



# De MOW BrugScan

Efficiënte monitoring van bruggen met satelliet

Rapportage PoC

22-12-2021

ref: GEO\_2020\_01

 SENSAR

## Inhoudsopgave

.....	1
1. Inleiding .....	3
2. Uitgevoerde Activiteiten .....	4
3. Leveringsspecificatie .....	6
4. Gebruikte methodieken .....	8
5. TerraSAR-X vs Sentinel-1 .....	19
A. Rode Lijst .....	25
B. Grijs Lijst .....	25

## 1. Inleiding

Het departement Mobiliteit en Openbare Werken (MOW) van de Vlaamse overheid heeft een groot aantal bruggen in beheer. Handmatige inspectie van deze bruggen op vervormingen vergt veel kosten en tijd en is bovendien foutgevoelig. Doordat er met handmatige methodes relatief infrequent gemeten wordt, zijn de metingen gevoelig voor de weersomstandigheden op het meetmoment en is het lastig snel optredende deformaties tijdig te detecteren. Hierdoor wordt onderhoud soms te laat en soms te vroeg gepleegd. Dit zorgt voor onnodig hoge kosten en verminderde veiligheid en gebruiksgemak voor de weggebruiker.

In die hoedanigheid heeft MOW een innovatieopdracht uitgeschreven om te onderzoeken of de satelliet-gebaseerde InSAR techniek een alternatief of een meerwaarde kan bieden ten opzichte van de huidige meettechnieken. De voornaamste vragen liggen rond de betrouwbaarheid en het detailniveau van de data voor het detecteren van vervormingen en de schaalbaarheid van de analyse richting het hele areaal. Sensar heeft de kans gekregen om een Proof-of-Concept (PoC) te produceren.

In deze rapportage vind u een overzicht van de uitgevoerde activiteiten, een beschrijving van de gebruikte methodieken en een analyse van het verschil tussen hoge resolutie TerraSAR-X en Sentinel-1.

## 2. Uitgevoerde Activiteiten

Specifiek voor de Proof-of-Concept fase zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

### WPA1: Dataproductie

- 1) Incorporatie Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II
- 2) Productie PS/DS datasets TerraSAR-X
- 3) Productie PS/DS datasets Sentinel-1 (ascending en descending)
- 4) Coördinatentransformatie naar Lambert72 en mTAW
- 5) Uitvoeren modelschattingen en mogelijkheid tot filteren temperatuursinvloeden
- 6) Datafiltering en kwaliteitscontrole

Tijdens de dataproductie zijn er geen bijzonderheden geweest. We hebben de verwerkingsstappen doorlopen zoals beschreven in het plan van aanpak. Bij de modelschatting is gebruik gemaakt van een kleinste kwadratenmethode waarbij er drie modellen zijn toegepast (lineaire snelheid, seizoenspatronen, kwadratische versnelling). Door seizoenspatronen als aparte modelparameter mee te nemen in de regressie wordt de lineaire snelheid niet beïnvloed door temperatuursinvloeden. Door gebruik te maken van het onze 'Adaptive Model Fitting' zijn alleen de noodzakelijke modellen gebruikt om zo overfitting te voorkomen.

### WPA2: Creëren afgeleide producten

- 1) Vergaren en opstellen productdefinitie in overleg met MOW
- 2) Inventariseren brugtypes en mogelijkheden per brugtype in overleg met MOW
- 3) Uitvoeren decompositie voor de Sentinel-1 metingen op de 21 bruggen; productie van verticale en horizontale metingen
- 4) Productie MOW BrugScan voor de 21 bruggen van hoge interesse
- 5) Analyse directe omgeving (200m straal) van de 21 bruggen met hexagonale gridcellen
- 6) Uitvoeren detectie-analyse en produceren alarmeringen
- 7) Productie van lengte- en breedteprofielen van de 21 bruggen, op basis van input van MOW
- 8) Workshop met MOW experts over de instellingen van de alarmeringen en feedback op de visualisatie van het product

Het creëren van de afgeleide producten is succesvol uitgevoerd en de elementen zijn beschreven in de methodiek (hoofdstuk 3). De enige afwijkingen hierop is dat de uitgevoerde decompositie niet is uitgevoerd, dit was vooral interessant voor landhoofden. De resolutie van Sentinel-1 bleek echter voldoende om dit met genoeg betrouwbaarheid uit te voeren. Daarnaast is de tijdreeks van TerraSAR-X iets te kort voor betrouwbare afwijkingsdetecties en zijn deze dus alleen uitgevoerd op Sentinel-1.

### WPA3: Ontwikkelingen

- 1) Weergave van beperkte tijdspanne van de tijdserie
- 2) OPTIONEEL: weergave van tijdseries van een groep meetpunten

Sensar heeft gedurende dit project de interactieve grafieken van de tijdreeksen verbeterd. De weergave van tijdseries van een groep meetpunten is ondervangen door de samenvattingen per object / gridcel.

### WPA4: Levering en rapportage

- 1) Beschikbaar maken databestand en interactieve webviewer
- 2) Productie "grijze lijst" en "rode lijst"; bruggen zonder InSAR resultaten en gevonden alarmeringen
- 3) Opstellen eindrapportage POC en geven eindpresentatie. Indicatie van potentie voor het uitvoeren van geautomatiseerde analyse en eerste verschillen tussen TerraSAR-X en Sentinel-1

De data is reeds beschikbaar gemaakt als databestand (geopackage) en in de interactieve webviewer. Binnen dit databestand is er een aparte laag met alarmeringen aangeleverd. Er zijn geen bruggen gevonden zonder dekking, wel is het Viaduct van Vilvorde slecht gedekt door sterke temperatuurschommelingen. Daarnaast is er in met dit document en de geplande eindpresentatie toelichting gegeven op de data.

## Bevindingen workshop

Tijdens de PoC-fase hebben we met experts van MOW een constructieve workshop gehad. Tijdens deze workshop kwam de verschillende informatiebehoefte naar boven en is er feedback geleverd op het tussenresultaat.

Hieruit kwam naar voren dat er de behoeftes voor de MOW BrugScan op te delen zijn in drie elementen:

- **Meer inzicht**, voornamelijk om, naast de beschikbare waterpassingen, dieper inzicht te krijgen in de vervorming van de bruggen. Hierbij werd vooral aangehaald dat waterpassen geen inzicht bieden in seizoenspatronen en dat sommige locaties niet gemeten worden vanwege veiligheidsrisico's.
- **Alarmeringen**, voor het detecteren van afwijkingen om daarmee een risico gestuurde inzet te doen van conventionele inspecties.
- **Analyse-tools**, waarbij er vooral interesse is om met lengteprofielen kritieke punten op kunstwerken te identificeren. Er is ook behoefte om deze profielen zelf te kunnen tekenen.

Wij hebben deze bevindingen meegenomen in de levering van het PoC en het vergelijk van TerraSAR-X vs Sentinel-1. De drempelwaardes voor alarmeringen & de mogelijkheid om zelf profielen in te kunnen tekenen nemen willen we graag meenemen naar de uitvoeringsfase.

### 3. Leveringsspecificatie

De data is te downloaden via onze cloud:

Link: <https://data.sensar.nl/s/87p3crLqB6WEfzM>

Wachtwoord: akopg6D2QJ

Deze link is 30 dagen beschikbaar, maar kan bij ons altijd opnieuw worden aangevraagd.

De data is verpakt in een geopackage, welke leesbaar zou moeten zijn voor bijna elk GIS-systeem. Een geopackage is in feite een kleine en lichte database, waarbij de data is verpakt in verschillende tabellen. Per productlaag is er een tabel met de data voor TerraSAR-X en de data voor Sentinel-1 en daarnaast nog ruwe puntenwolken voor elke gebruikte stack en elk datatype (PS/DS). De vlakcontouren van de DS-metingen zijn niet meegeleverd, dit zou het databestand te groot maken.

De productlagen bevatten de volgende kolommen:

Kolom	Beschrijving	Eenheid
id	Primary key	-
geom	De geometrien	-
velocity	De lineaire snelheid van de deformatiemetingen	mm/yr
velocity_acc	De nauwkeurigheid van de trendschatting	mm/yr
seasonal_sin	De sinuscomponent van een jaarlijkse cyclus	mm
seasonal_sin_acc	De nauwkeurigheid van de sinuscomponent	mm
seasonal_cos	De cosinuscomponent van een jaarlijkse cyclus	mm
seasonal_cos_acc	De nauwkeurigheid van de cosinuscomponent	mm
seasonal_phase	De fase van de seizoensbeweging	dagen t.o.v. 1 januari
seasonal_amplitude	De amplitude van de seizoensbeweging	mm
quadratic	De kwadratische versnelling van de deformatie	mm/yr <sup>2</sup>
quadratic_acc	De nauwkeurigheid van de kwadratische versnelling	mm/yr <sup>2</sup>
v_yyyymmdd	De verticale deformatie op tijdstip yyyy-mm-dd	mm
h_yyyymmdd	De horizontale deformatie op tijdstip yyyy-mm-dd	mm
rmse	Meetruis per individuele meting	mm
mean_spatial_quality	Ruimtelijke score	- [0, 1]
coverage	Dekkingsgraad	- [0, 1]
coverage_quality	Score voor homogeniteit dekkingsgraad	- [0, 1]
ts_chart	Link naar een interactieve tijdreeks	text

De ruwe-data kan tevens de volgende kolommen bevatten:

Kolom	Beschrijving	Eenheid
d_yyyymmdd	De deformatie <b>line-of-sight</b> op tijdstip yyyy-mm-dd	mm
ensemble_coherence	Mate van signaalstabiliteit	- [0, 1]

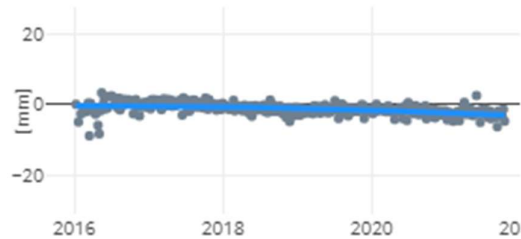
## Webportaal

Daarnaast is de data beschikbaar gesteld in ons webportaal en toegankelijk via deze link en wachtwoord:

