

Meetregister bij het meetplan Twente
Rapportage van satelliet radar interferometrie
Twente 2020

8 januari 2021

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Documentnummer: NAM EP202011204521

Samenvatting

In dit meetregister worden de actuele bodemdalingsmetingen van Twente gepubliceerd. Zij zijn gebaseerd op radarbeelden, die tussen 2015 en 2020 met de satelliet Sentinel-1 zijn opgenomen en in 2020 met de Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniek zijn geprocest. De resulterende deformatie tijdseries zijn op de locaties van bestaande peilmerken omgerekend en daar met de bestaande waterpassingen gecombineerd. Het resultaat zijn gecombineerde tijdseries uit vijfjaarlijkse waterpassingen tussen 1971 en 2015 en jaarlijks gemiddelde InSAR deformatie tussen 2010 en 2020 (Sentinel-1, aangevuld met Radarsat-2 metingen).

Aanvullend is een stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken in Twente uitgevoerd, waarin de peilmerken gebaseerd op historische waterpassingen als stabiel, deels stabiel of niet stabiel worden geclassificeerd. Deze classificatie helpt bij de interpretatie van de deformatie tijdseries.

Ook al is het streven, om in toekomstige meetregisters weer van de InSAR techniek gebruik te maken, een hernieuwde waterpassing blijft als terugvaloptie gewaarborgd. Hiertoe zijn de waterpas peilmerken in Twente in 2020 gecontroleerd op aanwezigheid.

Inhoudsopgave

1. Introductie	4
1.1. Keuze meettechniek	4
1.2. Gebruikte meetgegevens	4
1.3. Leeswijzer	6
2. Stabiliteitsanalyse waterpasnetwerk	7
2.1. Methode	7
2.2. Resultaten.....	8
3. PS-InSAR	9
3.1. Puntselectie	9
3.2. Conversie naar de verticaal	10
3.3. Resultaten.....	10
4. Combinatie	12
4.1. Referentie in de ruimte	12
4.2. Aansluiting van tijdseries op elkaar.....	12
4.2.1. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken.....	13
4.2.2. Meerdere tijdseries per peilmerk.....	13
5. Peilmerkcontrole	14
6. Conclusies en vooruitzichten.....	16
Bijlagen	17
A. Geleverde data	17
A.1. Differentiestaat InSAR	17
A.2. Gecombineerde differentiestaat.....	17
A.3. Stabiliteitsstaat.....	17
A.4. Kaart met hoogteverschillen	18
B. Combinatie procedure.....	19
C. Lijst met niet aanwezige peilmerken uit de peilmerkcontrole.....	21
Referenties	22

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 het goedgekeurde meetplan Twente 2020.

Het nu voorliggende rapport vormt het officiële en openbare ‘meetregister’ behorende bij het meetplan Twente 2020. De gepubliceerde hoogteverschillen en deformatietijdseries geven alleen een indruk van de beweging van de meetpunten en diens omgeving. 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

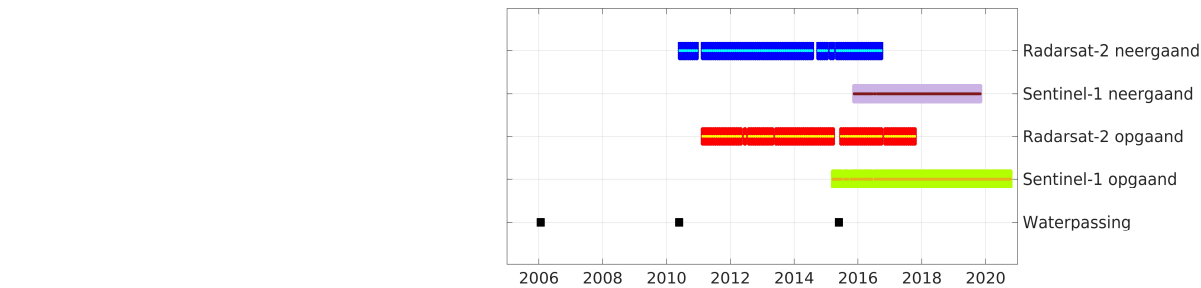
Tot en met het laatste meetregister van 2015 is waterpassing als inwinningstechniek voor bodembewegingsmetingen gebruikt. In dit meetregister is voor het eerst in Twente voor PS- InSAR (Persistent Scatterer satelliet radar interferometrie) als meettechniek gekozen. Daarbij zijn de InSAR-waarnemingen dusdanig verwerkt, dat de deels naar 1971 teruggaande waterpas-tijdseries voor individuele peilmerklocaties door InSAR-metingen kunnen worden voortgezet.

InSAR heeft niet alleen het voordeel van minder veiligheidsrisico's, die bij het waterpassen door het verloop van waterpastrajecten langs wegen altijd aanwezig zijn. InSAR is door de veel hogere ruimtelijke dichtheid van meetpunten ook robuuster tegenover autonome beweging van individuele punten en maakt een betere selectie van representatieve meetpunten mogelijk. Dat InSAR qua nauwkeurigheid geschikt is voor de monitoring van bodemdaling door delfstofwinning is uit eerder gepubliceerde vergelijkingen met waterpassingen gebleken (NAM, 2018a, 2019b). Tevens is de toepasbaarheid op Twente in een recent analyserapport onderzocht (NAM, 2020).

Dit meetregister is samengesteld in lijn met het Annex Meetplan Zuid-Holland 2019 (NAM, 2018b). Door middel van dit annex geeft NAM invulling aan de aspecten, die SodM van groot belang acht voor het monitoren van bodemdaling met PS-InSAR. De daarin beschreven procedures en kwaliteitsborgingen zijn voor de NAM generiek van toepassing op alle InSAR meetregisters, waarbij InSAR als hoofdtechniek ingezet kan worden voor het monitoren van bodemdaling. Deze houden in, dat de ruimtelijke verdeling van de waterpaspeilmerken geschikt moet blijven voor een toekomstige waterpassing als terugvaloptie op de historische meettechniek. Hieraan is invulling gegeven met een stabiliteitsanalyse en peilmerkcontrole in het veld.

1.2. Gebruikte meetgegevens

Tussen 1971 en 2015 zijn in Twente regelmatige, vijfjaarlijkse waterpassingen uitgevoerd. De hierop aansluitende InSAR-metingen zijn afkomstig twee satellietmissies: Radarsat-2 en Sentinel-1 (zie Figuur 1). De Sentinel-1 waarnemingen vanuit de opgaande baan (3/2015-10/2020) vormen de basis voor dit meetregister. Zij worden aangevuld door InSAR gegevens van zowel Radarsat-2 als Sentinel-1 (neergaande baan), die de NAM in de afgelopen jaren in verband met het monitoren van bodembeweging als gevolg van waterinjectie uit Schoonebeek in de Twentse gasvelden heeft laten processen.

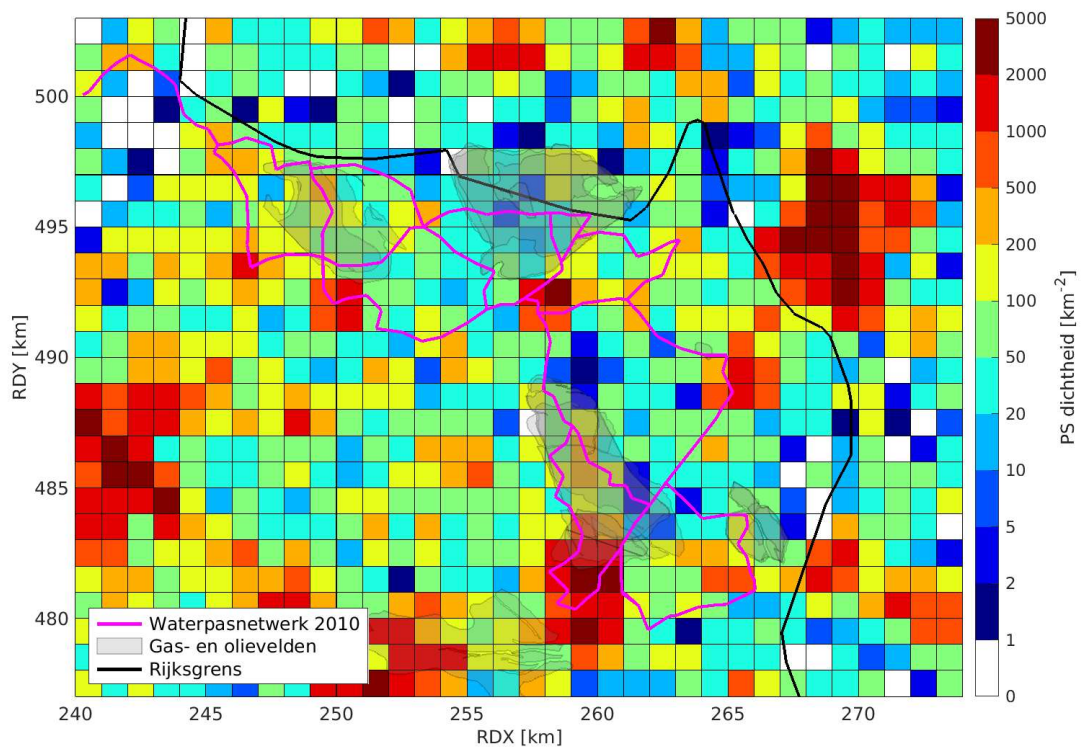


Figuur 1: Temporele bemonstering van satelliet opnames en tijdstippen van de waterpassingen.

Radarsat-2 heeft een nominaal opnameinterval van 24 dagen. Van Sentinel-1 komt tegenwoordig om de zes dagen een nieuw beeld beschikbaar; tot September 2016 gebeurde dat nog om de twaalf dagen.

De voorafgaande haalbaarheidsanalyse (NAM, 2020) was op Sentinel-1 data vanuit de neergaande baan toegepast. Deze dataset bevat echter een gat van vier maanden in zomer 2015, dat in de processing niet kan worden overbrugd zonder scherpere aannames over een glad verloop in de tijd te maken. Om dit te voorkomen en tegelijk een directe aansluiting aan de laatste waterpassing met een gemiddeld uitvoeringsdatum in mei 2015 te kunnen maken, is in dit meetregister Sentinel-1 data vanuit de opgaande baan gerapporteerd. Deze dataset begint in maart 2015 en overlapt met de waterpascampagne.

De ruimtelijke dichtheid van InSAR-meetpunten boven de te monitoren gas- en olievelden is ook met de met de Sentinel-1 missie, opgaande baan, voldoende (zie Figuur 2). De dichtheid is vergelijkbaar met de dataset vanuit de neergaande baan (zie NAM, 2020).



Figuur 2: Dichtheid van InSAR-meetpunten (Sentinel-1, opgaande baan) in het rapportagegebied. Aangegeven wordt het aantal representatieve punten per vierkant van 1 km², waarbij in paragraaf 3.1 is uitgelegd, wat onder representativiteit wordt verstaan. De paarse lijnen geven het waterpasnetwerk van 2010 weer.

1.3. Leeswijzer

De volgende hoofdstukken bevatten uitleg over de verwerking van de meetgegevens en gerelateerde analyses. De meetgegevens zelf zijn als bestanden bijgesloten. Een overzicht geeft bijlage A.

Een in het kader van dit meetregister uitgevoerde stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken wordt in hoofdstuk 2 besproken. Hoofdstuk 3 geeft inzicht in de na-verwerking van de PS-InSAR metingen en hoofdstuk 4 in diens combinatie met de historische waterpassingen in vorm van tijdseries. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de peilmerkcontrole gepresenteerd en besproken. Tot slot is hoofdstuk 6 gewijd aan conclusies en vooruitzichten.

2. Stabiliteitsanalyse waterpasnetwerk

De peilmerken uit de bestaande waterpassingen zijn op representativiteit en betrouwbaarheid geanalyseerd. Het resultaat is een overzicht van peilmerken, waarvan de metingen gebruikt kunnen worden, om de “diepe” bodemdaling, dat wil zeggen de bodemdaling door delfstofwinning, af te leiden.

De analyseresultaten geven de gebruiker van de meetresultaten een handvat om onbetrouwbaar geachte metingen niet te beschouwen. Onbetrouwbaarheid kan daarbij zowel fysieke instabiliteit van het peilmerk zelf betekenen, als ook geconstateerde onregelmatigheden in de metingen. Maar ook voor de publicatie van waterpassingen en InSAR-metingen in een gecombineerde differentiestaat is het zinvol, om tijdseries uit InSAR alleen dan op waterpassingen aan te sluiten, wanneer het betreffende peilmerk als betrouwbaar is aangemerkt. Verder helpt de stabiliteitsanalyse alsmede de uitgevoerde peilmerkcontrole (zie hoofdstuk 5) bij de beoordeling, of het huidige waterpasnetwerk geschikt is voor een eventuele terugval op waterpassing als meettechniek.

2.1. Methode

De in 2019 gepubliceerde analysemethode (NAM, 2019a) is ongewijzigd toegepast. Er zijn alle beschikbare metingen tussen 1970 en 2015 gebruikt. Het resultaat is een classificatie van de peilmerken in *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 peilmerkbeweging of significante meetfouten in de tijdserie.

deels stabiel (verondersteld): Eén of meerdere delen van de tijdserie wordt 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.

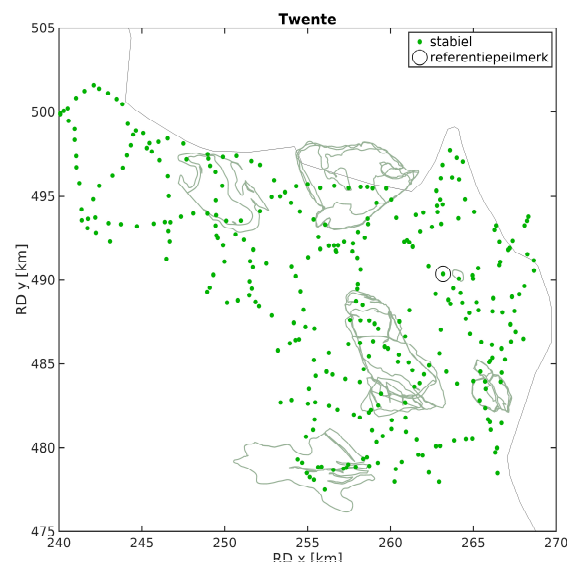
2.2. Resultaten

De resultaten worden in een stabiliteitsstaat (bijlage A.3) gepresenteerd. Uit het overzicht in Tabel 1 blijkt, dat slechts één van de geanalyseerde peilmerken als niet stabiel is geclassificeerd. Daarnaast is op één ander peilmerk een identificatiefout gedetecteerd. Beide peilmerken zijn in 2015 niet waargenomen.

Tabel 1: Peilmerkclassificatie qua aantallen en percentages.

	alle peilmerken	in 2015 gemeten
gerapporteerde peilmerken	407 (100,0 %)	325 (100,0 %)
niet geanalyseerde peilmerken (→ niet stabiel)	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)
(geheel) stabiele peilmerken	405 (99,5 %)	325 (100,0 %)
(ten minste) deels stabiele peilmerken	406 (99,8 %)	325 (100,0 %)
deels maar niet geheel stabiele peilmerken	1 (0,2 %)	0 (0,0 %)
verstoringen op deels stabiele peilmerken	0	0
deels stabiele peilmerken met verstoringen	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)
identificatiefouten op deels stabiele peilmerken	1	0
deels stabiele peilmerken met identificatiefouten	1 (0,2 %)	0 (0,0 %)
niet stabiele peilmerken	1 (0,2 %)	0 (0,0 %)
peilmerken met afwijkend gedrag	1 (0,2 %)	0 (0,0 %)
peilmerken met abnormale snelheid	1 (0,2 %)	0 (0,0 %)

