

## **Gebruik van InSAR voor parametrisatie van het isotachenmodel in bodemdalingsberekeningen**

Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groen Hart, project 42

## **Gebruik van InSAR voor parametrisatie van het isotachenmodel in bodemdalingsberekeningen**

Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groen Hart, project 42

### **Auteur(s)**

Henk Kooi

Roel Melman



## Gebruik van InSAR voor parametrisatie van het isotachenmodel in bodemdalingsberekeningen

Onderdeel van Regio Deal Bodemdaling Groen Hart, project 42

<b>Opdrachtgever</b>	Provincie Zuid-Holland
<b>Contactpersoon</b>	De heer R.J.M. (Rob) Ligtenberg
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	21-06-2024
<b>Projectnummer</b>	11206019-004
<b>Document ID</b>	11206019-004-BGS-0003
<b>Pagina's</b>	30
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Roel Melman	
	Henk Kooi	

# Samenvatting

Dit rapport doet verslag van een deelstudie die is uitgevoerd in project 42 van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH). Project 42 richt zich op verbetering van het modelinstrumentarium voor bodemdalingsberekeningen. Deze deelstudie had tot doel een methode te ontwikkelen waarin radarsatellietdata (InSAR) wordt gebruikt om het isotachenmodel te parametriseren.

In gebiedsdekkende bodemdalingsberekeningen, zoals die worden uitgevoerd voor de nationale of provinciale bodemdalingsvoorspellingskaarten, wordt het isotachenmodel gebruikt om de compactiebijdrage aan bodemdaling te kwantificeren. Compactie staat hier voor de verdichting van het korrelskelet van het bodemmateriaal (veen, klei, leem, zand). Compactie gaat gepaard met verlies van poriënruimte en hoogteverlies van bodemlagen. Het hoogteverlies van bodemlagen resulteert in bodem- of maaiveldddaling.

Een eigenschap van het isotachenmodel is dat de parameterwaarden die aan het bodemmateriaal worden toegekend zich (direct) vertalen in een compactiesnelheid. Dit levert dus ook direct een bodemdalingssnelheid op. In modellering is in feite altijd sprake van 'een vliegende start'. De gangbare aanpak in het gebruik van het modelleerinstrumentarium is/was om de parameterwaarden zo te kiezen dat de bijdrage door compactie aan de initiële maaiveldddaling overal bijzonder klein is. De compactie neemt dan in de loop van een berekening alleen duidelijk toe waar sprake is van belastingstoename, bijvoorbeeld door een grondwaterstandsverlaging of door een maaiveld ophoging. Echter, voor gebieden waar de momentane compactiesnelheid op het moment waarop de modellering start duidelijk groter is, wordt de bodemdaling door compactie richting de toekomst met deze gangbare aanpak onderschat.

Met name in de bebouwde omgeving, valt met behulp van radarsatelliet gegevens (InSAR) een goede schatting te maken van de maaiveldddaling en de ruimtelijke verschillen daarin. Zo'n InSAR-gebaseerde schatting van maaiveldddaling door compactie kan vervolgens worden gebruikt om de isotachenparameters van het ondergrondmodel te parametriseren en daarmee bodemdalingsprognoses te verbeteren. In dit rapport wordt hiervoor een aanpak gepresenteerd. De aanpak wordt gedemonstreerd voor Gouda.

Er is gebruik gemaakt van vier beschikbare InSAR datasets op basis van opnamen van de TerraSar-X satelliet voor de periode 2013 – 2016. De datasets verschillen op twee aspecten: (1) de baan van de satelliet (ascending (Asc) /descending (Dsc)); (2) type reflectoren (persistent scatterer (PS)/diffuse scatterer(DS)). De datasets bevatten 'lage reflectoren' - hoge punten die waarschijnlijk op gebouwen liggen waren door de producent ondergebracht in aparte datasets. Voor elke dataset zijn verschillende statistische methoden gebruikt om tot een enkelvoudige dalingsschatting te komen voor elk gridpunt van het ondergrondmodel dat wordt gebruikt in de bodemdalingsprognose (100 m x 100 m) . Ook is onderzocht hoeveel het uitmaakt wanneer punten die volgens de BAG (Basisregistratie Adressen en Gebouwen) op gebouwen zouden liggen worden weggelaten.

Er wordt getoond in welke mate (i) keuzes voor, of beschikbaarheid van, datasets, en (ii) keuzes in de verwerking van de data, van invloed zijn op de schatting van de maaivelddalingsnelheid. De resultaten laten zien dat er geen eenduidig recept bestaat om tot de schatting te komen. Kennis van de InSAR datasets is waardevol om goed onderbouwde keuzes te maken. Voor drie zones met relatief hoge dalingssnelheden (in de DS datasets) is informatie gevonden over renovaties die zijn uitgevoerd kort voor de

meetperiode. Dit ondersteunt de veronderstelling dat de InSAR data een realistisch beeld geeft van de maaiveldddaling.

Eén van de schattingen is gebruikt om de parametrisatie te doen. Er is voor gekozen om per gridpunt de minst goed afgepaalde parameter, de overconsolidatie ratio (OCR), in een vaste verhouding te optimaliseren voor klei en voor veen. De initiële maaivelddalingsnelheid van het model komt nauwkeurig overeen met de gebruikte schatting op basis van InSAR.

De python scripts voor de diverse stappen in de aanpak zijn bijgevoegd als bijlagen. Het rapport besluit met een bespreking van (i) aandachtspunten voor gebruik van de parametrisatiemethode, (ii) de waarde die moet worden toegekend aan de verbeterde parameterwaarden en (iii) de inzetbaarheid van de methode voor bodemdalingsmodellering in Het Groene Hart.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 42	7
1.2	Dit deelonderzoek	7
1.3	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Toelichting isotachenmodel en parameters</b>	<b>10</b>
2.1	Rekken en spanningen	10
2.2	Toestandsdiagram en parameters	10
<b>3</b>	<b>Benodigde stappen in de parametrisatie</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Casus Gouda; gebiedsdekkende bodemdalingssnelheid uit InSAR</b>	<b>13</b>
4.1	Gebied en datasets	13
4.2	Rastering van de verticale maaiveldalingsinformatie uit InSAR	15
4.2.1	Gevoeligheid voor diverse keuzeopties	15
4.2.2	Validatie	18
<b>5</b>	<b>Casus Gouda; parametrisatie isotachenmodel</b>	<b>21</b>
5.1	Gebruikte bodemdalingssnelheidsraster	21
5.2	Keuzes om tot een eenduidige parametrisatie te komen	21
5.3	Iteratieve kalibratie OCR veen en klei	21
5.4	Resultaat	22
<b>6</b>	<b>Discussie</b>	<b>24</b>
	<b>Bijlage A; filtering op gebouwen als optie</b>	<b>26</b>
	<b>Bijlage B; scripts</b>	<b>28</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 42

Het werk dat wordt gepresenteerd in dit rapport is uitgevoerd in het kader van het onderzoeksprogramma Regio Deal Bodemdaling Groene Hart (RDBGH) project 42: *Het voorspellen van bodemdaling en een nieuw ondergrondmodel van het Groene Hart*. Project 42 richt zich op het modelinstrumentarium voor bodemdalingsberekeningen. Bij instrumentarium moet gedacht worden aan software en de benodigde input die wordt gebruikt voor het maken van bodemdalingsvoorspellingskaarten over grote gebieden voor beleidsontwikkeling (Groene Hart, provinciaal, nationaal), maar ook aan software en rekenconcepten voor meer specifieke, lokale toepassingen zoals het maken van lange termijn zettingsverwachtingen bij renovaties (met name ophogen) van wegen en het bouwrijp maken van terreinen voor nieuwbouw. Praktische toepassingen van het instrumentarium betreffen dus vrijwel altijd voorspellingen (toekomstverwachtingen). Het onderzoek in project 42 richt zich specifiek op vragen over de kwaliteit van de gebruikte rekenmodellen voor bodemdaling. Het doel daarbij is tweeledig:

1. Meer inzicht verschaffen in de adequaatheid/beperkingen van de rekenmodellen;
2. Waar mogelijk de modellen of het gebruik ervan te verbeteren.

In het onderzoek wordt aandacht geschonken aan verbetering van het geologisch model (GeoTOP) voor de ondergrond van het Groene Hart, aan verbetering van procesmodellen zoals voor bodembeweging door krimp en zwel van klei en bodemdaling door oxidatie van veen, en aan parametrisatie en toetsing van het isotachenmodel (voor compactieberekeningen).

## 1.2 Dit deelonderzoek

### *Compactiebijdrage aan bodemdaling en het isotachenmodel*

Dit deelonderzoek richt zich op parametrisatie van het isotachenmodel in het bodemdalingsinstrumentarium. De studie is met name gericht op Atlantis, het instrumentarium dat wordt gebruikt voor gebiedsdekkende bodemdalingsberekeningen (Figuur 1). Het isotachenmodel wordt daarin gebruikt om de compactiebijdrage aan bodemdaling te kwantificeren. Met compactie wordt de verdichting van het korrelskelet van het bodemmateriaal (veen, klei, leem, zand) bedoeld<sup>1</sup>. Dit gaat gepaard met verlies van poriënruimte en hoogteverlies van bodemlagen. Het hoogteverlies van bodemlagen resulteert in bodemdaling.

