

PIO PROJECT

METEN VAN DEFORMATIES BIJ BRUGGEN VIA INSAR

Dossier Deelrapport Revisie

001 Rev1

Rev	Datum	Omschrijving wijzigingen	Opgemaakt	Goedgekeurd
0	31/10/2025	Eerste versie eindverslag	Leen De Vos, Yves Impens	
A	08/01/2026	Finale versie eindverslag, nagekeken door alle leden van de WG		
B				
C				
D				

INHOUD

1	Situering van het project	4
2	Overzicht van het PIO TRAJECT.....	5
3	Beschikbare Aardobservatie technieken	7
3.1	Toepassing van earth observation (EO) technieken binnen asset management	7
3.2	Beschikbare EO technieken	7
3.2.1	Passieve sensoren.....	8
3.2.2	Actieve sensoren.....	9
3.3	Metten van vervorming vanuit de ruimte: SAR interferometrie	9
3.3.1	Techniek.....	9
3.3.2	Data/beelden collectie, planning, prijszetting en satelliet issues.....	17
4	Resultaten van de POC	18
4.1	Algemeen	18
4.2	Voorbeelden	20
4.2.1	Grote verplaatsing spoorwegbrug over R22	20
4.2.2	Viaduct van Vilvoorde.....	22
4.3	Interpretatie	25
5	finale analyse	27
5.1	Finaal bestek	27
5.2	Resultaat	28
5.2.1	Beschikbare resultaten	28
5.2.2	Specifieke vereisten.....	28
5.2.3	Shapefiles	34
5.2.4	Monographs per brug.....	36
5.2.5	Vergelijking van resultaten analyse op verschillende tijdstippen en met gekende / opgemeten vervormingen	37
5.2.6	Sentinel versus TerraSar X.....	51
5.3	Bedenkingen bij de resultaten	52
5.4	Antwoorden op de onderzoeksvragen	54
6	Huidige ontwikkelingen	55
6.1	EGMS	55
6.1.1	Algemeen.....	55

6.1.2	Vergelijking EGMS met eindresultaat Tre Altamira.....	56
6.2	Eurostruct	62
7	Mogelijke vervolgstappen	63
8	Besluit	65
9	Gebruikte afkortingen.....	66
10	Bijlagen	66

1 SITUERING VAN HET PROJECT

Met behulp van radar satellietbeelden kunnen theoretisch verplaatsingen tot op millimeterniveau vastgesteld worden door het meten van faseverschillen tussen opeenvolgende beelden. Dit gebeurt aan de hand van een InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) analyse. Een PIO project (Programma Innovatieve Overheidsopdrachten) werd opgestart begin 2020 om na te gaan in hoeverre deze techniek op grote schaal ingezet kan worden, met als eerste doelstelling kijken of het mogelijk is om met InSAR de vervormingen van bruggen op te volgen.

Het hoofddoel van dit project was om na te gaan of InSAR kan ingezet worden in het dagelijks beheer van bruggen en om te onderzoeken welk type satellieten en analyse hiervoor best geschikt zijn. Een tweede doelstelling van het project was om na te gaan of het haalbaar is om met deze techniek problemen sneller te detecteren en bijkomend topografische (en andere) metingen efficiënter in te zetten op bruggen die mogelijk een risico vormen.

Onder andere werden volgende onderzoeksvragen onderzocht:

- Op welke bruggen kunnen verschillende technieken worden toegepast? Wat is de invloed van het type brug, de oriëntatie van de brug, de aanwezigheid van bomen, gebouwen, water in de onmiddellijke omgeving...
- Onder welke omstandigheden kunnen verschillende technieken worden toegepast? Wat met aanwezigheid van verkeer/ invloed van weersomstandigheden ...?
- Is het mogelijk om automatisch een opdeling te maken in een periode voor en een periode na werken aan een brugdek? Hoe goed kunnen de punten op de brug gelokaliseerd worden
- Is het mogelijk om lengteprofielen te trekken in de langse en dwarse richting van de brug, waarbij de locatie van de steunpunten en de overspanningen kan aangeduid worden?
- Is het mogelijk om lokale anomalieën te detecteren? Zowel in de tijd (plotse vervormingen) als in de ruimte (afwijkingen t.o.v. nabijgelegen punten)?
- Welke nauwkeurigheid is haalbaar? Zowel in de gedetecteerde verplaatsing als in de nauwkeurigheid van positionering van de datapunten. Welke resolutie is optimaal, rekening houdend met alle aspecten (terugkeerfrequentie satellieten, afmetingen bruggen,...)?
- Hoeveel beelden zijn minimaal nodig voor elke mogelijke techniek om tot een goed resultaat te komen? Is dit afhankelijk van de resolutie van het beeld?
- Is het mogelijk om meerdere beelden aan elkaar te koppelen indien heel Vlaanderen gedekt wordt met meerdere beeldensets?
- Welke softwaremogelijkheden zijn beschikbaar om de data te visualiseren? Is een koppeling met de beheerstool van de Vlaamse overheid mogelijk?
- Is het mogelijk een alarmeringssysteem op te zetten, zodat afwijkingen op een geautomatiseerde manier kunnen vastgesteld worden

Daarnaast was het ook de intentie om tijdens het project zoveel als mogelijk andere toepassingsgebieden te onderzoeken, om een uitgebreidere toepassing mogelijk te maken en een eventuele samenwerking voor de aankoop en analyse van de satellietbeelden tot stand te kunnen brengen.

Het project werd opgezet door enkele technisch ondersteunende afdelingen binnen het departement mobiliteit en openbare werken, momenteel gegroepeerd onder NeXperta (Afdeling ATO, Afdeling EBS en Afdeling Geotechniek).

2 OVERZICHT VAN HET PIO TRAJECT

Een uitgebreid traject werd doorlopen om de marktkennis en marktrijpheid te verkennen en om het maximale resultaat uit het project te halen. Uiteindelijk werd als procedure gekozen voor een MPMO (mededingingsprocedure met onderhandelingen), waarbij in een eerste fase een beperkt aantal firma's geselecteerd werden om een Proof Of Concept (POC) uit te werken (zie H4). Het bestek werd na de POC beperkt aangepast (zie 5.1) en een finale keuze werd gemaakt op basis van de inschrijving en de uitgevoerde POC.

Hieronder wordt een opsomming gegeven van alle doorlopen stappen, met bijhorende data. In totaal duurde het volledige traject zo een 3 jaar. Door PIO werd in alle fasen van het traject ondersteuning geboden bij deze innovatieve opdracht.

Om het project mogelijk te maken, werden 53 hoge resolutie beelden (TerraSAR-X (TSX) InSAR stripmap (SM)) aangekocht van een zone die Antwerpen en Brussel omvatten. De beelden werden genomen in de periode 6/2014 tot 3/2016. Daarnaast werd ook een analyse gevraagd van de vrij beschikbare Sentinel (SNT) beelden (beelden beschikbaar gesteld binnen het Copernicus programma van het Europese Space agency).

- Aanvraag en opstart PIO project
 - 13/12/2019: Indienen projectaanvraag:
 - 16/03/2020: Opstartvergadering samen met PIO
 - Behoeftanalyse & Marktonderzoek
 - 03/04/2020: Uitsturen bestek minicompetitie consultancy bureau
 - 24/04/2020: Offertes consultancy kantoren
 - 28-30/04/2020: Evaluatie offertes consultancy kantoren
 - 07/05/2020: Opstartvergadering met Verhaert
 - 06/2020: Deliverable 1 – Behoeftebepaling
 - 21/10/2020: Digitale Marktconsultatie (lijst met 1 op 1 gesprekken)
 - 21/10/2020: Presentatie PIO + Presentatie MOW
 - 10/2020: Deliverable 2 – Marktconsultatie
 - 12/2020: Deliverable 3 – Publiek eindverslag
 - 12/2020: Deliverable 4 – Adviesrapport
 - Publicatie bestek – MPMO: zomer 2021
 - 17/06/2021: Openingszitting – Selectieleidraad NL + EN
 - 14/07/2021: Selectieverslag
 - 15/07/2021: Selectiebeslissing
 - 07/09/2021: Openingszitting – bestek NL + EN
 - 08/09/2021: PV van opening
 - Pitches voorstelling plan van aanpak
 - 09/09/2021: e-Geos
 - 09/09/2021: Sensar
 - 09/09/2021: Sixense
 - 09/09/2021: Tre Altamira
 - 09/09/2021: Skygeo
-

- Selectie van 3 bedrijven. Door ex aequo voor plaats 3 werden uiteindelijk 4 bedrijven geselecteerd: e-Geos, Skygeo, Sensar en Tre Altamira.
 - Overzicht stappen per bedrijf van POC met 21 bruggen
 - e-Geos
 - 14/10/2021: Startvergadering
 - 24/11/2021: Tussentijdse overlegmomenten
 - 15/12/2021: Indienen resultaat POC
 - Platform AWARE
 - Rapporten per brug in bijlage 1
 - Technical report in bijlage 2
 - 31/10/2021: Update van POC
 - 21/12/2021: Eindvergadering
 - 23/02/2022: Terugkoppelmoment resultaat POC
 - Skygeo
 - 15/10/2021: Startvergadering
 - 8/11/2021 & 30/11/2021: Tussentijdse overlegmomenten
 - 24/12/2021: Indienen resultaat POC:
 - Platform SkyGeo
 - Rapporten per brug in bijlage 3
 - Technical report in bijlage 4
 - 21/12/2021: Eindvergadering
 - 23/02/2022: Terugkoppelmoment resultaat POC
 - Sensar
 - 20/10/2021: Startvergadering
 - 02/12/2021: Tussentijdse overlegmomenten
 - 24/12/2021: Indienen resultaat POC:
 - Platform van Sensar "MOW BrugScan"
 - Geen rapporten per brug beschikbaar
 - Technical report in bijlage 5
 - 17/01/2022: Eindvergadering
 - 23/02/2022 - Terugkoppelmoment resultaat POC
 - Tre Altamira
 - 14/10/2021: Startvergadering
 - 01/12/2021: Tussentijdse overlegmomenten
 - 17/12/2021: Indienen resultaat POC:
 - Platform Tremaps
 - Rapporten per brug in bijlage 6
 - Technical report in bijlage 7
 - 17/12/2021: Eindvergadering
 - 23/02/2022: Terugkoppelmoment resultaat POC
 - Beoordeling initiële offertes voorafgaand aan de POC + Onderhandelingen + onderzoek 21 bruggen:
 - 24/05/2022: gunningsverslag met Selectie van Tre Altamira
 - Uitvoering van de alle bruggen in geselecteerd gebied door Tre Altamira
 - 23/09/2022: Eerste resultaten overleg
-

- 25/11/2022: Live – Tussentijdse resultaten
- 21/12/2022: Resultaten beschikbaar op platform
- 05/01/2023: Update monographs
- 23/01/2023: Finale rapport
- 01/03/2023: Update eerste versie van monographs
- 24/03/2023: Toelichting op aangeleverde resultaten/antwoorden op vragen
- 30/10/2023: update van resultaten aangeleverd
- 14/12/2023: Korte demo van het nieuwe platform
- 20/12/2023: Finale versie van de monographs

3 BESCHIKBARE AARDOBSERVATIE TECHNIEKEN

Een zeer overzichtelijk CIRIA-rapport werd in 2022 uitgegeven “InSAR and Earth Observation techniques for infrastructure” (CIRIA C805). Het rapport geeft een uitgebreid overzicht van de verschillende beschikbare EO (Earth Observation) technieken en de bruikbaarheid ervan voor asset eigenaars, naast een meer technische uitleg over de werking van de technieken. Het rapport richt zich op alle EO-technologieën die nuttig zijn binnen infrastructuurprojecten, met een specifieke focus op tijdreeksanalyse met behulp van InSAR. Hieronder wordt een korte samenvatting gegeven van dit rapport, waarbij de InSAR techniek in iets meer detail besproken wordt. De bedoeling van deze samenvatting is om duidelijk te maken wat de technische mogelijkheden en beperkingen van InSAR zijn, omdat deze uiteraard impact hebben op de toepasbaarheid. Van de andere EO-technieken wordt een opsomming en korte omschrijving gegeven, alsook mogelijke toepassingen binnen AM (Asset Management).

3.1 TOEPASSING VAN EARTH OBSERVATION (EO) TECHNIEKEN BINNEN ASSET MANAGEMENT

De aardobservatie (EO) industrie bestaat uit drie delen: de ruimtevaart (bouw en lancering van satellieten), de midstream (gegevensverzameling en -distributie) en de downstream (verwerking tot eindproducten). InSAR is een eindproduct, zowel opgeleverd door overheidsgerelateerde als commerciële bedrijven. Waar vroeger quasi zuiver overheidsgerelateerde instanties instonden voor de lancering van satellieten en voor de verzameling en distributie van EO-data, komen meer en meer commerciële bedrijven op de markt die ook dit aspect van de EO-industrie aanbieden.

Naast InSAR zijn er nog veel EO-technieken die ingezet kunnen worden binnen AM. Deze worden hieronder kort beschreven om de mogelijkheden hiervan te schetsen en omdat verschillende technieken ingezet kunnen worden voor verschillende doeleinden, maar ook vaak gecombineerd ingezet kunnen worden om maximaal informatie te bekomen.

Binnen Europa wordt een grote inspanning geleverd om vrij beschikbare eindproducten aan te leveren, geproduceerd op basis van Europese satellietbeelden (EUSPA, Copernicus). Een voorbeeld hiervan is EGMS (European Ground Motion Server), waarover meer in paragraaf 6.

3.2 BESCHIKBARE EO TECHNIEKEN

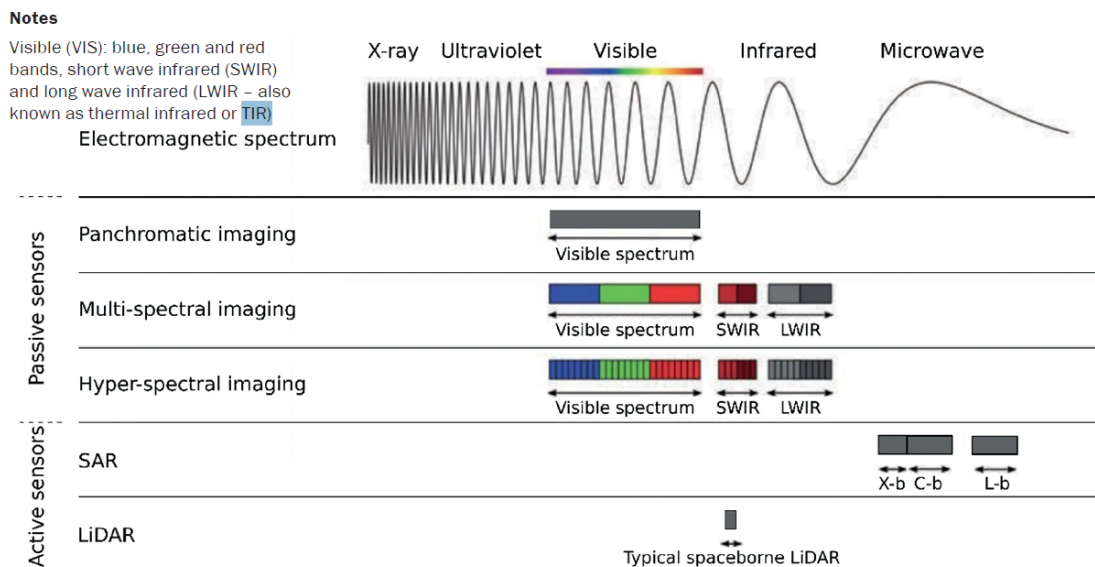
Er zijn twee hoofdcategorieën in EO technieken: technieken die gebruik maken van passieve sensoren (zoals optische sensoren die gereflecteerde of uitgestraalde energie meten) en technieken die gebruik maken van

actieve sensoren (zoals radar of LiDAR, waarbij een bron energie uitzendt en de terugkaatsing opgemeten wordt). Sommige sensoren kijken recht naar beneden (nadir), terwijl anderen onder een hoek gericht zijn (off-nadir). Nog andere sensoren kunnen gericht worden naar een bepaalde locatie onder verschillende hoeken.

Passieve sensoren werken in het gamma van het spectrum van ultraviolet, zichtbaar tot infrarood en thermaal infrarood. Zij hebben een externe bron nodig zoals zonlicht of spectrale emissie van de aarde om een beeld te genereren.

Actieve sensoren gebruiken de langere golflengtes binnen het elektromagnetisch spectrum (centimeter schaal, microwave) en kunnen hierdoor beelden nemen van de aarde door wolken en regen heen. Zij zenden hun eigen signaal uit en zijn daarom niet afhankelijk van zonlicht, waardoor ze dag en nacht ingezet kunnen worden, onafhankelijk van het weer.

Onderstaande Figuur 1 uit ciria, 2022 illustreert dit.



Figuur 1: onderscheid tussen passieve en actieve sensoren, ciria 2022

3.2.1 Passieve sensoren

Bij de passieve sensoren wordt onderscheid gemaakt tussen:

- “panchromatische imaging”: “Panchromatisch” betekent dat het beeld over een breed spectrum van golflengtes in het zichtbare licht gevoelig is – dus het registreert alle zichtbare kleuren als één zwart-witbeeld met hoge resolutie. Deze worden bv. gebruikt om multispectrale (gekleurde beelden) te verscherpen, om DSM of DTM (hoogtemodellen) te maken. Zij kunnen daardoor ingezet worden bv. om volumetrische veranderingen te bepalen (grondwerken of aardverschuivingen) of om informatie over een terrein te verkrijgen.
- “Multispectrale imaging”: “Multispectraal” verwijst naar het vastleggen van beelden in meerdere, afzonderlijke golflengtebanden (zoals zichtbaar licht, nabij-infrarood, enzovoort). In tegenstelling tot panchromatische beeldvorming, die één breed spectrum vastlegt als zwart-wit, legt multispectrale beeldvorming meerdere kleurenbanden afzonderlijk vast. Dit maakt het mogelijk om materialen of vegetatie beter te onderscheiden en wordt vaak gebruikt in bv. teledetectie

(verstedelijking), landbouw (kwaliteit van planten, gebruik van landbouwgronden) en milieumonitoring.

- “hyperspectrale imaging”: “Hyperspectrale” beeldvorming is een geavanceerde vorm van teledetectie waarbij beelden worden vastgelegd in honderden tot duizenden smalle, opeenvolgende spectrale banden. In tegenstelling tot panchromatische of multispectrale beelden, geven hyperspectrale beelden een veel gedetailleerdere “spectrale vingerafdruk” van elk pixel in een beeld. Hiermee kunnen zeer kleine verschillen in materiaal, chemische samenstelling of conditie worden opgespoord. Dit wordt bv. gebruikt om ziekten of tekorten in planten zeer vroeg te detecteren, om bodemverontreiniging, algenbloei of marien plasticafval te identificeren of om soorten gesteenten of mineralen te analyseren, om de staat van wegenis te mappen, ... Hoewel satellieten met deze techniek al beschikbaar zijn, is het ruisniveau (Hyperion, NASA) zeer hoog. Hier kan in de toekomst, met de komst van evt. nieuwe satellieten, wel nog veel vooruitgang geboekt worden.

3.2.2 Actieve sensoren

De meest gebruikte actieve sensoren zijn SAR en LiDAR.

SAR gebruikt actieve radar: het systeem zendt zelf radiosignalen uit en vangt de weerkaatsingen op van het oppervlak. Door gebruik te maken van de beweging van het platform (bv. een satelliet of vliegtuig), wordt een synthetische ‘grote’ antenne gesimuleerd, wat resulteert in hogere resolutiebeelden dan met een fysieke antenne van die grootte mogelijk zou zijn.

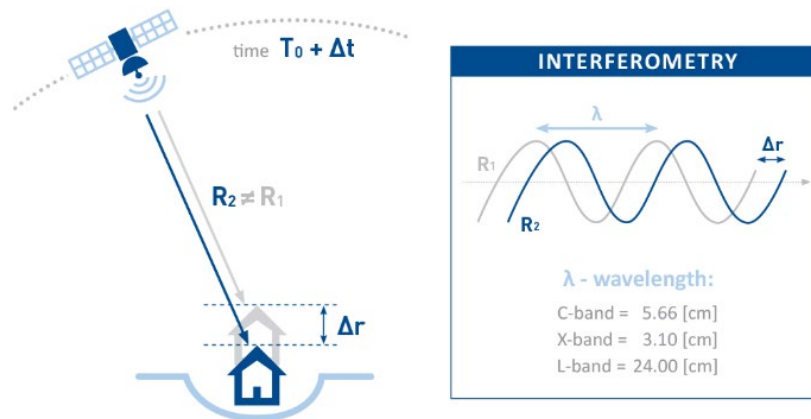
Radarbeelden worden gekenmerkt door 2 componenten, nl. de amplitude en de fase. De amplitude is afhankelijk van de grootte van het gereflecteerde signaal (helderheid), terwijl de fase afhankelijk is van de afstand tussen antenne en de grond. De kijkrichting (Line of Sight, LoS) is zijwaarts om onderscheid te kunnen maken tussen het gereflecteerde signaal van objecten die zich op een gelijke afstand van de satelliet bevinden. SAR is momenteel de meest gebruikte actieve techniek binnen EO.

LiDAR is een techniek waarbij met behulp van laserlicht (IR) de afstand tot objecten en het aardoppervlak wordt gemeten. Het systeem zendt korte laserpulsen uit en meet de tijd die het licht nodig heeft om terug te kaatsen van het object naar de sensor. In tegenstelling tot SAR is LiDAR wel weersafhankelijk. De meest gebruikte applicatie voor satelliet LiDAR is momenteel het genereren van een DEM (digitaal hoogtemodel). Hoewel met satellieten een groter oppervlakte kan bereikt worden, bevatten de beelden die via een satelliet genomen werden minder details. Daardoor wordt LiDAR meer als airborne techniek ingezet (vliegtuigen, drones), omdat deze dus een grotere precisie hebben en minder impact van het weer ondervinden. Momenteel heeft LiDAR nog beperkte toepassingen binnen EO.

3.3 METEN VAN VERVORMING VANUIT DE RUIMTE: SAR INTERFEROMETRIE

3.3.1 Techniek

InSAR is gebaseerd op het concept van interferentie, waarbij de fase-informatie van twee of meer SAR-beelden van hetzelfde gebied, die op verschillende tijdstippen zijn verkregen, wordt vergeleken. Het faseverschil tussen de beelden is gerelateerd aan de verandering in de afstand tussen de sensor en het aardoppervlak. Dit faseverschil kan worden gebruikt om zeer nauwkeurige metingen van oppervlakteverplaatsing te verkrijgen, tot op de millimeter nauwkeurig.



Figuur 2: Schematische voorstelling van werking InSAR, bron Tre Altamira

InSAR maakt gebruik van een vrij complexe technologie om met een heel aantal aspecten in de verwerking om te gaan. Voor degene die de resultaten moeten interpreteren is het nuttig enige achtergrondkennis te hebben van deze aspecten. Ze worden daarom hieronder 1 per 1 kort toegelicht. Voor meer informatie wordt verwezen naar het Ciria 2022 rapport of de technische rapporten die binnen dit project werden opgeleverd.

3.3.1.1 PS versus DS

Persistent Scatter (PS) en Distributed Scatter (DS) zijn twee technieken die gebruikt worden om de gereflecteerde data te verwerken.

Bij de PS-techniek wordt gebruik gemaakt van pixels die een sterke, stabiele radarreflectie geven over een lange periode (en dus in meerdere satellietbeelden). De reflectie binnen 1 pixel wordt gebruikt voor de verwerking. Er is meestal één dominante reflector per pixel.

Kenmerken PS:

- De reflectie binnen een pixel is zeer uitgesproken en blijft consistent in tijd, waardoor zeer nauwkeurige metingen van beweging mogelijk zijn (millimeterschaal).
- De PS techniek wordt meestal gebruikt bij kunstmatige objecten zoals gebouwen, bruggen, spoorwegen, of andere harde oppervlakken.
- Voordeel van de PS techniek: hoge nauwkeurigheid en dichtheid van meetpunten (1 meetpunt per pixel).

Bij DS wordt gebruik gemaakt van een gebied waar de radarreflectie afkomstig is van meerdere kleine, minder dominante reflectoren. De reflectie is in dat gebied “egaler”. Dat geldt ook voor de betreffende zone op zich. Vaak wordt de reflectie van meerdere pixels samen bekeken.

Kenmerken DS:

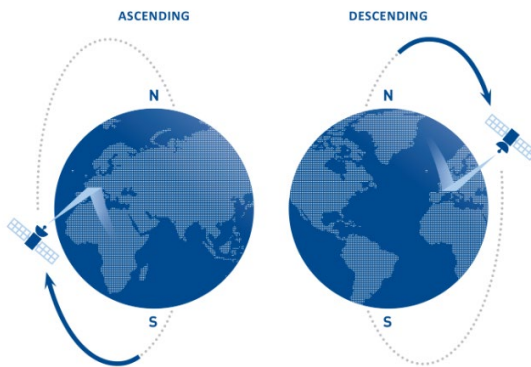
- De DS-techniek wordt vooral gebruikt in natuurlijke omgevingen zoals gebieden met vegetatie, kale grond, of rotsen.
- De reflectie is minder stabiel in de tijd (slechts stabiel over een kortere tijdsperiode) en kan variëren door bijvoorbeeld groei van vegetatie of veranderingen in bodemvocht.

3.3.1.2 Kijkhoek

InSAR kan bewegingen in de "line of-sight" detecteren: een beweging weg van de satelliet of naar de satelliet toe. InSAR-satellieten kijken steeds schuin naar het aardoppervlak, meestal onder een hoek van 20° tot 45° vanaf het verticale punt recht onder de satelliet. Door deze schuine kijkhoek kan men een onderscheid maken tussen de punten die zich rechts en links op een gelijke afstand tot de satelliet bevinden. Bij een kleine hoek t.o.v. de nadir (nadir is de loodrechte lijn tussen satelliet en aardoppervlak), wordt vooral de verticale beweging gemeten.

Die kijkhoek zorgt ervoor dat de satelliet in de ascending-mode (opgaande baan, zuid→noord) en in de descending-mode (neergaande baan, noord→zuid) een andere waarneming heeft van het aardoppervlak: de beelden kunnen hierdoor niet samen geanalyseerd worden, maar maken deel uit van een eigen "stack" en worden dus apart geanalyseerd.

In de ascending-mode kijkt de satelliet oostwaarts en in de descending-mode kijkt deze westwaarts. Door de metingen in eenzelfde gebied te bekijken, is het mogelijk om de beweging te ontbinden in een verticale beweging en een horizontale beweging (O-W, zie volgend punt).



Figuur 3: Kijkrichting satelliet (Bron: Tre Altamira)

3.3.1.3 Ontbinding in O-W (horizontaal) en verticale component

Door gegevens van zowel ascending (zuid→noord, kijkend naar oosten) als descending (noord→zuid, kijkend naar westen) banen te combineren, is het mogelijk om de gemeten LoS-bewegingen wiskundig te ontbinden in een verticale (op/neer) en een horizontale (oost-west) component. Door de baan van de satelliet (quasi perfect N-Z) is het meten van noord-zuid-beweging niet mogelijk**.

Belangrijk is te weten dat ontbinding enkel mogelijk is op plekken waar er meetpunten uit beide richtingen (ascending én descending) worden waargenomen/gemeten. Er worden vaak meerdere meetpunten uit een gebied groter dan een pixel samengenomen om deze met elkaar te vergelijken en de densiteit van het aantal meetpunten in een ontbonden analyse is dus steeds een stuk lager dan bij een analyse van de aparte kijkrichtingen.

Bij de interpretatie moet men er rekening mee houden dat de beelden in ascending en descending mode niet op hetzelfde tijdstip/dezelfde dag genomen worden, waardoor men een interpolatie moet doen van de metingen om deze op een zelfde tijdstip met elkaar te kunnen vergelijken**. Het is mogelijk dat het resultaat

**doordat er een heel kleine afwijking is van de N-Z richting, wordt de waargenomen beweging minimaal beïnvloed door een N-Z beweging; deze wordt echter bijna altijd verwaarloosd

hierdoor beïnvloed wordt.

Wanneer de resultaten van de analyse van de ascending en descending mode hetzelfde resultaat geven (beide weg van de satelliet of beide naar de satelliet toe), is de beweging vooral verticaal. Wanneer deze volledig tegengesteld zijn aan elkaar (1 weg van de satelliet en 1 naar de satelliet toe), dan is de beweging vooral horizontaal.

**vaak wordt zowel op het tijdstip van het ascending beeld een interpolatie van de descending verplaatsingen als op het tijdstip van het descending beeld een interpolatie van de ascending verplaatsing berekend. Hierdoor zijn er wel meer datapunten in de tijd beschikbaar voor de analyse van de ontbonden verplaatsing.

3.3.1.4 Coherentie

De coherentie is een maat voor de lokale ruimtelijke correlatie tussen twee SAR-beelden die op verschillende tijdstippen zijn opgenomen. Het geeft aan in hoeverre de fase-informatie van de radarreflecties tussen die twee opnames consistent is gebleven. Coherentie wordt uitgedrukt als een waarde tussen 0 (geen correlatie) en 1 (perfecte correlatie).

Oorzaken van lage coherentie:

- Aanwezigheid van sneeuw, water, modder,...: Deze oppervlakken veranderen snel en reflecteren radarstralen onvoorspelbaar.
- Tijd tussen opnames: hoe langer de tijd tussen twee opnames, hoe groter de kans op decorrelatie (verlies van coherentie).
- Bodemverstoring: Bouwactiviteiten, landbouw, of aardverschuivingen veranderen het oppervlak.
- Vegetatiegroei

In stedelijke gebieden, waar gebouwen en infrastructuur weinig veranderen, is de coherentie meestal hoog. Hier kunnen zeer nauwkeurige metingen worden gedaan.

Samengevat: de coherentie bepaalt de kwaliteit van InSAR-metingen.

- Hoge coherentie = betrouwbare metingen.
- Lage coherentie = meetpunten vallen weg of zijn onbetrouwbaar.
- De coherentie wordt beïnvloed door veranderingen aan het oppervlak tussen de opnames.

Vaak wordt een bepaalde minimum coherentie ingesteld bij de verwerking die moet behaald worden om een meetpunt te behouden. Afhankelijk van het bedrijf dat de berekeningen uitvoert, wordt deze minimale waarde vastgelegd bij de analyse of kan je zelf instellen welke coherentie je minimaal wil. De coherentie wordt bv. ook kleiner bij grote verplaatsingen, wat ervoor kan zorgen dat bij een automatisch ingestelde minimale coherentie, de meetpunten met een grote verplaatsing verdwijnen.

3.3.1.5 Referentiepunt

InSAR meet relatieve verplaatsingen: de gemeten bewegingen zijn altijd ten opzichte van een gekozen referentiepunt binnen het analysegebied.

Er wordt aangenomen dat het referentiepunt stabiel is (geen verplaatsing). Dit punt kan gekozen worden in functie van de radareigenschappen (zeer hoge coherentie in alle beelden). Dit betekent dan dat, bij een analyse van een andere set van beelden, het referentiepunt kan wijzigen. Dit punt kan bv. ook gekozen worden in de buurt van een punt waarvan men de verplaatsing op een andere manier opvolgt (bv. flepos station) en waarvan men weet dat dit punt stabiel is.

Alle verplaatsingen die InSAR rapporteert, zijn de verplaatsingen van andere punten ten opzichte van dit referentiepunt en men verkrijgt dus relatieve bewegingen. Voor absolute metingen (bijvoorbeeld ten

opzichte van een nationaal coördinatenstelsel) zijn aanvullende data nodig, zoals GNSS-metingen, om het referentiepunt te koppelen aan een vast referentiefraam.

3.3.1.6 Sensor resolutie

We onderscheiden 2 resoluties:

1. **Ruimtelijke resolutie (spatial resolution)**

De ruimtelijke resolutie van een satellietbeeld bepaalt het kleinste detail dat een sensor kan onderscheiden op het aardoppervlak en wordt aangeduid door de afmetingen van het grid of de grootte van de pixels die onderscheiden kunnen worden binnen het beeld. De ruimtelijke resolutie hangt enerzijds samen met het type satelliet en anderzijds hangt dit samen met de grootte van het genomen beeld.

Voor SAR (radar) wordt de ruimtelijke resolutie apart berekend in de azimut- (vliegrichting) en range- (kijkrichting) richting. Een pixel is daardoor niet altijd vierkant, maar kan ook rechthoekig zijn (bv. SNT).

Voorbeelden van klassen:

- Lage resolutie: pixels > 30 m
- Middel: 10–30 m
- Hoog: 1–10 m
- Zeer hoog (VHR): < 1 m

Tabel 1 geeft een overzicht van de ruimtelijke resolutie voor enkele typische satellieten.

Voor infrastructuurtoepassingen is meestal hoge tot zeer hoge resolutie gewenst. Sommige satellieten zijn in staat om beelden te nemen met een verschillende ruimtelijke resolutie. Dit heeft dan een directe impact op de afmetingen van de genomen beelden (hoe hoger de ruimtelijke resolutie, hoe kleiner het beeld).

2. **Temporele resolutie (temporal resolution)**

Dit is de tijd tussen opeenvolgende opnames van hetzelfde gebied (ook wel revisit-tijd genoemd). Voor SAR is dit belangrijk voor het detecteren van kleine bewegingen over langere tijd. De nauwkeurigheid van de analyse verhoogt met een kleinere revisit-tijd en wanneer de tussentijd tussen de genomen beelden gelijk is (en er dus geen “ontbrekende” beelden zijn).

3.3.1.7 Horizontale positionering en nauwkeurigheid

De horizontale positionering verwijst naar de positie van de geolocatie (X,Y) van een meetpunt, waarbij voor de inschatting van de nauwkeurigheid, de positie vergeleken wordt met de werkelijke locatie op aarde. De nauwkeurigheid van de horizontale positionering is afhankelijk van verschillende factoren:

- Het gebruikte type SAR-satelliet (bijvoorbeeld C-band Sentinel-1, X-band TerraSAR-X, enz.)
- De gebruikte digitale hoogtekartaart (DEM)
- De helling van het terrein
- Het gebruikte interferometrische verwerkingsalgoritme

De horizontale positionering van meetpunten met InSAR is typisch nauwkeurig tot op enkele meters, maar is afhankelijk van de gebruikte satelliet en omstandigheden. De nauwkeurigheid van de positionering is het hoogst in de noord-zuid richting en is iets lager in de oost-west richting. Tabel 1 (zie 3.3.1.8) komt uit het rapport van Tre Altamira en geeft zowel de nauwkeurigheid in X,Y positionering als de meetnauwkeurigheid voor enkele typische satellieten (waaronder Sentinel (SNT) en TSX). Uit Tabel 1 blijkt duidelijk dat de horizontale positionering van SNT een pak minder nauwkeurig is dan deze van TSX (NZ locatie 8 m t.o.v. 1 m en OW locatie 12 m t.o.v. 3 m).

3.3.1.8 Nauwkeurigheid van de verplaatsing

De meetnauwkeurigheid bij InSAR hangt af van verschillende factoren, waaronder het gebruikte type SAR-satelliet (X-, C- of L-band), de kwaliteit van de gebruikte digitale hoogtekartaart (DEM), de verwerkingsmethode, de coherentie van de beelden en atmosferische invloeden.

Voor tijdreeks-InSAR (zoals Persistent Scatterer Interferometry, PSI) kan een nauwkeurigheid tot **millimeter niveau** (typisch 2–4 mm) worden bereikt, mits er voldoende beelden zijn en er een hoge coherentie is. Typische waarden die vaak vermeld worden voor X-band zijn een nauwkeurigheid van <1 mm/jaar, maar een nauwkeurigheid van ongeveer 5 mm voor een enkel meetpunt in de tijd.

Belangrijkste factoren die de nauwkeurigheid beïnvloeden:

- **Cohherentie:** Een hoge coherentie is essentieel voor nauwkeurige metingen. Lage coherentie (door vegetatie, verstoring, of snelle veranderingen) leidt tot minder of onbetrouwbare meetpunten.
- **Aantal en frequentie van SAR-beelden:** Hoe meer beelden en hoe kleiner de tijd tussen opeenvolgende opnames, hoe beter de precisie van de tijdreeksanalyse.
- **Atmosferische effecten:** Variaties in de atmosfeer tussen opnames kunnen de fase beïnvloeden en daarmee de nauwkeurigheid van de vervormingsmeting verminderen. Tijdreeks-InSAR-methoden corrigeren hier meestal voor.
- **Kwaliteit van de DEM:** Fouten in de hoogtekartaart kunnen leiden tot systematische fouten in de afgeleide vervorming.
- **Verwerkingsalgoritme:** Verschillende algoritmes (PSI, SBAS, SqueeSAR, etc.) hebben elk hun eigen gevoeligheid voor fouten en ruis.
- **Afstand tot het referentiepunt:** De nauwkeurigheid neemt af naarmate de afstand tot het stabiele referentiepunt groter wordt, o.a. door atmosferische variatie.

Tabel 1: vergelijking van nauwkeurigheid (meetnauwkeurigheid en X,Y positionering) i.f.v. type satelliet (Bron executive report van Tre Altamira)

Satellite	Band	Wavelength [cm]	Resolution RGxAZ [mxm]	North-South [m]	East-West [m]	Elevation [m]
ERS - ENVI	C-band	5.6	20x5	± 2	± 7	± 1.5
RSAT (<i>Standard Beam</i>)	C-band	5.6	20x5	± 2	± 7	± 1.5
SNT	C-band	5.9	5x20	± 8	± 12	± 8
CSK	X-band	3.12	3x3	± 1	± 1	± 0.5
TSX (<i>Stripmap</i>)	X-band	3.11	3x3	± 1	± 3	± 1.5
TSX (<i>Spotlight</i>)	X-band	3.11	1x1	± 0.5	± 3	± 1.5
ALOS-1 (<i>Fine Beam</i>)	L-band	23.6	16.6x16.6	± 1.5	± 3	± 2
ALOS-2 (<i>Fine SM3 Beam</i>)	L-band	23.8	10x10	± 1.5	± 3	± 2

3.3.1.9 SAR golflengte

SAR-sensoren werken op verschillende microgolf-golflengtes, meestal aangeduid als radar 'bands' (X-, C-, L-band). Tabel 1 geeft de golflengte voor enkele typische satellieten. Tabel 2 geeft een overzicht i.f.v. de gebruikte golflengte.

De golflengte bepaalt de penetratie, resolutie en gevoeligheid:

- Korte golflengte (X-band, ca. 3 cm):
 - o Voordelen:
 - Zeer hoge ruimtelijke resolutie (1–3 m) (zie 3.3.1.6).
 - Hoge nauwkeurigheid voor de opgemeten verplaatsing (2–3 mm). (zie 3.3.1.8).
 - Ideaal voor stedelijke gebieden en infrastructuur waar veel reflectoren (gebouwen, bruggen) aanwezig zijn.
 - o Nadelen:
 - Lage penetratie door vegetatie en bodem (zie 3.3.1.10).
 - Minder geschikt voor gebieden met veel begroeiing of voor diepere bodemprocessen.
 - Minder lange historische archieven beschikbaar.
- Middel-golflengte (C-band, ca. 5,5 cm):
 - o Voordelen:
 - Redelijke ruimtelijke resolutie (5–30 m).
 - Goede balans tussen ruimtelijke resolutie en penetratie.
 - Geschikt voor regionale monitoring, lineaire infrastructuur (wegen, spoor), en gebieden met lichte vegetatie.
 - Veel gratis data beschikbaar (Sentinel-1, ERS, ENVISAT).
 - o Nadelen:
 - Minder geschikt voor dichte vegetatie.
 - Nauwkeurigheid voor de opgemeten verplaatsing iets lager dan X-band (4–5 mm).
- Lange golflengte (L-band, ca. 23 cm):
 - o Voordelen:
 - Hoge penetratie door vegetatie en in de bodem.
 - Geschikt voor monitoring onder dichte vegetatie, bos, of natte gebieden.
 - o Nadelen:
 - Lage ruimtelijke resolutie (30–40 m).
 - Lagere meetprecisie (10–20 mm).
 - Minder geschikt voor stedelijke details of kleine objecten.

De theoretisch maximum meetbare verplaatsing tussen 2 opnames bedraagt $\frac{1}{4}$ van de golflengte en is dus voor:

- X-band: $\pm 0,8$ cm
- C-band: $\pm 1,4$ cm
- L-band: ± 6 cm

Dit betekent dat snelle of grote verplaatsingen sneller buiten het meetbereik van korte golflengtes kunnen vallen. Speciale analyse-technieken, die ook rekening houden met verplaatsing van nabijgelegen punten, kunnen hier eventueel een oplossing voor bieden.

Tabel 2: typische karakteristieken i.f.v. de gebruikte SAR golflengte

<i>Band</i>	<i>Golflengte (cm)</i>	<i>Penetratie</i>	<i>Resolutie (m)</i>	<i>Meetprecisie (mm)</i>	<i>Toepassing</i>
<i>X-band</i>	2.4–3.8	Laag	1–3	2–3	Stedelijk, infrastructuur
<i>C-band</i>	3.8–7.5	Medium	5–30	4–5	Regionaal, lineair
<i>L-band</i>	15–30	Hoog	30–40	10–20	Vegetatie, bodem

Samengevat:

- Hoe korter de golflengte, hoe hoger de ruimtelijke resolutie en meetprecisie, maar hoe minder diep het signaal doordringt in vegetatie of bodem.
- Hoe langer de golflengte, hoe groter het penetratievermogen, maar hoe lager de resolutie en meetprecisie.
- De keuze van de band hangt dus af van het doel: voor nauwkeurige monitoring van gebouwen of infrastructuur kies je normaal voor X-band (of C-band); voor monitoring onder vegetatie of in landelijke gebieden is L-band beter geschikt, ondanks de lagere nauwkeurigheid.
- De gebruikte satelliet “TerraSAR-X” valt in de groep van X-band.

3.3.1.10 Vegetatie/penetratie

Invloed op coherentie: Vegetatie zorgt vaak voor lage coherentie tussen SAR-beelden. Dit komt doordat bladeren, gras en andere vegetatie-elementen snel veranderen tussen opnames, waardoor de radarreflectie varieert.

In gebieden met veel vegetatie (“vegetated areas”) is de kans groot dat meetpunten (MP’s) wegvallen of onbetrouwbaar worden. Hierdoor is de dichtheid van meetpunten lager dan in stedelijke of kale gebieden.

Bandkeuze en vegetatie: Langere golflengtes kunnen beter door vegetatie heen penetreren naar het aardoppervlak. C-band (zoals Sentinel-1) kan hierdoor iets beter door lichte vegetatie heen meten dan X-band, maar beide zijn beperkt bij dichte begroeiing. L-band SAR (met langere golflengte) kan beter door dichte vegetatie heen dringen en is daarom geschikter voor monitoring in bosrijke gebieden, maar heeft een lagere ruimtelijke resolutie.

3.3.1.11 Atmosferische correctie

Dit is het proces waarbij de invloed van de atmosfeer op metingen wordt verwijderd of geminimaliseerd. Dit is essentieel, omdat atmosferische variaties de gemeten signalen kunnen verstoren en zo de nauwkeurigheid van bijvoorbeeld hoogte- of verplaatsingsmetingen negatief beïnvloeden.

De atmosferische component bestaat uit:

- **Troposferische vertraging:** veroorzaakt door variaties in temperatuur, druk en vooral waterdamp.
- **Ionosferische vertraging:** vooral relevant bij langere golflengtes (L-band), veroorzaakt door variaties in de elektronendichtheid.

De kwaliteit van de atmosferische correctie beïnvloedt ook het resultaat.

Naast bovenstaande zaken, zijn er nog een aantal zaken die een rol spelen bij de kwaliteit van de analyse en/of het aantal beschikbare meetpunten:

- Beschaduwing: doordat de satelliet schuin kijkt, kan het zijn dat er een deel van het aardoppervlak en de bijhorende objecten niet zichtbaar zijn in een bepaalde kijkrichting.
- Kwaliteit van de beelden: zowel de terugkeerperiode als de exacte positie van de satelliet in de ruimte hebben effect op de analyse.
- Gebruikt hoogtemodel: om een correctie te doen voor de hoogteligging van de meetpunten, wordt gebruik gemaakt van een digitaal hoogtemodel. De keuze van het gebruikte hoogtemodel heeft een impact op het resultaat, vooral de afmetingen van het grid en datum waarop dit werd opgemaakt spelen een belangrijke rol.

Er moeten keuzes gemaakt worden hoe met bovenstaande aspecten omgegaan wordt. Dat betekent concreet dat de analyse, uitgevoerd door 2 verschillende partijen nooit helemaal gelijk zal zijn en zelfs dat een analyse die door dezelfde partij opnieuw wordt uitgevoerd met een andere dataset of andere instellingen niet tot exact hetzelfde resultaat leidt. Er kan zowel een impact zijn op het resultaat van de locatie van de PS punten als de berekende vervorming. Om een analyse te kunnen uitvoeren, moeten de beelden door dezelfde satelliet constellatie genomen zijn en moet ook de kijkrichting van deze beelden gelijk zijn. Beelden van verschillende satellieten en beelden van een verschillende kijkrichting (ascending/descending) kunnen dus niet in eenzelfde analyse gecombineerd worden.

3.3.2 Data/beelden collectie, planning, prijszetting en satelliet issues

Zoals hierboven beschreven zijn er verschillende soorten radar satellieten en verschillende partijen die de beelden registreren. In functie van de leverancier van de beelden, worden deze al dan niet gratis op de markt gebracht. In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven dat in het rapport van Ciria (2022) staat. Hierin wordt een overzicht gegeven van enkele typische satellieten, hun resolutie, de terugkeerperiode, hun leeftijd en een aanduiding of de beelden al dan niet gratis ter beschikking worden gesteld.

Bij de commerciële satellieten worden beelden “op vraag” genomen en worden enkel beelden genomen die “besteld” werden. Er is dan echter wel een grote garantie dat deze beelden met een vaste frequentie genomen worden.

Ondertussen (zie H6) zijn er heel wat commerciële satellieten op de markt gebracht. Dit zal mogelijks wel een impact hebben op het InSAR landschap en de mogelijkheden om hoge resolutie beelden aan te schaffen.

Tabel 3: olijsting van de kenmerken van een aantal typische satellieten met verschillende golflengte (Bron Ciria rapport 2022)

Band	Satellites	Spatial resolution (range × azimuth, m)	Revisit frequency, days	Data availability	Data acquisition plan	Price
X-band	TerraSAR-X and PAZ	1 × 1 to 3 × 3	4-7	2007 to present	Programming on demand	Not free
	COSMO-SkyMed	1 × 1 to 3 × 3	ca. 4	2007 to present	Programming on demand	Not free
C-band	ERS	20 × 5	35	1992-2000	Theoretically global coverage but with large gaps in space and time	Free
	ENVISAT	20 × 5	35	2002-2012	Theoretically global coverage but with large gaps in space and time	Free
	Sentinel-1	5 × 20	6	2014 to present	Continuous acquisition for almost the entire surface of the Earth	Free
	RADARSAT	1 × 3 to 5 × 5	24	1995 to present	Programming on demand	Not free to everyone
L-band	ALOS	7 × 7 to 88 × 88	46-14	2006-2011 and 2014 to present	Global acquisition plan	Not free
	SAOCOM	10 × 10 to 30 × 30	8	2019 to present	Programming on demand	Not free

4 RESULTATEN VAN DE POC

4.1 ALGEMEEN

4 bedrijven kregen de mogelijkheid om een Proof of Concept (POC) uit te werken binnen een deelgebied in Brussel.

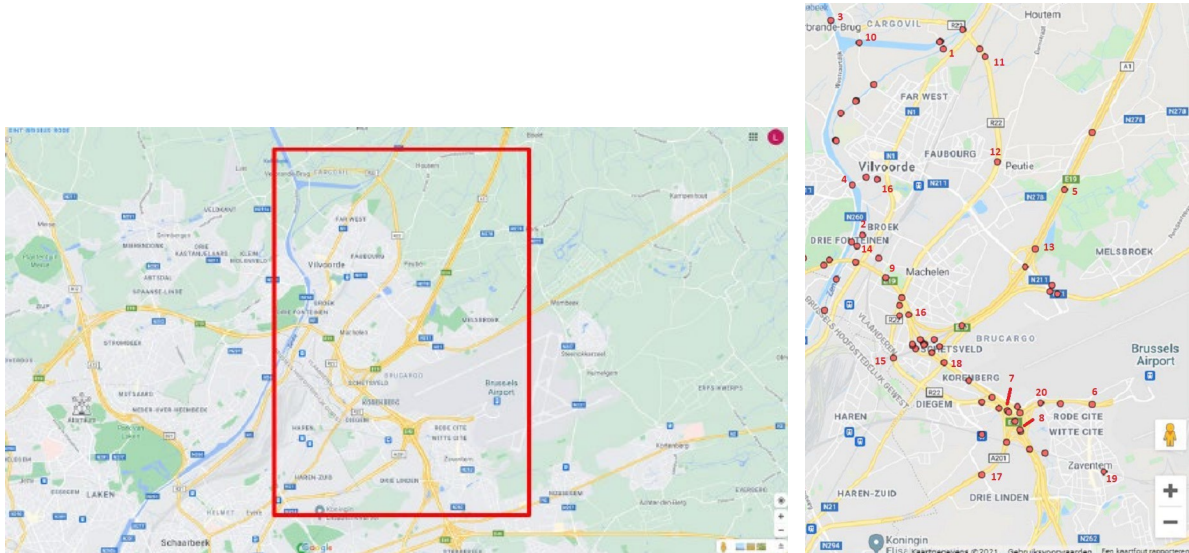
Deze bedrijven zijn:

- e-Geos: Italiaans bedrijf, schreef in samen met Nhazca
- Sensor: Nederlands bedrijf
- Skygeo: Nederlands bedrijf, schreef in samen met de Belgisch geologische dienst
- Tre Altamira: Italiaans/Spaans/Canadees bedrijf

Binnen dit deelgebied (6.5 x 8.5km) werd gevraagd om tijdens de POC voor 20 bruggen een detailanalyse te bezorgen (zie Figuur 4), naast de analyse van het volledige gebied met de TSX-beelden. Het al dan niet analyseren van de SNT-beelden werd toegelaten/aanbevolen, maar niet verplicht. Onder deze 20 bruggen bevindt zich het viaduct van Vilvoorde, waar waterpassingen omwille van veiligheidsredenen niet uitgevoerd worden.

De TSX-beelden zijn slechts in 1 kijkrichting beschikbaar (descending). De SNT-beelden zijn zowel in ascending als descending mode beschikbaar. Hierdoor is een opsplitsing in een horizontale (oost-west) en

verticale component enkel mogelijk bij de SNT-data. Tijdens de POC werd het vrijgelaten aan de inschrijvers of ze de ontbinding in de 2 componenten al dan niet uitvoerden.



Figuur 4: Deelgebied voor analyse tijdens POC

Het technisch rapport van de resultaten van de POC's per bedrijf wordt gegeven in bijlagen 2, 4, 5 en 7. Een zo goed mogelijke vergelijking van de verschillende resultaten werd opgemaakt. Enkele bedenkingen bij deze vergelijking worden hieronder opgesomd. Uiteindelijk werd het bedrijf Tre Altamira geselecteerd om het project uit te voeren. Vooral hun aangepaste analyse, die het mogelijk maakt om ook grotere variaties in verplaatsingen te detecteren heeft hierbij een belangrijke rol gespeeld.

- Elk bedrijf leverde de resulterende meetpunten (zowel DS als PS) aan via een platform. De performantie van en mogelijkheden binnen deze portalen verschilde. Het is duidelijk dat een grote hoeveelheid data beschikbaar wordt gesteld.
- Elk bedrijf gaf aan dat ze voor een deel van de analyse of verwerking ter hoogte van de bruggen, naast de automatische verwerking ook een deel manuele taken/analyses deden. Voorkennis over werken/veranderingen aan de structuur/periodes van niet beschikbaar zijn van data kan helpen in de interpretatie van de meetpunten. Maar dit betekent ook dat er bij verschillende partijen af en toe fouten of vreemde resultaten meegedeeld werden.
- Een 1 op 1 vergelijking van de resultaten was niet evident:
 - o De precieze locatie van de meetpunten is geïmpacteerd door de verwerking (keuze referentiepunt, atmosferische correctie, coherentie, gebruikt hoogtemodel,...), waardoor deze MP niet op dezelfde X/Y coördinaat liggen. Zie ook 3.3.1.7 voor de nauwkeurigheid van de positionering in het X,Y vlak. Het vergelijken van individuele meetpunten was daardoor ook niet mogelijk.
 - o Afhankelijk van de grenzen (coherentie) die opgesteld werden in de automatische analyse, worden niet altijd evenveel punten weerhouden als MP.
 - o De keuze van het referentiepunt heeft een impact op de verplaatsing die bepaald wordt tijdens de analyse. De keuze van het referentiepunt werd vrijgelaten, waardoor er ook telkens andere resultaten te verwachten zijn.

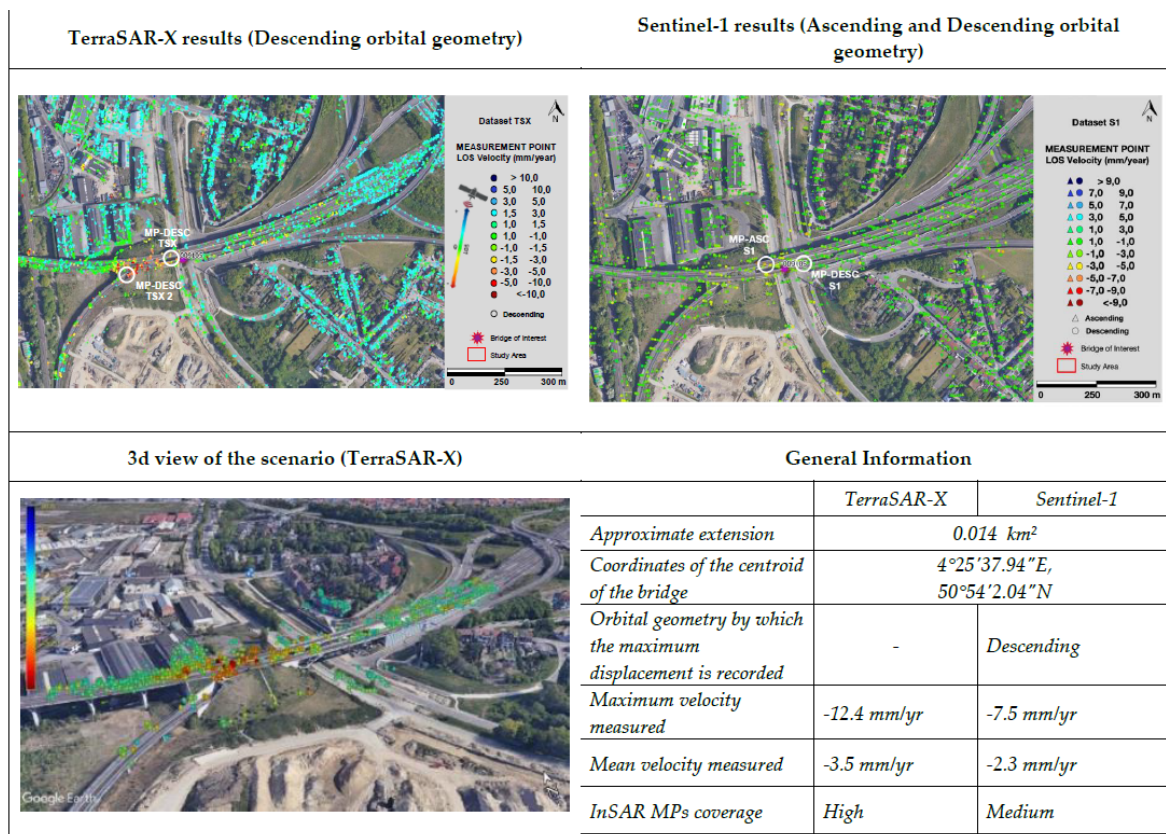
- Voor de DS kunnen meerdere combinaties van reflecties genomen worden. Bij sommige analyses worden sommige reflecties meerdere keren gebruikt, om zo een grotere dekking te creëren.
- Er werd door de meeste partijen een rapport aangeleverd per brug, waarop zoveel mogelijk info, nodig voor de analyse van die brug, samengevat wordt. De opgeleverde rapporten per bedrijf worden meegegeven in de bijlage 1, 3 en 6.

4.2 VOORBEELDEN

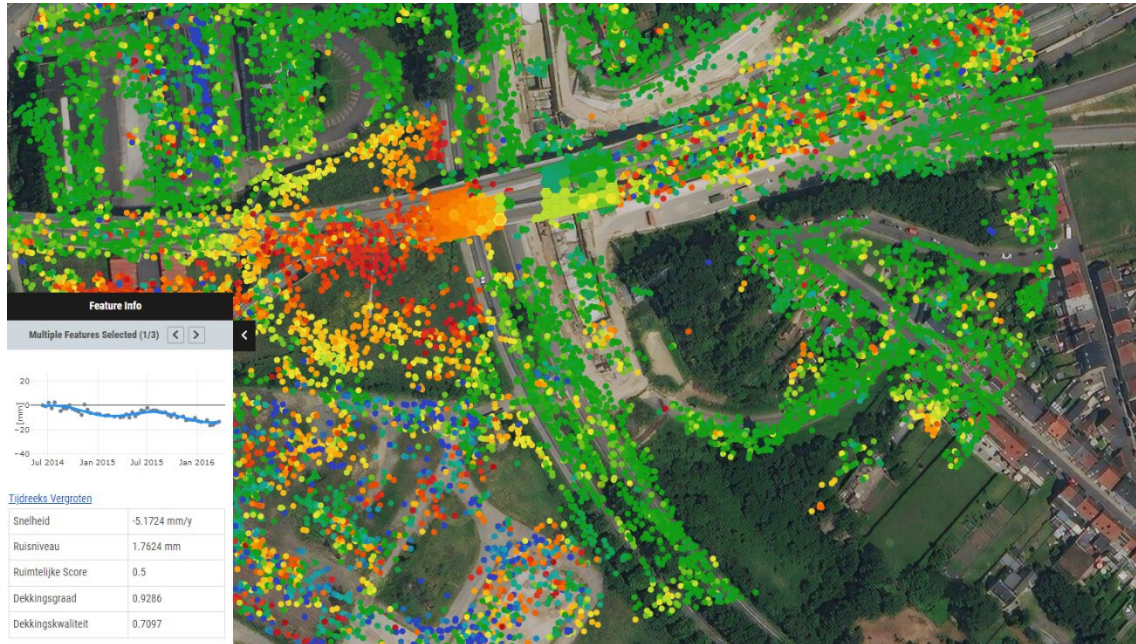
Hieronder wordt voor enkele gevallen de vergelijking tussen de verschillende partijen gemaakt.

4.2.1 Grote verplaatsing spoorwegbrug over R22

Voor brug 9105 (spoorwegbrug in spoorlijn over R22) zien we een significante zetting, vooral aan 1 zijde van de brug. Dit zien we terug bij alle partijen, evenals de variatie van de deformatie i.f.v. de seizoenen/temperatuur (SNT-data). Het gaat om vrij grote zettingen (lokaal tot een 7-tal cm over periode 2015-2022). Hier is de interpretatie van de SNT-data beduidend eenvoudiger omwille van de langere tijdsserie. De geanalyseerde beelden van de verschillende partijen voor deze locatie worden weergegeven in Figuur 5a tem Figuur 5d.



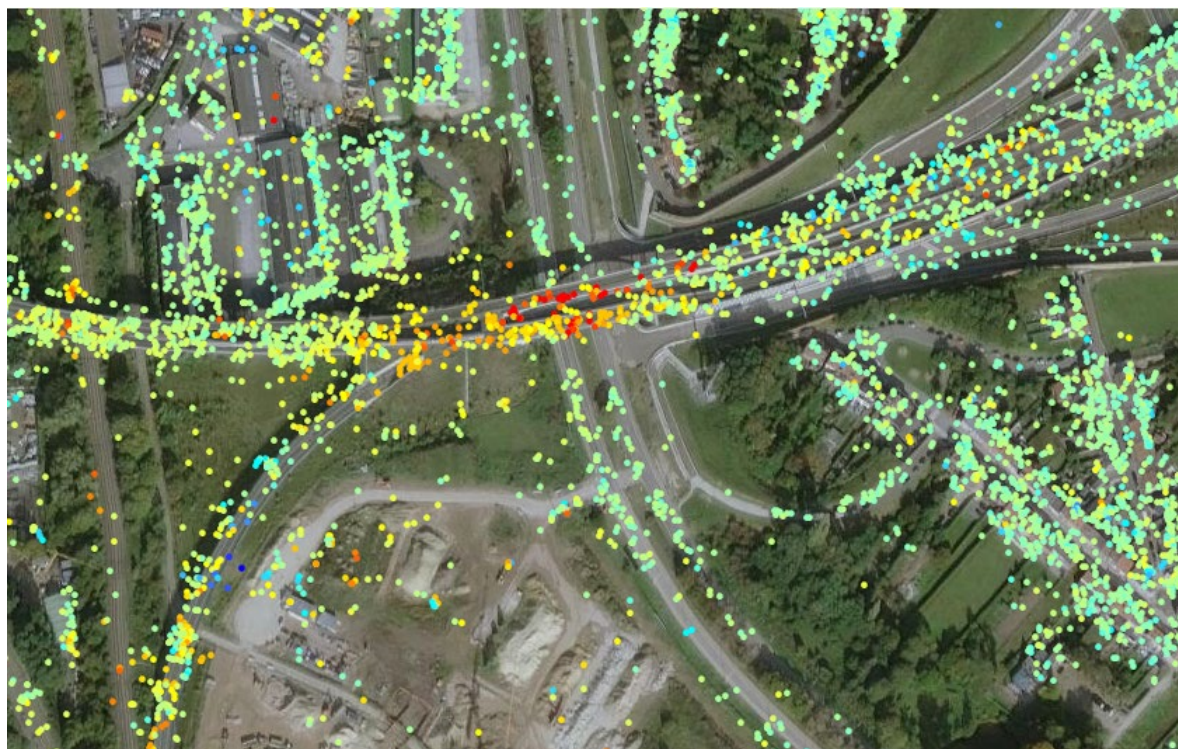
Figuur 5a: Resultaat InSAR analyse t.h.v. spoorwegbrug in spoorlijn 25N over R22, analyse uitgevoerd door e-Geos (Bron – rapport e-Geos)



Figuur 5b: Resultaat InSAR analyse t.h.v. spoorwegbrug in spoorlijn 25N over R22, analyse uitgevoerd door Sensor (Bron: platform Sensor)



Figuur 5c: Resultaat InSAR analyse t.h.v. spoorwegbrug in spoorlijn 25N over R22, analyse uitgevoerd door Skygeo (Bron: platform Skygeo)

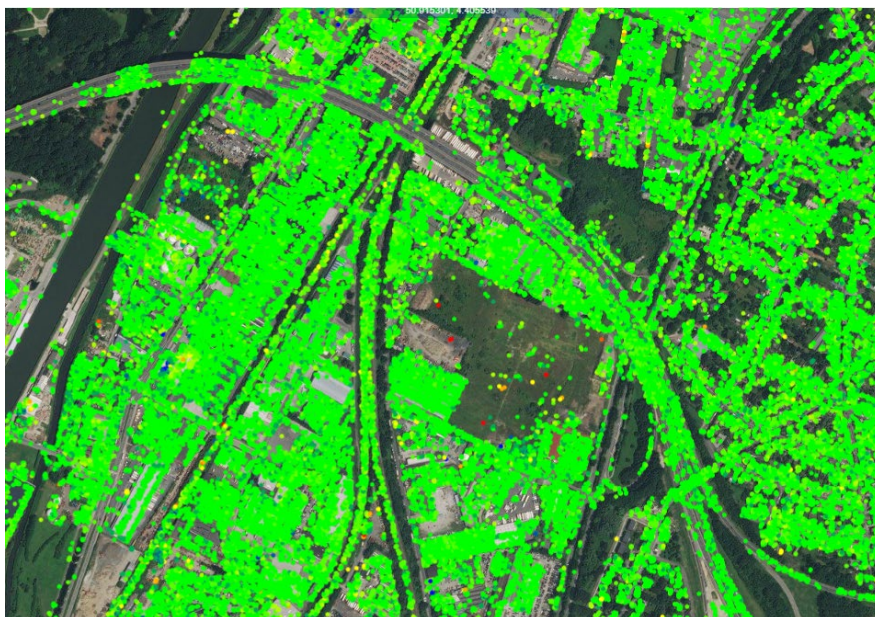


Figuur 5d: Resultaat InSAR analyse t.h.v. spoorwegbrug in spoorlijn 25N over R22, analyse uitgevoerd door Tre Altamira (Bron: platform Tre Altamira)

4.2.2 Viaduct van Vilvoorde

Het viaduct van Vilvoorde lijkt vrij grote verplaatsingen te ondergaan i.f.v. de seizoenen/temperatuur variaties. Bij 3 van de 4 bedrijven resulteerde dit erin dat er weinig tot geen MP aanwezig zijn op de brug van Vilvoorde. Zelfs met de kennis van deze grote verplaatsing o.i.v. temperatuur konden de meetpunten niet beschikbaar gesteld worden. De geanalyseerde beelden van de verschillende partijen voor deze locatie worden weergegeven in Figuur 6a tem Figuur 6d.

Op het platform van Tre Altamira is er een quasi volledige dekking van het viaduct van Vilvoorde. Hierbij zien we deelgebieden die bewegen in de richting van de satelliet (blauw), maar ook delen die bewegen weg van de satelliet (rood). Figuur 7 geeft voor 2 gebieden de gemiddelde vervorming weer. Hierbij kunnen we zien dat er vooral een vrij grote variatie is i.f.v. de seizoenen. Omdat we geen exact veelvoud van een cyclus bekijken, zorgt dit ervoor dat het lijkt alsof er een verplaatsing is, maar er is dus vooral een schommeling waar te nemen (wss temperatuur gerelateerd).



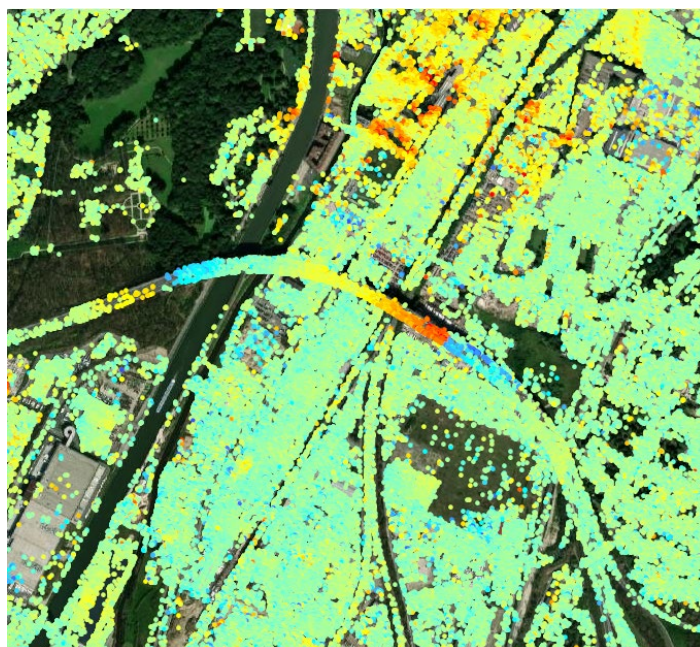
Figuur 6a: Resultaat InSAR analyse t.h.v. Viaduct van Vilvoorde, analyse uitgevoerd door e-Geos (Bron – platform e-Geos)



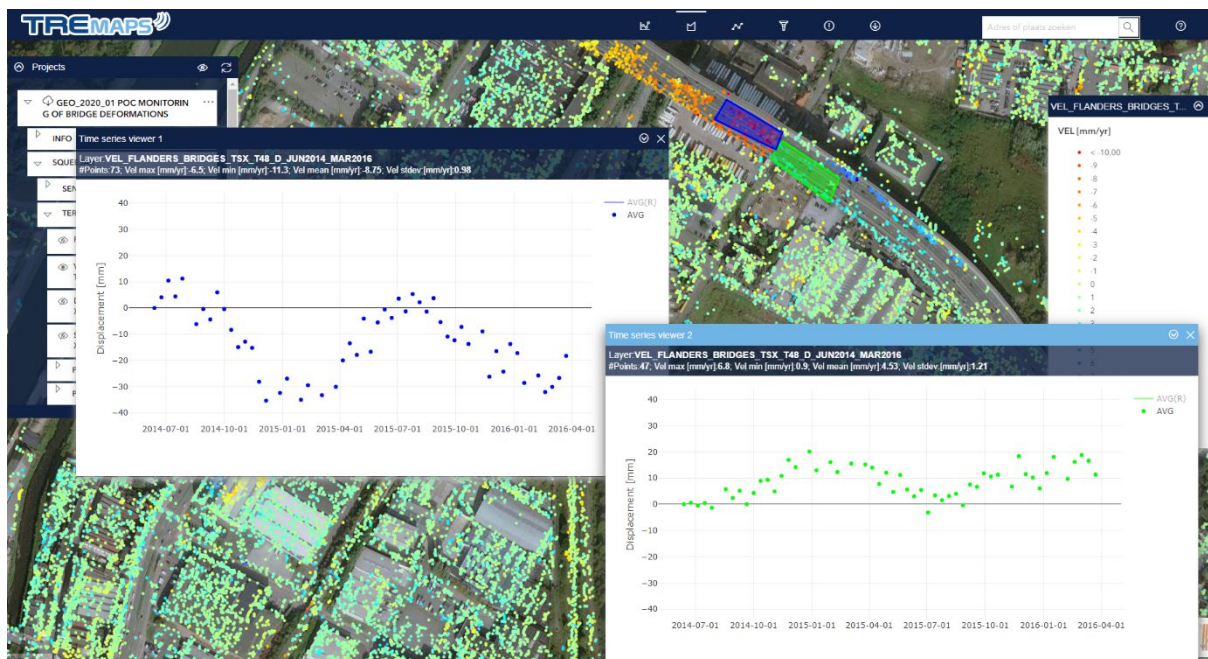
Figuur 6b: Resultaat InSAR analyse t.h.v. Viaduct van Vilvoorde, analyse uitgevoerd door Sensor (Bron: platform Sensor)



Figuur 6c: Resultaat InSAR analyse t.h.v. Viaduct van Vilvoorde, analyse uitgevoerd door Skygeo (Bron: platform Skygeo)



Figuur 6d: Resultaat InSAR analyse t.h.v. Viaduct van Vilvoorde, analyse uitgevoerd door Tre Altamira (Bron: platform Tre Altamira)

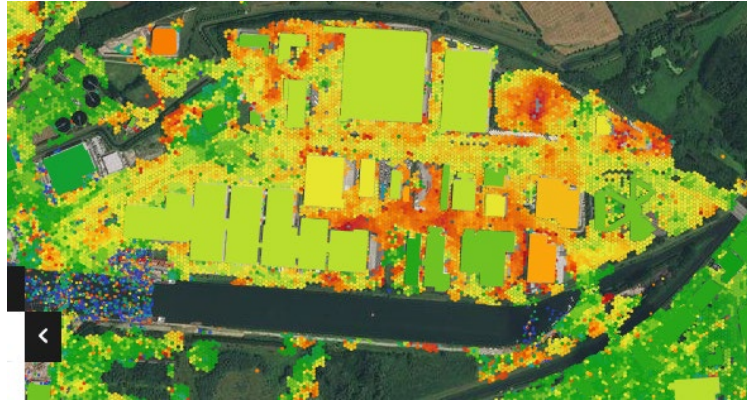


Figuur 7: Detail t.h.v. Viaduct van Vilvoorde, analyse uitgevoerd door Tre Altamira (Bron: platform Tre Altamira)

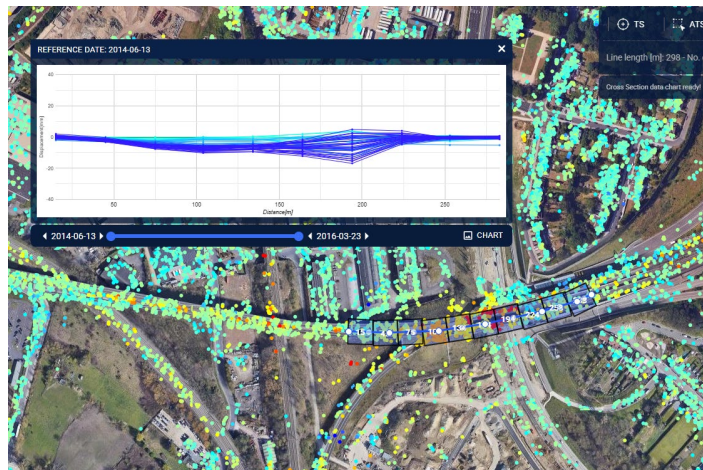
4.3 INTERPRETATIE

Bepaalde afgeleide producten bieden wel een meerwaarde voor de interpretatie van de resultaten:

- Combineren van meetpunten in een gemiddelde over een groter gebied: hoewel vrij “black box” omdat er gewogen waarden meegenomen worden (i.f.v. coherentie waarde en ligging), blijkt de indeling van Sensor in hexagonalen en rechthoeken (i.f.v. type object) wel een vereenvoudiging voor de interpretatie (zie Figuur 8).
- Lengteprofielen: het kunnen genereren van lengteprofielen over een gekozen lengte en met een vrij te kiezen breedte (zie Figuur 9).
- 3D-beeld: Het aanleveren van een 3D beeld met daarop de meetpunten. Dit is enkel mogelijk voor TSX-data omdat hierbij de hoogte-inschatting van de meetpunten vrij goed is (zie Figuur 10).



Figuur 8 : Voorbeeld van een verdeling van het gebied in hexagonen: geeft gebiedsdekkende weergave (Bron: platform Sensor)



Figuur 9: Voorbeeld van een vrij te genereren lengteprofiel (Bron: platform Tre Altamira)



Figuur 10: Voorbeeld van een 3D beeld van een brug, met daarop de meetpunten afgeleid van de TSX-data (Bron: rapport e-Geos)

5 FINALE ANALYSE

5.1 FINAAL BESTEK

Na de uitvoering van de POC werden enkele kleine wijzigingen aan het technisch gedeelte doorgevoerd binnen het bestek. Het bestek en de finale wijzigingen (Bijlage 8/84 tot 8/88) zijn terug te vinden in Bijlage 8.

De minimale vereisten die opgenomen werden in het bestek zijn:

1. **Puntsgewijze vervormingsmap**
Een InSAR analyse moet uitgevoerd worden in het gevraagde gebied, waarbij een puntsgewijze InSAR vervormingsmap als resultaat ter beschikking gesteld wordt voor het volledige gebied (dus zowel de punten op de brug als alle tussenliggende punten).
 2. **PS en DS punten**
Het resultaat omvat zowel PS (persistent scatterer) als DS (distributed scatterer) punten. Er moet een duidelijk onderscheid zijn tussen de PS- en de DS-punten. Deze moeten gezamenlijk en afzonderlijk raadpleegbaar zijn.
 3. **Platform**
Er moet een platform ter beschikking gesteld worden, waarop resultaten van de analyse kunnen bekeken en opgevraagd worden. De resultaten van de analyse blijven gedurende minimaal 3 jaar beschikbaar op dit platform. De data wordt bovendien aangeleverd voor de uiteindelijke oplevering.
 4. **Weergave van vervorming en vervormingssnelheid**
De vervorming en vervormingssnelheid van de InSAR punten dienen individueel en in groep opvraagbaar te zijn en een inschatting van de vervorming en vervormingssnelheid over de volledige of een beperkte beschikbare tijdspanne toelaten.
 5. **Onderscheid Sentinel – TerraSAR-X**
De resultaten van de verschillende satellieten zijn duidelijk onderscheidbaar en zowel afzonderlijk als samen raadpleegbaar op het platform.
 6. **Nauwkeurigheid**
De onzekerheid van de analyse wordt weergegeven, zodat een inschatting van de nauwkeurigheid van de weergegeven vervorming mogelijk is.
 7. **Georeferentie**
De ligging van de InSAR punten in de ruimte en de nauwkeurigheid van de ligging van de punten dient zo hoog mogelijk te zijn en dient bovendien raadpleegbaar te zijn voor elk punt. De X,Y-coördinaten van de punten moeten beschikbaar zijn in Lambert72 en WGS84. De Z-coördinaat dient uitgedrukt te worden in mTAW. Uitermate veel aandacht moet besteed worden aan de transformatie van de coördinaten. Indien manuele aanpassingen gedaan worden aan de locatie, dienen deze gerapporteerd en toegelicht te worden.
 8. **Lengte- en breedteprofielen**
Van elke brug moet het mogelijk zijn lengte en/of breedteprofielen te genereren, waarbij de vervorming op alle tijdstippen langsheen de profielen geplot wordt voor alle punten binnen een opgegeven breedte.
-

9. Rapportage

Er wordt door de inschrijver in een rapport een vergelijking gemaakt van de analyse van de beschikbare hoge resolutiebeelden en de beschikbare Sentinel-1 beelden. Op basis hiervan kan besloten worden wat de meerwaarde of noodzaak is van het gebruik van hoge resolutiebeelden. Er wordt verduidelijkt in welke mate een groter aantal beelden (voor de hoge resolutiebeelden) nog tot een verbetering van het resultaat kan leiden.

Naast de minimale vereisten, werden in het bestek een aantal bijkomende vereisten opgesomd. Er werd gevraagd zoveel als mogelijk aan deze bijkomende vereisten te voldoen. Deze bijkomende vereisten worden opgesomd in 5.2.2, waar ook de conclusies met betrekking tot deze eisen geformuleerd worden.

5.2 RESULTAAT

In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van de ervaringen binnen het project en wordt getracht op basis van de resultaten in te schatten wat de meerwaarde van een InSAR analyse binnen Vlaanderen kan zijn. Voor meer gedetailleerde informatie over het eindresultaat wordt verwezen naar het eindrapport in bijlage 9.

5.2.1 Beschikbare resultaten

Door Tre Altamira werden als eindresultaat aangeleverd:

- Een technisch eindrapport met daarin heel wat uitleg over de techniek, nauwkeurigheden, impact van snelle vervormingen,... Bijkomende info over de specifieke vereisten binnen het bestek worden 1 per 1 behandeld in het rapport (zie Bijlage 9).
- een "monograph" per brug waarvan een shapefile werd aangeleverd: een document met daarover een samenvatting van de relevante meetresultaten per brug. Zie Bijlage 10 voor een oplistijng van de bruggen waarvan de shapefiles werden aangeleverd aan Tre Altamira. Zie Bijlage 11 voor de monografieën van alle bruggen waarvan de shapefiles werden aangeleverd.

Aan alle minimale vereisten werd voldaan. De specifieke vereisten worden behandeld in 5.2.2. Hieraan gerelateerd worden in 5.4 ook de onderzoeksvragen en de antwoorden hierop verder uitgewerkt.

In de paragrafen 5.2.3 t.e.m. 5.2.7 wordt extra informatie over het behaalde resultaat toegelicht.

5.2.2 Specifieke vereisten

In het bestek werden een aantal bijkomende vereisten gesteld. De vereisten waren optioneel, maar het al dan niet voldoen aan de vereiste werd wel mee opgenomen in de scoring van de aanbieders. In het cursief is telkens de vereiste uit het bestek opgesomd. Daaronder wordt toegelicht in hoeverre aan de vereiste uiteindelijk voldaan was na de finale analyse.

1. Maximale beschikbaarheid van resultaat in geval van werkzaamheden

Er wordt op een optimale manier omgegaan met bruggen waar werkzaamheden worden uitgevoerd, zodat er een maximaal aantal betrouwbare InSAR punten aanwezig is tot net voor en net na de werken. Er wordt aangegeven of het een meerwaarde is dat deze periode wordt opgegeven (bv. binnen de beheerstoepping) of dat deze verstoringen automatisch kunnen gedetecteerd worden.

Aan de hand van de analyse van de Sentinel beelden, waar een langere tijdsperiode beschikbaar is, kan de techniek beoordeeld worden.

Doelstelling van deze specifieke eis was om te kijken of het mogelijk was om op een automatische manier om te gaan met werken. Op voorhand was er het idee dat er mogelijks een analyse zou kunnen gebeuren op de data voor en na de werken of dat de beelden die verstoord worden door de werken automatisch niet gebruikt zouden worden. Dit blijkt moeilijk. Tijdens de POC werd aangegeven dat dit een optie is, maar dat het weglaten van beelden impact heeft op de nauwkeurigheid van het resultaat. Bovendien zijn het slechts kleine delen van beelden die dan niet gebruikt mogen worden, wat het automatiseren quasi onmogelijk maakt.

Door Tre Altamira werd een automatisatie doorgevoerd om te kijken of er een variatie is in de amplitude van het weerkaatste signaal en deze te koppelen met de kwaliteit van de gedetecteerde verplaatsing. De punten waarbij een plotse verandering optreedt in beide op hetzelfde moment, werden toch behouden in de analyse. Deze analyse werd toegepast op de bruggen waarvoor shapefiles aanwezig zijn en leidde vooral tot het detecteren van punten die plots wel een goede coherentie vertoonden. Parameters werden toegevoegd om deze punten te identificeren (zie ook bijlage 9).

Een andere optie lijkt om nooit lange meetperiodes in 1 keer te analyseren, maar een soort lopende analyse over telkens een aantal jaar uit te voeren, waarbij deze analyses dan nog aan elkaar gekoppeld dienen te worden. In de huidige analyse werd dit niet mee opgenomen, gezien de beperkte dataset (in de tijd) van de TSX-beelden.

2. Omgeving

De resultaten van de InSAR analyse in de omgeving van de brug moet beschikbaar zijn. Het is duidelijk welke punten op de brug en welke punten naast de brug liggen en voor welke punten dit onzeker is. In overleg met de aanbestedende overheid wordt bepaald hoe deze gegevens mee in de rapportage van de bruggen kan opgenomen worden.

In de applicatie zijn alle beschikbare MP zichtbaar, dus zowel de punten op de brug als deze naast de brug en kan men de analyses van de verplaatsingen van deze punten bekijken door zelf deelgebieden te selecteren of lengteprofielen te maken. Binnen de monographs wordt op basis van de hoogteligging ingeschat welke punten op de brug liggen en welke ernaast liggen a.h.v. een kleurindeling (paars/wit). Op het initiële platform was deze data ook beschikbaar in de applicatie. Tre Altamira ging omwille van snelheid en mogelijks andere zaken over naar een ander/nieuw platform waarbij deze data niet meer zichtbaar is binnen de applicatie zelf, maar er kan wel gefilterd worden op hoogte.

Het blijkt dus wel mogelijk om in het platform zelf bv. een deelanalyse zichtbaar te maken van punten die op de brug liggen, maar voldoende aandacht dient besteed te worden aan de opmaak van het bestek, zodat deze gegevens ook binnen de applicatie beschikbaar zijn.

3. Automatisering van de analyse

De kwaliteit van de automatische analyse benadert zo goed als mogelijk de kwaliteit van een manuele analyse die per brug zou uitgevoerd worden.

Omwille van het zeer groot aantal bruggen en structuren binnen Vlaanderen, was er de hoop dat een volledig automatische analyse zou kunnen uitgevoerd worden. Het bleek evenwel dat bruggen waarvan geen shapefiles beschikbaar waren, een veel lager aantal MP beschikbaar hadden. Een semiautomatische analyse werd uitgevoerd, waarbij in de gebieden van de bruggen met shapefiles een licht andere analyse werd toegepast dan in het volledige gebied. Gezien van een aantal bruggen de shapefiles nog niet ingetekend waren in iASSET, betekende dit dat het ook veel moeilijker was om van deze bruggen een beoordeling uit te voeren. Net voor de oplevering van het eindrapport werd daarom nog een nieuwe reeks shapefiles aangeleverd.

Tijdens de POC (waar een veel kleiner aantal bruggen geanalyseerd werd), gaven ook de andere partijen aan t.h.v. de bruggen een licht andere selectie van parameters door te voeren.

Deze eis werd dus niet volledig gehaald.

4. Automatiseren van lengteprofielen

Er worden automatisch lengteprofielen gegenereerd van de brug, waarbij de breedte van de te beschouwen zone afhankelijk is van de breedte van de brug. De lengteprofielen worden opgenomen in het automatisch opgeleverd rapport per brug. In overleg met de aanbestedende overheid wordt beslist vanaf welke breedte het zinvol is een lengteprofiel te ontdebellen in de breedte. Het lengteprofiel volgt de vorm van de brug. De locatie van de landhoofden en pijlers worden aangegeven op het lengteprofiel. De lengteprofielen worden aan de uiteindes van de brug 20m verder doorgetrokken dan de shapefiles die worden aangeleverd van de bruggen, volgens de as van de weg. Voor brede bruggen wordt bekeken of ook dwarse profielen kunnen gemaakt worden, ter hoogte van de pijlers, de landhoofden, centraal in de overspanning...

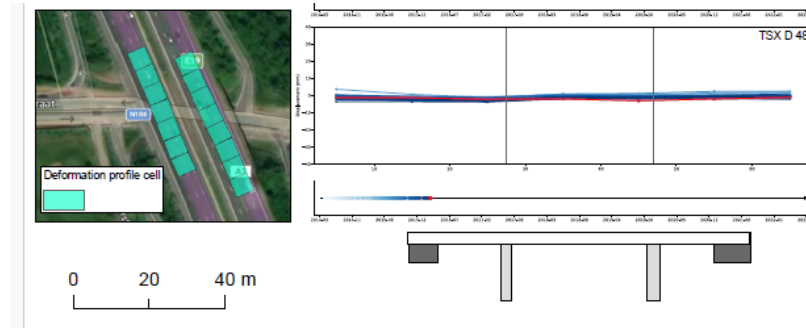
In de monographs werd van elke brug een lengteprofiel toegevoegd, waarbij aan de vereisten voldaan werd. Zowel voor de SNT-beelden als de TSX-beelden werden lengteprofielen opgesteld, waarbij automatisch kleinere deelgebieden gedefinieerd worden per brug waarbinnen telkens een gemiddelde verplaatsing per deelgebied geplot wordt. Omwille van het veel dener aantal MP, zijn de deelgebieden bij de TSX analyse een stuk kleiner dan bij de SNT analyse, waardoor het lengteprofiel veel eenduidiger te interpreteren valt. Omwille van de resolutie van het grid, is het mogelijk om voor TSX (3 m x 3 m) steeds deelgebieden van 10 m x 10 m te definiëren. Bij SNT is de resolutie van het grid asymmetrisch (5m x 20m) en hangt de indeling in deelgebieden af van de oriëntatie van de brug t.o.v. de kijkrichting.

Het opsplitsen in 2 parallelle lengteprofielen per brug of het opmaken van dwarse lengteprofielen per brug bleek niet zinvol, gezien het beperkt aantal MP op de brug.

Bij de opmaak van de lengteprofielen werd geen rekening gehouden met de locatie van de landhoofden en de pijlers, noch met de oriëntatie van de landhoofden en pijlers. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 11. Gezien de afzonderlijke delen en de ondersteunde delen zich anders kunnen gedragen, zou dit wel nog een meerwaarde kunnen opleveren. Dit werd bevestigd in de studie van Eurostruct (zie 6.2) en is dus iets wat bij een vervoltraject best meegenomen wordt.

BRIDGE: 237





Figuur 11: Verschil in oriëntatie van landhoofden, pijlers en brug t.o.v. oriëntatie van deelgebieden voor opmaak van lengteprofiel

5. Detecteren van plotse veranderingen in verplaatsing

Niet enkel lineaire verplaatsingen (met een constante verplaatsingssnelheid), maar ook seizoensgebonden variaties en plotse veranderingen in de verplaatsingssnelheid kunnen automatisch gedetecteerd worden. Hierbij is het van belang dat een plotse verandering (sprong of knik) in de verplaatsingen zo snel mogelijk kan gedetecteerd worden en niet resulteert in het ongeldig markeren van InSAR punten. De punten op of in de onmiddellijke omgeving van een brug die een verandering in gedrag (zowel in reflectie, ruis als verplaatsingssnelheid) ondergaan, worden gemarkeerd in het rapport en op het (web)platform.

Het gebruikte algoritme (squeeSAR) gebruikt geen lineaire veronderstelling voor de analyse, waardoor seizoensgebonden en andere variaties sowieso meegenomen worden. Een detectiesysteem voor het geautomatiseerd onderkennen van plotse veranderingen in gedrag werd geprogrammeerd, waardoor afwijkende punten aangeduid kunnen worden op de monographs en in de applicatie weergegeven worden.

In de huidige analyse werd gedefinieerd dat afwijkend gedrag overeenstemt met een verandering van snelheid van verplaatsing > 5 mm/jaar of een plotse sprong > 5 mm, waarbij deze verandering gedurende minstens 4 opeenvolgende beelden of 60 dagen moet optreden. In de metadata wordt meegegeven op welke datum het veranderend gedrag optreedt en wat de grootte van de verandering is.

Hier zijn er zeker mogelijkheden in de toekomst om dit te optimaliseren wanneer er meer ervaring is met het interpreteren van de data.

6. Temperatuursvariaties

Bewegingen van de brug zelf onder invloed van temperatuursvariaties worden niet automatisch uitgefilterd. Er is een analyse beschikbaar waarbij deze effecten wel en een analyse waar deze effecten niet uitgefilterd werden. Er wordt rekening mee gehouden dat er mogelijks slechts een deel van een sinusoïde aanwezig is, omwille van een tijdsreeks die niet een exact aantal jaren omvat en een zo goed mogelijke fit en correctie wordt nagestreefd.

Vaak zijn de bewegingen/gedetecteerde verplaatsingen gerelateerd aan variaties in temperatuur. Dit seizoenseffect kan nuttig zijn om te onderkennen, maar maakt het soms moeilijk om veranderingen in gedrag snel op te merken. Er werd daarom gevraagd om een analyse uit te voeren die de bewegingen onder thermische wijzigingen niet corrigeert en een analyse die deze wel corrigeert. In de initiële analyse waren beide aanwezig en was er ook een kaart waarop de amplitude van de thermische variaties kon gezien worden, maar in het finale resultaat wordt enkel de gecompenseerde data weergegeven en is de amplitudekaart (zowel op de monographs als in de applicatie) niet meer aanwezig.

Voor de temperatuurscompensatie werd gebruik gemaakt van de temperatuur die opgemeten werd in opendata.meto.be of www.wundergrund.com. De thermische constante die gebruikt werd, wordt wel weergegeven in het eindresultaat.

De compensatie voor temperatuur/seizoen schommelingen leidt er wel toe dat de analyse nog gevoeliger is voor degene die de verwerking uitvoert en maakt ook dat men de amplitude t.g.v. thermische variaties niet meer eenduidig kan waarnemen. Het wordt aangeraden om toch beide situaties (met en zonder temperatuur correctie) weer te geven als resultaat, zodat degene die de data bekijkt zelf kan beslissen welke data meest relevant is.

7. Alarmeringssysteem

Een alarmeringssysteem dat aan de hand van een algoritme een automatische beoordeling geeft per brug of deze mogelijk de aanvaardbare criteria voor deformaties overschrijdt wordt opgesteld. Deze criteria worden in overleg met de aanbestedende overheid uitgewerkt, waarbij er verschillende mogelijke criteria voorgelegd worden door de opdrachtnemer (bv. plotse afwijking, wijziging in gedrag van structuur, vervorming groter dan ...mm(/jaar), variatie in amplitude van beweging...). Het is mogelijk om de criteria per brug(type) of overspanning aan te passen. Er wordt bijvoorbeeld een onderscheid gemaakt tussen een situatie waarbij de aanvaardbare criteria voor deformaties niet worden overschreden (groen), een situatie waarbij een eerste grenswaarde wordt overschreden (oranje) en een situatie waarbij een tweede grens wordt overschreden (rood alarm). Hierbij kan een onderscheid gemaakt worden in functie van de locatie van het punt (pijler, landhoofd, overspanning). Wanneer onvoldoende informatie beschikbaar is om een oordeel te vellen over de toestand van de brug, kan deze een grijze of witte code krijgen. De alarmering wordt gevisualiseerd in de rapporten en op het platform.

Een alarmeringssysteem werd uitgewerkt, waarbij gekeken wordt of de gedetecteerde verplaatsing binnen elke polygoon die aangeleverd werd binnen de shapefiles vergeleken wordt met de standaardafwijking bepaald a.h.v. alle beelden, resulterend in een code groen-oranje of rood. De opgestelde alarmeringsfunctie diende vnl. om aan te tonen dat automatisering van en alarmering mogelijk was. Allerlei criteria zouden kunnen opgesteld worden om op te alarmeren, maar worden mogelijks best opgesteld i.f.v. het brugtype en/of onderdeel (brugdek, pijler, landhoofd...).

Deze informatie is enkel beschikbaar op de monographs en niet op de applicatie. Er werd dus niet 100% aan deze eis voldaan.

8. Betrouwbaarheid van het resultaat per brug

Er wordt aangegeven of een resultaat voor een bepaalde brug voldoende betrouwbaar is om een inschatting te geven van het gedrag van de brug (% beschikbare betrouwbare InSAR punten binnen een (onderdeel) van een shapefile, verdeling van de punten binnen de shapefiles, ruisniveau en/of betrouwbaarheid van de gemiddelde vervorming, ..., waarbij het belangrijk is om in alle zones van de brug voldoende punten beschikbaar te hebben). Er wordt een betrouwbaarheidsinterval aangeduid op het lengteprofiel.

De standaardafwijking van de MP wordt weergegeven en kan gebruikt worden om de betrouwbaarheid in te schatten. Daar waar geen MP aanwezig zijn binnen de deelgebieden voor de opmaak van de lengteprofielen, wordt uiteraard geen data geplot op de lengteprofielen. Er moeten gegevens van 2 aan elkaar grenzende deelgebieden aanwezig zijn om een profiel te tekenen. Indien dat niet het geval is, wordt er geen lijn getrokken, maar enkel puntdata weergegeven binnen het deelgebied cel waar wel data aanwezig is.

Aan deze eis werd naar onze mening niet volledig voldaan.

9. Horizontale verplaatsing

Voor de Sentinel beelden: een inschatting van de horizontale verplaatsing van de brug, gebaseerd op een vergelijking tussen de ascending en descending beelden.

De ontbinding in horizontale en verticale verplaatsing werd uitgevoerd voor de SNT-beelden. De dichtheid van de MP van de SNT-analyse is al vrij beperkt. Omdat er voor de ontbinding in O-W en verticale component een groter gebied samengenomen wordt (zie 3.3.1.3), betekent dit dat er vaak slechts enkele punten beschikbaar zijn op de brug en biedt dit voor de SNT-beelden voor bruggen weinig tot geen meerwaarde. Naar interpretatie is het eenvoudiger om zelf te bekijken of ascending en descending beelden een verplaatsing in dezelfde richting geven (de verplaatsing is verticaal) of in de tegenovergestelde richting geven (de verplaatsing is Oost-West). Voor de TSX-beelden is slechts 1 kijkrichting aanwezig (stack van descending beelden) en was ontbinding niet mogelijk (werd ook niet gevraagd in het bestek om die reden).

Hoewel de eis dus wel behaald werd, levert deze voor de bruggen weinig tot geen meerwaarde op voor de SNT-beelden.

10. In depth analyse van zones waar geen InSAR punten beschikbaar zijn

Omwille van verschillende redenen zijn soms geen InSAR punten beschikbaar op bepaalde locaties. Op basis van deze in depth analyse is het duidelijk waarom er op die locaties geen InSAR punten beschikbaar zijn en waarom sommige punten al dan niet weerhouden worden bij de analyse. De focus ligt hierbij op de bruglocaties en hun onmiddellijke omgeving. Van zodra een onderdeel van een shapefile of de omgeving van de brug onvoldoende PS/DS punten toont (percentage dekking in overleg met de aanbestedende overheid te bepalen), wordt deze analyse voor dat gedeelte van brug en omgeving uitgevoerd.

Op basis van variaties in de opgemeten amplitudes, gecombineerd met de wijziging in verplaatsing werden een heel aantal punten gedetecteerd waar variaties van het gedrag vastgesteld worden. Deze punten zouden normaal door de analyse automatisch uitgesloten worden, maar konden hier dus behouden worden. Kennis over de brug (kennis over werkzaamheden, wijzigingen) kunnen meehelpen om te interpreteren waarom er geen MP aanwezig zijn. Naast werkzaamheden kan beschadwing of aanwezigheid van variërende objecten in de tijd (bv. containers, havenkranen...) een impact hebben op het aantal beschikbare MP. Deze in depth analyse werd echter niet per brug uitgevoerd, zoals gevraagd in het bestek en aan deze eis is dus niet volledig voldaan.

11. Shapefiles

Van de bruggen worden shapefiles aangeleverd, die brugdek, pijlers en landhoofden van elkaar onderscheiden. Deze shapefiles worden, daar waar nodig, opgesplitst door de opdrachtnemer. De opsplitsing gebeurt in overleg met de aanbestedende overheid om een optimale verdeling te bekomen, maar bedraagt minimaal voor de brugdekken 1/4 naast een aansluitpunt (pijler of landhoofd), 2/4 centraal en terug 1/4 naast een aansluitpunt. Over de (delen van de) shapefiles wordt een gemiddelde waarde van de vervorming en vervormingssnelheid bepaald en deze resultaten zijn per onderdeel raadpleegbaar op het rapport en door de (onderdelen van) de shapefiles aan te klikken op het platform.

De indeling van de deelgebieden voor de opmaak van de lengteprofielen gebeurde niet aan de hand van de shapefiles maar volgens een vast stramien (deelgebieden van 10 m x 10 m, startende 20 m voor (aan landzijde van) het eerste landhoofd en eindigend 20m voorbij het tweede landhoofd). Hierdoor werd aan deze eis niet voldaan. Volgens de resultaten van Eurostruct (zie 6.2) zou het nochtans een meerwaarde zijn om rekening te houden met de afmetingen en oriëntatie van de brugonderdelen voor het opmaken van de deelgebieden.

12. Rapportage

Per brug wordt een automatisch rapport gegenereerd, waarop de meest belangrijke resultaten per brug worden afgebeeld. Wat deze resultaten zijn, wordt in samenspraak met de aanbestedende overheid vastgelegd. Zo wordt bv. verwacht dat minimaal de lengteprofielen (alook een aanduiding van de lengteprofielen op een kaart) met aanduiding van pijlers en landhoofden op het lengteprofiel, de gemiddelde vervorming van de verschillende (onderdelen van) shapefiles, alarmering, betrouwbaarheid, info over vervorming van omgeving, detectie van plotse wijzigingen... in dit rapport worden opgenomen.

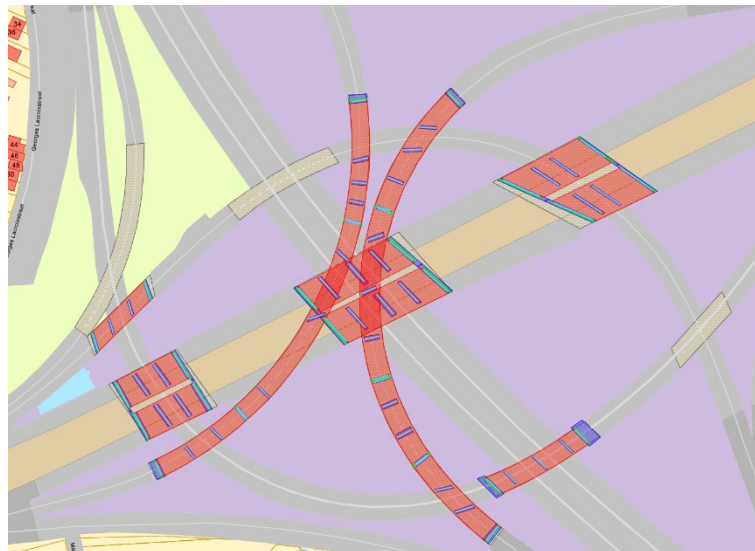
Voor elke brug werd een monograph opgesteld (zie 5.2.4) waar de gevraagde informatie wordt meegegeven. Het lijkt zeker een meerwaarde voor degene die de interpretatie moet doen om over een overzicht te beschikken van elke brug afzonderlijk en mits enige inwerking in de interpretatie van de analyse, kunnen dergelijke overzichten ook quasi onmiddellijk ingezet worden. De opmaak van deze monographs is volledig geautomatiseerd en kunnen ook nog aangepast worden naar de behoeften van de gebruikers. Mogelijke verbeterpunten worden weergegeven in 5.2.4.2.

Aan deze eis werd voldaan.

5.2.3 Shapefiles

5.2.3.1 Informatie in de shapefiles uit iASSET

De shapefiles werden opgemaakt a.h.v. de data die in iASSET zijn opgenomen. Hierbij worden de brugdelen, landhoofden en pijlers opgenomen als vlakken. De locaties van de brugdelen (rood) en landhoofd/pijler (blauw) zijn te zien in onderstaande Figuur 12, met aanduiding van de brugdelen in rood en aanduiding van landhoofd/pijler in blauw.



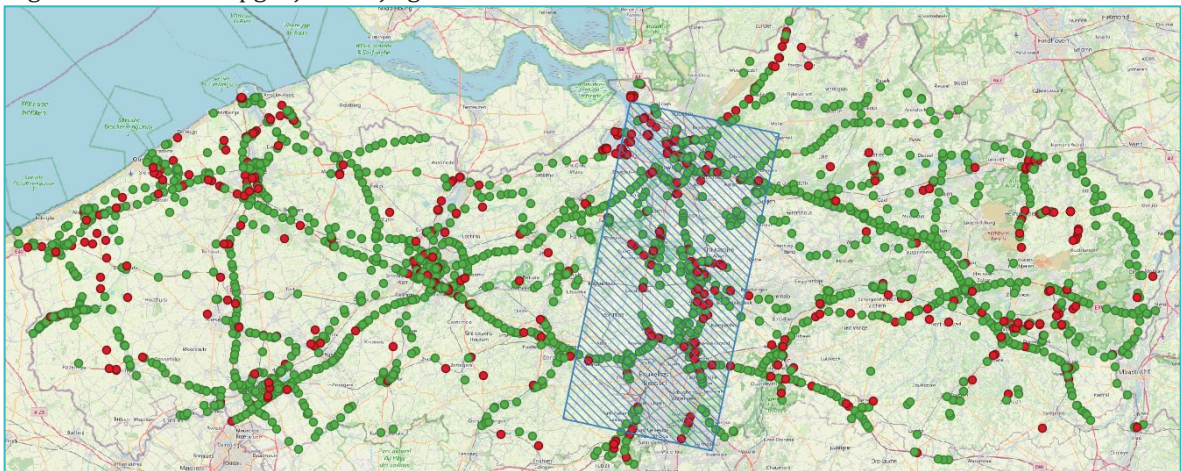
Figuur 12: Opdeling van een brug in brugdelen, landhoofden en pijlers

5.2.3.2 Intekening van bruggen in iASSET voor gebruik in INSAR-analyse

Van de 2600 Brug-complexen die EBS opvolgt was reeds 80% ingetekend op het moment van aanlevering van de shapefiles aan Tre Altamira. Er zijn verschillen tussen de beheerders. Het agentschap Wegen en Verkeer beheert met bijna 70% het meeste bruggen, waarvan >75% al ingetekend. Gezien het grote

aantal, worden deze stelselmatig ingetekend naar de jaarlijkse nood voor inspecties. Bij De Vlaamse Waterweg, beheerder van de resterende 30%, moet slechts 5% nog ingetekend worden. Er is weinig verschil tussen de intekening binnen en buiten het gebied van de analyse.

Op Figuur 13 staan de 2600 Brug-complexen, waarbij het TSX-window de blauw gearceerde rechthoek is. De groene en rode bolletjes tonen of het Brug-complex was ingetekend op moment van aanleveren van de data of niet (en of dus een shapefile werd aangeleverd of niet). De bruggen waarvan een shapefile werd aangeleverd worden opgelijst in Bijlage 10.



Figuur 13: opgenomen bruggen in iASSET; groen: shapefile werd aangeleverd; rood: shapefile werd niet aangeleverd

5.2.3.3 Nauwkeurigheid intekening

De nauwkeurigheid van de intekening is niet steeds uniform door het gebrek aan richtlijnen voor nauwkeurigheid en de beperkte controle. De intekening gebeurt momenteel hoofdzakelijk o.b.v. luchtfoto's. Het brugdek en de meeste voegen zijn daarbij voldoende zichtbaar. Echter de locatie van de pijlers, landhoofden en oplegrijen moet geschat worden onder het brugdek. Gezien bij de opmaak van de monographs (zie verder) gebruik wordt gemaakt van de ingetekende brugdelen, pijlers en landhoofden, zou het voordelig zijn om voor deze toepassing de positionering van pijlers, landhoofden te verbeteren. Hieronder worden enkele voorstellen opgelijst om de nauwkeurigheid te verbeteren, volgens toenemende inspanning.

- Zorgvuldiger te werk gaan bij de digitaliseren o.b.v. de luchtfoto's en een kwaliteitscontrole op de aangeleverde intekening.
- Zoeken naar bestaande intekeningen, bv. De Vlaamse Waterweg beschikt i.k.v. vaarkaarten over de locaties van constructies in/nabij de waterwegen.
- Zoeken naar bestaande (liefst digitale, gegeorefereerde) plannen en omzetten naar opdeling voor iASSET.
- Op het terrein inmeten van de exacte locatie.

Hoe nauwkeuriger de beelden en de analyse wordt, hoe meer impact een correcte intekening heeft op de interpretatie van de resultaten.

5.2.4 Monographs per brug

5.2.4.1 Aangeleverde resultaten op de monographs

Per brug waarvan een shapefile werd aangeleverd aan Tre Altamira werd als resultaat een pdf aangeleverd van 4 pagina's, met daarop volgende informatie:

- Zowel voor de analyse van de TSX (enkel descending) als SNT (ascending en descending en analyse) beelden:
 - o In tabel-vorm (links op elke pagina)
 - de minimale, maximale en gemiddelde vervormingssnelheid en bijhorende standaardafwijking
 - de minimale, maximale en gemiddelde vervorming en bijhorende standaardafwijking voor de meetpunten over de gemeten periode
 - de minimale, maximale en gemiddelde seizoensamplitude
 - o In een aantal figuren (rechts op elke pagina):
 - Een plot van alle MP met in een kleurschaal de vervorming van de MP op en in de nabijheid van de brug. Een aanduiding (paars) of er bepaalde meetpunten beïnvloed zijn door een plotse verandering
 - Een inschatting van welke MP zeker op de brug liggen, welke mogelijks op de brug liggen en welke MP zeker naast de brug liggen. Dit kan helpen om in te schatten of de opgemerkte verplaatsing op of naast de brug optreedt.
 - De thermische dilatatie parameter die gebruikt werd voor de thermische correctie van de MP op de brug
 - Per brugonderdeel een kleurcodering die de gemiddelde vervorming per brugonderdeel weergeeft
 - Per brugonderdeel een code groen – oranje – rood, gebaseerd op een eenvoudige grenswaardebepaling
- Voor de SNT-beelden een ontbinding in Verticale verplaatsing en Oost-West verplaatsing:
 - o De beelden in ascending en descending mode worden gecombineerd om de ontbinding O-W en verticaal te kunnen maken. Grotere cellen worden aangenomen, waarbij verondersteld wordt dat de MP die binnen deze cel vallen eenzelfde object/gebied omvatten. Dit resulteert in een groter grid (minder dens aantal MP) dan bij de individuele kijkrichtingen
 - o De beelden in ascending en descending mode worden niet op hetzelfde tijdstip/dezelfde dag genomen, maar er wordt aangenomen dat de verplaatsing toch combineerbaar is
 - o N-Z verplaatsingen kunnen niet gedetecteerd worden, gezien dat de vliegrichting is van de satelliet
 - o Eenzelfde "analyse" kan men zelf doen, door in descending en ascending mode te kijken of de verplaatsingsrichting gelijk is (verticale beweging) of verschillend is (O-W verplaatsing)
- Een lengteprofiel met daarop:
 - o Links de aanduiding van de indeling van het lengteprofiel langsheen de brug voor de 3 beeldreeksen. Een verschillende indeling werd aangehouden omwille van het aantal MP/het meetgrid per beeldreeks:
 - Voor de TSX-beelden wordt uitgegaan van een vierkante meetcel van 10 m op 10 m
 - Voor de SNT-beelden wordt rekening gehouden met de oriëntatie van de brug en de kijkhoek van de satelliet, omdat deze een impact hebben op het aantal MP binnen een meetcel. Dit kan leiden tot een verschil in afmeting van de meetcellen in beide kijkrichtingen

- Rechts per beeldreeks een lengteprofiel met daarop op elk tijdstip een vervormingslijn (oplopend in de tijd worden de lijnen donkerder) die de gemiddelde vervorming weergeeft binnen elke meetcel. Een lijn kan slechts getrokken worden indien er in 2 aansluitende meetcellen een resultaat beschikbaar is
- Onderaan een schets van de brug en haar opbouw (onderscheid landhoofd, pijlers en brugdek)

5.2.4.2 Mogelijke verbeterpunten

De kwaliteit van de monographs zou nog verbeterd kunnen worden door naast het brugnummer ook de naam van de brug toe te voegen en evt. een link toe te voegen naar zowel TREmaps (platform waarop INSAR analyse staat) als een link naar iASSET (of gebruikt platform van de VO).

Tijdens het project werden de objecten uit de shapefiles wel ingetekend op de monographs, maar zijn deze niet beschikbaar op de TREmaps toepassing. Het zou zeker een meerwaarde zijn om deze wel toe te voegen.

Zoals aangegeven in 5.2.2.3 kan een toename in nauwkeurigheid bij het intekenen van de shapefiles leiden tot een verbeterde interpretatie, aangezien bij de lengteprofielen de data uitgezet wordt t.o.v. de ingetekende objecten in de shapefiles.

5.2.5 Vergelijking van resultaten analyse op verschillende tijdstippen en met gekende / opgemeten vervormingen

Door Tre Altamira werd 3 keer een analyse uitgewerkt:

- Tijdens de POC fase
- Een eerste analyse eind 2022
- Een bijkomende/vernieuwde analyse met extra aangeleverde shapefiles

Bovendien werd ook overgeschakeld op een nieuw en performanter platform, dat echter niet over dezelfde mogelijkheden beschikt als het oude platform.

Het was onmiddellijk duidelijk dat de analyse, hoewel uitgevoerd op dezelfde beelden en uitgevoerd door dezelfde partij, niet 1 op 1 hetzelfde resultaat opleverde. Enkele voorbeelden worden hieronder aangehaald.

Doordat gevraagd werd in de definitieve analyse om een groter gebied rondom de brug te beschouwen en ook de lengteprofielen te verlengen met 20 m aan weerszijden van de brug, is het resultaat sowieso niet 1 op 1 te vergelijken. Bovendien werden ook andere thresholds opgesteld tijdens de uitvoering van het project t.o.v. de POC (meer kan hierover teruggevonden worden in de bijlagen 7 en 9).

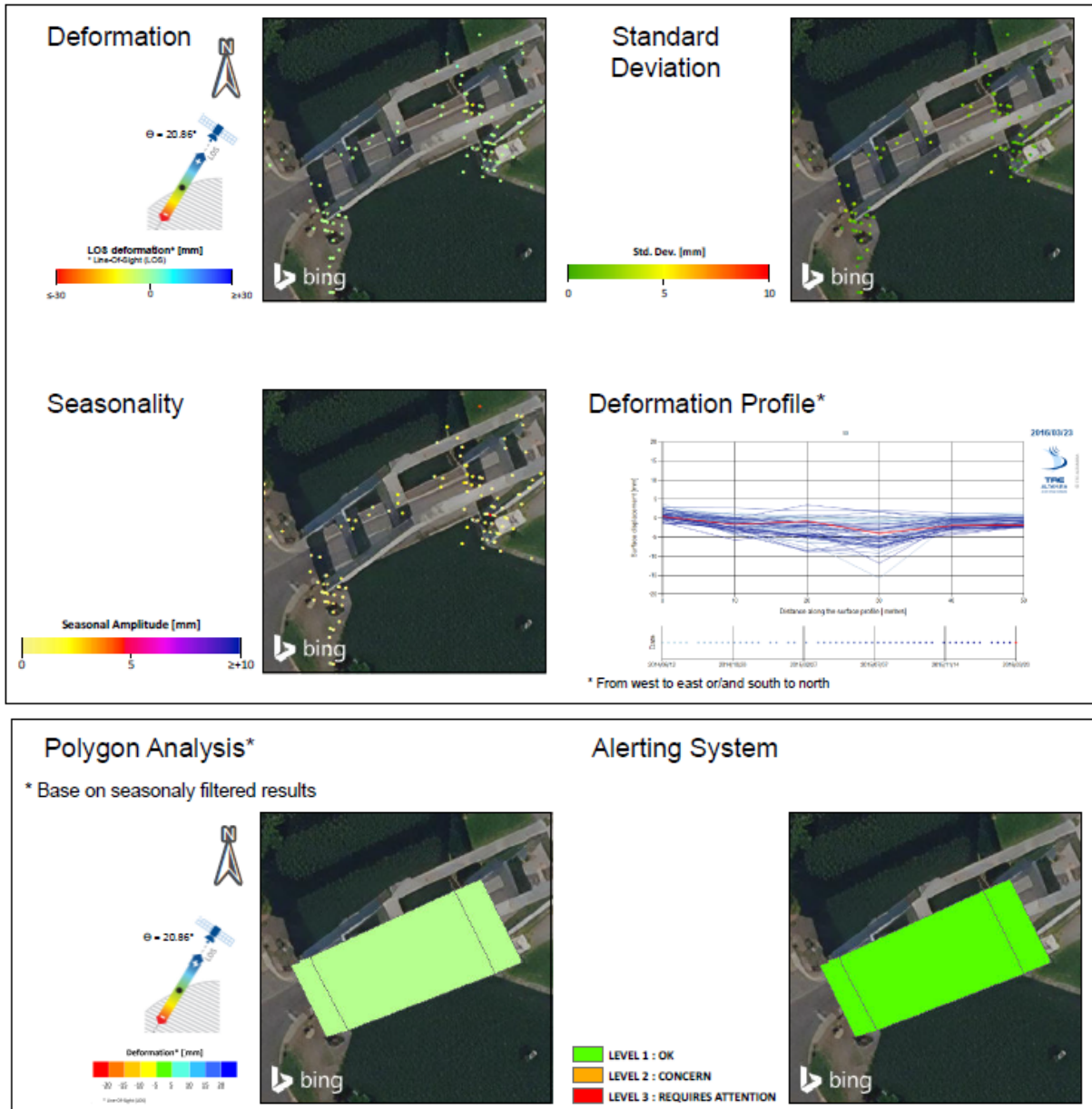
Er worden een 4-tal voorbeelden gegeven (2 waarbij er een afwijking is in de resultaten, 2 waarbij het resultaat gelijkaardig is). Het niet steeds terugkrijgen van dezelfde MP en vervormingswaarden in de tijd is zeker een belangrijk aandachtspunt waarbij verdere ervaring zal moeten leren in welke mate dit een belangrijk effect heeft op de interpretatie en het gebruik van de data.

Ten slotte wordt een voorbeeld gegeven waarbij waterpassingsmetingen beschikbaar zijn en wijzen op vrij grote verplaatsingen van 1 onderdeel van een brug (5.2.5.5).

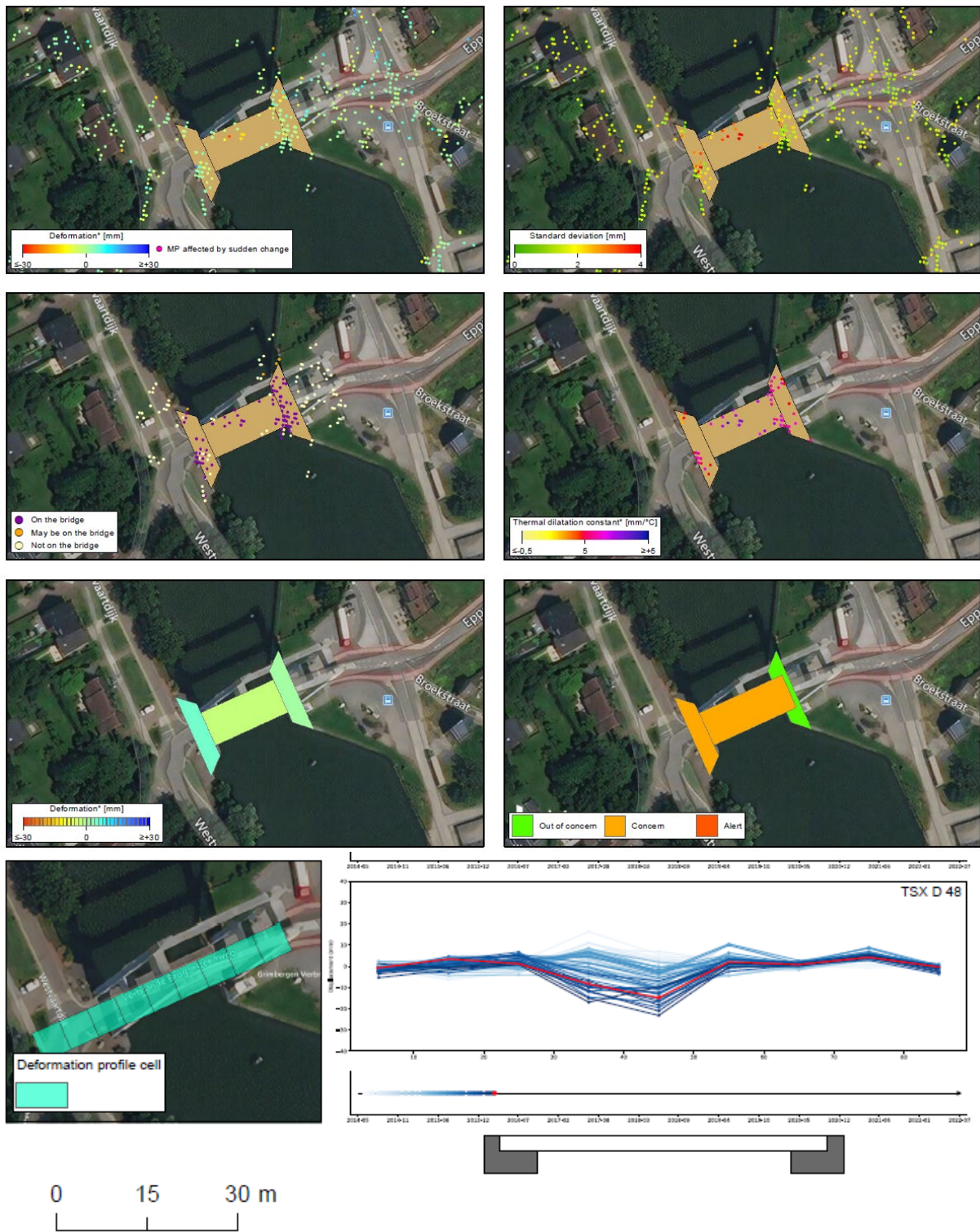
5.2.5.1 Voorbeeld 1: Brug 6135 (Verbrande brug)

Figuur 14 geeft het resultaat weer dat in de monograph van de POC stond, Figuur 15 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2022 weer en Figuur 16 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2023 weer. De resultaten van de POC en de analyse van 2022 zijn gelijkaardig qua lengteprofiel, enkel de alarmering/overschrijden van thresholds levert een ander resultaat op. Dit is te wijten aan de andere grenswaarden die gebruikt werden in de eindanalyse, t.o.v. de POC.

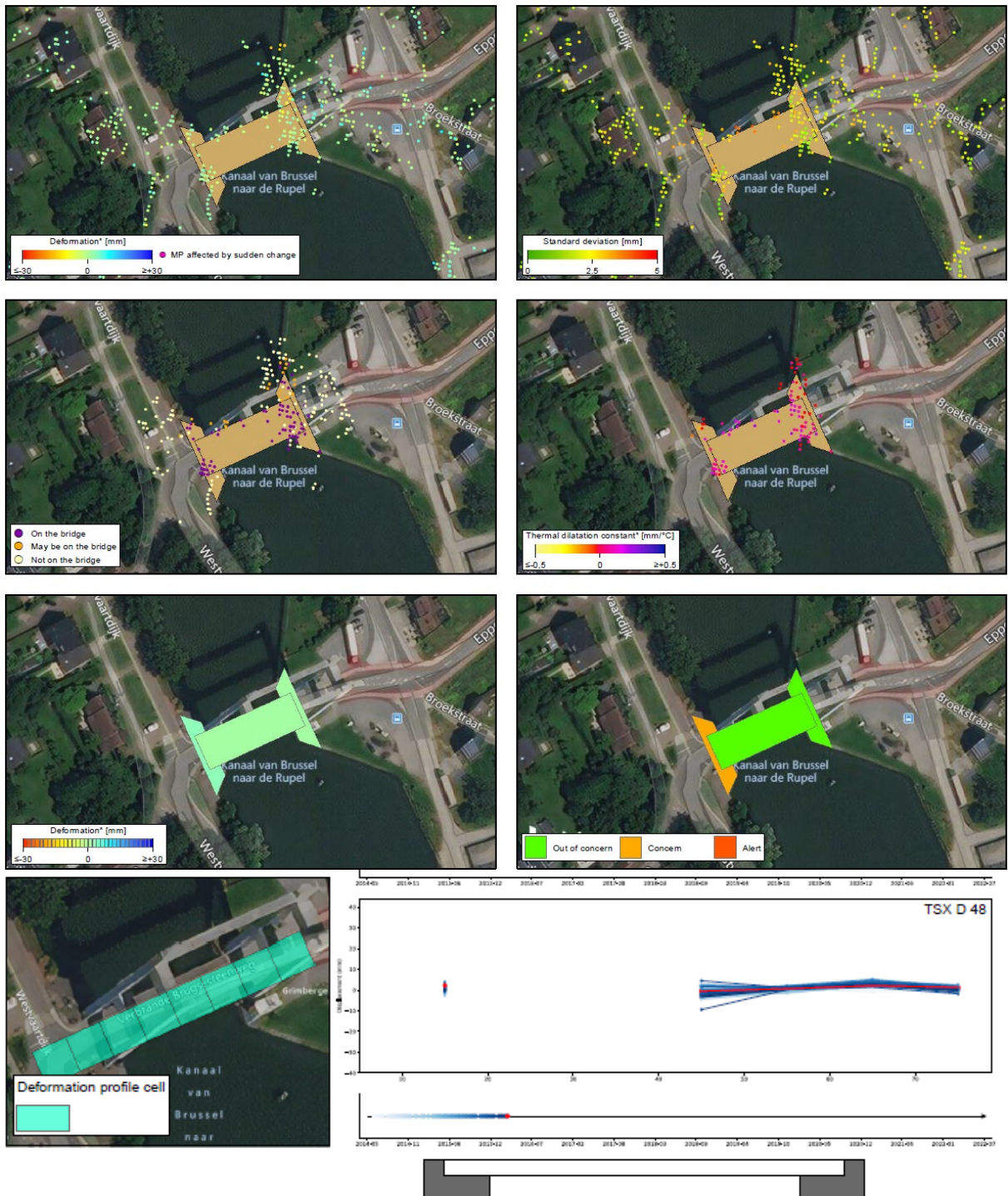
Er is echter duidelijk een groot verschil tussen het resultaat van 2022 en 2023, waar door het wegvallen van een aantal MP, een andere indeling en een andere ligging van de deelcellen een volledig ander beeld verkregen wordt voor zowel het lengteprofiel als de interpretatie van de grenswaarden/thresholds. Men moet dus opletten dat, bij het hebben van onvoldoende MP, niet enkel naar de interpretatie van de threshold analyse (groen/oranje/rood) gekeken wordt.



Figuur 14: TSX monograph brug 6135, analyse tijdens POC



Figuur 15: TSX monograph brug 6135, analyse 2022

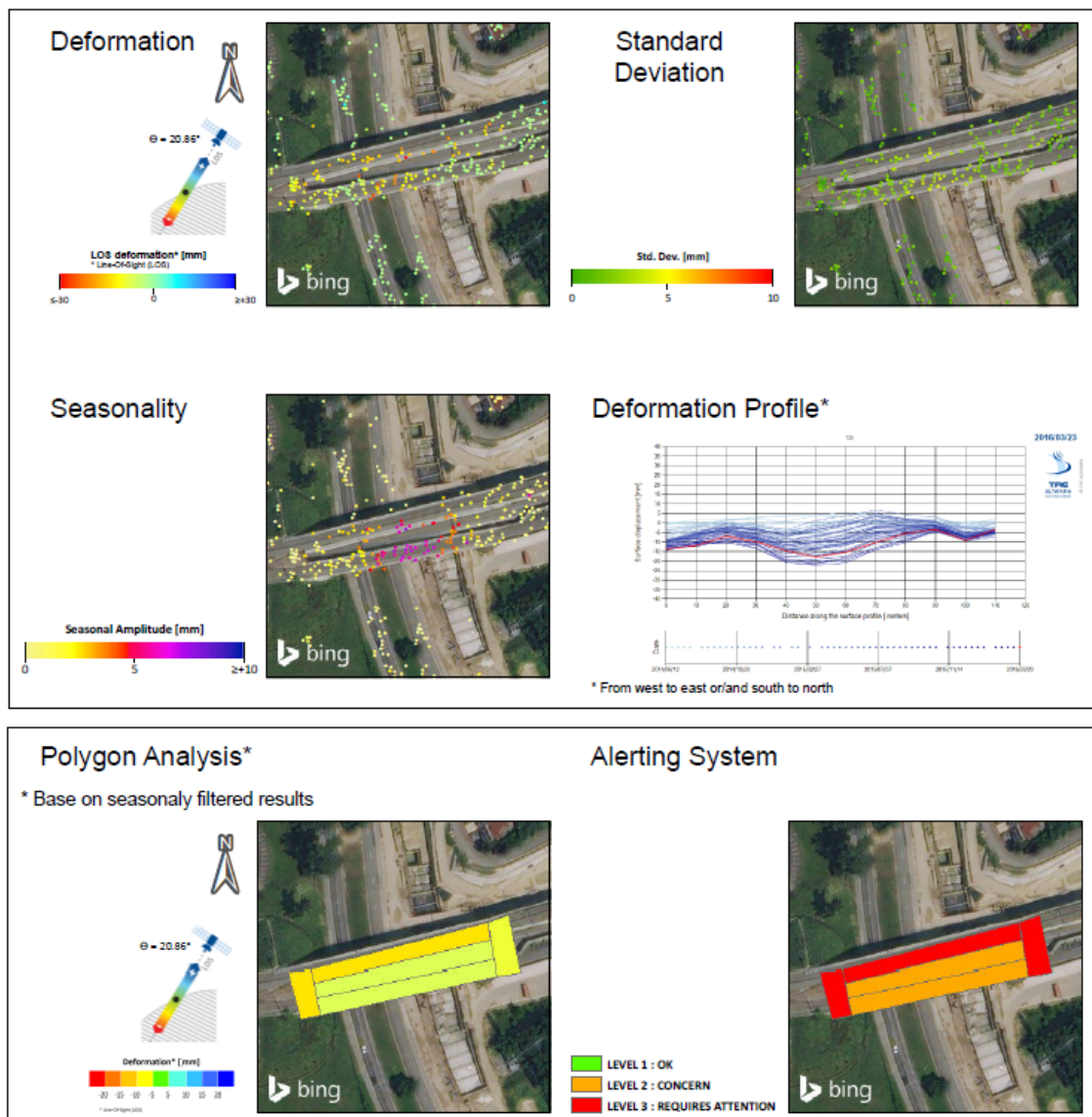


Figuur 16: TSX monograph brug 6135, analyse 2023

5.2.5.2 Voorbeeld 2: Brug 9105 (Spoorwegbrug in Spoorlijn 25N over R22)

Figuur 17 geeft het resultaat weer dat in de monograph van de POC stond en Figuur 18 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2023 weer. In de analyse van 2022 werd deze brug niet meegenomen (onduidelijkheid over de aangeleverde shapefiles).

Ondanks de andere indeling (vermoedelijk, aangezien deze in de POC niet aangeduid werden), een andere ligging van de deelcellen en de opdeling in 2 parallelle bruggen, wordt voor deze brug een gelijkaardig beeld verkregen wordt, zowel naar lengteprofiel als naar interpretatie. Ondanks de andere thresholds, wordt de brug steeds gemarkeerd als zorgwekkend.



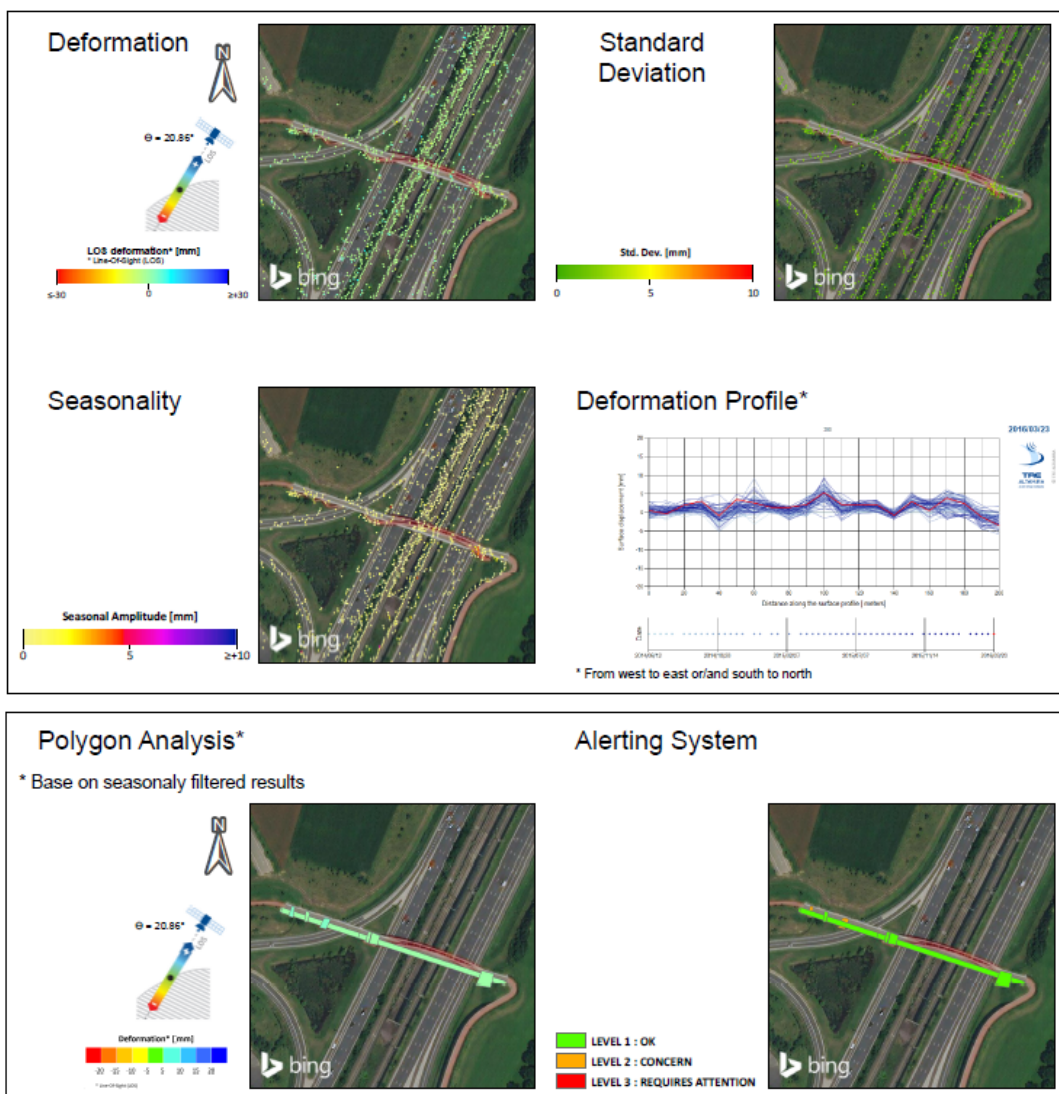
Figuur 17: TSX monograph brug 9105, analyse tijdens POC



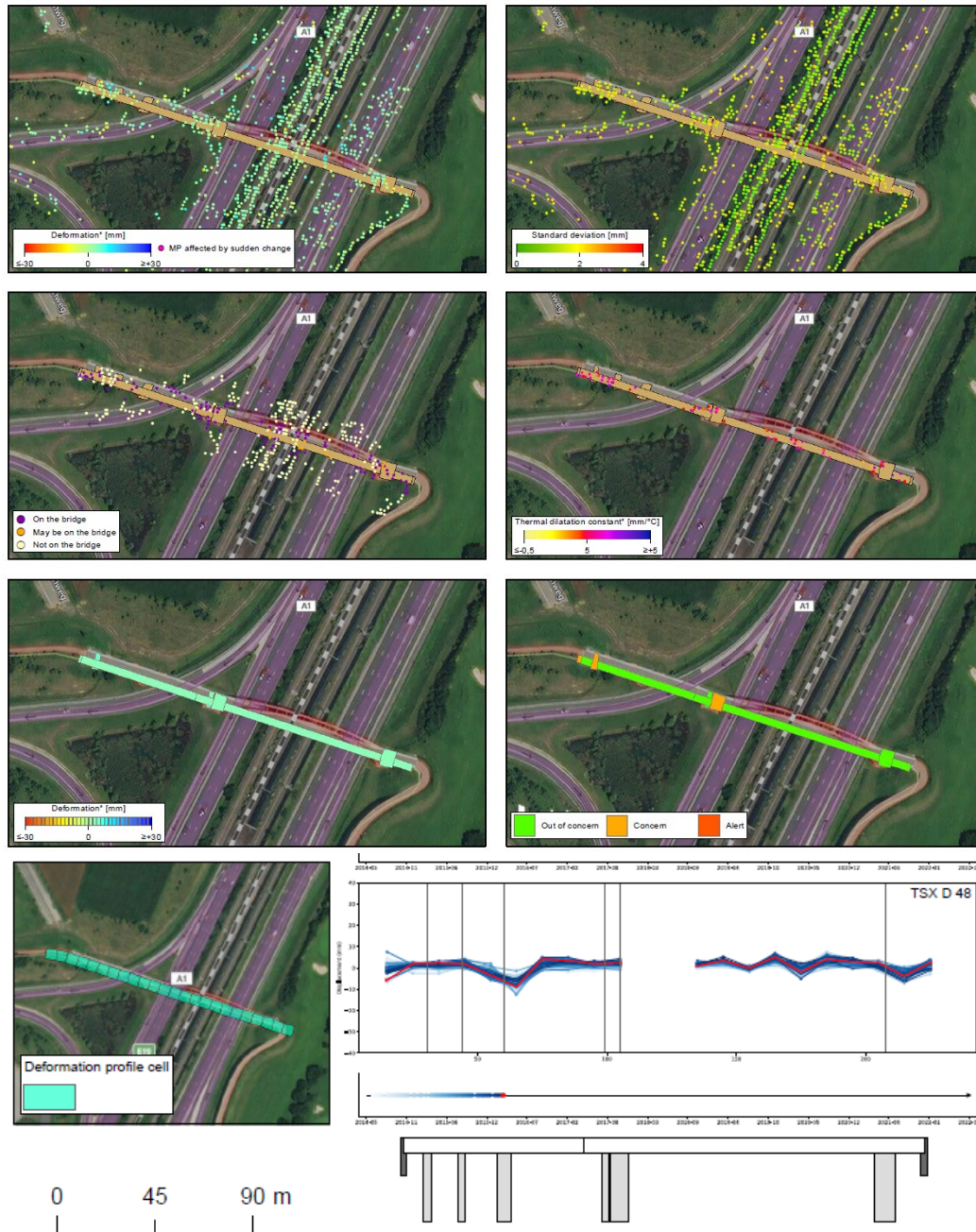
Figuur 18: TSX monograph brug 9105, analyse 2023

5.2.5.3 Voorbeeld 3: Bruggen 8763 (Fietsbrug over E19 + Noordelijke spoorontsluiting luchthaven)

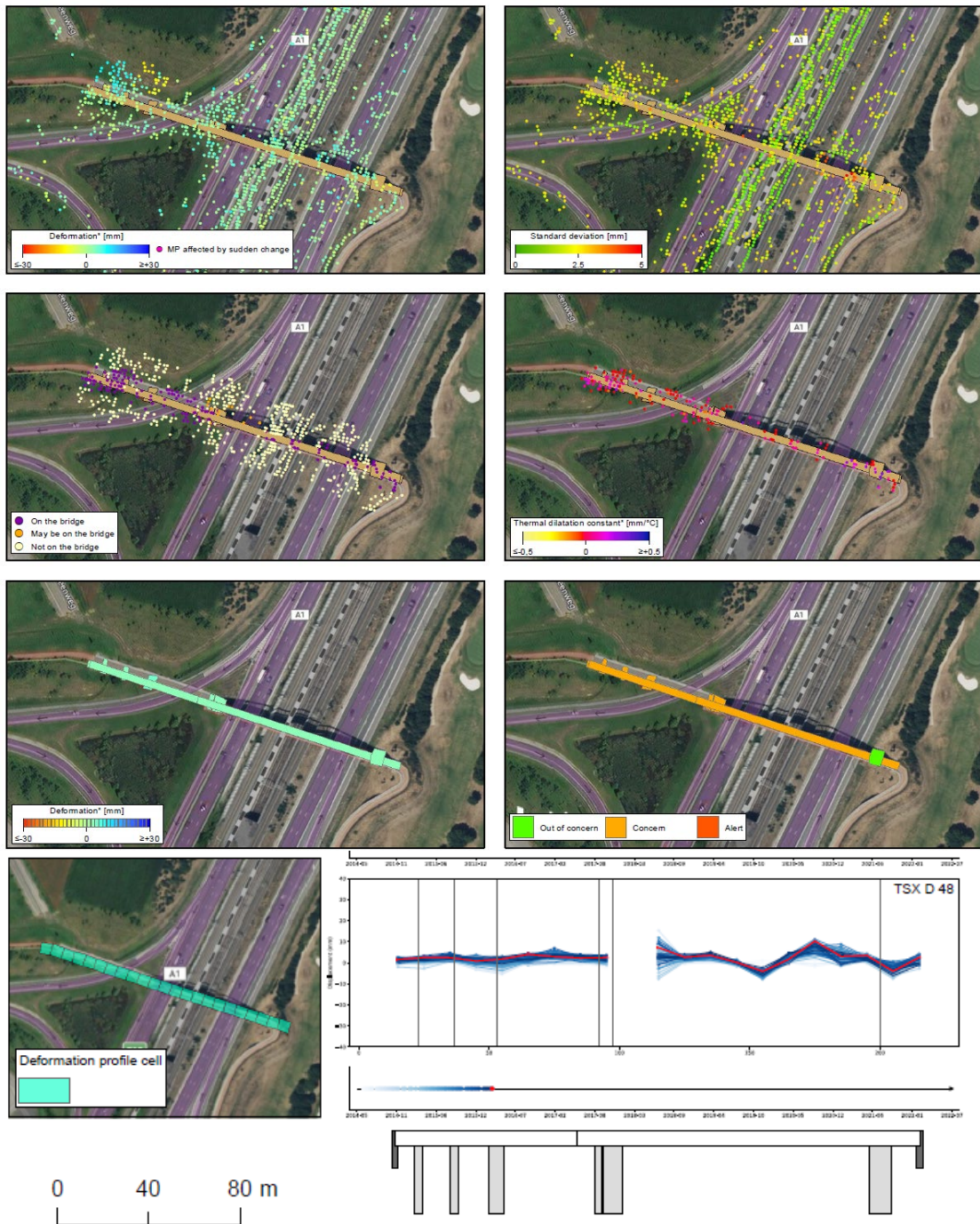
Figuur 19 geeft het resultaat weer dat in de monograph van de POC stond, Figuur 20 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2022 weer en Figuur 21 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2023 weer. De resultaten van de POC en de analyse van 2022 zijn gelijkaardig qua lengteprofiel, enkel de alarmering/overschrijden van thresholds levert een ander resultaat op. Dit is te wijten aan de andere grenswaarden die gebruikt werden in de eindanalyse, t.o.v. de POC. Zowel in de lengteprofielen als in de interpretatie van de thresholds is er alweer verschil tussen het resultaat van de POC en van 2022 en 2023. Door het wegvallen van een aantal MP, mogelijk een licht andere horizontale positionering en een andere indeling en een andere ligging van de deelcellen wordt een licht verschillend beeld verkregen. Dit is iets waar zeker bij een vervolgtraject voldoende aandacht moet aan besteed worden en waar de ervaring van de gebruiker een belangrijke rol zal spelen.



Figuur 19: TSX monograph brug 8763, analyse tijdens POC



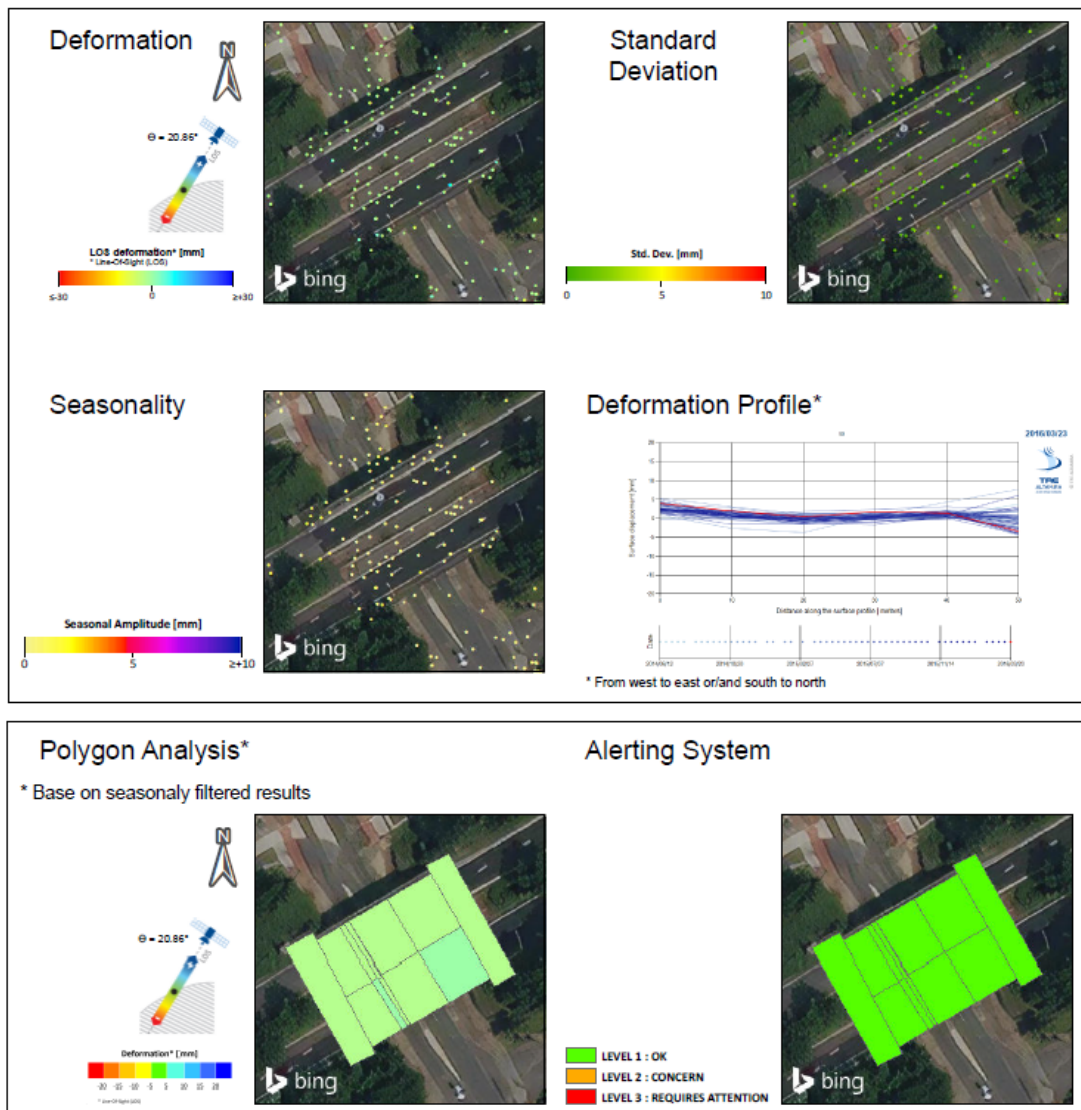
Figuur 20: TSX monograph brug 8763, analyse 2022



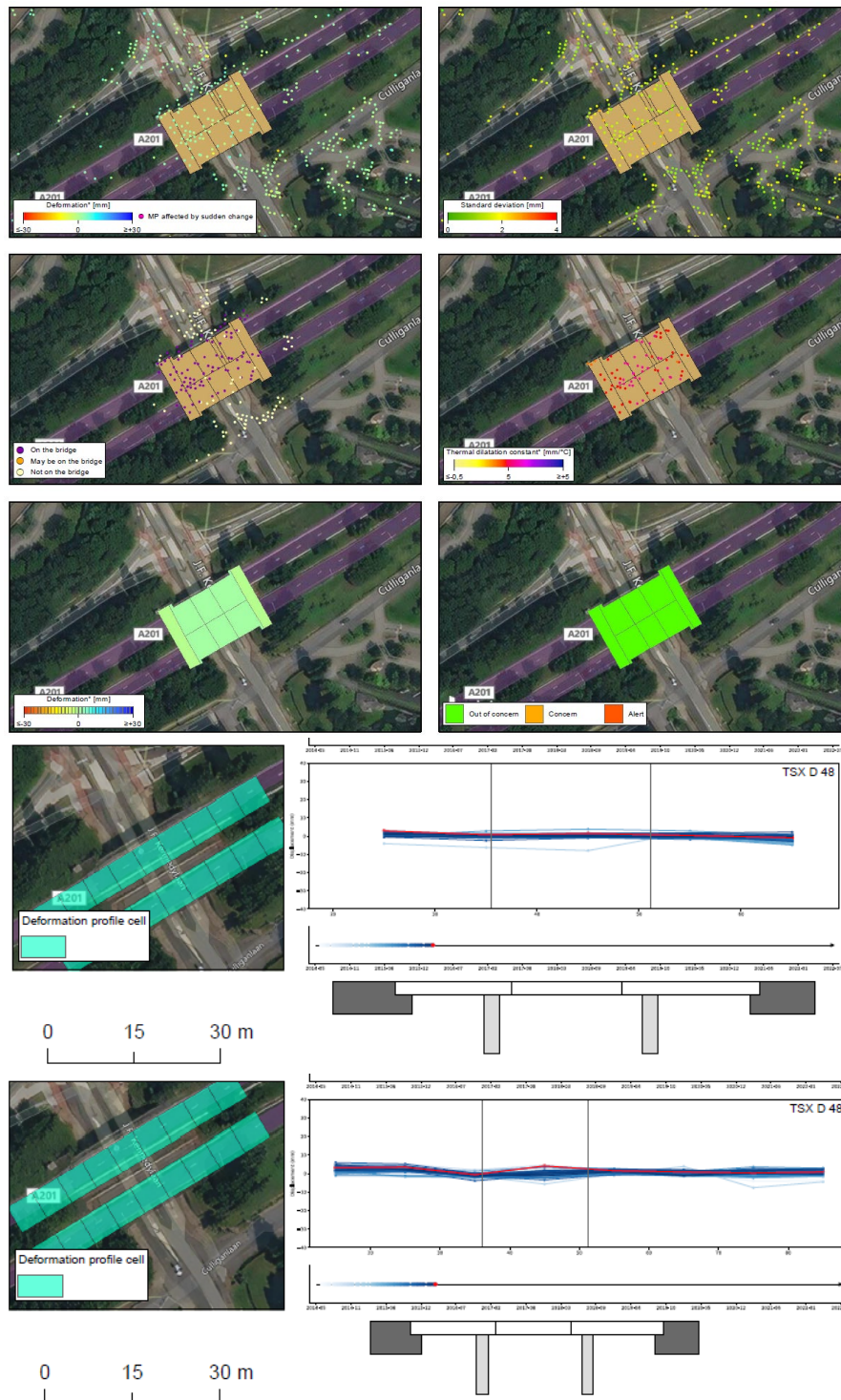
Figuur 21: TSX monograph brug 8763, analyse 2023

5.2.5.4 Voorbeeld 4: Brug 3590 (Brug 1 over de J. F. Kennedylan Grenstraat)

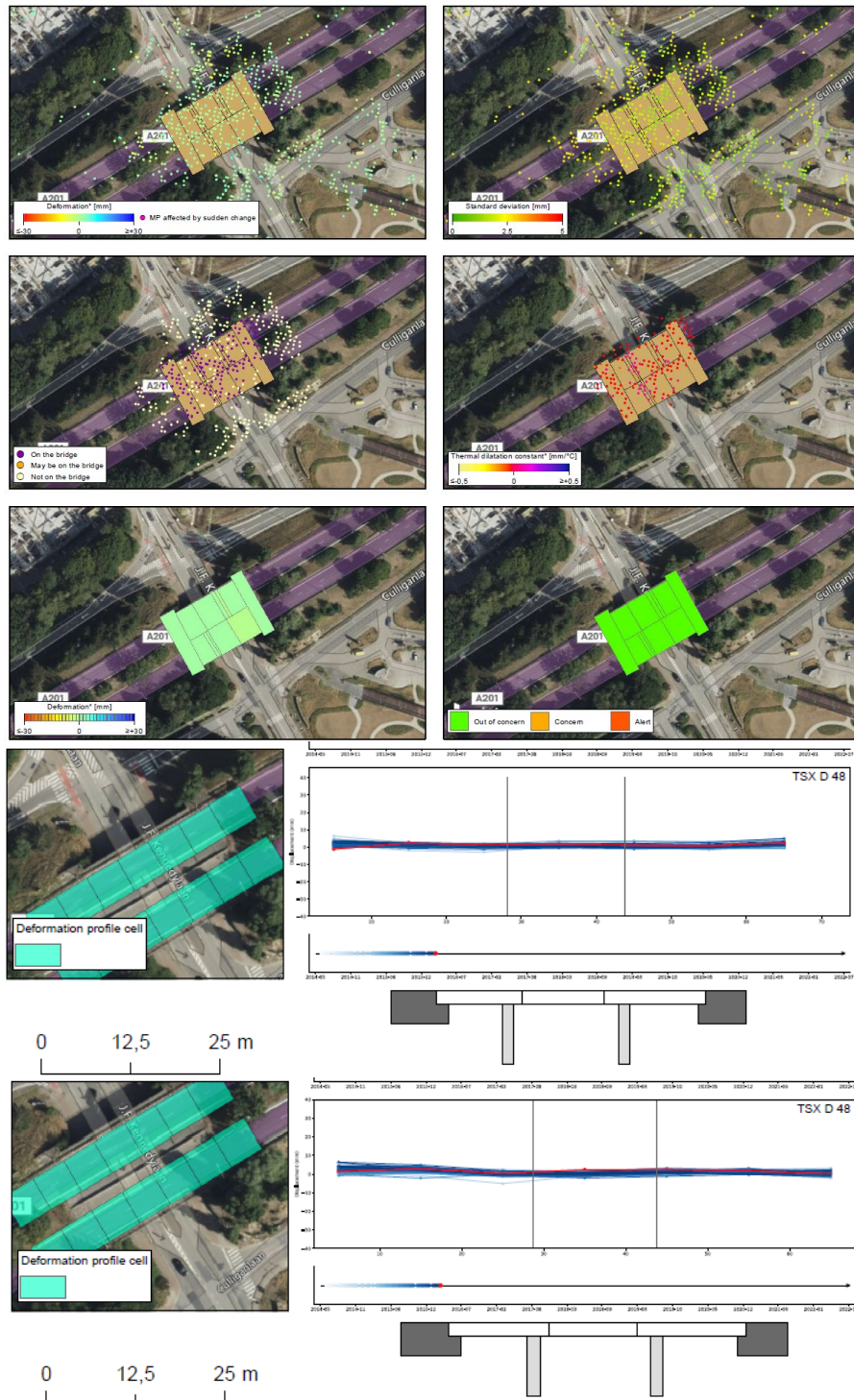
Figuur 22 geeft het resultaat weer dat in de monograph van de POC stond, Figuur 23 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2022 weer en Figuur 24 geeft het resultaat uit de monograph analyse 2023 weer. Door de andere indeling, het opsplitsen in 2 parallelle bruggen en een andere ligging van de deelcellen, is er een klein verschil in de gedetecteerde verplaatsingen. In alle 3 de gevallen is het echter duidelijk dat de brug weinig verplaatsing ondergaat in de tijd en de interpretatie is in de 3 gevallen dus gelijkaardig.



Figuur 22: TSX monograph brug 3590, analyse tijdens POC



Figuur 23: TSX monograph brug 3590, analyse 2022



Figuur 24: TSX monograph brug 3590, analyse 2023

5.2.5.5 Voorbeeld 5: brug 4326 (Brug t.h.v. knooppunt R0-A201)

In de waterpassingen wordt voor deze brug een grote zetting waargenomen t.h.v. het zuidelijk landhoofd (Figuur 25). Tussen 2006 en 2022 wordt 20 tot 40 mm zetting waargenomen, tussen 2 metingen in 2022 een 3-tal mm (let wel, zie Figuur 25, de hele brug lijkt deze 3 mm vervorming waar te nemen tussen de metingen in 2022).

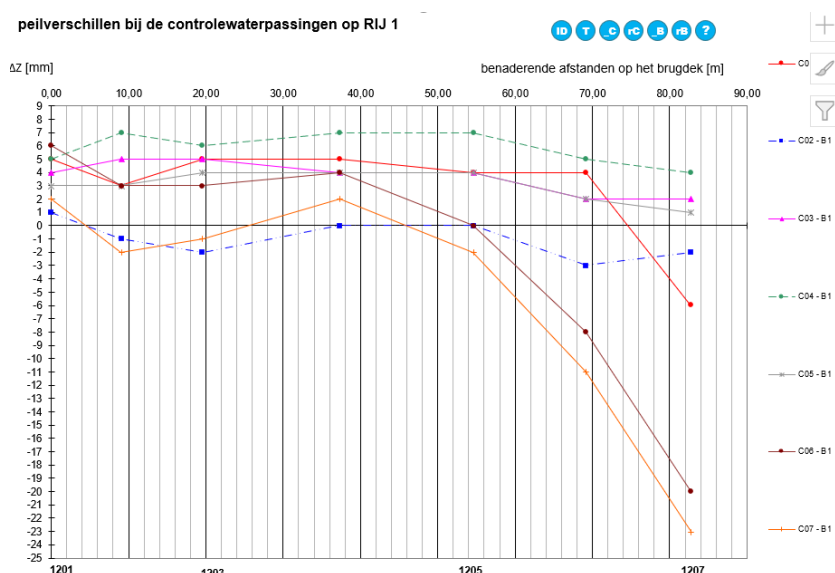
In Figuur 26 wordt het resultaat van de TSX-analyse weergegeven. Hieruit blijkt mogelijks een iets grotere verplaatsing t.h.v. het zuidelijke landhoofd, maar de verplaatsingen worden niet als afwijkend gedetecteerd, noch zouden deze visueel als alarmerend beschouwd worden. Mogelijkheden zijn:

- Dat de periode waarover de TSX-beelden beschikbaar zijn, onvoldoende lang is om een doorgaande zetting te detecteren.
- Dat door de opdeling in deelcellen voor het opmaken van de lengteprofielen, waarbij geen rekening gehouden wordt met de individuele objecten, de vervorming uitgemiddeld wordt. Nadere inspectie van de individuele MP op de Tremaps-applicatie wijst echter geen individuele punten met grotere zetting aan.
- Dat de verplaatsing zo groot zou zijn dat deze als afwijkend beschouwd wordt, waardoor MP met een grotere vervorming automatisch uitgefilterd worden. De densiteit van het aantal MP doet dit echter niet vermoeden

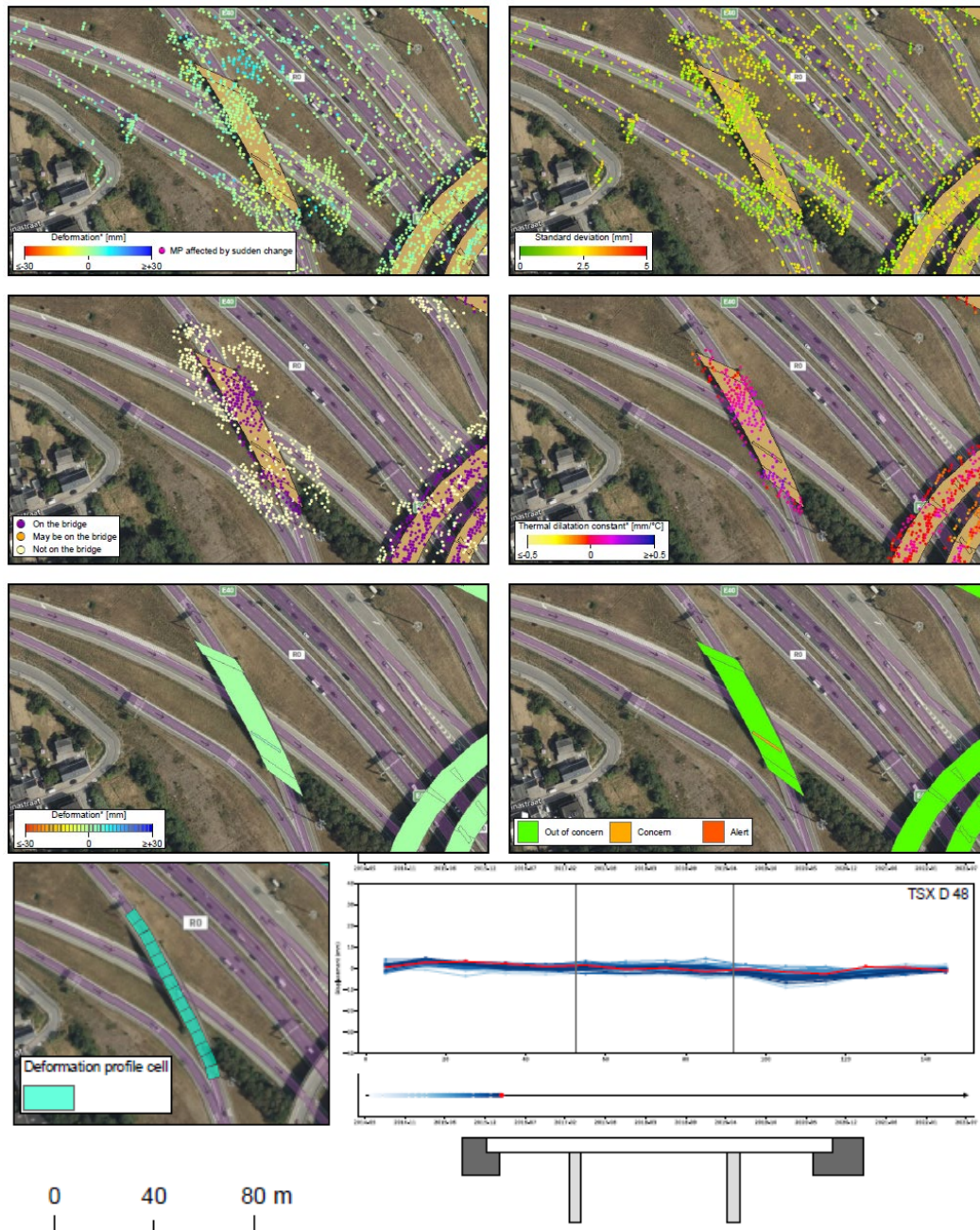
In Figuur 27 wordt het resultaat van de analyse in EGMS weergegeven. Hierop werden 2 deelgebieden getekend: links werd een gebied over het brugdek geselecteerd, rechts werd een deelgebied over het landhoofd geselecteerd. Wat opvalt is dat:

- Er een vrij grote seizoenschommeling wordt waargenomen (amplitude 10-tal mm).
- Er ter hoogte van het zuidelijk landhoofd een licht dalende trend wordt waargenomen (5-tal mm over periode 2019-2023), maar deze zou zeker niet visueel uit het resultaat gehaald worden.

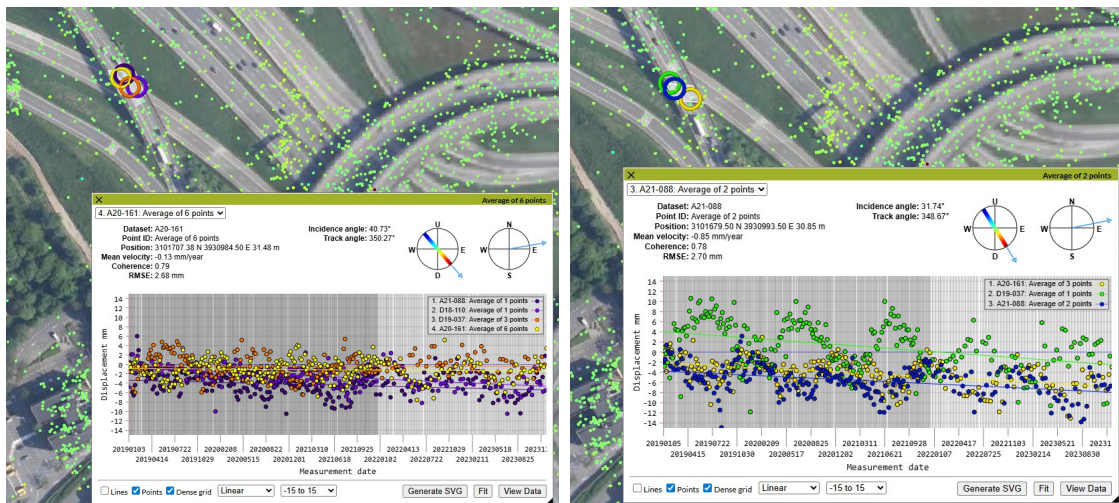
Gezien er vrij weinig waterpassingen zijn uitgevoerd in de periode 2006-2022, is het niet zeker in welke periode de zettingen zijn opgetreden. Het gebied waar de brug zich bevindt bevat venige zones. Mogelijks kan een plotse zetting opgetreden zijn omwille van werken (bemaling of andere) in de buurt. De resultaten van de InSAR analyse kunnen aanvullend aan de topografische metingen gebruikt worden om de interpretatie van het gedrag van de brug te doen.



Figuur 25: waterpassingen t.h.v. brug 4326 in periode 2006-2022



Figuur 26: TSX monograph brug 4326, analyse 2023



Figuur 27: EGMS trendlijnen periode 2019-2023, brugdek (links) en zuidelijk landhoofd (rechts)

5.2.6 Sentinel versus TerraSar X

Als eerste moet worden opgemerkt dat de periode waarover beelden beschikbaar zijn voor SNT beduidend langer is dan de periode waarover TSX-beelden beschikbaar zijn. Een 1 op 1 vergelijking van de analyse van beide satellieten is dus niet echt mogelijk.

In onderstaande Tabel 4 wordt een vergelijking gegeven van de belangrijkste parameters. Voor de interpretatie van de analyseresultaten spelen vooral de densiteit van het aantal beschikbare MP en de nauwkeurigheid van de horizontale positionering als belangrijkste voordeel voor een analyse op basis van TSX (hoge resolute satelliet) beelden, gezien de relatief beperkte afmetingen van de constructies. De kostprijs en terugkeerperiode spelen dan weer enorm in het voordeel van de SNT-beelden, gezien zelfs een volledig gratis analyse over Vlaanderen beschikbaar is (zie 6.1). De korte terugkeerperiode zorgt ervoor dat grotere verplaatsingen toch ook vaak goed gedetecteerd kunnen worden, gezien de tijd tussen 2 beelden (en de verplaatsing dus ook) beperkt is en dat de tijd tussen ascending en descending opnames beperkt is (voordeel bij ontbinding in componenten).

Er zijn nog enkele aspecten die wel een impact hebben, doch niet zo een cruciale:

- De invalshoek van de kijkrichting van de satelliet heeft een impact op de interpretatie: een kleinere invalshoek (TSX) betekent dat er meer verticaal gekeken wordt en dat de opgemeten verplaatsing dus vnl. een verticale component heeft. De opgemeten verplaatsing is dan dus quasi zonder correctie vergelijkbaar met de waterpassingen. Een grotere invalshoek heeft dan weer als voordeel dat een eventuele ontbinding in O-W component nauwkeuriger zal zijn.
- Omdat de golfte van de TSX-beelden iets kleiner is dan bij de SNT-beelden is de nauwkeurigheid van de opgemeten verplaatsing iets beter bij de TSX-beelden.

Gezien voor de interpretatie van de metingen best niet naar individuele punten gekeken wordt, is de interpretatie een stuk duidelijker wanneer men met hogere resolutie beelden kijkt. Zolang geen lange tijdsperiode aan hoge resolutie beelden beschikbaar is, zal de analyse van de SNT-beelden een aanvullende meerwaarde hebben om seizoenschommelingen en lange termijn trends van elkaar te kunnen onderscheiden.

De afweging kan gemaakt worden of nog hogere resolutie beelden een nog beter beeld zouden geven van het gedrag van een brug. Bij de nieuwe generatie satellieten zijn er mogelijkheden om naar een resolutie van 1 m x 1 m tot 0.25 m x 0.25 m te gaan. Hieraan is dan wel weer gekoppeld dat de afmetingen van de genomen frames/beelden een stuk kleiner zijn, waardoor een veelvoud van beelden nodig is om Vlaanderen volledig af te dekken, de kostprijs dus een heel stuk hoger zal liggen (kostprijs voor 1 beeld ligt in dezelfde grootteorde als voor de TSX-beelden) en dat de beelden van de analyse ook allemaal aan elkaar gekoppeld moeten worden.

Tabel 4: vergelijking SNT vs TSX

	<i>Sentinel</i>	<i>TSX</i>
<i>Pixel grootte/grid</i>	5 m x 20 m	3 m x 3 m
<i>Densiteit aantal MP</i>	Lager (1 punt/100m ²)	Vrij hoog (1 punt/9 m ²)
<i>Ascending en descending</i>	Beide aanwezig	Keuze te maken, kostprijs x2 indien beide aangekocht worden
<i>Invalshoek kijkrichting</i>	35.86 (descending) – 40.21° (ascending)	21.6°
<i>Golflengte</i>	5.66 cm	3.10 cm
<i>Nauwkeurigheid van de horizontale positionering</i>	8 m (Z-N) – 12 m (O-W)	1 m (Z-N) – 3 m (O-W)
<i>Nauwkeurigheid</i>	Circa 1 mm/jaar	Circa 1 mm/jaar
<i>Terugkeerperiode</i>	6 dagen	11 dagen
<i>Kostprijs</i>	Gratis, zowel beelden als analyse (zie 6.1)	Zowel beelden als analyse zijn aan te kopen. Kostprijs circa 1500 euro/beeld. Aantal beelden afhankelijk van de gekozen optie (zie 7).
<i>Interpretatie voor bruggen</i>	Moeilijk zonder bijkomende info	Mogelijk, maar analyse van de beelden speelt een belangrijke rol en optimalisaties van deze analyse zijn nog mogelijk

5.3 BEDENKINGEN BIJ DE RESULTATEN

- Uit de analyse van Tre Altamira blijkt duidelijk dat t.h.v. de bruggen met shapefiles veel meer MP beschikbaar zijn dan t.h.v. de bruggen waar geen shapefiles aangeleverd werden. Zij geven zelf aan een semi-automatische analyse door te voeren in deze gebieden, om een hogere dekking te garanderen. Concreet betekent dit dat de gebieden buiten de shapefiles en de bruggen waar geen shapefiles voorhanden waren, minder MP bevatten dan mogelijk zou zijn met een semi-automatische analyse.

- Een meetperiode van net iets minder dan 2 jaar voor de hoge resolutie TSX-beelden is vrij kort om de verplaatsing van bruggen te analyseren en te vergelijken met beschikbare waterpassingen. Voor vele bruggen is er qua waterpassing maar om de 3 tot 5 jaar een meting beschikbaar om deze resultaten mee te vergelijken. Enkel bruggen die in deze specifieke tijdsperiode een significante deformatie hebben ondergaan of die een grote deformatie onder invloed van de seizoenen/temperatuur vertonen en waarbij dan ook nog topografische metingen ter beschikking zijn, kunnen eenduidig vergeleken worden. Niettegenstaande deze beperking binnen het huidige traject, blijkt toch dat, voor de interpretatie van de meetresultaten een voldoende dichte grid aan punten beschikbaar moet zijn. Voor de meeste bruggen is het aantal beschikbare meetpunten bij de TSX-beelden beduidend groter dan bij de SNT-data. Bij bruggen waar voldoende dekking is, lijken er voldoende meetpunten beschikbaar voor een interpretatie.
- Per "pixel" wordt een soort gemiddelde reflectie waargenomen, waarbij objecten die een goede reflectie geven een hogere impact hebben op het resultaat. Het is niet mogelijk om af te leiden wat precies reflecteert binnen een pixel. Dit betekent dat de interpretatie van de meetresultaten minder eenduidig is dan bij een waterpassing, waar de exacte locatie van het meetpunt gekend is.
- Doordat er veel meer resultaten in de tijd beschikbaar zijn, kan veel meer informatie over het gedrag van de structuur verkregen worden. Zo kunnen seizoenschommelingen en thermisch gedrag gedetecteerd worden
- De rapporten per brug bieden zeker een meerwaarde voor een snelle blik op de toestand van een brug. Een grote meerwaarde is het lengteprofiel met daarop de aanduiding van de landhoofden/pijlers/overspanningen. Deze kunnen automatisch aangemaakt worden op basis van de shapefiles vanuit iASSET. Hoe correcter deze ingetekend zijn, hoe beter ook hier het resultaat is.
- De beelden van TSX worden in deze zone opgenomen rond 5u 's ochtends. Dat lijkt een ideaal tijdstip om:
 - o Weinig last te hebben van veel verkeer
 - o Weinig last te hebben van opwarming door de zon (en dus bijkomende thermische effecten)

Wanneer naar een andere satellietconstellatie gekeken wordt, dient dit ook meegenomen te worden in de keuze van de satellietbeelden provider.

- Wanneer een zeer lange meetperiode gebruikt wordt, moet men zich ervan bewust worden dat alle locaties waar binnen deze tijdsperiode veranderingen zijn aangebracht (aanbouw, restauratie...) geen MP zullen hebben. Hier kan waarschijnlijk wel een speciale analysetechniek toegepast worden waarbij een glijdende periode van een aantal jaar gebruikt wordt voor de analyse. Dit werd hier niet toegepast. Sommige bedrijven sluiten soms bepaalde beelden uit in de analyse, maar gezien de tussentijd tussen de beelden en de regelmaat van de beelden ook een effect hebben op het resultaat, wordt dit door andere bedrijven afgeraden.
- De analyse van de resultaten met SNT lijkt een stuk minder goed dan de analyse die gebeurt binnen EGMS (zie 6), hoewel een gelijkaardige lengte van meetperiode beschikbaar is. Dit is deels te wijten aan het feit dat binnen EGMS alle beschikbare SNT-banen gebruikt worden (vaak dus meer dan 1 beeld beschikbaar), maar een deel is moeilijk te verklaren. De punten van de SNT-analyse liggen echt in een vast grid, waar deze bij de TSX-analyse en dan EGMS_analyse anders/beter gelokaliseerd worden.
- De analyseresultaten zijn afhankelijk van de partij die de analyse uitvoert. Zowel de gebruikte software als bepaalde keuzes die gemaakt worden (gebruikt hoogtemodel, keuze referentiepunt, gewenste coherentie, kennis van gedrag van structuur...) hebben een impact op het resultaat. Dit maakt dat, als men naar een raamcontract voor de analyse zou gaan, de keuze van de analyserende partij wel degelijk ook een invloed heeft op het resultaat en dat deze keuze dus bedachtzaam moet gemaakt worden.

5.4 ANTWOORDEN OP DE ONDERZOEKSVRAGEN

Voorafgaandelijk aan het project werden een aantal onderzoeksvragen opgesteld. Deze worden hieronder opgelijst (cursief), samen met een antwoord op de vragen

- *Op welke bruggen kunnen verschillende technieken worden toegepast? Wat is de invloed van het type brug, de oriëntatie van de brug, de aanwezigheid van bomen, gebouwen, water in de onmiddellijke omgeving...*
Zowel bij grote bruggen als kleine bruggen wordt met TSX-beelden vaak voldoende dekking behaald, al is deze, zelfs bij de TSX-beelden, vaak onvoldoende om ook dwarse profielen te trekken. Een volautomatische analyse lijkt nog tot de uitval van vrij veel MP te leiden. Beschaduwing (bomen, grote gebouwen) speelt maar bij een beperkt aantal bruggen een rol. De oriëntatie van de brug speelt vooral een grote rol bij de SNT-beelden, waar een grid van 5 m x 20 m beschikbaar is, waardoor enkel grote bruggen met een goede oriëntatie een aanvaardbare dekking hebben. De aanwezigheid van water is, zeker bij de TSX-beelden niet echt een issue, aangezien het dan juist duidelijker is dat de beschikbare MP op de brug liggen.
- *Onder welke omstandigheden kunnen verschillende technieken worden toegepast? Wat met aanwezigheid van verkeer/ invloed van weersomstandigheden ...?*
Het verkeer lijkt weinig invloed te hebben op het resultaat. Ook het weer lijkt weinig invloed te hebben. Er moet wel opgemerkt worden dat de TSX-beelden rond 5u 's ochtends opgenomen worden (wanneer er nog weinig verkeer is en er geen extreme opwarming is door de zon). Mocht naar een andere satelliet constellatie gegaan worden, dan moet hier wel rekening mee gehouden worden. In België sneeuwt het onvoldoende om hiervan last te hebben bij de InSAR analyse.
- *Is het mogelijk om automatisch een opdeling te maken in een periode voor en een periode na werken aan een brugdek? Hoe goed kunnen de punten op de brug gelokaliseerd worden*
Op deze vraag wordt uitvoering ingegaan in 5.2.2, 1)
- *Is het mogelijk om lengteprofielen te trekken in de langse en dwarse richting van de brug, waarbij de locatie van de steunpunten en de overspanningen kan aangeduid worden?*
Het maken van lengteprofielen in de langsrichting is zeker mogelijk voor de TSX-beelden (zie ook 5.2.2. 4)), voor de SNT-beelden zijn vaak onvoldoende MP aanwezig om een lengteprofiel te trekken, zelfs in de langsrichting. In de dwarsrichting blijkt het bij beide satellietbeelden niet mogelijk om een profiel te trekken. Hiervoor zou een veel fijnere resolutie nodig zijn, maar deze heeft dan weer andere nadelen.
- *Is het mogelijk om lokale anomalieën te detecteren? Zowel in de tijd (plotse vervormingen) als in de ruimte (afwijkingen t.o.v. nabijgelegen punten)?*
De techniek lijkt vooral geschikt om bewegingen/trends op grotere schaal op te volgen. Het detecteren van anomalieën in de tijd blijkt wel mogelijk, zie ook 5.2.2, 5)
- *Welke nauwkeurigheid is haalbaar? Zowel in de gedetecteerde verplaatsing als in de nauwkeurigheid van positionering van de datapunten. Welke resolutie is optimaal, rekening houdend met alle aspecten (terugkeerfrequentie satellieten, afmetingen bruggen,...)?*
Een nauwkeurigheid van 1 mm/jaar lijkt ongeveer de richtlijn. De nauwkeurigheid van positionering in het horizontale vlak wordt weergegeven in Tabel 1. De lagere nauwkeurigheid van horizontale positionering van SNT zorgt er, samen met het minder aantal beschikbare MP, dat voor een interpretatie minimaal en resolutie van 3 m x 3 m noodzakelijk lijkt.
- *Hoeveel beelden zijn minimaal nodig voor elke mogelijke techniek om tot een goed resultaat te komen? Is dit afhankelijk van de resolutie van het beeld?*
Het standaardantwoord dat hierop gegeven wordt is 25, maar het is niet enkel het aantal beelden dat een rol speelt bij de analyse en de interpretatie. Een kortere tussentijd tussen de beelden is opportuun voor een nauwkeurige analyse en verder is het niet enkel het aantal beelden maar ook de periode waarover de analyse gebeurt die een belangrijke rol speelt. Vele verplaatsingen zijn

seizoensafhankelijk en ook vrij beperkt in absolute grootte, waardoor vaak pas trends kunnen waargenomen worden na een langere meetperiode. De analyse lijkt mogelijk vanaf 25 beelden, maar is volgens ons pas zinvol naar interpretatie toe, na een periode van minimaal 2 jaar voor veel gevallen. Hoe langer de periode, hoe beter de interpretatie van de resultaten kan gebeuren.

- *Is het mogelijk om meerdere beelden aan elkaar te koppelen als heel Vlaanderen gedekt wordt met meerdere beeldensets?*

Voor SNT wordt heel Vlaanderen afgedekt door 1 of 2 beelden en is het koppelen van de beelden vrij eenvoudig. Voor het dekken van heel Vlaanderen met TSX zouden 18 beelden nodig zijn en op basis van ervaringen in het verleden blijkt het koppelen van de beelden onderling wel een aandachtspunt. Wanneer gekeken wordt naar de analyse die gebeurt binnen EGMS, waar ook meerdere beelden aan elkaar gekoppeld worden over heel Europa, door gebruik te maken van lokale GNSS stations, lijkt het zeker mogelijk om deze koppeling te maken. Dit zal een zekere expertise vragen, zowel bij de omschrijving hiervan in het bestek als bij de uitvoering en opvolging van de analyse.

- *Welke softwaremogelijkheden zijn beschikbaar om de data te visualiseren? Is een koppeling met de beheerstool van de Vlaamse overheid mogelijk?*

Het visualiseren van de data gebeurt enerzijds in de monographs en anderzijds op het platform van de ontwikkelaar. Het doorlinken naar het systeem van de asset managementsysteem van de VO en het doorlinken vanop de monograph naar het platform zou wel mogelijk moeten zijn, al werd dat in dit project niet uitgetest.

Tijdens het project bleek dat, door het wisselen van platform van de provider, niet alle mogelijkheden steeds beschikbaar waren. Er wordt best nagedacht of het geen meerwaarde zou bieden een eigen platform op te zetten, waar de mogelijkheden zelf gekozen kunnen worden en waardoor er ook continuïteit zou zijn voor de gebruikers. Een platform om de beschikbare data vanuit EGMS te plotten lijkt toch noodzakelijk. Mogelijks kan dit gecombineerd worden.

- *Is het mogelijk een alarmeringssysteem op te zetten, zodat afwijkingen op een geautomatiseerde manier kunnen vastgesteld worden*

Dit blijkt op zich wel mogelijk, al dient er wel bepaald te worden welke grenswaarden ingesteld worden. Deze grenswaarden zullen mogelijks afhankelijk zijn van het type constructie en dienen intern opgesteld te worden.

6 HUIDIGE ONTWIKKELINGEN

6.1 EGMS

6.1.1 Algemeen

Eén van de grootste veranderingen sinds de aanvang van het project, is de ontwikkeling van een online platform/applicatie binnen het Copernicus programma van Europa, EGMS (European Ground Motion Service): <https://egms.land.copernicus.eu/>.

Binnen dit platform wordt een gratis analyse van de SNT-beelden over Europa ter beschikking gesteld. De analyse gebeurt in een soort samenwerkingsverband tussen verschillende bedrijven, waarbij er een opsplitsing gebeurd is in een aantal gebieden. Jaarlijks wordt een analyse gedaan van de Europese Unie. Voor de landen die buiten de Europese Unie vallen, wordt geen analyse uitgevoerd (bv. Zwitserland, Bosnië en Herzegovina, Servië...).

Op het einde van het derde kwartaal (of 4^{de} kwartaal) wordt telkens een analyse gepubliceerd van een verwerking van de laatste 5 jaar (bv. op het einde van het derde kwartaal 2025 wordt normaal een analyse gepubliceerd van 2020-2024; eind 2024 werd een analyse gepubliceerd van 2019-2023).

De eerste keer dat een analyse werd uitgevoerd is in 2023. Momenteel zijn er dus al 2 (bijna 3) analyses beschikbaar:

- Periode 2018-2022
- Periode 2019-2023
- Periode 2020-2024 (op 15/10/2025 nog niet gepubliceerd)

Enkel de meest recente analyse kan gevisualiseerd worden op het platform. Gearchiveerde data kan gedownload worden, maar kan niet binnen de applicatie gevisualiseerd of bevroegd worden. Het lijkt zeker een opportuniteit om (binnen Vlaanderen?) een applicatie te hebben waar al deze analyses raadpleegbaar zijn. Het is immers zeer interessant om voor een bepaalde locatie de evolutie over de jaren heen te kunnen bekijken.

Het EGMS-platform is zeer nuttig en geeft een heel mooie dekking over Vlaanderen. Een groot voordeel is dat er ook getracht wordt absolute verplaatsingen te bekomen, door te corrigeren met een lokaal GNSS-netwerk. De resultaten lijken erg betrouwbaar.

Gezien er op verschillende locaties in Vlaanderen een dubbele dekking is van zowel ascending als descending mode, is er een vrij denses aantal meetpunten beschikbaar.

De achtergrond kaart die gebruikt wordt in de EGMS-applicatie is niet zeer nauwkeurig. Er kunnen echter externe EGMS lagen toegevoegd worden, bv. <https://geo.api.vlaanderen.be/OMWRGBMRVL/wms> (kaart van Vlaanderen).

Hieronder wordt een vergelijking gemaakt met enkele voorbeelden die besproken werden in 4.2.

6.1.2 Vergelijking EGMS met eindresultaat Tre Altamira

Voor de in 4.2 bekeken locaties worden ook de EGMS-beelden (2019-2023) onderzocht. Men moet zich wel bewust zijn dat de meetperiodes niet overeenstemmen (SNT-periode van analyse tijdens dit project is 2015-2022). Enerzijds is de periode van SNT-beelden tijdens dit project langer, waardoor er mogelijk minder MP beschikbaar zijn (zie hierboven), anderzijds gaat het ook over een andere periode, waardoor er mogelijk andere gebieden (bv. ten gevolge van werken) geen MP hebben.

6.1.2.1 Grote verplaatsing spoorwegbrug over R22

Zoals hierboven vermeld, merken we een significante zetting, vnl. van de westzijde van de brug 9105 (spoorwegbrug in spoorlijn over R22). In de periode 2015-2022 gaat het over vrij grote zettingen (lokaal tot een 7-tal cm over deze periode). De geanalyseerde beelden van de Tre Altamira (zowel SNT als TSX) worden vergeleken met het resultaat van EGMS in Figuur 28 t.e.m. Figuur 30.

In alle figuren werd de legende van de verplaatsingen gezet op -10 tot +10 mm/jaar.

Figuur 28a (ascending) en 28b (descending): analyse SNT door Tre Altamira: de MP zijn erg lineair ge-positioneerd i.f.v. de kijkrichting van de satelliet.

Figuur 28c: wanneer een gemiddelde verplaatsing genomen wordt van een groepje MP t.h.v. de ophoging achter het westelijke landhoofd zien we een gemiddelde verplaatsing van circa 20 mm, die vnl. is opgetreden in de periode 2017-2020. Nadien lijken de verplaatsingen gestabiliseerd. Er wordt een gemiddelde genomen van zowel de ascending als descending beelden samen.

Figuur 29a (ascending) en 29b (descending): analyse SNT door EGMS: de MP zijn veel minder lineair gepositioneerd en bevinden zich vooral t.h.v. de vaste structuren. Er zijn geen meetpunten langsheen de Woluwelaan. In de periode 2016-2018 werd hier gewerkt aan een fietstunnel aan de oostzijde van de Woluwelaan. In de periode 2022-2023 werd er gewerkt aan een wegtunnel. Mogelijk zorgen vooral de laatste werken voor een verstoring in de analyse.

Figuur 29c: wanneer een gemiddelde verplaatsing genomen wordt van een groepje MP t.h.v. de ophoging achter het westelijke landhoofd zien we een gemiddelde verplaatsing van circa 10 mm, die vnl. is opgetreden in de periode 2019-2020. Nadien treden nog wel wat zettingen op, maar aan een trager tempo. Er wordt geen gemiddelde genomen van zowel de ascending als descending beelden samen. Beide kijkrichtingen geven een gelijkaardig beeld, wat wijst op een vnl. verticale verplaatsing (zetting).

Figuur 29d: ter hoogte van het centrale gedeelte van de brug zien we vooral een seizoensgebonden beweging (amplitude van een 20-tal mm) en een beperkte absolute verplaatsing. Gezien het een stalen brug is, is dit niet verwonderlijk.

Figuur 29e: ter hoogte van de oostelijke ophoging zien we een heel kleine seizoensgebonden schommeling en een minimale absolute zetting.

Figuur 30 (descending): analyse TSX door TRE altamira. a) Wanneer een gemiddelde verplaatsing genomen wordt van een groepje MP t.h.v. de ophoging achter het westelijke landhoofd zien we een gemiddelde verplaatsing van circa 10 mm over de periode 07/2014-03/2016. b) t.h.v. het centrale deel zien we vnl. een seizoensgebonden beweging (amplitude 10-tal mm); c) in het oostelijke deel is er quasi geen beweging



a)



b)



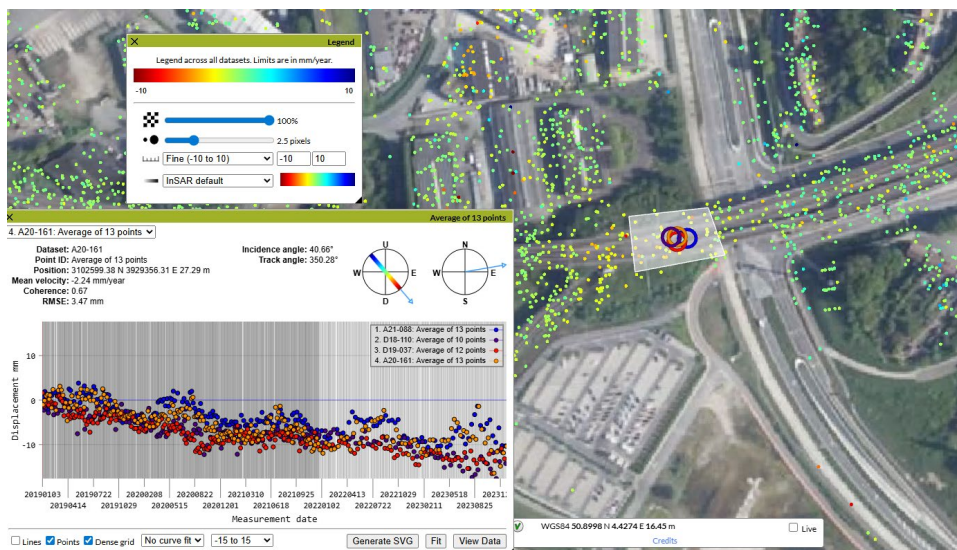
c)
Figuur 28: analyse SNT uitgevoerd door Tre Altamira (04/2015-01/2022); a) ascending, b) descending, c) ascending en descending samen, met een gemiddelde verplaatsing van circa 2 cm t.h.v. het westelijke landhoofd



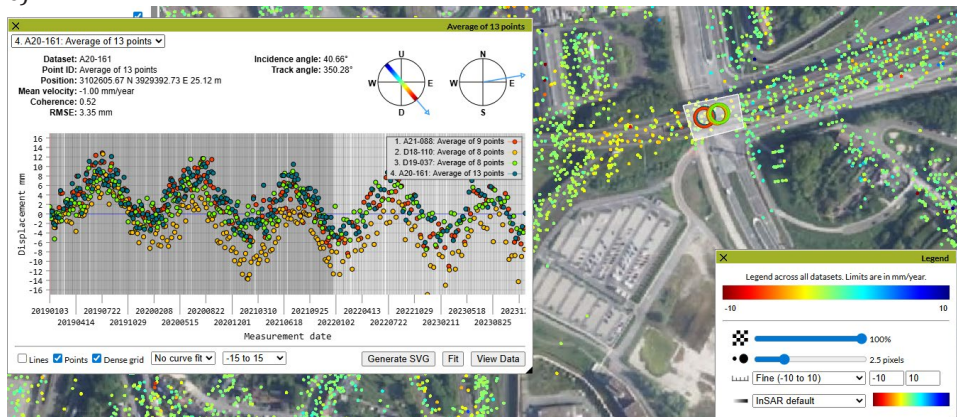
a)



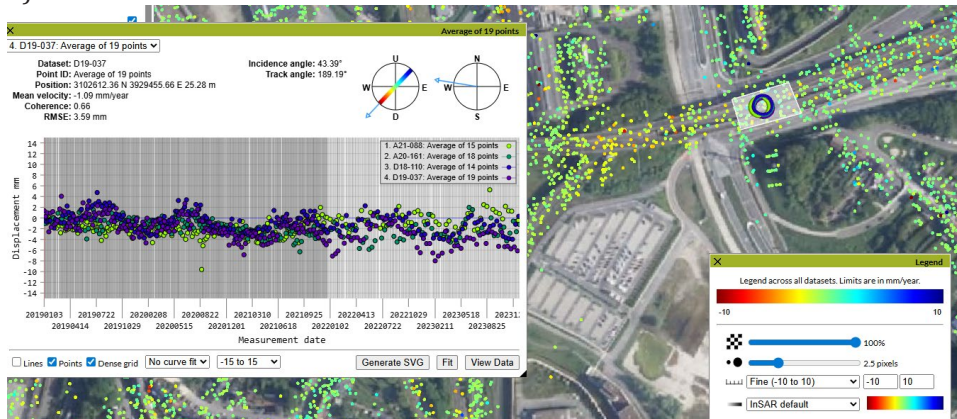
b)



c)



d)



e)

Figuur 29: analyse SNT uitgevoerd door EGMS (01/2019-12/2023); a) ascending, b) descending, c) ascending en descending samen, met een gemiddelde verplaatsing van circa 10 à 15 mm t.h.v. het westelijke

landhoofd; d) ascending en descending samen, met een seizoensgebonden beweging met amplitude van circa 20 mm t.h.v. het centrale deel van de brug; e) ascending en descending samen, met een gemiddelde verplaatsing van circa 4 mm t.h.v. het oostelijke landhoofd



Figuur 30: analyse TSX uitgevoerd door Tre Altamira (07/2014-04/2016); gemiddelde verplaatsing van a) westelijke ophoging, b) centraal deel van de brug, c) oostelijke ophoging, temperatuur gecompenseerd

Conclusies:

- De periode waarover gekeken wordt heeft een impact op de resultaten. Dit is niet abnormaal, gezien ook de verplaatsingen ook vaak niet lineair zijn i.f.v. de tijd.
- Visueel kan men, enkel kijkend naar de analyse met als legende de verplaatsingsnelheid een zone met een grote bewegingsamplitude niet onderscheiden van een zone met quasi geen vervorming.
- Best om telkens een (kleine) groep van punten te selecteren om een globaal beeld te krijgen, eerder dan punt per punt te bekijken.
- De locatie van de meetpunten van SNT in de analyse van Tre Altamira lijkt gewoon i.f.v. het grid opgemaakt te zijn, eerder dan dat deze gekoppeld werd aan bv een hoogteligging of geschatte ligging van het reflectiepunt. Bij EGMS lijken de punten beter gelokaliseerd.

6.1.2.2 Viaduct van Vilvoorde

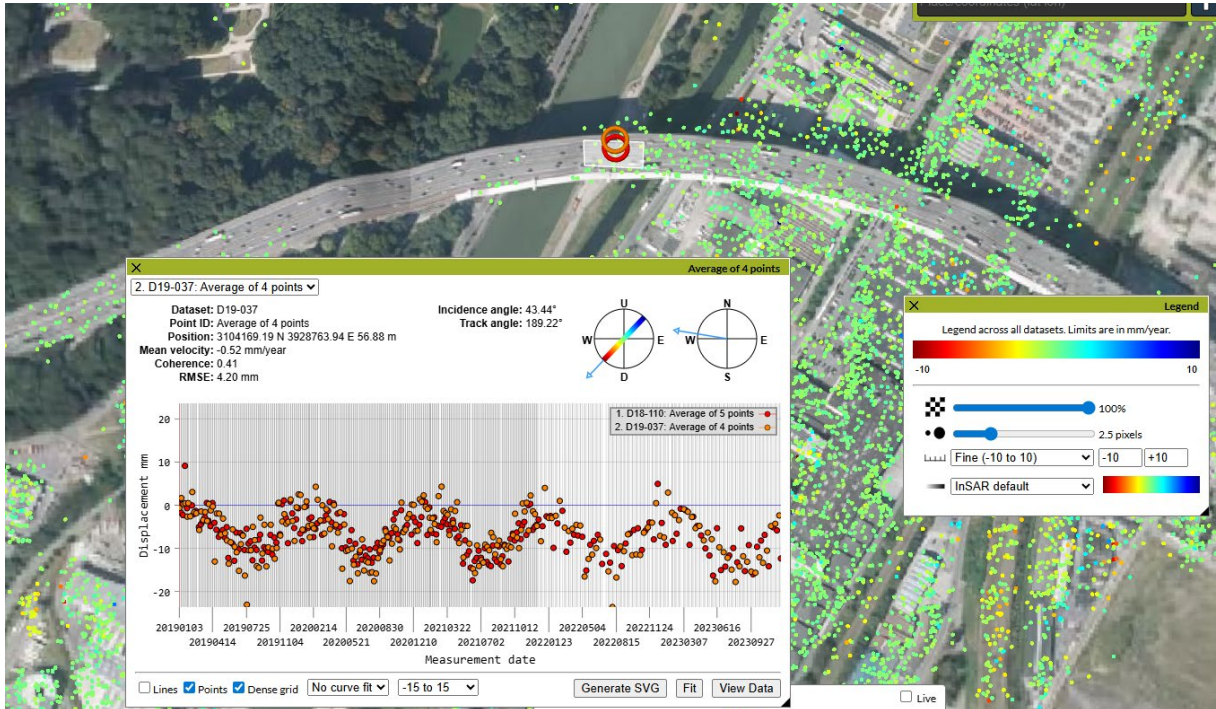
Het viaduct van Vilvoorde lijkt op basis van de analyse van Tre Altamira onderhevig aan vrij grote seizoensgebonden verplaatsingen. Bij de andere bedrijven resulteerde dit erin dat er weinig tot geen MP aanwezig zijn op de brug van Vilvoorde.

In Figuur 31 wordt de analyse van de SNT-beelden door Tre Altamira weergegeven. Hierop zien we een vrij volledige dekking van de brug, met in het centrale gedeelte een seizoensgebonden variatie grootteorde 20mm.

In figuur 32 wordt de analyse van EGMS weergegeven. Hierop zien we dat in het gedeelte van de brug over het water geen MP heeft. De zone net naast het water geeft echter een gelijkaardig gedrag weer (seizoensgebonden variatie van circa 20mm). Er zijn quasi enkel MP beschikbaar uit de descending kijkrichting. Daarom wordt enkel deze geplot.



Figuur 31: analyse SNT uitgevoerd door Tre Altamira (04/2015-01/2022); descending, met een seizoensgebonden verplaatsing van circa 20mm



Figuur 32: analyse SNT uitgevoerd door EGMS (01/2019-12/2023); descending, met een seizoensgebonden verplaatsing van circa 20mm

6.2 EUROSTRUCT

Naar aanleiding van het falen van de brug in Genua in 2018 (en de brug in Aulla in 2020) en de reeds lopende COST action 1406 (quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level, 2014-2019) werden in Italië heel wat projecten rond brugmonitoring opgezet. Uit de COST action 1406 werd de Eurostruct associatie opgericht. Zij organiseren bv. jaarlijks conferenties en zetten ook in op het publiceren van rapporten en het organiseren van onderzoek.

Binnen hun scope werd ook de mogelijkheid onderzocht om InSAR in te zetten voor het opvolgen van bruggen.

Op 19/11/2024 werd een webinar opgenomen, dat zowel de basisprincipes toelicht als verschillende voorbeelden, resulterend in mogelijkheden en beperkingen/aandachtspunten voor het opvolgen van deformaties van bruggen via InSAR. Het is zeker de moeite om dit webinar te bekijken: <https://www.youtube.com/watch?v=VozxhJF1Tzk>.

Volgende zaken worden meegegeven in de presentatie:

- Zowel het type brug (materiaal/opbouw) als de oriëntatie hebben een belangrijke impact op het aantal beschikbare MP
- Gratis software kan ingezet worden voor de analyse, ook door niet experts.
- De analyse van hoge resolutie data levert een beduidend groter aantal MP dan de analyse via SNT-beelden. De bewegingen die met hoge resolutie data worden bekomen bevatten minder ruis en geven dus een duidelijker beeld, maar de algemene trend, wanneer meerdere punten samengenomen worden, geeft vaak een gelijkaardig beeld voor beide types satellieten.

- Het gekozen grid (zones waarin punten worden samengenomen) voor de analyse van de metingen heeft veel impact op het resultaat. Dit grid wordt best zodanig gekozen dat het rekening houdt met de brugoverspanningen en de oriëntatie van de brug. Dit leidt tot een veel kleinere variatie/onzekerheid op de meetresultaten. Hier is echter voorkennis over de opbouw van de brug nodig. Indien deze voorkennis er niet is, kan er op basis van de correlatie tussen meetpunten een opdeling gemaakt worden van punten met een gelijkaardig gedrag. Dit levert een minder nauwkeurig resultaat op, maar vraagt wel geen voorkennis over de opbouw van de brug**.

**het toont wel aan dat het inzetten van de beschikbare shapefiles zeker een meerwaarde biedt naar interpretatie van de metingen, zeker voor de opgemaakte lengteprofielen.

- Enkele voorbeelden worden aangehaald van bruggen die ingestort zijn. Bij de voorbeelden maakte men gebruik van een voorspelling op basis van de metingen van enkele jaren voorafgaand aan de calamiteit om zo de afwijking voor het instorten duidelijk te zien. Enige tijd voor instorten van de brug kon wel een afwijkend gedrag vastgesteld worden. Bij 1 brug kon telkens een afwijkend gedrag worden vastgesteld tijdens overstromingsmomenten, en dit zelfs al enkele jaren voor instorten. Bij de andere brug kon men slechts 6 maand tot 1 jaar voorafgaand aan het instorten een wijziging in gedrag opmerken.**

** Dit legt wel een zekere druk op de analyse frequentie van de metingen indien men van InSAR gebruik wil maken als early warning system.

Volgende uitdagingen worden opgelijst:

- Aantal beschikbare beelden en benodigde processing
- Aantal beschikbare PS punten
- Precisie en nauwkeurigheid van de verplaatsing
- Temporele resolutie
- Vertraging in processing (EGMS)

Volgende mogelijkheden worden opgesomd:

- Metingen gebeuren onafhankelijk van weersituatie en omgevingsomstandigheden (bewolking heeft geen impact)
- Grote ruimtelijke dekking (gebiedsdekkende monitoring)
- Geen toegewijd monitoringssysteem nodig
- Monitoring in het verleden mogelijk
- Mogelijkheden om als early warning te gebruiken, met als aandachtspunt wel dat EGMS steeds met een zekere vertraging de data aanlevert. Bij het falen van 1 van de 2 bruggen was slechts 6 maand voor falen een afwijking in deformatie vastgesteld.

7 MOGELIJKE VERVOLGSTAPPEN

Het is duidelijk dat het gebruik van hoge resolutie data een meerwaarde biedt naar interpretatie van de resultaten, zowel voor de kleinere assets als voor de grotere assets (beter onderscheid tussen verschillende

zones en betere lokalisatie van eventuele vervormingen). Het gebruik van deze hoge resolutie data brengt echter een grote bijkomende kost met zich mee, aangezien de analyse binnen EGMS gratis wordt aangeboden. De auteurs van dit document zien 3 mogelijkheden voor een vervolgtraject:

- 1) Enkel EGMS wordt gebruikt om ervaring op te doen met de meettechnieken de interpretatie van de data. Hierbij wordt het dan wel ten stelligste aangeraden om de historische data van EGMS beschikbaar te maken op een platform waarop de data kan geraadpleegd worden (dit is het geval voor elk van de 3 opties)
- 2) Gebruik van EGMS (+bijhouden en raadpleegbaar maken van historische data) en gebruik van HR beelden in/rond grote steden + jaarlijkse analyse van deze beelden. Voordeel hiervan is dat de kost beperkt blijft (in functie van het aantal steden/gebieden dat men wenst op te volgen) maar dat er toch een hogere dekking is in de gebieden waar veel assets aanwezig zijn. Nadelen zijn dat er geen volledig gebiedsdekkende oplossing is binnen Vlaanderen in HR en dat er toch een kost verbonden is aan aankoop beelden en analyse.
- 3) Aankoop van HR beelden over heel Vlaanderen/België + jaarlijkse analyse van deze beelden. Voordeel hiervan is dat er een HR dekking is over heel Vlaanderen/België. Nadeel is de hoge kostprijs die dit met zich meebrengt (vooral voor de aankoop van de beelden)

Naast het nemen van de beslissing over het vervolgtraject (in functie van de ingeschatte meerwaarde), dient men zich ervan bewust te zijn dat er nog een heel traject afgelegd moet worden:

- Gebruikers dienen ervaring op te doen met het gebruik en de interpretatie van de data. Een beperkte opleiding is hiervoor zeker zinvol, maar het zal vooral het dagdagelijks toepassen en gebruiken van deze techniek zijn die dit mogelijk zal maken.
- Combinatie van InSAR met andere, lokale technieken kunnen enerzijds het vertrouwen en de kennis voor de interpretatie van de data vergroten, maar zullen steeds nodig zijn wanneer meer gedetailleerde info over het gedrag noodzakelijk is (bv. zeer lokaal gedrag, ondergronds gedrag...)
- De na-analyse van de resultaten dient nog geoptimaliseerd te worden (opstellen lengteprofielen, vastleggen threshold waarden). Hier is een inspanning gevraagd van zowel de analist als de gebruikers.
- De ingetekende shapefiles van de bruggen kunnen nog geoptimaliseerd worden en bij de analyse wordt best rekening gehouden met de afmetingen en oriëntatie van deze shapefiles
- Er moet beslist worden hoe en waar de historische EGMS data bijgehouden zal worden en raadpleegbaar zal zijn. Een koppeling met de AM-applicatie binnen de VO lijkt zinvol.
- Er moet gekozen worden welke HR satellietbeelden men wil aanschaffen (rekening houdend met gewenste/benodigde resolutie; leeftijd satelliet en ervaring met satelliet)
- Er moet gekozen worden hoeveel beelden men wil aanschaffen (retourperiode, 1 of 2 kijkrichtingen, gebiedsdekkend of enkel t.h.v. enkele specifiek gekozen beelden).
- Indien men wil overgaan tot aankoop en analyse van beelden moet beslist worden op welk niveau men dit wil doen? Binnen Vlaanderen of binnen België? De beelden en de analyse kan zeker veel breder ingezet worden dan enkel voor het opvolgen van de bruggen.
- Er moet een raamcontract opgemaakt worden voor de analyse van de beelden + er moet een keuze gemaakt worden i.v.m. de analyse frequentie (1 keer per jaar, 2 keer per jaar...). De partij die de analyse uitvoert en de uitgevoerde analyse hebben een grote impact op het resultaat. Idealiter wordt een expert aangesteld om dit raamcontract op te stellen, zodat met zekerheid een goede partij en een goede analyse bekomen wordt. Duidelijke randvoorwaarden moeten opgesteld worden voor de analyse en voldoende aandacht dient besteed te worden aan de mogelijkheden op het online platform.

8 BESLUIT

Er is zeker heel wat potentieel in het gebruik van InSAR voor het opvolgen van de assets binnen Vlaanderen. De grootste voordelen zijn:

- Monitoring op zeer grote schaal. Mogelijk om zeer grote gebieden met veel assets op te volgen
- Geen plaatsing van instrumentatie nodig, hierdoor ook geen interferentie met verkeer (zowel voor plaatsing als uitvoeren van manuele metingen)
- Geeft bijkomende info over asset en omgeving
- T.o.v. waterpassingen is er zeer veel informatie beschikbaar in de tijd (meting om de 6 dagen à 14 dagen ipv 1 meting om de 3 à 5 jaar)

Waarvoor kan InSAR ingezet worden binnen Vlaanderen:

- Op grote schaal globaal opvolgen van de assets/bruggen binnen Vlaanderen.
- In eerste instantie bijkomende informatie opleveren over het gedrag van de structuur (thermisch gedrag of niet, continue of differentiële zettingen, mogelijke doorbuigingen i.f.v. de tijd) en zijn omgeving.
- Voor bruggen waar quasi geen verplaatsing vastgesteld wordt, kan deze techniek op termijn mogelijk ingezet worden ter vervanging van de topografische opmetingen. Hierbij wordt aangeraden zeker nog steeds een (topografische) nulmeting uit te voeren van de brug en moet aandacht besteed worden aan het eventueel wegvallen van meetpunten in de tijd.
- Naast bruggen, kan de techniek ook op grotere schaal ingezet worden voor het opvolgen van andere assets binnen Vlaanderen/België: gebouwen, dijken (indien voldoende reflecterend en niet in een beschaduwde zone), havendammen, spoorwegen, weginfrastructuur, ...

Waarvoor is de data (momenteel) zeker nog niet geschikt:

- Als early warning in geval van falen. Hier is het vooral de analyse frequentie die ervoor zorgt dat er een vrij grote delay zit tussen het effectief optreden van een verplaatsing en het zichtbaar zijn in de analyse. Indien gebruik gemaakt wordt EGMS varieert de vertraging tussen 1 à 2 jaar. Indien gekozen zou worden voor een jaarlijks analyse van hoge resolutie data, dan is deze vertraging nog steeds maximaal 1 jaar. Bij verwachten van falen dient overgegaan te worden tot een lokale, nauwkeurige en realtime monitoring die tijdig een waarschuwing kan geven in geval van aankomend falen. Zelfs indien de analyse continu beschikbaar zou zijn, komen eenmalige outliers vrij frequent voor en zijn verschillende meetpunten in de tijd nodig om een plotse verandering/verplaatsing te bevestigen.
- Volledige vervanging van de topografische metingen, gezien een zeer nauwkeurige positiebepaling van de punten die opgemeten worden bij InSAR niet mogelijk is. Voor kritieke deformaties zal dat steeds een issue zijn. Bovendien vliegen satellieten telkens maar over een beperkte periode in de tijd (10-20 jaar in het verleden), waardoor echt lange termijnsmetingen/analyses niet evident zijn.
- Opvolging van werven zal nooit mogelijk zijn, gezien de grote veranderingen die op zeer korte termijn optreden.
- Het uitvoeren van onderhoudswerken kan de analyse sterk verstoren. Mogelijks leidt dit tot het wegvallen van de MP over een langere periode en in het beste geval tot gefragmenteerde analyses voor en na de werken.

Volgende aanbevelingen kunnen we alvast doen (zie ook paragraaf 7):

- Keuze 2 (combinatie van EGMS en lokaal HR beelden) lijkt momenteel de meest economische keuze. Zolang men niet overgaat tot de aankoop van de beelden, kan men ook de analyse niet laten uitvoeren, gezien de beelden enkel op vraag opgenomen worden.

- Het lijkt opportuun om ons voor een vervolgtraject te laten begeleiden door een echte (externe) expert, met name voor de keuze van het type satelliet, de keuze voor de retourperiode, keuze aantal kijkrichtingen, omschrijving gewenste analyse...
- Na de start van de aankoop van de beelden, dient men minimaal 1 jaar aan data te hebben vooraleer men de eerste analyse kan doen. Het is dus zeker aanbevolen om zo snel mogelijk een (eventueel begeleide) beslissing te nemen en over te gaan tot aankoop van de beelden.
- Indien overgegaan wordt tot de aankoop van HR beelden is de aanbeveling om deze aan te kopen onafhankelijk van degene die de analyse uitvoert, gezien men zich anders op zeer lange termijn bindt aan de analist. Idealiter worden deze op een hoger niveau binnen België/Vlaanderen aangeschaft en wordt de analyse van de beelden ook vrij ter beschikking gesteld, zodat zoveel mogelijk partijen hiervan gebruik kunnen maken.
- Bepaalde optimalisaties kunnen nog uitgevoerd worden (bv. opmaak lengteprofielen op basis van oriëntatie en afmetingen shapefiles). Deze worden bij de opmaak van het bestek voor de analyse best meegenomen.
- Het opnemen en bijhouden van de data van EGMS, eventueel samen met de analyse van hogere resolutie beelden is ten zeerste aangeraden. Dit omwille van:
 - o Het raadpleegbaar maken van de historische analyses van EGMS
 - o Het beschikbaar hebben van alle data op 1 platform, waar de gewenste mogelijkheden beschikbaar zijn

9 GEBRUIKTE AFKORTINGEN

AM	Asset Management
DEM	Digital Elevation Model
DS	distributed Scatterers
EO	Earth Observation
EUSPA	European Agency for the Space Program
HR	Hoge Resolutie
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
MP	Meetpunten (Measurement Points in het Engels)
POC	Proof Of Concept
PS	Persistent scatterer
SNT	Sentinel
TSX	Terrasar X
VO	Vlaamse Overheid

10 BIJLAGEN

Bijlage 1	Rapporten per brug POC, e-geos
Bijlage 2	Technisch rapport POC, e-geos
Bijlage 3	Rapporten per brug POC, Skygeo
Bijlage 4	Technisch rapport POC, Skygeo

Bijlage 5	Technisch rapport POC, Sensar
Bijlage 6	Rapporten per brug POC, Tre Altamira
Bijlage 7	Technisch rapport POC, Tre-Altamira
Bijlage 8	Gepubliceerd bestek, incl wijzigingen na POC
Bijlage 9	Executive report, Tre Altamira
Bijlage 10	Oplijsting van assets waarvoor shapefiles werden aangeleverd
Bijlage 11	Monografieën van alle assets waarvoor shapefiles werden aangeleverd