Link: <http://mgo.ms/s/ykobe>

Wachtwoord: TL05zcuRnDzkj5bwXez0shbC

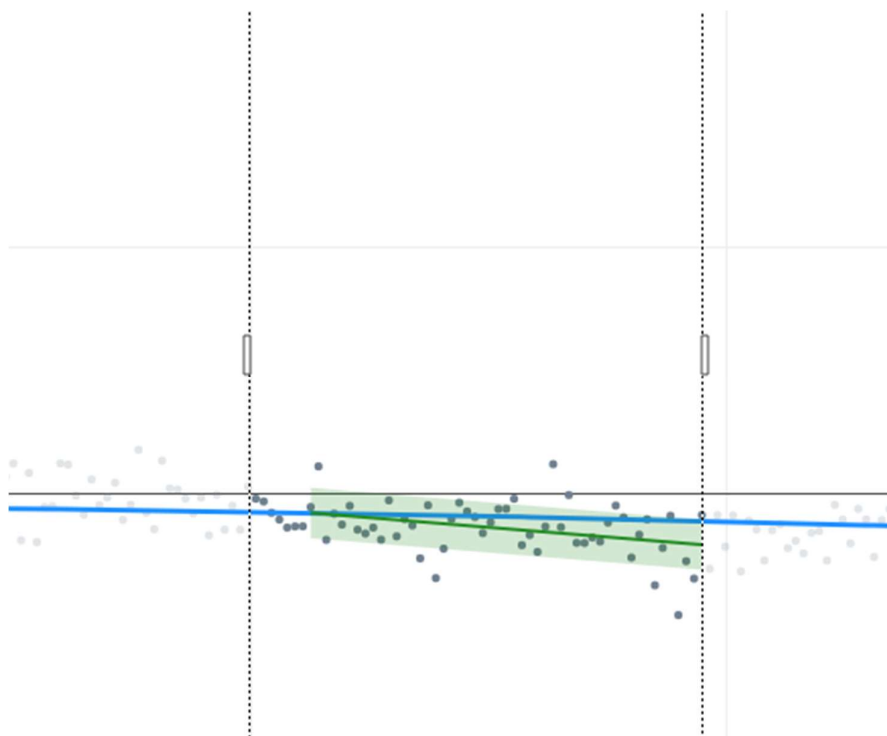
Bij dit portaal is het mogelijk om op de objecten te klikken. Tevens is de ruwe data beschikbaar gesteld. Vanwege de hoge datahoeveelheid van TerraSAR-X zijn alleen de metingen 200 meter rondom de objecten aangeleverd. In de productlagen is de volgende informatie beschikbaar door op een object te klikken:



### Tijdreeks Vergroten

Snelheid	-0.461 mm/y
Ruisniveau	1.4105 mm
Ruimtelijke Score	0.9349
Dekkingsgraad	0.6658
Dekkingskwaliteit	0.7759

Tevens is het mogelijk om de tijdreeks te vergroten en zelf een trendfit te schatten.



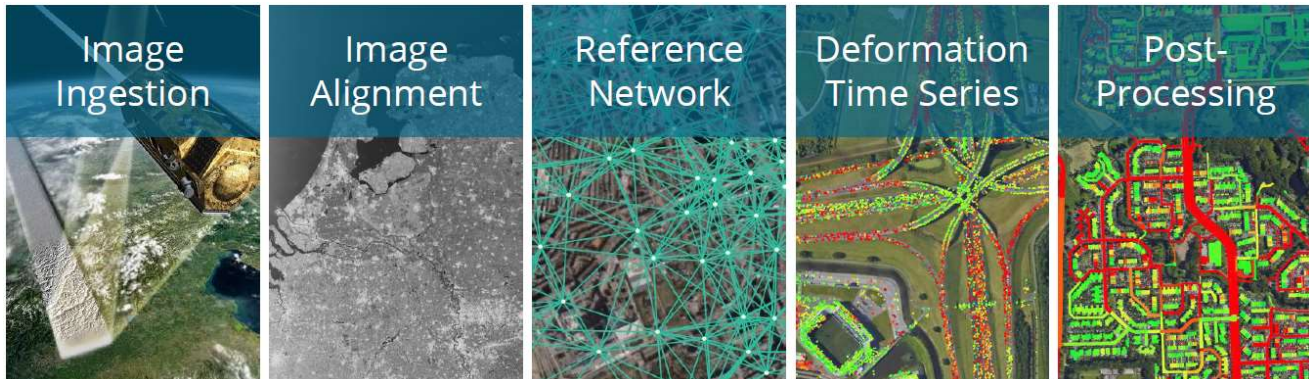
## 4. Gebruikte methodieken

### 4.1 PS/DS-InSAR

In deze paragraaf zullen we de Sensor productieketen op hoofdlijnen beschrijven, alvorens in te gaan op de specifieke processing aanpak en de verwachte nauwkeurigheid. Tot slot lichten we twee algoritmes toe die specifiek door Sensor zijn ontwikkeld en uniek zijn in de markt: Intermittent PS en Optimized DS.

#### 3.1.1. Sensor productieketen

Sensor heeft een eigen productieketen ontwikkeld en doet ook het onderhoud hiervan. Dit stelt ons in staat om binnen de volledige productieketen nieuwe algoritmes te maken en instellingen te veranderen om de resultaten te optimaliseren. Op hoofdlijnen bestaat de productieketen uit 5 stappen (zie **Error! Reference source not found.**).



Figuur 1: De Sensor productieketen met op hoofdlijnen de 5 stappen die doorlopen worden bij elk project.

Bij de *Image Ingestion* worden de satellietbeelden van de verschillende providers automatisch gedownload en toegevoegd aan onze database. We werken met alle verschillende SAR leveranciers. Tijdens de *Image Alignment* 'coregistreren' we de satellietbeelden. Tijdens dit proces worden de beelden met 1/1000<sup>e</sup> van een pixel nauwkeurig op elkaar gelegd. Zo zorgen we ervoor dat de pixels door de tijd heen met elkaar te vergelijken zijn. Vervolgens wordt het *Reference Network* gemaakt op basis van de reflecties met de hoogste kwaliteit in een groot gebied rondom het project. Deze zijn meestal afkomstig van gebouwen en verharde infrastructuur. Het Reference Network heeft een vergelijkbare functie als het referentie netwerk bij waterpassen; alle metingen worden aan dit netwerk opgehangen. Daarna proberen we voor elke pixel een *Deformation Time Series* te genereren op basis van het Reference Network. Als de resulterende kwaliteit hoog genoeg is, wordt deze tijdserie gegenereerd. Dit is de reden dat er doorgaans geen metingen op gras en water beschikbaar zijn. Tot slot verwerken we deze 'ruwe metingen' tot een product in de *Post-Processing*. Hierbij worden de metingen samengesmolten op objectniveau en worden relevante signalen automatisch gedetecteerd. De MOW BrugScan is hier een voorbeeld van.

#### 3.1.2. Processing aanpak - generiek

Hieronder lichten we de specifieke keuzes toe die wij maken tijdens de dataverwerking op het gebied van PS/DS-InSAR. We belichten onder andere de netwerk formatie, de atmosferische correcties, unwrapping, het referentiepunt, topografische correctie, DS, filtering, model fitting en coördinatentransformatie. De aannames en keuzes bij de processing worden tevens toegelicht in een geautomatiseerd 'Processing Report'.

##### Netwerk formatie

Het geodetische netwerk in InSAR is vergelijkbaar met die bij waterpassen. Alle metingen worden opgehangen aan zogeheten 'netwerkpunten' met een hoge kwaliteit en betrouwbaarheid. Bij waterpassen zijn dit de referentiebouten in de lokale kerk. Voor het creëren van het geodetische netwerk gebruiken we een speciale methodiek: very redundant networks. Dit betekent dat we de netwerkpunten op heel veel manieren met elkaar controleren. Dit is alsof je niet naar een referentiebout waterpast, maar naar honderden tegelijkertijd. Het resultaat is een zeer consistent geodetisch netwerk, wat zorgt voor een zeer hoge kwaliteit van metingen. Daarnaast biedt het de mogelijkheid om de analyse vergaand te automatiseren en onafhankelijk te zijn van degene die het project uitvoert. Waar bij conventionele methodieken verschillende netwerken geprobeerd

worden, gebruiken wij rekenkracht om alle mogelijkheden tegelijk te proberen en hierop geautomatiseerd te optimaliseren.

#### Atmosferische correcties

Sensar onderscheidt de deformatie en de atmosfeer door de aanname dat atmosferische ruis ruimtelijke gecorreleerd is, maar in tijd willekeurig is. Per meetreeks wordt er een model geschat (bijv. met een lineaire trend en een seizoenspatroon). Vervolgens wordt de afstand tussen de metingen en de trend beschouwd als ruis. Deze ruis wordt gebruikt voor een ruimtelijke interpolatie (op basis van "Kriging"), waarbij de ruimtelijke correlatie van de ruis gebruikt wordt om de variabiliteit van de atmosfeer in te schatten. Het voordeel van deze methode is dat deze voorspelbaar en efficiënt werkt. Het nadeel is dat er een aanname wordt gemaakt over de beweging van de deformatie en de variabiliteit van de atmosfeer. Deze nadelen zijn voor dit specifieke project echter geen probleem. Een alternatieve methodiek is het gebruiken van weermodellen. Deze is echter alleen van toevoegde waarde bij verwerkingen over afstanden groter dan 100km.

#### Unwrapping

De basis van de InSAR techniek is het meten van faseverschillen. Verschillen in fase zijn eenduidig waar te nemen, zolang ze binnen een halve golflengte blijven tussen twee observatiemomenten. Er ontstaat dus een probleem wanneer de gemeten waarde meer dan een halve golflengte verschilt van de vorige meting. Binnen de InSAR-wereld noemen we dit ambigüiteiten, welke worden ingeschat door een unwrapping algoritme. Dit kan worden vergeleken met het opmeten van een huiskamer met een kleine liniaal; men zal meerdere liniaal lengtes nodig hebben om de totale afmeting te schatten. Het fase signaal bevat naast deformatie ook topografie en ruis (atmosfeer).