### *Parametrisatie bepaalt de momentane compactie- en bodemdalingssnelheid*

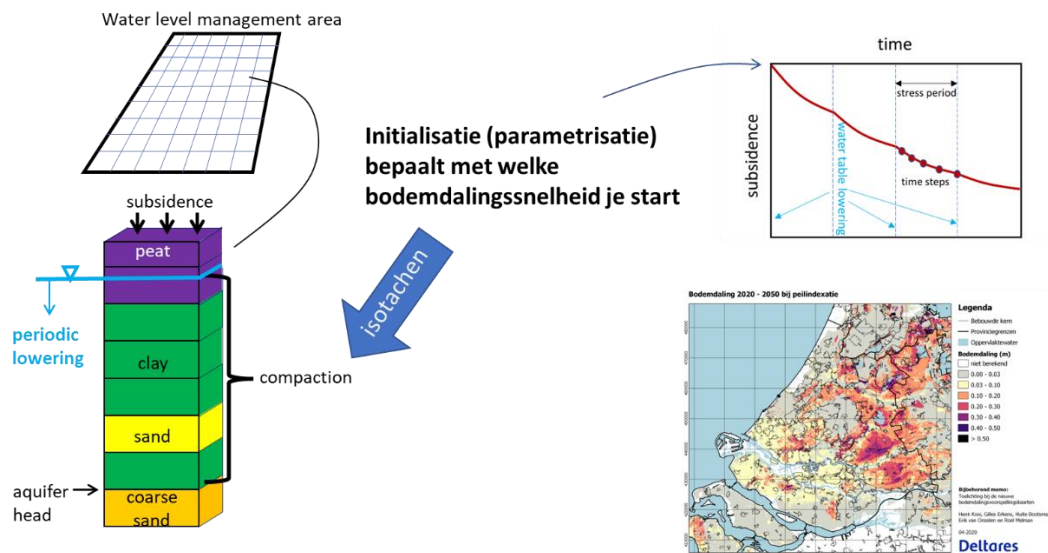
Een eigenschap van het isotachenmodel is dat de parameterwaarden die aan het bodemmateriaal worden toegekend zich (direct) vertalen in een compactiesnelheid en dus ook een bodemdalingssnelheid. Er is in feite altijd 'een vliegende start', er is geen

---

<sup>1</sup> Compactie kan worden gezien als synoniem van samendrukking, een term die in de geotechniek gangbaar is. Compactie en het isotachenmodel beschrijft de verdichting van bodemmateriaal dat plaatsvindt in de (permanent) verzadigde ondergrond. Verdichting boven het freatisch niveau wordt aangeduid met de term krimp en vraagt om een andere rekenwijze.

belastingsstap voor nodig<sup>2,3</sup> (Figuur 1). Die vliegende start door compactie vertegenwoordigt de invloed van de historische ontwikkeling vóór de start van de berekening. De bodemdalingssnelheid kan daarom beschouwd worden als de snelheid van restzetting die gaande is bij de start van een berekening. De tijdsafhankelijke compactie (zonder verandering in grondspanning) wordt 'kruip' genoemd. De kruip komt voort uit een geleidelijke reorganisatie van de korrels en verdichting van het korrelskelet. Zonder nieuwe spanningstoename neemt de kruipsnelheid geleidelijk af. Voor veen en klei is het beeld dat de kruip vele decennia kan doorgaan voor het 'min of meer' stopt.

Bij gebruik van het isotachenmodel in bodemdalingberekeningen is het dus gewenst om de parameterwaarden zo te kiezen dat de initiële bodemdalingssnelheid aansluit bij de daadwerkelijke bodemdaling door compactie. Zonder verdere ingrepen bepaalt de initiële dalingssnelheid hoe de daling (door compactie) zich verder ontwikkelt. Wanneer de initiële bodemdaling wordt onderschat door de gekozen parametrisatie, wordt de daarop volgende bodemdaling (in meter) ook onderschat. De onderschatting neemt toe in de tijd. En andersom voor overschatting van de initiële bodemdalingssnelheid. Naast deze consequentie van niet passende parametrisatie heeft een 'fout' in de parametrisatie ook gevolgen voor de berekende bodemdaling voor optredende belastingen zoals grondwaterstandsverlagingen of ophogingen. De 'gevoeligheid' voor zulke belastingen is dan anders volgens het isotachenmodel<sup>4</sup>.



*Figuur 1 Schematische weergave van de inzet van het isotachenmodel in gebiedsdekkende bodemdalingsmodellering, zoals de productie van de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten die zijn opgenomen in de [nationale klimaateffectatlas](#). Het isotachenmodel levert de compactiebijdrage ("compaction") aan de bodemdaling. De parametrisatie van het isotachenmodel bepaalt o.a. welke compactiesnelheid aanwezig is bij de start van de berekening. Een goede parametrisatie is daarom belangrijk voor de bodemdalingsprognose.*

<sup>2</sup> Een 'vliegende start' geldt niet alleen voor compactie, maar ook voor bodemdaling door oxidatie. Als de initiële grondwaterstand het veen voldoende mate 'drooglegt' levert dat een snelheid van bodemdaling door oxidatie op.

<sup>3</sup> Oudere 'compactiemodellen' zoals het Koppejan model hebben deze eigenschap niet.

<sup>4</sup> Een uitgangspunt in dit rapport is dat het isotachenmodel zoals dat in Nederland wordt gebruikt valide is voor 'alle belastingen', inclusief afwezigheid daarvan. De bruikbaarheid voor kleine belastingen wordt onderzocht in andere deelstudies van RDBGH project 42.



### *Doel van het onderzoek*

Het doel van dit onderzoek is om een de methode te ontwikkelen waarmee parametrisatie van het isotachenmodel in gebiedsdekkende toepassingen kan worden 'ingeregeld' op een schatting van de maaiveldddaling die wordt verkregen uit radarsatellietmetingen (InSAR). Het oogmerk daarvan is om, bij beschikbaarheid van zulke metingen, de nauwkeurigheid van bodemdalingsprognoses te kunnen vergroten.

### *Casus Gouda*

De methode is ontwikkeld en toegepast op basis van een casus in Gouda. Er is voor deze casus gekozen omdat er vrij uitgebreide InSAR datasets beschikbaar waren en omdat er verwacht wordt dat de maaiveldddaling in Gouda volledig aan compactie is toe te schrijven door de relatief dikke antropogene laag (ophogingen) en de relatief ondiepe grondwaterstand die zich in de antropogene laag bevindt.

## 1.3 Leeswijzer

De verdere inhoud van dit rapport is als volgt.

Hoofdstuk 2 geeft een (uitgebreidere) beschrijving van het isotachenmodel en introduceert de modelparameters.

Hoofdstuk 3 licht de stappen toe waar de parametrisatiemethode uit bestaat.

Hoofdstukken 4 en 5 presenteren een toepassing op Gouda. Hoofdstuk 4 toont en evalueert verschillende methoden om met de InSAR datasets tot gebiedsdekkende schattingen te komen van de maaivelddalingsnelheid. Hoofdstuk 5 presenteert de gebruikte maaivelddalingschatting en de uiteindelijke parametrisatie.

Ten slotte bediscussieert Hoofdstuk 6 aandachtspunten voor algemeen gebruik van de parametrisatiemethode: welke waarde moet worden toegekend aan de verbeterde parameterwaarden, en de inzetbaarheid van de methode voor bodemdalingsmodellering in Het Groene Hart.

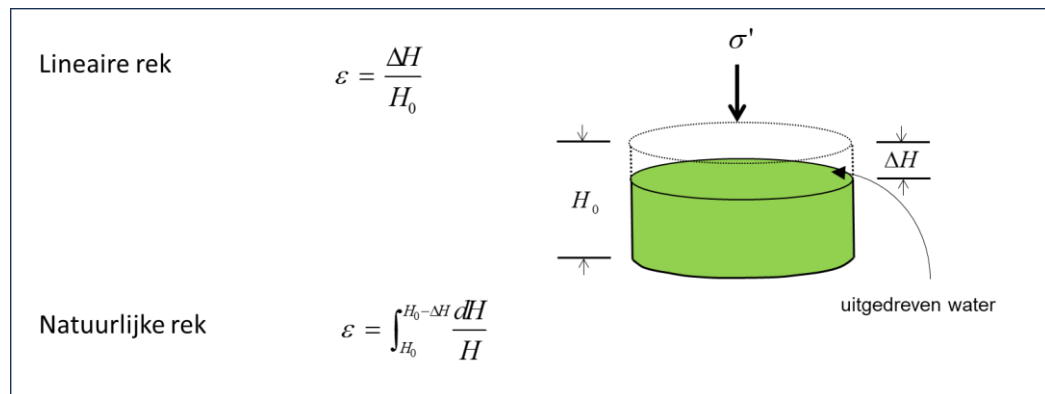
Het ontwikkelde en gebruikte Python script is opgenomen in de bijlagen.

