

Meetregister bij het meetplan Noord-Holland
Rapportage van satelliet radar interferometrie
Noord-Holland 2022

30 juni 2022

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Documentnummer: NAM EP202205201708

Samenvatting

In dit meetregister worden de actuele bodemdalingsmetingen van Noord-Holland gepubliceerd. Zij zijn gebaseerd op radarbeelden, die tussen 2015 en 2022 met de Sentinel-1 satellieten zijn opgenomen en in 2022 met de Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniek zijn geproceste. De resulterende deformatie tijdseries zijn op de locaties van waterpaspeilmerken omgerekend en daar met de bestaande waterpassingen gecombineerd. Het resultaat zijn gecombineerde tijdseries uit vijfjaarlijkse waterpassingen tussen 2007 en 2017 en jaarlijks gemiddelde InSAR deformatie tussen 2015 en 2022.

Aanvullend is een stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken in Noord-Holland uitgevoerd, waarin de peilmerken gebaseerd op historische waterpassingen als stabiel, deels stabiel of niet stabiel worden geclassificeerd. De 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 waterpaspeilmerken in Noord-Holland in 2022 gecontroleerd op aanwezigheid. Er hoeven geen peilmerken te worden bijgeplaatst.

Inhoudsopgave

1. Introductie	4
1.1. Keuze meettechniek	4
1.2. Gebruikte meetgegevens	4
1.3. Leeswijzer	5
2. Stabiliteitsanalyse waterpasnetwerk	7
2.1. Methode	7
2.2. Resultaten	8
3. PS-InSAR	10
3.1. Puntselectie	10
3.2. Evaluatie ondiepe bodemdaling	11
3.3. Conversie naar de verticaal	15
3.4. Jaarlijks gemiddelde	15
3.5. Resultaten	15
4. Combinatie	17
4.1. Referentie in de ruimte	17
4.2. Aansluiting van tijdseries op elkaar	17
4.2.1. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken	17
4.2.2. Twee tijdseries per peilmerk	18
5. Peilmerkcontrole	19
6. Conclusies en vooruitzichten	21
Bijlagen	22
A. Geleverde data	22
A.1. Differentiestaat InSAR	22
A.2. Gecombineerde differentiestaat	22
A.3. Stabiliteitsstaat	22
A.4. Kaart met hoogteverschillen	22
B. Combinatie procedure	24
C. Lijst met niet aanwezige peilmerken uit de peilmerkcontrole	25
Referenties	26

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 Noord-Holland 2022. In dit meetplan is een 3-jaarlijks meet- en rapportageinterval afgesproken.

Het nu voorliggende rapport vormt het officiële en openbare ‘meetregister’ behorende bij het meetplan Noord-Holland 2022. 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

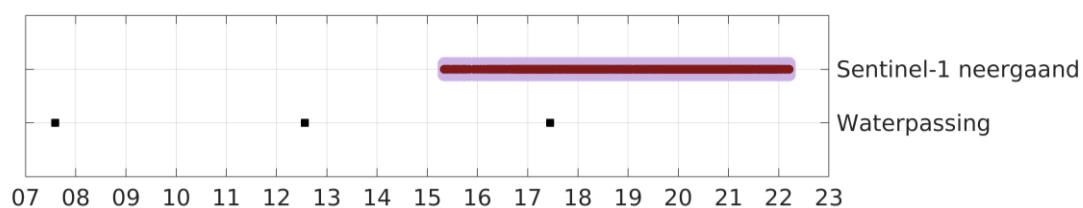
Tot en met het laatste meetregister van 2017 is waterpassing als inwinningstechniek voor bodembewegingsmetingen gebruikt. In dit meetregister is voor het eerst in Noord-Holland voor PS-InSAR (Persistent Scatterer satelliet radar interferometrie) als meettechniek gekozen. Daarbij zijn de InSAR-waarnemingen dusdanig verwerkt, dat de naar 2007 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 de ligging 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). Bij de toepassing op Noord-Holland wordt nadere aandacht besteed aan in hoeverre effecten van ondiepe bodemdaling door een overtaalligheid van representatieve meetpunten gecompenseerd kunnen worden.

Dit meetregister wordt opgeleverd 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. In de daarin beschreven procedures en kwaliteitsborgingen wordt tevens aangegeven, 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 peilmerkcontrole in het veld.

1.2. Gebruikte meetgegevens

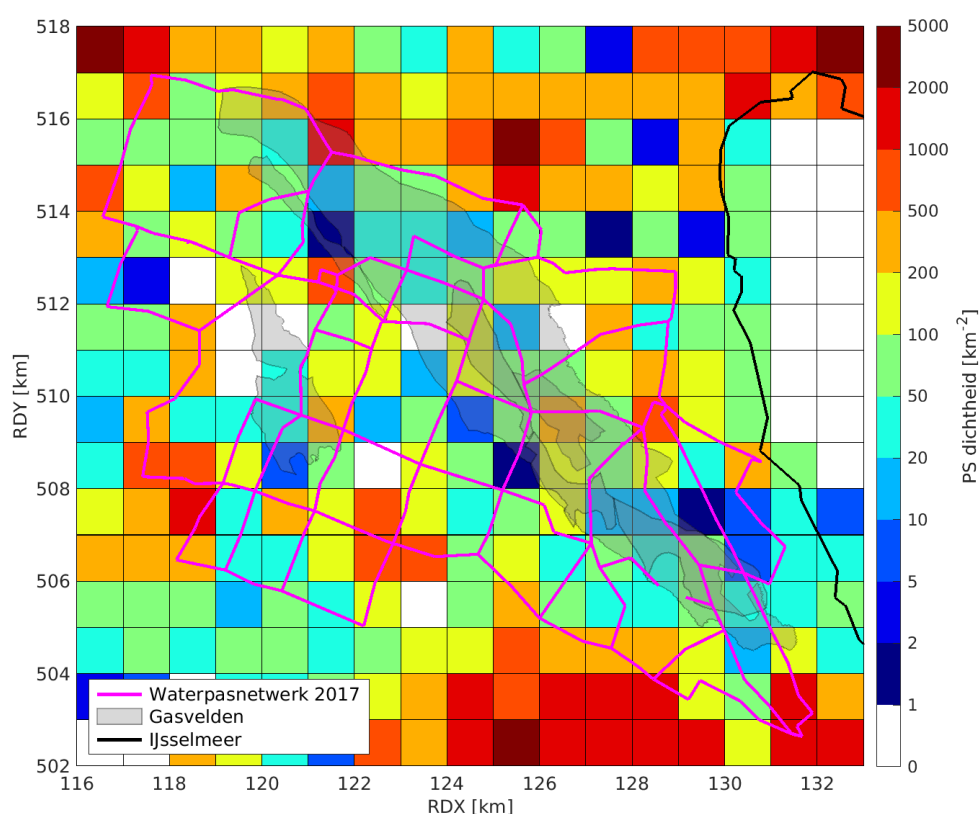
In 2007, 2012 en 2017 zijn in Noord-Holland waterpassingen uitgevoerd en gerapporteerd. De hierop aansluitende InSAR-metingen zijn afkomstig van de satellietmissie Sentinel-1 (zie Figuur 1). De Sentinel-1 waarnemingen vanuit de neergaande baan (5/2015-3/2022) vormen de basis voor dit meetregister.



