

Meetregister bij het meetplan Zuid-Holland

Rapportage van satelliet radar interferometrie en de
nauwkeurigheidswaterpassing

Zuid-Holland 2022

26 augustus 2022

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Documentnummer: NAM EP202208202043

Samenvatting

Dit document bevat het meetregister Zuid-Holland op basis van satelliet radar interferometrie (InSAR) en de additionele waterpassing in het gebied Hoeksche Waard. Het is tot stand gekomen in het kader van het meetplan Zuid-Holland 2022.

In dit meetregister worden de actuele bodemdalingsmetingen van Zuid-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 geïnterpreteerd. De resulterende deformatie tijdseries zijn op de locaties van waterpaspeilmerken omgerekend en daar met de bestaande waterpassingen gecombineerd. Het resultaat zijn gecombineerde tijdseries uit waterpassingen tussen 1989 en 2016 (c.q. 2022 voor de Hoeksche Waard) en jaarlijks gemiddelde InSAR deformatie tussen 2015 en 2022. Deze zijn berekend ten opzichte van drie verschillende referentiepunten.

De resultaten tonen aan dat InSAR op enkele uitzonderingen na binnen de nauwkeurigheidsmarges overeenkomt met de waterpasresultaten. Respectievelijk 84 % en 100 % van de verschillen tussen InSAR en waterpassen in de periodes 2011-2022 en 2019-2022 in het Hoeksche Waard gebied zijn kleiner dan 1 cm. In de enkele gevallen, waar verschillen optreden in de gecombineerde tijdreeksen met historische waterpassingen, is een waarschijnlijke oorzaak de autonome bodembeweging in het gebied.

De met InSAR gemeten bodemdaling in de periode 2019-2022 is vrijwel overal boven de gasvelden in Zuid-Holland minder dan 1 cm.

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 Zuid-Holland in 2022 gecontroleerd op aanwezigheid. Onder voorbehoud van een nacontrole op een bedrijventerrein hoeven er geen peilmerken te worden bijgeplaatst.

Inhoudsopgave

1. Introductie.....	5
1.1. Keuze meettechnieken.....	5
1.2. Beschikbaarheid meetgegevens.....	5
2. Waterpassing.....	8
2.1. Ontwerp van het waterpasnet.....	8
2.2. Metingen.....	9
2.2.1. Meetmethode.....	9
2.2.2. Instrumentarium en uitvoering.....	9
2.3. Toetsing en vereffening.....	9
2.3.1. Toetsing en vereffening.....	9
2.3.2. Beoordeling resultaten.....	9
2.4. Keuze referentiepeilmerk.....	10
2.5. Stabiliteitsanalyse.....	11
2.5.1. Methode.....	11
2.5.2. Toepassing.....	12
3. PS-InSAR.....	14
3.1. Puntselectie.....	14
3.2. Conversie naar de verticaal.....	15
4. Combinatie.....	16
4.1. Referentie in de ruimte.....	16
4.2. Aansluiting van tijdseries op elkaar.....	16
4.2.1. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken.....	17
4.2.2. Twee tijdseries per peilmerk.....	17
4.3. Resultaten.....	18
5. Vergelijking InSAR en waterpassen.....	20
6. Peilmerkcontrole.....	23
7. Conclusies en vooruitzichten.....	25
Bijlagen.....	26
A. Geleverde data.....	26
A.1. Differentiestaat InSAR.....	26
A.2. Gecombineerde differentiestaten.....	26
A.3. Stabiliteitsstaten.....	27
A.4. Kaart met hoogteverschillen.....	27
A.5. MOVE3 bestanden.....	27
B. Combinatie procedure.....	28
C. Documentatie waterpassing.....	30

C.1. Inrichting en realisatie meetnet	30
C.2. Bijzonderheden vereffening	30
D. Lijst met niet aanwezige peilmerken uit de peilmerkcontrole.....	31
Referenties	33

1. Introductie

In dit meetregister worden de resultaten van satelliet radar interferometrie en van een nauwkeurigheidswaterpassing 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 Zuid-Holland 2022.

Het nu voorliggende rapport vormt het officiële en openbare ‘meetregister’ behorende bij het meetplan Zuid-Holland 2022. De gepubliceerde hoogten 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. Daarnaast heeft RWS-CIV het recht de getoetste metingen naar eigen inzicht aan te sluiten op het NAP net, ten einde de vastgestelde hoogten op te nemen in het openbare NAP peilmerken register.

1.1. Keuze meettechnieken

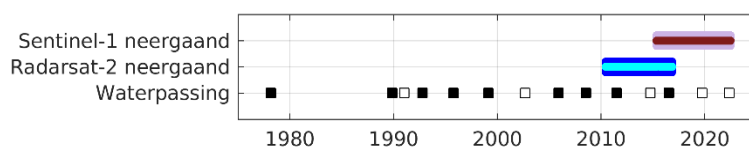
Zoals reeds in het meetregister Zuid-Holland 2019 (NAM, 2020) is voor PS-InSAR (Persistent Scatterer satelliet radar interferometrie) als inwinningstechniek gekozen. Ten opzichte van waterpassen is de bodembeweging afgeleid uit InSAR minder gevoelig voor autonome beweging door de grotere ruimtelijke dichtheid van meetpunten (NAM, 2018a). Hierdoor is het mogelijk om een betere selectie van representatieve punten te maken, wat in Zuid-Holland (met gebieden met sterke veencompactie in de bovenste grondlagen en uiteenlopend zettingsgedrag van bebouwing en infrastructuur) een voordeel is. Om de punt dichtheid ook in het meer landelijke gebied De Hoeksche Waard te kunnen garanderen, is in aanvulling hierop een kleine waterpassing uitgevoerd.

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. 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 in 2022, zes jaar na de laatste waterpassing, invulling gegeven met een peilmerkcontrole in het veld. Het interval voor peilmerkcontroles in Zuid-Holland is 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.

1.2. Beschikbaarheid meetgegevens

Sinds 1978 wordt de bodemdaling in Zuid-Holland gemonitord door regelmatige waterpassingen, waarbij de campagne van 1989 de nulmeting voor het meetregister voorstelt. Vanaf medio 2010 zijn InSAR waarnemingen van het rapportagegebied beschikbaar (zie Figuur 1). In 2014 werd de gemeten bodemdaling gebaseerd op InSAR-metingen gerapporteerd, en er werden slechts twee validatiegebieden gewaterpast. In 2016 heeft Rijkswaterstaat weer een volledige waterpassing uitgevoerd. Sinds 2019 is InSAR de primaire meettechniek voor het grootste deel van het rapportagegebied, terwijl een klein netwerk in De Hoeksche Waard wordt gewaterpast.

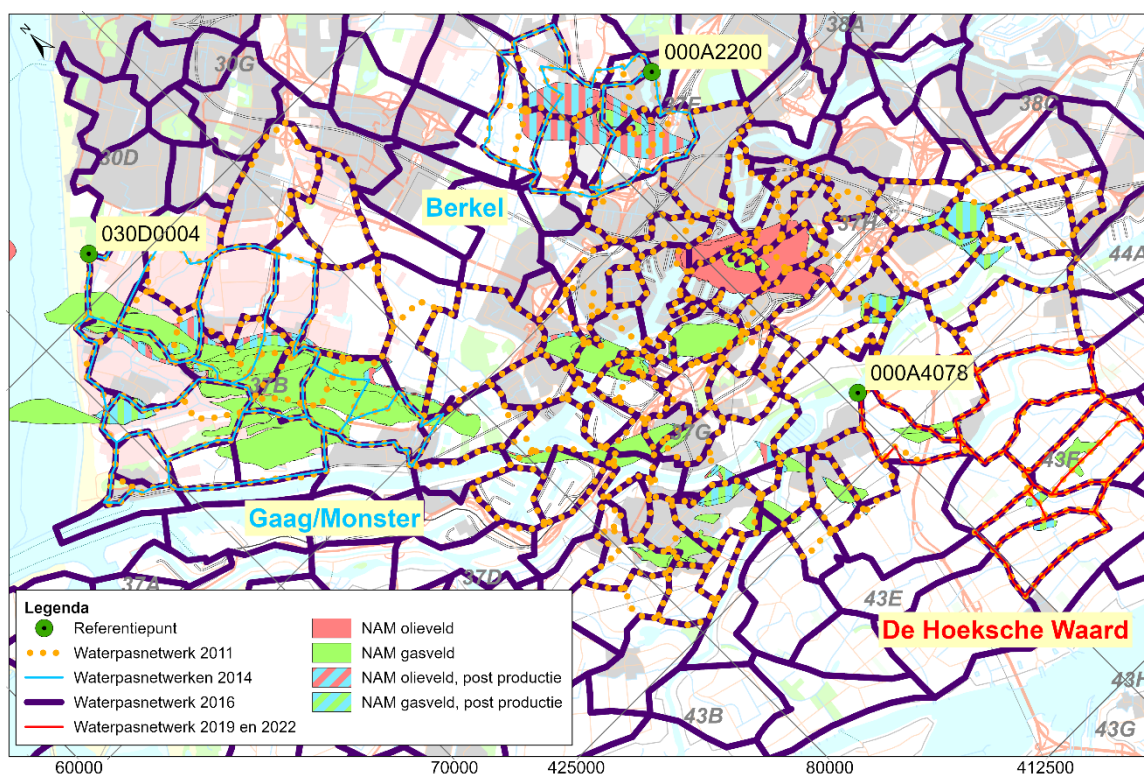
De waterpasnetwerken van de laatste jaren bedekken verschillende deelgebieden en hebben daarom verschillende referentiepunten (zie Tabel 1 en Figuur 2).



Figuur 1: Temporele bemonstering van satelliet opnames en tijdstippen van de waterpassingen. De wit gevulde vierkanten geven aan, dat minder dan het volledige rapportagegebied is gewaterpast.

Tabel 1: Waterpasnetwerken in Zuid-Holland van de laatste jaren

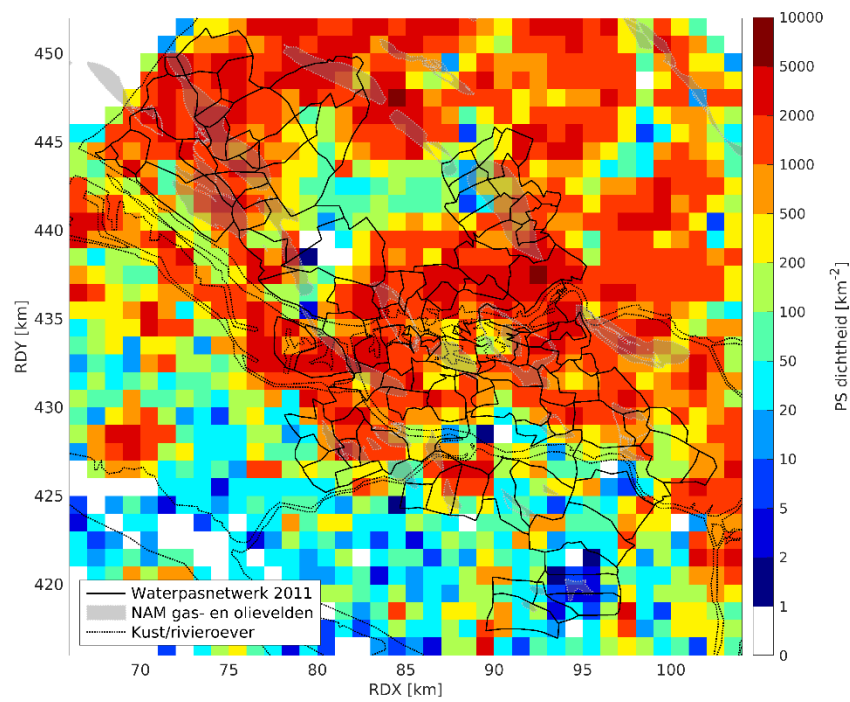
Jaar	Omvang	Referentiepeilmerk
2011	= Rapportagegebied	030D0004
2014	Validatiegebied "Gaag/Monster"	030D0004
2014	Validatiegebied "Berkel"	000A2200
2016	> Rapportagegebied	030D0004
2019	Deelgebied De Hoeksche Waard	000A4078
2022	Deelgebied De Hoeksche Waard	000A4078



Figuur 2: Omvang van de waterpasnetwerken in Zuid-Holland van de laatste jaren.

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 Sentinel-1C in werking wordt gesteld. De lancering van deze derde satelliet staat voor het tweede kwartaal van 2023 gepland.

Ook de ruimtelijke bedekking van het rapportagegebied door PS is met de Sentinel-1 missie ruim voldoende (zie Figuur 3). Vanwege de lagere dichtheid in De Hoeksche Waard, is daar uit voorzorg een klein netwerk gewaterpast (zie Figuur 2).



Figuur 3: PS-dichtheid 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. De zwarte lijnen geven het waterpasnetwerk van 2011 weer, dat het rapportagegebied volledig afdekt.

2. Waterpassing

Voor de waterpassing is de procedure gevolgd, die met ingang van 18 augustus 2005 is vastgesteld door Staatstoezicht op de Mijnen en Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening (RWS-CIV) ten behoeve van een zorgvuldige en betrouwbare uitvoering van de metingen en de rapportage. De metingen zijn uitgevoerd conform de voorschriften van RWS-CIV (RWS, 2021).

2.1. Ontwerp van het waterpasnet

Bij het ontwerp van het meetnet zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd.

Aansluitpunten

Het meetnet is zodanig ontworpen dat de peilmerken op de rand van het net buiten de invloedssfeer van de mijnbouwactiviteiten van NAM vallen.

Kringen en trajecten

De grootte van het meetnet is zodanig gekozen, dat het gebied waar deformatie kan optreden is omsloten. Alle peilmerken zijn opgenomen in gesloten kringen, wat een belangrijke voorwaarde is om de betrouwbaarheid van de meetresultaten te kunnen toetsen. Deze kringen worden gevormd door trajecten. De trajecten, die bestaan uit een aantal secties, zijn zoveel mogelijk langs bestaande wegen gelegen.

Punt dichtheid

Met instemming van Staatstoezicht op de Mijnen zijn bij de inrichting de volgende richtlijnen voor de peilmerkdichtheid in de waterpastrajecten gehanteerd:

- Binnen de bebouwde kom: een onderlinge afstand van circa 500 m.
- Buiten de bebouwde kom: een onderlinge afstand van circa 1000 m.

Secundaire optische waterpassingen

De metingen zijn zodanig uitgevoerd dat ze voldoen aan de besteisen van RWS-CIV voor secundair optische waterpassingen. Deze eisen zijn:

- Maximale afstand tussen instrument en baak is 50 m;
- Het maximale afstandsverloop is 3 m;
- De MOVE3-vereffening moet voldoen aan de specificaties:
 - De standaardafwijking van de waarnemingen is $1,1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km} \cdot \sqrt{L}}$ voor individuele heen- of teruggang;
 - De F-toets met mag niet overschreden worden bij $\alpha_0 = 0,01$;
 - De kritieke waarde van de w-toets is 2,58 bij $\alpha_0 = 0,01$;
 - De kringsluitfout mag de bovengrens van $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{km} \cdot \sqrt{L}}$ niet overschrijden.

Bij overschrijding van de toleranties vindt hermeting plaats.

Betrouwbaarheid en precisie

Doel van de metingen is, met voldoende betrouwbaarheid en precisie inzicht te krijgen in de peilmerk-dalingen. Voor de betrouwbaarheid en precisie is als uitgangspunt gehanteerd dat de differenties tot op enkele millimeters nauwkeurig met een hoge mate van betrouwbaarheid kunnen worden vastgesteld.

De betrouwbaarheid wordt enerzijds gewaarborgd door de configuratie van het meetnet, anderzijds door het uitvoeren van herhalingsmetingen waarbij 'foutieve' waarden kunnen worden opgespoord.

De precisie wordt enerzijds gewaarborgd door de waterpassingen te laten voldoen aan de eisen van RWS-CIV voor secundair optische waterpassingen, anderzijds door de huidige configuratie van het meetnet.

2.2. Metingen

2.2.1. Meetmethode

De waterpassing is uitgevoerd conform de eisen van RWS-CIV voor secundair optische waterpassingen. De toetsingscriteria staan vermeld in paragraaf 2.1. De secties zijn in heen- en teruggang gemeten. De waarnemingen zijn direct digitaal opgeslagen.

2.2.2. Instrumentarium en uitvoering

De metingen zijn uitgevoerd met een digitaal waterpasinstrument. Dit is een elektronisch waterpasinstrument, waarbij de baken digitaal worden afgelezen. Dit heeft als voordeel dat er geen afleesfouten kunnen voorkomen.

Tijdens de meetwerkzaamheden is het waterpasinstrument wekelijks gecontroleerd op de hoofdvoorwaarde.

2.3. Toetsing en vereffening

2.3.1. Toetsing en vereffening

Voor de vereffening is getoetst of de metingen voldoen aan de eisen van RWS-CIV voor secundair optische waterpassingen, zoals genoemd in paragraaf 2.1. Bij overschrijding van de toleranties zijn hermetingen uitgevoerd.

Met MOVE3-vereffeningssoftware zijn de kringluitfouten berekend (zie bijlage A.5).

De hoogteverschillen en afstanden tussen de peilmerken zijn voor de heen- en de teruggang bepaald. Deze vormen samen met de NAP-hoogte van de aansluitpunten de invoer voor het vereffening- en berekeningsprogramma MOVE3.

Vervolgens is een eerste fase vereffening uitgevoerd ter controle op de waarnemingen volgens de methode van de kleinste kwadraten, waarbij het meetnet intern wordt getoetst. Hierbij vindt toetsing plaats van het meetnet als geheel (F-toets) en toetsing van de afzonderlijke waarnemingen (W-toets). Zowel de afzonderlijke waarnemingen als het meetnet voldoen aan de toetsingscriteria.

In geval van verwerpingen, worden één of meerdere secties hermeten tot aan de toetsingscriteria wordt voldaan.

De gemeten hoogteverschillen, de resultaten van de vereffening en de berekende hoogten van de peilmerken zijn terug te vinden in de uitvoer van MOVE3 (zie bijlage A.5).

2.3.2. Beoordeling resultaten

Bijzonderheden i.v.m. meting en vereffening zijn in bijlage C gedocumenteerd.

Metingen

Alle secties, trajecten en kringen hebben sluitfouten die liggen binnen de toleranties die vermeld zijn in hoofdstuk 2.1.

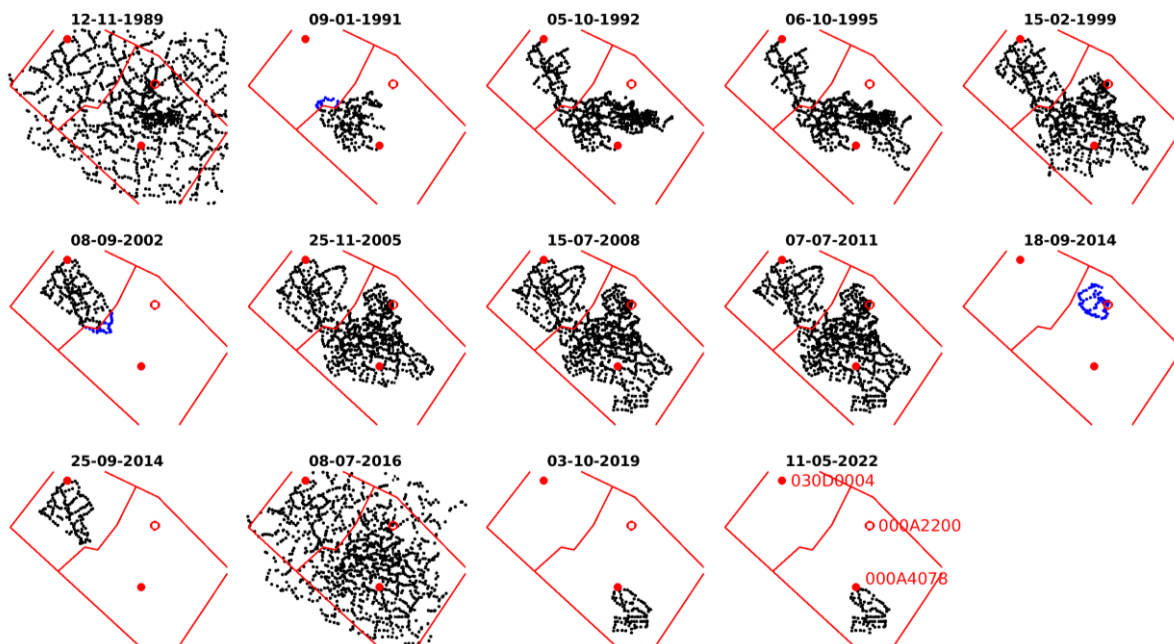
De eerste fase vereffening van het meetnet met MOVE3, waarbij alleen waarnemingen worden getoetst, levert geen verwerpingen op.

Toetsing door RWS-CIV

RWS-CIV heeft de metingen getoetst en goed bevonden. RWS-CIV is niet voornemens, de metingen aan te sluiten op het NAP-net, omdat er slechts één aansluitpunt in het meetnet zit (de twee ondergrondse merken zijn in hetzelfde peilhuis). Bij brief van 7 juli 2022 heeft RWS-CIV aan Staatstoezicht op de Mijnen meegedeeld, dat de verrichte meting in orde is bevonden op basis van een vrije vereffening.

2.4. Keuze referentiepeilmerk

Over de jaren heen zijn is het waterpasnetwerk in Zuid-Holland in variërende configuraties gewaterpast. Figuur 4 laat zien, dat er geen peilmerk bestaat, dat in alle meetcampagnes is aangemeten. Daarom is het niet mogelijk, alle meetgegevens in een enkele differentiestaat met een enkel referentiepeilmerk te rapporteren.



Figuur 4: Netwerkconfiguraties door de jaren heen. De rode punten geven de locaties van de referentiepeilmerken weer: 030D0004 (noordwesten), 000A2200 (noordoosten) en 000A4078 (zuiden). De omlijnningen duiden de referentiegebieden aan, die in het meetregister Zuid-Holland 2019 zijn gebruikt maar nu weer zijn losgelaten. Metingen van de blauw gekleurde peilmerken konden met de in het laatste meetregister gemaakte keuzes niet gerapporteerd worden.

In het laatste meetregister (NAM, 2020) zijn daarom twee differentiestaten opgeleverd, ten opzichte van de referentiepeilmerken 030D0004 en 000A4078. Daardoor konden met uitzondering van de validatiemeting boven het Berkelveld van 18 september 2014 alle netwerken gerapporteerd worden. Ook werd het rapportagegebied in twee niet-overlappende delen gesplitst, om te voorkomen, dat peilmerken in meer dan één differentiestaat voorkomen. Dat had tot gevolg, dat een klein aantal metingen (blauw in Figuur 4) in géén differentiestaat voorkwam. De gekozen aanpak had wel het

voordeel, dat de afstand van een referentiepeilmerk en daarmee de potentiële foutenvoortplanting in het waterpasnetwerk beperkt blijft.

Op recent verzoek van SodM (email d.d. 13 januari 2022) dienen nu alle metingen vanaf de nulmeting aanwezig te zijn in de differentiestaat c.q. differentiestaten. Om dit verzoek na te komen, is het aantal differentiestaten in dit meetregister verhoogd van twee naar drie, waarvoor 030D0004 (watertoren Monster), 000A2200 (ondergronds merk bij Hillegondakerk) en 000A4078 (meethuisje bij gemaal De Bosschen) als referentiepunten zijn gebruikt. Ook is de beperking op niet-overlappende deelgebieden losgelaten. In elke differentiestaat zijn nu alle hoogteverschillen in het hele rapportage-gebied opgenomen, die ten opzichte van het respectievelijke referentiepeilmerk kunnen worden berekend. Dit betekent, dat een peilmerk tot drie keer gerapporteerd kan zijn. Door de grotere afstanden naar de referentiepunten kunnen voorplantingsfouten in het netwerk nu oplopen tot 1 cm (NAM, 2018a).

2.5. Stabiliteitsanalyse

2.5.1. Methode

In deze rapportage is met een stabiliteitsclassificatie van de waterpaspeilmerken rekening gehouden, gebaseerd op de eerder gepubliceerde analysemethode (NAM, 2019a). 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 peilmerkbeweging 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.

2.5.2. Toepassing

Omdat er met de gedeeltelijke waterpassing van het rapportagegebied in 2022 nog nieuwe metingen zijn verricht, is de laatste stabiliteitsanalyse (NAM, 2019a) geactualiseerd, waarbij de stabiliteitscriteria niet zijn veranderd. De resultaten worden in stabiliteitsstaten (bijlage A.30) gepresenteerd. I.v.m. de uitbreiding van twee naar drie differentiestaten (zie paragraaf 2.4) is er ook een derde stabiliteitsstaat bijgekomen.

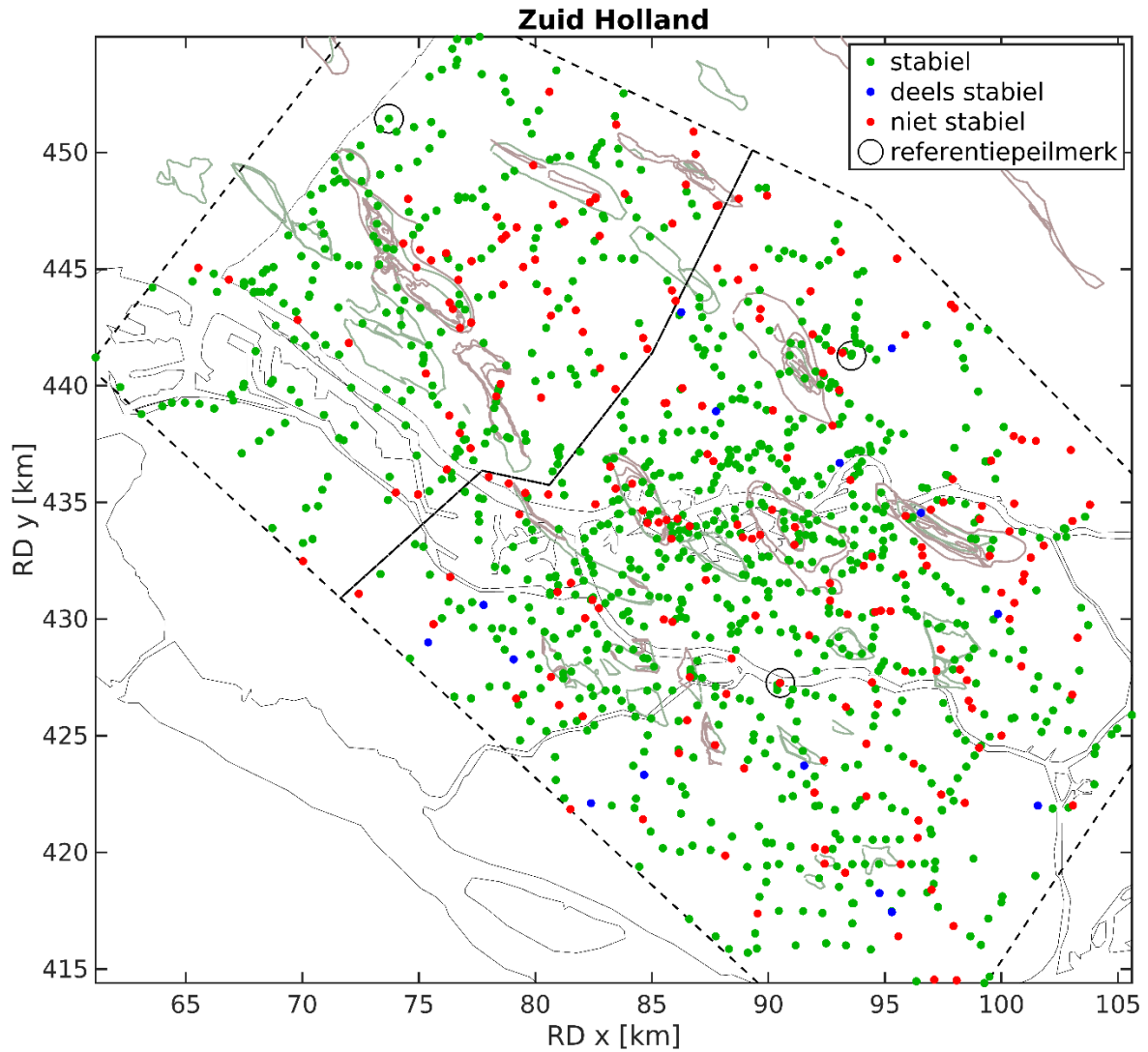
De classificatie is in Figuur 5 gevisualiseerd, en Tabel 2 geeft een statistisch overzicht. Voor de kaart en de statistische beschouwing is met de volgende aspecten rekening gehouden:

- Er worden alleen peilmerken beschouwd, die tussen 1989 en heden minimaal twee keer zijn waargenomen en daardoor een bruikbare bijdrage leveren voor het meten van bodemdaling. Andere peilmerken worden ook niet in de differentiestaten gerapporteerd.
- Het design van een waterpasnetwerk is dynamisch over de tijd. Peilmerken vervallen en nieuwe peilmerken worden bijgeplaatst. Voor de overzichtskaart en de statistische overzicht (rechter kolom) worden daarom alleen peilmerken beschouwd, die in de laatste meetepoche zijn waargenomen. Deze is 2022 voor het deelnetwerk in de Hoeksche Waard en 2016 daarbuiten.

Tabel 2: Peilmerkclassificatie qua aantallen en percentages.

	alle peilmerken	In 2016/22 gemeten
gerapporteerde peilmerken	1770 (100,0 %)	1196 (100,0 %)
niet geanalyseerde peilmerken (→ niet stabiel)	1 (0,1 %)	0 (0,1 %)
(geheel) stabiele peilmerken	1451 (82,0 %)	971 (81,2 %)
(ten minste) deels stabiele peilmerken	1477 (83,4 %)	986 (82,4 %)
deels maar niet geheel stabiele peilmerken	26 (1,5 %)	15 (1,3 %)
verstoringen op deels stabiele peilmerken	5	3
deels stabiele peilmerken met verstoringen	5 (0,3 %)	3 (0,3 %)
identificatiefouten op deels stabiele peilmerken	21	12
deels stabiele peilmerken met identificatiefouten	21 (1,2 %)	12 (1,0 %)
niet stabiele peilmerken	293 (16,6 %)	210 (17,6 %)
peilmerken met afwijkend gedrag	275 (15,5 %)	200 (16,7 %)
peilmerken met abnormale snelheid	149 (8,4 %)	100 (8,4 %)

Tabel 3 laat zien, dat de classificatie van peilmerken in de vrijwel meeste gevallen gelijk is gebleven. Volgens verwachting is voor een klein aantal peilmerken de classificatie veranderd. Dit heeft te maken met de kleine hoeveelheid nieuwe waarnemingen uit de Hoeksche Waard. Deze beïnvloeden de iteratievolgorde van de hele ruimte-tijd analyse, waardoor de berekende stabiliteitsparameter van alle peilmerken hun drempelwaardes door kleine veranderingen nu net kunnen over- of onderschrijden. Slechts één peilmerk (043B0185) kon niet met de standaardprocedure op stabiliteit geanalyseerd worden, omdat het aan de rand van het analysegebied ligt. Daarmee ligt het echter ook buiten de invloedssfeer van de gasvelden en is niet verder van belang.



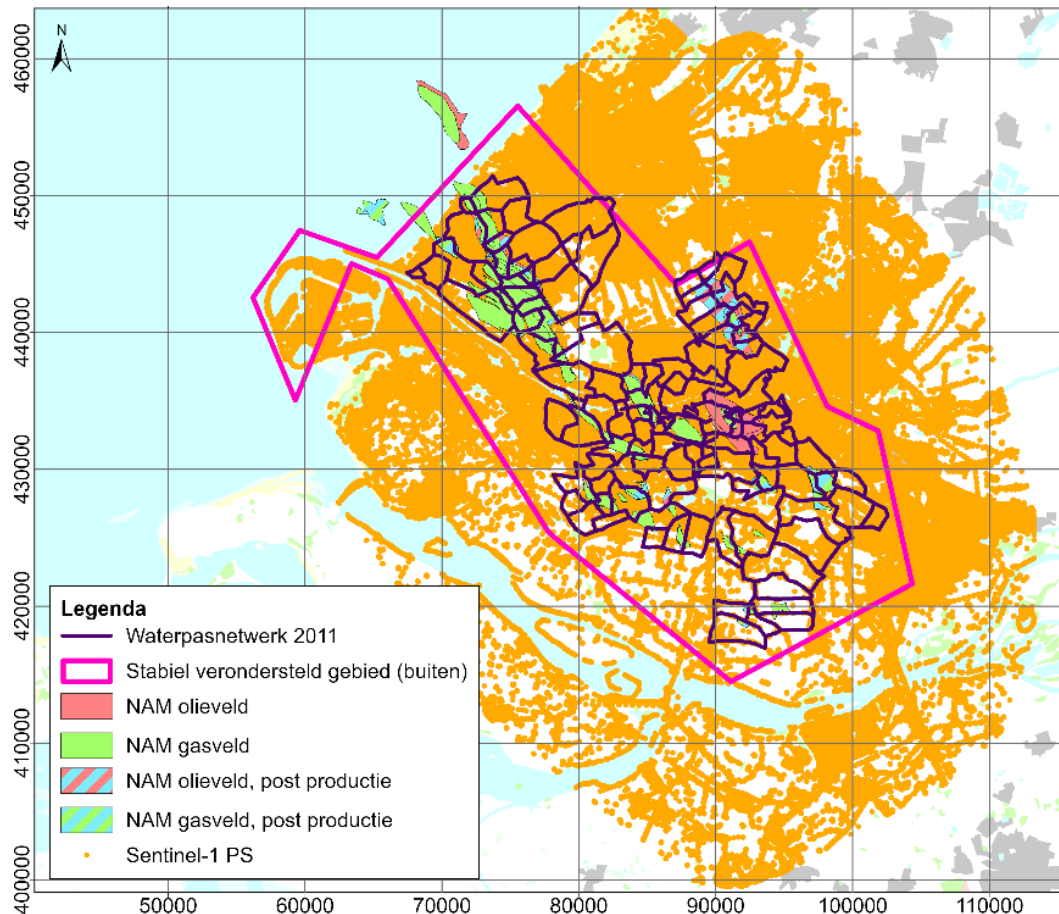
Figuur 5: Classificatie van peilmerken, die in de laatste meetcampagne zijn waargenomen. De laatste meetcampagne was in 2022 voor het deelnetwerk De Hoeksche Waard en in 2016 voor de rest van het netwerk. De classificatie in het noordwestelijke deelgebied komt overeen met de differentiestaat met referentiepeilmerk 030D004; in het zuidoostelijke deelgebied is te zien, hoe de peilmerken ten opzichte van referentiepeilmerk 000A4079 zijn geclassificeerd.

Tabel 3: Herclassificatie van waterpaspeilmerken ten opzichte van het meetregister Zuid-Holland 2019 (NAM, 2020). Toelichtingen: 1) peilmerken, die in 2022 voor de tweede keer zijn gemeten; 2) peilmerken, die na de nulmeting in 1989 niet meer zijn gemeten; 3) zonder het niet gerapporteerde peilmerk, dat in Tabel 2 als niet stabiel peilmerk is meegeteld.

Laatste stabiliteitsanalyse (NAM, 2020)	Herziening voor dit meetregister					Totaal
	Stabiel	Min. deels stabiel	Niet stabiel	Niet geanalyseerd	Niet gerapporteerd	
Stabiel	1440	1	4	0	25	1470
Deels stabiel	4	24	0	0	0	28
Niet stabiel	3	1	288	0	5	297
Niet geanalyseerd	0	0	0	1	0	1
Niet gerapporteerd	4	0	0	0	–	4 ¹⁾
Totaal	1451	26	292 ³⁾	1	30 ²⁾	1800

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 en relatief in de tijd (t.o.v. de vroegste opname).



Figuur 6: Bedekking van de geproceste Sentinel-1 data. Het gebied buiten de paarse lijn is als stabiel verondersteld referentiegebied gebruikt.

De gegevens verwerking is uitgevoerd door Skygeo B.V., Delft. Vervolgens heeft de NAM de aangeleverde deformatietijdseries 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 (middeling over negen opeenvolgende opnames). Dit 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 vinden voornamelijk plaats in de omgeving van de randen van de gasvelden. 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...0,8 mm/a.

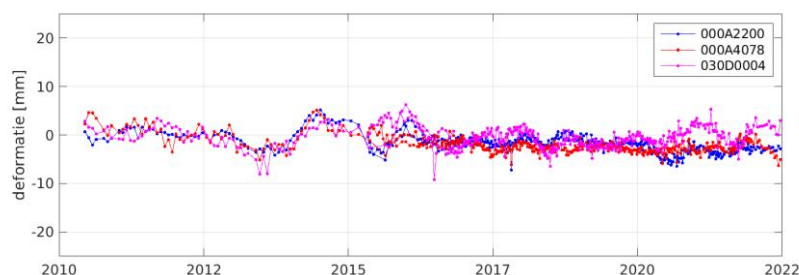
4. Combinatie

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. Aandachtspunten zoals ruimtelijke referentie en koppeling van tijdseries worden in het volgende nader toegelicht, voordat de resultaten worden besproken.

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 gerelateerd zijn (zie Figuur 6). 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 geselecteerde PS binnen een straal van 1 km rond de referentiepeilmerken geen residuele deformatie laten zien (zie Figuur 7).



Figuur 7: Gemiddelde tijdseries (mediaan) van geselecteerde PS binnen een straal van 1 km rond de referentiepeilmerken.

De PS, waarop deze tijdseries gebaseerd zijn, zijn geselecteerd op hun representativiteit voor de diepe bodemdaling volgens paragraaf 3.1. De selectie is verder verfijnd met behulp van aanvullende drempelwaarden op de puntkwaliteit (temporele coherentie minimaal 0,8) en de hoogte boven het maaiveld (minimaal 4 m). PS op een zekere hoogte hebben een grotere kans, op een gebouw met een stabiele fundering te liggen. Ook al is de hoogtebepaling van de PS slechts op enkele meters nauwkeurig, vanwege het grote aantal beschikbare punten kan de representativiteit van de gemiddelde tijdserie door het instellen van een drempelwaarde merkbaar verbeterd worden.

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 de twee InSAR satellieten (Radarsat-2 en Sentinel-1) onderling gecombineerd worden. Bij de aansluiting wordt ook rekening gehouden met de resultaten van de

stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (zie paragraaf 2.5). 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 B.

4.2.1. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken

In de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (paragraaf 2.5) wordt een deel van de peilmerken als niet stabiel verondersteld (ca. 17 % van alle gerapporteerde peilmerken). 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 zijn 2 % van de peilmerken “deels stabiel verondersteld”. Dat betreft peilmerken, waarop identificatiefouten en/of verstoringen identificatiefouten zijn geconstateerd (zie paragraaf 2.5.1). Waterpasmetingen, 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 overlappend 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 tijdseries bij verstoringen in twee delen gesplitst, zodat de InSAR deformatie met alle delen van de waterpas tijdserie tot een representatieve tijdserie 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 3.1) zijn gebaseerd.

4.2.2. Twee tijdseries per peilmerk

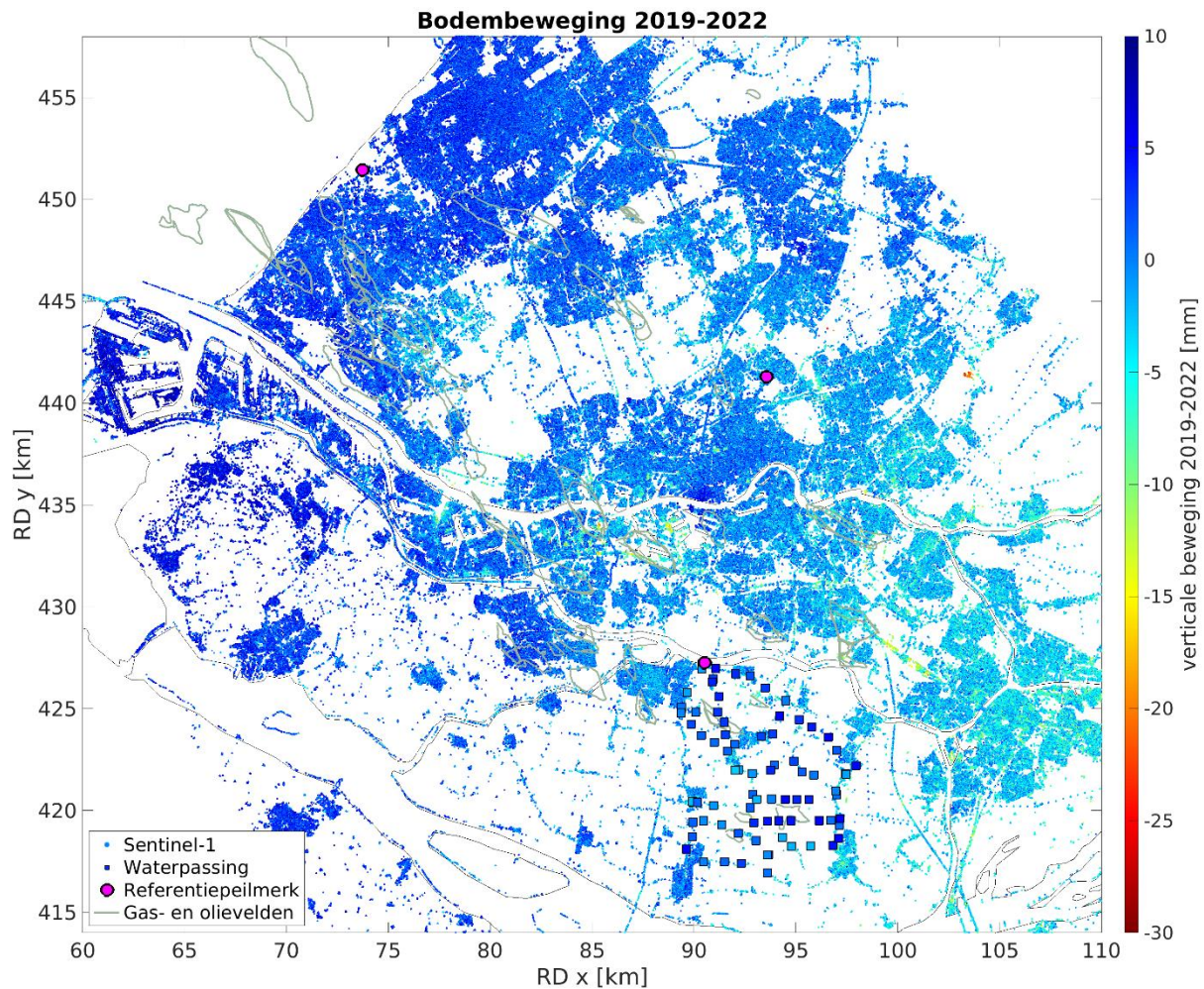
Voor een aantal peilmerken worden in de gecombineerde differentiestaat dus twee tijdseries gerapporteerd. Daarvoor zijn de volgende redenen te bedenken:

- 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.
- Het peilmerk is deels stabiel verondersteld en bevat geconstateerde verstoringen, waar de tijdserie in delen is opgesplitst.

De tweede bij een peilmerk behorende tijdserie is met een suffix op het peilmerknummer gekenmerkt (XXXXXXa). De benaming volgt de chronologische volgorde van de eerste waarneming per deeltijdserie.

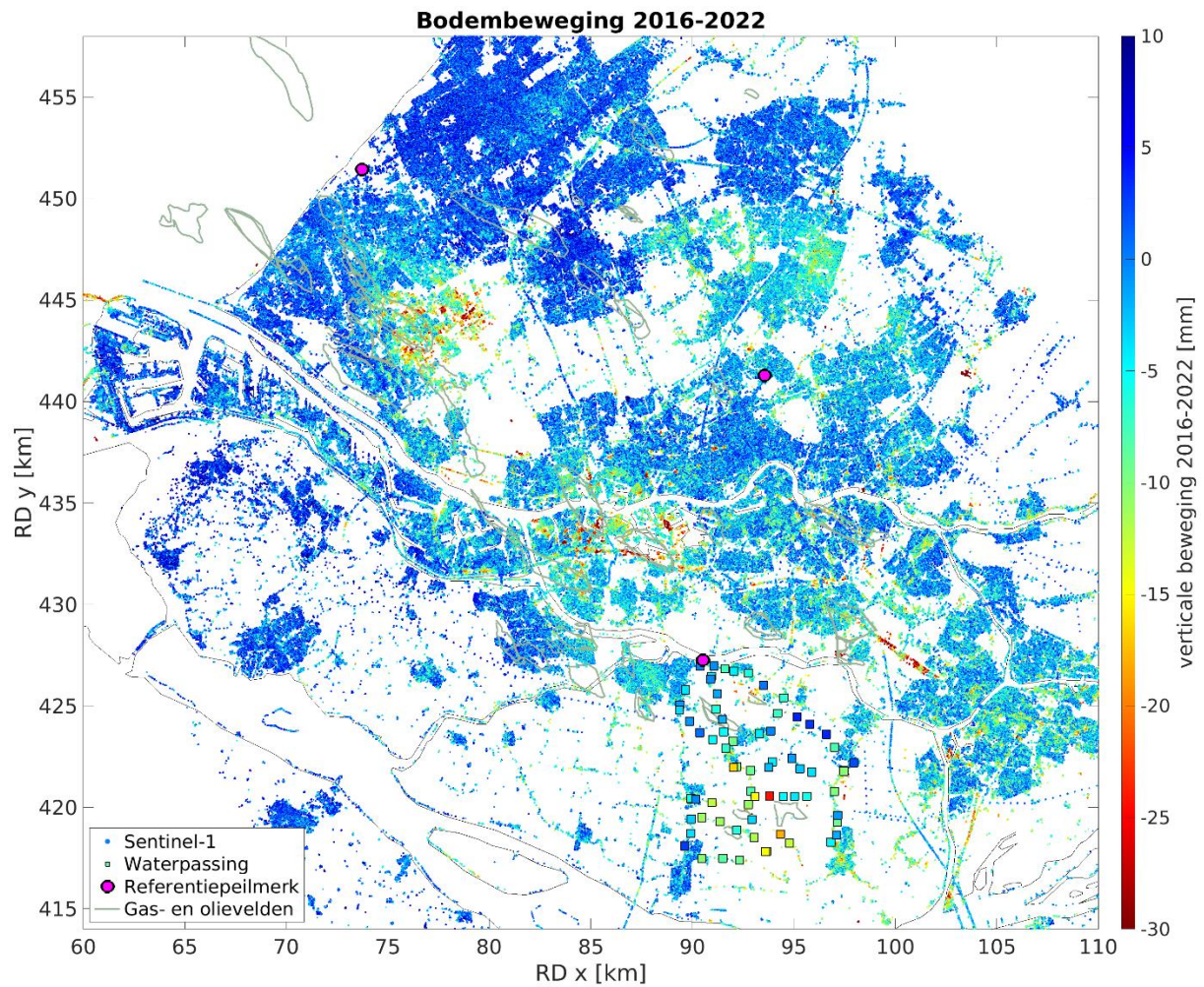
4.3. Resultaten

Figuur 8 toont de verticale beweging in de periode 2019-2022. Alle grootschalige patronen zijn kleiner dan 10 mm en vallen daarmee binnen de meetonzekerheid. Ook na het selecteren van representatieve PS zijn er een aantal lokale variaties zichtbaar. Dit betreft echter een minderheid van de PS, en het betreft vaak lokale afwijkingen langs infrastructuur.



Figuur 8: Bodembeweging (mm) bepaald uit InSAR en waterpassen voor de periode 2019-2022. Deze vergelijkende kaart kan voor andere tijdvakken niet worden gemaakt, omdat de deformatie bij aansluiting van Radarsat-2 (tot 2016) en Sentinel-1 (sinds 2015) op elkaar niet PS-gewijs kan worden berekend.

In Figuur 9 wordt het langere interval 2016-2022 beschouwd. Daarin worden significante en over grotere afstanden coherente bodemdalingenpatronen zichtbaar, die ook buiten de gasvelden optreden. Deze zijn steeds kleiner dan 15 mm. Lokale variaties, die op grond van hun ruimtelijk bereik wellicht met ondiepe oorzaken geassocieerd kunnen worden, lopen op tot enkele centimeters.

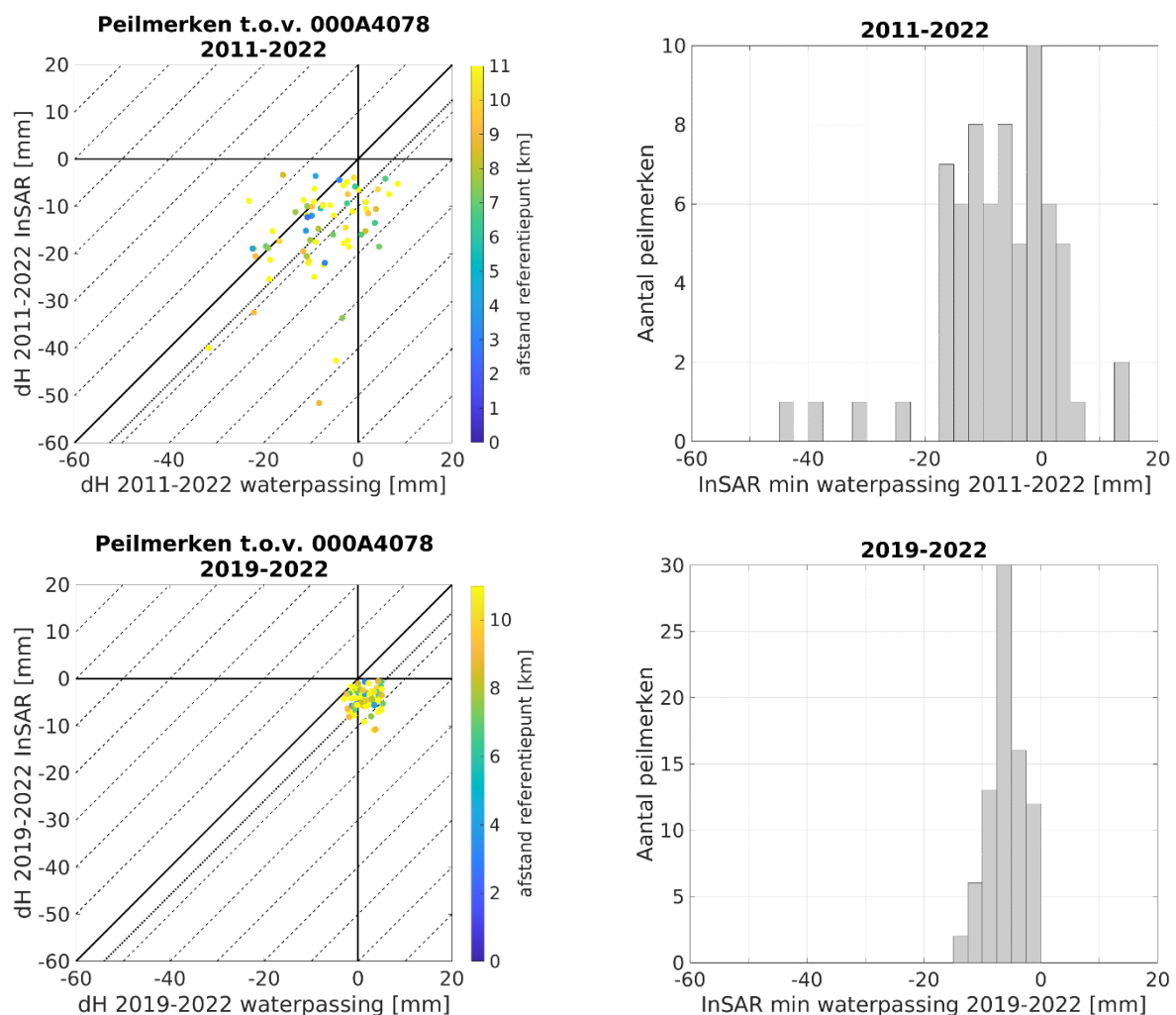


Figuur 9: Bodembeweging (mm) bepaald uit InSAR en waterpassen voor de periode 2016-2022. Deze vergelijkende kaart kan voor andere tijdvakken niet worden gemaakt, omdat de deformatie bij aansluiting van Radarsat-2 (tot 2016) en Sentinel-1 (sinds 2015) op elkaar niet PS-gewijs kan worden berekend.

5. Vergelijking InSAR en waterpassen

De vergelijking tussen InSAR en waterpasmetingen is uitgevoerd ten opzichte van de jaren 2019 (laatste waterpassing) en 2011 (langst mogelijk tijdvak). Voor InSAR zijn alleen de meetpunten (PS) gebruikt die representatief zijn voor het dominante deformatie regime, op basis van overeenkomst van de bodembeweging met naburige punten (zie paragraaf 3.1). Voor waterpassen zijn alleen de peilmerken gebruikt die als geheel of deels stabiel zijn geclassificeerd in de stabiliteitsanalyse (zie paragraaf 2.5). Zowel de gebruikte PS als de gebruikte peilmerken kunnen dus als representatief worden beschouwd voor bodembeweging door diepe oorzaken. De waterpassingen worden vergeleken met de InSAR deformatie door gemiddelde tijdseries van alle PS binnen een straal van 500 m rond de peilmerklocaties te berekenen en deze in tijdvakken van een kwart jaar vóór en ná de tijdstippen van de waterpassing te middelen.

Figuur 10 toont de scatterplots en de histogrammen van de verschillen tussen bodembeweging bepaald uit InSAR en waterpassen in de periodes 2011-2022 en 2019-2022.



Figuur 10: Vergelijking bodembeweging (mm) tussen InSAR en waterpassen voor de periodes 2011-2019 en 2016-2019 op locaties van stabiel veronderstelde peilmerken..

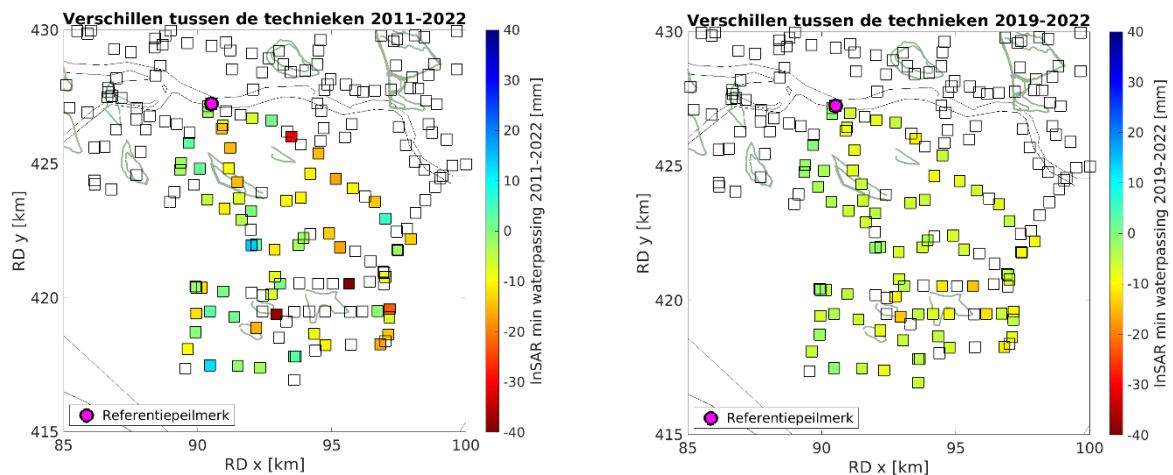
Voor de periodes 2011-2022 en 2016-2022 zijn respectievelijk 82 % en 100 % van de verschillen tussen InSAR en waterpassen kleiner dan 1 cm (zie Tabel 4). Dit is een lichte afname ten opzichte van de 86 %

in de vergelijking tussen InSAR en waterpassen voor de periode 2011-2019 in het Meetregister Zuid-Holland 2019 (NAM, 2020), die kan worden verwacht bij een uitbreiding van het tijdvak om drie jaar.

Tabel 4: Absolute afwijkingen in aantallen peilmerken van de verschillen tussen waterpassing en InSAR, ten opzichte van het gemiddelde verschil.

Tijdvak	Aantal	>1 cm	>1.5 cm	>2 cm	>1 cm	>1.5 cm	>2 cm
2011-2022	68	12	6	5	17,6 %	8,8 %	7,4 %
2019-2022	79	0	0	0	0,0 %	0,0 %	0,0 %

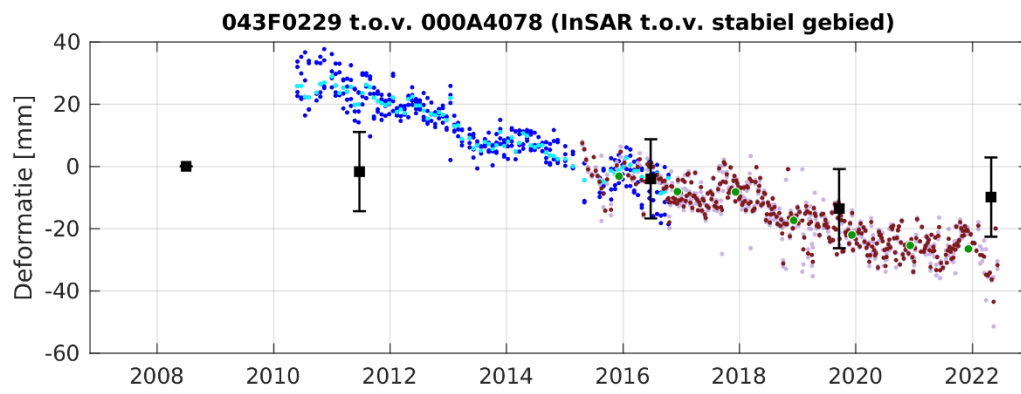
Figuur 11 toont de ruimtelijke verdeling van de verschillen tussen waterpassen en InSAR. De peilmerken met grote afwijkingen volgen geen systematisch patroon.



Figuur 11: Ruimtelijke verdeling van de verschillen in bodembeweging tussen InSAR en waterpassen, ten opzichte van het gemiddelde verschil, voor de periodes 2011-2022 en 2019-2022 op locaties van stabiel veronderstelde peilmerken. Peilmerken met niet gevulde vakjes zijn in één van de twee campagnes niet gemeten.

Bij beschouwing van een langere periode is het al vanuit de meetonzekerheid te verwachten, dat de met verschillende technieken waargenomen hoogteverschillen minder goed overeenkomen. Bij een klein aantal peilmerken is echter sprake van verschillen, die niet door de meetonzekerheid verklaard kunnen worden. De grootste afwijking vertoont peilmerk 043F0229 met een verschil van 36 mm tussen 2011 en 2022 t.o.v. het gemiddelde verschil tussen waterpassing en InSAR (zie Figuur 12). De waarschijnlijke verklaring hiervoor is, dat de InSAR-meetpunten in grotere mate onderhevig zijn aan ondiepe compactie dan de peilmerken. In het geval van peilmerk 043F0229 is de beschikbaarheid van slechts twee PS binnen een straal van 500 m ook zeer beperkt, waardoor de meting minder robuust wordt.

Terwijl op enkele peilmerken significante verschillen worden geconstateerd, is er voor de grote meerderheid van de peilmerken een goede overeenkomst tussen waterpassing en InSAR.



Figuur 12: Tijdseries van peilmerk 043F0229 (zwarte vierkantjes) en alle PS binnen een straal van 500 m (gekleurde punten). Voor de waterpassing is de eerste meting op nul gesteld, en de InSAR-tijdserie is dusdanig erop aangesloten, dat het gemiddelde verschil nul is.

6. Peilmerkcontrole

In het kader van de instandhouding van het waterpasnetwerk in Zuid-Holland als mogelijke terugval optie in de toekomst, zijn in 2022 de (stabiele) peilmerken van dat netwerk gecontroleerd op hun aanwezigheid (met uitzondering van de peilmerken die onderdeel zijn van de waterpassing in de Hoeksche Waard).

Hiervoor zijn de peilmerken langs de waterpastrajecten van 2011 geselecteerd boven de voorkomens in het meetplan Zuid-Holland 2022 en een binnen een buffer gelijk aan de reservoirdiepte.

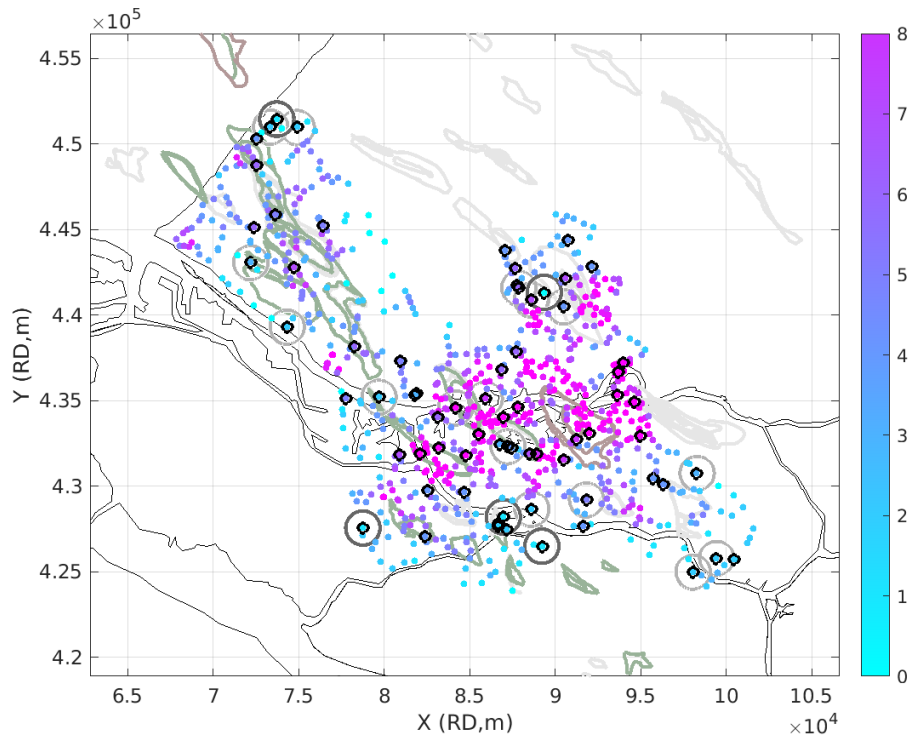
De controle van de peilmerken is gedaan door landmeters met behulp van een GIS App. In deze App is een inspectie tool ingericht, zodat de landmeter direct bij visuele controle in het veld de aan- dan wel afwezigheid van een peilmerk kan rapporteren. Hierbij worden ook foto's gemaakt van de peilmerken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

Er zijn in totaal 829 peilmerken gecontroleerd, waarvan er 53 niet meer aanwezig waren (ca. 6.5%), zie bijlage D. Tevens waren van 17 peilmerken de locaties niet toegankelijk, zie eveneens bijlage D. De peilmerken die niet toegankelijk waren voor controle zijn hieronder in de beoordeling meegenomen als zijnde 'niet aanwezig/verdwenen'.

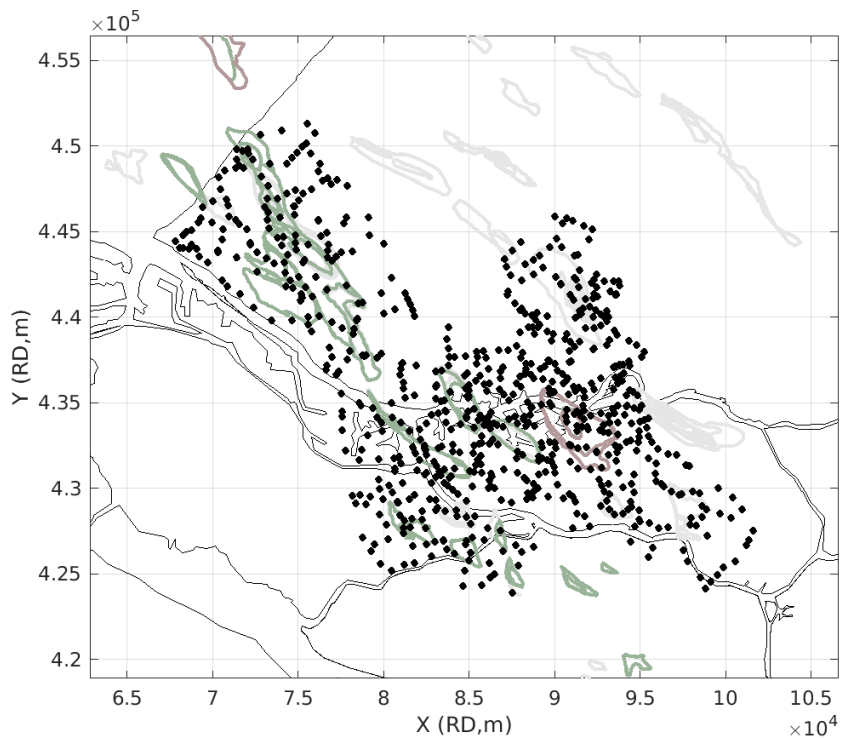
De volgende analyse is uitgevoerd om te beoordelen of het nodig is om nieuwe peilmerken te plaatsen:

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 13. De locaties met niet aanwezige, niet te vinden of niet te bereiken 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 5 locaties liggen er minder dan 2 peilmerken in een straal van 1 kilometer, waarvan 4 locaties ruim buiten de contouren van de producerende gasvelden liggen. Op 1 locatie is dit niet geval; het betreft hier peilmerken op een terrein van een waterbedrijf in Spijkenisse, dat niet toegankelijk was tijdens de peilmerk controle. NAM zal proberen alsnog toegang te krijgen tot het terrein of bevestiging te krijgen van het waterbedrijf dat de peilmerken nog aanwezig zijn. Vooralsnog hoeven er geen peilmerken te worden bijgeplaatst. Figuur 14 toont de aanwezige (bereikbare) stabiele peilmerken in Zuid-Holland.



Figuur 13: Gecontroleerde peilmerken. Per peilmerk locatie wordt door middel van een kleurschaal 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 grijze cirkels met een straal van 1 km weergegeven (donkergrijze cirkels geven de locaties aan met minder dan 2 peilmerken in een straal van 1000 m). Grijze contouren: gasvelden (donkergrijs in productie)



Figuur 14: Aanwezige stabiel geclassificeerde peilmerken in het waterpas netwerk Zuid-Holland.

7. Conclusies en vooruitzichten

Voor het rapportagegebied Zuid-Holland is in 2022 InSAR als primaire meettechniek gebruikt. De InSAR deformatie metingen zijn berekend uit een Sentinel-1 dataset in de periode van 2015-2022 en met overlap aangesloten op de voorgaande Radarsat-2 tijdseries. Om de nodige punt dichtheid te kunnen garanderen, is in De Hoeksche Waard een kleine waterpassing uitgevoerd. De resultaten daarvan komen over een termijn van enkele jaren binnen de nauwkeurigheidsmarges overeen met InSAR en lopen over een periode van 11 jaar slechts op een klein aantal peilmerklocaties uiteen.

Het is bekend dat in het rapportage gebied relatief veel autonome bewegingen van meetpunten voorkomen (ondiepe (veen)compactie en zetting van objecten), wat enkele lokale afwijkingen verklaart. Door de grote ruimtelijke dichtheid van InSAR is een bodemdalingskaart gebaseerd op deze techniek echter minder gevoelig voor autonome bewegingen dan waterpassingen.

De met InSAR gemeten bodemdaling in de periode 2019-2022 is vrijwel overal boven de gasvelden in Zuid-Holland minder dan 1 cm.

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. Continuïteit blijft door de voor het tweede kwartaal van 2023 geplande lancering van Sentinel-1C 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. Onder voorbehoud van een na-controle op een bedrijventerrein hoeven er geen nieuwe peilmerken te worden bijgeplaatst.

Bijlagen

A. Geleverde data

Het meetregister Zuid-Holland 2022 bevat naast dit rapport een aantal digitaal opgeleverde bestanden. Deze zijn in deze bijlage geïventariseerd.

A.1. Differentiëestaat InSAR

De resultaten van de InSAR processing (Sentinel-1, 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_Zuid-Holland_2022.csv  
Sentinel-1_MR_Zuid-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 6 op blz. 14).

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). Zoals in paragraaf 2.4 is uitgelegd, zijn drie aparte differentiestaten met verschillende referentiepunten nodig, om de complete historie van meetgegevens te bevatten. De betekenis van de kolommen is in een “leesme”-bestand verklaard. Zie bestanden:

```
000A0078_1989-11-12_MR_Zuid-Holland_2022.csv  
000A2200_1989-11-12_MR_Zuid-Holland_2022.csv  
030D0004_1989-11-12_MR_Zuid-Holland_2022.csv  
00000000_1989-11-12_MR_Zuid-Holland_2022.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. Stabiliteitsstaten

De resultaten van de herziening van de peilmerk-stabiliteitsanalyse, zoals toegelicht in paragraaf 2.5, zijn in drie stabiliteitsstaten aangeleverd en in een “leesme”-bestand toegelicht:

```
sta_zh2022_000A4078.csv  
sta_zh2022_000A2200.csv  
sta_zh2022_030D0004.csv  
sta_zh2022.leesme.txt
```

A.4. Kaart met hoogteverschillen

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

```
Kaart_MR_Zuid-Holland_2022_EP202002201026.pdf
```

De hoogteverschillen uit InSAR zijn berekend als mediaan van de individuele tijdseries van alle (dus minimaal één) PS binnen een straal van 500 m om de peilmerken. Vervolgens zijn de gemiddelden in de tijd in vakken van een kwart jaar vóór en ná de (gemiddelde) tijdstippen van de waterpassing berekend. Deze kunnen van de in de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2) gerapporteerde hoogteverschillen, licht afwijken. De laatste zijn jaarlijkse gemiddelden en berekend op tijdstippen met afstanden van precies één jaar, die in het algemeen niet met de gemiddelde tijdstippen van de waterpassingen overeenkomen.

A.5. MOVE3 bestanden

Invoer- en uitvoerbestanden van de de eerste fase vrije vereffening van het waterpas-netwerk met MOVE3 zijn als zip-bestand aangeleverd:

```
MOVE3_MR_Zuid-Holland_2022.zip
```

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 Zuid Holland relevante verwerkingsstappen.

1. Combinatie van InSAR-tijdseries van opeenvolgende satellietmissies

- a. De Sentinel-1 tijdserie wordt op de Radarsat-2 tijdserie aangesloten. De onderlinge offset wordt bepaald als gemiddelde van de volgende differenties binnen het overlappend tijdvak:
 - i. deformatie van de Sentinel-1 tijdserie min de, op de acquisitietijdstippen van de Sentinel-1 tijdserie, lineair geïnterpoleerde, deformatie van de Radarsat-2 tijdserie
 - ii. deformatie van de Radarsat-2 tijdserie min de, op de acquisitietijdstippen van de Radarsat-2 tijdserie, lineair geïnterpoleerde deformatie van de Sentinel-1 tijdserie
- b. Alle waarnemingen van deze twee tijdseries vormen een gecombineerde InSAR tijdserie.

2. **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.

3. 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.
- c. Het is mogelijk, dat de tijdseries van InSAR 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.

- 4. Vastlegging van absolute waardes:** 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. Documentatie waterpassing

Bij de inrichting is gebruik gemaakt van bestaande peilmerken uit het NAP-peilmerkenregister. De totale lengte van het meetnet is 77 kilometer.

C.1. Inrichting en realisatie meetnet

Het meetnet bestaat in totaal uit 104 peilmerken, waarvan 2 ondergrondse peilmerken binnen eenzelfde peilhuis. 100 peilmerken zijn zowel in 2019 als in 2022 aangemeten.

De peilmerken 037G0584, 037H0001 en 043F0176 zijn vervallen en vervangen door de nieuwe peilmerken 037G0703, 037H0822 en 043F0285. Het peilmerk 043F0191 is tevens vervallen maar niet vervangen, omdat er voldoende andere peilmerken in de buurt zijn. Peilmerk 043F0218 was onbereikbaar en kon daarom niet worden gemeten.

C.2. Bijzonderheden vereffening

Het traject tussen 043F0208 en 043F0258 is hermeten i.v.m. een te hoge w-toets.

Van peilmerk 037H0368 is de onderkant (037H0368_OK) gemeten. Met de boutdikte van 22 mm is in de vereffening rekening gehouden door een pseudo-waarneming van 037H0368_OK naar 037H0368 in te voeren.

D. Lijst met niet aanwezige peilmerken uit de peilmerkcontrole

Tabel D.1: Lijst met verdwenen peilmerken.

Peilmerk	X (RD,m)	Y (RD,m)	Aanwezig	Opmerking
000A2728	94584	434944	N	Nieuwbouw.
000A2776	94948	432972	N	Weg vervangen.
000A2836	79668	435223	N	Peilmerk niet te vinden. Asphalt ipv. klinkers; andere begroeiing.
000A3520	80866	431858	N	Peilmerk niet te vinden. Bestrating ipv. gras.
030D0002	73340	451000	N	Nieuw huis.
030D0117	72500	450300	N	Gebouw staat er niet meer.
030D0143	74890	450980	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037B0051	72400	445160	N	Huis gesaneerd.
037B0144	73620	445900	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037B0159	72540	448770	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037B0248	74710	442780	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037B0249	78240	438150	N	Peilmerk verdwenen; loods gesloopt.
037B0346	76410	445250	N	Peilmerk niet te vinden; infrastructuur volledig veranderd.
037D0067	77760	435140	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037D0310	78750	427560	N	Nieuwe gevel.
037E0096	87840	441600	N	Aanpassing A13.
037E0369	89350	441330	N	Aanleg verlengde A16.
037E0490	87680	437860	N	Loods gesloopt.
037E0561	87630	442690	N	Geen peilmerk aanwezig.
037E0596	87740	441770	N	Damwand in de weg.
037E0600	88580	440910	N	Verwijderd; bouw verlengde A16.
037F0203	90560	442150	N	Het huis bestaat niet meer.
037F0352	92110	442830	N	Bouw verlengde A16.
037F0370	90750	444390	N	Huis volledig gerenoveerd/nieuwbouw. Geen bout in gevel.
037F0500	90500	440500	N	Woonwijk in aanbouw.
037G0165	87800	434620	N	Bout verdwenen.
037G0320	84660	429680	N	Gebouwen gesloopt.
037G0334	84740	431790	N	Gebouw gesloopt.
037G0337	82080	431910	N	Peilmerk niet te vinden; gewijzigde situatie bouw nieuwe Botlekbrug.
037G0382	83160	432260	N	Viaduct gesloopt.
037G0445	82520	429750	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037G0459	86840	436830	N	Naar links verplaatst - verandering kademuur.
037G0503	88900	431900	N	Bout verwijderd.
037G0508	80950	437350	N	Peilmerk is er niet meer.
037G0512	89210	426500	N	Peilmerk niet te vinden; pand gesloopt.
037G0564	87420	432240	N	Nieuwbouw; gebouw gesloopt.
037G0572	88610	431820	N	Kast voor bout geplaatst.

037G0595	87210	432330	N	Nieuwbouw; trafo verwijderd.
037G0626	82380	427060	N	Onder het asfalt.
037G0652	85480	433040	N	Gebouw gesloopt
037G0672	81780	435360	N	Object met peilmerk bestaat niet meer.
037H0063	96360	430120	N	Bout verwijderd of begraven bij vernieuwing bestrating en aanleg groenstrook.
037H0112	93660	436680	N	Verwijderd met renovatie.
037H0193	91200	432770	N	Lijkt gesloopt (bouw nieuwe wijk).
037H0206	91960	433120	N	Gevel bedekt - constructiewerk.
037H0280	93620	435340	N	Renovatie werkzaamheden.
037H0397	98260	430770	N	Peilmerk verdwenen; pand gesloopt.
037H0550	90490	431550	N	Muur overheen gemetseld. Bout verdwenen in voeg.
037H0688	95710	430480	N	Verbouwd.
037H0696	91751	429300	N	Paal vervangen.
037H0715	91630	427680	N	Peilmerk verdwenen.
037H0725	99750	425950	N	Gevelbeplating aangebracht.
038C0364	100440	425740	N	Peilmerk niet te vinden; adres en foto lijken niet te kloppen.

Tabel D.2: Lijst met niet bereikbare peilmerken.

Peilmerk	X (RD,m)	Y (RD,m)	Opmerking
000A2838	81850	435430	Niet toegankelijk - achter hek.
000A4007	93968	437214	Sleutel voor nodig.
000A5007	93971	437220	Sleutel voor nodig.
030D0003	73720	451450	Alleen toegankelijk op afspraak.
030D0004	73720	451450	Alleen toegankelijk op afspraak.
037B0173	72170	443080	Niet te bereiken; afgesloten privé terrein.
037B0233	74280	439340	Door hek niet bereikbaar.
037E0545	87050	443780	Alleen toegankelijk op zaterdag.
037G0223	85880	435120	Niet te bereiken.
037G0227	86960	428210	Alleen toegankelijk op afspraak.
037G0239	88600	428680	Afgesloten jachthaven.
037G0398	86900	433980	Afgesloten terrein.
037G0448	86670	427700	Alleen toegankelijk op afspraak.
037G0449	86660	427850	Alleen toegankelijk op afspraak.
037G0450	87160	427480	Alleen toegankelijk op afspraak.
037G0563	86750	432460	Geen toegang tot gemaal.
037H0576	98100	425100	Op afgesloten priveterrein.

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): Meetregister bij het meetplan Zuid-Holland – Rapportage van satelliet radar interferometrie en de nauwkeurigheidswaterpassing Zuid-Holland 2019. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 14 februari 2020, EP201911202029.
- RWS (2021): [Productspecificaties Beheer NAP 2021 – secundaire waterpassingen t.b.v. de bijhouding van het NAP](#). Rijkswaterstaat, 25 januari 2021’.