## 2 Toelichting isotachenmodel en parameters

### 2.1 Rekken en spanningen

#### *Lineaire en natuurlijke rek*

Net als in andere geotechnische verticale samendrukkingsmodellen wordt de mate van samendrukking (compactie) gekwantificeerd met de dimensieloze grootheid rek (Engels: strain). In de Nederlandse geotechnische adviespraktijk worden twee rekdefinities gebruikt, lineaire en natuurlijke rek (Figuur 2). Lineaire rek relateert de hoogte verandering aan de oorspronkelijke hoogte en varieert (wiskundig) tussen 0 en 1. Natuurlijke rek varieert tussen 0 en  $\infty$ , omdat elke incrementele bijdrage aan de natuurlijke rek niet naar de oorspronkelijke monsterhoogte  $H_0$  refereert, maar naar de momentane hoogte  $H$  die door de samendrukking afneemt.



Figuur 2 Twee manieren om rek te kwantificeren. Lineaire rek wordt gebruikt in het Bjerrum isotachenmodel; natuurlijke rek in het abc-isotachenmodel.

#### *Elastische rek en inelastische of kruiprek*

De totale rek in het isotachemodel bestaat uit de som van twee delen: een elastische rek en een inelastische rek. De elastische rek is omkeerbaar (reversibel), de inelastische rek is permanent (irreversibel).

De elastische rek is gekoppeld aan verandering van de effectieve druk (wordt hieronder toegelicht). De inelastische rek volgt in het isotachemodel uit de *kruipreksnelheid* (en de tijdsduur waarvoor die snelheid van toepassing is). De kruipreksnelheid is afhankelijk van de grootte van de effectieve druk en van de totale rek (som elastische en kruiprek).

#### *Effectieve druk*

De spanningsvariabele in het isotachemodel is de (verticale) effectieve druk; ook wel aangeduid met de naam verticale korrelspanning. De effectieve druk is het verschil tussen de verticale grondspanning en de poriedruk (druk van het grondwater).

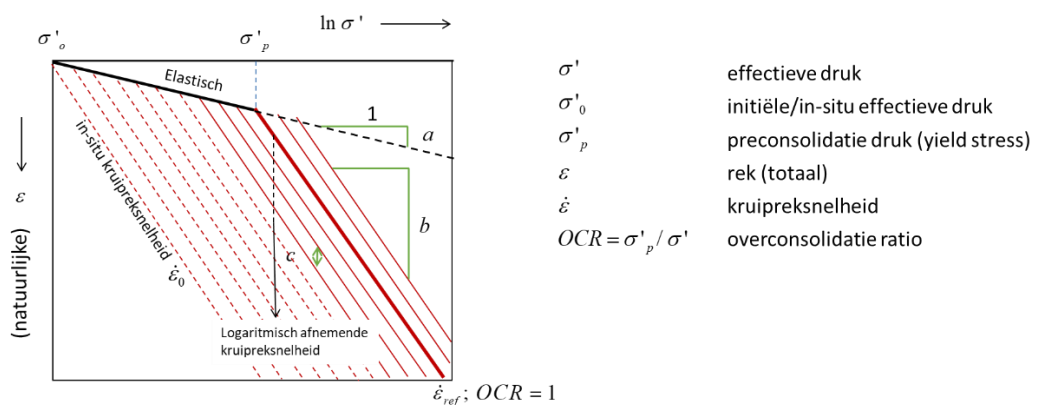
### 2.2 Toestandsdiagram en parameters

De essentie van het isotachemodel kan in beeld gebracht worden met een toestandsdiagram. Figuur 3 toont het diagram voor het model op basis van natuurlijke rek. Punten in het diagram vertegenwoordigen een combinatie van de effectieve druk en de totale rek. Bij elk punt hoort ook een kruipreksnelheid. De rode lijnen zijn *isotachen*: lijnen die punten met eenzelfde kruipreksnelheid met elkaar verbinden. Bij de getoonde gelijke afstand tussen de isotachen

verandert de kruipreksnelheid logaritmisch; voor het getoonde abc-isotachenmodel met een factor  $e \approx 2,72$ . Naar beneden en naar links neemt de kruipreksnelheid (sterk) af. De dikke rode lijn geeft de referentie isotache weer. Deze wordt in het laboratorium bepaald op basis van een gestandaardiseerde methodiek (IL (incremental loading) proeven; CRS (constant rate of strain) proeven). Hoewel verschillende definities van referentie isotache mogelijk zijn, wordt modelmatig de referentie isotache gedefinieerd als de zakkingslijn die na 1 dag in een standaard laboratorium wordt bereikt. Aan de referentie isotache is de preconsolidatiespanning gekoppeld. De isotachen zijn ook iso-OCR lijnen: lijnen van gelijke overconsolidatie ratio. De referentie isotache correspondeert met  $OCR = 1$ .

De samendrukkingseigenschappen van het (in-situ) bodemmateriaal wordt met het abc-isotachenmodel vastgelegd met drie samendrukkingsparameters  $a$ ,  $b$ ,  $c$  en  $OCR_0$ . De samendrukkingsparameters zijn gevisualiseerd in het toestandsdiagram (Figuur 3). De kruipreksnelheid ( $\text{dag}^{-1}$ ) volgt uit:

$$\dot{\varepsilon} = c \times OCR^{\frac{c}{b-a}} \quad (1)$$



Figuur 3 Toestandsdiagram voor het isotachenmodel op basis van natuurlijke rek. Voor toelichting zie hoofdstekst 2.2.

### 3 Benodigde stappen in de parametrisatie

Op hoofdlijnen kunnen er twee stappen worden onderscheiden in de parametrisatie (Figuur 4). Uitgangspunt is dat er een ondergrondmodel beschikbaar is waarvoor de compactieberekeningen met het isotachenmodel kunnen worden uitgevoerd. Daarnaast zijn één of meer representatieve InSAR datasets nodig met ruimtelijke informatie over de verticale deformatie van het maaiveld.

Stap 1 betreft rastering van de deformatiesnelheid op het kaartbeeld grid van het ondergrondmodel. De aanpak daarvoor is niet eenduidig; afhankelijk van de beschikbare data zijn diverse keuzes mogelijk. Het resultaat is een 'gebiedsdekkende' gerasterde maaivelddalingskaart<sup>5</sup>.

Stap 2 betreft kalibratie van de isotachenparameters. Er wordt hier vanuit gegaan dat de kalibratie met de bodemdalingssnelheid per cel/gridpunt van het raster gebeurt (meer generieke kalibratie is wel denkbaar). Kalibratie betreft dus de parameterwaarden in de driedimensionale volumes; voxels) van het ondergrondmodel die aanwezig zijn onder de cel (een voxelstack of bodemkolom). Omdat er slechts één dalingssnelheid is per cel, en in principe meerdere voxels, elk met vier isotachenparameters, is een sterke parameterreductie nodig om een unieke parametrisatie te verkrijgen.



Figuur 4 Stappen in de parametrisatie op hoofdlijnen. Kalibratie wordt veelal gedaan met [PEST](#), een softwarepakket voor model-onafhankelijke parameter schatting en onzekerheidsanalyse.

<sup>5</sup> Over het algemeen zal niet voor elke cel/gridpunt een dalingssnelheid uit InSAR volgen. Bijvoorbeeld als er geen InSAR punten in de cel aanwezig zijn. Zonder schatting op andere gronden kan voor zo'n cel geen parametrisatie plaatsvinden. Dit aspect wordt niet in dit rapport geadresseerd.

# 4 Casus Gouda; gebiedsdekkende bodemdalingssnelheid uit InSAR

## 4.1 Gebied en datasets

### InSAR data

Figuur 5 geeft een beeld van het studiegebied aan de hand van de gebruikte InSAR data. Tabel 1 heeft een overzicht van de gebruikte InSAR data. Deze data waren onderdeel van een grotere set data (aanvullende satellieten) die zijn geproduceerd door SkyGeo eind 2016/ begin 2017 voor een bodemdalingstudie voor de gemeente Gouda.

Er is gekozen voor de datasets van de TerraSar-X satelliet. Deze data beslaat een recente periode van drie jaar (2013 – 2016), heeft een relatief hoge informatie dichtheid (reflectiepunten; Engels: scatterers) en een hoge positionauwkeurigheid van ca. 3 x 3 m ten opzichte van oudere datasets en nieuwe niet-commerciële datasets zoals van Sentinel 2. Relevant is ook dat er door SkyGeo een uitsplitsing is gemaakt van lage en hoge punten (Tabel 1). Omdat hogere reflectoren veelal op diep gefundeerde objecten liggen (gebouwen, masten), leveren die punten geen goede schattingen voor de maaiveldddaling. Ten slotte is relevant dat de dataset schattingen geeft van de verticale deformatie.



Figuur 5 'Studiegebied' Gouda, weergegeven aan de hand van lineaire snelheid schattingen uit InSAR in de gebruikte datasets (Lage punten datasets uit Tabel 1).