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

De Sentinel-1 missie bestaat tegenwoordig uit twee satellieten, Sentinel-1A en Sentinel-1B, waarvan tussen september 2016 en december 2021 om de zes dagen een nieuw beeld beschikbaar kwam. Sinds de uitval van Sentinel-1B in december 2021 is het opnameinterval tijdelijk teruggebracht naar twaalf dagen. Dit duurt totdat de Sentinel-1B, zo mogelijk, kan worden hersteld of totdat Sentinel-1C in werking wordt gesteld. De lancering van deze derde satelliet staat voor 2023 gepland.

Zoals in Figuur 2 te zien is, is de ruimtelijke dichtheid van InSAR-meetpunten boven de te monitoren gasvelden inderdaad ruim voldoende.



Figuur 2: Dichtheid van InSAR-meetpunten (Sentinel-1, neergaande baan) in het rapportagegebied. Aangegeven wordt het aantal representatieve PS per vierkant van 1 km², waarbij in paragraaf 3.1 is uitgelegd, wat onder representativiteit wordt verstaan.

1.3. Leeswijzer

De volgende hoofdstukken bevatten uitleg over de verwerking van de meetgegevens en gerelateerde analyses.

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.

Tot slot is in een aantal bijlagen nog aanvullende informatie te vinden. Bijlage A geeft een overzicht over meegeleverde meetgegevens en bijgesloten bestanden. In bijlage B wordt de gestandaardiseerde methode uitgelegd, waarmee tijdseries van verschillende meettechnieken op elkaar worden aangesloten. Bijlage C bevat een lijst met niet aanwezige peilmerken uit de peilmerkcontrole.

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 buiten beschouwing te laten. 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. De analyse is gebaseerd op waterpassingen uit de jaren 1974 tot en met 2017. Dat zijn aanzienlijk meer metingen dan in het meetregister worden gerapporteerd. Dit bevat metingen vanaf 2007 (nulmeting); echter, de stabiliteitseigenschappen van de peilmerken kunnen met behulp van de langere historie met een hogere betrouwbaarheid worden afgeleid. Dat betekent ook, dat peilmerken soms als niet stabiel worden verondersteld, hoewel daartoe gebaseerd op de gerapporteerde waterpassingen van 2007 tot 2017 geen aanleiding bestaat.

De methode kent drie stabiliteitscategorieën:

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 meet-campagnes 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.
- Omdat de gerapporteerde tijdseries van Noord-Holland slechts drie epochen bevatten, is er bij een geconstateerde verstoring maximaal één deeltijdserie (voor of na de verstoring) met minimaal twee metingen. Het andere deel kan maximaal één waarneming bevatten en is daarmee equivalent aan een identificatiefout. Om deze reden worden in deze stabiliteitsanalyse van Noord-Holland eventuele verstoringen als identificatiefouten opgevat.

2.2. Resultaten

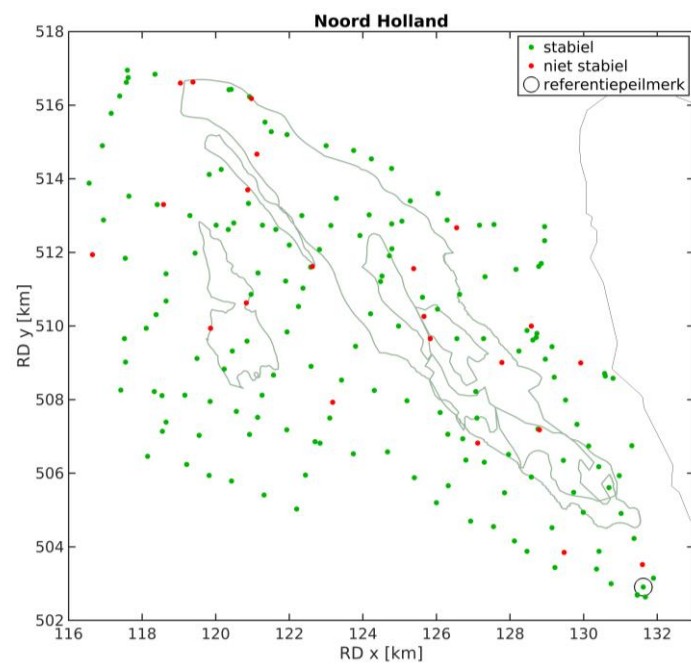
De resultaten worden in een stabiliteitsstaat (bijlage A.3) gepresenteerd. Uit het overzicht in Tabel 1 blijkt, dat 88 % van de in de meest recente campagne waargenomen peilmerken ten minste deels stabiel verondersteld zijn. Dat is minder dan in de rapportagegebieden Noord Nederland (93 %; NAM, 2019a), Zuidoost-Drenthe (99 %; NAM, 2020b) en Twente (100 %; NAM, 2021), maar nog steeds meer dan in Zuid-Holland (82 %; NAM, 2019a). Deze variatie is wellicht te verklaren door de harde zandgrond in Drenthe en Twente, de zachte veengrond in Noord- en Zuid-Holland en het voorkomen van beide grondsoorten in het rapportagegebied Noord Nederland.

Eén van de geanalyseerde peilmerken (019G0204) is als niet stabiel verklaard, omdat het na detectie van een identificatiefout (boven de drempelwaarde) met slechts één resterende meetepoche niet verder kon worden geanalyseerd. Verder zijn in de drie gerapporteerde meetepochen geen identificatiefouten geconstateerd.

Tabel 1: Peilmerkclassificatie qua aantallen en percentages.

	alle peilmerken	in 2017 gemeten
gerapporteerde peilmerken	202 (100,0 %)	187 (100,0 %)
niet geanalyseerde peilmerken (→ niet stabiel)	1 (0,5 %)	0 (0,5 %)
(geheel) stabiele peilmerken	176 (87,1 %)	165 (88,2 %)
(ten minste) deels stabiele peilmerken	176 (87,1 %)	165 (88,2 %)
deels maar niet geheel stabiele peilmerken	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)
verstoringen op deels stabiele peilmerken	–	–
deels stabiele peilmerken met verstoringen	–	–
identificatiefouten op deels stabiele peilmerken	0	0
deels stabiele peilmerken met identificatiefouten	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)
niet stabiele peilmerken	26 (12,9 %)	22 (11,8 %)
peilmerken met afwijkend gedrag	24 (11,9 %)	21 (11,2 %)
peilmerken met abnormale snelheid	11 (5,4 %)	9 (4,8 %)