Sensar gebruikt een temporele unwrapping methodiek waarbij de relatieve deformatie en topografie tussen twee metingen wordt ingeschat. Dit gebeurt door de deformatiesnelheid (fase als functie van tijd) en de topografische component (fase als functie van geometrie) te schatten. Hieruit volgt onder andere de aanname van een lineair gedrag in tijd. Temporele unwrapping is binnen de PSI-techniek een zeer gangbare methode. Het voordeel van deze methode, in combinatie met het referentienetwerk, is dat het mogelijk is tussenliggende ruis (water, vegetatie) te overbruggen. Doordat meetpunten binnen het referentienetwerk slechts op korte afstand (< 1000 meter) van elkaar liggen, zijn de atmosferische effecten relatief klein en de resultaten daarmee betrouwbaar.

De aanname van lineair gedrag heeft daarnaast grote voordelen: het is voorspelbaar, computatief zeer efficiënt en valide voor het gros van de meetpunten. Ook bij licht non-lineair gedrag (seizoensvariaties, versnellingen, etc.) werkt deze methode afdoende. Bij sterk non-lineair gedrag kan het echter voorkomen dat deze methode tekort schiet. Bij Sensar passen we in de post-processing correcties toe om hiervoor te compenseren.

#### Referentiepunt

Een goed referentiepunt is cruciaal om datasets van verschillende satellieten en/of kijkhoeken met elkaar te kunnen vergelijken. Daarnaast zorgt het ervoor dat datasets reproduceerbaar zijn en onafhankelijk zijn van de engineer die de set produceert.

Sensar maakt gebruik van een geautomatiseerde referentiepuntsselectie op basis van een vaste procedure. Deze procedure bepaalt een betrouwbare datum op basis van een multivariate statistische analyse van een controlegroep die bestaat uit objecten waarvan we statistisch gezien het zettingsgedrag kennen (bijv. gebouwen van na 1970 en voor 2010). Op basis hiervan bepalen we een referentiepunt met een laag ruisniveau en een stabiel gedrag in tijd. In studies uit het verleden hebben we aangetoond dat we met deze methodiek datasets van verschillende oorsprong binnen 0.5 mm/jaar nauwkeurig kunnen iken.

#### Topografische correctie

De ruwe faseverschillen zoals gemeten door de satelliet geven voornamelijk de topografische variaties aan. Dit komt doordat SAR-satellieten nooit precies vanuit dezelfde hoek een opname kunnen maken (de variatie in satellietpositie is meestal <500 meter). Gedurende de unwrapping wordt de topografische component van de deformatie component gesplitst, waardoor er een correctie plaats vindt. Deze topografische component kan



echter makkelijk gescheiden worden door voorkennis toe te voegen middels een DTM (Digital Terrain Model). Hoe beter de DTM, hoe beter de correctie vooraf en hoe kleiner de correctie tijdens de unwrapping. Voor dit project zullen we hiervoor het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II gebruiken. Voor de kalibratie van de hoogte op maaiveld gebruikt Sensar een controlegroep, een selectie van meetpunten met hoge kwaliteit en rondom brede wegen, om vervolgens statistisch te bepalen waar de datum moet liggen.

Hierdoor zullen de uiteindelijk correcties voornamelijk nodig zijn voor objecten als gebouwen en bruggen. Deze correctie is daarmee extra informatie over de hoogte van het meetpunt en kan gebruikt worden als input voor L3-producten.

#### DS

Bij Sensar hebben we een unieke versie van het DS (Distributed Scatterers) algoritme geïmplementeerd. Dit algoritme onthoudt de vorm van de DS-vlakken die gevormd worden. Dit biedt een meer realistische weergave van de werkelijkheid en is essentieel voor het creëren van afgeleide producten. Onze methodiek voor DS wordt verder toegelicht in paragraaf **Error! Reference source not found.**

#### Filtering

Op elke plek in onze verwerkingsketen vinden er filteringsstappen plaats. De meest belangrijke stappen zijn:

- **Pre-filtering** (ook wel kandidatenselectie genoemd). Hierbij worden de meest stabiele reflecties gebruikt voor een PSI-analyse. Voor PS wordt dit gedaan op basis van de consistentie van de amplitude, voor DS wordt dit gedaan middels coherentie.
- **PSI-filtering**. Hierbij worden meetpunten verwijderd op basis van de kwaliteit van het unwrapping-algoritme. Voor bruggen kan het lonen om deze filterstap minder streng te maken om zodoende meer non-lineaire beweging toe te staan voor correcties in post-processing.
- **Geodetische filtering**. Hierbij worden niet alleen metingen gefilterd op ruisniveau, maar ook individuele observaties verwijderd wanneer deze een outlier zijn en/of wanneer het meetpunt gedurende de tijd meer of minder ruis is gaan vertonen (dit kan duiden op een permanente verandering). Voor het ruisniveau filteren wij grofweg op  $1/10^6$  van de golflengte.
- **Product filtering**. Hierbij worden objecten met een slechte dekking en/of kwaliteit gefilterd.

#### Model fitting

Op basis van de tijdserie worden verschillende model parameters geschat per meetpunt. Bij Sensar proberen we de 3 meest voorkomende componenten in te schatten: lineair, kwadratisch en seizoensvariaties (sinus/cosinus o.b.v. jaarfrequentie). Om 'overfitting' te voorkomen, doen we voor elke trendfit een test of het toevoegen van een extra component voldoende meerwaarde biedt ten opzichte van het ruisniveau. Dit noemen we de 'Adaptive Model Fit'. Als een punt zich bijvoorbeeld lineair gedraagt, maar veel ruis bevat, bestaat anders het risico dat je de 'ruis gaat lopen fitten'. De lineaire component wordt altijd ingeschat. Dit resulteert in metingen met:

1. Lineair
2. Lineair + kwadratisch
3. Lineair + seizoenssignaal
4. Lineair + kwadratisch + seizoenssignaal

#### Coördinatentransformatie

We voeren in onze projecten regelmatig coördinaattransformaties uit. Hiervoor gebruiken we de EPSG (PROJ.4) definities en de GEOS-tools om deze transformaties uit te voeren. Deze tools worden breed gebruikt in de GIS-community en zijn voor PSI-data voldoende, omdat de locatienauwkeurigheid in de orde-grootte van meters zit en geavanceerdere transformaties pas toegevoegde waarde hebben bij een locatienauwkeurigheid van centimeters.

### 3.1.3. Processing aanpak – specifiek voor bruggen

Bruggen zijn er in vele soorten, maten en (constructie)types. Sommige bruggen zijn lastig in te meten met InSAR door een grote uitzetting ten gevolge van temperatuur, door de vorm/maat en door de oriëntatie. De eerste twee problemen kunnen we adresseren door een andere type processing aanpak te nemen. Deze zal echter deels



toegespitst moeten worden op de onderhavige brug, wat een uitdaging vormt voor de automatisering. Hiervoor zullen we in gesprek treden met MOW om een classificering van bruggen te maken waarop we onze specifieke aanpak kunnen baseren.

We zien twee mogelijkheden voor het verbeteren van de dekking op bruggen:

1. Het uitfilteren van incidentele verstoringen.
2. Het kiezen van meerdere lokale referentiepunten

Incidentele verstoring zijn gefilterd middels de IPS-methode (toegelicht in 3.1.5). Deze hebben we voor dit project geoptimaliseerd om maximale punt dichtheid te krijgen op de bruggen. De noodzaak voor meerdere lokale referentiepunten bleek niet nodig voor 20 van de 21 bruggen. Het Viaduct van Vilvorde bleek echter een lage dekking te hebben. Dit werd veroorzaakt door een sterke seizoensbeweging van de brug. Deze beweging heeft een piek in de zomermaanden, wat wijst op een sterke relatie met temperatuur en wat voor bruggen geen uitzondering is.

Wij hebben tijdens het project een extra verwerkingsslag uitgevoerd waarbij we gebruik hebben gemaakt van meerdere lokale referentiepunten, een speciaal unwrapping algoritme voor seizoensbeweging en een beta-algoritme om ook incidentele verstoring met DS-metingen te herkennen. Deze verwerkingsslagen mocht echter niet baten, de seizoensdeformatie is dusdanig groot t.o.v. lokale referentiepunten dat deze niet betrouwbaar uit de faseverschillen kan worden afgeleid.

### 3.1.4. Nauwkeurigheid

Onze aanpak leidt tot datasets met een zeer hoge nauwkeurigheid. De exacte nauwkeurigheid per meting zal variëren en is onder andere afhankelijk van het object, de lokale situatie, de weersomstandigheden, het aantal metingen, etc. Per meetreeks communiceren we diverse kwaliteitsparameters over zowel de tijdsreeks als de individuele meetwaarden.

Op basis van studies uit het verleden verwachten we grofweg de volgende nauwkeurigheden te kunnen behalen:

Tabel 1: Grove inschatting van de te behalen nauwkeurigheden met TerraSAR-X en Sentinel-1.

Satelliet	X/Y/Z locatie	Trend (verticaal)	Individuele meting (verticaal)	Trend (horizontaal)	Individuele meting (horizontaal)*
<b>TerraSAR-X</b>	1 - 1,5m	1 mm/jaar	1-4mm	3 mm/jaar	3-12 mm
<b>Sentinel-1</b>	5m	1 mm/jaar	2-8mm	3 mm/jaar	6-24 mm

\* Bij een aanname van de richting van *horizontaal* (zie paragraaf **Error! Reference source not found.**) is deze waarde tevens afhankelijk van de oriëntatie van het object.

De behaalde nauwkeurigheid voor zoveel individuele observaties als voor de trend wordt per meetpunt en meetvlak gecommuniceerd.

### 3.1.5. Intermittent PS (IPS)

Bij Sensor hebben we twee nieuwe, unieke datatypes ontwikkeld op het gebied van PS/DS-InSAR. De eerste hiervan is Intermittent Persistent Scatterers, ofwel IPS. Dit datatype is een verbetering op de standaard PS-algoritmes. Het onderliggende algoritme is in staat incidentele verstoringen te detecteren en eruit te filteren. Voorbeelden hiervan zijn file, openstaande bruggen of kortstondige werkzaamheden. Met IPS worden tot wel 200% extra meetpunten gevonden vergeleken met conventionele PS-algoritmes.

Het algoritme detecteert per pixel en per tijdstap verstoringen en filtert deze eruit. Het resultaat is dat er per meetpunt een verschillende hoeveelheid metingen beschikbaar is in de onderliggende tijdsreeks. IPS heeft twee belangrijke voordelen:

- Grotere beschikbaarheid van meetpunten. Een punt valt niet weg zodra er een (lokale) incidentele verstoringen plaats vindt.

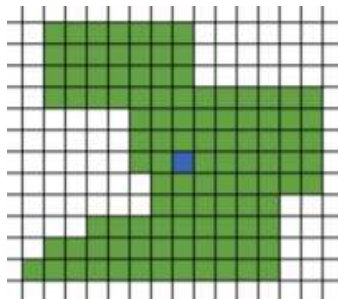


- Hogere kwaliteit van de tijdseries. Door slechte metingen eruit te filteren wordt de algehele kwaliteit van de resulterende tijdserie hoger, waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten wordt vergroot.

IPS werkt tevens voor korte periodes van werkzaamheden. Voor de detectie en correctie van langere periodes van werkzaamheden zien wij mogelijkheden tot de ontwikkeling van een nieuw algoritme. Dit doen we graag samen met de experts van MOW om zo de theorie optimaal aan te laten sluiten bij de praktijk.

### 3.1.6. Optimized DS (ODS)

Het tweede unieke datatype dat we hebben ontwikkeld is Optimized Distributed Scatterers, ofwel ODS. ODS is een verbetering van de conventionele DS-algoritmes. Bij de DS-techniek worden meerdere pixels samengevoegd om zodoende een hogere signaal-ruisverhouding te krijgen. Hierdoor worden ook slechter reflecterende oppervlaktes (bv. wegen) goed zichtbaar. Het gevolg van deze techniek is dat DS-metingen een vlak representeren in plaats van een punt. Conventionele DS-algoritmes gaan hieraan voorbij en gebruiken vaak simpelweg het middelpunt van elk gevonden DS-vlak. Hierdoor is het bij conventionele DS-metingen dus onbekend wat de precieze dekking is, waardoor het resultaat een onjuiste weergave is van wat er ruimtelijk gezien gebeurt. De vorm en grootte van dit vlak kan namelijk allerlei vormen aannemen afhankelijk van de grondbedekking, resolutie en zoekruimte van het algoritme (zie **Error! Reference source not found.**).



*Figuur 2: Voorbeeld van een DS-meting. In conventionele DS-algoritmes wordt het werkelijke DS-vlak (groen) als punt (blauw) gevisualiseerd. Bij Sensor gebruiken we de informatie van de exacte vorm van het DS-meetvlak in onze producten; Optimized DS.*

Bij Sensor's ODS wordt de geometrische vorm – en daarmee ook de grootte - van elk DS-meetvlak onthouden en daarna extra nauwkeurig toegewezen aan geospatieële objecten, zoals bijvoorbeeld bruggen, gridcellen, gebouwen of perceelsgrenzen. Dit zorgt voor een veel realistischere weergave van de onderliggende processen. De visualisatie op objectniveau (bijvoorbeeld de MOW BrugScan) sluit hier perfect bij aan.

### 3.1.7 Intermittent DS

Parallel aan dit project heeft Sensor een uitbreiding op ODS ontwikkeld: Intermittent DS. Hierbij worden dezelfde eigenschappen van ODS behouden, maar is het mogelijk om verstoringen uit te filteren (zoals bij IPS). Dit kan in dynamische locaties met veel bouwwerkzaamheden leiden tot een significante toename in datadichtheid. Dit algoritme was nog niet operationeel tijdens dit project en dus alleen ingezet tijdens extra verwerkingsslagen voor het Viaduct van Vilvorde. Voor de uiteindelijke uitvoeringsfase kunnen wij dit algoritme wel inzetten.

### 3.2.1 MOW BrugScan: GIS-definities

Elke productlaag start met een geospatieële definitie van de objecten, de zogenaamde GIS-definities. Sensor heeft voor de PoC een GIS-workflow gemaakt voor de definitie van bruggen. Dit is gedaan op basis van het aangeleverde databestand van MOW daarin de locaties en vormen van de kunstwerken die zijn geselecteerd voor het PoC. Uiteindelijk zal er per object een tijdreeks beschikbaar worden gesteld.

Bruggen zijn er in alle vormen en maten en satellieten hebben verschillende soorten resoluties. Wanneer een grote brug met een hoge resolutie wordt ingemeten is het nodig deze brug te segmenteren in kleine stukken, terwijl bij het inmeten van een kleine brug met een lage resolutie een risico is op een te weinig detailniveau. Daarom hebben wij een automatisch algoritme ontworpen wat bruggen opknipt in segmenten, waarbij we



onderscheid maken tussen grote bruggen (segmentering in lengte en breedte middels gridcellen), lange bruggen (segmentering in lengte) en kleine bruggen (geen segmentering).

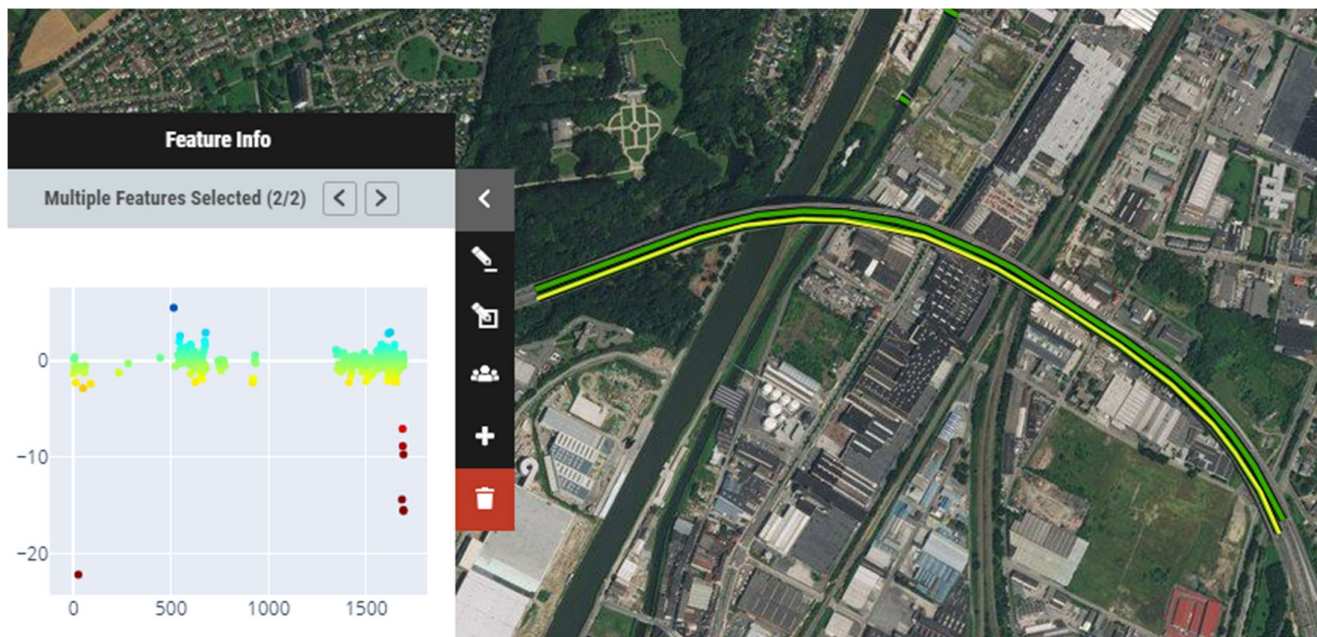
Om de bruggen op te delen maken we gebruik van wegdefinities uit Openstreetmap-data, dit is wereldwijd en consistent beschikbaar, en de door MOW aangeleverde brugdelen. Per brugdeel wordt er gezocht naar de wegdefinitie in Openstreetmap, deze zijn gedefinieerd als lijnen. Vervolgens wordt er gekeken of aangrenzende brugdelen dezelfde weg delen, op basis hiervan kan er 1 weg per brug worden bepaald en kunnen brugdelen aan elkaar worden gekoppeld. De weg wordt vervolgens gebruikt om de brug, per brugdeel, op te delen in segmenten. Bij TerraSAR-X is er gekozen voor segmenten van 3 meter, bij Sentinel-1 voor segmenten van 25 meter. Bij TerraSAR-X worden bruggen breder dan 10 meter onderverdeelt in hexagon-gridcellen, waarbij er dus ook in de breedte informatie beschikbaar komt. Voor Sentinel-1 worden alle bruggen alleen in de lengte gesegmenteerd.