Tabel 1 Gebruikte InSAR datasets

Dataset	Satellite	Timespan	Images	Median Time Interval
TSX asc PS Lage Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-25 - 2016-09-24	45	22
TSX asc DS Lage Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-25 - 2016-09-24	45	22
TSX asc PS Hoge Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-25 - 2016-09-24	45	22
TSX asc DS Hoge Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-25 - 2016-09-24	45	22
TSX dsc PS Lage Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-22 - 2016-11-04	80	11
TSX dsc DS Lage Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-22 - 2016-11-04	80	11
TSX dsc DS Hoge Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-22 - 2016-11-04	80	11
TSX dsc PS Hoge Punten	tdx-1, tsx-1	2013-11-22 - 2016-11-04	80	11

### Ondergrondmodel

Voor het ondergrondmodel is gebruik gemaakt van een uitsnede van het ondergrondmodel dat is gebruikt voor de bodemdalingsprognose van provincie Zuid-Holland (2020)<sup>6</sup>. Het voxelmodel ende bijbehorende (meest waarschijnlijke) lithoklassen is in het stedelijk gebied grofweg gelijk aan dat van GeoTop v1.3. Op plaatsen waar de bodemkaart (v2014) informatie verschaft, is de ondiepe ondergrond tot 1,2 m -mv van GeoTop vervangen op basis van de bodemkaart. Meer informatie is te vinden in toelichting bij de prognosekaart<sup>6</sup>.

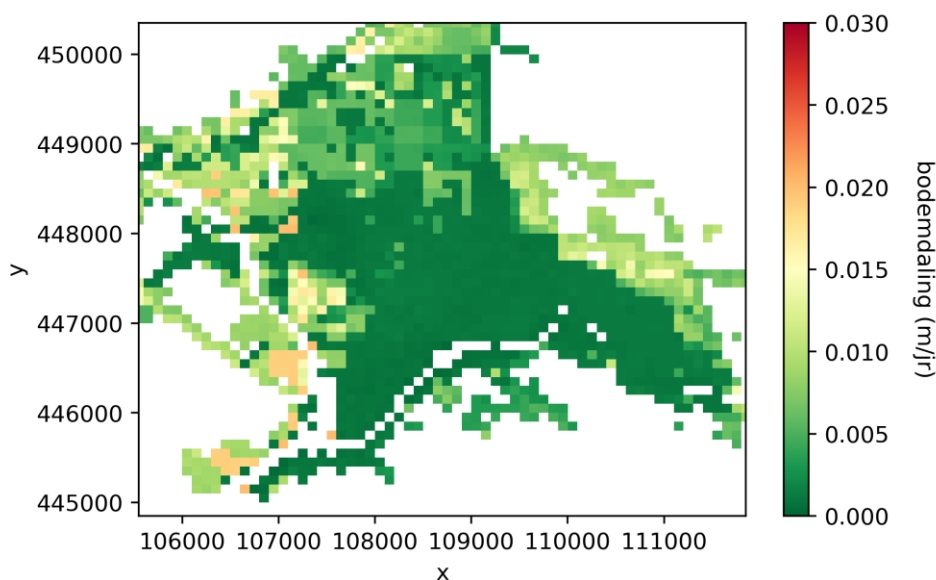
Relevant voor dit rapport is:

1. Er worden vier lithoklassen onderscheiden: zand, klei, veen, 'leem'.
2. Het kaartbeeld grid bestaat uit cellen van 100 m x 100 m.

Tabel 2 toont de parameterwaarden voor de compactieberekeningen die waren toegekend aan de vier lithoklassen in de bodemdalingsprognose van de provincie Zuid-Holland (2020). De drie isotachenparameters a,b,c en OCR bepalen de initiële compactiesnelheid (Figuur 3). De andere parameters spelen een rol bij de compactie die zich ontwikkelt door nieuwe belastingen. Figuur 6 toont de initiële bodemdalingssnelheid. De bodemdalingssnelheid correleert hier met dikte klei en veen in het ondergrondmodel. Het bevat geen ruimtelijke verschillen door de (recente) historie van belastingen.

Tabel 2 Parametrisatie compactieberekeningen bodemdalingsprognose provincie Zuid-Holland (2020).

	Initiële volumieke gewicht [kN/m <sup>3</sup> ]	Isotachenparameters			Consolidatiecoëfficiënt [m <sup>2</sup> /s]	Overconsolidatie ratio OCR
		a	b	c		
	$\gamma_{verz} / \gamma_{onverz}$				$c_v$	
zand	19.0 / 17.0	0.0001	0.0023	0	1.00E+00	1.25
klei	17.0 / 16.0	0.005	0.065	0.003	3.00E-08	1.56
veen	10.5 / 3.5	0.017	0.13	0.009	8.00E-08	2.23
'leem'	19.0 / 17.5	0.002	0.03	0.0008	4.00E-08	1.25



Figuur 6: Initiële bodemdalingssnelheid in de bodemdalingsprognose van de provincie Zuid-Holland (2020).

<sup>6</sup> Kooi (2020). Toelichting bij de nieuwe bodemdalingsvoorspellingskaarten. Deltares Memo 11204103 bij de oplevering van nieuwe bodemdalingsvoorspellingskaarten voor de Provincie Zuid-Holland; dd. 14 april 2020.

## 4.2 Rastering van de verticale maaiveldalingsinformatie uit InSAR

Met de rastering moet voor elke 100 m x 100 m cel van het ondergrondmodel een enkelvoudige maaiveldalingsnelheidswaarde worden bepaald op basis van de puntwaarden van de verticale (lineaire) deformatiesnelheid in de InSAR datasets.

### 4.2.1 Gevoeligheid voor diverse keuzeopties

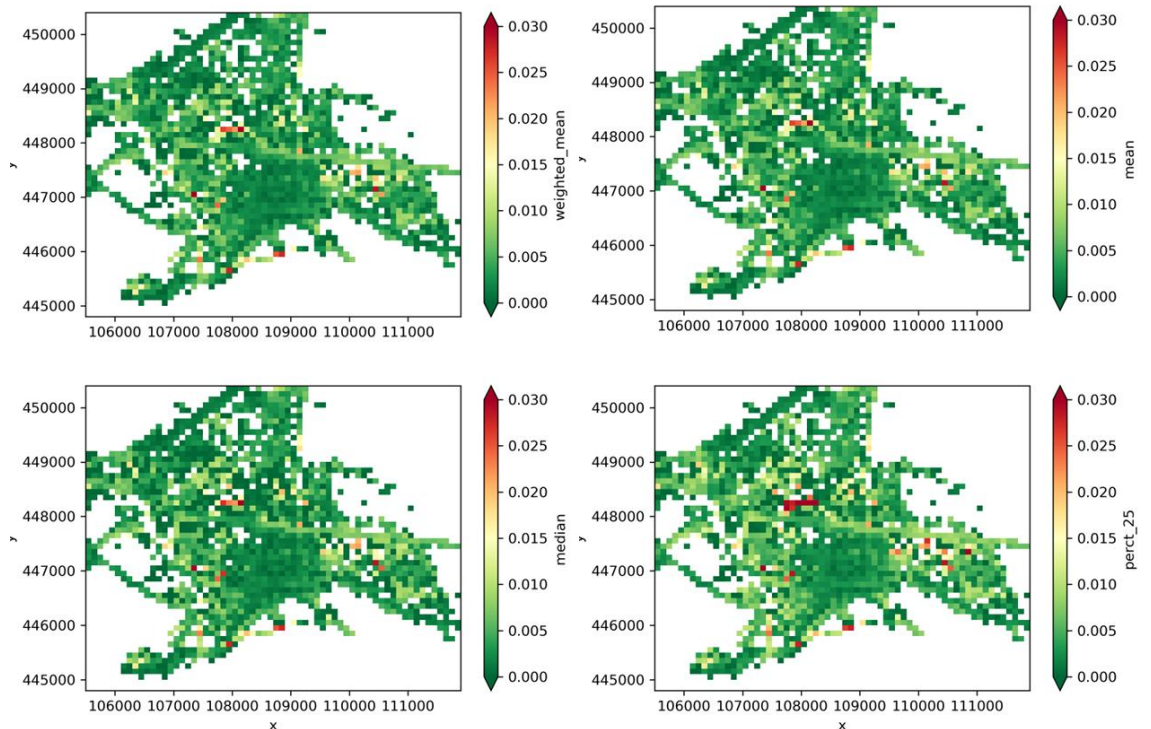
Om een beeld te krijgen van de gevoeligheid van gerasterde bodemdalingssnelheidsschattingen voor (a) verschillende InSAR datasets en (b) de verwerking van de puntwaarden, zijn de volgende keuzes gemaakt en variaties gebruikt.

