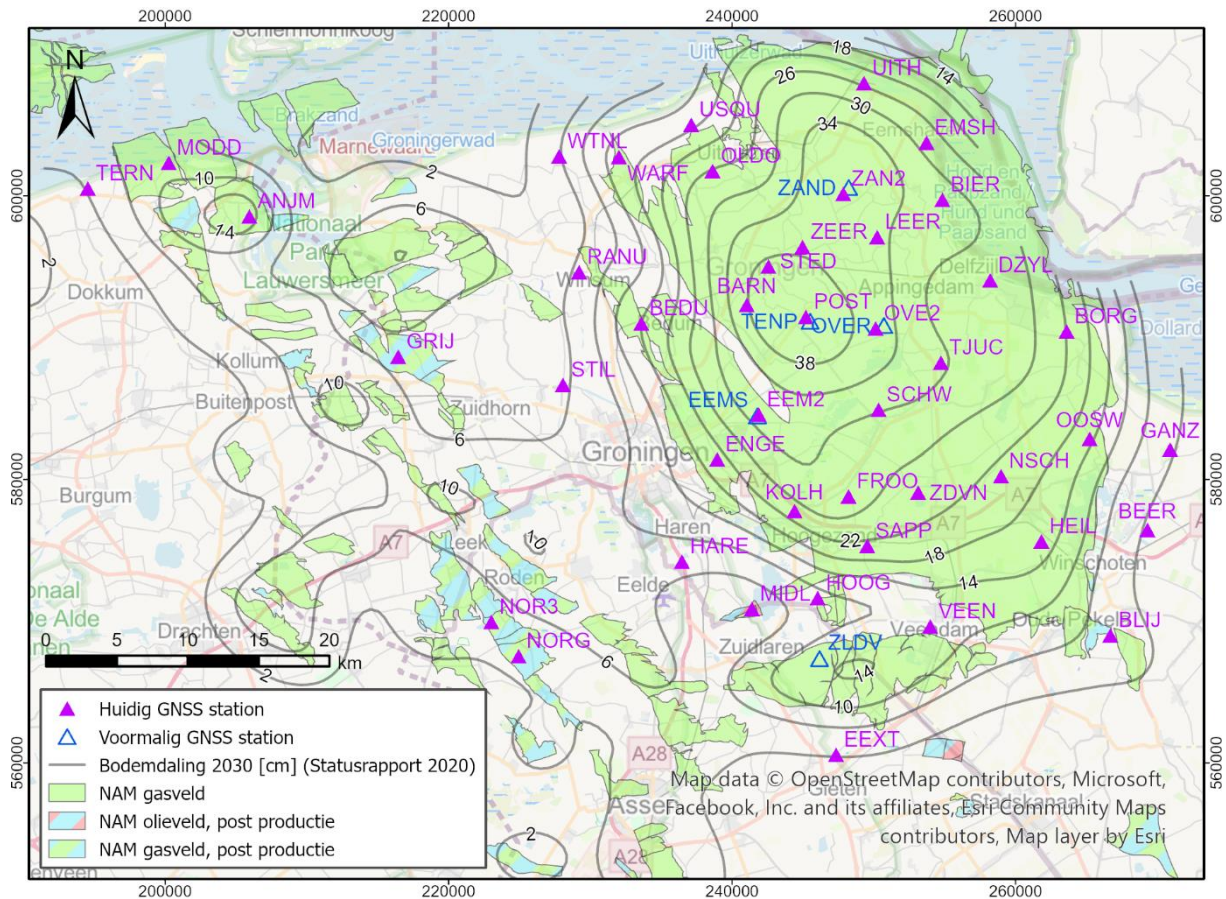




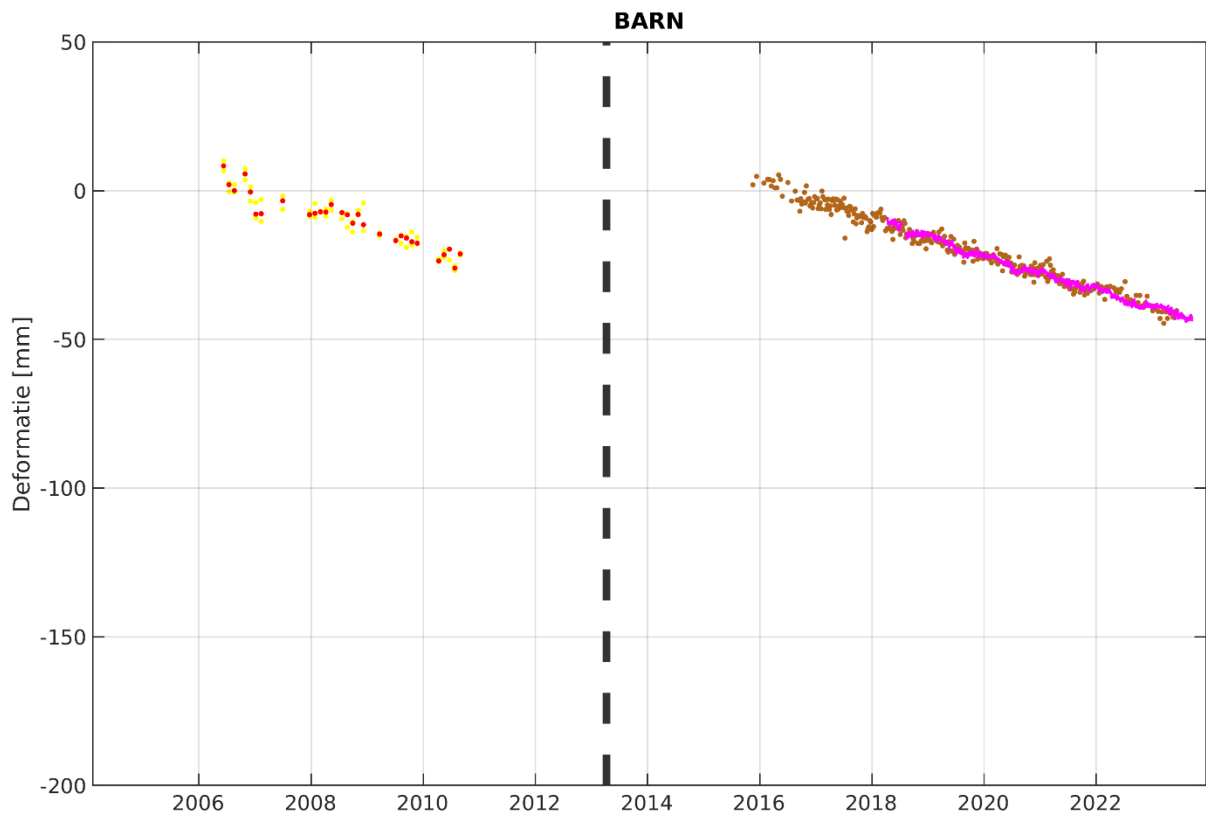
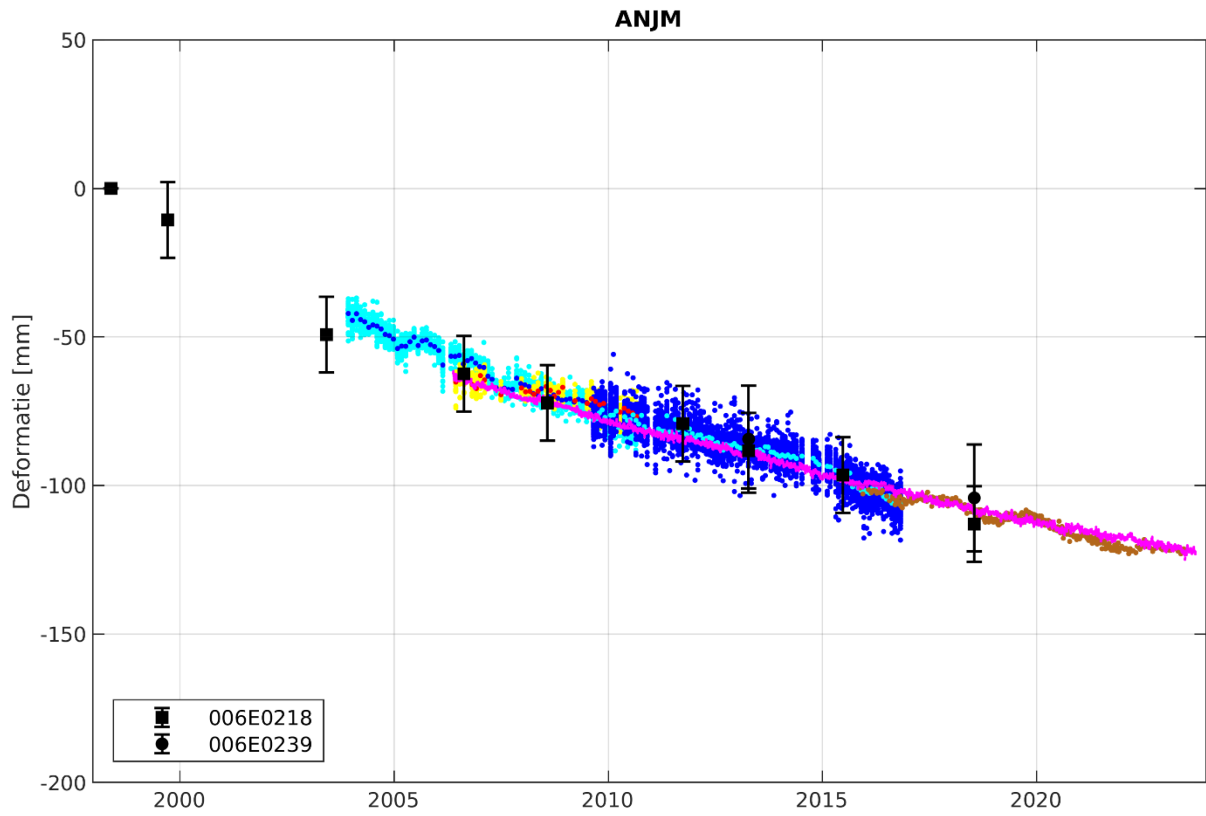


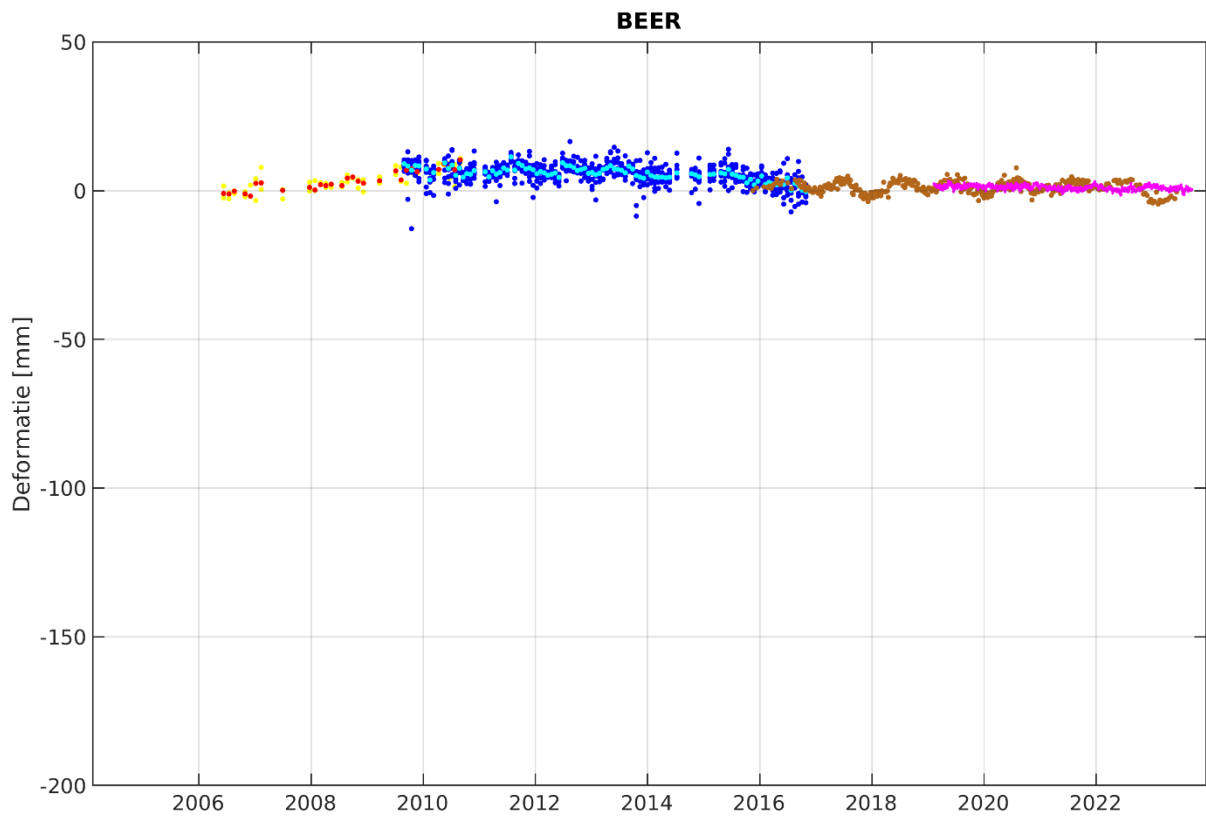
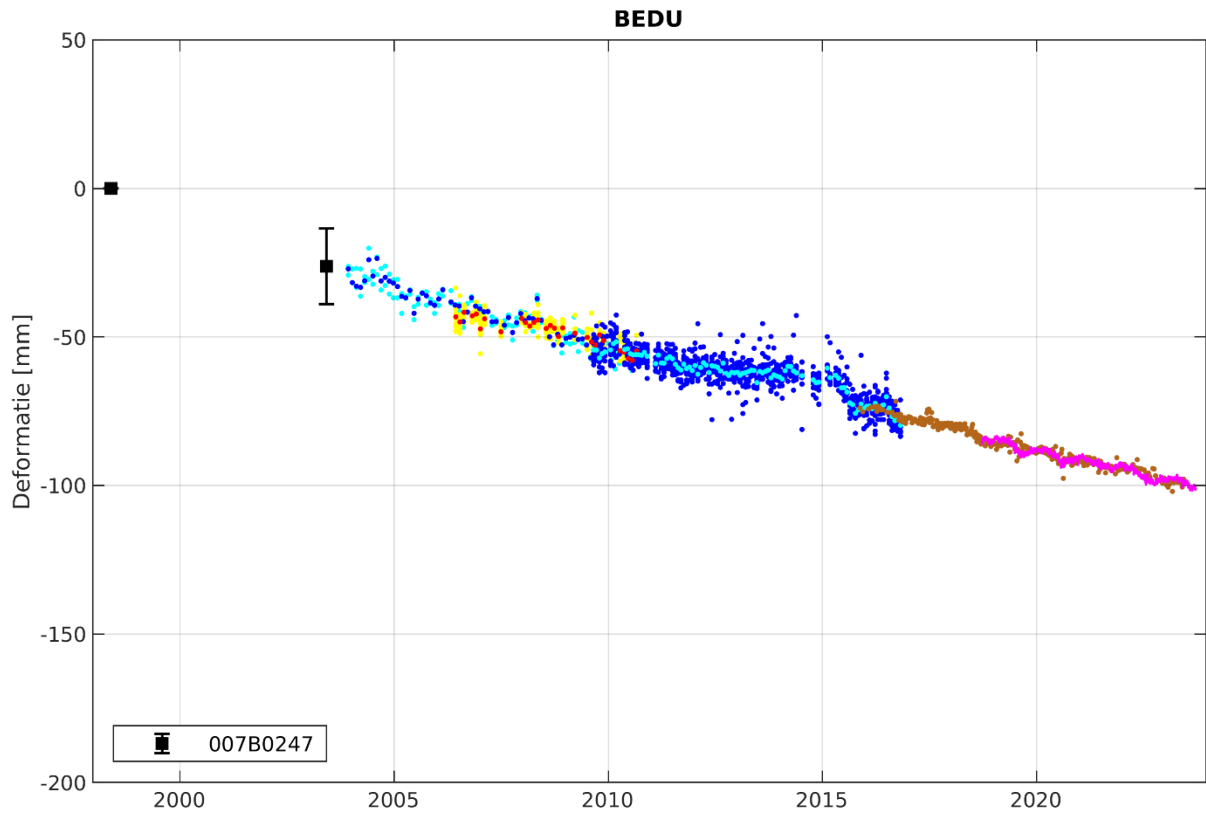
## B.2. GNSS