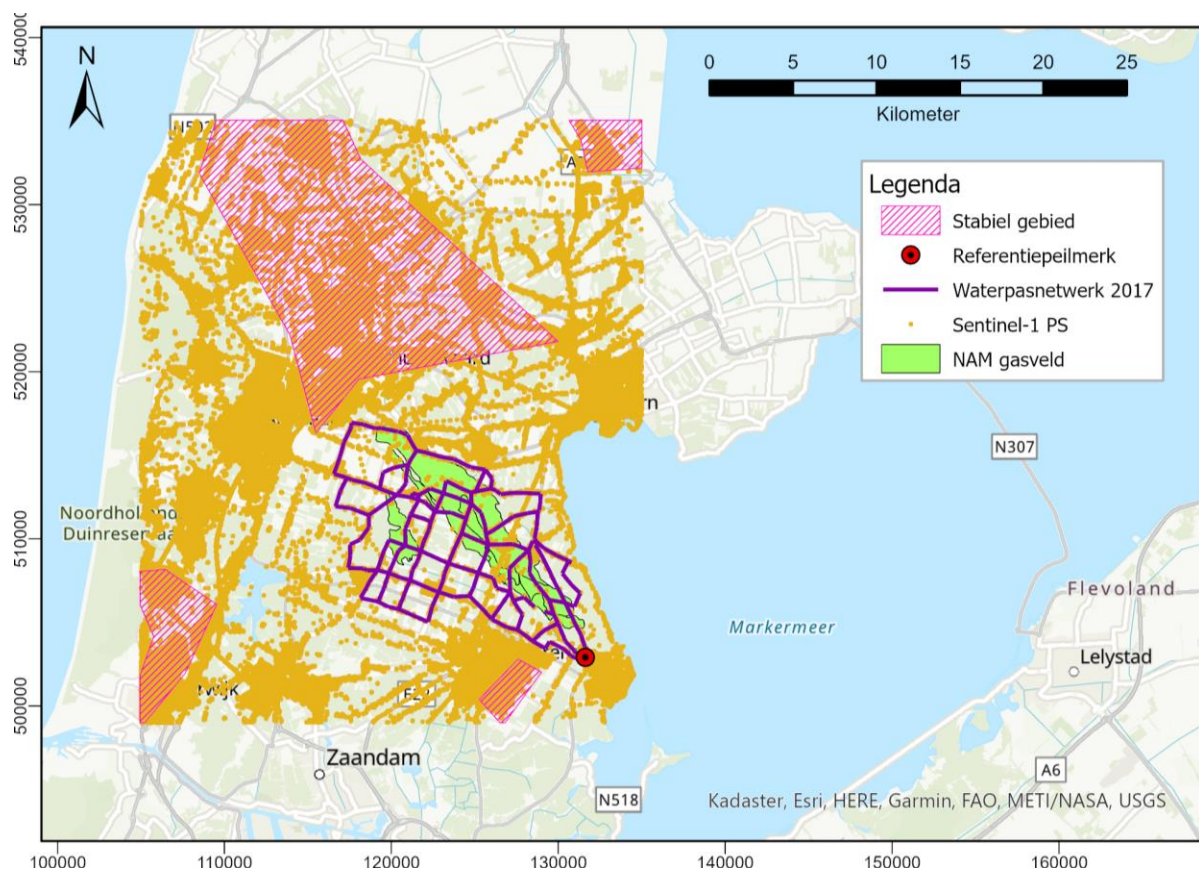
Figuur 3 laat de ruimtelijke verdeling van de niet stabiel veronderstelde peilmerken zien. Er treden geen clusters op, zodat het bijhouden van de door delfstofwinning veroorzaakte bodemdaling hierdoor niet wezenlijk belemmerd wordt.



Figuur 3: Classificatie van peilmerken, die in de meetcampagne van 2017 zijn 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 Sentinel-1 data (representatieve PS volgens paragraaf 3.1). Het paars gearceerde gebied is als stabiel verondersteld referentiegebied gebruikt.

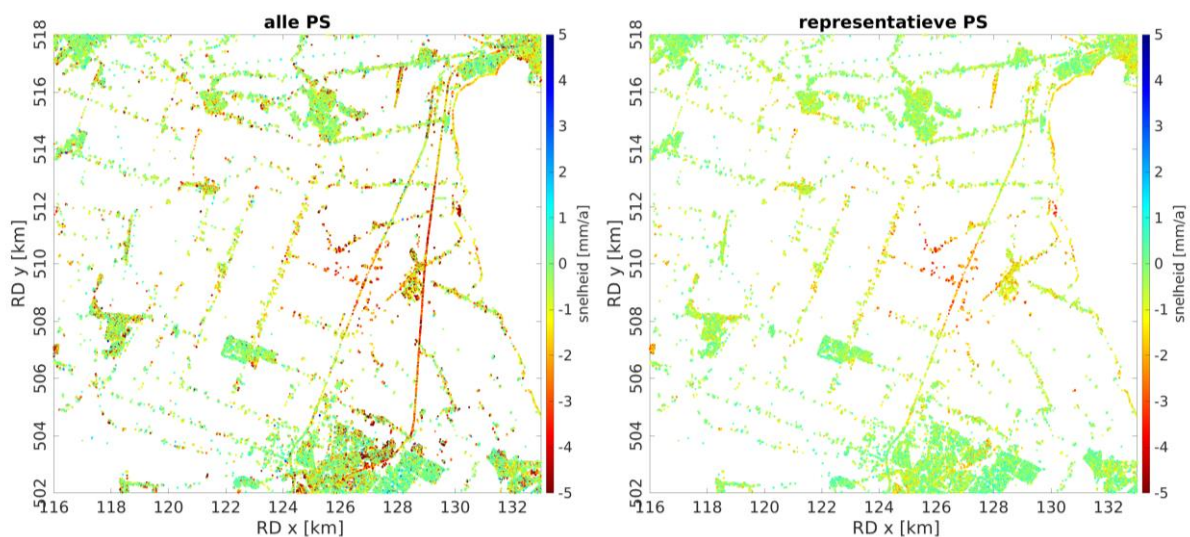
De verwerking is uitgevoerd door Skygeo B.V., Delft. De door de externe partij aangeleverde deformatietijdseries worden door de NAM na-verwerkt met betrekking tot puntselectie, conversie naar de verticaal en jaarlijkse middeling.

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 volgens een in meetregisters van andere gebieden beproefde methode een selectie van representatieve PS gemaakt, waarvan de deformatie met naburige punten in overeenstemming is.

De 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. 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 methode veronderstelt, dat de meerderheid van de naburige PS representatief is voor de diepe bodemdaling. Dit is in het algemeen een valide aanname – behalve in de omgeving van de spoorlijn tussen Purmerend en Hoorn. Langs deze lijn zijn veel PS waargenomen, die structureel harder lijken te zakken dan de PS in de onmiddellijke omgeving (zie Figuur 5). 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 5: PS-selectie in het rapportagegebied. De punten op de spoorlijn van Purmerend naar Hoorn (lijn in noord-zuid richting bij $x \approx 129$ km) is handmatig als niet representatief geclassificeerd.

De 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. Evaluatie ondiepe bodemdaling