De rastering is gedaan voor elk van de vier datasets met 'lage punten'. Voor elk van deze datasets zijn vier verwerkingsmethoden toegepast:

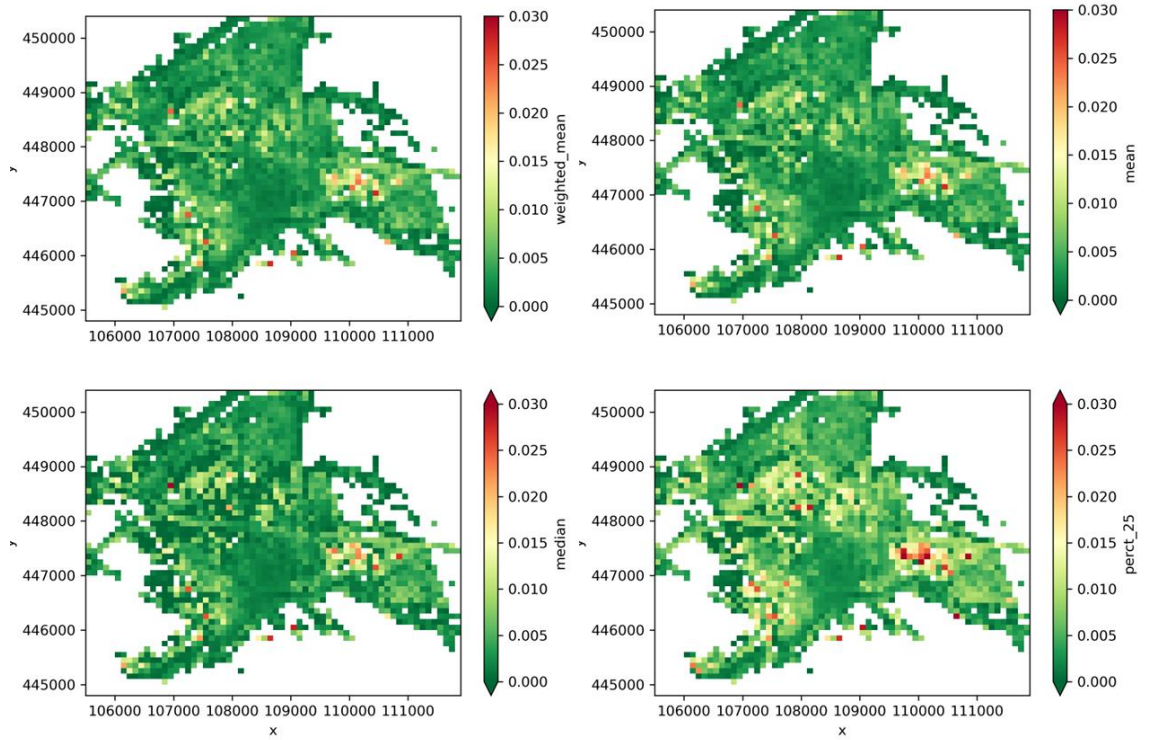
- Gemiddelde van de puntwaarden binnen de cel.
- Gewogen gemiddelde van de puntwaarden binnen de cel, met weging op basis van de gerapporteerde kwaliteitswaarden voor de punten.
- Mediaan van de puntwaarden binnen de cel.
- 1<sup>e</sup> kwartiel van de puntwaarden binnen de cel (daling negatief)

De resultaten zijn gevisualiseerd in Figuur 7. Tabel 3 en Tabel 4 tonen enkele statistieken. Bijlage A laat zien dat het 'wegfilteren' van punten op gebouwinformatie van nut kan zijn.

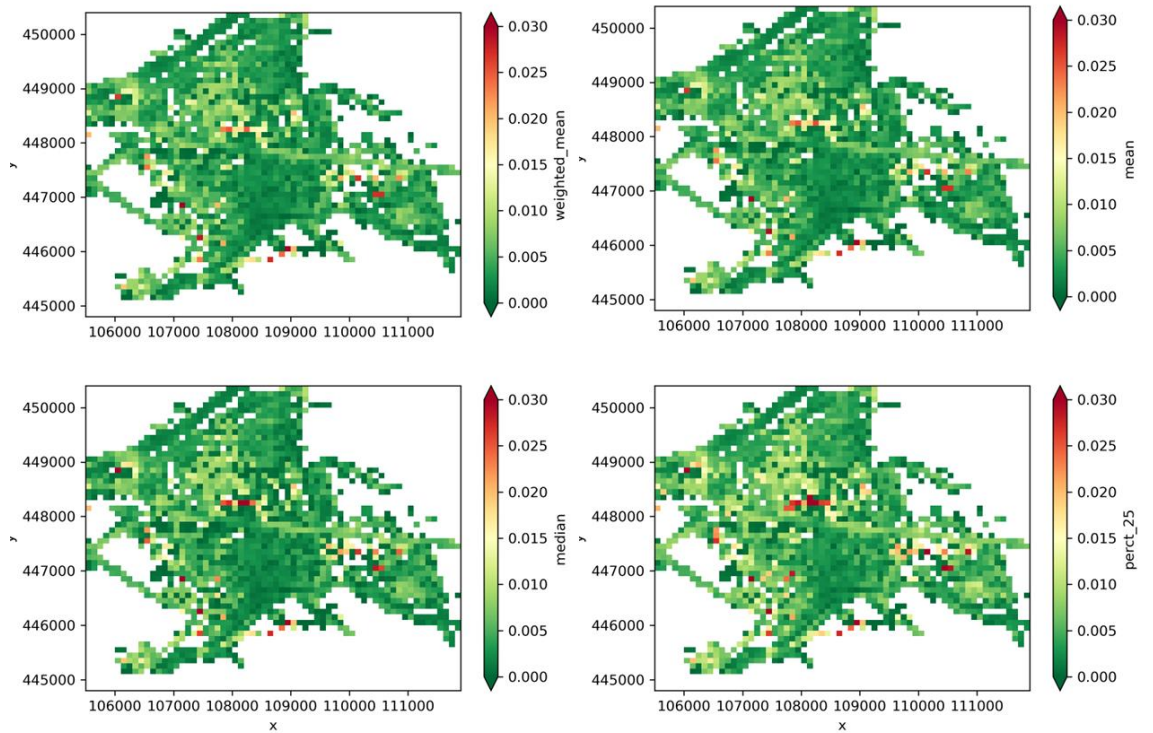
## TSX | ascending, distributed scatterers (DS)



# TSX | ascending, persistent scatterers (PS)

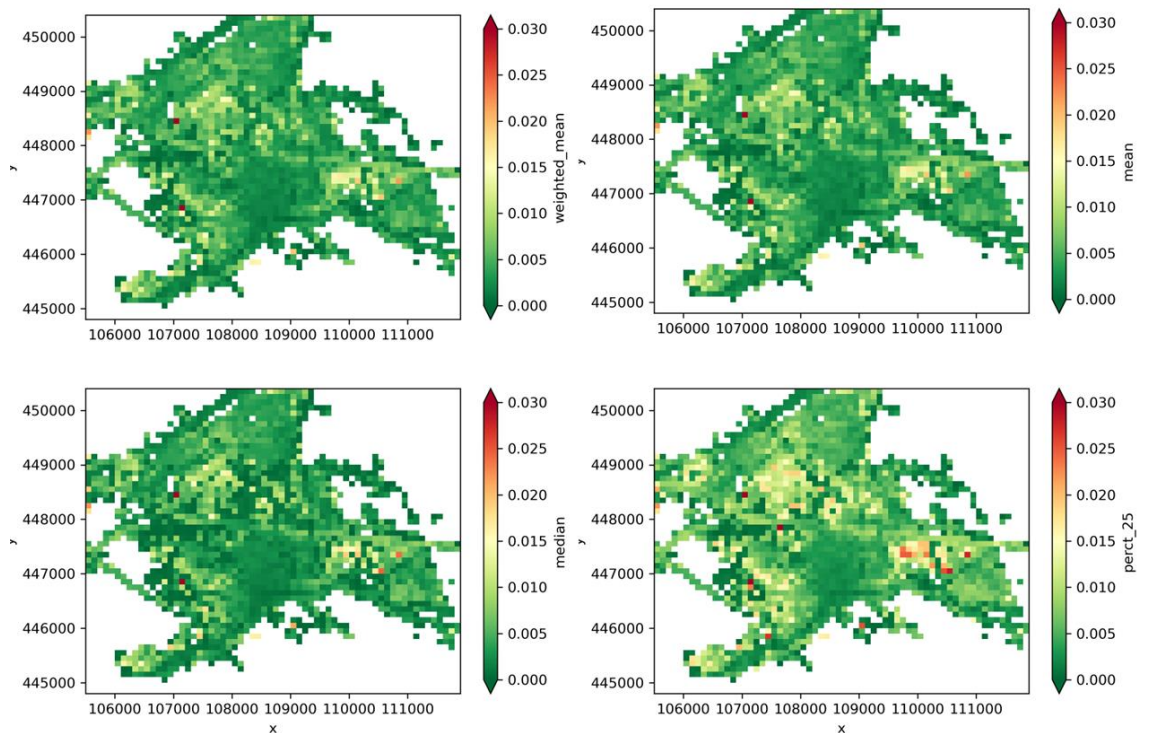


# TSX | descending, distributed scatterers (DS)





# TSX | descending, persistent scatterers (PS)



Figuur 7 Resultaten van de rastering (deze en vorige pagina) voor de 16 varianten; snelheid in m/jaar. Per blok van vier varianten is de gebruikte InSAR dataset erboven aangegeven (satellietbaan en type reflector). Binnen deze blokken varieert de verwerkingsmethode (gemiddelde, mediaan, etc); deze is bij de legenda vermeld.

Tabel 3 Gemiddelde dalingsnelheid (totale raster) in mm/jaar; gemiddeld aantal punten per cel.

	Asc/DS	Asc/PS	Dsc/DS	Dsc/PS
Gewogen gemiddelde	3,83	4,00	4,41	4,19
Gemiddelde	3,84	4,02	4,43	4,22
Mediaan (p50)	3,75	3,59	4,36	3,79
1 <sup>e</sup> kwartiel (p25)	4,76	5,71	5,46	5,88
Gemiddeld aantal punten per cel	23,44	50,46	36,33	72,35

Tabel 4 Gemiddelde dalingsnelheid (totale raster) van de vier verwerkingsmethoden in mm/jaar.