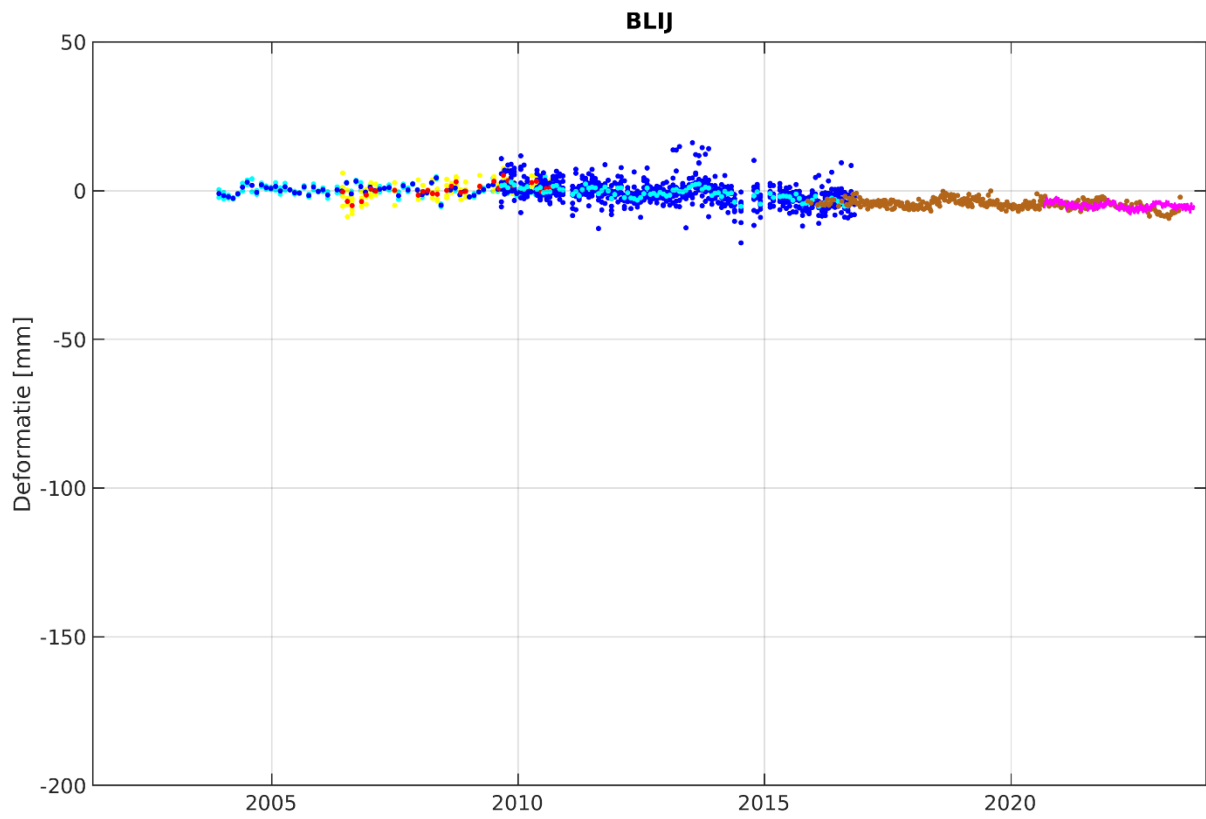
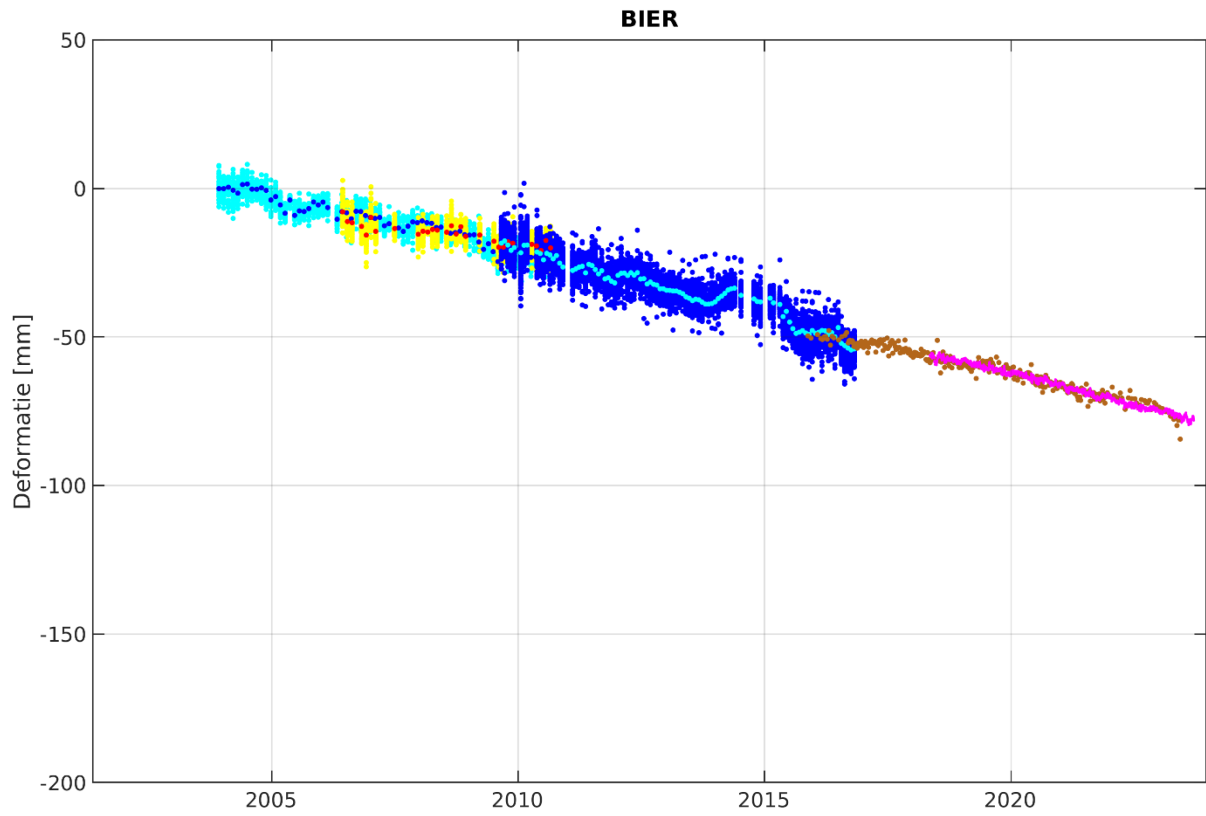
Op de volgende bladzijden wordt de verticale component van de deformatie-tijdsreeks van de 45 huidige en voormalige GNSS-stations in het rapportagegebied getoond (zie Figuur 11). Daarbij worden de tijdsreeks van vier afgebouwde stations met tijdsreeks van vervangende stations aangevuld. Ter vergelijking worden in de afbeeldingen ook waarnemingen van alle PS en ten minste deels stabiel veronderstelde peilmerken binnen een straal van 500 m getoond. De onderlinge aansluiting van de tijdsreeks op elkaar volgt de in bijlage C toegelichte combinatie procedure.

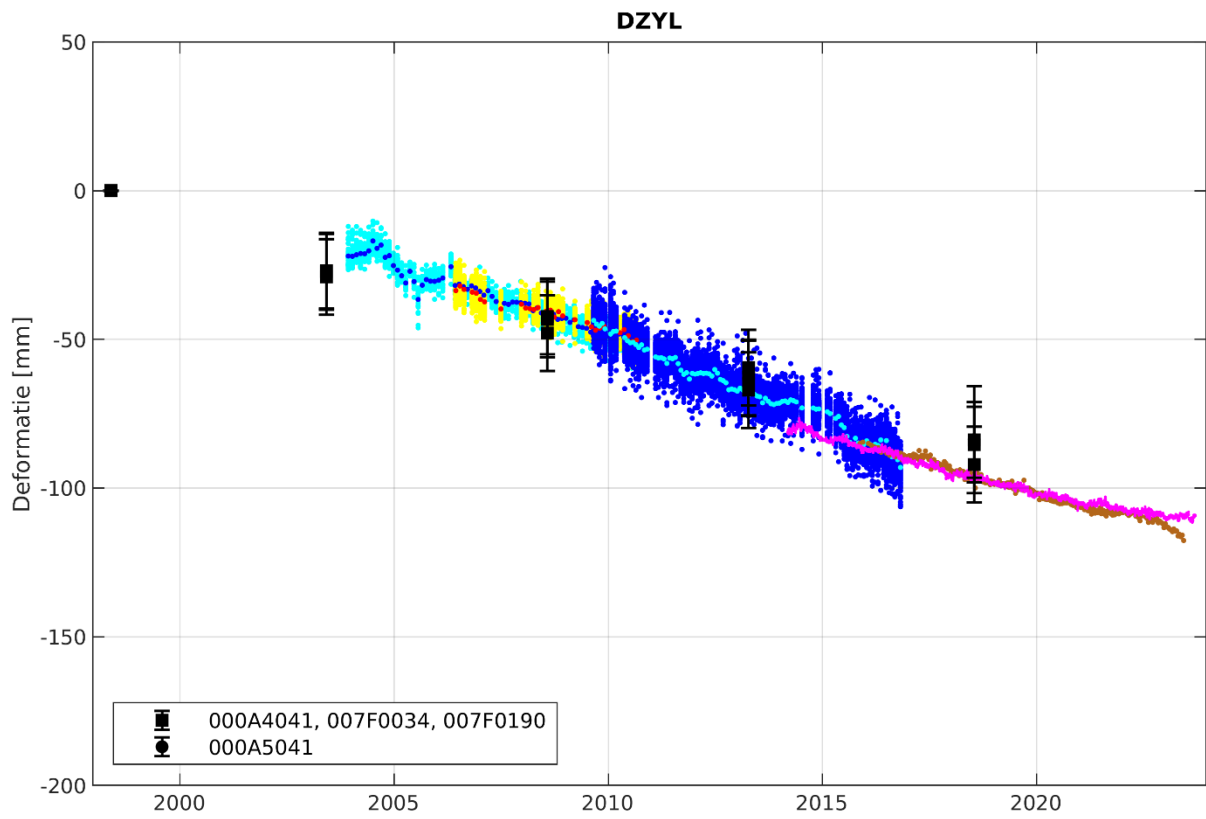
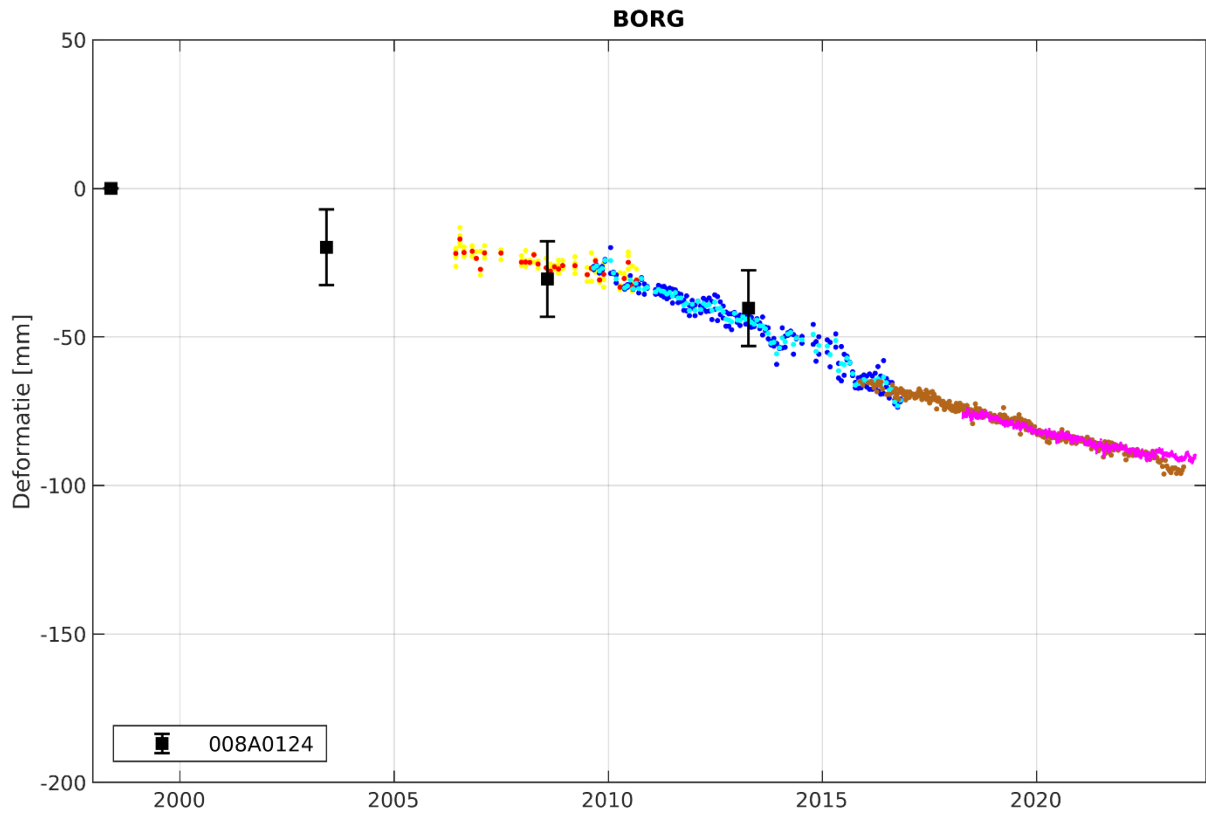


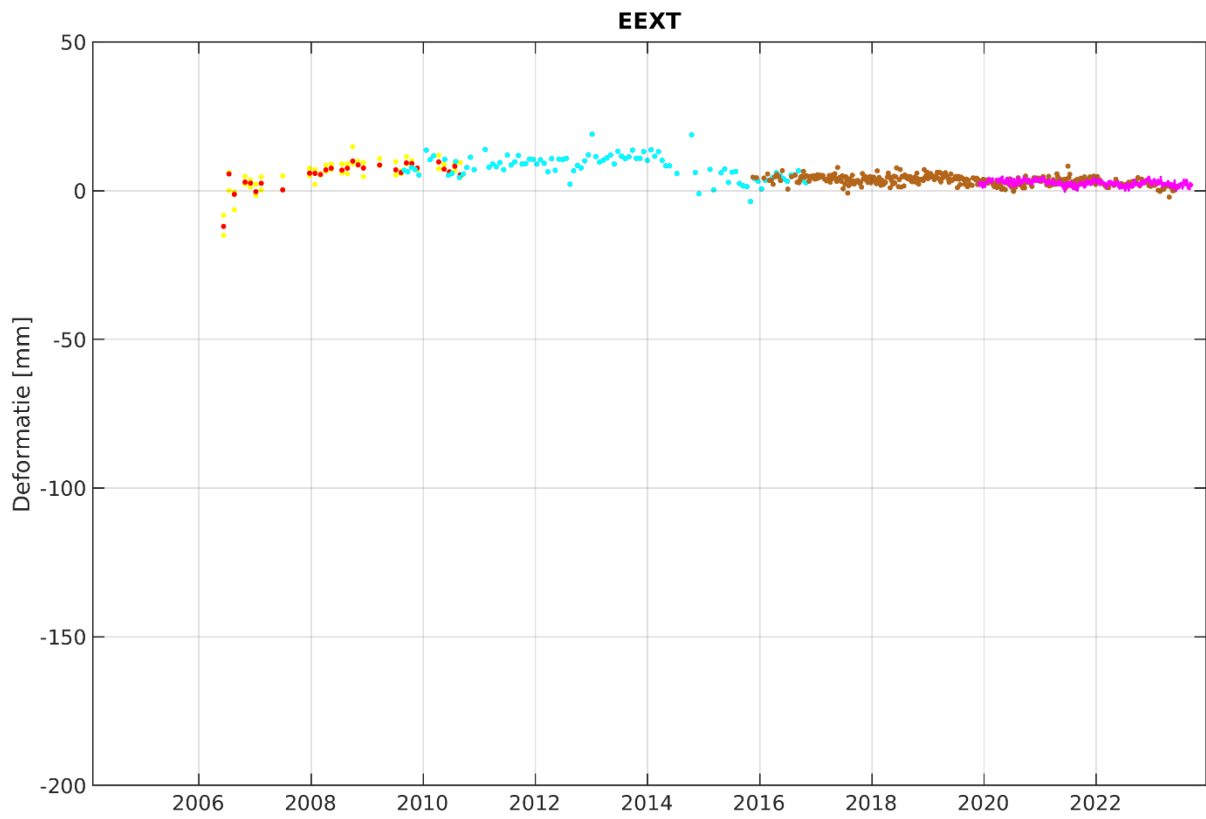
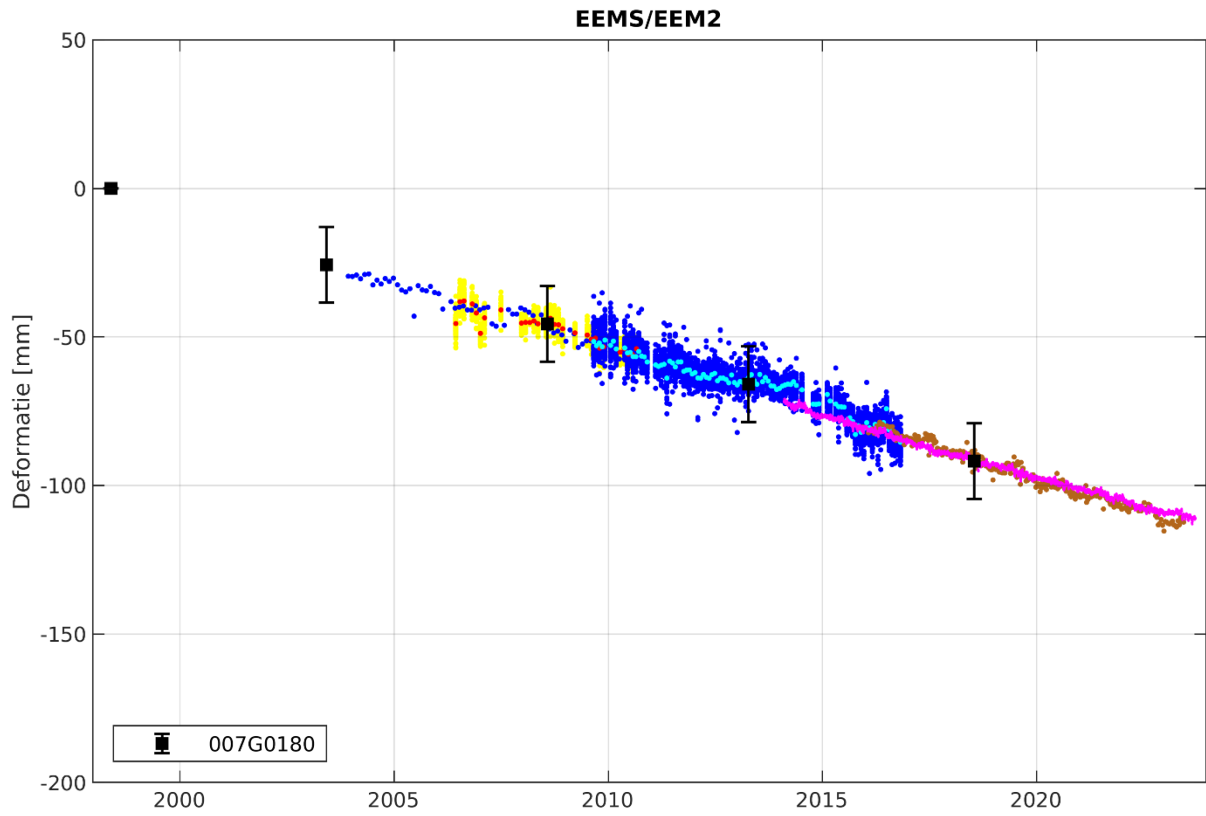
Figuur 11: GNSS-stations in het rapportagegebied.

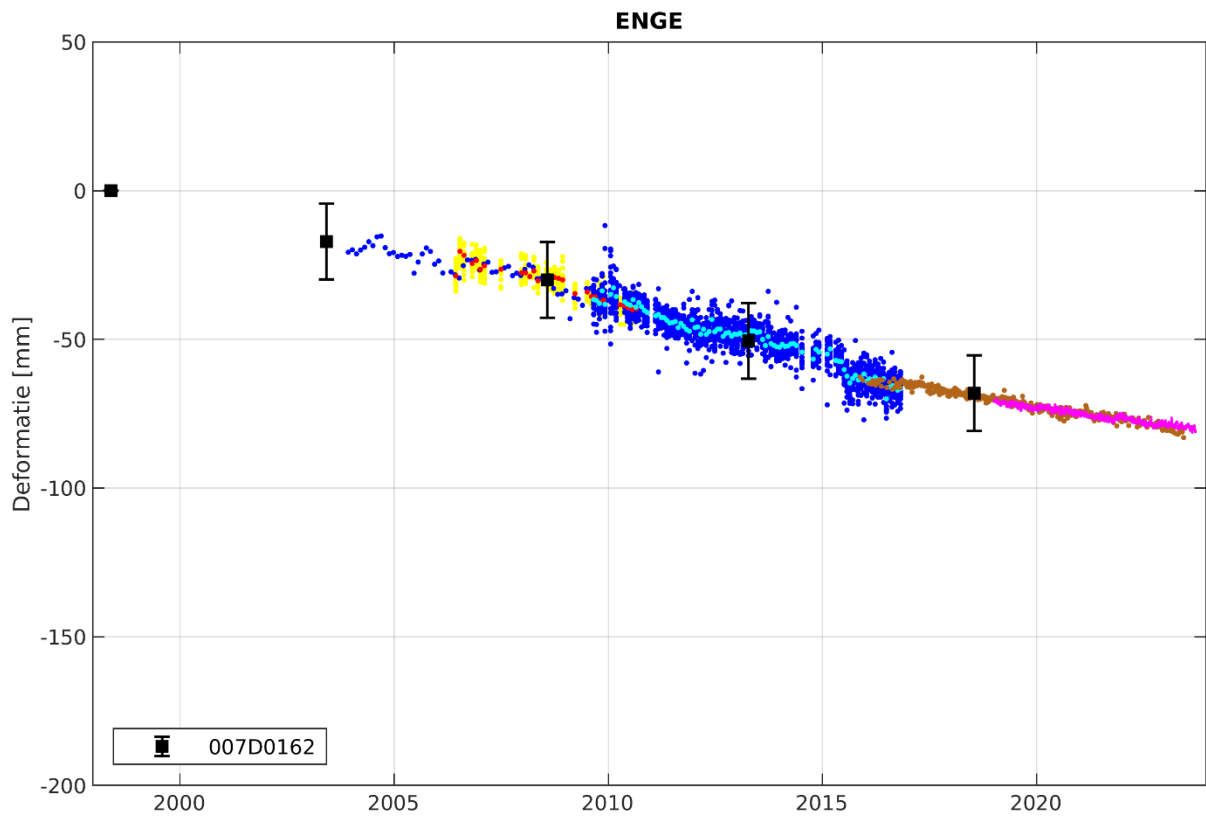
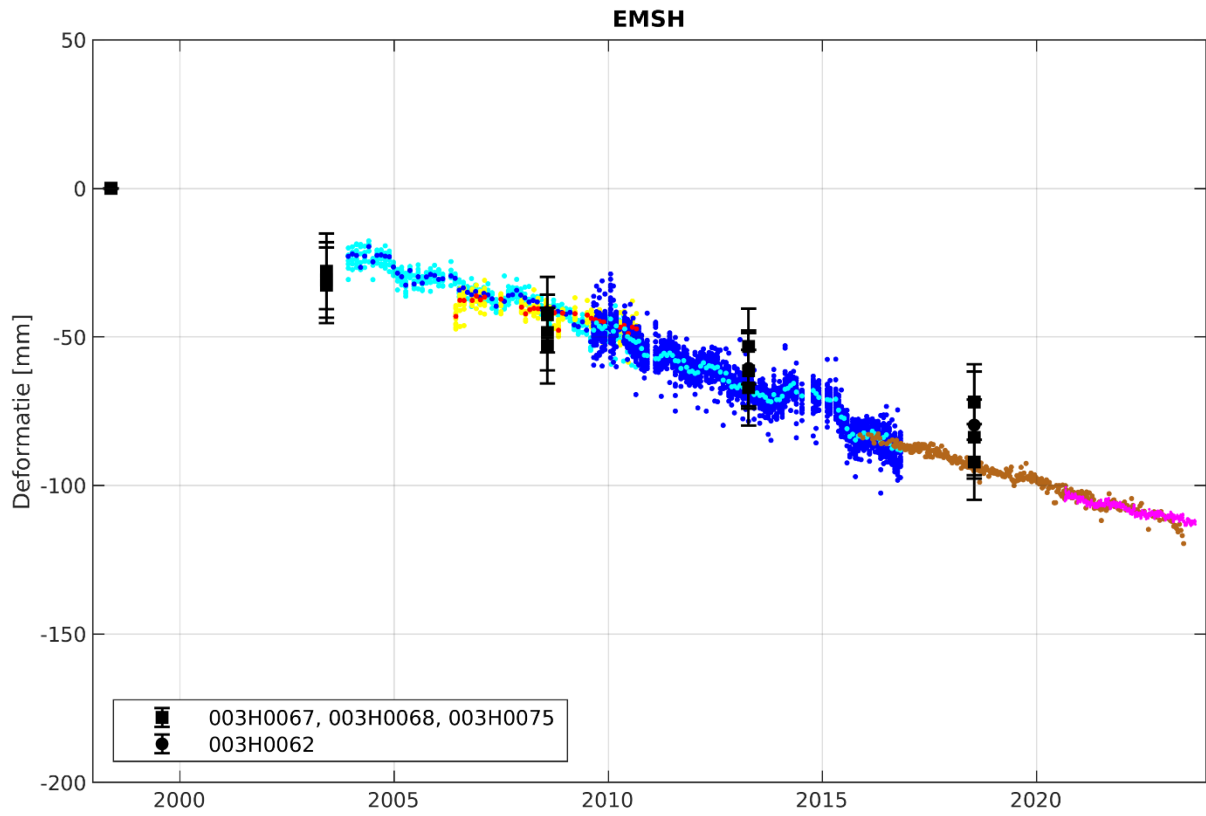