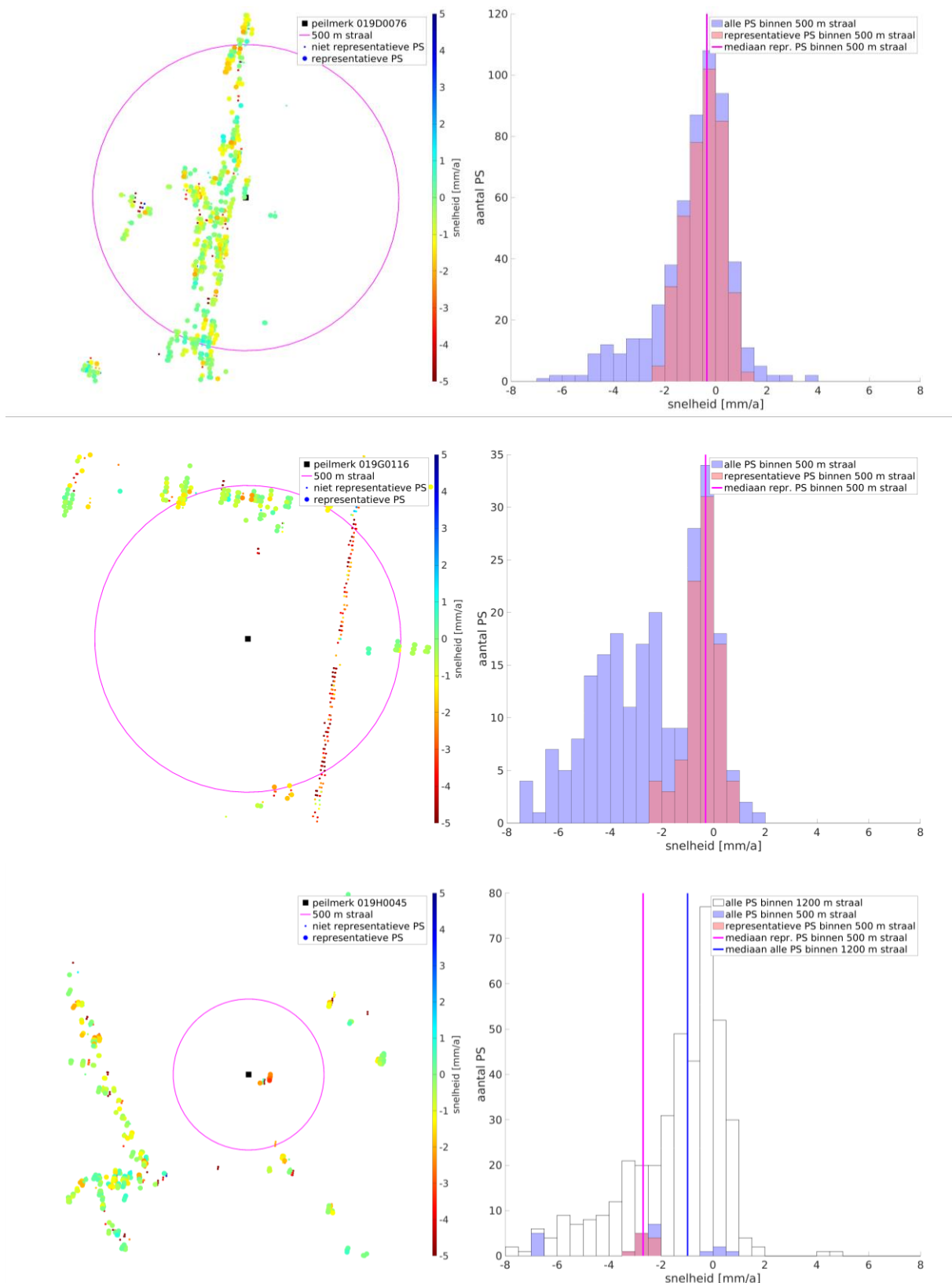
Het rapportagegebied staat bekend om het optreden van ondiepe bodemdaling door veencompactie. Dit is goed te zien op de bodemdalingskaart 1.0 (NCG, 2022), waarop de ondiepe component als verschil tussen het 10-percent percentiel en de mediaan van verticale snelheden uit Sentinel-1 InSAR data wordt opgevat. In tegenstelling tot het rapportagegebied Zuid-Holland, waar ook ondiepe bodemdaling optreedt en al eerder InSAR-metingen in het meetregister zijn gerapporteerd (NAM, 2018a, 2020a), is de punt dichtheid boven de NAM-gasvelden in Noord-Holland lager. De representativiteit van de gerapporteerde InSAR-metingen voor de diepe bodemdaling is daarom minder vanzelfsprekend en is nauwer geëvalueerd.

In de na-verwerking van de InSAR data worden twee methodes toegepast, om ondiepe effecten uit de meetgegevens te filteren. Ten eerste worden representatieve PS gebaseerd op het bewegingsgedrag van naburige PS geselecteerd zoals beschreven in paragraaf 3.1. Het resultaat is terug te vinden in de InSAR-differentiëestaats met één tijdserie per PS in bijlage A.1. Indien aan ondiepe bodemdaling onderhevige PS lokaal de overhand hebben, kunnen deze echter onterecht als representatief worden geclassificeerd. De tweede methode is de berekening van de mediane tijdseries uit meerdere PS in de directe omgeving van peilmerken bij de verdere verwerking tot met historische waterpassingen gecombineerde tijdseries (zie bijlage A.2): De voor een peilmerklocatie representatieve InSAR tijdserie wordt berekend als mediaan van de individuele tijdseries van alle PS binnen een straal van 500 m rond het peilmerk. Door gebruik te maken van meerdere PS in de directe omgeving en de berekening van de mediaan in plaats van het gemiddelde, is de resulterende tijdserie maximaal ongevoelig voor ondiepe effecten.

De representativiteit van de mediaan-tijdseries voor de diepe bodemdaling is voor Noord-Holland nog nader geëvalueerd aan de hand van snelheidshistogrammen zoals te zien in Figuur 6. Deze histogrammen geven een visuele indruk van de snelheidsverdeling van alle PS in het bereik van een peilmerk. Wanneer de mediaan van de snelheden als representatief kan worden beschouwd voor de diepe bodemdaling, dan wordt dat ook voor de corresponderende deformatie-tijdserie uit epoche-wijze medianen (kort: mediaan-tijdserie) verondersteld.

Een goed voorbeeld is peilmerk 019D0076 (Figuur 6, boven). De meeste PS in de omgeving van het peilmerk hebben snelheden tussen -2 mm/a en $+2$ mm/a. Een klein aantal PS daalt harder dan 2 mm/a. Deze PS worden op de kaart door kleine rode punten gekenmerkt en in het histogram door de “staart” aan de linkerkant gerepresenteerd. Omdat de ruimtelijke verdeling geen grootschalige clusters laat zien en hard dalende punten direct naast niet dalende punten optreden, is er sprake van twee overlappende deformatieprocessen. Daarbij is de interpretatie aannemelijk, dat de meerderheid van de punten representatief is voor de diepe bodembeweging (al dan niet daling), terwijl het kleine aandeel hard dalende punten bijkomend nog onderhevig is aan ondiepe bodemdaling. In het histogram is goed te zien, dat de in paragraaf 3.1 beschreven puntselectie werkt en alle hard dalende punten als niet representatief worden beschouwd, terwijl de meerderheid van de niet of nauwelijks bewegende punten representatief wordt geacht. De mediaansnelheid is representatief voor deze groep punten.

De situatie is anders voor peilmerk 016G0116 (Figuur 6, midden), dat op een afstand van 300 m naast de spoorlijn tussen Purmerend en Hoorn gelegen is. De meerderheid van de PS binnen een straal van 500 m rond het peilmerk ligt op de ondiep zakkende spoorlijn. In het histogram is duidelijk een scheiding tussen twee afzonderlijke deformatieprocessen te zien. Hier is, zoals eerder toegelicht, handmatig ingegrepen door alle PS op de spoorlijn als niet representatief voor de diepe bodemdaling te classificeren. Daardoor kon worden bereikt, dat de mediaansnelheid van de representatieve PS met het rechter maximum van het histogram samenvalt, dat karakteristiek is voor bodembeweging door diepe processen.



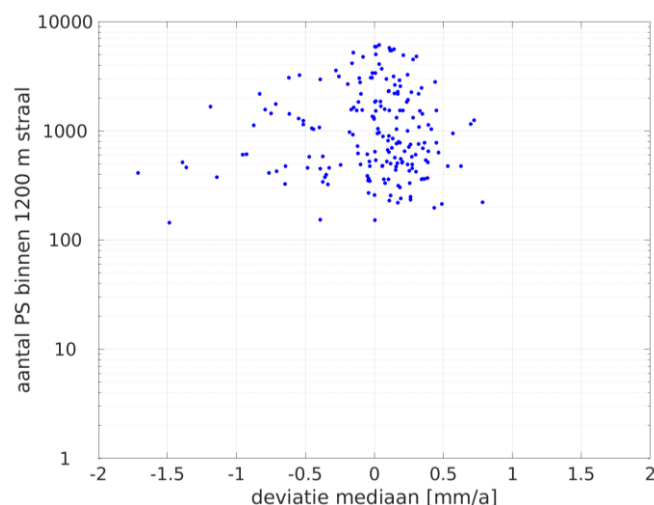
Figuur 6: Representativiteit van de InSAR-snelheden op de locaties van drie exemplarische peilmerken. Links is te zien, welke als representatief en als niet representatief veronderstelde PS binnen een straal van 500 m vallen. Rechts worden de histogrammen van de verticale snelheden van deze puntselecties getoond, samen met de mediaan van de representatieve PS binnen een straal van 500 m. Voor peilmerk 019H0045 (onder) zijn als context ook alle PS binnen in de ruimere omgeving met hun mediaansnelheid weergegeven.

Naast de spoorlijn is er in het rapportagegebied geen andere geïsoleerde infrastructuur met een vergelijkbaar hoge punt dichtheid, die duidelijk en op grote schaal onderhevig is aan ondiepe bodemdaling. De mediaan is robuust tegenover autonoom dalende PS, wanneer die in de minderheid zijn. Alleen in een klein aantal gevallen worden de meetpunten binnen een straal van 500 m rond een peilmerklocatie door autonoom dalende PS gedomineerd. Denk aan vrijstaande en slecht gefundeerde gebouwen met weinig reflecterende objecten eromheen. Om een kwantitatieve inschatting van dit soort gevallen te kunnen maken, zijn alle 202 peilmerklocaties systematisch geëvalueerd.

Door de straal rond een peilmerklocatie van 500 m naar 1200 m te vergroten, is de mediaansnelheid van de daarbinnen liggende PS praktisch altijd representatief voor de diepe bodemdaling. Voor rapportagedoeleinden is straalvergroting geen aanvaardbare oplossing, omdat zo ruimtelijke variaties van de diepe bodemdaling te sterk vereffend kunnen worden. In gebieden met weinig diepe bodemdaling is straalvergroting echter een geschikt hulpmiddel, om een referentiesnelheid te berekenen. Deze helpt bij de beoordeling van mediaansnelheid binnen de 500-m-straal. Afwijkingen zijn een duidelijke indicatie voor de invloed van autonome bodemdaling.

In de directe omgeving van Peilmerk 019H0045 (Figuur 6, onder) staat maar één geïsoleerde woning met PS van variërende snelheid. De meeste punten dalen met 2 mm/a of harder. Een paar PS dalen helemaal niet. In de bredere omgeving is er een duidelijke meerderheid van niet of nauwelijks dalende PS. Het verschil tussen de mediaansnelheden gebaseerd op PS binnen stralen van respectievelijk 500 en 1200 m geeft een kwantitatieve indicatie, in hoeverre de PS binnen de kleinere straal beïnvloed zijn door autonome bewegingen.

Deze evaluatie is voor alle 202 gerapporteerde peilmerklocaties gemaakt. Figuur 7 toont de afwijking van de mediaansnelheid van de representatieve PS binnen 500 m ten opzichte van de mediaansnelheid van alle PS binnen 1200 m. De laatste is altijd gebaseerd op meer dan 140 PS en is daarom een robuuste schatting voor een referentiesnelheid, die niet door ondiepe effecten is beïnvloed. De meeste afwijkingen zijn kleiner dan 1 mm/a (of 5 mm in 5 jaar). Slechts bij zes peilmerken zijn de afwijkingen groter, en er moet van een significante beïnvloeding van de mediaansnelheden (en dus ook de gerapporteerde tijdseries) door autonome bodembeweging worden uitgegaan.



Figuur 7: Deviatie van de mediaan van de verticale snelheden van alle representatieve PS binnen een straal van 500 m rond een peilmerk ten opzichte van de mediaan van de verticale snelheden van alle PS binnen 1200 m straal. Op de verticale as is het aantal PS binnen een straal van 1200 m weergegeven. PS op de spoorlijn Purmerend-Hoorn (zie paragraaf 3.1) zijn buiten beschouwing gelaten.

De InSAR-metingen op zes van de 202 peilmerklocaties zijn dus significant beïnvloed door ondiepe bodemdaling. Voor nog eens zes locaties kunnen geen InSAR-metingen worden gerapporteerd, omdat zich geen PS binnen een straal van 500 m bevinden. Er blijven 190 peilmerklocaties met bruikbare InSAR-metingen over. Dat zijn aanzienlijk meer dan de 176 in paragraaf 2.2 als stabiel veronderstelde peilmerken, waarop potentieel bruikbare waterpassingen kunnen worden verricht. Ook al berust de evaluatie hierboven op een aantal aannames, er kan worden geconcludeerd, dat InSAR als inwinnings-techniek voor bodemdalingsmetingen ondanks de gevoeligheid voor ondiepe bodemdaling in Noord-Holland niet minder betrouwbaar is dan waterpassingen.

3.3. 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.