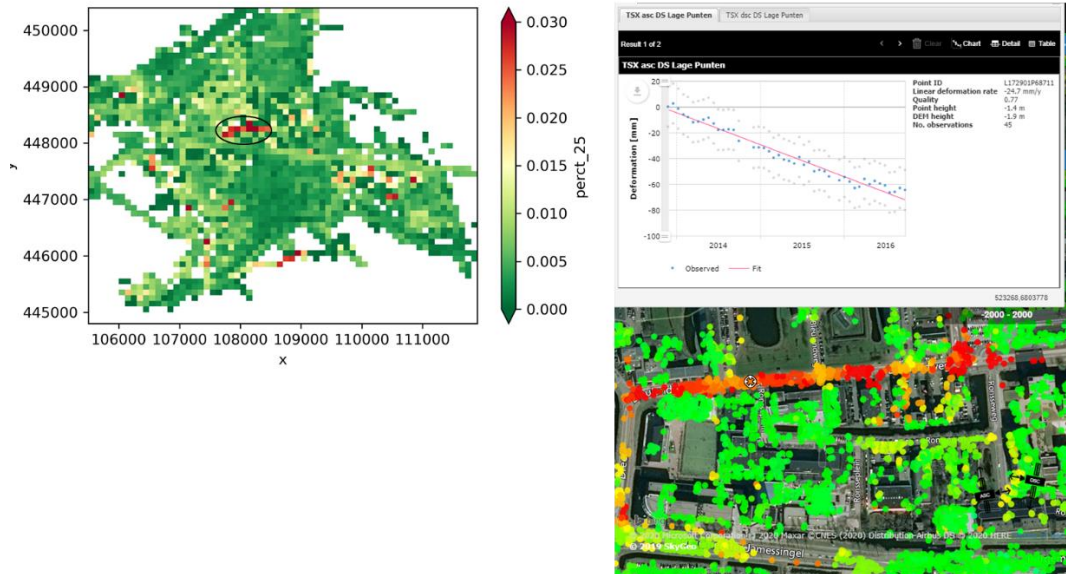
	Asc	Dsc
PS	4,33	4,52
DS	4,05	5,67

De resultaten laten zien dat de ruimtelijke patronen voor de individuele InSAR datasets beperkt gevoelig zijn voor de gekozen methode, maar dat de dalingswaarden met name voor het 1<sup>e</sup> kwartiel duidelijk veelal hoger zijn dan voor de andere methoden. De patronen verschillen verder met name tussen de PS en DS datasets, en minder tussen de ascending en descending datasets. De DS datasets laten andere zones met hoge dalingsnelheid zien dan de PS datasets. DS datasets leveren meer informatie van wegvlakken terwijl PS datasets meer informatie geven nabij gebouwen door reflectie via de wanden/muren.

## 4.2.2 Validatie

Een formele validatie met betrouwbare, onafhankelijke schattingen van de bodemdalingssnelheid is niet mogelijk omdat zulke schattingen niet beschikbaar zijn. Wel kan onderzocht worden of zones met hoge(re) dalingsnelheid redelijkerwijs verklaarbaar zijn. Te verwachten valt dat zones met hoge dalingsnelheid samenhangen met voorgaande werkzaamheden, met name renovaties die gepaard zijn gegaan met ophoging. Voor een aantal zones met hoge dalingsnelheid (> 0,02 m/jaar) is online gezocht naar informatie die dat kan bevestigen. Voor de volgende zones is daarover het volgende gevonden.

### Bleulandweg



Gouda, 22 oktober 2013

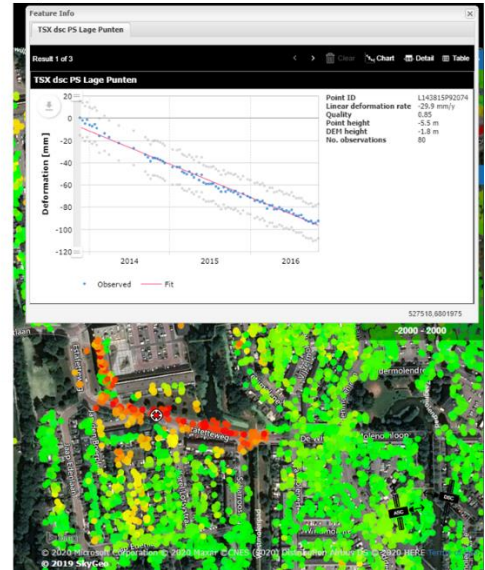
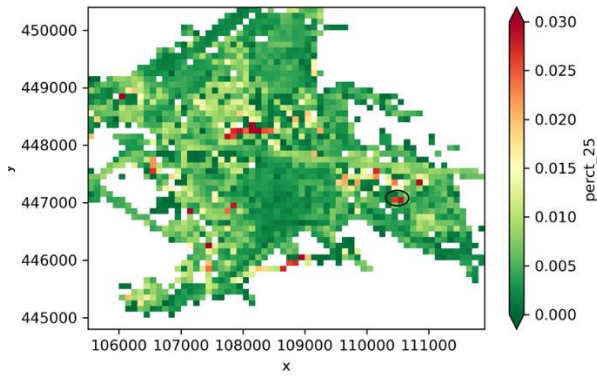
Geachte voorzitter,

Ingevolge art. 38 van het 'Reglement van orde voor de vergaderingen en andere werkzaamheden van de gemeenteraad van Gouda willen wij U een aantal vragen voorleggen die voortvloeien uit de werkzaamheden reconstructie Bleulandweg-Buchnerweg.

Begin 2012 zijn de bewoners van de Buchnerweg, Dreef Noord, Van Hogendorpplein, Bleulandweg Oost en West en Ronsseweg schriftelijk op de hoogte gebracht van de reconstructie van de wegen in hun gebied. Met een schets werd aangegeven hoe de fasering en communicatie van de uit te voeren werkzaamheden er uit zou gaan zien.

**Inmiddels bevinden de werkzaamheden zich in een afrondende fase.**

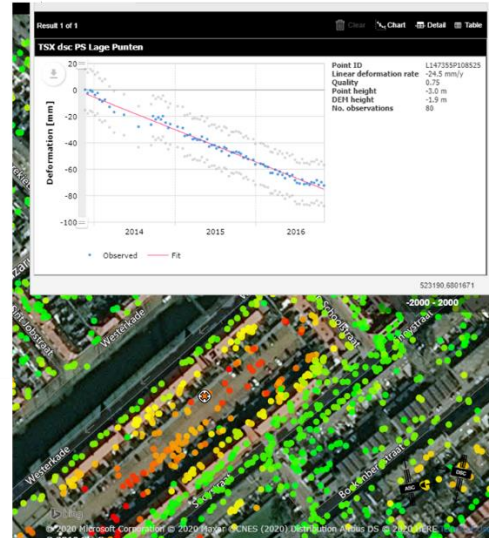
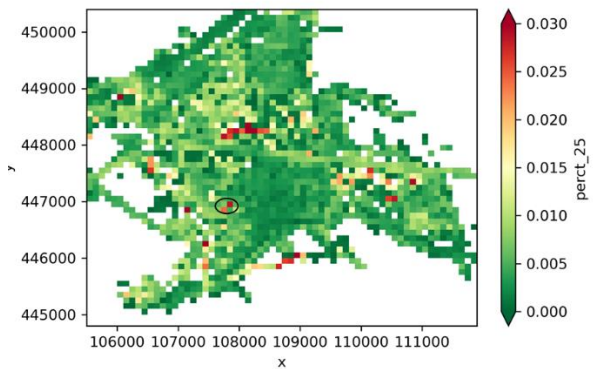
## Estafetteweg



### TRANSCRIPT OF DE KRANT VAN GOUDA, 23 JULI 2010

appartementen met 30.000,- E-premie\* Wegwerkzaamheden in Goverwelle in de Goudse wijk Goverwelle wordt momenteel druk gewerkt aan het kruispunt van de Estafetteweg en de Sport-laan. In de afgelopen maanden is de Estafetteweg verhoogd en vrijwel opnieuw aangelegd. Het laatste

## Westerkade – Snoystraat



## de raad van de gemeente gouda

het voorstel van burgemeester en wethouders van 8 januari 2013;

artikel 3.8 van de Wet ruimtelijke ordening;

### besluit:

1. De zienswijzen op het ontwerpbestemmingsplan Korte Akkeren in behandeling te nemen en hierop te besluiten conform bijgevoegde Nota van beantwoording zienswijzen;
2. Het bestemmingsplan Korte Akkeren met kenmerk NL.IMRO.0513.0700BPKortea-DF01vast te stellen, overeenkomstig bijgevoegde stukken;
3. Geen exploitatieplan ex artikel 6.12 van de Wet ruimtelijke ordening vast te stellen.

7. project "Westerka~~de~~ - Snoystraat"

De woningen die hier eerst stonden, zijn gesloopt en de start van de nieuwbouw (woningbouw) is aangevangen. Dit project is in juridisch-planologische zin mogelijk gemaakt in een afzonderlijk bestemmingsplan. Dit plan is inmiddels onherroepelijk en daarom integraal opgenomen in het bestemmingsplan "Korte Akkeren".