Per segment is er vervolgens een representatieve tijdreeks ingeschat o.b.v. de ruwe InSAR-data. De aangeleverde pijlers en landhoofden zijn als losse objecten beschouwd. Initieel was de insteek om met Sentinel-1 ook een decompositie uit te voeren op de landhoofden, maar hiervoor bleek de resolutie niet afdoende. Deze decompositie kan alleen worden uitgevoerd wanneer er twee stacks beschikbaar zijn en van de objecten verwacht mag worden dat deze horizontaal bewegen. Bij twee stacks TerraSAR-X is dit dus wel mogelijk. Sensor gebruikt een dergelijke aanpak in de binnenstad van Amsterdam



*Figuur 3: voorbeeld in de binnenstad van Amsterdam waar 2 stacks TerraSAR-X gebruikt zijn voor een horizontale decompositie.*

Op basis van de openstreetmap-data kunnen er vervolgens ook profielen worden geproduceerd. Deze zijn momenteel alleen beschikbaar via ons webportal:



### 3.2.1 Ruimtelijke koppeling

Gedurende de ruimtelijke koppeling worden metingen en objectdelen (brugsegmenten, landhoofden, pijlers, etc.) aan elkaar gekoppeld op basis van hun locatie en vorm. In eerste instantie lijkt dit een simpele stap; een meetpunt ligt op het object, of niet. Bij het werken met ruwe InSAR-data zal men echter moeten omgaan met twee complexe elementen:

#### 1. 3D geolocatie

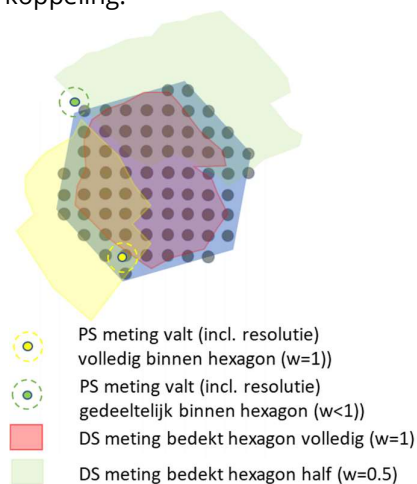
Elke meting heeft een 3D-locatie (X/Y/Z), maar deze is slechts met een bepaalde nauwkeurigheid af te leiden, afhankelijk van de resolutie en opnamegeometrie. De resolutie van Sentinel-1 is daarnaast asymmetrisch (4x20 meter) waardoor de relatie tussen reflectie en geolocatie complex is.

Daarnaast is de hoogteschatting van belang, omdat deze mede gebruikt wordt voor de locatiebepaling in de range richting. Afhankelijk van de satelliet (TerraSAR-X of Sentinel-1) zal de standaardafwijking van de hoogte 1 tot meerdere meters omvatten en afhankelijk zijn van de kwaliteit van het meetpunt zelf. Een extra factor is dat er voor de PS-data gebruik wordt gemaakt van oversampling van de amplitude om een nauwkeurige locatie te vinden. Dit leidt bij sterke reflecties tot een verbetering, maar zal bij zwakke reflecties leiden tot een willekeurige positie binnen de pixel. Kortom, de nauwkeurigheid van de geolocatie verschilt per meting en per satelliet. Hiermee zal omgegaan moeten worden.

#### 2. Verschil tussen meetpunten (PS) en meetvlakken (DS)

Er zit een fundamenteel verschil tussen de PS-metingen en de DS-metingen. PS-metingen zijn puntmetingen, bestaande uit 1 enkele pixel en zijn (meestal) toe te leiden tot 1 individuele reflectie. DS-metingen zijn vlakmetingen, bestaande uit meerdere vergelijkbare pixels en daarmee representeren ze de gedeelde component van de onderliggende pixels. PS is daarmee geoptimaliseerd voor de beste resolutie, DS is geoptimaliseerd voor de beste signaal-ruis-verhouding. Voor de ruimtelijke koppeling betekent dit dat men PS-punten fundamenteel anders moet behandelen dan DS-vlakken.

Sensar gebruikt voor de ruimtelijke koppeling een algoritme dat niet alleen de 3D locatie (X/Y/Z) meeneemt, maar ook de nauwkeurigheid, de kwaliteit en het meettype afweegt (zie **Error! Reference source not found.**). Sensar maakt hiervoor gebruik van 3 metrics om dit te bepalen: dekkingsgraad, homogeniteit (ruimtelijke spreiding) en ruimtelijke score. De dekking en homogeniteit hebben betrekking op de relatie tussen metingen en object, de ruimtelijke score heeft betrekking op de relatie tussen object en meting ("in hoeverre is deze meting representatief voor dit object?"). De ruimtelijke score wordt vervolgens gebruikt om niet representatieve metingen te filteren, maar ook als weging in de temporele koppeling.



Figuur 4: Voorbeeld van de ruimtelijke koppeling waarbij het object (de blauwe hexagon) wordt gedekt door PS en DS-metingen. Op basis van de dekkingsgraad, homogeniteit en ruimtelijke score wordt er een weging toegekend aan elke meting.

De metrics worden ingeschat door de vorm en locatie van PS- en DS-metingen te gebruiken. De ruimtelijke score van PS-metingen is gebaseerd op de locatie en locatienauwkeurigheid. Voor de DS-metingen wordt gekeken welk

percentage van de meting binnen het object ligt. Vanwege de grote hoeveelheid meetpunten en objecten maken we gebruik van een lokaal sampling-grid per object, dat schaalt met de beschikbare resolutie.

Verwacht mag worden dat deze koppeling geen deterministisch resultaat kent, maar slechts de best mogelijke inschatting is op basis van de nauwkeurigheid van de geolocalisatie. Sensar biedt de mogelijkheid om – onder bepaalde aannames – een verdere selectie toe te passen middels een adaptieve clustering. Hiervoor worden, per object, de geselecteerde meetpunten geclusterd op basis van eigenschappen, zoals snelheid, seizoenspatronen, etc. Vervolgens kan een cluster worden geselecteerd op basis van grootte, hoogte of gedrag. Hierdoor is het mogelijk om een homogene selectie van meetpunten te forceren. Het gebruik hiervan is echter wel sterk afhankelijk van het type object. We bespreken dit dan ook graag met de experts van MOW alvorens het algoritme toe te passen.

Uit de ruimtelijke koppeling volgen een aantal kwaliteitsparameters per objectdeel: een dekkingsgraad, een homogeniteit en een ruimtelijke score per meting. Hiermee is het ook mogelijk om eisen te stellen aan de dekking van objecten en een filtering toe te passen. De ruimtelijke score kan worden gebruikt als weging voor de temporele koppeling.

### 3.2.2. Temporele koppeling

Wanneer de metingen ruimtelijk gekoppeld zijn (m.a.w. ze dekken hetzelfde object), kunnen de tijdsreeksen worden samengevoegd. Hierin zijn twee aanpakken mogelijk:

#### 1. Temporele verweving (aggregatie)

Bij het verweven, ook wel bekend als aggregatie, worden per object alle metingen uit alle stacks samengevoegd tot 1 representatieve reeks. Hierbij wordt aangenomen dat er louter beweging in de verticale richting is. In eerste instantie wordt er per stack een gemiddelde tijdreeks berekend. Hierbij worden de individuele metingen gewogen o.b.v. hun ruimtelijke score en hun kwaliteit (bijvoorbeeld de RMSE).

In het geval van Sentinel-1 (2 stacks beschikbaar) worden hierna de metingen uit de verschillende stacks in elkaar verweven om zo een enkele tijdreeks te vormen. Hiervoor worden de tijdreeksen op elkaar uitgelijnd door een gemiddelde per tijdvak te bepalen. Tevens wordt er een check gedaan of de verschillende stacks wel vergelijkbare tijdreeksen hebben, om te voorkomen dat er twee verschillende signalen worden gemixt. Bij meerdere signalen wordt er gekozen voor het meest voorkomende signaal of, bij een gelijkspel, het kwalitatief beste signaal. De redenen voor verschillende signalen zijn horizontale beweging, interne verschillen binnen het object of een foutieve ruimtelijke koppeling. De afgewezen stacks worden, per object, gecommuniceerd.

#### 2. Temporele 2D Decompositie

Temporele 2D Decompositie is alleen mogelijk als er meerdere stacks beschikbaar zijn. Dit is het geval bij de Sentinel-1 dataset. Bij de decompositie worden de metingen ontleed in een horizontale en verticale component. Deze aanpak is aanzienlijk complexer dan de verweving, omdat hierbij een geodetisch model gebruikt wordt om twee tijdreeksen te schatten o.b.v. een meetreeks per stack.

Elke meetreeks heeft een unieke opnamegeometrie en unieke opnamemomenten. De opnamegeometrie bestaat uit de vliegrichting ( $\alpha$ ) en invalshoek ( $\theta$ ), en daarmee de meetrichting van elke meting ("line-of-sight"). De relatie tussen de gemeten beweging in 'line-of-sight' en een 3D vector,  $d_E$  (oostelijk),  $d_N$  (noordelijk) en  $d_U$  (omhoog), kan worden beschreven middels:

$$d_{LOS} = d_U \cos \theta - d_E \sin \theta \cos \alpha + d_N \sin \theta \sin \alpha$$

Hierbij is de noordelijke beweging feitelijk niet te meten door de inclinatie van de huidige satellietconstellaties. Deze wordt daarmee vaak buiten beschouwing gelaten ( $d_N = 0$ ). Middels de kleinste kwadratenmethode kunnen de vectoren worden ingeschat ('decompositie'). Wanneer er te weinig stacks beschikbaar zijn voor een decompositie, bijvoorbeeld alleen meetpunten uit een ascending stack, kan er een back-up strategie worden toegepast door aan te nemen dat de horizontale of verticale component nul is.



Deze decompositie zal per tijdstap worden uitgevoerd. Deze tijdstappen zijn echter anders per stack en vergt daarvoor dus een extra verwerkingsstap. Wij beschikken over twee methodes: een gemiddelde per tijdvak (bijv. per week/per maand), of een interpolatie, waarbij de eerste vaak de voorkeur heeft vanwege de eenvoud en de hoge opnamefrequentie van Sentinel-1. Voor dit project stellen we voor een gemiddelde per twee weken aan te houden.

Tevens is mogelijk om, voor specifieke objecten, een directieve aanname te maken over de richting van de horizontale beweging (bijvoorbeeld loodrecht op het landhoofd). Hierbij is het ook mogelijk om de gevoeligheid van deze directieve aanname te toetsen, om zodoende per oriëntatie andere aannames te maken, bijvoorbeeld wanneer deze ongunstig (noordelijk/ zuidelijk) georiënteerd is.

De kwaliteit van deze decompositie kan op meerdere manieren worden geduïd. We leveren hiervoor per object 1) de gemiddelde afwijking per meetstap, 2) gemiddelde nauwkeurigheid per meetstap en 3) de theoretische gevoeligheid o.b.v. de oriëntatie van de beweging. Deze worden bepaald op basis van het aantal metingen, de kwaliteit en het onderliggende model. In de gebruikershandleiding zullen we aangeven hoe deze parameters gebruikt kunnen worden.

De uitkomst van een temporele decompositie is fundamenteel anders dan bij de temporele verweving. De beschikbare tijdreeksen zijn schattingen o.b.v. de onderliggende observaties en zijn geen directe observaties meer. We willen graag met MOW en haar gebruikers een hybride methode verkennen, waarbij er voorafgaand aan de temporele koppeling gecheckt wordt of een decompositie noodzakelijk is voor het onderhavige object. Zo blijven we dicht bij de oorspronkelijke metingen, indien mogelijk.

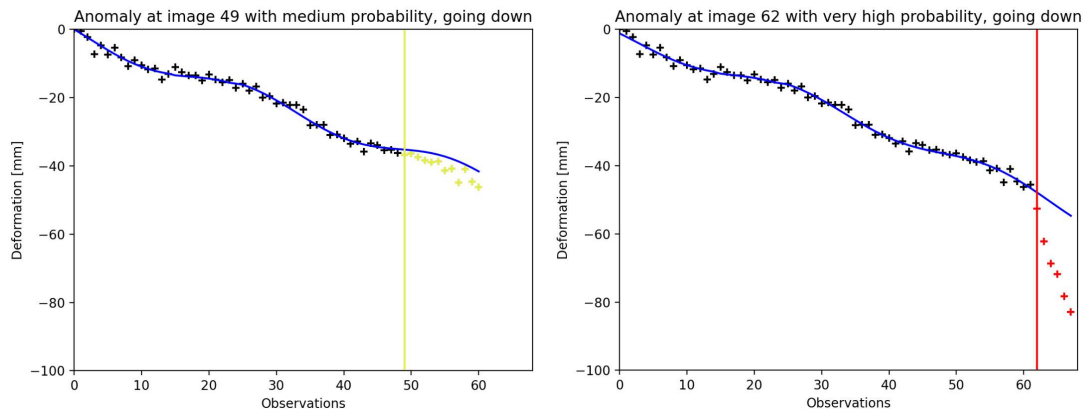
Voor alle objecten zal er vervolgens een verticale en/of horizontale tijdreeks beschikbaar zijn, waarover wij een trend-fit kunnen uitvoeren (lineaire snelheid, seizoenssignalen, etc.). Om overfitting te voorkomen maken we gebruik van een adaptieve modelfit, gebaseerd op BIC-scores. Zo worden alleen de relevante modelcomponenten ingeschat. De resulterende parameters kunnen dan gebruikt worden om weer te geven in het GIS-portaal en in de dataset.

### 3.2.3. Detectie-analyse

InSAR-deformatiereeksen worden meestal gevisualiseerd middels het kleuren van hun lineaire snelheid. Er zijn echter nog veel meer signalen te ontdekken in de deformatiereeksen. Voorbeelden hiervan zijn de periodiciteit en de versnelling, maar ook afwijkende trends of trendbreuken. Daarnaast is voor het ene object een snelheid van 3 mm/jaar geen probleem, waar dit voor het andere object wel een probleem kan zijn. Dit soort zaken kunnen gedetecteerd worden door het markeren van objecten die (mogelijk) afwijkend of interessant gedrag vertonen. Hiervoor zullen we 3 methodes toepassen:

1. Drempelmarkeringen  
Drempelmarkeringen worden gebruikt voor het markeren van objecten/objectdelen die bewegingen (lineair, maar ook kwadratisch of periodiek) vertonen die hoger zijn dan verwacht mag worden. Deze zullen we per objecttype en use case vaststellen in samenwerking met MOW.
2. Overgangsmarkeringen  
Overgangsmarkeringen worden gebruikt voor het markeren van sterke verschilzetting, zoals bijvoorbeeld hard-zacht overgangen tussen wegdelen en kunstwerken. Hiervoor zullen we per use case vaststellen welke waardes hier relevant voor zijn.
3. Afwijkingsmarkeringen  
Afwijkingsmarkeringen worden gebruikt voor het markeren van tijdreeksen die recent zijn gaan afwijken (zie **Error! Reference source not found.**). Sensor gebruikt hiervoor een algoritme dat de waarschijnlijkheid van nieuwe metingen berekent op basis van het ruisniveau en het historische gedrag, waarbij ook periodiciteit meegenomen wordt. Om deze detecties een significantie mee te geven, communiceert het algoritme de onwaarschijnlijkheid van de gevonden tijdsreeks ten opzichte van het verleden om zo onderscheid te maken tussen zekere en minder zekere markeringen. De significantie van deze markeringen zal uitgedrukt worden in de kleur van de marker op de kaart.





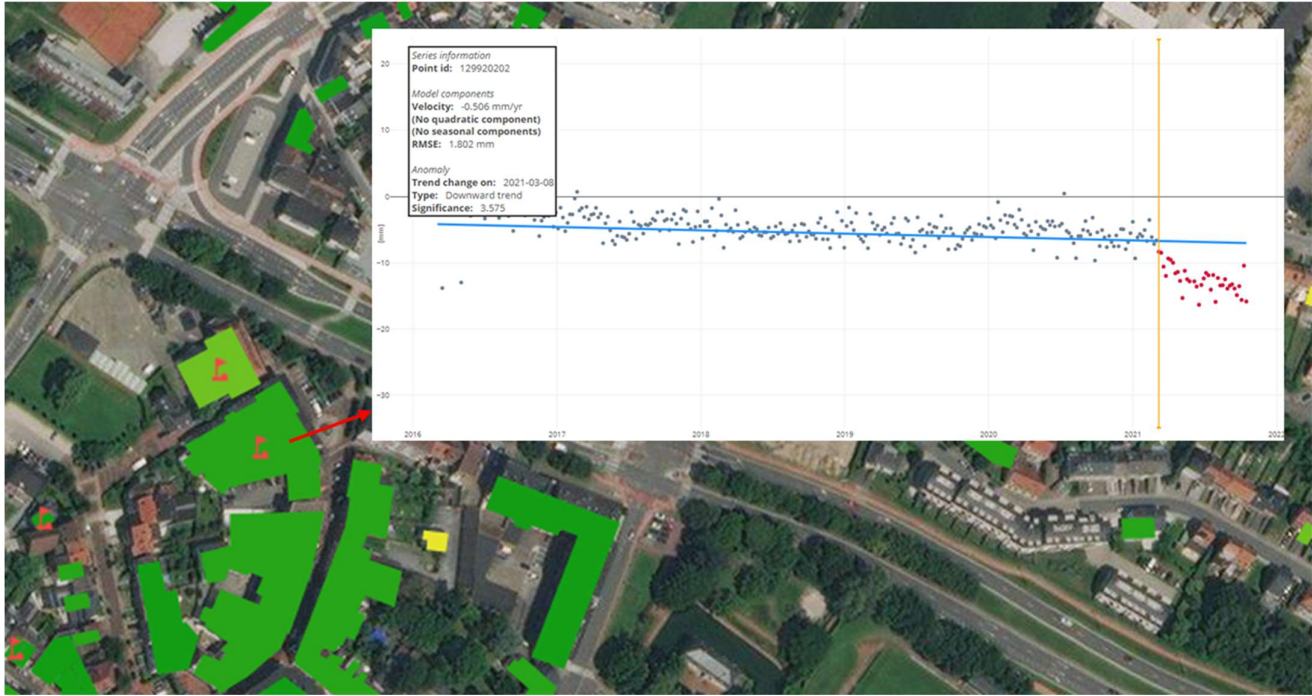
Figuur 5: Impressie van het algoritme om veranderingen in de meetreeks te detecteren. Links: 'gele detectie' – middelmatige waarschijnlijkheid, rechts hetzelfde object een tijd later: 'rode detectie' – zeer hoge waarschijnlijkheid.

Voor het Proof-of-Concept hebben wij de afwijkingsmarkeringen doorontwikkeld en getest. Voor de afwijkingsmarkeringen is het belangrijk om gedurende een langere periode een uitgangssituatie op te bouwen voordat afwijkingen betrouwbaar kunnen worden bepaald. Wij zien echter dat een betrouwbare kwaliteit pas behaald wordt na minimaal 60 beelden verspreid over minimaal 2 jaar, pas dan kunnen seizoenspatronen en ruisniveau's nauwkeurig bepaald worden. Typisch controleren we alleen de laatste periode van de tijdreeks op afwijkingen (max 20%), omdat recente veranderingen het meest interessant zijn voor interventies. Deze hebben wij alleen voor Sentinel-1 aangeleverd, omdat ze hierbij het beste tot hun recht komen. Bij TerraSAR-X is de tijdreeks te kort om deze afwijkingen betrouwbaar te rapporteren.

De significantie van dergelijke detecties is echter belangrijk. Een meetpunt met weinig ruis maakt het mogelijk om kleinere afwijkingen te herkennen of sterke afwijkingen sneller te herkennen. Hiervoor maakt Sensor gebruik van zogenaamde sigma-factoren. Dit wil zeggen dat een significantie van 1 aantoont dat de afwijking ongeveer 1 standaardafwijking relevant is. De onderstaande tabel laat de kansen zien dat dergelijke afwijkingen optreden zonder daadwerkelijke afwijking:

$\sigma$	Betrouwbaarheid
$1\sigma$	84.13%
$1.5\sigma$	93.32%
$2\sigma$	97.73%
$2.5\sigma$	99.38%
$3\sigma$	99.87%
$3.5\sigma$	99.98%
$> 4\sigma$	100% (almost)





Figuur 6: Voorbeeld van een detectie met Sentinel-1 met een significantie van 3.5. Dit geeft dus een vertrouwen van 99.98% dat deze afwijking daadwerkelijk plaats vindt.

## 5. TerraSAR-X vs Sentinel-1

### Inleiding

Voor het monitoren van bruggen middels InSAR-deformatiemetingen zijn er verscheidene bronnen beschikbaar. Wereldwijd is er gratis Sentinel-1 data beschikbaar, maar er zijn ook commerciële alternatieven, zoals TerraSAR-X, Cosmo-Skymed en RadarSAT-2. Om voor toekomstige monitoring een gegronde keuze te maken heeft MOW gedurende de PoC-fase hoge resolutie TerraSAR-X data beschikbaar gesteld. De TerraSAR-X data is gedurende deze fase vergeleken met Sentinel-1 data.

### Theoretische vergelijking

De voornaamste verschillen tussen SAR-satellietdata hebben te maken met

1. de satellietmissie, deze bepaald de opnamefrequentie en hoogtegevoeligheid (dit heeft een relatie met de variaties van de satellietbaan), etc.
2. het instrument, deze bepaald op welke golflengte er wordt opgenomen, wat weer invloed heeft op de resolutie en het type reflectie. Daarnaast heeft ieder instrument z'n eigen range aan opnamemodi.
3. de operationele inzet. Dit wordt voornamelijk bepaald door het ruimteagentschap of commerciële partij die de satelliet in beheer heeft. Deze partijen maken ook strategische keuzes over de opnamemodus, opbouw van het historisch archief en de beschikbaarheid van de data. Zo kiest ESA ervoor om met een lage resolutie de hele wereld hoogfrequent in beeld te brengen, terwijl Airbus ervoor kiest om alleen kleine stukken in kaart te brengen met hoge resolutie.

In tabel ... staan de belangrijkste verschillen overzichtelijk weergegeven.

Eigenschap / bron	TerraSAR-X T48	Sentinel-1 T37	Sentinel-1 T88
Tijdspanne	13/06/2014 – 23/03/2016	07/03/2016 - 19/10/2021	10/01/2016 - 16/10/2021
Resolutie	3x3 meter	4x20 meter	4x20 meter
Opnamefrequentie	11-daags*	6-daags*	6-daags*
Aantal beelden	52	317	315
Golflengte	31 mm (X-band)	55 mm (C-band)	55 mm (C-band)
Vliegrichting	Descending (N -> Z)	Descending (N -> Z)	Ascending (Z -> N)
Hoogtegevoeligheid	Hoog	Laag	Laag
Meetresultaten			
Aantal PS-metingen	2,458,553	312,058	224,683
Aantal DS-metingen	3,435,041	7,920	6,653
Ruisniveau PS	1.83 mm	4.56 mm	3.94 mm
Ruisniveau DS	1.42 mm	4.38 mm	3.62 mm

\*mediane opnamefrequentie

### Het temporele domein

Kort samengevat kan men stellen dat Sentinel-1 uitblinkt voor temporele domein (veel opnames) en TerraSAR-X in het ruimtelijke domein (veel detail). Als vuistregel kan worden aangenomen dat de theoretisch maximale deformatie een kwart van de golflengte is. Dit komt we feitelijk een halve golflengte hebben om te meten (het signaal gaat heen en terug) en het je voor phase-unwrapping een halve omwenteling aan marge moet hebben. Dit zorgt ervoor dat we bij TerraSAR-X zo'n 7,7 mm tussen twee opeenvolgende metingen kunnen meten, bij Sentinel-1 is dit 13,8 mm. Met een meetfrequentie van 11 dagen maakt dit dat theoretisch zo'n 255 mm per jaar kunnen meten met TerraSAR-X en zo'n 840 mm per jaar met Sentinel-1. Overigens zijn deze limieten alleen van belang t.o.v. van andere punten en is het wel mogelijk om met een geodetisch netwerk sterkere deformatie te meten dan deze grenswaardes. Deze limieten zijn daarom vooral relevant voor lokale deformatie.

Deze theoretische waardes zijn echter zonder de aanwezigheid van ruis en onder de aanname van een constante lineaire snelheid. Praktisch gezien liggen deze waardes vaak een factor 4-5 lager, maar zijn de verhoudingen tussen TerraSAR-X en Sentinel-1 wel constant. Met Sentinel-1 kan men dus verwachten dat de



maximale deformatie 3x hoger ligt dan met TerraSAR-X. Daarentegen kan men verwachten dat het ruisniveau van TerraSAR-X grofweg een factor 2 lager ligt dan bij Sentinel-1, voornamelijk door de kortere golflengte.

Bij de alarmeringen heeft Sentinel-1 in deze vergelijking een groot voordeel. Voor TerraSAR-X hebben we namelijk maar 52 beelden in minder dan 2 jaar en daardoor kan er geen betrouwbare detectiekwaliteit worden behaald. Bij Sentinel-1 kan er verder worden teruggekeken voor veranderingen en is de uitgangssituatie beter in kaart gebracht. Voor alarmeringen is er bij deze vergelijking dus een sterke voorkeur voor Sentinel-1. Als er meer beelden van TerraSAR-X worden ingekocht valt dit voordeel echter weg.

#### Het ruimtelijke domein

TerraSAR-X heeft een aanzienlijk hogere resolutie: 3x3 meter versus 4x20 meter: bijna een factor 9. Het is iets te kort door de bocht door te stellen dat TerraSAR-X dus 9x meer metingen zou moeten opleveren, dit is ook afhankelijk van de golflengte en de reflectiekenmerken. Een radarpixel een som van alle reflecties binnen deze pixel, waarbij de sterkste reflectie het signaal van de pixel domineert. Bij een hogere resolutie mag worden verwacht dat er minder reflecties zijn binnen 1 pixel en daardoor kan worden gesteld dat deze pixels minder ruis bevatten, alsmede meer zwakkere reflecties toelaten. Dit is vooral relevant bij gebouwen en maaiveld, een gebouw zal namelijk een pixel domineren vanwege de reflecties die de hoeken van het gebouw veroorzaken. Dit maakt dat Sentinel-1 in de buurt van gebouwen waarschijnlijk minder goed het omliggende maaiveld kan meten. Hierdoor mag worden verwacht dat TerraSAR-X een hogere meetpunt dichtheid gaat halen dan de factor 9.

Er is echter ook een ander fenomeen, namelijk de golflengte. Een reflectie wordt veroorzaakt door objecten die even groot of groter zijn dan de golflengte. Dit betekent dat TerraSAR-X meer reflecties gaat ontvangen dan Sentinel-1, voornamelijk in straten met klinkers en bij huizen met dakpannen zien wij dit verschil. Ook is TerraSAR-X aanzienlijk gevoeliger voor zeer absorberend asfalt beton (ZOAB) dan Sentinel-1. Dit heeft echter ook een nadeel, alle takjes, blaadjes en andere kleine objecten leveren aanzienlijk meer ruis op in het TerraSAR-X beeld. Wij zien dus ook vaak dat in gebieden met veel vegetatie, TerraSAR-X een lagere meetpunt dichtheid haalt.

Als laatste zien we dat specifiek voor de DS-metingen, er ook sprake is van een dimensie-effect. DS-metingen bestaan uit gegroepeerde pixels met vergelijkbaar gedrag, zoals asfalt. De dimensies van het asfalt in de stedelijke omgeving is echter niet onbeperkt, dit beperkt zich meestal tot tientallen meter in de breedte. Bij Sentinel-1 is het daarom lastig om voldoende burens te vergaren voor DS-metingen, de vlakken zijn simpelweg niet groot genoeg. Dit maakt dat het percentage DS-metingen in Sentinel-1 altijd erg laag is vergeleken met TerraSAR-X.

#### Hoogtescheiding

De ruwe InSAR-metingen bevatten naast deformatiemetingen ook hoogtemetingen. Deze nauwkeurigheid hangt af van de resolutie, golflengte, de kwaliteit van het meetpunt en de satellietbaan. Een satellietbaan met een krappe baan (dus weinig variaties) zorgt voor een lagere gevoeligheid voor hoogte. Sentinel-1 heeft zo'n krappe baan en heeft daarom een veel lagere gevoeligheid voor hoogte dan TerraSAR-X. Bij TerraSAR-X zit deze nauwkeurigheid in rond een meter, bij Sentinel-1 rond de 5 meter.

Een nauwkeurige hoogte maakt het mogelijk om een betere scheiding tussen maaiveld en gebouwen/infrastructuur te maken.

#### Samenvattend

TerraSAR-X is beter geschikt voor het meten van langzame processen met een hoog detailniveau dan Sentinel-1, maar Sentinel-1 is weer beter geschikt voor dynamische processen met een lager detailniveau. Afhankelijk van de toepassing en het beschikbare budget zal dit moeten worden afgewogen door de gebruiker. Uit de workshop hebben wij gehaald dat er bij bruggen een sterke behoefte is voor beide componenten: van sommige bruggen mag worden verwacht dat er een sterke (seizoensgebonden) beweging plaats vindt, maar er is ook zeker behoefte om dit op een hoog detailniveau in kaart te brengen.

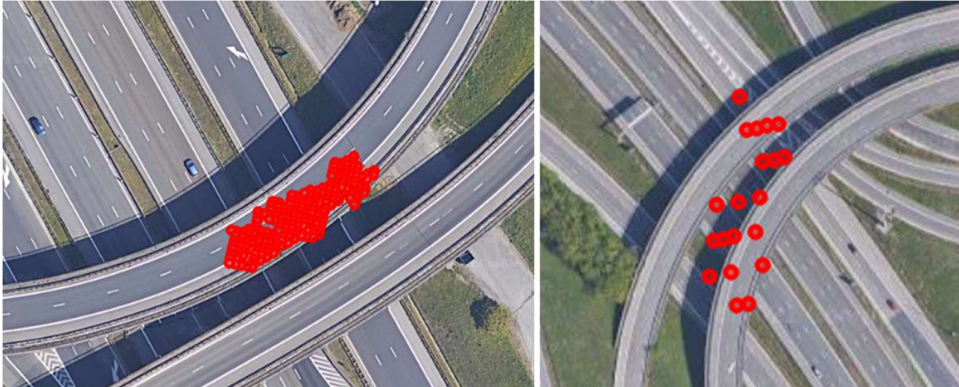


## De praktijk

### Statistische vergelijking

Tijdens deze PoC is er gebruik gemaakt van 1 stack TerraSAR-X en 2 stacks Sentinel-1. Wanneer wij kijken naar de onderliggende L2-data zien wij gelijk een interessante statistiek. Kijkend naar de verhouding tussen de PS-metingen van de TerraSAR-X stack en de Sentinel-1 stacks, dan zien we dat dit rondom de factor 9 zit. Hierbij zien we waarschijnlijk een combinatie van de effecten zoals eerder beschreven. Tevens zijn bij TerraSAR-X relatief veel DS-metingen vergeleken met PS-metingen (ongeveer 140% t.o.v. PS), bij Sentinel-1 is dit omgedraaid en zien we, zoals verwacht, heel weinig DS-metingen (ongeveer 2% t.o.v. PS). Hierbij moet worden opgemerkt dat er bij TerraSAR-X de DS-metingen relatief veel overlappen en dus vrijwel identiek zijn.

Een goed van het verschil tussen beide vlakken is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Twee DS-metingen, links is een TerraSAR-X meting, rechts een Sentinel-1 meting. In conventionele DS-algoritmes is alleen het middelpunt zichtbaar.

Daarnaast is het ruisniveau grofweg een factor 2 hoger bij Sentinel-1 dan bij TerraSAR-X, zoals verwacht. Overigens is het ook interessant om het aantal observaties te vermenigvuldigen met het aantal observaties in tijd. In dat geval zijn er bij TerraSAR-X grofweg zo'n 300 miljoen datapunten beschikbaar, waarbij dat bij Sentinel-1 neerkomt op 350 miljoen meetpunten. De datasets bevatten dus grofweg evenveel data, de vraag is natuurlijk of ze evenveel informatie bevatten.

### Invloed op L3-producten.

Bij onze level-3 producten nemen we de resolutie van de satelliet mee in de kwaliteitsbeoordelingen. Dit komt voornamelijk terug in het berekenen van de ruimtelijke relatie tussen meting en object, oftewel, in hoeverre zegt een meting iets over het object. Een klein schuurtje is met hoge resolutie vele malen beter te meten dan met een lagere resolutie, maar bij een grote loods is dit verschil minder relevant. Zoals eerder uitgelegd in 3.2.2 berekenen we de score van PS door de afstand tot het object te bepalen en bij DS door het percentage pixels binnen een object uit te rekenen.

Voor elke productlaag kunnen wij een andere ondergrens opgeven voor deze score. Bij een lage ondergrens zullen er meer metingen worden meegenomen en dus zullen meer objecten worden gedekt, maar wel met metingen die minder relevant zijn. Bij een hoge ondergrens is dit effect andersom: minder metingen, lagere dekking maar wel meer relevantie. Wij verwerken op deze manier de (soms asymmetrische) resolutie van de satelliet in het product, zodat het voor gebruikers duidelijk is welke objecten gedekt worden en in hoeverre dit representatief is.

Sommige objecten hebben een vooraf vastgestelde contour, zoals bijvoorbeeld panden. Voor de gridcellen en de segmentering van de bruggen is dit echter variabel en kan er dus ook worden gespeeld met de objectgrootte van deze segmenten. Bij TerraSAR-X hebben we gebruik gemaakt van kleinere segmentering (3 meter), bij Sentinel-1 hebben we deze segmenten op 25 meter bepaald. Een grotere segmentatie zou leiden tot minder detailniveau, terwijl bij een kleinere segmentatie de metingen waarschijnlijk onder de ondergrens zouden vallen.

Typisch gebruiken wij voor gebouwen een ondergrens van 30%, terwijl we voor maaiveldmetingen zo'n 10% aanhouden. Voor kunstwerken verwachten wij dat het belangrijk is om metingen te gebruiken met een sterke relatie tot het object. Daarom hebben wij ook een drempelwaarde van 30% gebruikt voor de kunstwerken.

Dit heeft vooral effect op de landhoofden en pijlers, welke we met Sentinel-1 niet voldoende accuraat kunnen inmeten. Omdat dit objecten zijn met een vaste contour, kunnen we ze ook niet grover indelen. Dit maakt dat het ook niet mogelijk is geweest om de landhoofden onder te verdelen in horizontale en verticale beweging. Dit laat duidelijk zien dat de resolutie van Sentinel-1 gevolgen niet in staat is om objecten met elke resolutie in te meten.



*Figuur 7: Links een kunstwerk gemeten met TerraSAR-X, rechts met Sentinel-1. Deze productlagen zijn dynamisch en worden o.b.v. de beschikbare resolutie gesegmenteerd.*



*Figuur 8: Links een kunstwerk gemeten met TerraSAR-X, rechts met Sentinel-1. Deze productlagen zijn statisch (vaste contouren) en hier zakt de dekking van kleine objecten bij een lagere resolutie.*

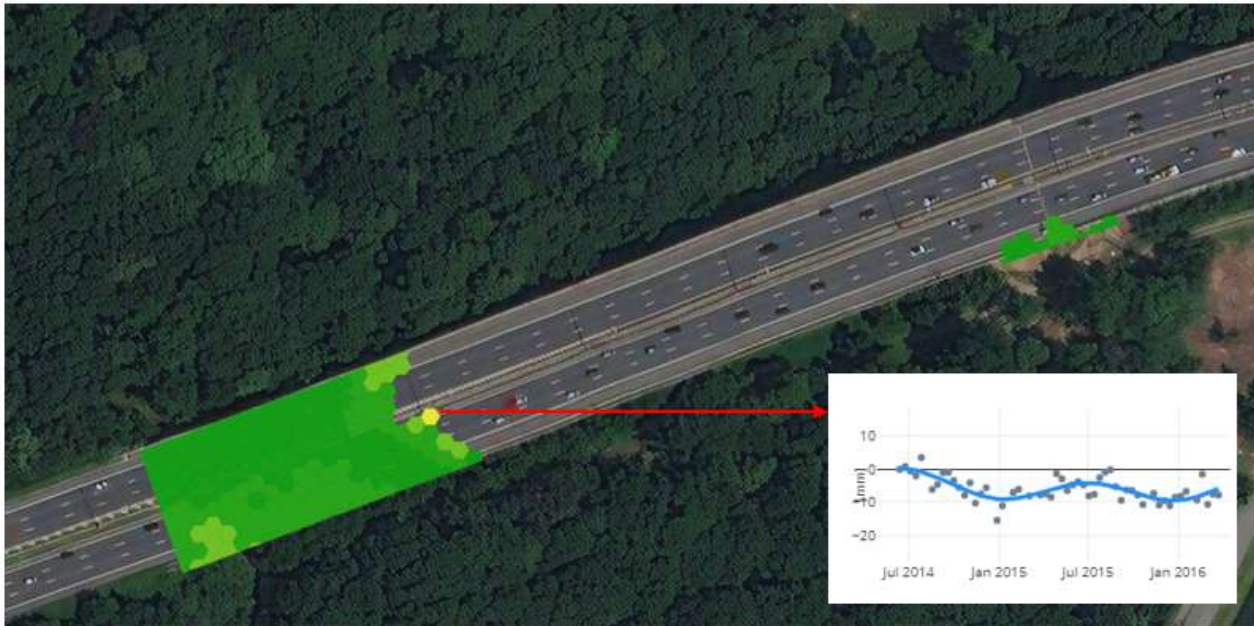
#### Vergelijking deformatie

Het vergelijken van de deformatie is erg lastig met de beschikbare sets, omdat er slechts een hele korte periode aan overlap is. We zien in het gebied ten noorden van het Viaduct van Vilvorde wel een groot verschil tussen de



gebouwen in TerraSAR-X en Sentinel-1. Dit zou echter verklaarbaar zijn door bouwwerkzaamheden of dergelijke. Wanneer wij kijken naar stabiele gebouwen, zien we dat de datasets eenzelfde snelheid laten zien.

Wat wel opvalt is dat Sentinel-1 meer dekking heeft op het Viaduct van Vilvorde, voornamelijk op plekken waar een sterke seizoensdeformatie is. Dit kan verklaard worden door de grotere goflengte maar ook de hogere opnamefrequentie. Met Sentinel-1 is er echter ook geen volledige dekking van het Viaduct mogelijk.



*Figuur 9: De westkant van het Viaduct van Vilvorde met TerraSAR-X. Duidelijk zichtbaar dat er weinig TerraSAR-X metingen beschikbaar zijn, vanwege de sterke seizoensbeweging.*



*Figuur 10: De westkant van het Viaduct van Vilvorde met Sentinel-1. Duidelijk zichtbaar dat er meer Sentinel-1 metingen beschikbaar zijn, maar nog het viaduct niet volledig dekken. Wel duidelijk zichtbaar is dat Sentinel-1 de seizoensbeweging beter in kaart kan brengen.*

### Conclusie en advisering

Het gebruik van Sentinel-1 vs TerraSAR-X is een keuze tussen resolutie, opnamefrequentie en kosten. TerraSAR-X is zeer geschikt voor infrastructuur vanwege het hoge detailniveau – grofweg een factor 10 beter - maar komt



bij bruggen tekort als er een sterke (seizoens)deformatie plaats vindt. Dit is echter, op de kosten na, eigenlijk het enige nadeel van TerraSAR-X. De grotere golflengte van Sentinel-1 maakt het mogelijk om meer deformatie te meten.

Wanneer er voldoende beelden beschikbaar zijn, zijn alarmeringen met TerraSAR-X ook zeer goed mogelijk. Hier moet natuurlijk wel bij worden opgemerkt dat de opnamefrequentie van 11-dagen wel lager is dan de 6-daagse frequentie van Sentinel-1.

De voornaamste vraag die dus gesteld kan worden is of de hogere resolutie het prijsverschil waard is. Met een hogere resolutie kan er met een hoger detail gemeten worden en zijn ook kleinere objecten goed meetbaar, waardoor de waardepropositie ook hoger is. Onze inschatting is dat constructeurs het detailniveau nodig hebben voor hun analyses, maar dat voor areaalbreed risico-management het ook mogelijk is om Sentinel-1 te gebruiken.



## A. Rode Lijst

Brugnummer	Opmerking
009105-004	Sterke deformatie > -10 mm/yr gevonden
009105-003	Sterke deformatie > -10 mm/yr gevonden
009105-005	Sterke deformatie > -10 mm/yr gevonden
008677-003	Sterke deformatie > -5 mm/yr gevonden
003187-009	Kleine spot met deformatie midden op de brug

## B. Grijs Lijst

Brug	Opmerking
Viaduct van Vilvorde	Veel segmenten niet gedekt door sterke seizoensbeweging