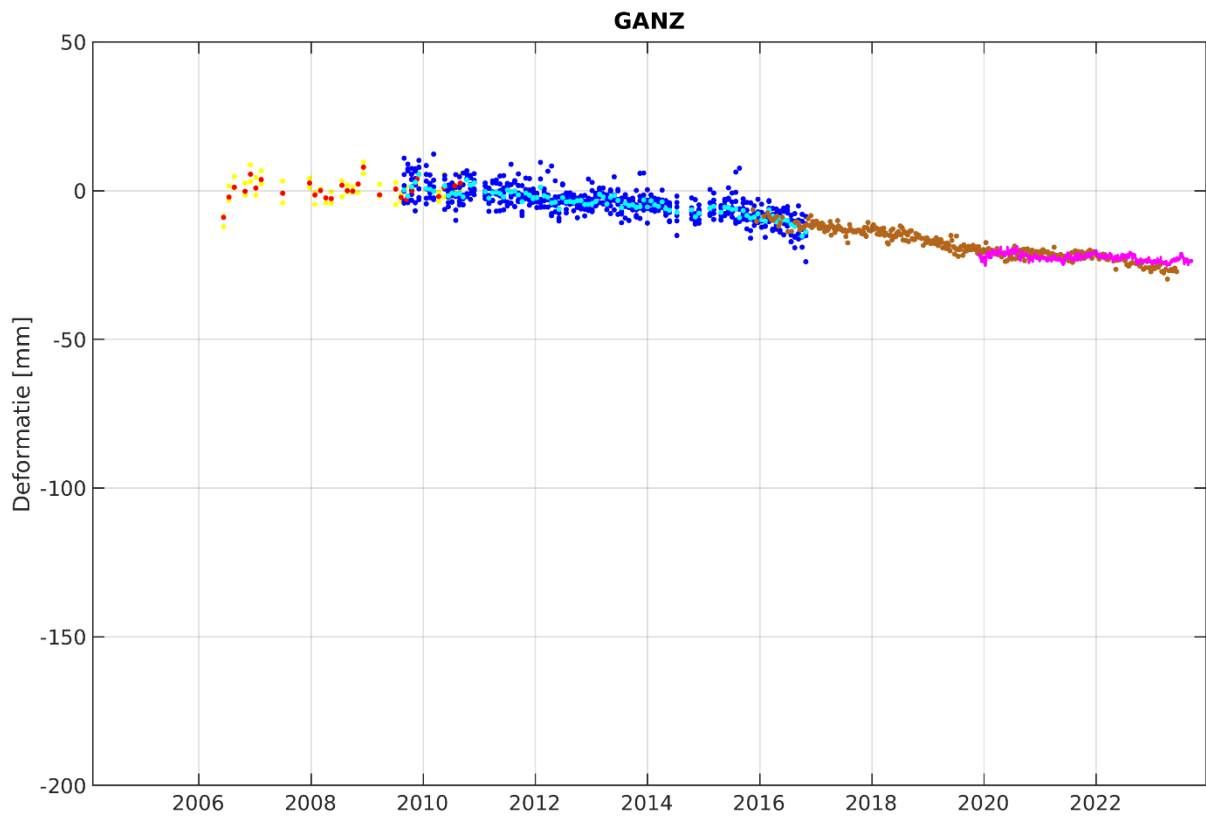
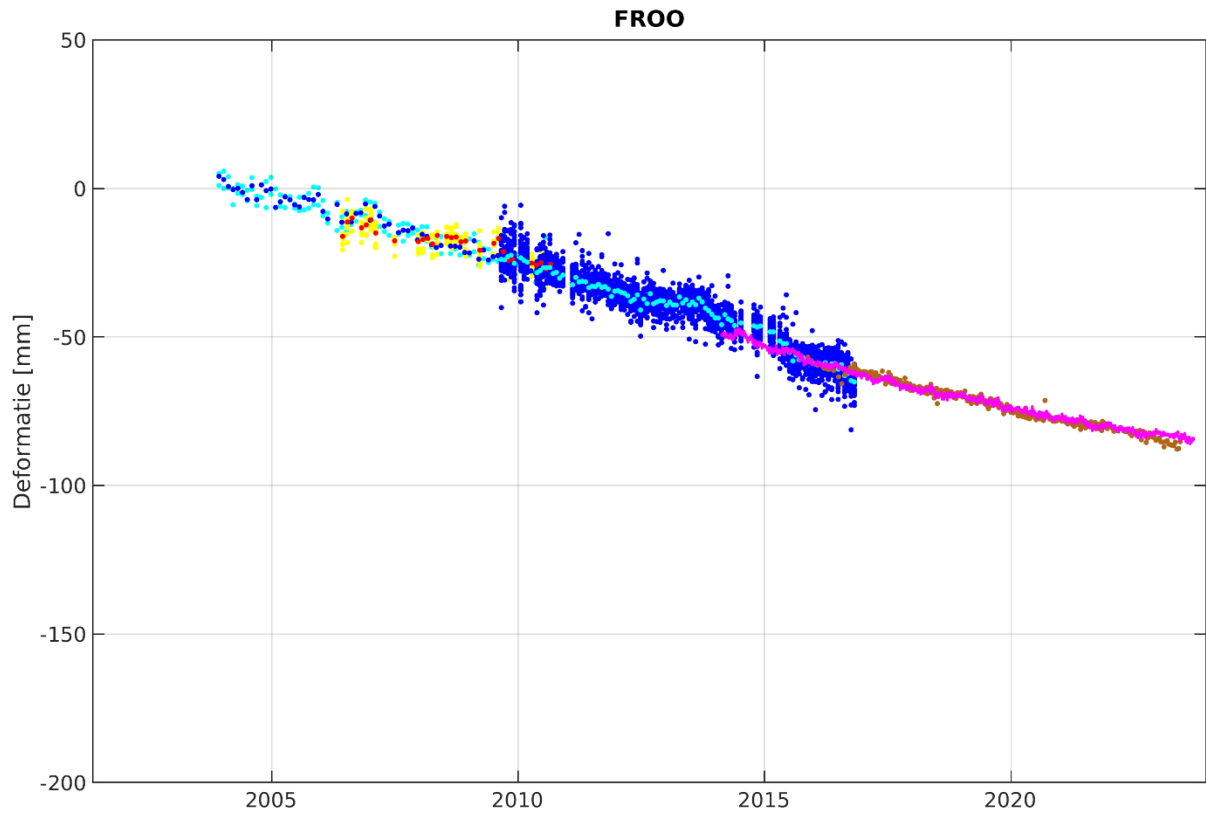




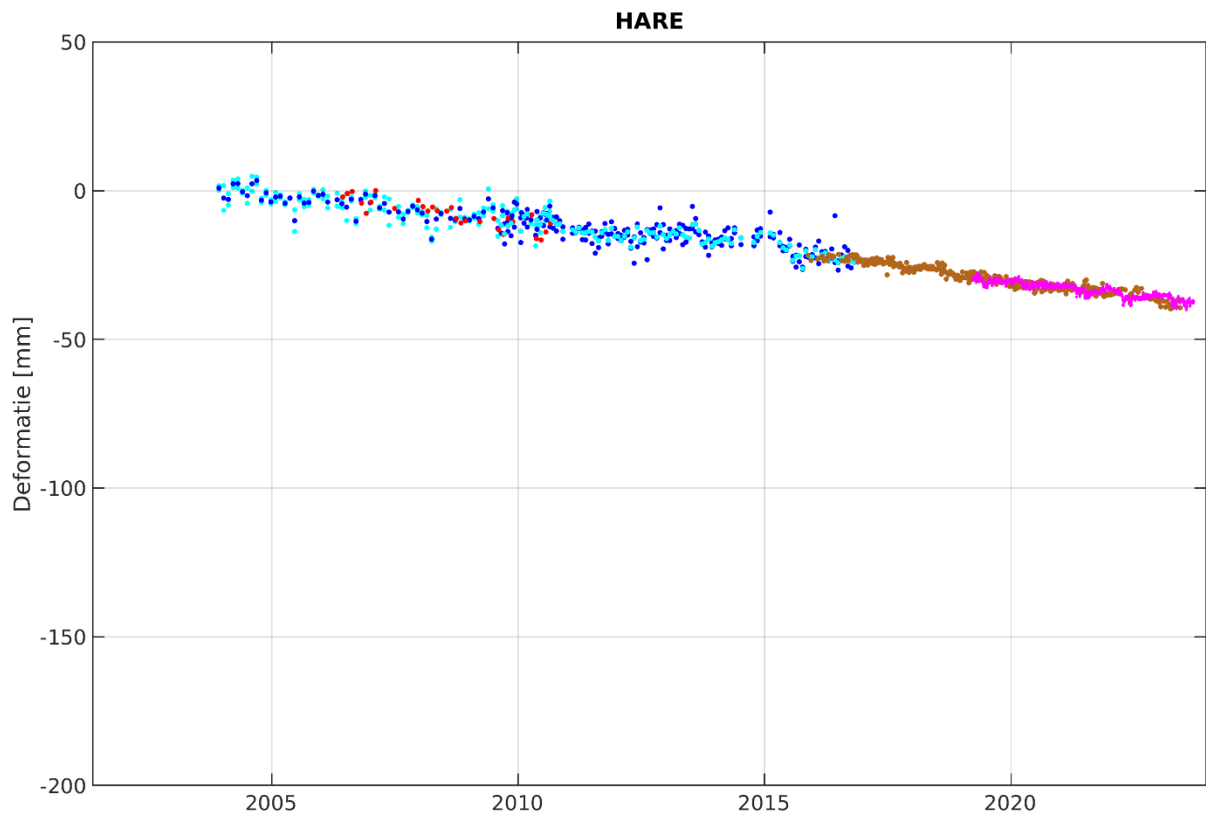
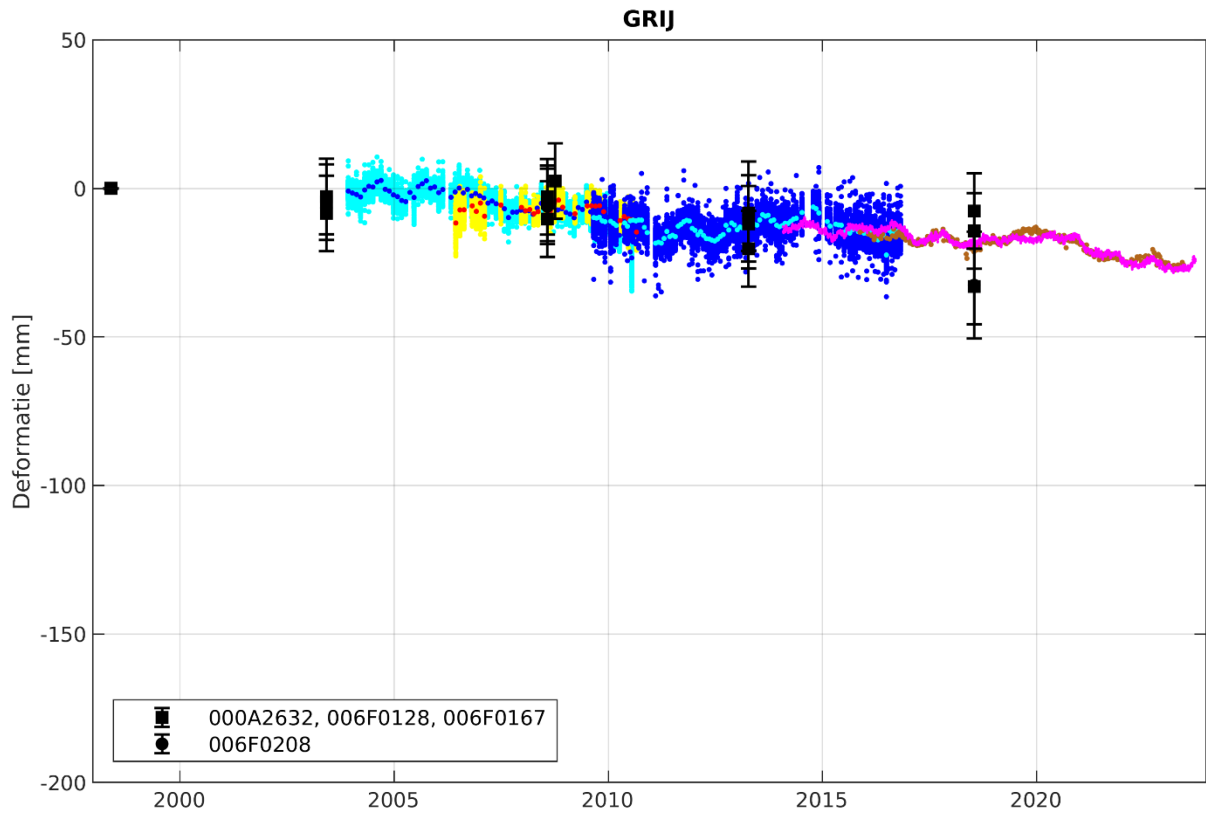


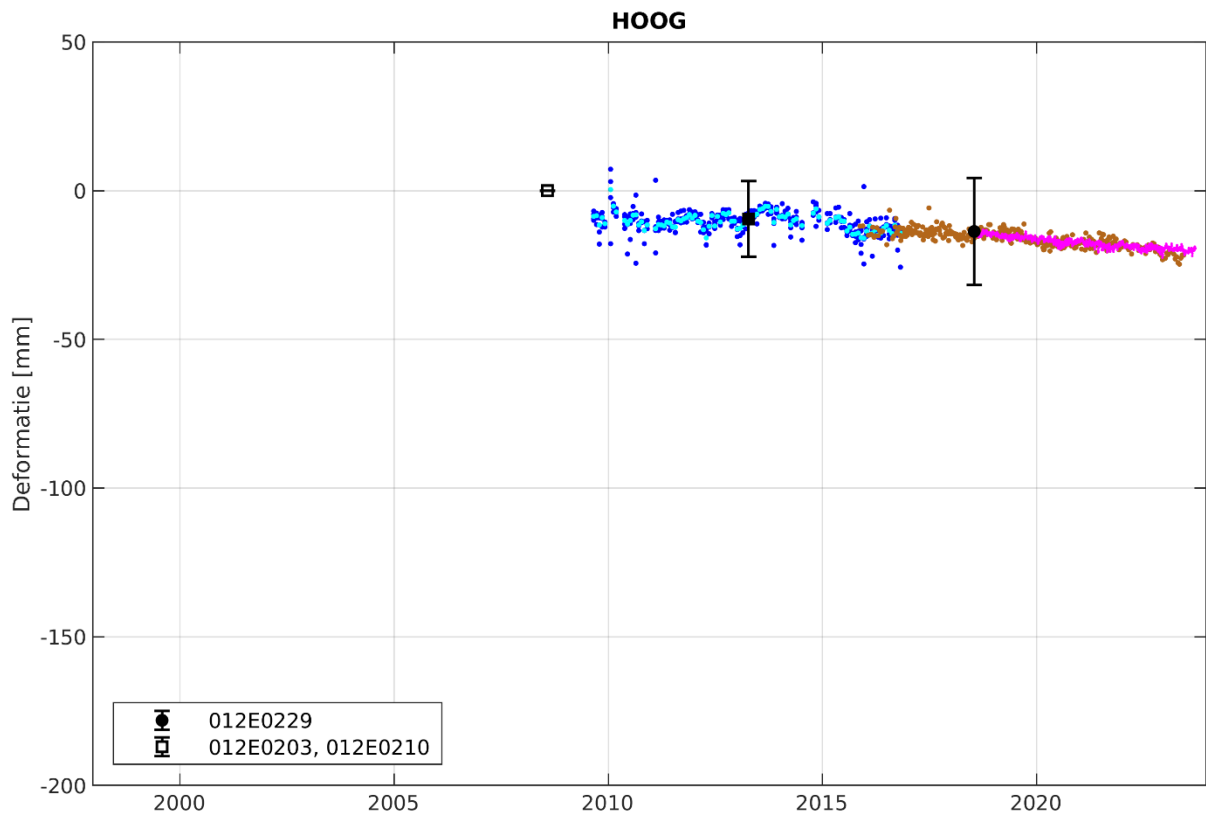
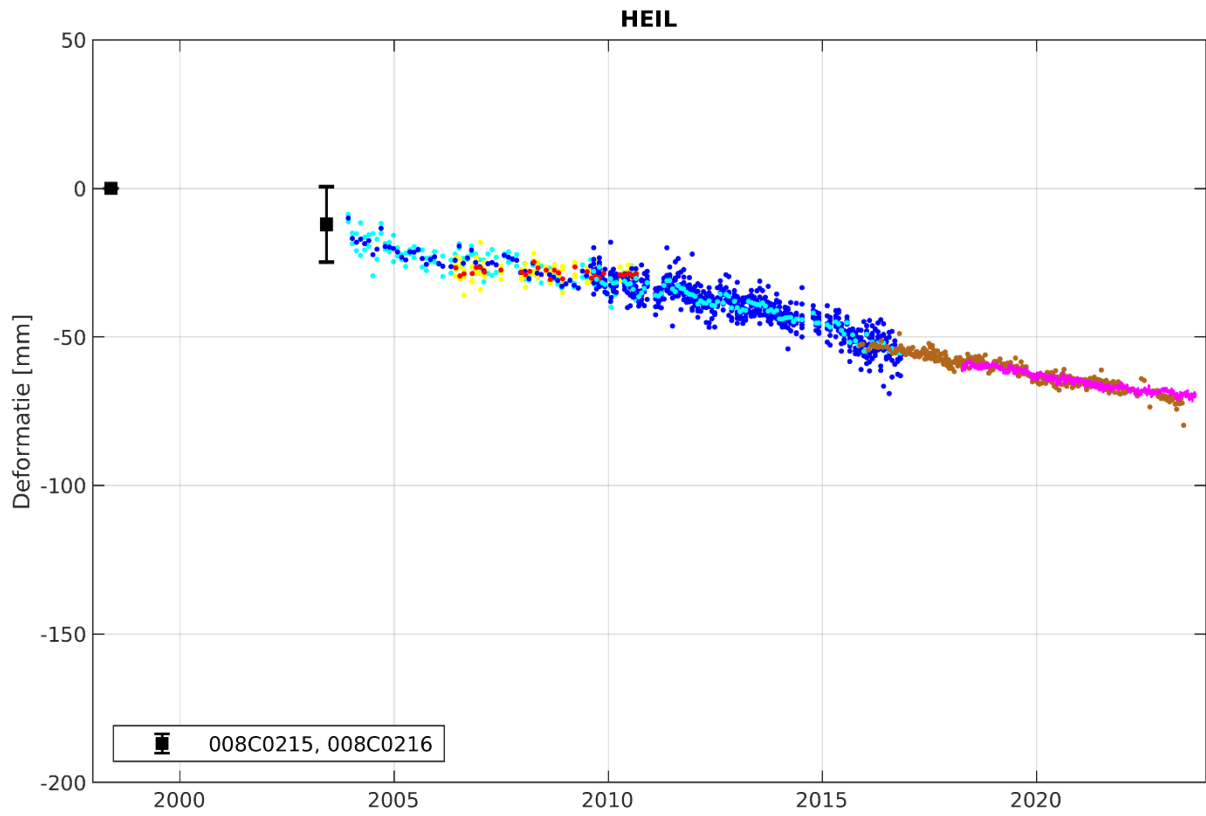


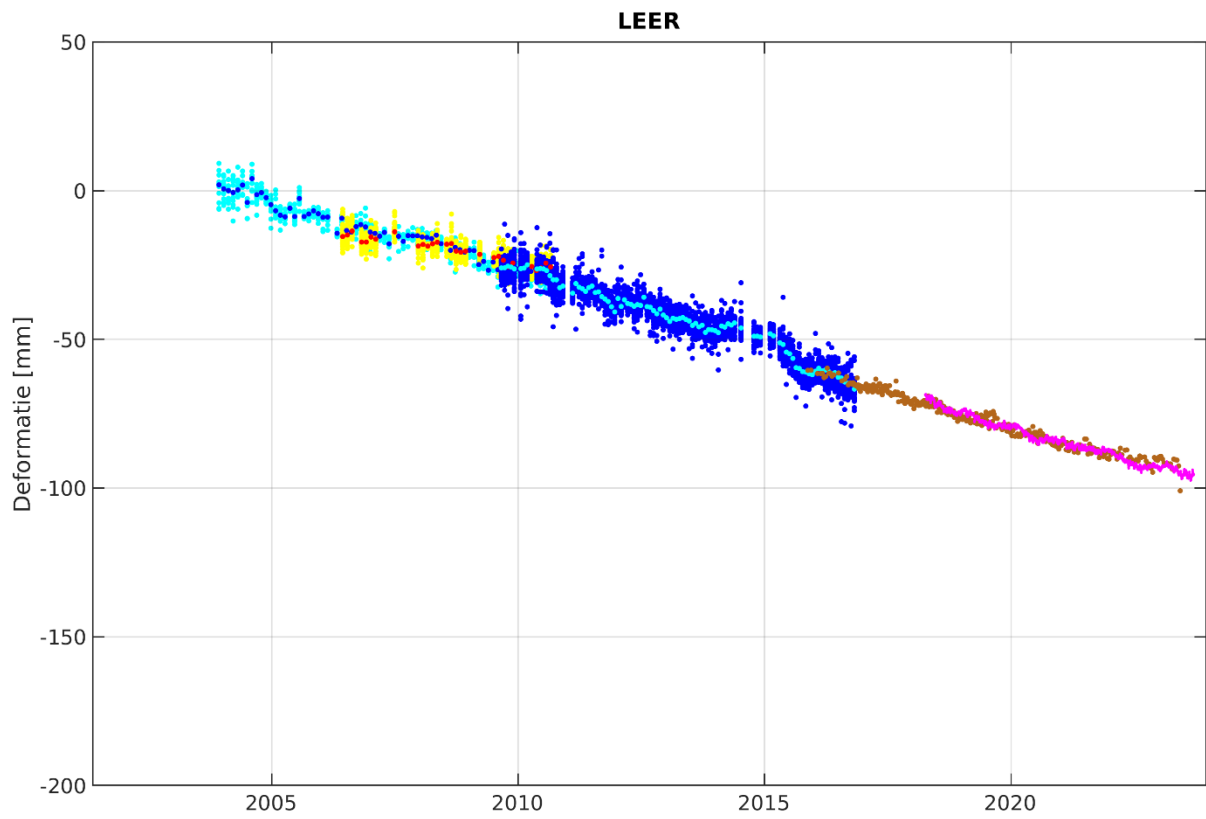
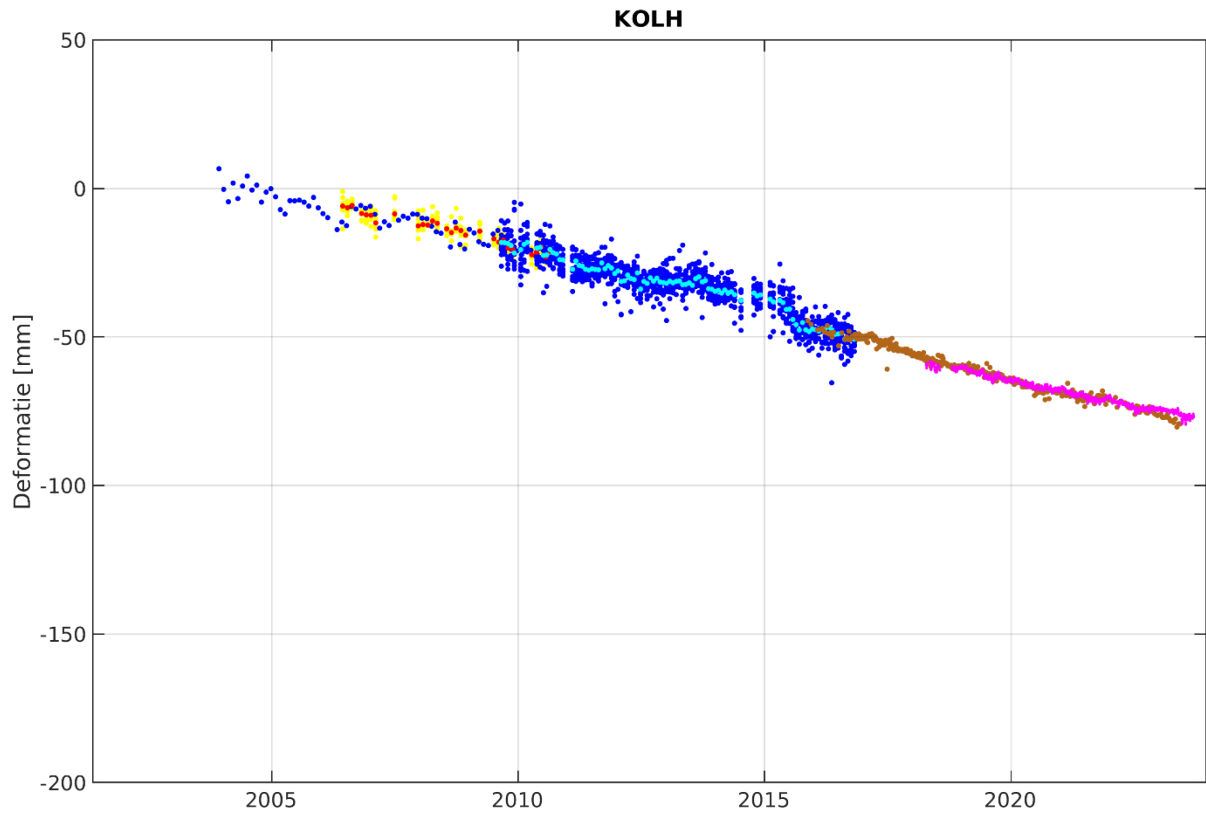


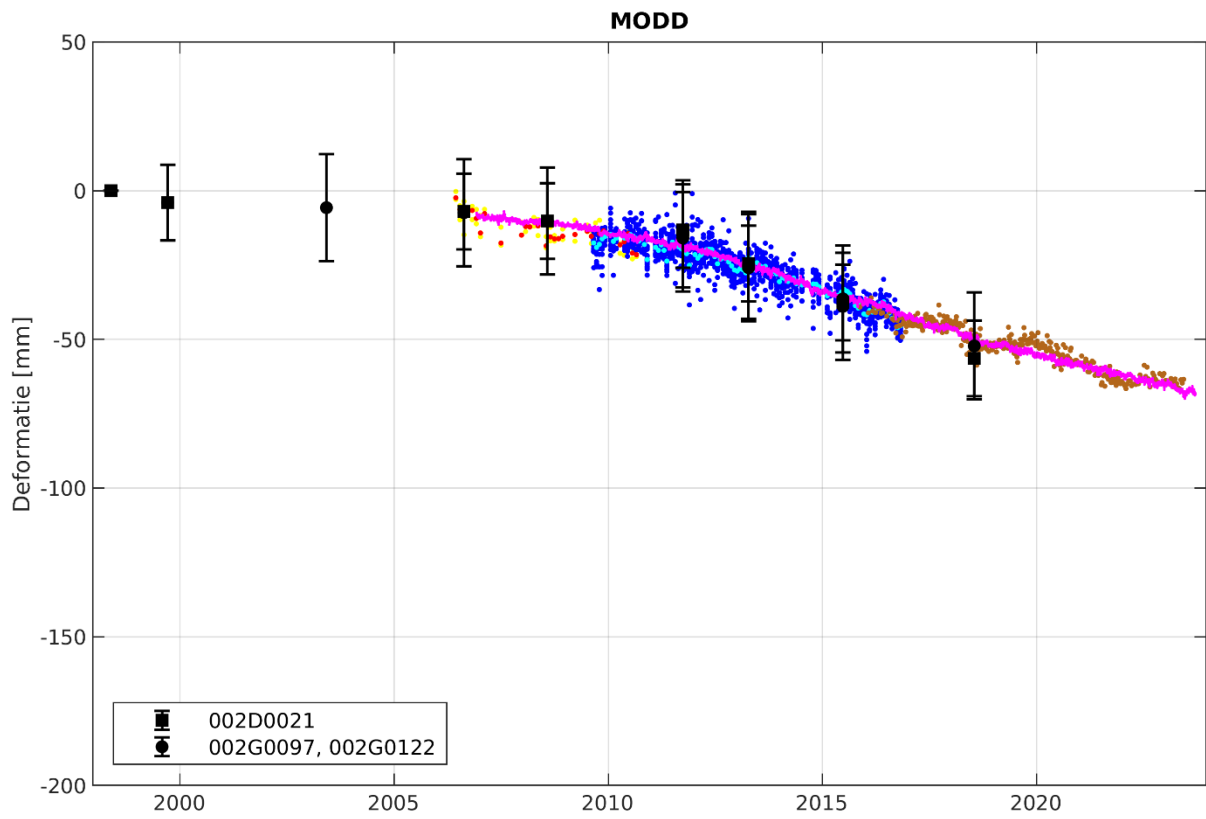
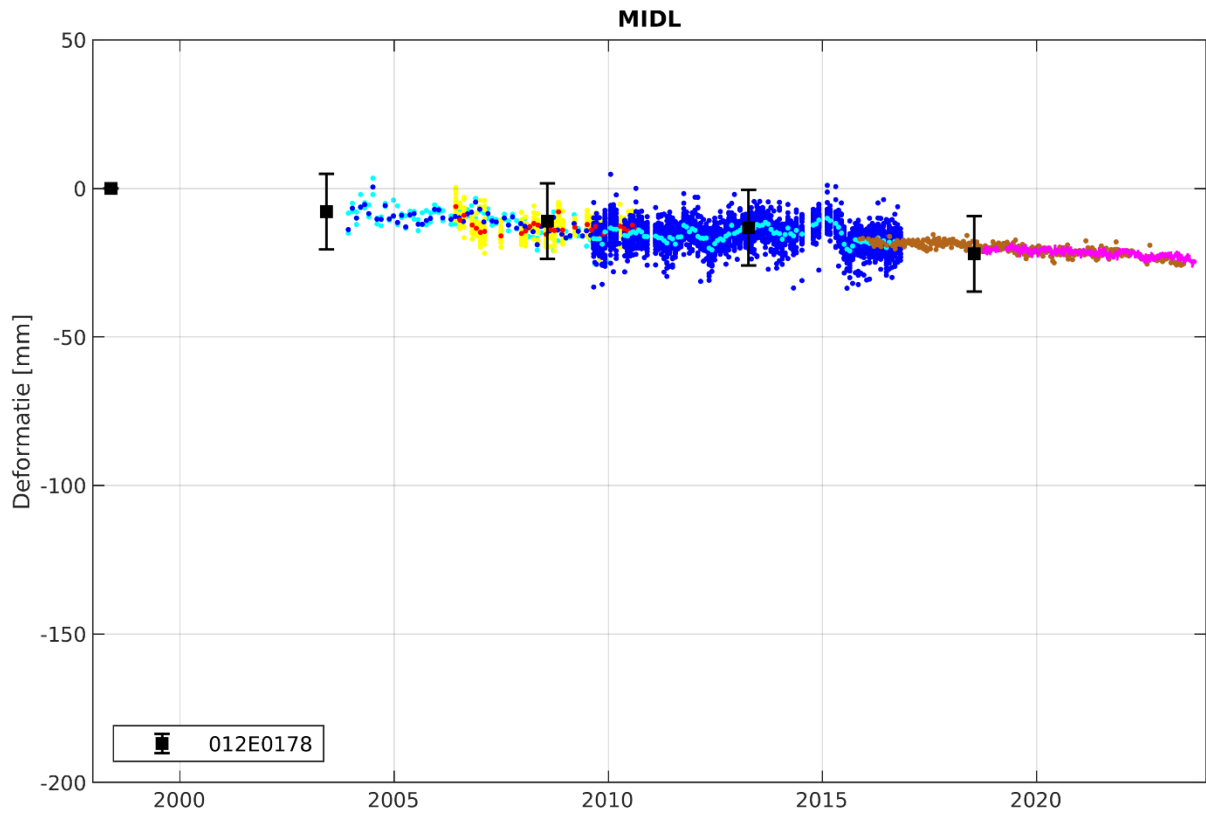


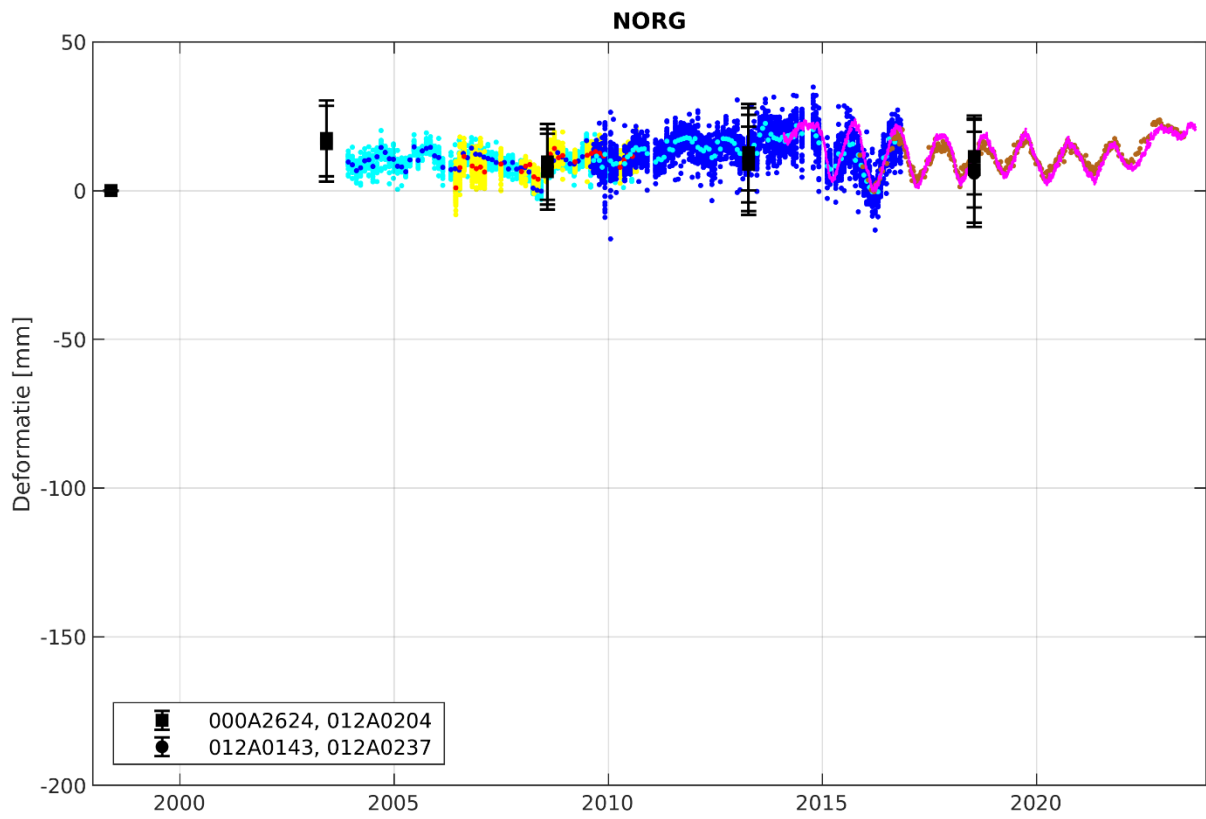
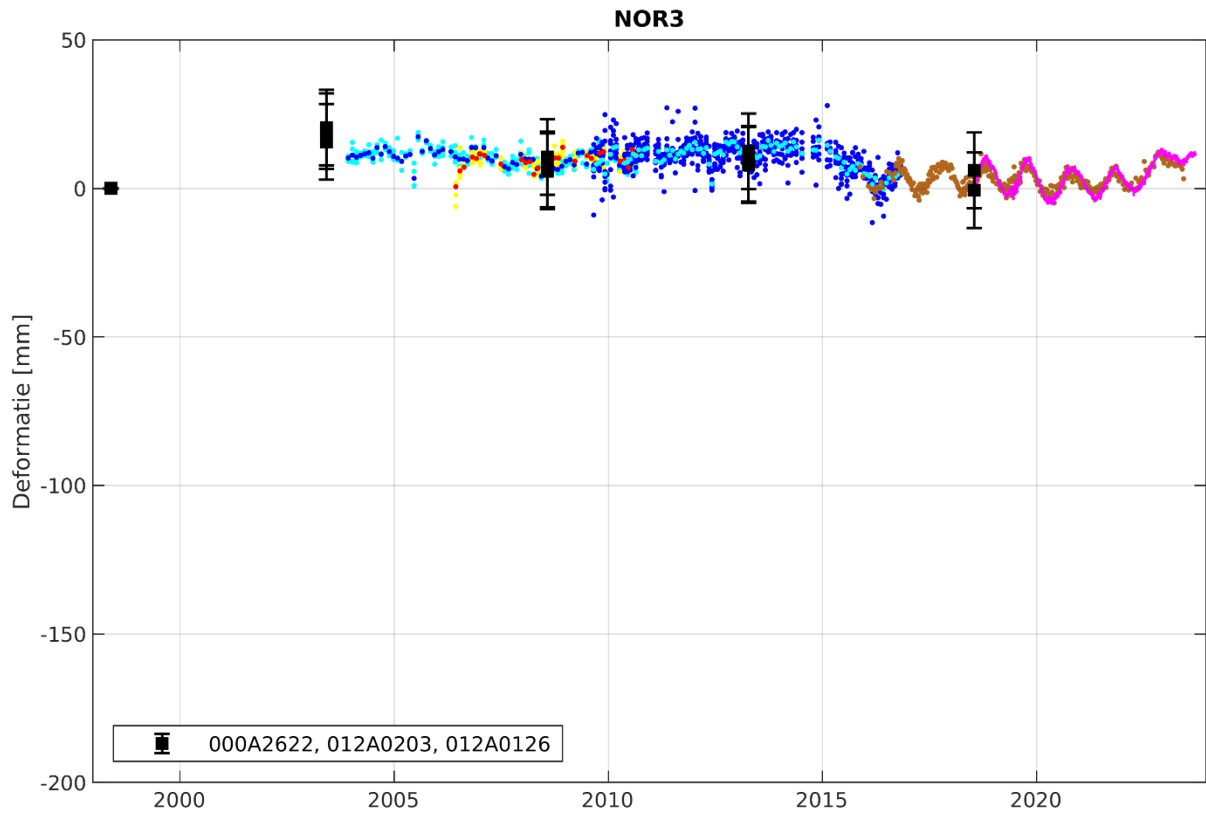


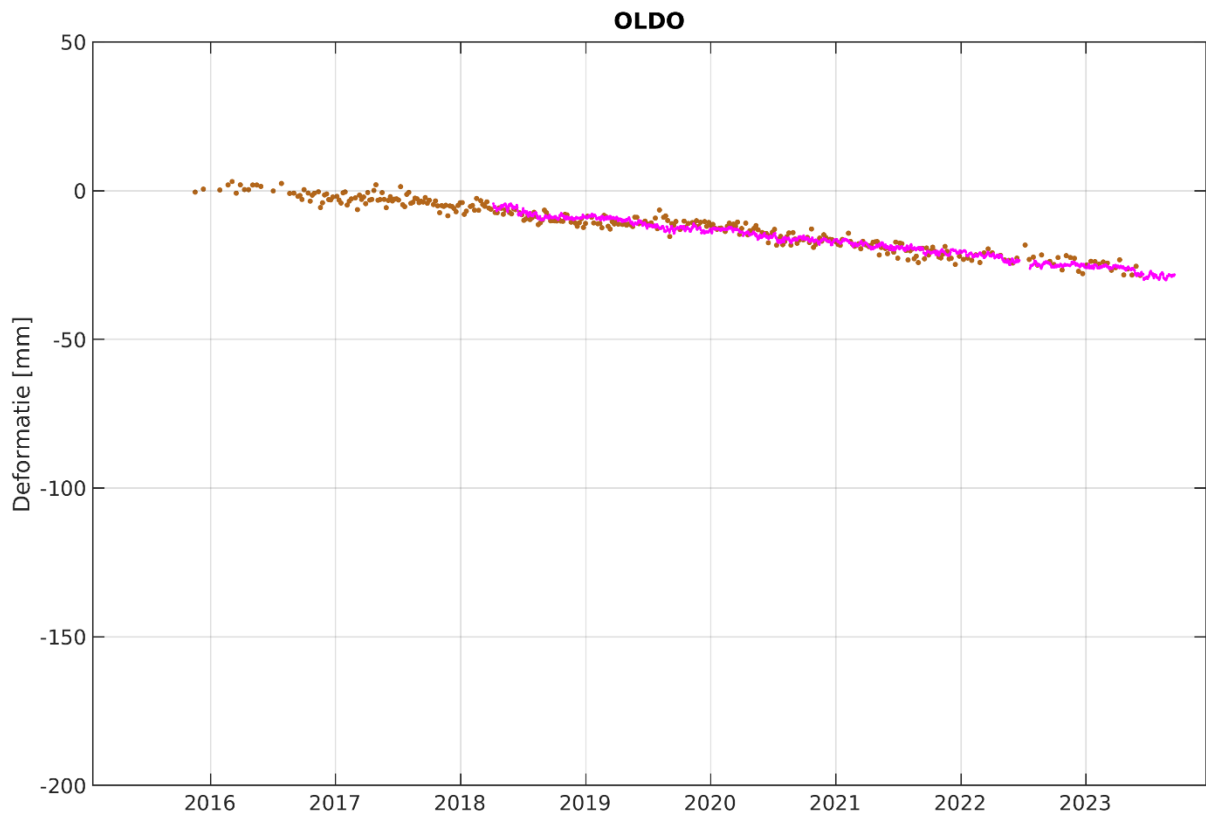
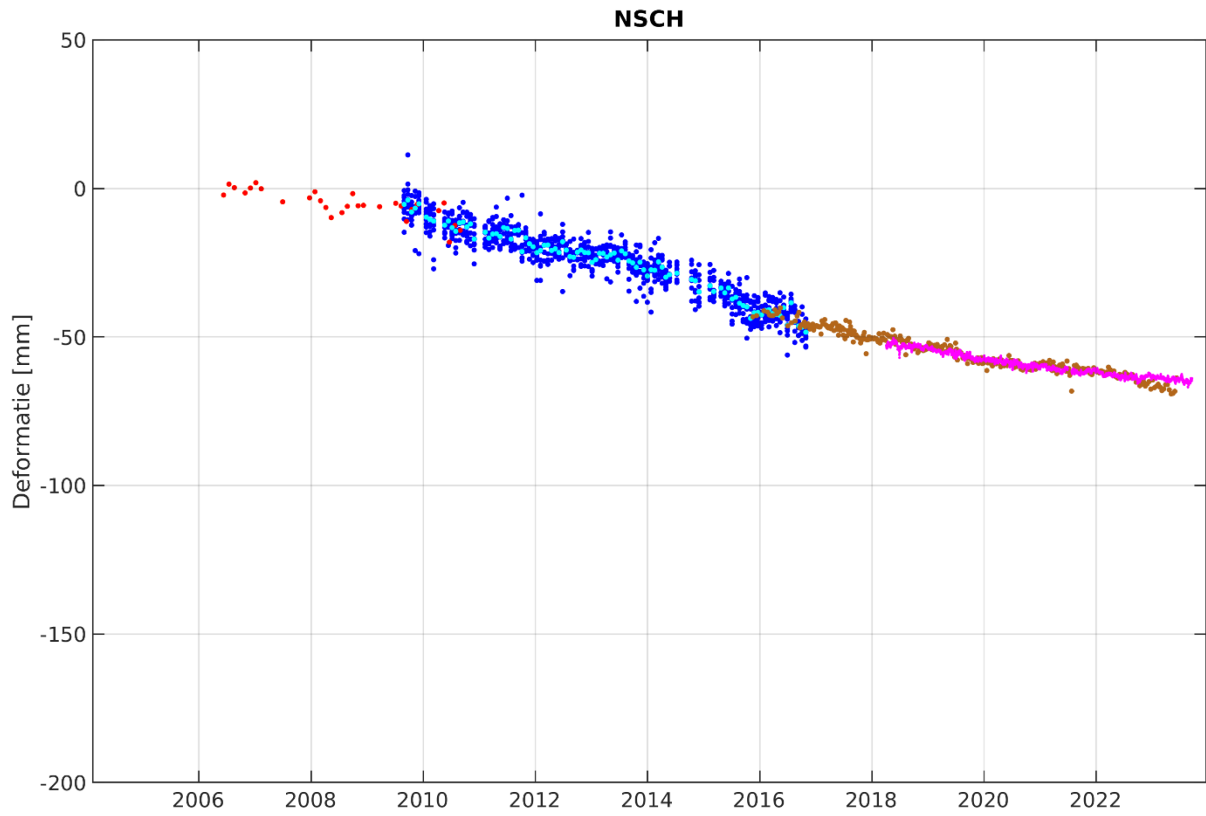


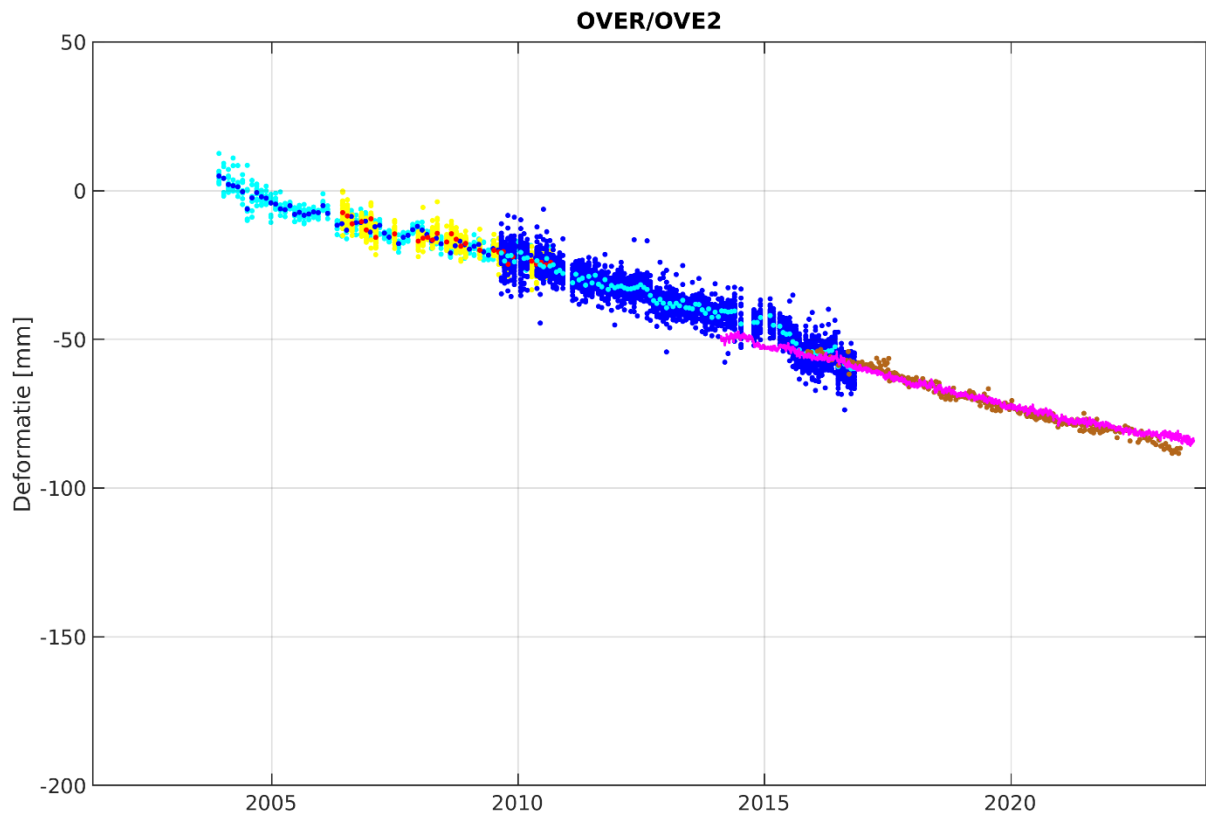
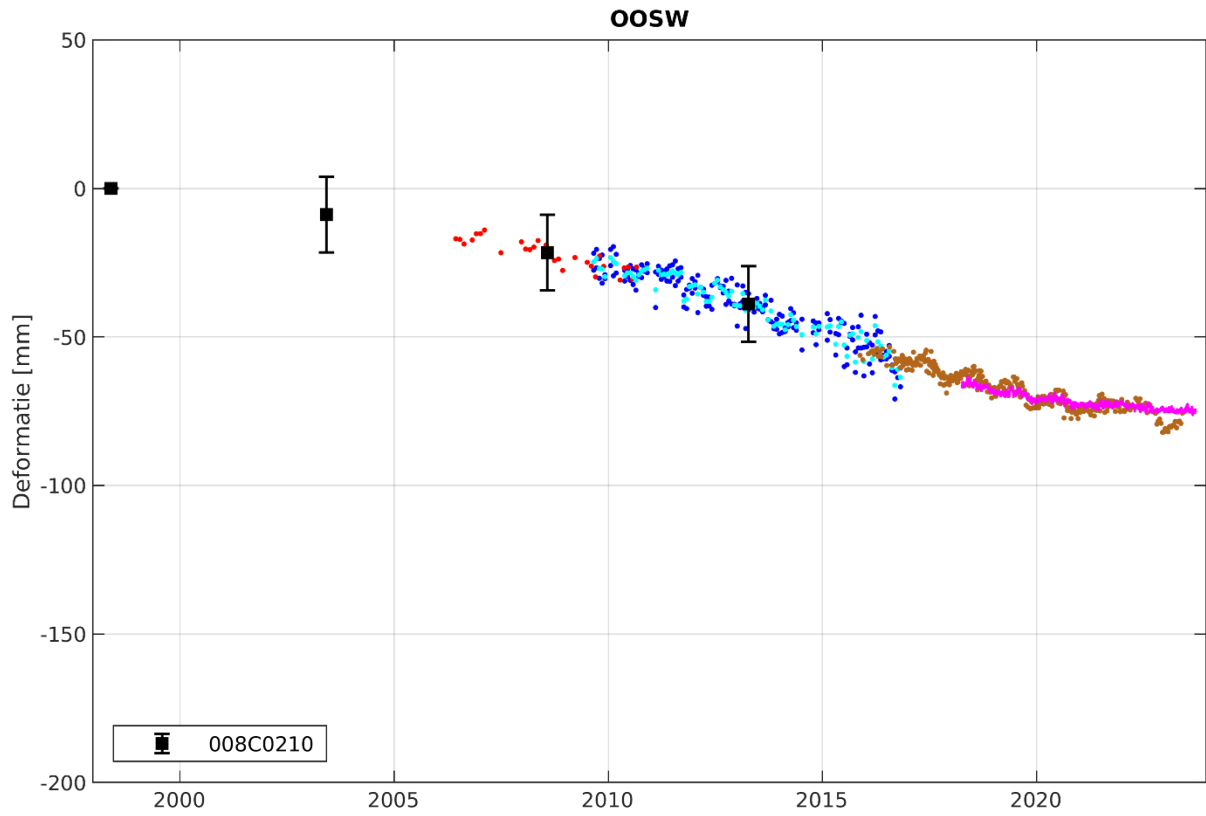


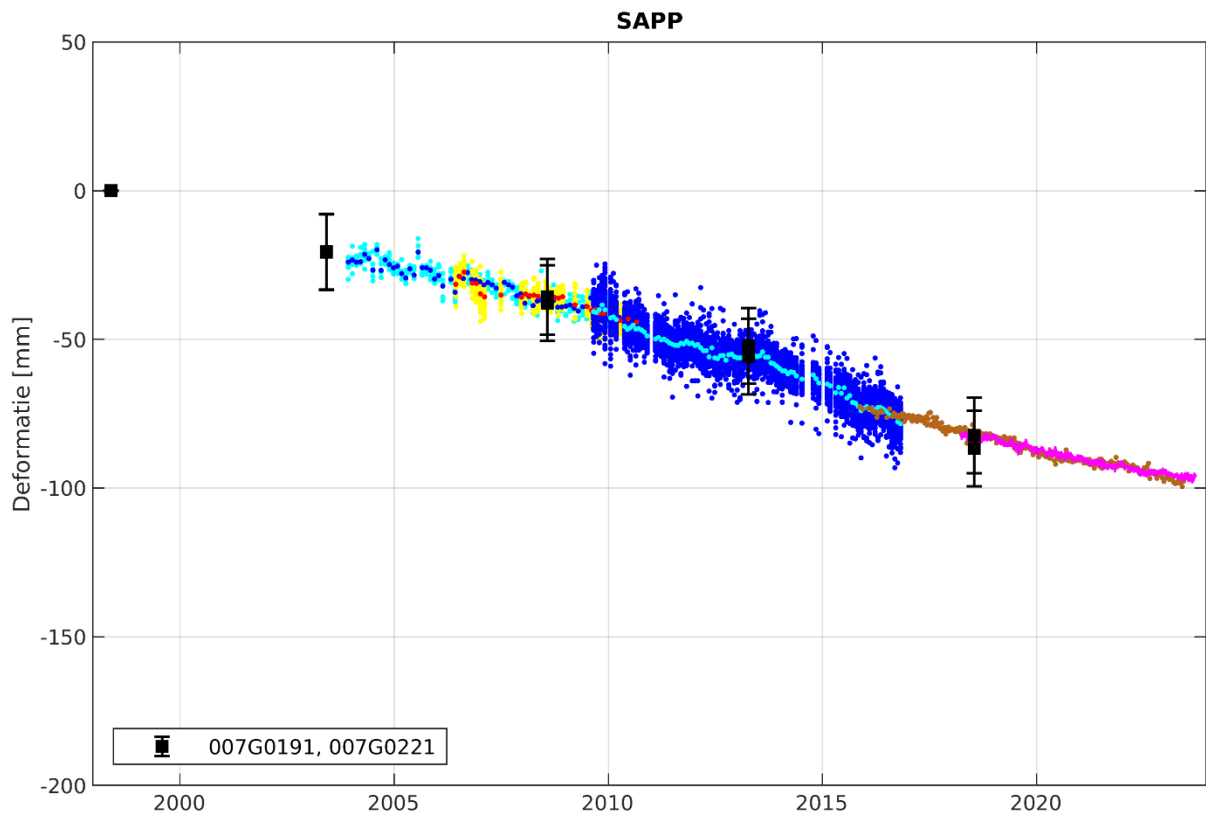
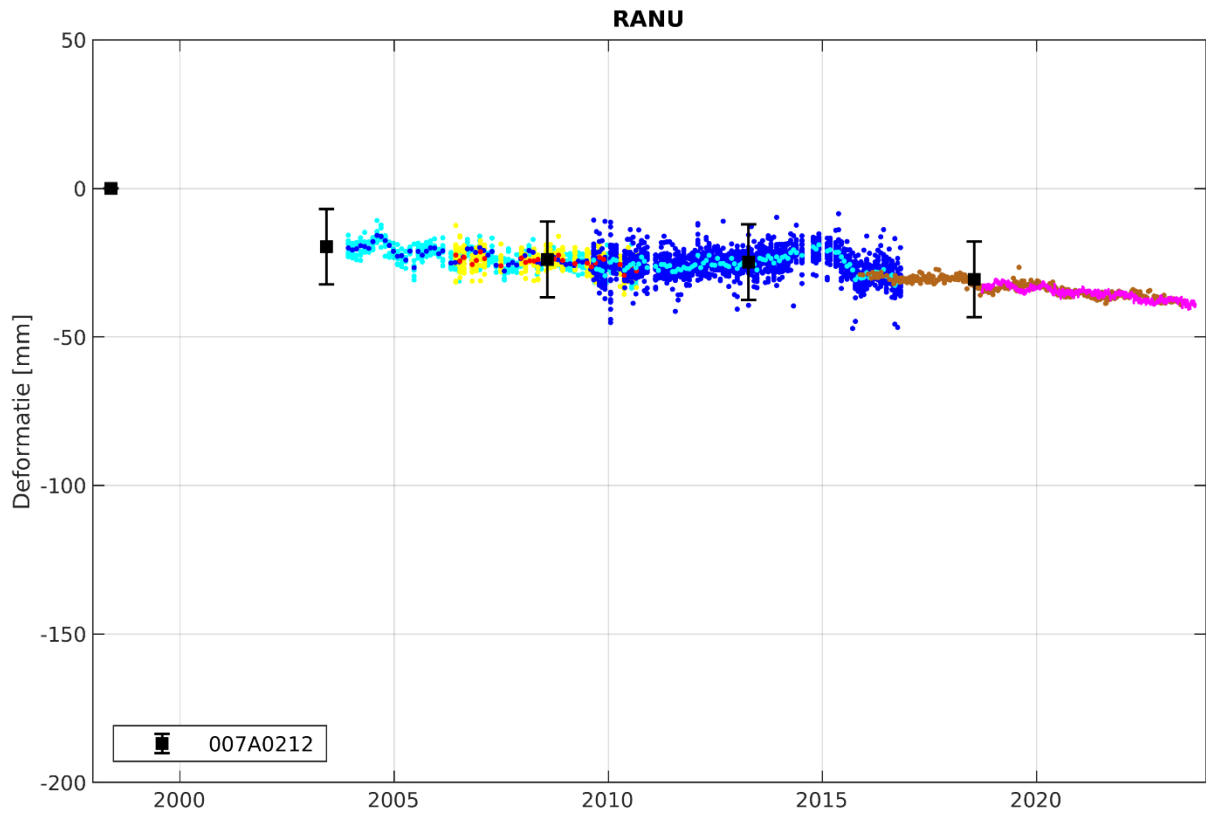




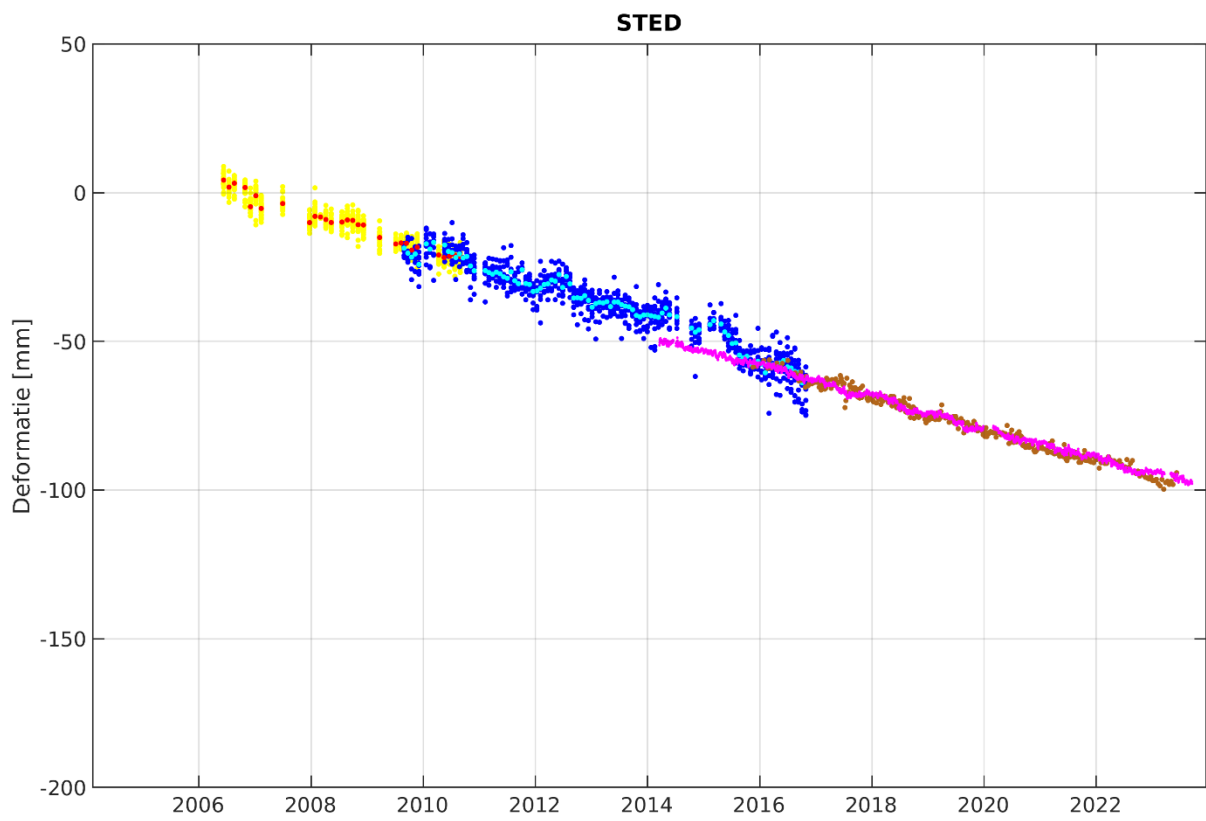
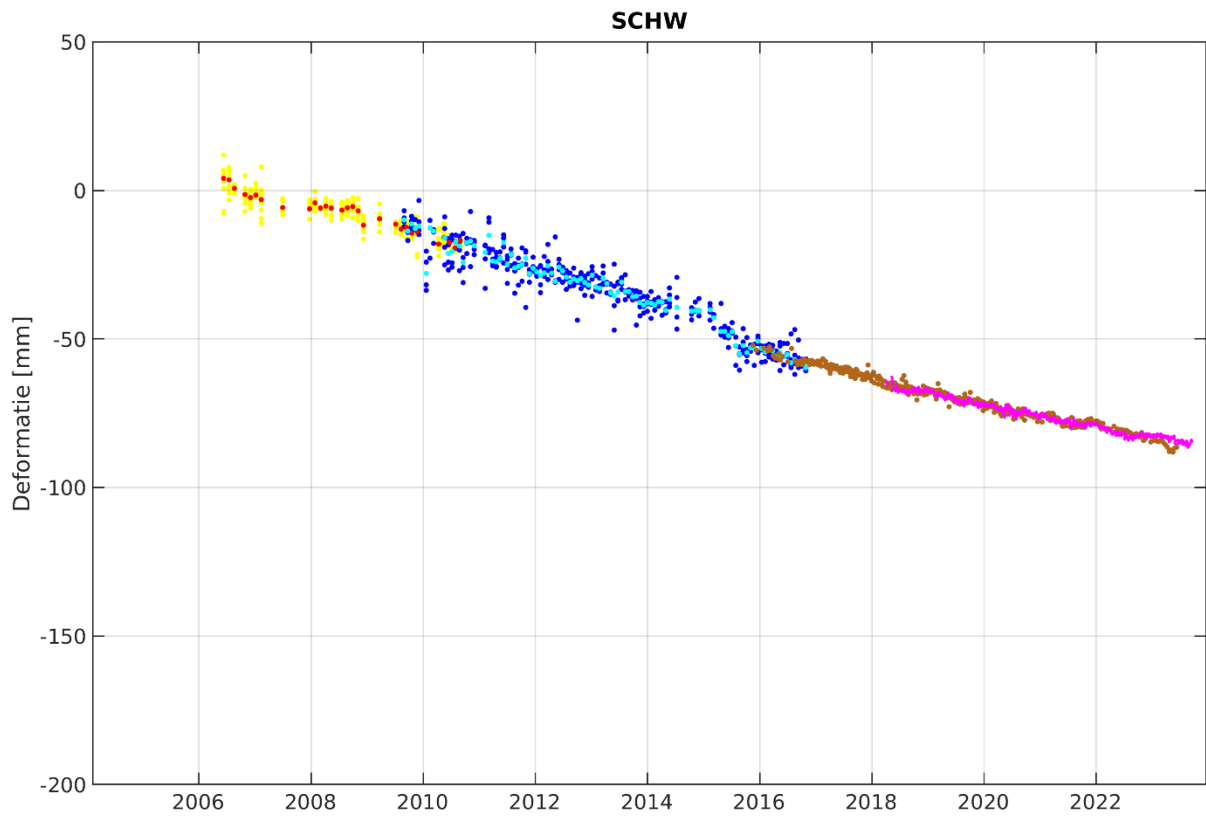


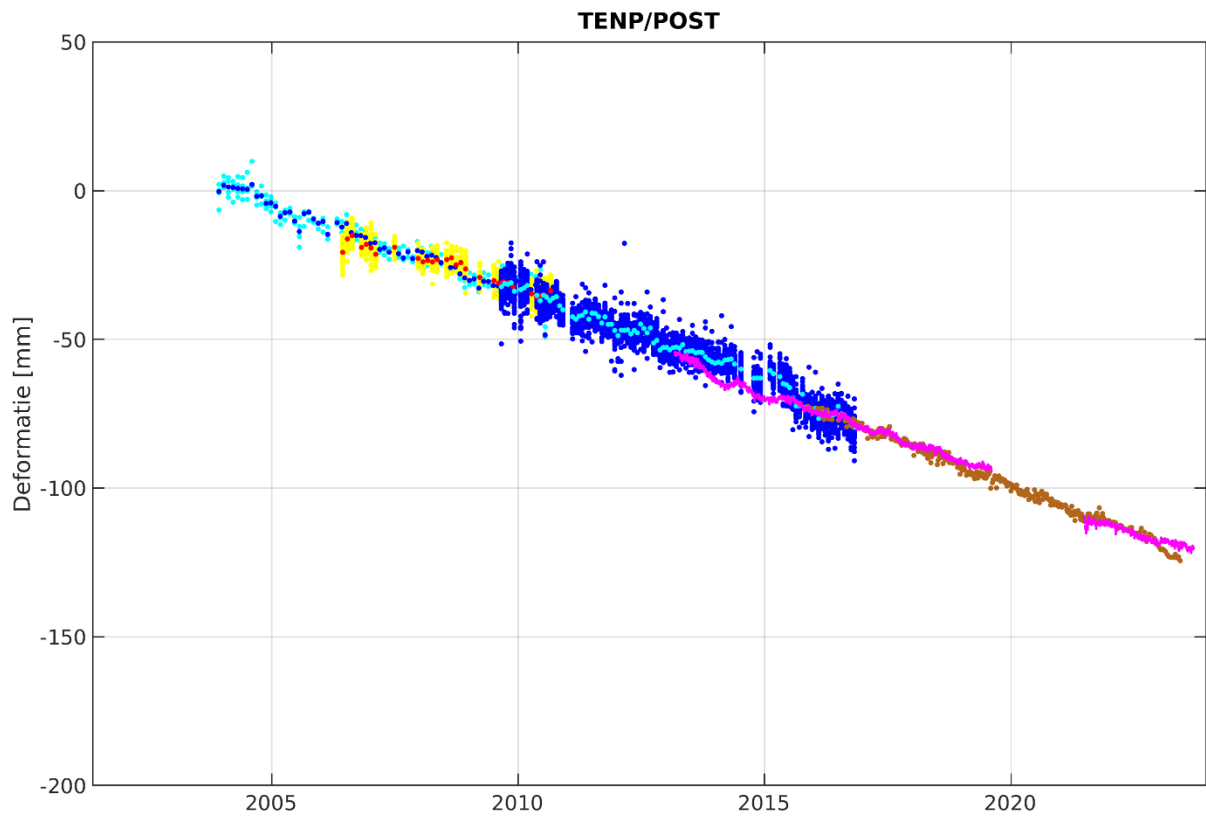
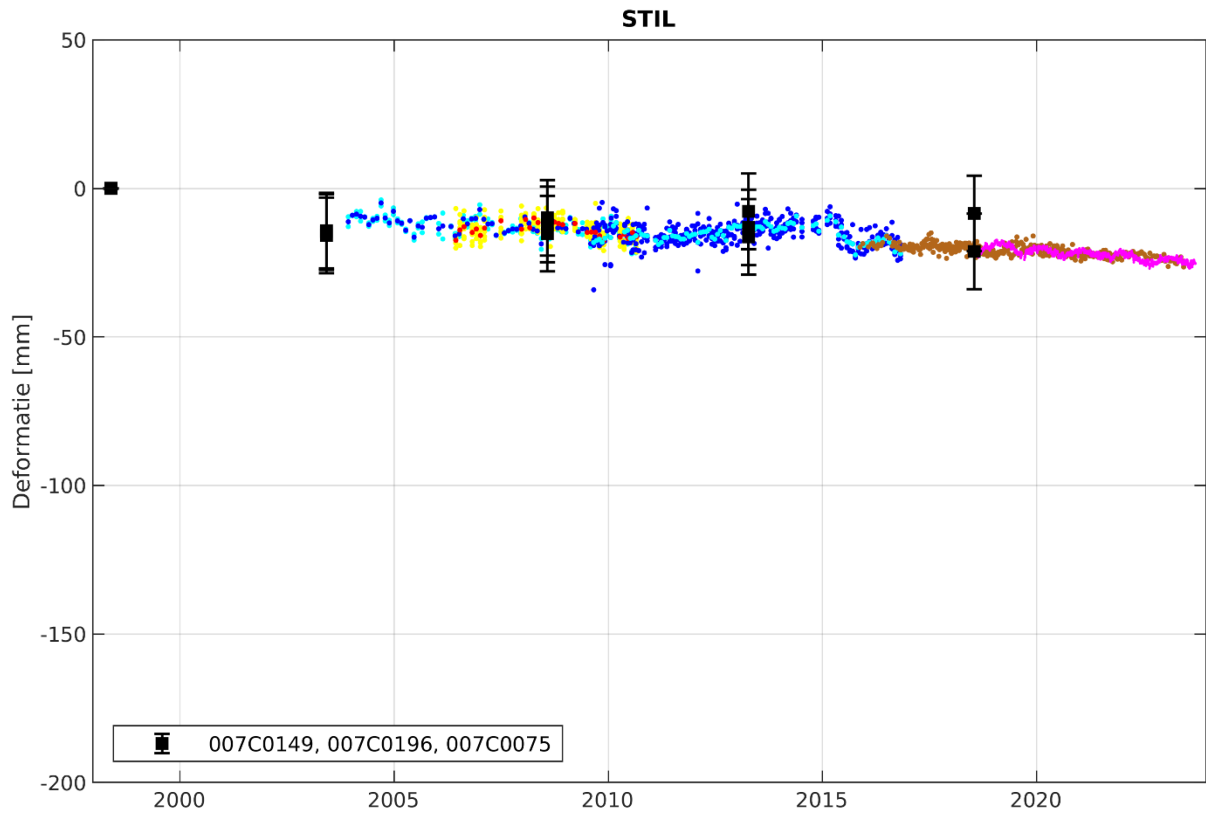


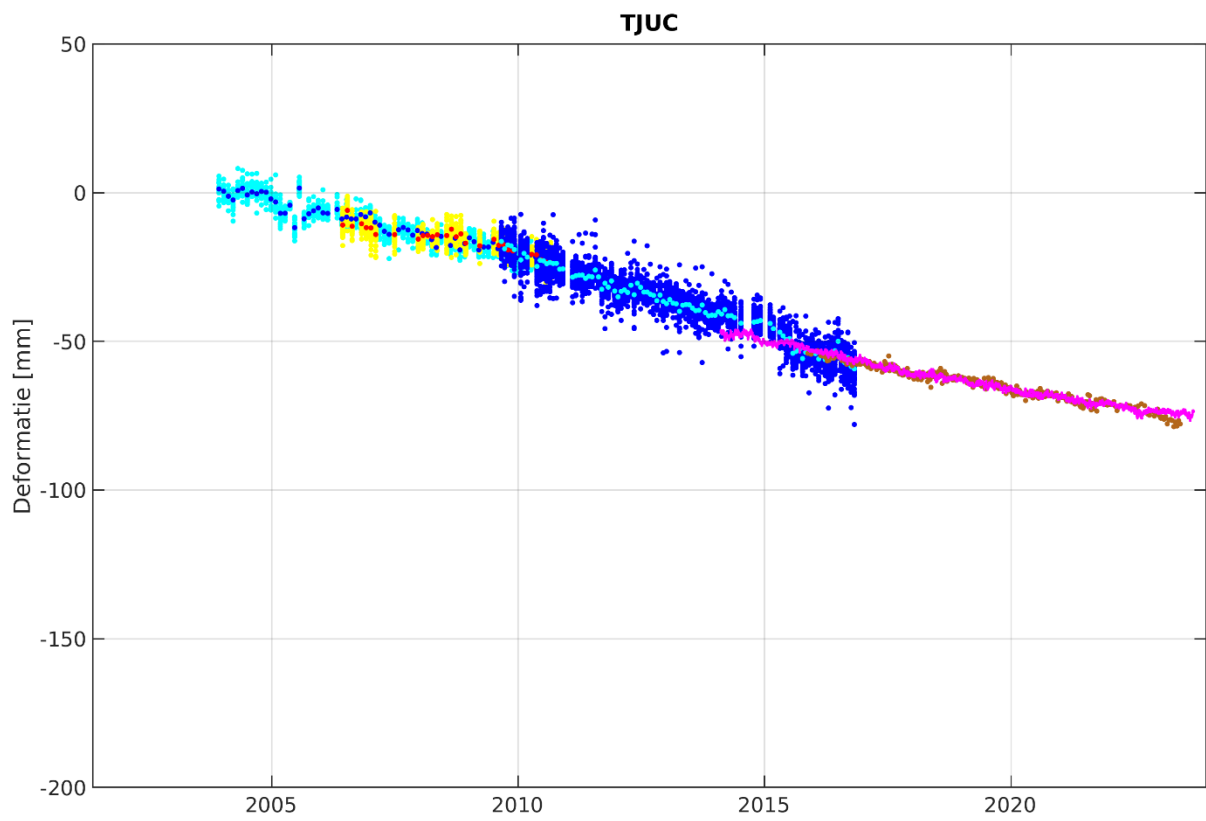
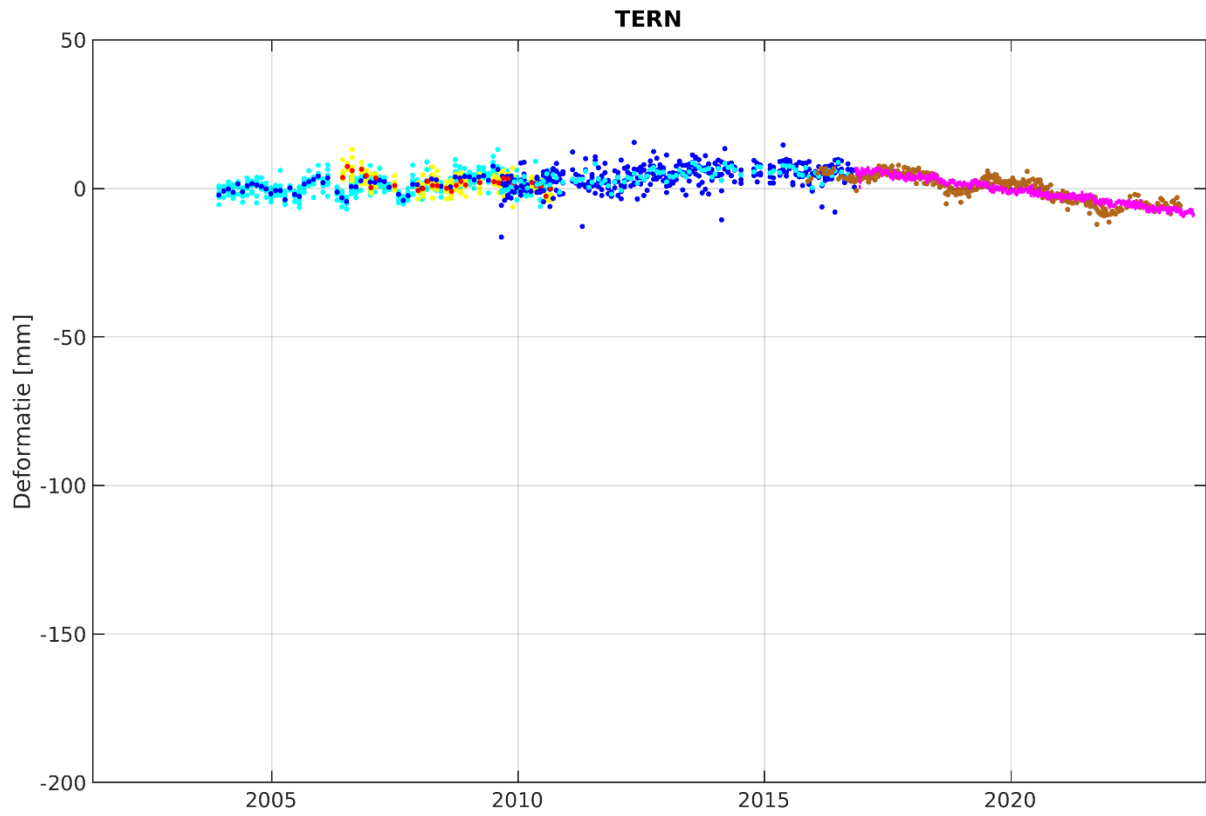


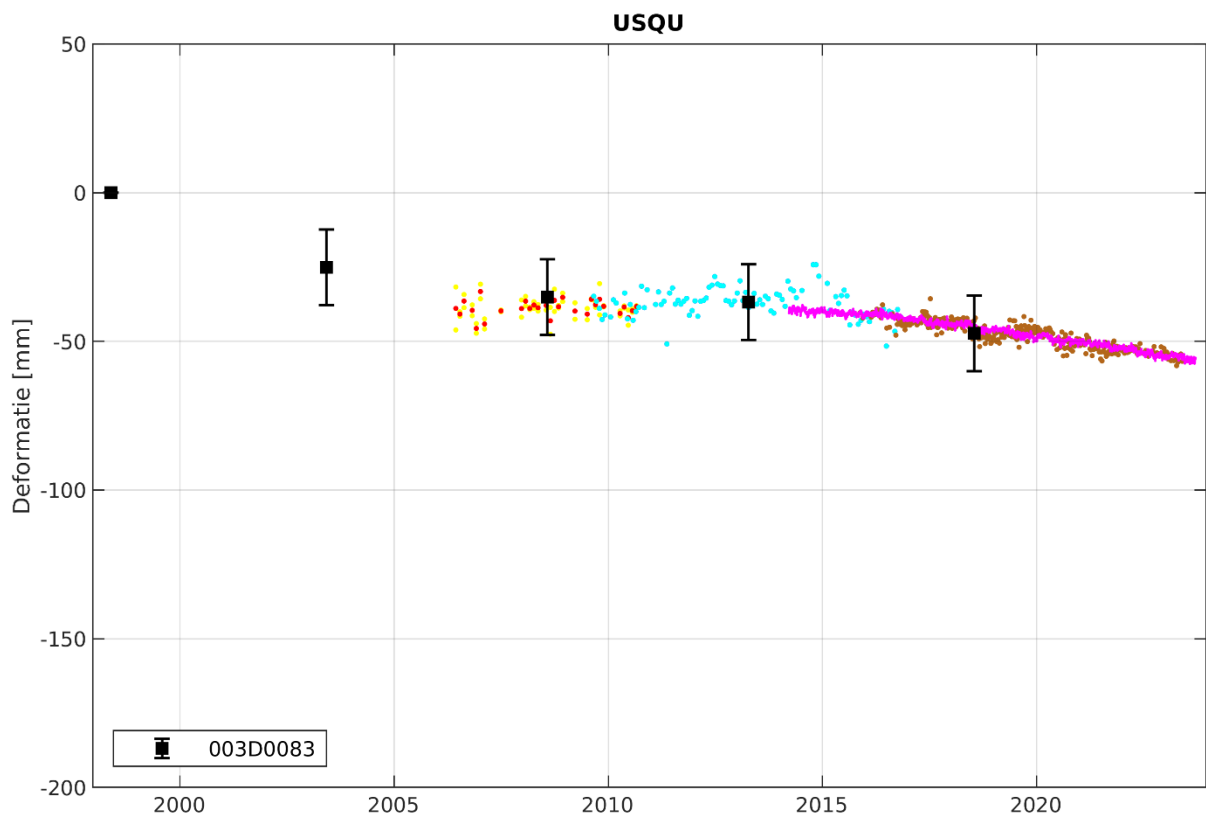
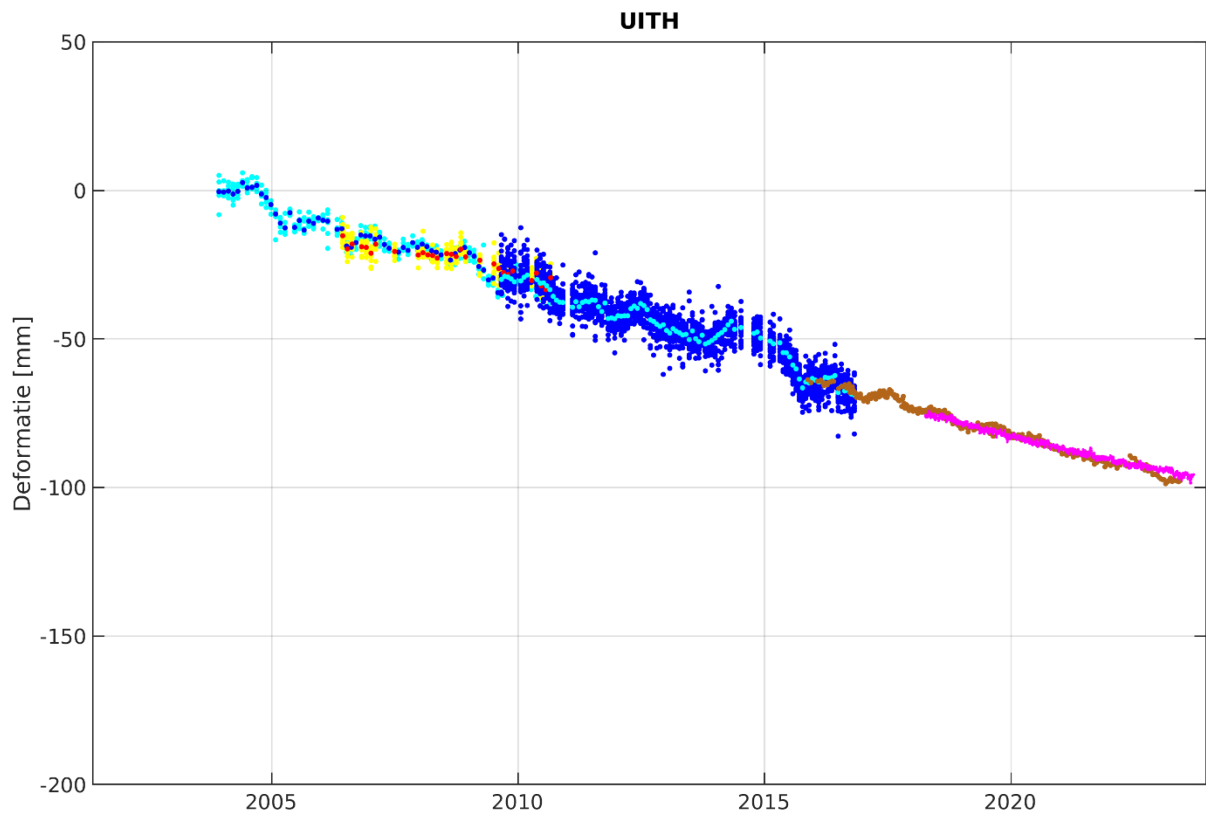


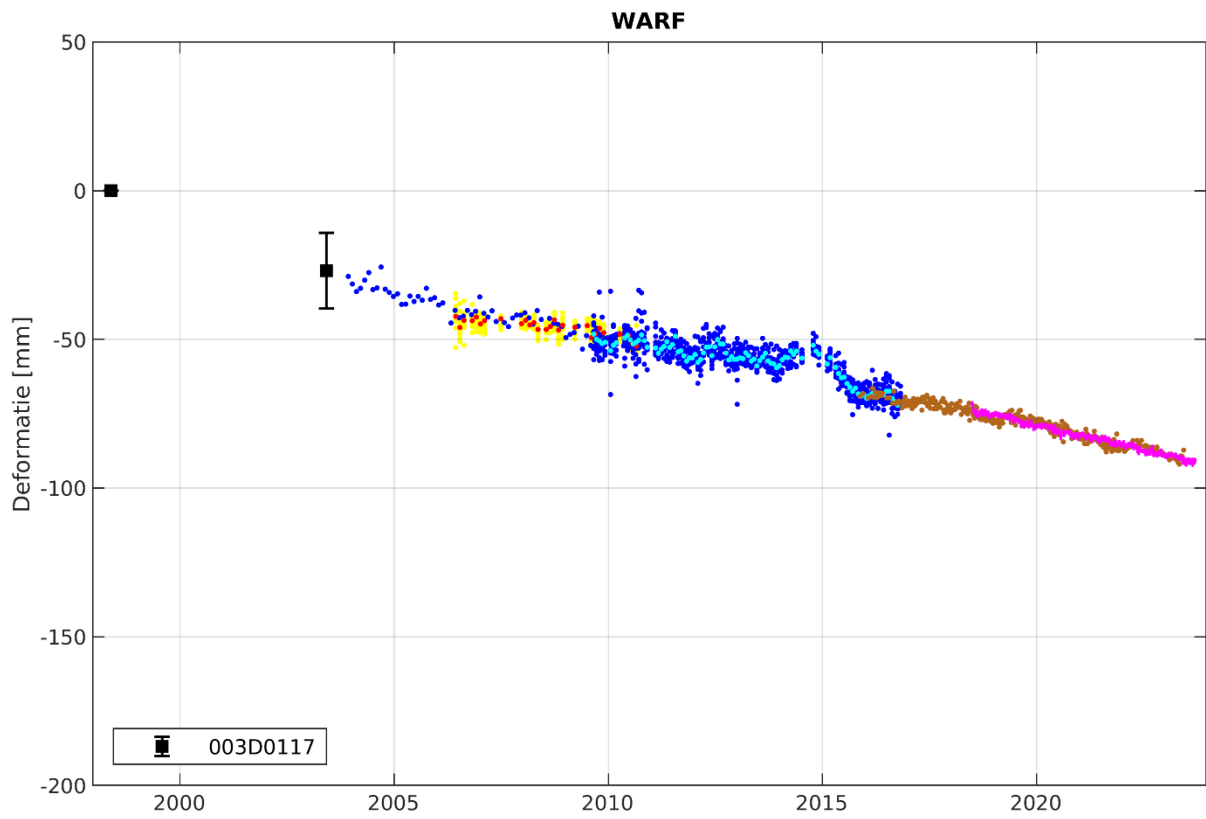
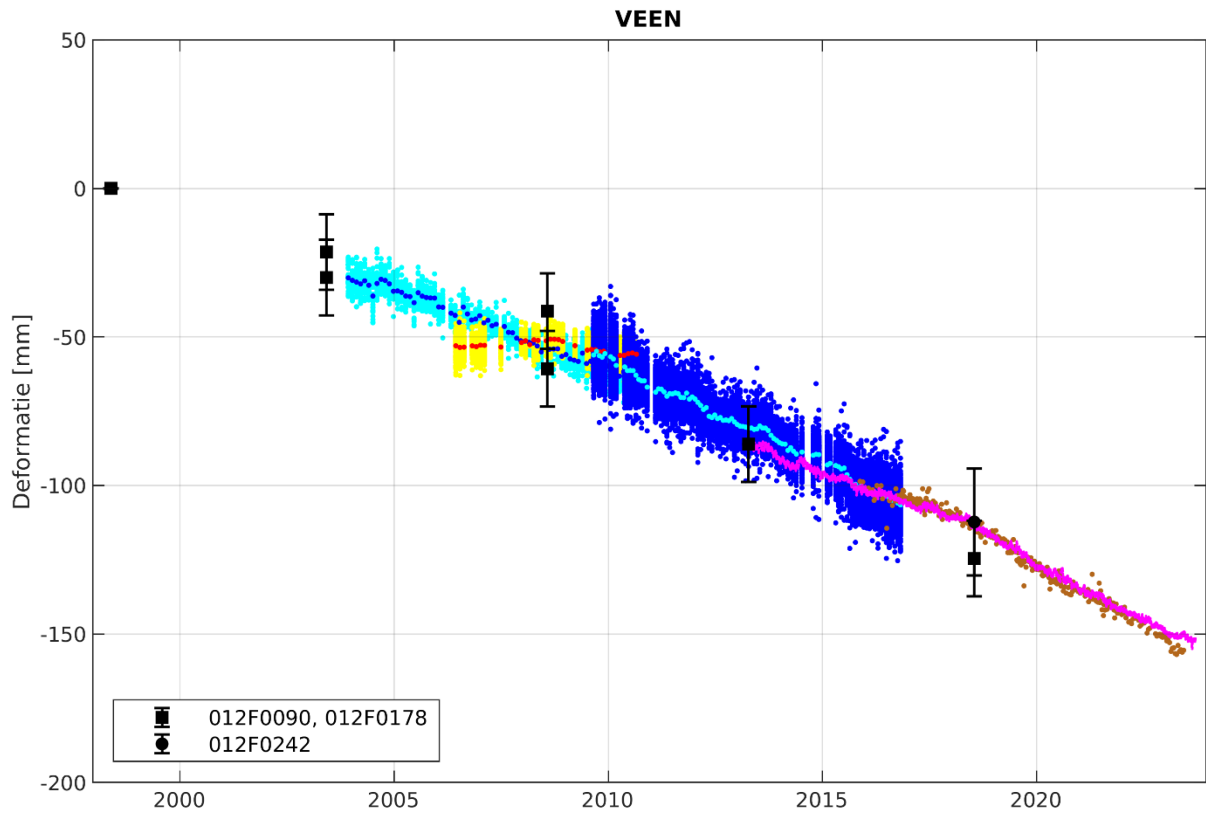


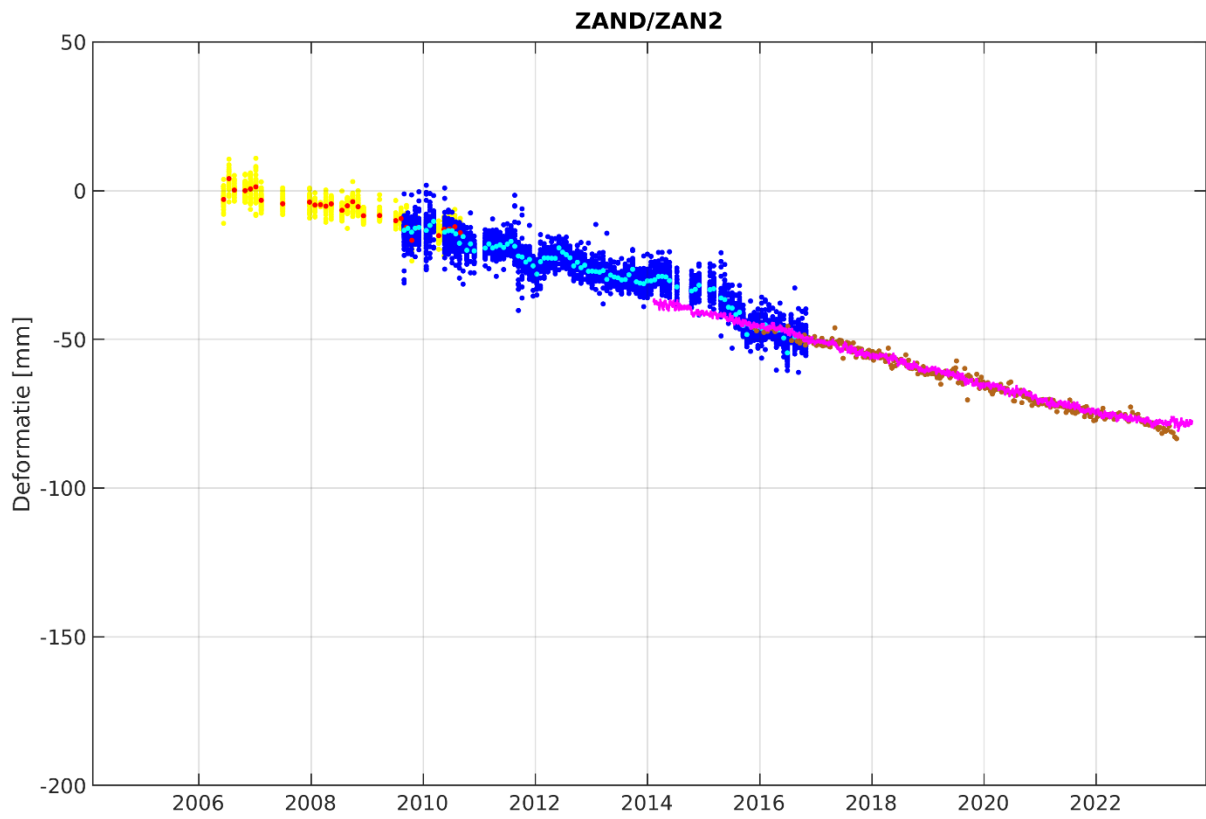
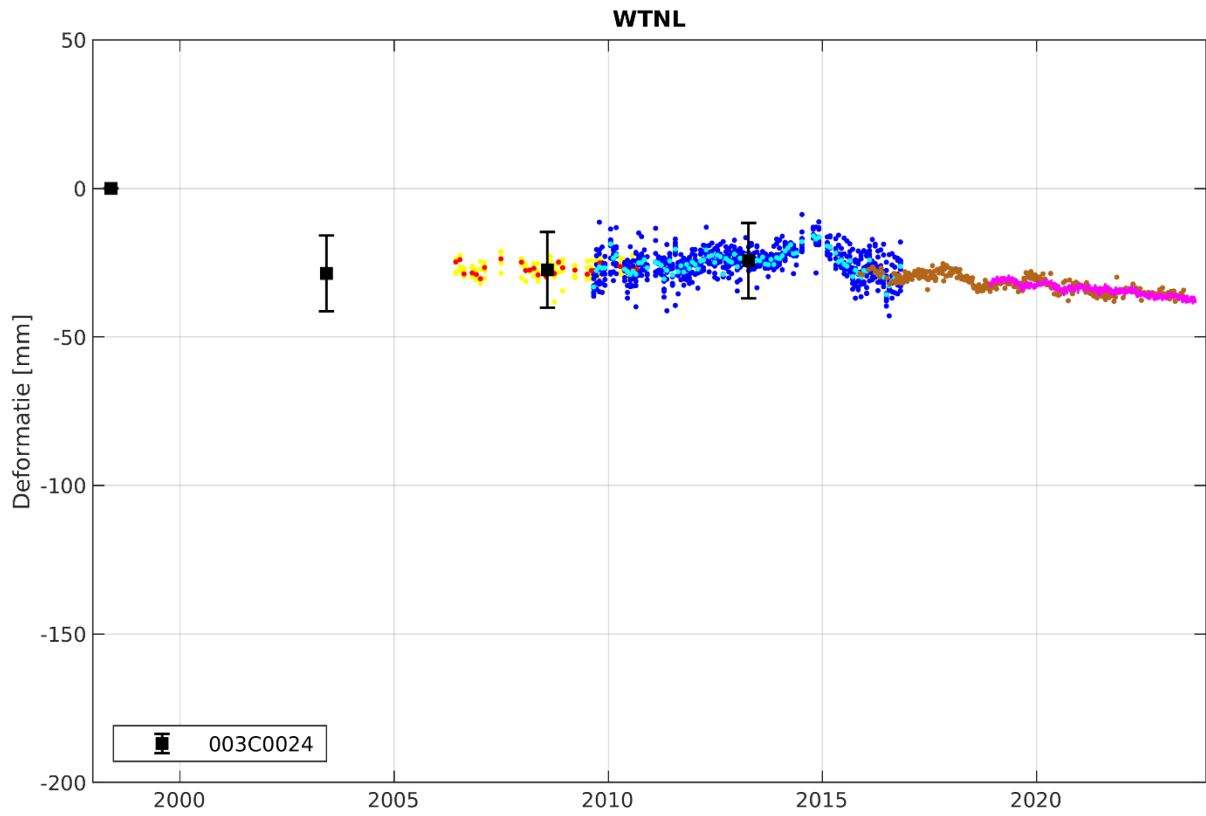


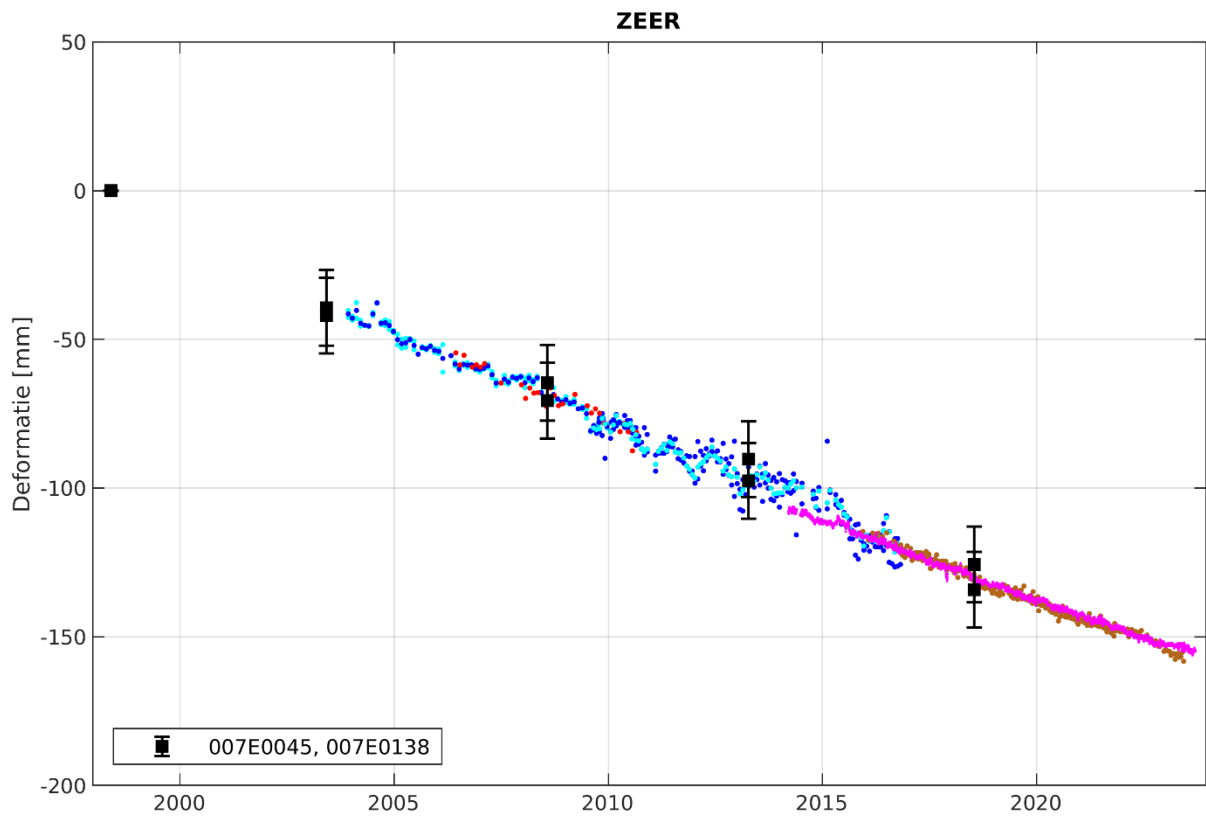
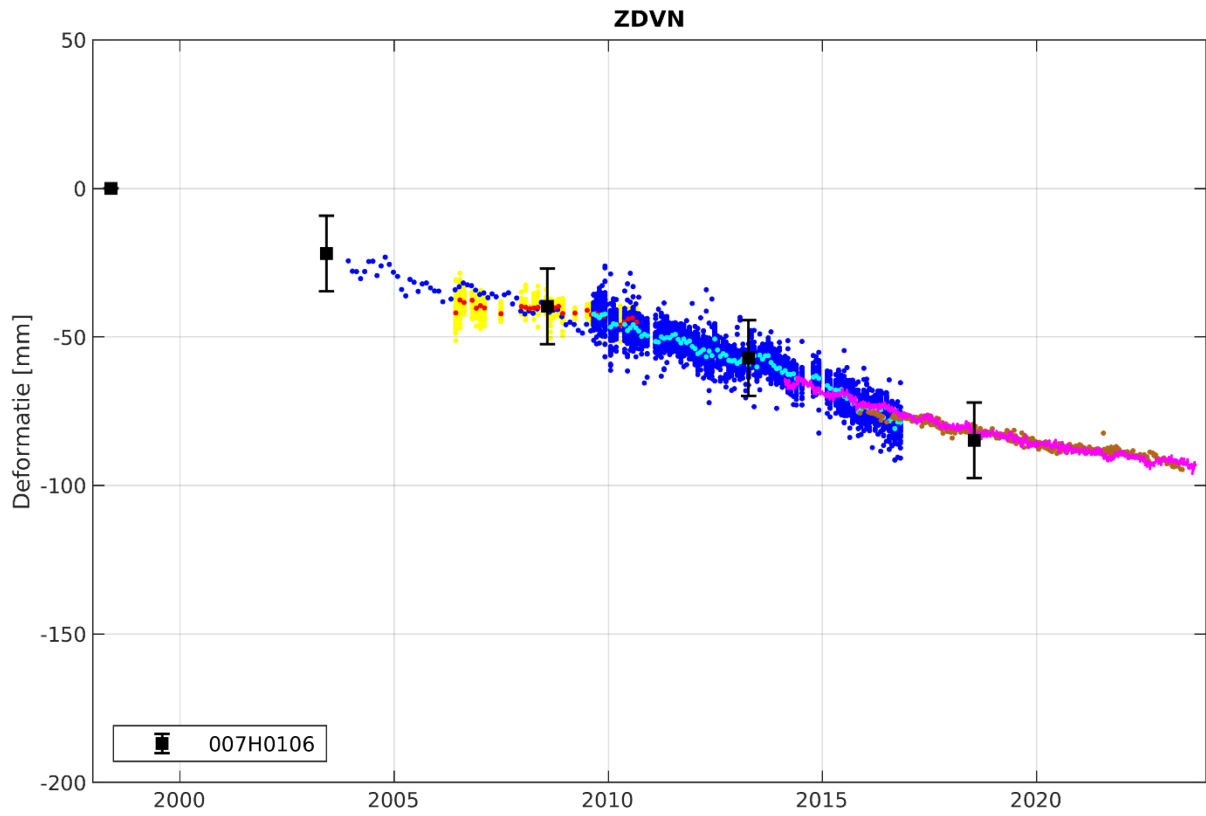


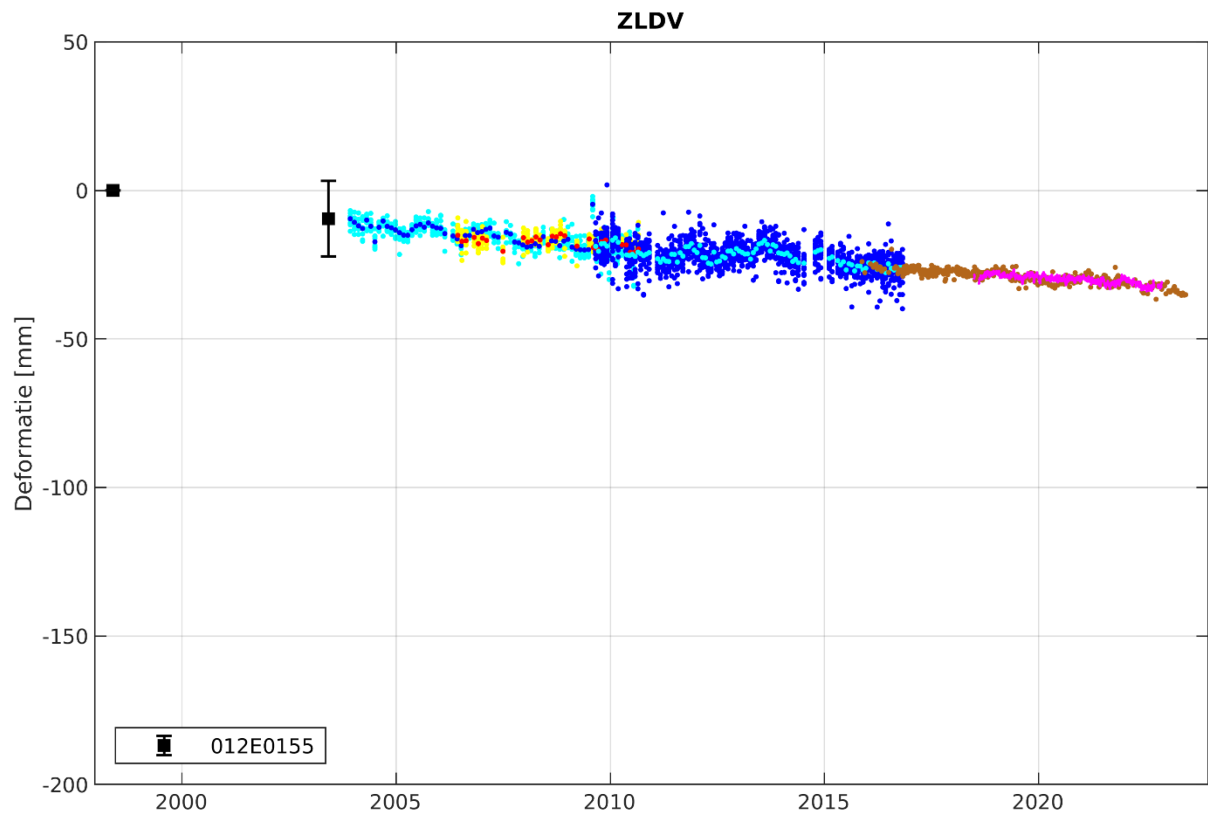



















### B.3. Verklaring der tekens

De symbolen in de visualisatieplaatjes hebben de volgende betekenis:

Symbool	Uitleg	Betreft tijdvak
	Waterpassing op een stabiel verondersteld peilmerk: hoogteverschil t.o.v. de vroegste waarneming zonder geconstateerde identificatiefout; met $3\sigma$ -foutenbalken.	1964-2018
	Waterpassing op een niet stabiel verondersteld peilmerk of identificatiefout op een deels stabiel verondersteld peilmerk. Bij niet stabiel veronderstelde peilmerken is het hoogteverschil t.o.v. de vroegste waarneming op het peilmerk aangegeven, bij deels stabiel veronderstelde peilmerken is dat het hoogteverschil t.o.v. de vroegste waarneming zonder geconstateerde identificatiefout; met $3\sigma$ -foutenbalken.	1964-2018
	Waterpassing op een stabiel verondersteld peilmerk: hoogteverschil t.o.v. het begin van een gekoppelde InSAR-tijdserie; met $3\sigma$ -foutenbalken.	1993-2018
	Waterpassing op een niet stabiel verondersteld peilmerk of identificatiefout op een deels stabiel verondersteld peilmerk: hoogteverschil t.o.v. het begin van een gekoppelde InSAR-tijdserie; met $3\sigma$ -foutenbalken.	1993-2018
•	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-1/2, 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	2009-2018
•	Radarsat-2, neergaande baan, mediaan	2009-2018
•	Sentinel-1, gecombineerde tijdserie uit beide banen, indien beschikbaar	2015-2023
•	Jaarlijks gemiddelde InSAR-deformatie	1992-2018
•	Dagelijks gemiddelde GNSS-deformatie	2006-2019
	Scheidingslijn tussen twee tijdseries, die wegens gebrek aan continuïteit niet aan elkaar kunnen worden gekoppeld	

## C. Combinatie procedure

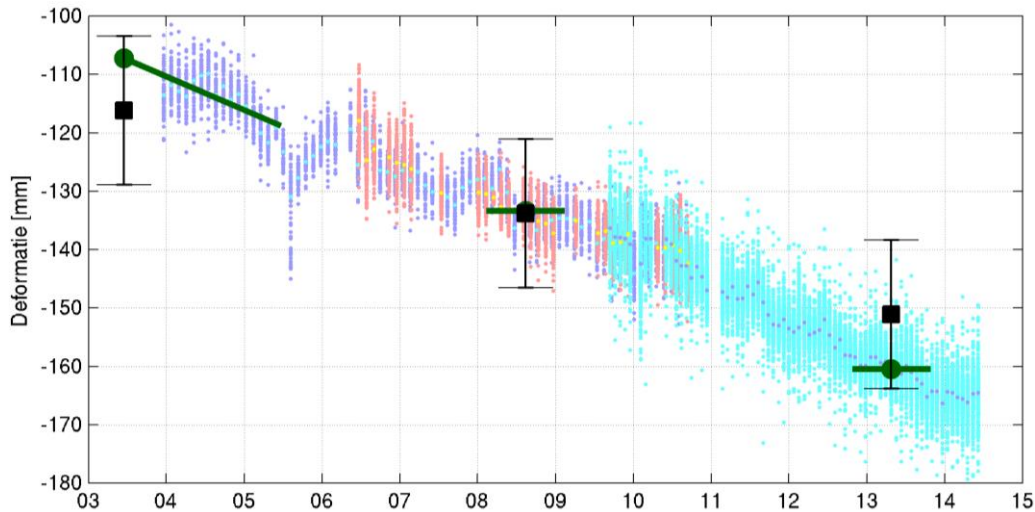
Om verschillende tijdseries van waterpassing, InSAR en/of GNSS op elkaar aan te sluiten, wordt de hieronder beschreven combinatie procedure gebruikt. Deze is toegepast op de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2) en de visualisatie van tijdseries in bijlage B.

Met combinatie is in deze context de schatting van onderlinge offsets van individuele tijdseries en diens 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.

De hieronder beschreven procedure is ongewijzigd ten opzichte van het addendum InSAR bij het meetregister Noord-Nederland 2018 (NAM, 2019c).

1. **Combinatie van waterpas-tijdseries van meerdere (deels) stabiele peilmerken:** Dit is uitsluitend van toepassing op bijlage B.1.
  - a. Peilmerken worden in chronologische volgorde op elkaar aangesloten: De tijdserie van het tweede peilmerk wordt met de eerste waarneming op de (zo nodig geïnterpoleerde) tijdserie van het eerste peilmerk aangesloten.
  - b. De deformatie van de (reeds) gecombineerde peilmerken wordt in een gecombineerde tijdserie gemiddeld.
  - c. Verdere peilmerken worden chronologisch successievelijk op deze gecombineerde tijdserie aangesloten.
  - d. Geconstateerde identificatiefouten worden niet gebruikt voor de aansluiting.
2. **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.
3. **Aansluiting van GNSS op InSAR:** Dit is uitsluitend van toepassing op bijlage B.2.
  - a. De GNSS-tijdseries worden tot dagelijkse gemiddeldes gereduceerd.
  - b. Bij twee GNSS tijdseries van verschillende stations, die elkaar opvolgen, worden de bijbehorende tijdseries op elkaar aangesloten als deze in de tijd overlappen. De

- onderlinge offset wordt bepaald als gemiddelde van de dagelijkse differenties tussen de deformatie van de twee tijdserie binnen het overlappend tijdvak.
- c. De GNSS-tijdseries worden op de gecombineerde InSAR-tijdserie aangesloten, als deze bestaat en in de tijd overlapt. De onderlinge offset wordt bepaald als gemiddelde van de differenties tussen de deformatie van de GNSS-tijdserie op de acquisitiedagen van de InSAR-tijdserie en de deformatie van de InSAR-tijdserie binnen het overlappend tijdvak.
  - d. Alle GNSS-waarnemingen en de gecombineerde InSAR-tijdserie vormen een gecombineerde InSAR/GNSS-tijdserie.
4. **Opsplitsen van tijdseries waterpassing:** Als op een deels stabiel verondersteld peilmerk een verstoring is geconstateerd, wordt de tijdserie van waterpassingen bij de verstoring gesplitst. Daardoor ontstaan twee (of meer) aparte tijdseries voor één peilmerk, die in het vervolg worden behandeld, alsof het om afzonderlijke peilmerken zou gaan.
5. **Aansluiting van InSAR/GNSS op waterpassing**
- a. Ter schatting van de onderlinge offset wordt voor ieder tijdstip van waterpassing binnen het overlappend tijdvak een gemiddelde InSAR/GNSS-deformatie berekend. Deze is het gemiddelde van de gecombineerde InSAR/GNSS-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. Er wordt alleen aangesloten aan waterpassingen op stabiele peilmerken of aan waterpassingen op deels stabiele peilmerken, die niet als identificatiefout zijn geïdentificeerd. Bij niet stabiel veronderstelde peilmerken of wanneer het overlappend tijdvak alleen waterpassingen met geconstateerde identificatiefouten bevat, gebeurt geen aansluiting, en er worden aparte tijdseries voor InSAR/GNSS en waterpassing gerapporteerd.
  - c. 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 12).



Figuur 12: Voorbeeld voor de aansluiting van een InSAR-tijdserie op de waterpassing. 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.

- d. Het is mogelijk, dat de tijdseries van InSAR/GNSS en waterpassing in de tijd wel overlappen maar binnen het overlappend tijdvak geen waterpassingen uitgevoerd zijn. Dat is bijvoorbeeld het geval, als een peilmerk vóór en na, maar niet tijdens een InSAR missie is waargenomen. In deze gevallen worden waterpassing en InSAR in de differentiestaat niet gecombineerd en los van elkaar gerapporteerd, om geen mogelijk onjuiste aanname van een vloeiend gedrag te maken.
6. **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 in bijlage B 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 op de volgende manier:
- a. Indien de gecombineerde tijdserie een waterpassing bevat, die niet als identificatiefout is geïdentificeerd en die niet meer dan een jaar later is dan de vroegste waarneming van een andere techniek, wordt deze waterpassing op nul gesteld.
  - b. Zo niet, dan wordt onderzocht, of de gecombineerde tijdserie GNSS-waarnemingen bevat, die niet meer dan een jaar later zijn dan de vroegste InSAR-waarnemingen. In dit geval wordt de gemiddelde deformatie van alle GNSS-waarnemingen binnen de eerste 25 dagen van de GNSS-tijdserie op nul gesteld.
  - c. Zo niet, dan wordt onderzocht, of de gecombineerde tijdserie InSAR-waarnemingen bevat. In dit geval wordt de gemiddelde deformatie van alle InSAR-waarnemingen binnen het eerste jaar van de InSAR-tijdserie op nul gesteld.

Zo niet, dan wordt de vroegste waterpassing op nul gesteld. Deze is dan óf een identificatiefout óf een waarneming op een niet stabiel verondersteld peilmerk.

## Referenties

NAM (2018): Annex Meetplan Zuid-Holland 2019, 18 december 2018, EP201812201671.

NAM (2019a): Meetregister bij het meetplan Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Noord-Nederland 2018. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 28 februari 2019, EP201901203987.

NAM (2019b): Stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken 2019 – Toelichting methodiek en toepassing op de meetregisters “Noord Nederland, Groningen en Waddenzee 2018” en “Zuid-Holland 2017”. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 12 juli 2019, EP201906210480.

NAM (2019c): Meetregister bij het meetplan Noord Nederland, Groningen en Waddenzee 2018 – Addendum InSAR. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 19 juli 2019, EP201907205139.

NAM (2020a): Meetregister bij het meetplan Zuid-Holland – Rapportage van satelliet radar interferometrie en de nauwkeurigheidswaterpassing Zuid-Holland 2019. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 14 februari 2020, EP201911202029.

NAM (2020b): Gebruik van InSAR in de meetregisters Noord Nederland en Groningen – Analyse beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 29 mei 2020, EP202005202312.

NAM (2021): Meetregister bij het meetplan Waddenzee – Rapportage van satelliet radar interferometrie Lauwersmeer 2021. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 10 september 2021, EP202107202657.