# 5 Casus Gouda; parametrisatie isotachenmodel

## 5.1 Gebruikte bodemdalingssnelheidsraster

De parametrisatie is uitgevoerd op basis van een bodemdalingssnelheidsraster dat is verkregen op basis van de combinatie van de Asc DS en Dsc DS datasets en 1<sup>e</sup> kwartiel.

## 5.2 Keuzes om tot een eenduidige parametrisatie te komen

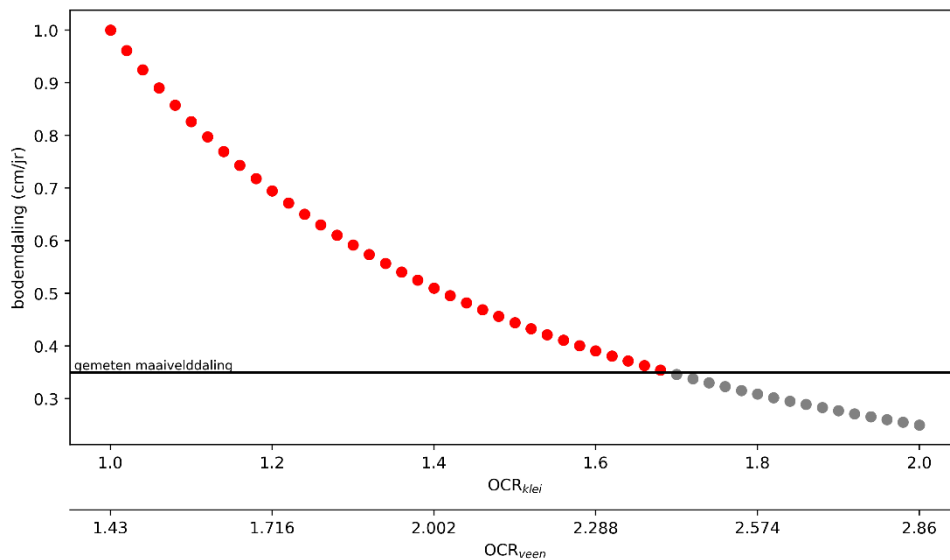
In het model wordt de bodemdaling door compactie bepaald door de bijdragen van alle voxels in de voxelkolom bij een kaartbeeld cel (100 m x 100 m). Een voxelkolom bestaat uit meer dan 25 voxels. De bijdrage (reksnelheid) van elke voxel wordt bepaald door vier parameters a, b, c en OCR. In de meest brede zin is dus sprake van meer dan 100 vrijheidsgraden en slecht één doelwaarde.

De volgende aanvullende beperkingen zijn toegevoegd om tot een eenduidige parametrisatie te komen:

1. De parametrisatie is vast per lithoklasse (veen, klei, leem, zand)
2. De parameterwaarden voor lithoklassen zand en leem zijn als in Tabel 3. De bijdrage aan bodemdaling is verwaarloosbaar ten opzichte van de bijdragen van veen en klei.
3. Van veen en klei wordt alleen de OCR-waarde aangepast aan de bodemdaling van het raster. Variaties in kruiprek voor elk van de lithoklassen worden sterker bepaald door variaties in de OCR dan door variaties in a, b en c. Deze laatste worden dus 'karakteristiek' verondersteld voor de lithoklassen.
4. De verhouding van de OCR voor veen en klei volgens Tabel 2 wordt gehandhaafd:  $OCR_{veen}/OCR_{klei} = 1,43$ .

## 5.3 Iteratieve kalibratie OCR veen en klei

Er is een relatief eenvoudige iteratieve kalibratieprocedure uitgevoerd voor elke voxelkolom. Hierbij zijn de OCR-waarden van klei- en veenvoxels geleidelijk verhoogd, volgens de vaste verhouding van  $OCR_{veen}/OCR_{klei} = 1,43$ , totdat het verschil tussen het gemodelleerde resultaat en de werkelijke bodemdaling minder dan 1 mm per jaar was. Dit proces is geïllustreerd in Figuur 8. De beginwaarden van OCR voor klei en veen zijn respectievelijk 1.0 en 1.43 bij de eerste iteratiestap, wat resulteert in een te hoge geschatte bodemdaling. De procedure is herhaald, waarbij de OCR-waarde van klei telkens met 0.02 wordt verhoogd, totdat de gemodelleerde daling goed overeenkomt met de gemeten waarden.

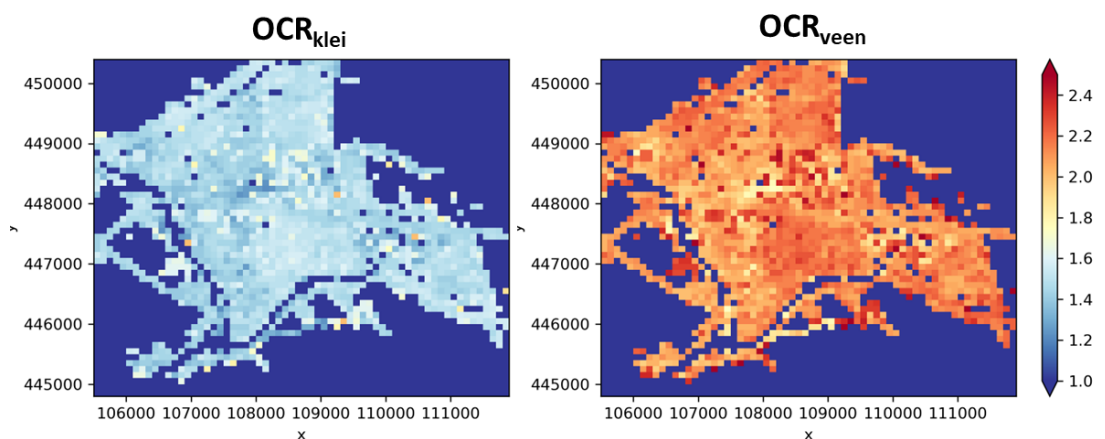


Figuur 8 voorbeeld iteratieve kalibratie OCR klei en veen. De rode en grijze punten geven de iteratiestappen weer.

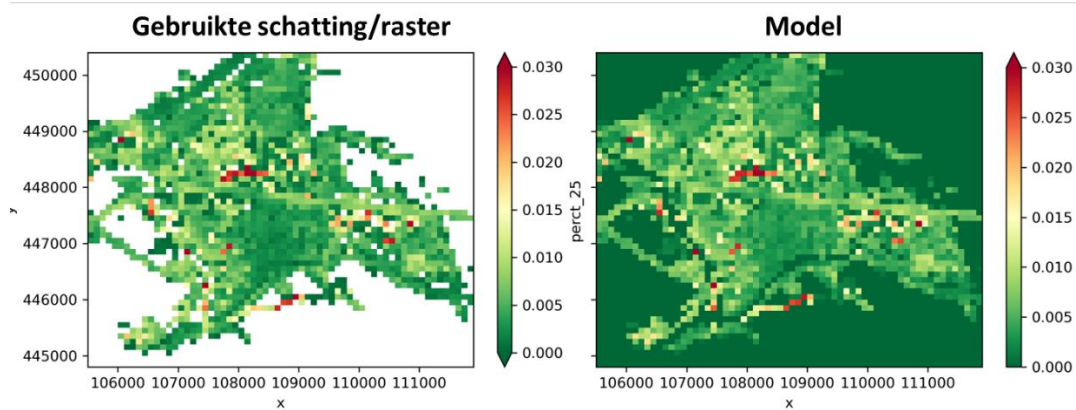
## 5.4 Resultaat

Het resultaat van de kalibratie is weergegeven in Figuur 9 en Figuur 10. Volgens de toegepaste vaste verhouding zijn de gekalibreerde OCR-waarden voor klei altijd lager dan die voor veen. In regio's waar de met InSAR gemeten maaiveldaling lager uitvalt, zijn de OCR-waarden hoger, en omgekeerd. Het historische centrum van Gouda, bijvoorbeeld, vertoont over het algemeen iets hogere OCR-waarden dan diverse buitenwijken. De dalingsnelheid is relatief laag doordat de ondergrond veel langer belast is geweest door dikke ophooglagen. In vergelijking met het bodemdalingsmodel dat is gebruikt voor de bodemdalingsprognose voor Zuid-Holland (2020), waarin de OCR waarden voor veen en klei constant zijn, zijn de OCR-waarden in dit geparametriseerde model sterk ruimtelijk gedifferentieerd.

Het gebruikte python script is opgenomen in Bijlage B.



Figuur 9 Resultaat parametrisatie van  $OCR_{klei}$  en  $OCR_{veen}$ .



Figuur 10 Resultaat van de initiële bodemdaling (rechts) in vergelijking met de gebruikte schatting op basis van InSAR (links). Het verschil is overal < 1 mm/jaar.

## 6 Discussie

In deze studie is een aanpak gepresenteerd waarmee de parametrisatie van het isotachenmodel in gebiedsdekkende toepassingen kan worden 'ingeregeld' op een schatting van de maaivelddalingsnelheid (door compactie) die wordt verkregen uit radarsatellietmetingen (InSAR). Dit biedt de mogelijkheid om bodemdalingsprognoses te verbeteren.