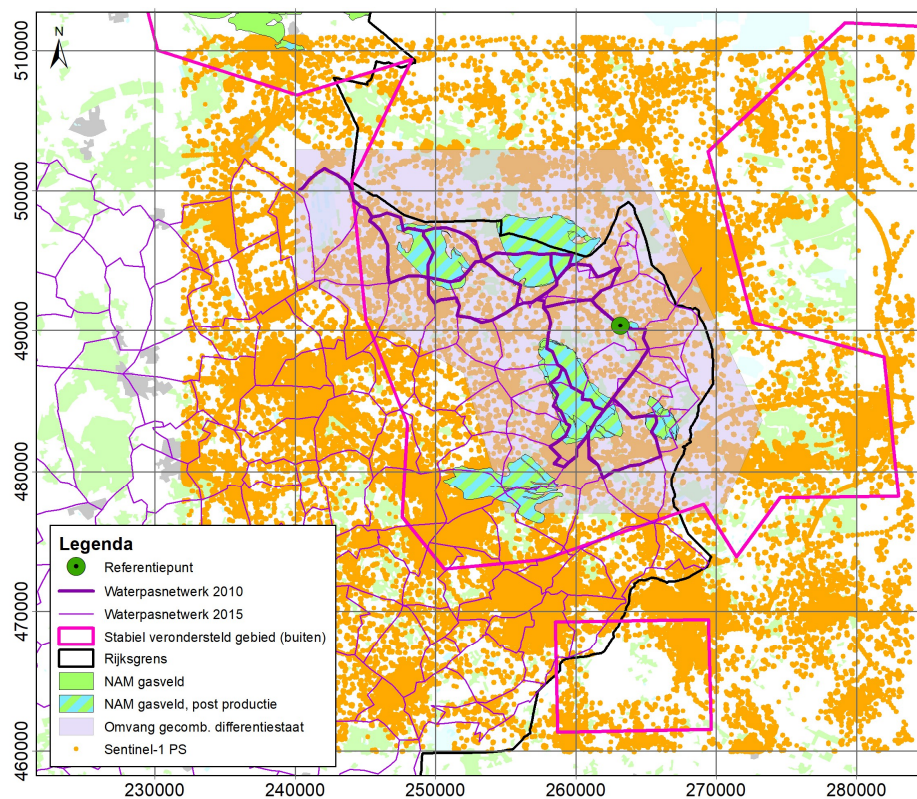
Er mag worden geconcludeerd, dat in het rapportagegebied Twente praktisch alle peilmerken als stabiel mogen worden verondersteld (zie Figuur 3). Niet stabiel veronderstelde peilmerken zijn geen belemmering voor het bijhouden van de door delfstofwinning veroorzaakte bodemdaling.



Figuur 3: Classificatie van peilmerken, die in de meetcampagne van 2015 waargenomen.

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, te weten relatief in de ruimte (hier: t.o.v. een stabiel verondersteld gebied, zie Figuur 4) en relatief in de tijd (t.o.v. de vroegste opname).



Figuur 4: Bedekking van de geproceste Radarsat-2 data. Het gebied buiten de paarse lijn is als stabiel verondersteld referentiegebied gebruikt.

De verwerking is uitgevoerd door Skygeo B.V., Delft. De door de externe partij aangeleverde deformatietijdseries worden door de NAM na-verwerkt met betrekking tot puntselectie en conversie naar de verticaal.

3.1. 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. Dit wordt over negen opeenvolgende opnames berekend. In eerdere meetregisters gebaseerd op Radarsat-2 waren dit drie of vijf opnames, en de verhoging op negen is gemotiveerd door de hogere opnamefrequentie van Sentinel-1. Het glijdend gemiddelde

wordt vergeleken met een referentietijdserie, die per epoche 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.

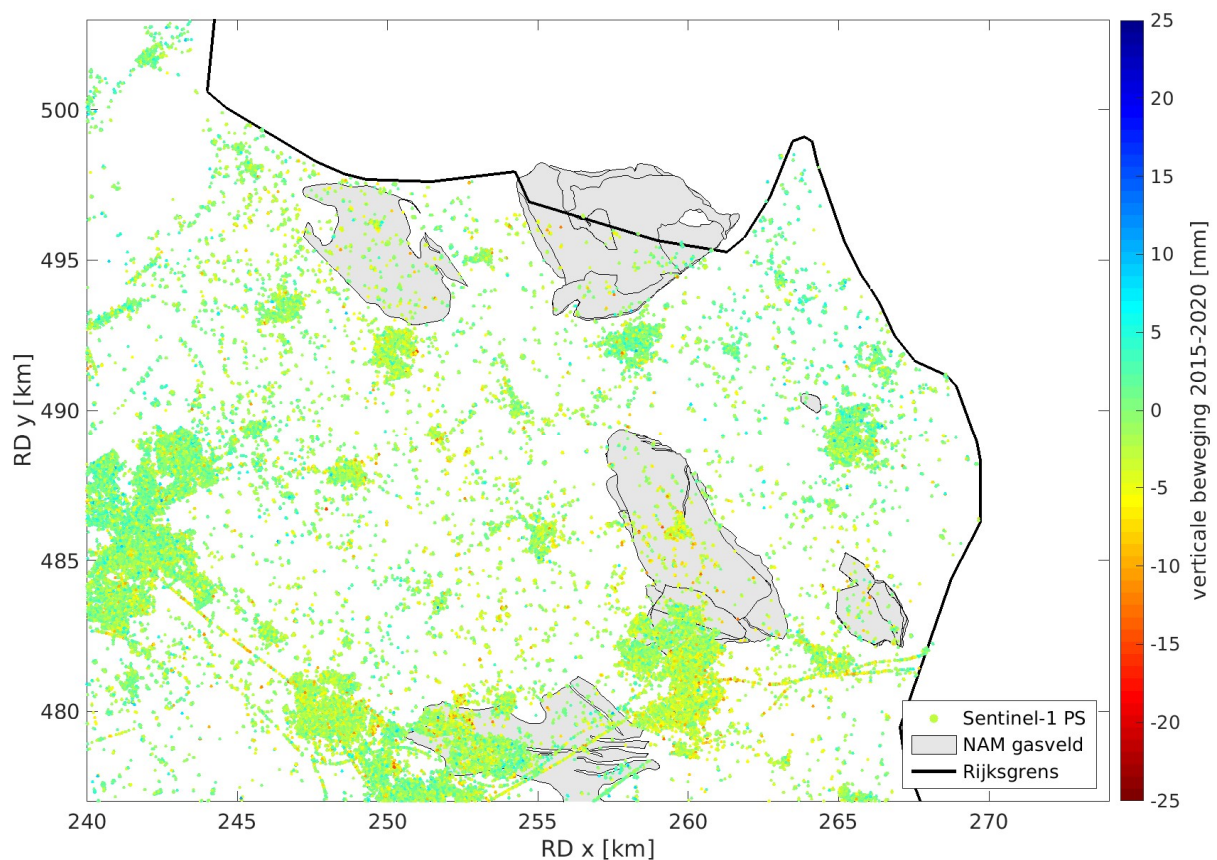
Deze representativiteit van de individuele PS is in de aangeleverde InSAR differentiestaat (bijlage A.1) in een aparte kolom gekenmerkt. Voor de gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) zijn alleen representatieve PS gebruikt.

3.2. 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 verwachte horizontale bewegingen zijn echter relatief klein, en vanwege de steile kijkhoek is de InSAR techniek ook minder gevoelig voor horizontale dan voor verticale deformatie. Per 1 mm/a horizontale beweging is het effect op de geconstateerde verticale beweging in dit meetregister 0,7 mm/a.

3.3. Resultaten

Figuur 5 toont de verticale beweging van de representatief geachte InSAR-meetpunten tussen 2015 en 2020. Tijdseries met jaarlijks gemiddelde InSAR-deformatiemetingen zijn per peilmerklocatie in de bijgevoegde gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) gerapporteerd.



Figuur 5: Bodembeweging (mm) bepaald uit InSAR voor de periode 2015-2020. Deze is berekend uit de gemiddelde deformatie van tijdvakken van een half jaar vóór en na 29 mei 2015 c.q. 29 mei 2020.

Bij de interpretatie van Figuur 5 moet met de meetonzekerheid rekening worden gehouden. Grootschalige variaties tot ca. 1 cm kunnen aan restfouten in de atmosfeerschatting van de InSAR-processing te wijten zijn. Daarmee rekening houdend kan worden geconcludeerd, dat in de afgelopen vijf jaar in het rapportagegebied geen significante bodembeweging heeft plaatsgevonden, die vanwege een glad ruimtelijk verloop typerend is voor bodemdeformatie als gevolg van productie uit of injectie in ondergrondse gasvelden.

4. Combinatie

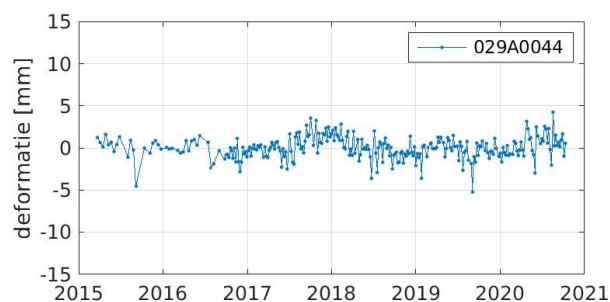
Om met behulp van InSAR metingen de bodemdaling op de langere termijn te kunnen aangeven, moeten deze met waterpassingen gecombineerd worden. De zodanig voortgezette historische tijdseries worden in gecombineerde differentiestaten opgeleverd (bijlage A.2).

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. Zodoende worden InSAR tijdseries in de peilmerk-gewijze tijdseries van waterpassingen geïntegreerd. Aandachtspunten zoals ruimtelijke referentie en koppeling van tijdseries worden in het volgende nader toegelicht.

De goede overeenkomst van Sentinel-1 metingen met waterpassingen en Radarsat-2 in Twente is al eerder aangetoond (NAM, 2020).

4.1. Referentie in de ruimte

De gerapporteerde hoogteverschillen van beide meettechnieken zijn relatief in de ruimte. Voor de waterpassingen is het peilmerk 029A0044 als referentiepeilmerk gebruikt, terwijl de InSAR-deformatiemetingen aan een stabiel verondersteld referentiegebied gerelateerd zijn (zie Figuur 4). 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 gemiddelde tijdserie van alle PS binnen een straal van 1 km rond het referentiepeilmerk geen residuele deformatie laat zien (zie Figuur 6).



Figuur 6: Gemiddelde tijdserie (mediaan) van alle PS binnen een straal van 1 km rond het referentiepeilmerk 029A0044.

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. Bij de aansluiting wordt ook rekening gehouden met de resultaten van de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (zie hoofdstuk 2). Op waterpaspeilmerken geconstateerde niet-stabiliteit, verstoringen en identificatiefouten kunnen net zoals een ontbrekende overlap in de tijd tussen waterpassing en InSAR 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 B.

4.2.1. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken

In de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (paragraaf 2) wordt één peilmerk (028E0254) als niet stabiel verondersteld. Dat betekent, dat de op dit peilmerk gemeten deformatie als niet representatief wordt beschouwd voor de bodembeweging met diepliggende oorzaken zoals delfstofwinning of waterinjectie. De waterpas tijdserie van peilmerk 028E0254 wordt mede daarom *niet* met de InSAR tijdserie 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 één peilmerk (028H0304) “deels stabiel verondersteld”, omdat de waarneming van 2010 als identificatiefout is geïdentificeerd (zie hoofdstuk 2). De waterpassing van 2010 wordt daarom bij de onderlinge aansluiting met InSAR tijdseries niet gebruikt, en voor waterpassing en InSAR worden aparte tijdseries gerapporteerd.

De classificatie in al dan niet of deels stabiel veronderstelde peilmerken is overgenomen in de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2). Tijdseries, die alleen InSAR deformatie bevatten zijn altijd als *stabiel* gekenmerkt, omdat deze uitsluitend op representatieve PS (zie paragraaf 3.1) zijn gebaseerd.

4.2.2. 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.
- 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.

In het geval van twee apart gerapporteerde tijdseries wordt het peilmerknummer (XXXXXXX) aan de chronologisch eerste toegekend, en de chronologisch tweede wordt met een suffix “a” op het peilmerknummer gekenmerkt (XXXXXXXa).

5. Peilmerkcontrole

In het kader van de instandhouding van het waterpasnetwerk in Twente als mogelijke terugval optie in de toekomst zijn in 2020 de (stabiele) peilmerken van het NAM waterpasnetwerk voor Twente gecontroleerd op hun aanwezigheid.

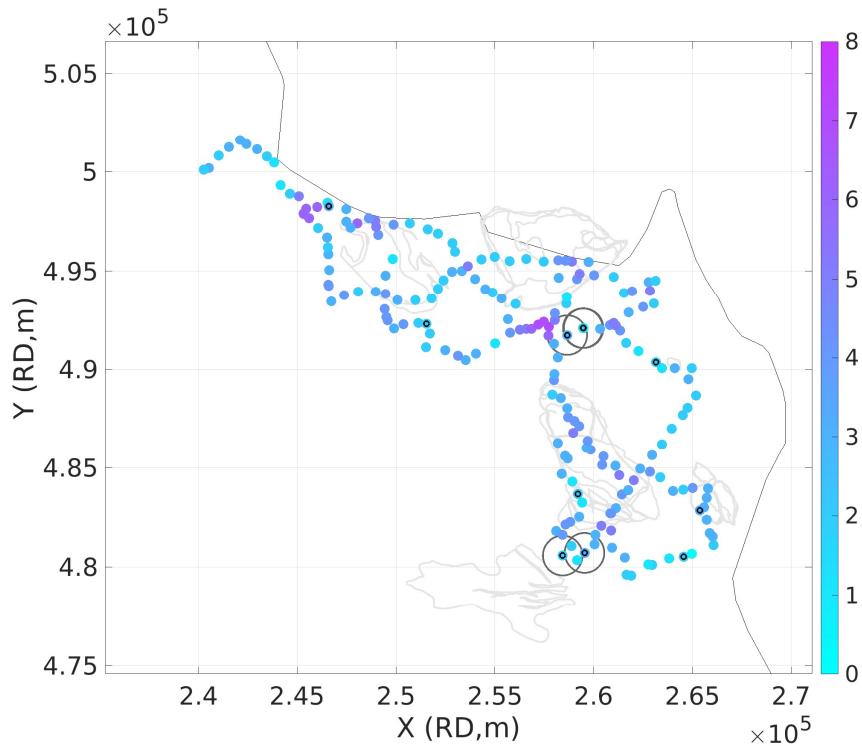
De controle van de peilmerken is gedaan door landmeters met behulp van een GIS App. In deze App is een inspectie tool ingericht, zodat de landmeters direct bij visuele controle in het veld de aan- dan wel afwezigheid van een peilmerk kunnen rapporteren. Hierbij worden ook foto's gemaakt van de peilmerken. De resultaten hiervan zijn door de NAM direct in een GIS-systeem in te zien.

Er zijn in totaal 201 peilmerken gecontroleerd, waarvan er 11 niet meer aanwezig of verstoord waren (5 %), zie bijlage C.

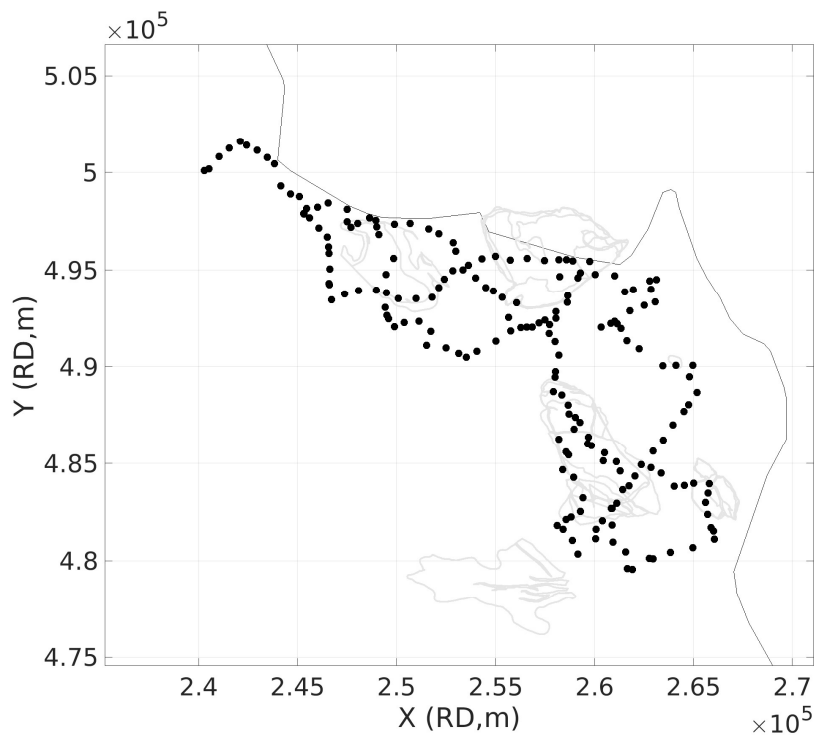
De volgende analyse is uitgevoerd om te beoordelen of het nodig is om nieuwe peilmerken te plaatsen:

1. Per verdwenen stabiel peilmerk is berekend of er alternatieve stabiele peilmerken aanwezig zijn in directe omgeving binnen een straal van 500 meter.
2. Indien dit niet zo is, wordt vervolgens beoordeeld of er minstens 2 stabiele peilmerken aanwezig zijn in een straal van 1 km.
3. Indien dit niet zo is, worden voor de gevallen binnen de invloedssfeer van de producerende gas- en olievelden peilmerken bijgeplaatst en aangesloten op minimaal 2 naburige peilmerken, tenzij er alternatieve stabiele NAP peilmerken van Rijkswaterstaat beschikbaar zijn.

De resultaten van de analyse van de peilmerkcontrole worden getoond in Figuur 7. De locaties met verdwenen of verstoorde peilmerken zijn zwart omcirkeld. Indien er geen alternatief peilmerk binnen 500 meter aanwezig is, is de straal van 1 kilometer aangegeven door middel van een cirkel. Er is één locatie (cirkel rechtsboven in Figuur 7) waar geen alternatief peilmerk aanwezig is binnen een straal van 500 meter, en tevens niet 2 peilmerken binnen een straal van 1 kilometer. Deze locatie ligt echter ruim buiten de contouren van de nabije gasvelden, waaruit niet meer wordt geproduceerd. In enkele Twente velden heeft wel waterinjectie plaatsgevonden in de periode 2015-2020. Figuur 8 toont de aanwezige stabiele peilmerken in het waterpas netwerk Twente in 2020. De NAM zal in Twente geen nieuwe peilmerken bij plaatsen.



Figuur 7: Gecontroleerde peilmerken. Per peilmerk locatie wordt door middel van een kleurschaal aangegeven hoeveel andere gecontroleerde peilmerken in een straal van 1 kilometer aanwezig zijn. De locaties van verdwenen peilmerken zijn zwart omcirkeld. Op de locaties met verdwenen peilmerken waar geen ander gecontroleerd peilmerk in een straal van 500 meter aanwezig is, zijn donkergrijze cirkels met een straal van 1 kilometer weergegeven. Lichtgrijze contouren: gasvelden.



Figuur 8: Aanwezige stabiele peilmerken in het waterpas netwerk Twente.

6. Conclusies en vooruitzichten

In het meetregister Twente worden in 2020 voor het eerst InSAR-deformatiemetingen gerapporteerd, afkomstig van de Sentinel-1 missie, opgaande baan. In een gecombineerde differentiestaat worden de historische tijdseries van peilmerkbewegingen voortgezet. De tot 2015 beschikbare hoogteverschillen uit waterpassing worden aangevuld door de InSAR-deformatie, die voor alle peilmerklocaties als jaarlijkse gemiddeldes van 2010 tot 2020 is berekend (Sentinel-1, aangevuld met Radarsat-2 metingen).

Op de historische waterpasmetingen is een stabiliteitsanalyse uitgevoerd, waardoor onderscheid kan worden gemaakt tussen al dan niet stabiel veronderstelde peilmerken c.q. betrouwbare waarnemingen. Deze classificatie helpt bij de interpretatie van metingen en verhoogt de betrouwbaarheid van de met InSAR gecombineerde tijdseries. Hieruit is gebleken, dat nagenoeg alle peilmerken in Twente als stabiel kunnen worden verondersteld.

De Europese Sentinel-1 missie is voor de lange termijn ontworpen. Daarom mag ervan uit worden gegaan, dat ook voor de komende meetregisters geschikte Sentinel-1 meetgegevens beschikbaar zullen komen. Indien continuïteit met InSAR monitoring door onvoorziene omstandigheden toch niet mogelijk is, kan alsnog worden teruggevallen op het bestaande waterpasnetwerk. Hiervoor zijn alle peilmerken in het veld geïnspecteerd, en de sinds de laatste meting verdwenen peilmerken zijn geïnventariseerd. Er hoeven geen nieuwe peilmerken te worden bijgeplaatst.

Bijlagen

A. Geleverde data

Het meetregister Twente 2020 bevat naast dit rapport een aantal digitaal opgeleverde bestanden. Deze zijn in deze bijlage gespecificeerd.

A.1. Differentiestaat InSAR

De resultaten van de InSAR processing (Sentinel-1, opgaande baan, 2015-2020), zoals verkregen en naverwerkt volgens hoofdstuk 3, zijn aangeleverd in de vorm van een differentiestaat naast toelichting in een “leesme”-bestand:

```
BijlageA1_MR_TW_2020_Sentinel-1.csv  
BijlageA1_MR_TW_2020_Sentinel-1.leesme.txt
```

De differentiestaat bevat één tijdserie per InSAR-meetpunt met de naar de verticaal geconverteerde deformatie schattingen (zie paragraaf 3.2). Voor elke PS is aangegeven, of de tijdserie als representatief wordt beschouwd of niet (zie paragraaf 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 4 op blz. 9).

A.2. Gecombineerde differentiestaat

Voor het hele rapportagegebied is een differentiestaat 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:

```
BijlageA2_MR_TW_2020_gecombineerd_029A0044.csv  
BijlageA2_MR_TW_2020_gecombineerd.leesme.txt
```

De combinatie met InSAR volgt de in bijlage B 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. Stabiliteitsstaat

De resultaten van de stabiliteitsanalyse, zoals toegelicht in paragraaf 2, zijn in een stabiliteitsstaat aangeleverd en in een “leesme”-bestand toegelicht:

```
BijlageA3_sta_tw2015_029A0044.csv  
BijlageA3_sta_tw2015.leesme.csv
```

A.4. Kaart met hoogteverschillen

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

BijlageA4_MR_TW_2020_2015-2020_EP202012201400.pdf

De hoogteverschillen uit InSAR zijn berekend als differentie van de in de gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) gerapporteerde jaarlijkse gemiddelde deformatie van 2015 en 2020.

B. Combinatie procedure

Om verschillende tijdseries van waterpassing en InSAR op elkaar aan te sluiten, wordt op de gecombineerde differentiestaten de hieronder beschreven procedure toegepast.

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.

De hieronder beschreven procedure is op identieke wijze al toegepast in het InSAR-addendum bij het meetregister Noord Nederland 2018 (NAM, 2019b). De beschrijving is echter ingekort op de voor Twente relevante verwerkingsstappen.

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.

2. Aansluiting van InSAR op waterpassing

- a. Ter schatting van de onderlinge offset wordt voor ieder tijdstip van waterpassing binnen het overlappend tijdvak een gemiddelde InSAR deformatie berekend. Deze is het gemiddelde van de gecombineerde InSAR 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 tijdvakken alleen waterpassingen met geconstateerde identificatiefouten bevat, gebeurt geen aansluiting, en er worden aparte tijdseries voor InSAR en waterpassing gerapporteerd.

3. **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.

C. Lijst met niet aanwezige peilmerken uit de peilmerkcontrole

PEILMERKNR	X(RD,m)	Y(RD,m)	AANWEZIG	OPMERKING
028F0069	259460	492080	Nee	Huis gesloopt; nieuwe gebouwd.
028H0319	258440	480560	Nee	Huis is gesloopt.
029C0029	265380	482840	Nee	Huis wordt gesloopt in wk 47 2020.
028H0376	259220	483670	Nee	Huis gesloopt; nieuwe gebouwd.
028F0244	251540	492300	Nee	Bout zit waarschijnlijk achter betimmeringen.
028E0076	246600	498270	Nee	Vervallen.
029C0016	264560	480510	Nee	Huis is gesloopt en herbouwd.
028F0218	258700	491700	Nee	Peilmerk afgebroken.
028H0320	259530	480700	Nee	Schuur gesloopt.
028F0235	259490	492070	Nee	Grond opgehoogd, peilmerk niet meer zichtbaar.
029A0044	263170	490350	Nee	Huis gesloopt; nieuwe gebouwd.

Referenties

NAM (2018a): [Meetregister Zuid-Holland 2017 – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing en satelliet radar interferometrie; rapportage behorende bij het meetplan Zuid-Holland 2017.](#)

Nederlandse Aardolie Maatschappij, 12 januari 2018, EP201709207562.

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

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

NAM (2020): Gebruik van InSAR in het meetregister Twente – Analyse beschikbaarheid en betrouwbaarheid 2020. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 8 juli 2020, EP202006204022.

RWS (2019): Productspecificaties Beheer NAP 2019. Secundaire waterpassing t.b.v. de bijhouding van het NAP. Rijkswaterstaat, 15 januari 2019.