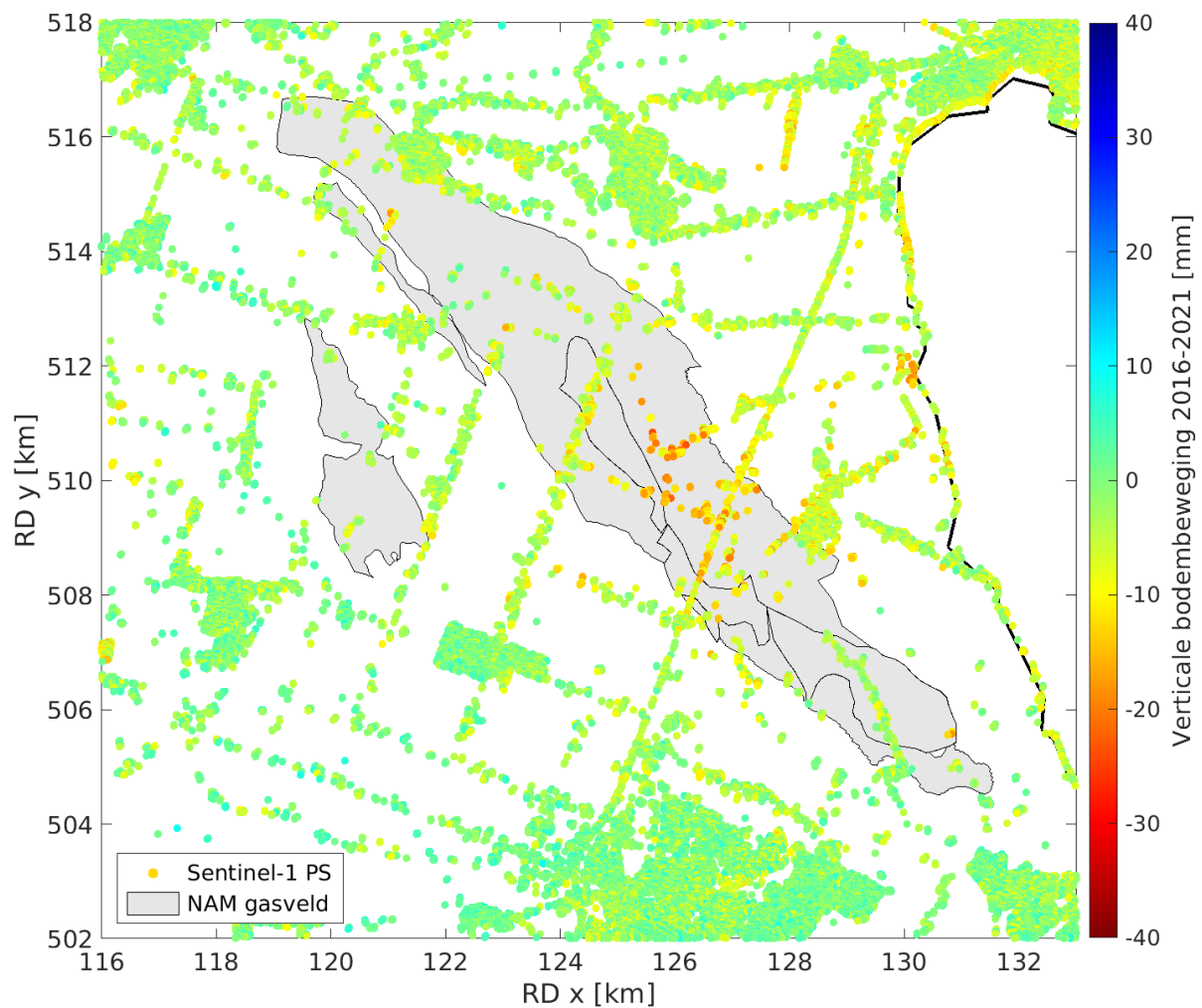
3.4. Jaarlijks gemiddelde

De InSAR opnameintervallen zijn korter dan nodig is voor de doelstelling, het bijhouden van bodemdeformatie door delfstofwinning. Om de hoeveelheid data te beperken worden in de gecombineerde differentiestaat op peilmerkkniveau (bijlage A.2) alleen jaarlijks gemiddelde hoogteverschillen gerapporteerd. De tijdseries worden dus in vakken van twaalf maanden onderverdeeld, waarvan alleen de gemiddelde waardes gerapporteerd worden. Deze waardes representeren de deformatie in het midden van de respectievelijke tijdvakken, die beginnend bij de laatste opname op 17 maart 2022 teruglopend in de tijd zijn gedefinieerd. Het laatste tijdvak loopt dus van 17 maart 2021 tot 17 maart 2022 met 16 september 2021 als gemiddelde datum. De meest recente deformatiewaardes van het meetregister 2022 liggen daarom formeel in het jaar 2021 maar zijn mede gebaseerd op metingen uit 2022.

Een aantal figuren in dit rapport evenals de bijliggende verschilkaart (bijlage **Error! Reference source not found.**) hebben als doelstelling, de verandering sinds het laatste meetregister van 2017 (NAM, 2017) weer te geven. In dat meetregister is een waterpassing gerapporteerd met 12 juni 2017 als gemiddelde datum. Omdat de InSAR-meting niet direct aan de waterpassing aansluit, is ervoor gekozen, voor de figuren en de verschilkaart het meetinterval van vijf jaar aan te houden, ongeacht het tijdstip van de laatste waterpassing. Te zien zijn daarom de gemeten hoogteverschillen uit InSAR tussen 16 september 2016 en 16 september 2021.

3.5. Resultaten

Figuur 8 toont de verticale beweging van de representatief geachte InSAR-meetpunten tussen september 2016 en september 2021. Tijdseries met jaarlijks gemiddelde InSAR-deformatiemetingen zijn per peilmerklocatie in de bijgevoegde gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) gerapporteerd.



Figuur 8: Bodembeweging (mm) bepaald uit InSAR voor de periode 2016-2021. Deze is berekend uit de gemiddelde deformatie tussen twee tijdvakken van een half jaar vóór en ná 16 september 2016 c.q. 16 september 2021.

Bij de interpretatie van Figuur 8 moet met de meetonzekerheid rekening worden gehouden. Groot-schalige 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 centrale deel van het gasveld Middelie een bodemdaling in de orde van 1,5 cm heeft plaatsgevonden. Andere significante bodemdalingssignalen, zoals vermeend ondiepe bodemdaling op een kampeerterrein bij Schardam aan de Markermeerkust, liggen buiten de invloedssfeer van de gaswinning.

4. Combinatie

Om de bodemdaling op de langere termijn met behulp van InSAR metingen 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. Aandachtspunten zoals ruimtelijke referentie en koppeling van tijdseries worden in het volgende nader toegelicht.

4.1. Referentie in de ruimte

De gerapporteerde hoogteverschillen van beide meettechnieken zijn relatief in de ruimte. Voor de waterpassingen is het peilmerk 000A2670 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 9).



Figuur 9: Gemiddelde tijdserie (mediaan) van alle PS binnen een straal van 1 km rond het referentiepeilmerk 000A2670.

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 (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 (hoofdstuk 2) wordt een deel van de peilmerken als niet stabiel verondersteld. Dat betreft 12 % van de in 2017 waargenomen peilmerken. De op deze peilmerken gemeten deformatie wordt niet als representatief 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.

De classificatie in al dan niet 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. Twee tijdseries per peilmerk

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

- Het peilmerk is in de campagne van 2017, de enige campagne in het overlappend tijdvak met InSAR, niet gewaterpast.
- Het peilmerk is niet stabiel verondersteld, daarom wordt de InSAR tijdserie niet op de waterpassing aangesloten.

Bij twee aparte tijdseries voor een peilmerk is het peilmerknummer (XXXXXXXX) aan de tijdserie van waterpassingen toegewezen. De chronologisch latere InSAR-tijdserie is met een suffix “a” op het peilmerknummer gekenmerkt (XXXXXXXXa).

5. Peilmerkcontrole

In het kader van de instandhouding van het waterpasnetwerk in Noord-Holland als mogelijke terugval optie in de toekomst zijn in 2022 de (stabiele) peilmerken van dat netwerk gecontroleerd op hun aanwezigheid.

Hiervoor zijn de peilmerken langs de waterpastrajecten van 2017 geselecteerd boven de voorkomens in het meetplan Noord-Holland 2022 en een gebied van minimaal 2,6 km daaromheen.

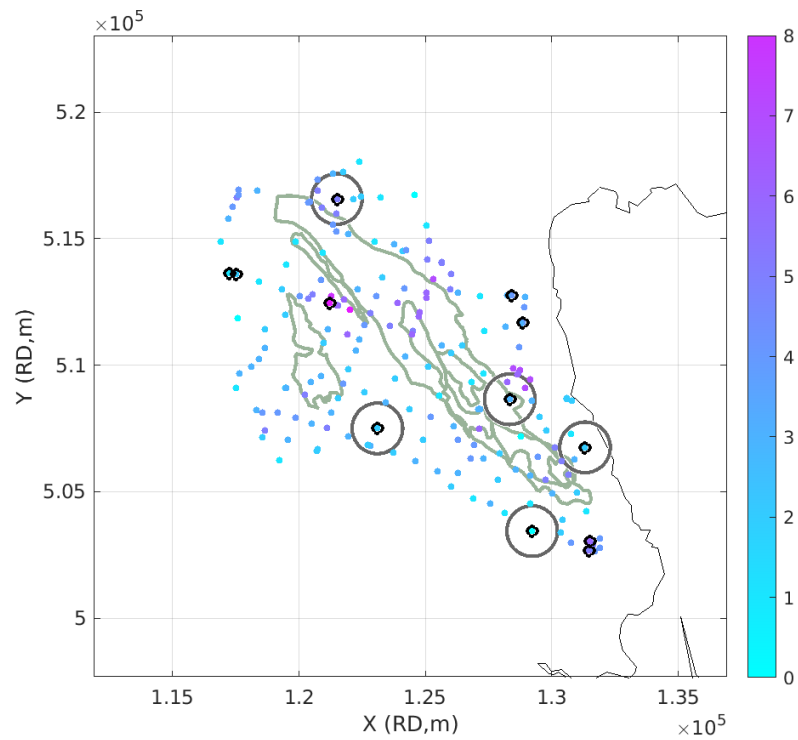
De controle van de peilmerken is gedaan door een landmeter met behulp van een GIS App. In deze App is een inspectie tool ingericht, zodat de landmeter direct bij visuele controle in het veld de aan- dan wel afwezigheid van een peilmerk kan rapporteren. Hierbij worden ook foto's gemaakt van de peilmerken.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

Er zijn in totaal 193 peilmerken gecontroleerd, waarvan er 12 niet meer aanwezig waren, zie bijlage C.

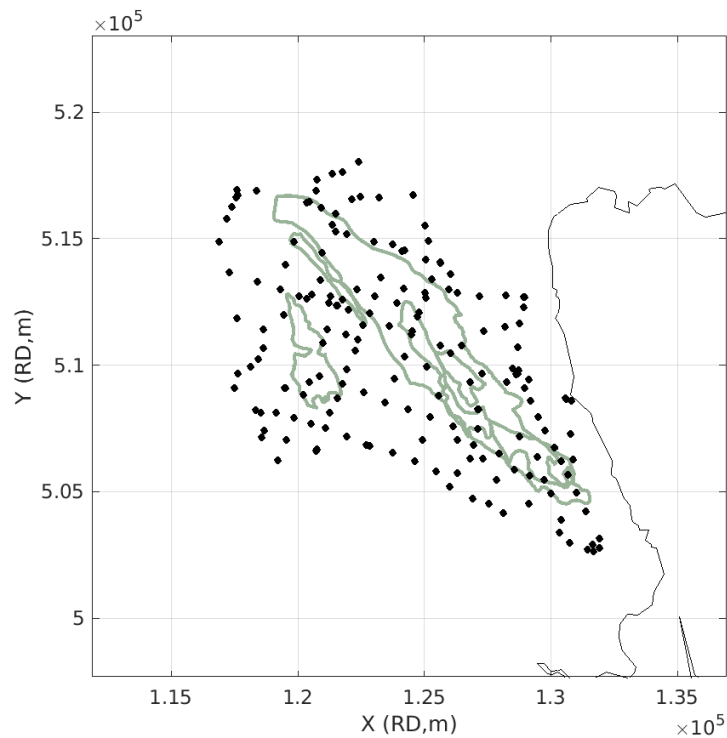
De volgende analyse is uitgevoerd om te beoordelen of het nodig is om nieuwe peilmerken te plaatsen:

1. Per verdwenen stabiel peilmerk is berekend of er alternatieve stabiele peilmerken aanwezig zijn in directe omgeving binnen een straal van 500 m.
2. Indien dit niet zo is, wordt vervolgens beoordeeld of er minstens twee 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 gasvelden peilmerken bijgeplaatst en aangesloten op minimaal twee naburige peilmerken, tenzij er alternatieve stabiele NAP peilmerken van Rijkswaterstaat beschikbaar zijn.

De resultaten van de analyse van de peilmerkcontrole worden getoond in Figuur 10. De locaties met niet aanwezige of niet te vinden peilmerken zijn zwart omcirkeld. Indien er geen alternatief peilmerk binnen 500 m aanwezig is, is de straal van 1 km aangegeven door middel van een cirkel. Op de zuidelijkste locatie daarvan zijn er minder dan 2 stabiele peilmerken aanwezig in een straal van 1 km. Omdat deze ruim buiten de contouren van de gasvelden ligt, worden er in Noord-Holland geen nieuwe peilmerken bijgeplaatst. Figuur 11 toont de aanwezige stabiele peilmerken in Noord-Holland.



Figuur 10: Gecontroleerde peilmerken. Per peilmerk locatie wordt door middel van een kleurenschaal aangegeven hoeveel andere gecontroleerde peilmerken in een straal van 1 km aanwezig zijn. De locaties van verdwenen stabiele peilmerken zijn zwart omcirkeld. Op de locaties met verdwenen peilmerken waar geen ander gecontroleerd peilmerk in een straal van 500 m aanwezig is, zijn donkergrijze cirkels met een straal van 1 km weergegeven. Lichtgrijze contouren: gasvelden.



Figuur 11: Aanwezige stabiel geclassificeerde peilmerken in het waterpas netwerk Noord-Holland.

6. Conclusies en vooruitzichten

In het meetregister Noord-Holland worden in 2022 voor het eerst InSAR-deformatiemetingen gerapporteerd, afkomstig van de Sentinel-1 missie, neergaande baan. In een gecombineerde differentiestaat worden de historische tijdseries van peilmerkbewegingen voortgezet. De tot 2017 beschikbare hoogteverschillen uit waterpassing worden aangevuld door de InSAR-deformatie, die voor alle peilmerklocaties als jaarlijkse gemiddeldes van 2015 tot 2022 is berekend.

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 88 % van alle in 2017 waargenomen peilmerken in Noord-Holland als ten minste deels stabiel kunnen worden verondersteld.

De Europese Sentinel-1 missie is voor de lange termijn ontworpen. Tegenwoordig is alleen de Sentinel-1A satelliet operationeel, terwijl Sentinel-1B recent is uitgevallen. Zelfs als deze niet meer kan worden hersteld, blijft door de voor 2023 geplande lancering van Sentinel-1C de continuïteit gewaarborgd.

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 Noord-Holland 2022 bevat naast dit rapport een aantal digitaal opgeleverde bestanden. Deze zijn in deze bijlage gespecificeerd.

A.1. Differentiëestaat InSAR

De resultaten van de InSAR processing (Sentinel-1, neergaande baan, 2015-2022), zoals verkregen en na-verwerkt volgens hoofdstuk 3, zijn aangeleverd in de vorm van een differentiëestaat naast toelichting in een “leesme”-bestand:

```
Sentinel-1_MR_Noord-Holland_2022.csv  
Sentinel-1_MR_Noord-Holland_2022.leesme.txt
```

De differentiëestaat bevat één tijdserie per PS 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. 10).

A.2. Gecombineerde differentiëestaat

Voor het hele rapportagegebied is een differentiëestaat 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:

```
000A2670_2007-08-05_MR_Noord-Holland.csv  
000A2670_2007-08-05_MR_Noord-Holland.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 (zie hierover ook paragraaf 3.4).

A.3. Stabiliteitsstaat

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

```
sta_nh2007-2017_000A2670.csv  
sta_nh2007-2017_000A2670.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:

```
MR_Noord-Holland_2022_201609-202109_EP202205202189.pdf
```

De hoogteverschillen uit InSAR zijn berekend als differentie van de in de gecombineerde differentie staat (bijlage A.2) gerapporteerde jaarlijkse gemiddelde deformatie tussen 16 september 2016 en 16 september 2021 (zie paragraaf 3.4 voor uitleg over dit interval). Voor een overzichtelijk beeld worden alleen hoogteverschillen op peilmerken getoond, die in 2017 zijn gewaterpast

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. Deze 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 Noord-Holland relevante verwerkingsstappen.

1. Aansluiting van InSAR op waterpassing

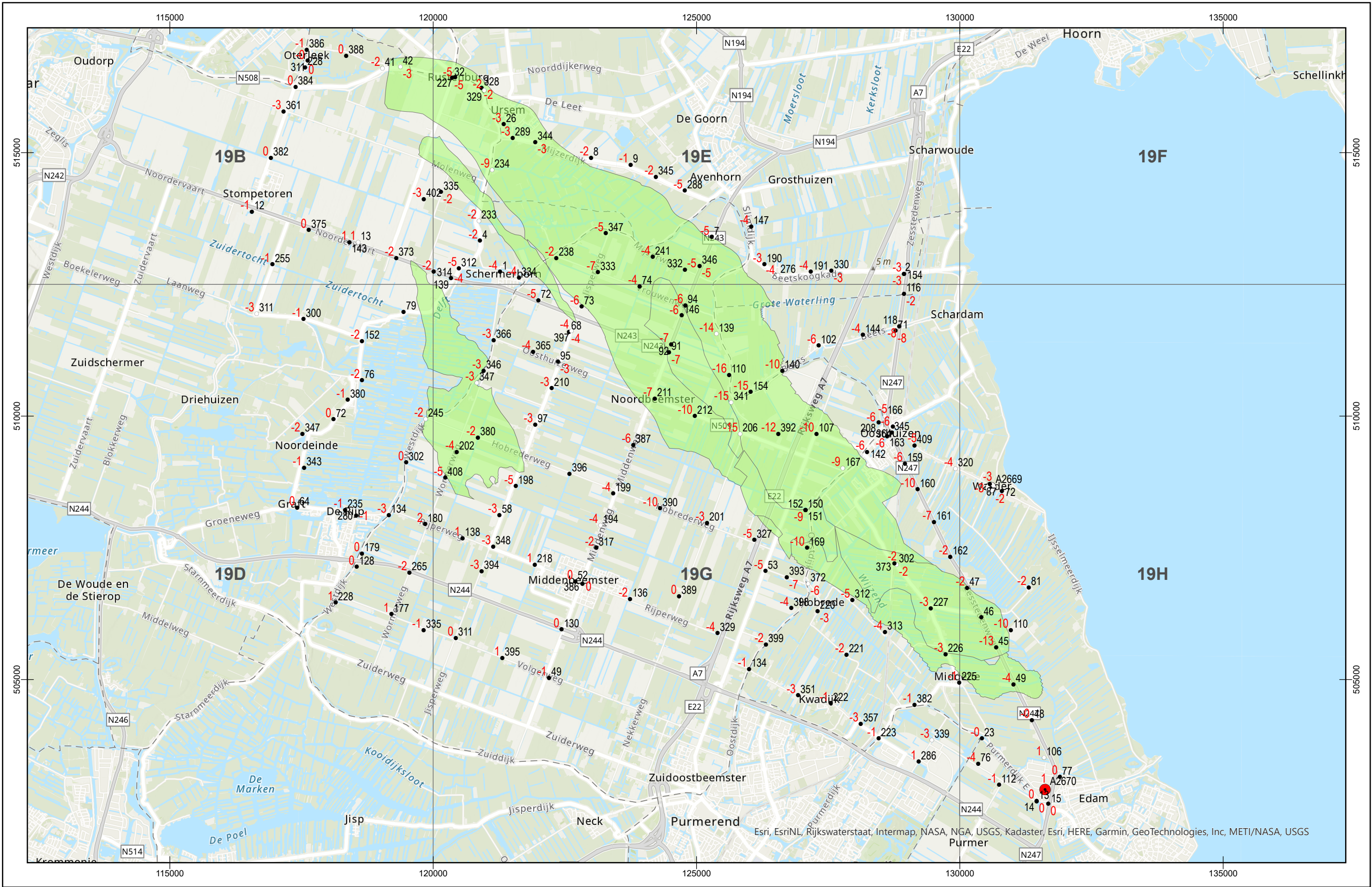
- a. Ter schatting van de onderlinge offset wordt voor het tijdstip van de waterpassing in het overlappend tijdvak een gemiddelde InSAR deformatie berekend. Deze is het gemiddelde van de InSAR tijdserie binnen een tijdvak van een half jaar vóór en ná het tijdstip van de waterpassing. De offset t.o.v. de waterpassing wordt vervolgens bepaald als differentie tussen deze gemiddelde deformatiewaarde en de waterpassing van 2017.
 - 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 de waterpassing van 2017 als identificatiefouten is aangemerkt, gebeurt geen aansluiting, en er worden aparte tijdseries voor InSAR en waterpassing gerapporteerd.
2. **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

Peilmerk	X(RD,m)	Y(RD,m)	AANWEZIG	OPMERKING
019E0252	128389	512751	N	Situatie gewijzigd; peilmerk niet te vinden.
019G0118	128846	511686	N	Peilmerk verdwenen.
019H0111	131503	503034	N	Peilmerk niet te vinden.
019H0013	131463	502687	N	Peilmerk verdwenen.
019G0286	129220	503440	N	Inrit verwijderd; nieuwbouw industrieel terrein
019H0081	131310	506750	N	Pand gesloopt voor nieuwbouw
019E0273	121494	516571	N	Schuur gesloopt
019B0375	117516	513604	N	Oever aangepast
019G0317	123100	507500	N	Peilmerk verdwenen; vervallen boerderij.
019B0362	117240	513640	N	Vervallen gebouw
019G0083	121207	512459	N	Verdwenen bout
019G0412	128332	508651	N	Nieuwbouw

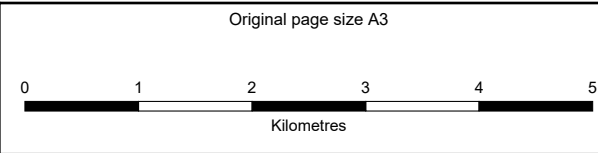
Referenties

- NAM (2017): [Meetregister bij het meetplan Noord-Holland 2017 – Rapportage van de nauwkeurigheidswaterpassing Noord-Holland 2017](#). Nederlandse Aardolie Maatschappij, 18 december 2017, EP201710209467.
- 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 (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): Meetregister bij het meetplan Zuidoost Drenthe – Rapportage van satelliet radar interferometrie, Zuidoost Drenthe 2019. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 26 maart 2020, EP202002201804.
- NAM (2021): [Meetregister bij het meetplan Twente – Rapportage van satelliet radar interferometrie, Twente 2020](#). Nederlandse Aardolie Maatschappij, 8 januari 2020, EP202011204521.
- Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-informatica (NCG, 2022): [Bodemdalingskaart 1.0](#), geraadpleegd op 15 juni 2022.



CRS: RD New
Projection: Double Stereographic
Datum: Amersfoort
False Easting: 155.000.0000
False Northing: 463.000.0000
Central Meridian: 5.3876
Scale Factor: 0.9999
Latitude Of Origin: 52.1562
Units: Meter

- | | | | | | |
|-----|-----------------------|---|---------------------------------|---|-------------|
| -4 | Peilmerkbeweging (mm) | ● | Peilmerk, stabiel verondersteld | ■ | NAM gasveld |
| 268 | Peilmerknummer | ○ | Peilmerk, niet stabiel | | |
| 37A | Kaartbladnaam | ⊙ | Ondergronds merk | | |
| | | ● | Referentie peilmerk | | |



NOORD-HOLLAND	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
DIFFERENTIES 9/2016-9/2021 (mm)	Date issued: 30 juni 2022
MEETREGISTER BIJ HET MEETPLAN NOORD-HOLLAND 2022	Doc. no. EP202205202189