In de 'oude aanpak' werd een vaste set van parameterwaarden per lithoklasse (veen, klei) gebruikt. Met die aanpak schaalde de initiële dalingsnelheid door compactie met de dikte van veen en klei in het ondergrondmodel. Met name in de bebouwde omgeving levert dat over het algemeen geen realistische startsituatie (Figuur 6). Met de nieuwe aanpak is de parametrisatie impliciet afgestemd op historie van ingrepen (belastingen) die de ruimtelijk verschillen in zakking (restzetting) bepalen.

De nauwkeurigheid waarmee een schatting van maaiveldddaling kan worden geproduceerd met de parametrisatie is in principe zeer hoog (Figuur 10). De uitdaging is daarom vooral om een zo goed mogelijke schatting van maaiveldddaling – in dit geval uit InSAR data - te verkrijgen. De gepresenteerde casus Gouda laat zien dat daarvoor diverse keuzes moeten worden gemaakt, en dat kennis van de datasets daarbij van belang is. Aandachtspunten daarbij zijn:

- Gebruik van verticale deformatiesnelheden. Wanneer de InSAR datasets Line of Sight (LOS) data betreft, dan dienen ze eerst gecorrigeerd te worden.
- Het scheiden van deformatie van maaiveld en andere objecten. Filteren op hoge punten (of lage snelheden) die naar verwachting deformatie van gebouwen of gefundeerde infrastructuur weergeven in plaats van de deformatie van het maaiveld.
- De gebruikte referentie. Is deze naar verwachting voldoende 'stabiel'?
- Of er andere bijdragen zijn aan bodemdaling in de datasets. Wanneer er bijvoorbeeld een bijdrage is van bodemdaling door gas- of zoutwinning, dan moet hiervoor worden gecorrigeerd om te voorkomen dat deze bijdrage 'terecht komt' in de parametrisatie van Holocene slappe bodemlagen.
- De combinatie van verschillende datasets, onder andere van ascending en descending banen en PS en DS.
- De verwerking van de meervoudige schattingen per gridpunt/cel. In de casus Gouda is bijvoorbeeld gekozen voor gebruik van het 1<sup>e</sup> kwartiel.
- Toekenning van waarden voor gridpunten waarvoor geen of zeer weinig informatie beschikbaar is. In de huidige studie is dit niet geadresseerd.

Het feit dat de parametrisatie een passende initiële maaivelddalingsnelheid oplevert betekent niet dat de parameterwaarden in andere opzichten ook valide zijn. Ten eerste zijn er andere combinaties van vier parameterwaarden (a,b,c, en OCR) die dezelfde kruipreksnelheid opleveren (vgl. 1). Ten tweede kunnen de bijdragen van bodemlagen of lithoklassen aan de maaiveldddaling anders zijn verdeeld dan aangenomen in de optimalisatiemethode. De parameterwaarden kunnen daarom afwijken van onafhankelijke bepalingen uit laboratoriumtests. Deze laatste kunnen wel gebruikt worden als extra randvoorwaarde om de optimalisatie aan te passen.

Ten slotte wordt er in de optimalisatie vanuit gegaan dat het isotachenmodel (Figuur 3; vgl. 1) valide is voor een groot bereik van OCR waarden, ook voor hoge waarden waarvoor de kruipreksnelheid zeer laag wordt. Dat is onzeker. Hoewel de geoptimaliseerde parameterwaarden dus een passende initiële dalingsnelheid geven, is het daarmee niet



gegarandeerd dat het geparametriseerde model een nauwkeurige prognose geeft van de compactie die wordt veroorzaakt door belastingen zoals ophogingen of grondwaterstandsverlaging. De toepasbaarheid van het isotachenmodel voor kleine belastingen wordt onderzocht in andere deelprojecten van RDBGH project 42.

De parametrisatiemethode is/wordt inzetbaar voor verbetering van bodemdalingsprognoses voor het landelijke gebied in het Groene Hart onder de volgende twee voorwaarden:

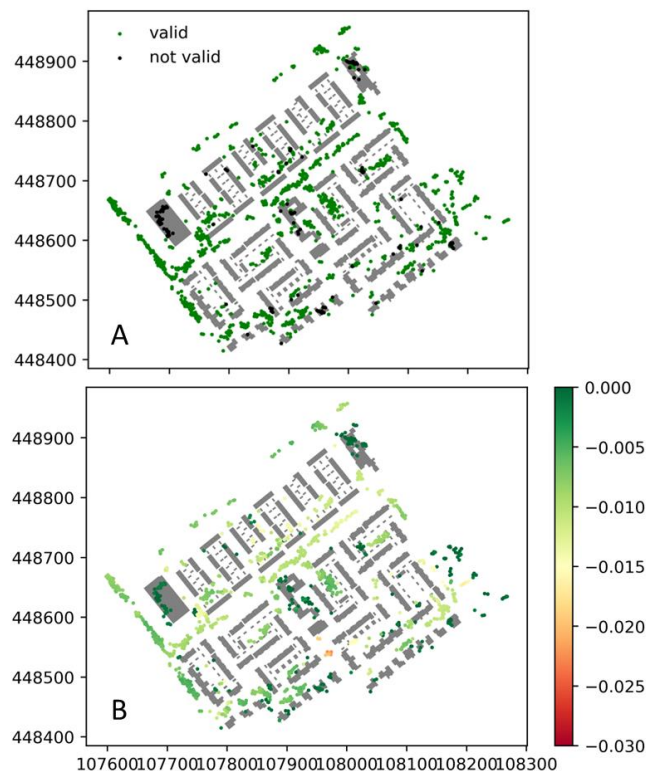
- A. Schattingen van de maaiveldalingsnelheid op basis van InSAR (en aanvullende technieken) zijn beschikbaar voor het buitengebied.
- B. Er kan een goede schatting worden gemaakt van de bijdrage van compactie in de maaiveldaling.

Stap A zal naar verwachting worden bereikt met de resultaten van RDBGH project 44. Stap B is vooralsnog een grote uitdaging voor het grootste deel van het veenweidegebied waar veenoxidatie naar verwachting de grootste bijdrage levert aan maaiveldaling. Voor gebiedsdelen waar veenoxidatie verwaarloosbaar is – bijvoorbeeld droogmakerijen met kleibodems - en InSAR betrouwbaar is en significante daling laat zien, is de methode direct inzetbaar.

## Bijlage A; filtering op gebouwen als optie

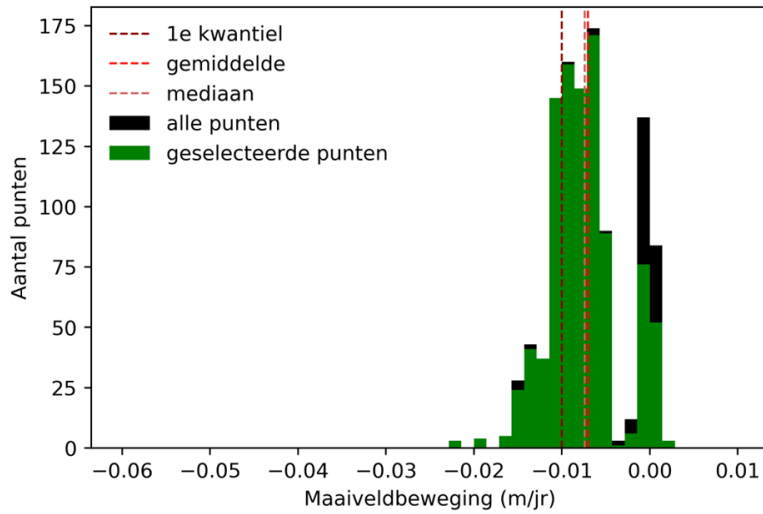
Het leidt geen twijfel dat de datasets met lage punten een betere schatting voor maaiveldddaling opleveren dan de datasets met hoge punten<sup>7</sup>, of waarin geen onderscheid in hoge en lage punten wordt gemaakt. Voor een proeflocatie rond de Mercatorsingel in Gouda is echter nader gekeken naar de locaties van de lage punten ten opzichte van gebouwen en de geschatte snelheden daarvan. Daaruit wordt geconcludeerd dat circa 10% van de reflectiepunten in de dataset waarschijnlijk op gebouwen ligt en dat deze vrijwel geen daling vertonen (Figuur 11 en Figuur 12). Dit levert een systematische afwijking (bias) in schattingen voor de gerasterde maaiveldddaling. Verwijdering van deze punten uit de dataset kan dus ook worden overwogen. Dat is hier echter niet gedaan.

Voor de locaties van gebouwen is gebruik gemaakt van BAG GeoPackage (versie 07-2020).



*Figuur 11 (A) Locaties van de lage reflectiepunten (distributed scatterers) ten opzicht van gebouwen (grijs). Punten die op gebouwen vallen zijn zwart weergegeven; punten die niet op gebouwen vallen zijn groen weergegeven. Ca. 10% van de punten ligt volgens deze systematiek op gebouwen; er is daarbij geen rekening gehouden met de fout in de locatiebepaling. (B) Lineaire snelheid van de punten. Hierin valt te zien dat de punten die op gebouwen zouden liggen over het algemeen 'geen' daling laten zien.*

<sup>7</sup> De precieze werkwijze voor de scheiding hoog-laag is niet terug gevonden in het 'FactualReport' dat bij de datasets was geleverd. Bij lage punten komen hoge waarden voor met hoogte van rond +5 m NAP. