

Meetregister bij het meetplan Zuidoost Drenthe

Rapportage van satelliet radar interferometrie

Zuidoost Drenthe 2024

10 september 2024

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Documentnummer: NAM EP202408212916

Samenvatting

In dit meetregister worden de actuele bodemdalingsmetingen van Zuidoost Drenthe gepubliceerd. Zij zijn gebaseerd op radarbeelden, die tussen 2015 en 2019 met de satelliet Sentinel-1 zijn opgenomen en in 2024 met de Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) techniek zijn geprocest. De resulterende deformatie tijdseries zijn op de locaties van bestaande peilmerken omgerekend en daar gecombineerd met de bestaande waterpassingen en eerder gerapporteerde waarnemingen van de satelliet Radarsat-2 (2011-2019). Bij de combinatie wordt rekening gehouden met een stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken en een representativiteitsclassificatie van InSAR meetpunten. Het resultaat zijn gecombineerde tijdseries uit vijfjaarlijkse waterpassingen tussen 1952 en 2014 en jaarlijks gemiddelde InSAR deformatie tussen 2011 en 2024.

In het grootste deel van Zuidoost-Drenthe wordt in de afgelopen vijf jaar geen significante bodembeweging waargenomen. Een uitzondering vormt het gebied van Schoonebeek, waar lokale bodemdaling tot ongeveer 1 cm optreedt. Deze wordt in een klein deelgebied gecompenseerd door in de tijd beperkte bodemstijging met een lokaal maximum van 3,5 cm tussen 2016 en 2022.

Continuïteit voor de toekomst wordt gewaarborgd door vervangende nieuwe satellieten van de Sentinel-1 missie. Ook al is het streven, om in toekomstige meetregisters weer van de InSAR techniek gebruik te maken, een hernieuwde waterpassing blijft als terugvaloptie gewaarborgd. De hiervoor noodzakelijk geachte peilmerken zijn in het veld op aanwezigheid gecontroleerd. Er hoeven geen nieuwe peilmerken te worden bijgeplaatst.

Inhoudsopgave

1. Introductie.....	4
1.1. Keuze meettechniek.....	4
1.2. Beschikbaarheid meetgegevens.....	4
1.3. Leeswijzer	5
2. Stabiliteitsanalyse waterpassingen	6
3. PS-InSAR	7
3.1. Reflectiegedrag.....	7
3.2. Puntselectie	9
3.3. Conversie naar de verticaal	9
3.4. Jaarlijks gemiddelde	10
3.5. Resultaten.....	10
4. Combinatie	14
4.1. Referentie in de ruimte	14
4.2. Aansluiting van tijdseries op elkaar.....	14
4.2.1. Inachtneming stabiliteitsanalyse waterpaspeilmerken.....	15
4.2.2. Meerdere tijdseries per peilmerk.....	15
5. Instandhouding waterpasnetwerk	16
5.1. Selecteren peilmerken	16
5.2. Peilmerkcontrole in het Veld.....	16
5.3. Analyse	17
6. Conclusies en vooruitzichten.....	19
Bijlagen	20
A. Geleverde data	20
A.1. Differentiestaat InSAR	20
A.2. Gecombineerde differentiestaat.....	20
A.3. Stabiliteitsstaat.....	20
A.4. Kaart met hoogteverschillen	21
B. Combinatie procedure.....	22
Referenties	24

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 Zuidoost-Drenthe 2024.

Het nu voorliggende rapport vormt het officiële en openbare ‘meetregister’ behorende bij het meetplan Zuidoost-Drenthe 2024. 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.

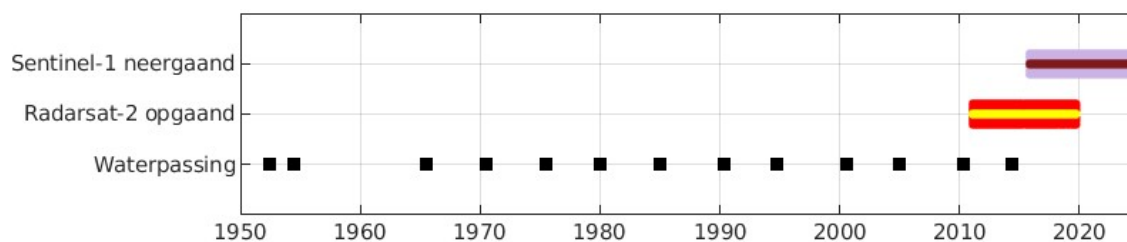
1.1. Keuze meettechniek

Tot 2014 is in Zuidoost-Drenthe waterpassing als inwinningstechniek voor bodembewegingsmetingen gebruikt. In het meetregister van 2019 (NAM, 2020) is voor PS-InSAR (Persistent Scatterer satelliet radar interferometrie) als meettechniek gekozen. De InSAR-waarnemingen van de satelliet Radarsat-2 werden dusdanig verwerkt, dat de veelal naar 1975 teruggaande waterpas-tijdseries voor individuele peilmerklocaties door InSAR-metingen konden worden voortgezet. In een addendum (NAM, 2023) heeft NAM de tijdseries aangevuld met waarnemingen uit het gebied van Schoonebeek, die teruggaan tot 1952.

Dit meetregister vult de tijdseries van het hele rapportagegebied aan met nieuwe InSAR-waarnemingen van de satelliet Sentinel-1 uit de jaren 2015-2024. Het is samengesteld in lijn met het Annex Meetplan Zuid-Holland 2019 (NAM, 2018). Door middel van dit annex geeft NAM invulling aan de aspecten, die SodM van groot belang acht voor het monitoren van bodemdaling met PS-InSAR. De daarin beschreven procedures en kwaliteitsborgingen zijn voor de NAM generiek van toepassing op alle InSAR meetregisters, waarbij InSAR als hoofdtechniek ingezet kan worden voor het monitoren van bodemdaling. Deze houden in, dat de ruimtelijke verdeling van de waterpaspeilmerken geschikt moet blijven voor een toekomstige waterpassing als terugvaloptie op de historische meettechniek. Hieraan is invulling gegeven met een hernieuwde peilmerkcontrole in het veld.

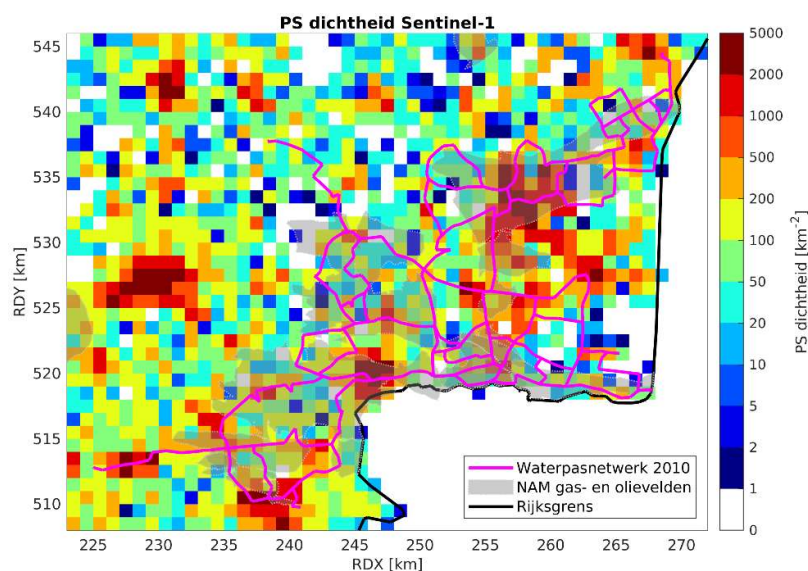
1.2. Beschikbaarheid meetgegevens

Tussen 1975 en 2014 zijn in Zuidoost Drenthe regelmatige, vijfjaarlijkse waterpassingen uitgevoerd. Deze zijn aangevuld met waterpassingen van het gebied van Schoonebeek uit de jaren 1952 tot en met 1970. De hierop aansluitende InSAR-metingen zijn afkomstig van de satellietmissies Radarsat-2 en Sentinel-1 (zie Figuur 1). Radarsat-2 heeft een opnameinterval van 24 dagen, en een enkele Sentinel-1 satelliet maakt eens in de 12 dagen een opname. Door de beschikbaarheid van twee Sentinel-1 satellieten tegelijk (2016 tot 2021 en naar verwachting weer vanaf 2025) wordt dit interval zelfs tot 6 dagen teruggebracht.



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

De ruimtelijke dichtheid van InSAR-meetpunten in het rapportagegebied is met de Sentinel-1 missie boven de te monitoren gas- en olievelden voldoende (zie Figuur 2).



Figuur 2: Dichtheid van InSAR PS in het rapportagegebied. Aangegeven wordt het aantal representatieve punten per vierkant van 1 km², waarbij in paragraaf 3.2 is uitgelegd, wat onder representativiteit wordt verstaan.

1.3. Leeswijzer

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

De classificatie van waterpaspeilmerken gebaseerd op een stabiliteitsanalyse wordt in hoofdstuk 2 toegelicht. Hoofdstuk 3 geeft inzicht in de na-verwerking van de PS-InSAR metingen en hoofdstuk 4 in diens combinatie met de historische waterpassingen in vorm van tijdseries. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de peilmerkcontrole gepresenteerd en besproken. Tot slot is hoofdstuk 6 gewijd aan conclusies en vooruitzichten.

2. Stabiliteitsanalyse waterpassingen

In deze rapportage is met een stabiliteitsclassificatie van de waterpaspeilmerken rekening gehouden, die in het laatste meetregister is gepubliceerd (NAM, 2020). 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 wordt representatief geacht voor de diepe bodemdaling. In deze delen is er geen duidelijke indicatie voor significante autonome peilmerkbeweging of significante meetfouten in de tijdserie.

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

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

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

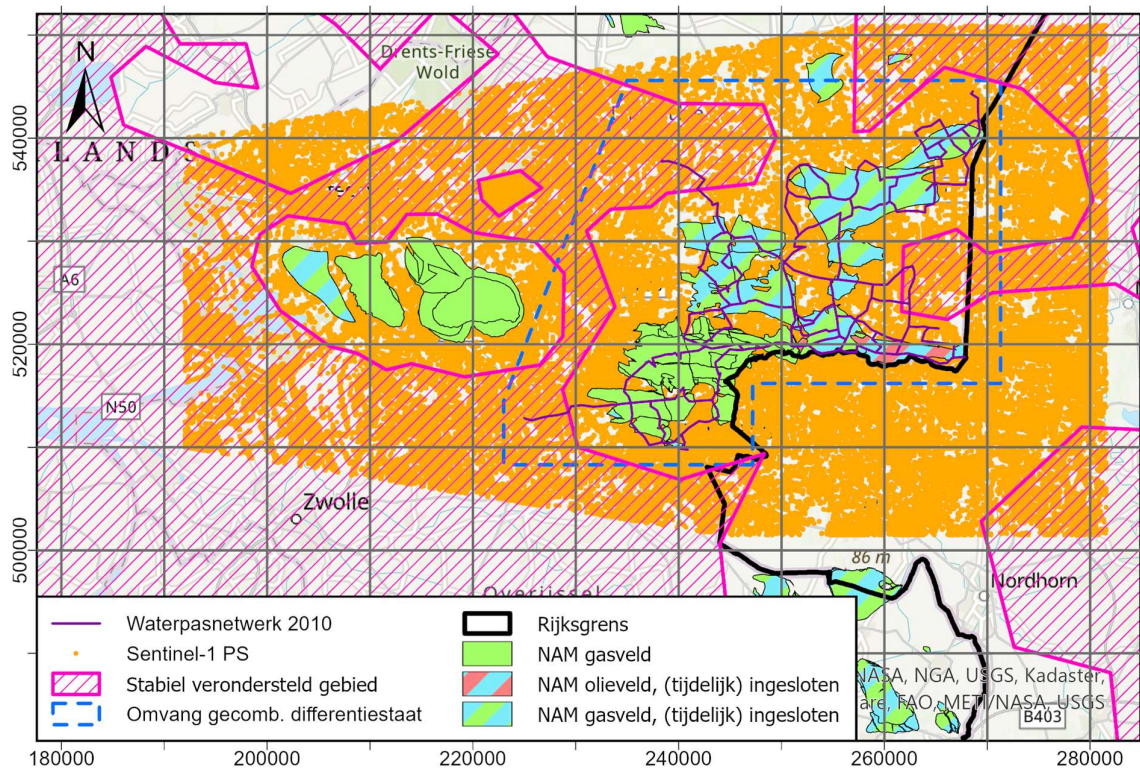
Verstoring: plotselinge sprong in de waargenomen beweging van een peilmerk. Verstoringen kunnen alleen in de context van een reeks opeenvolgende meetcampagnes worden gedetecteerd. De oorzaak is een permanente en meestal antropogene hoogteverandering van het peilmerk, bijvoorbeeld door verkeer of werkzaamheden.

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

De resultaten van de stabiliteitsanalyse zijn aan dit meetregister opnieuw als bijlage (A.3) toegevoegd.

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



Figuur 3: Bedekking van de geproceste Sentinel-1 data.

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

3.1. Reflectiegedrag

Gedetecteerde pixels met consistent reflectiegedrag kunnen worden verdeeld in puntreflectoren en verdeelde reflectoren. Bij puntreflectoren is het weerkaatste radarsignaal vooral afkomstig van één dominante reflector. Wanneer de opsomming van de weerkaatste radargolven van vele binnen een pixel verdeelde punten tot een coherent signaal leidt, dan is er sprake van een verdeelde reflector. Meestal worden puntreflectoren Persistent Scatterers (PS) en verdeelde reflectoren Distributed Scatterers (DS) genoemd.

PS hebben vaak de geometrie van een rechte binnenhoek en zijn vooral te vinden op en aan gebouwen, trappen, masten of stoepranden. DS kunnen ook op gebouwen voorkomen, maar zijn veelal ook op nagenoeg effen oppervlakken zoals verharde wegen te vinden. Beide soorten reflectoren hebben echter het van de InSAR-techniek opgelegde eigenschap, dat zij in de tijd niet veranderen. Daarom

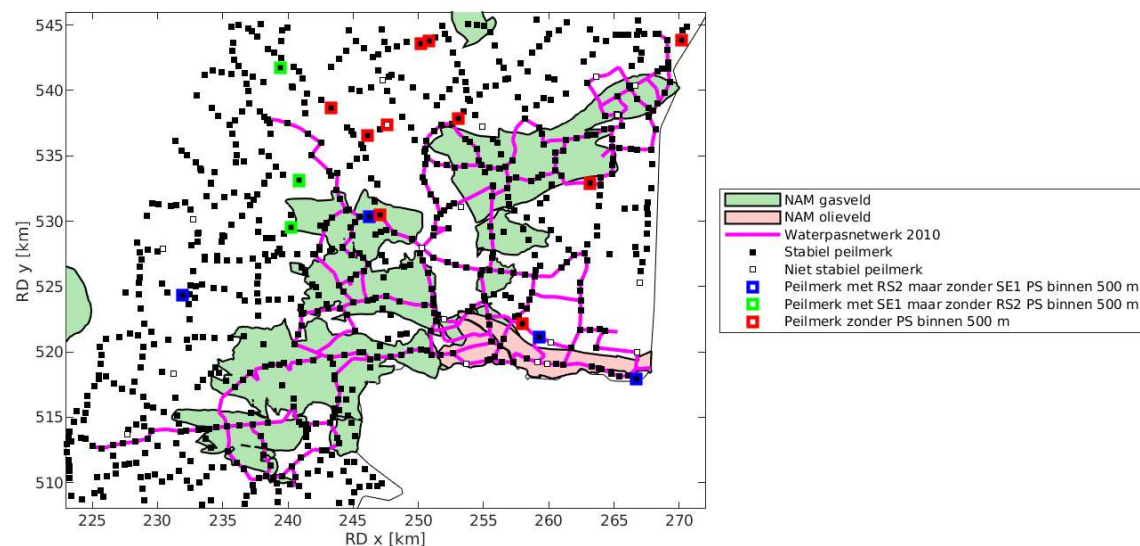
leveren zij allebei nuttige informatie voor de meting van bodembeweging. Alleen omdat puntreflectoren vaker in verband met diep gefundeerde objecten optreden, maken zij statistisch gezien een grotere kans, een voor de diepe bodemdaling representatief bewegingsgedrag te vertonen.

De benaming DS wordt ook voor verdeelde reflectoren gebruikt, die uit meerdere pixels zijn gevormd. Daarbij gaat het om zwakkere reflectoren, die zich alleen door beschouwing van meer dan één pixel tegelijk van de achtergrondruis (“clutter”) onderscheiden. Hun representativiteit voor de diepe bodemdaling is in hogere mate betwistbaar.

Strikt gesproken bestaan er in de praktijk nauwelijks perfecte puntreflectoren. De meeste PS genoemde meetpunten bestaan uit één dominante reflector, die over een klein oppervlak verdeeld is en diens reflectiegedrag nog sterk op een puntreflector lijkt. Er is dus een vloeiende overgang tussen punt- en verdeelde reflectoren, en de classificatie als PS of DS is niet altijd eenduidig. Alleen perfecte cornerreflectoren zijn definitieve Permanent Scatterers terwijl reflectoren, die over meerdere pixels zijn verdeeld definitieve Distributed Scatterers.

In de rapportage bij het laatste meetregister (NAM, 2020) werd gesteld, dat niet alleen PS maar ook DS zijn gerapporteerd, om de percentage peilmerken te verhogen, diens tijdserie door InSAR metingen kan worden voortgezet. Daarmee waren DS bedoeld, die slechts uit één pixel bestaan. Voor dit meetregister geldt hetzelfde beleid, echter wordt de benaming vereenvoudigd en zo gelijkgetrokken met meetregisters van andere rapportagegebieden. Er worden alle meetpunten gerapporteerd, die niet uit meerdere pixels bestaan en daarmee duidelijk als DS moeten worden beschouwd. Alle gerapporteerde punten die uit één pixel bestaan worden PS genoemd. Hun representativiteit voor de diepe bodemdaling wordt door de in de volgende paragraaf toegelichte filterprocedure gewaarborgd.

Zoals in Figuur 4 te zien, verandert met deze keuze het aandeel peilmerken praktisch niet, waarvan de tijdserie uit waterpassingen met InSAR kan worden voortgezet. De peilmerken, waarvoor geen InSAR-metingen kunnen worden gerapporteerd zijn nog steeds vooral buiten de gas- en olievelden te vinden.



Figuur 4: Bedekking van de peilmerklocaties van de waterpassing uit 2014 met InSAR-metingen van de satellieten Radarsat-2 (RS2) en Sentinel-1 (SE1).

3.2. Puntselectie

Een eerste selectie van PS is gemaakt door Skygeo B.V., waarbij vooral de temporele coherentie van de tijdserie als kwaliteitscriterium is gebruikt. De temporele coherentie geeft een indicatie van de correcte oplossing van de fasemeerduidigheden en is onafhankelijk van de daadwerkelijk gemeten deformatie. De eis van een minimale coherentie verkleint de kans, dat fasesprongen van een geheel veelvoud van 2,8 cm in de opgeleverde tijdseries terechtkomen.

NAM heeft bij de gerapporteerde en in het meetregister gebruikte tijdserie voor een hogere drempelwaarde gekozen dan bij de verkregen data was toegepast. De PS met een coherentie beneden deze drempelwaarde zijn niet gerapporteerd. Bij de gerapporteerde PS kunnen foutief opgeloste meerduidigheden niet helemaal worden uitgesloten, maar hun aandeel is zeer klein en daarom aanvaardbaar. Het resultaat wordt hierdoor niet beïnvloed.

Een tweede selectie heeft te maken met de representativiteit van de berekende deformatie uit InSAR 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.

De overeenstemming wordt beoordeeld met behulp van de volgende algoritme:

1. Voor elke PS worden alle naburige PS binnen een straal van 500 m geselecteerd, die aan aangescherpte kwaliteitscriteria omtrent reflectiegedrag en temporele coherentie moeten voldoen.
2. De straal wordt aangepast, zo dat minimaal 20 en maximaal 200 naburige PS erbinnen vallen.
3. Van de tijdseries van alle PS binnen deze straal wordt telkens het gemiddelde in de tijd afgetrokken. Vervolgens wordt hiervan een gemiddelde tijdserie berekend door voor elke epoeche de mediaan te berekenen. Het resultaat noemen wij mediaantijdserie van de burens.
4. Ook van de tijdserie van de PS in beschouwing wordt het gemiddelde in de tijd afgetrokken. Vervolgens wordt de mediaantijdserie van de burens ervan afgetrokken. Het resultaat noemen wij de gereduceerde tijdserie.
5. Van de gereduceerde tijdserie wordt het glijdend gemiddelde berekend, waarbij over negen opeenvolgende epochen wordt gemiddeld.
6. Als de resulterende tijdserie aan de volgende twee criteria voldoet, wordt de PS als representatief beschouwd:
 - a. De geschatte lineaire snelheid mag niet meer dan 1,5 mm/a van nul afwijken.
 - b. Het verschil tussen maximale en minimale waarde mag niet meer dan 14 mm bedragen.

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) en alle visualisaties binnen deze rapportage zijn alleen representatieve PS gebruikt.

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

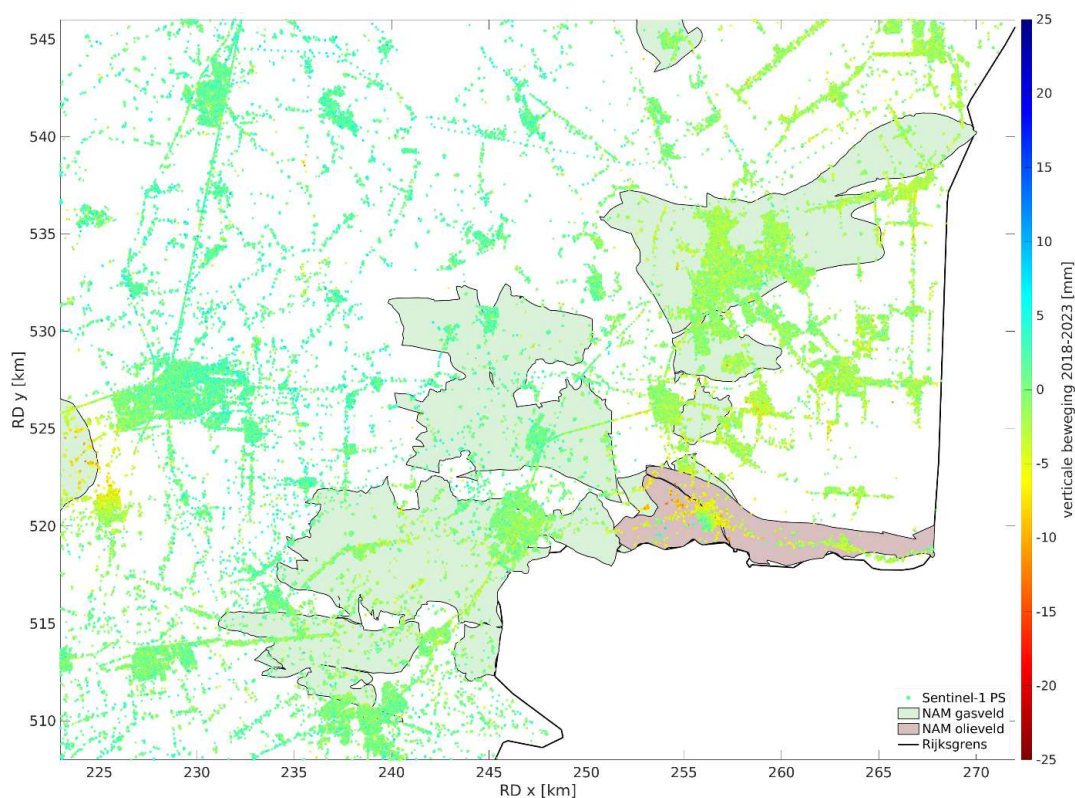
aanname, dat geen horizontale beweging heeft plaatsgevonden. De verwachte horizontale bewegingen zijn echter relatief klein, en vanwege de steile kijkhoek is de InSAR techniek ook minder gevoelig voor horizontale dan voor verticale deformatie. Per 1 mm/a horizontale beweging is het effect op de geconstateerde verticale beweging bij de in het gebied van dit meetregister gebruikte Sentinel-1 opnames 0,7...0,8 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 peilmerkniveau (bijlage A.2) alleen jaarlijks gemiddelde hoogteverschillen gerapporteerd. De tijdseries worden dus in vakken van twaalf maanden onderverdeeld, waarvan alleen de gemiddelde waarden gerapporteerd worden. Deze waarden representeren de deformatie in het midden van de respectievelijke tijdvakken, die beginnend bij de laatste opname van 29 juni 2024 teruglopend in de tijd zijn gedefinieerd. Het laatste tijdvak loopt dus van 29 juni 2023 tot 29 juni 2024 met 30 december 2023 als gemiddelde datum. De meest recente deformatiewaarden van het meetregister 2024 liggen daarom formeel in het jaar 2023 maar zijn mede gebaseerd op metingen uit 2024.

3.5. Resultaten

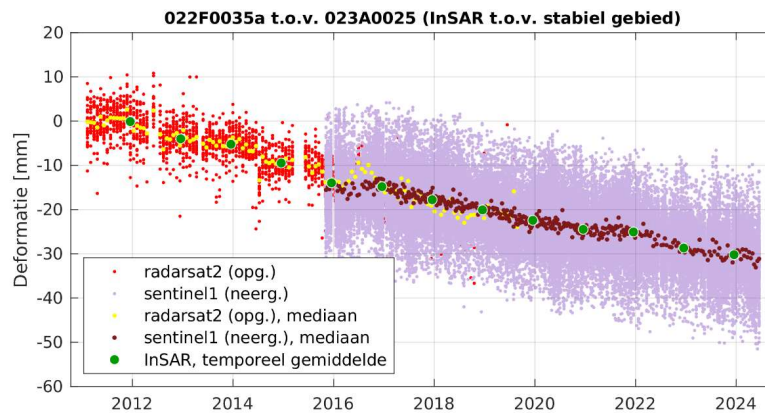
Figuur 5 toont de verticale beweging van de representatief geachte InSAR-meetpunten tussen 2019 en 2024. Tijdseries met jaarlijks gemiddelde InSAR-deformatiemetingen zijn per peilmerklocatie in de bijgevoegde gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) gerapporteerd.



Figuur 5: Bodembeweging bepaald uit InSAR voor de periode 2019-2024. Deze is berekend uit de gemiddelde deformatie van tijdvakken van een half jaar vóór en na 30 december 2018 c.q. 30 december 2023.

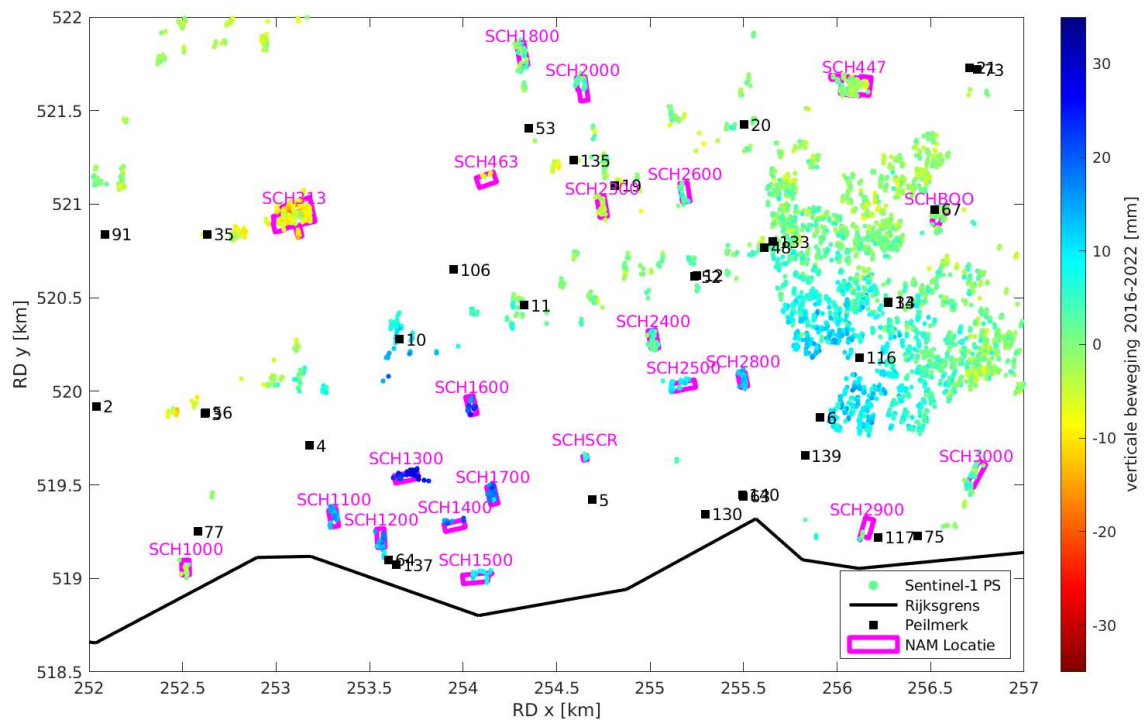
Bij de interpretatie van Figuur 5 moet met de meetonzekerheid rekening worden gehouden. Grootschalige variaties tot ca. 1 cm kunnen aan restfouten in de atmosfeerschatting van de InSAR-processing te wijten zijn.

In het grootste deel van het rapportagegebied treedt geen significante deformatie met grootschalige ruimtelijke correlatie op. Er is een lokaal bodemdalingssignaal zichtbaar bij Schoonebeek, welke echter beperkt is tot ongeveer 1 cm in vijf jaar, zoals te zien in de tijdserie behorend bij peilmerk 022F0035 in Figuur 6.

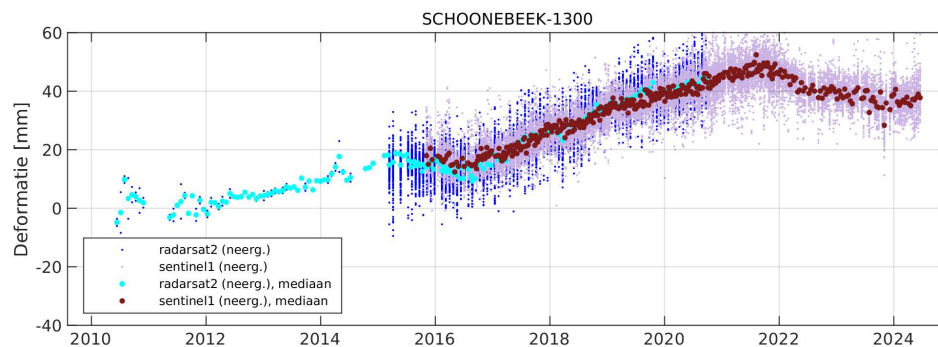


Figuur 6: InSAR tijdserie op de locatie van het in 2010 voor het laatst gemeten peilmerk 022F0035 tussen Schoonebeek en Coevorden. Getoond worden alle representatieve PS binnen een straal van 500 m, de hieruit gemiddelde tijdserie en daarvan de jaarlijks gemiddelde waarden, die in de gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) zijn gerapporteerd.

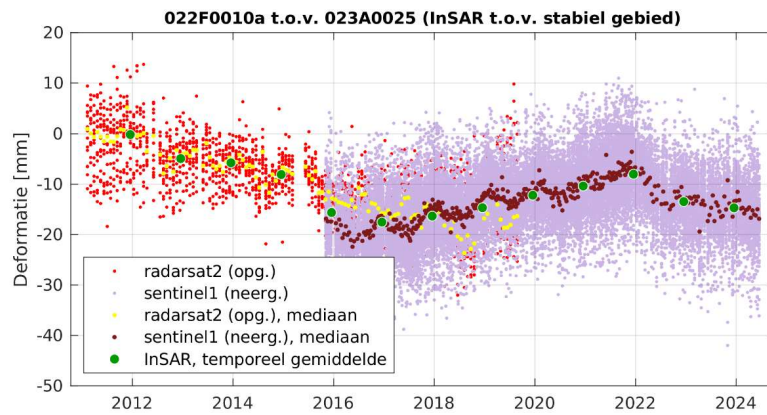
De bodemdaling bij Schoonebeek werd tussen 2016 en 2022 in het gebied van Padhuis deels gecompenseerd door bodemstijging (zie Figuur 7), die het grootst was boven de NAM-locatie Schoonebeek-1300 (zie Figuur 8). Daar is een tijdelijke stijging van 3,5 cm in zes jaar waargenomen. Het stijgingssignaal is zeer lokaal en is op de dichtstbijzijnde peilmerklocatie 022F0010 al afgezwakt naar 15 mm (zie Figuur 9).



Figuur 7: Met Sentinel-1 waargenomen bodembeweging ten westen van het dorp Schoonebeek tussen 1 januari 2016 en 1 januari 2022. De peilmerknummers zijn hier aangegeven zonder het voorafgaande kaartbladnummer 22F.



Figuur 8: Waargenomen bodembeweging op de NAM-locatie Schoonebeek-1300.



Figuur 9: InSAR tijdserie op de locatie van het in 2010 voor het laatst gemeten peilmerk 022F0010. Getoond worden alle representatieve PS binnen een straal van 500 m, de hieruit gemiddelde tijdserie en daarvan de jaarlijks gemiddelde waarden, die in de gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) zijn gerapporteerd.

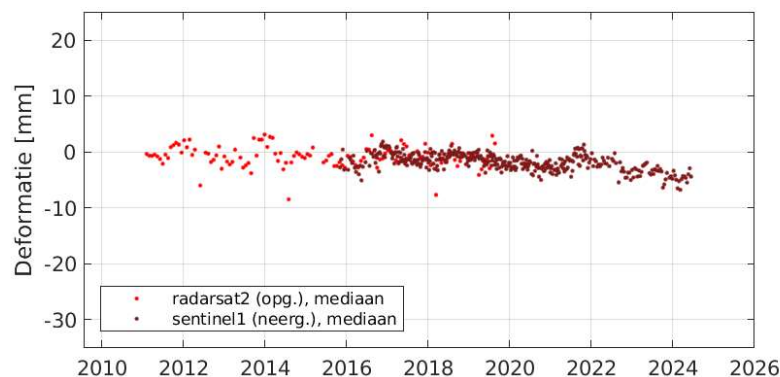
4. Combinatie

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 PS). Om een combinatie mogelijk te maken, wordt aangenomen, dat de gemiddelde beweging van alle PS binnen een straal van 500 m rond een peilmerk gelijk is aan de beweging van het peilmerk zelf. Zodoende worden InSAR tijdseries in de peilmerk-gewijze tijdseries van waterpassingen geïntegreerd. Aandachtspunten zoals ruimtelijke referentie en koppeling van tijdseries worden in het volgende nader toegelicht.

4.1. Referentie in de ruimte

De gerapporteerde hoogteverschillen van beide meettechnieken zijn relatief in de ruimte. Voor de waterpassingen is het peilmerk 023A0025 als referentiepeilmerk gebruikt, terwijl de InSAR-deformatiemetingen aan een stabiel verondersteld referentiegebied gerelateerd zijn (zie Figuur 3). 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 significante residuele deformatie laat zien (zie Figuur 10).



Figuur 10: Gemiddelde tijdserie (mediaan) van alle PS binnen een straal van 1 km rond het referentiepeilmerk N023A0025.

4.2. Aansluiting van tijdseries op elkaar

Om tijdseries van waterpassing en InSAR op elkaar aan te sluiten, moeten peilmerken en geassocieerde PS tegelijkertijd zijn waargenomen. Vervolgens kan uit de differenties op alle tijdstippen van gelijktijdige waarnemingen een onderlinge offset worden geschat en toegepast. Van tevoren moeten echter waarnemingen van verschillende InSAR satellieten onderling gecombineerd worden. Bij de aansluiting wordt ook rekening gehouden met de resultaten van de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken (zie hoofdstuk 2). Op waterpaspeilmerken geconstateerde niet-stabiliteit, verstoringen en identificatiefouten kunnen net zoals 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 (hoofdstuk 2) wordt een deel van de peilmerken als niet stabiel verondersteld (ca. 2 % 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, waarbij identificatiefouten en/of verstoringen zijn geconstateerd. 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.

De classificatie in al dan niet of deels stabiel veronderstelde peilmerken is overgenomen in de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2). Afwijkend daarvan zijn tijdseries van deels stabiel veronderstelde peilmerken, die bij verstoringen zijn opgesplitst en geen identificatiefouten bevatten, als *stabiel* gekenmerkt. Tijdseries, die alleen InSAR deformatie bevatten zijn tevens altijd als *stabiel* gekenmerkt, omdat deze uitsluitend op representatieve PS (zie paragraaf 3.2) zijn gebaseerd.

4.2.2. Meerdere tijdseries per peilmerk

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

- De tijdserie van waterpassingen heeft geen overlap met InSAR tijdseries.
- Het peilmerk is niet stabiel verondersteld, daarom wordt de InSAR tijdserie niet op de waterpassing aangesloten.
- Het peilmerk is deels stabiel verondersteld, en alle waarnemingen in het overlappend tijdvak met InSAR zijn als identificatiefouten geïdentificeerd.
- Het peilmerk is deels stabiel verondersteld en bevat geconstateerde verstoringen, waar de tijdserie in delen is opgesplitst.

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

5. Instandhouding waterpasnetwerk

In het kader van de instandhouding van het waterpasnetwerk in Zuidoost-Drenthe als mogelijke terugval optie in de toekomst is de aanwezigheid van de hiervoor noodzakelijke peilmerken vastgesteld.

5.1. Selecteren peilmerken

Allereerst is een selectie van peilmerken gemaakt, die voor de instandhouding van het waterpasnetwerk noodzakelijk worden geacht. Daarbij zijn de volgende criteria toegepast:

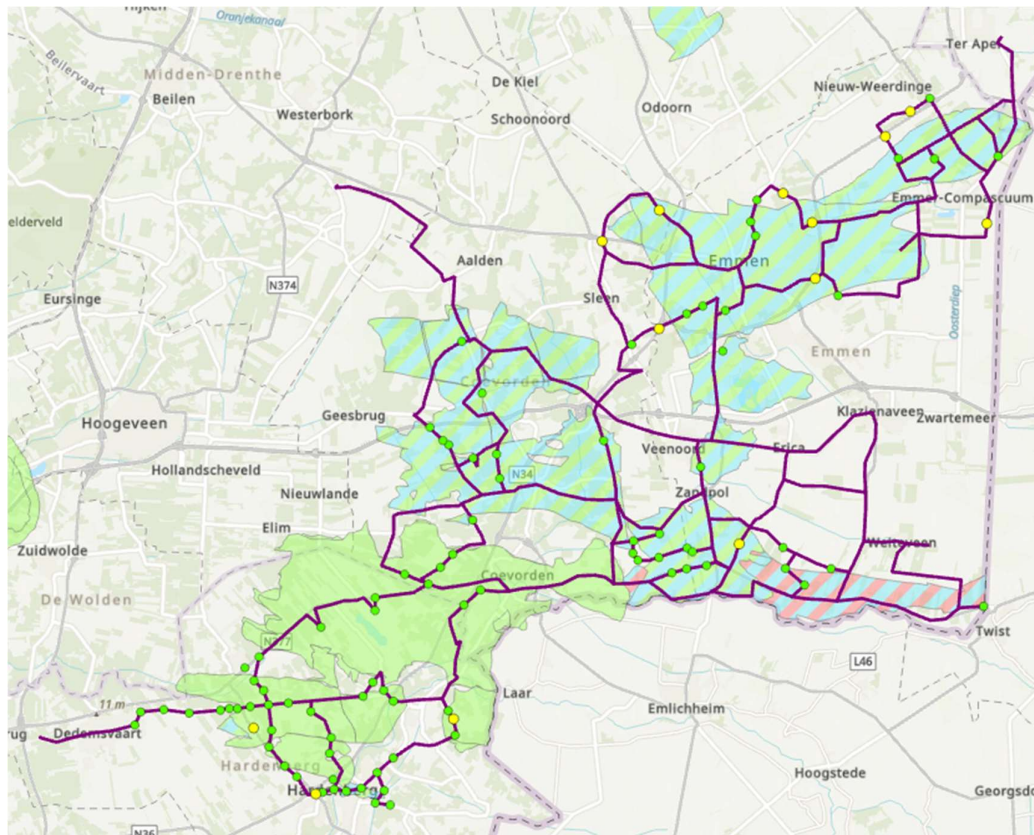
- gelegen langs de trajecten van het waterpasnetwerk van 2010; deze netwerkconfiguratie wordt als geschikt geacht om de bodemdaling boven de gas- en olievelden te monitoren.
- gelegen boven de gas- en olievelden of binnen een buffer gelijk aan diens diepte; de diepte van de velden in Zuidoost-Drenthe varieert tussen 900 m en 4050 m.
- stabiel verondersteld of stabiliteit niet geanalyseerd (zie hoofdstuk 2 c.q. NAM, 2020)
- niet vóór de laatste NAM-meetcampagne vervallen.
- in de laatste drie NAM-meetcampagnes (2005, 2010 en 2014) minimaal één keer aangemeten óf geplaatst in opvolging van de peilmerkcontrole van 2019 (NAM, 2020).

Als resultaat zijn 422 peilmerken geselecteerd. Vanwege het laatste criterium is deze selectie is aan de ruime kant, omdat in 2005, 2010 en 2014 niet doorgaans dezelfde peilmerken zijn waargenomen.

261 van de 422 peilmerken zijn in 2022 door Rijkswaterstaat gewaterpast, waardoor hun aanwezigheid tot en met het jaar 2022 al is vastgesteld. 62 peilmerken zijn bij Rijkswaterstaat reeds als vervallen gemeld. Er blijven dus 99 peilmerken over, die in het veld gecontroleerd moesten worden.

5.2. Peilmerkcontrole

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. 13 gecontroleerde peilmerken bleken niet meer aanwezig of verstoord te zijn (13 %), zie Figuur 11.



Figuur 11: Gecontroleerde peilmerken: aanwezige peilmerken in groen, niet aanwezige peilmerken in geel.

5.3. Analyse

Om te bepalen of er nieuwe peilmerken moeten worden geplaatst, is de volgende analyse uitgevoerd:

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

Tabel 1 toont de resultaten van deze analyse. Bij vrijwel alle verdwenen peilmerken zijn er voldoende andere stabiele peilmerken aanwezig in de nabije omgeving, of is in recente jaren een alternatief peilmerk van Rijkswaterstaat bijgeplaatst. Alleen voor peilmerk 018A0188 is dit niet het geval; echter dit peilmerk ligt buiten de contouren van een niet meer producerend gasveld (Roswinkel). Er hoeven dus geen additionele nieuwe peilmerken te worden bijgeplaatst.

Tabel 1: Analyse van de niet aanwezige peilmerken in de peilmerkcontrole.

PEILMERKNR	X(RD,m)	Y(RD,m)	AANWEZIG	OPMERKING	1 stabiel punt < 500 m	2 stabiele punten < 1000 m	peilmerk RWS
017H0215	253089	536720	Nee	Niet gevonden (niet te bereiken).	nee	nee	017H0241 (vanaf 2014)
017H0237	258710	537480	Nee	Peilmerk 017H0254 zit in hetzelfde object.	nee	nee	017H0254 (vanaf 2014)
022B0226	234670	513250	Nee	Peilmerk 022B0227 zit in hetzelfde object.	nee	nee	022B0227 (vanaf 2014)
018C0066	260030	536160	Nee	Niet gevonden (niet te bereiken).	nee	nee	018C0206 (vanaf 2014)
017H0067	250495	535312	Nee	Geen toestemming van de eigenaar.	ja	nvt	nvt
018A0188	264450	541180	Nee	Eigenaar gesproken; er zit geen bout in huisnr. 33.	nee	nee	nee
022E0014	243750	513660	Nee	Huis is bouwval en zit in verbouwing.	ja	nvt	nvt
017H0123	253080	531340	Nee	Niet toegestaan te stoppen snelweg afrit N34.	ja	nvt	nvt
018C0198	267960	536110	Nee	Peilmerk 018C0211 zit in hetzelfde object.	nee	nee	018C0211 (vanaf 2014)
018C0196	260170	533620	Nee	Peilmerk 018C0204 zit in hetzelfde object.	nee	nee	018C0204 (vanaf 2014)
022D0262	237490	510260	Nee	Niet te vinden na aanbrengen van gevelbekleding.	nee	ja	nvt
022F0152	256680	521580	Nee	Huis krijgt een nieuwe spouwmuur.	nee	nee	022F0157 (vanaf 2014)
018A0068	263350	540060	Nee	Niet gevonden (niet te bereiken).	nee	nee	018A0201, 018A0207 (2022)

6. Conclusies en vooruitzichten

In het meetregister Zuidoost-Drenthe is in 2024 InSAR als primaire meettechniek gebruikt. De InSAR-deformatie metingen zijn berekend uit een Sentinel-1 dataset uit de periode 2015-2024 en met overlap aangesloten op de voorgaande Radarsat-2-tijdseries en historische waterpassingen. Bij de aansluiting is rekening gehouden met de stabiliteitsanalyse van waterpaspeilmerken en een classificatie van InSAR PS als al dan niet representatief.

In het grootste deel van Zuidoost-Drenthe wordt in de afgelopen vijf jaar geen significante bodembeweging waargenomen. Een uitzondering vormt het gebied van Schoonebeek, waar lokale bodemdaling tot ongeveer 1 cm in vijf jaar optreedt. Deze wordt in een klein deelgebied gecompenseerd door bodemstijging met een lokaal maximum van ca. 3,5 cm tussen 2016 en 2022.

De Europese Sentinel-1 missie is voor de lange termijn ontworpen. Tegenwoordig is alleen de Sentinel-1A satelliet operationeel, nadat Sentinel-1B in december 2021 is uitgevallen. Continuïteit blijft door de geplande lancering van Sentinel-1C gewaarborgd, en ook Sentinel-1D staat al gereed. Indien continuïteit met InSAR monitoring door onvoorziene omstandigheden toch niet mogelijk is, kan alsnog worden teruggevallen op het bestaande waterpasnetwerk. Een groot deel daarvan is in 2022 door Rijkswaterstaat gewaterpast. De overige peilmerken zijn door NAM in augustus 2024 in het veld geïnspecteerd. Er hoeven geen peilmerken te worden bijgeplaatst.

Bijlagen

A. Geleverde data

Het meetregister Zuidoost Drenthe 2024 bevat naast dit rapport een aantal digitaal opgeleverde bestanden. Deze zijn in deze bijlage gespecificeerd.

A.1. Differentiestaat InSAR

De resultaten van de InSAR processing (Sentinel-1, neergaande baan, 2015-2024), zoals verkregen en na-verwerkt volgens hoofdstuk 3, zijn aangeleverd in de vorm van een differentiestaat naast toelichting in een “leesme”-bestand:

```
InSAR_Sentinel-1_desc_MR_Zuidoost-Drenthe_2024.zip  
InSAR_MR_Zuidoost-Drenthe_2024.leesme.txt
```

De differentiestaat bevat één tijdserie per PS met de naar de verticaal geconverteerde deformatie schattingen (zie paragraaf 3.3). Voor elke PS is aangegeven, of de tijdserie als representatief wordt beschouwd of niet (zie paragraaf 3.2). Op het tijdstip van de eerste opname is de deformatie op nul gezet. De referentie in ruimte is de gemiddelde deformatie van een stabiel verondersteld gebied (zie Figuur 3 op blz. 7).

A.2. Gecombineerde differentiestaat

Voor het hele rapportagegebied is een differentiestaat met gecombineerde tijdseries uit waterpassen en InSAR opgeleverd, waarbij de InSAR deformatie schattingen in de tijdseries van de waterpas peilmerken geïntegreerd zijn (zie hoofdstuk 4). De betekenis van de kolommen is in een “leesme” bestand verklaard. Zie bestanden:

```
023A0025_1952-06-15_MR_Zuidoost-Drenthe_2024.csv  
023A0025_1952-06-15_MR_Zuidoost-Drenthe_2024.leesme.txt
```

De combinatie met InSAR volgt de in bijlage B toegelichte procedure.

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

A.3. Stabiliteitsstaat

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

```
sta_zod2014_023A0025.csv  
sta_zod2014.leesme.csv
```

Deze stabiliteitsstaat is identiek aan de stabiliteitsstaat, die in het meetregister Zuidoost-Drenthe 2019 (NAM, 2020) is gepubliceerd.

A.4. Kaart met hoogteverschillen

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

Kaart_MR_Zuidoost-Drenthe_2024_2019-2024.pdf

De hoogteverschillen uit InSAR zijn berekend als differentie van de in de gecombineerde differentiestaat (bijlage A.2) gerapporteerde jaarlijkse gemiddelde deformatie van 30 december 2018 en 30 december 2023.

B. Combinatie procedure

Om verschillende tijdseries van waterpassing en InSAR op elkaar aan te sluiten, wordt op de gecombineerde differentiestaten de hieronder beschreven procedure gebruikt. Deze is toegepast op de gecombineerde differentiestaten (bijlage A.2) en de visualisatie van tijdseries in paragraaf 3.5.

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.

Ten opzichte van het laatste meetregister (NAM, 2020) bevat de hieronder beschreven procedure een aanvullende stap ter combinatie van InSAR tijdseries van opeenvolgende satellietmissies.

1. Combinatie van InSAR-tijdseries van opeenvolgende satellietmissies

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

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.

4. Vastlegging van absolute waarden: Gezien InSAR tijdseries geen absolute hoogteverschillen ten opzichte van het referentiepeilmerk, maar alleen veranderingen weergeven, wordt de gemiddelde deformatie binnen het eerste jaar van deze tijdseries op nul gesteld. Voor met

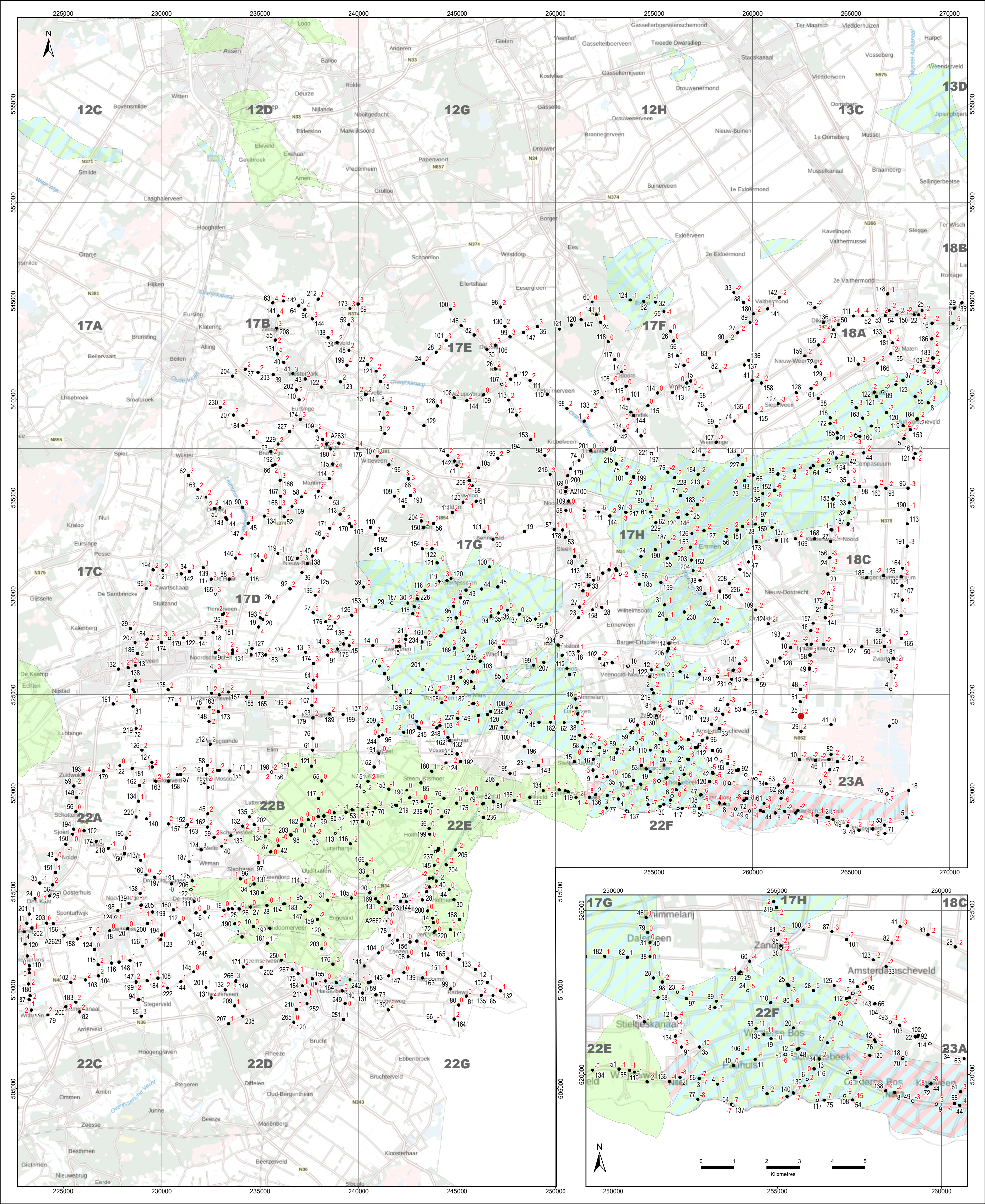
waterpassingen geïntegreerde tijdseries is deze stap niet nodig en wordt met betrekking tot de differentiestaten ook niet toegepast.

Referenties

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

NAM (2020): Meetregister bij het meetplan Zuidoost Drenthe – Rapportage van satelliet radar interferometrie. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 26 maart 2020, EP202002201804.

NAM (2023): Meetregister bij het meetplan Zuidoost Drenthe 2019 – Addendum waterpassing Schoonebeek 1952 t/m 1970. Nederlandse Aardolie Maatschappij, 11 januari 2023, EP202301200115.



LEGENDA

-4

Peilmerkbeweging (mm)

268

Peilmerknnummer

37A

Kaartbladnaam

•

Peilmerk, stabiel verondersteld

◦

Peilmerk, niet stabiel verondersteld

⊙

Ondergronds merk

●

Referentie peilmerk

NAM gasveld

NAM olieveld, (tijdelijk) ingesloten

NAM gasveld, (tijdelijk) ingesloten

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

Original page size A2

1:125000

012345

Kilometres

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.

Achtergrondkaart: Basisregistratie Topografie (Kadaster)

ZUIDOOST-DRENTHE

DIFFERENTIES 2019-2024

MEETREGISTER 2024

Date: 10 september 2024

EP202408245492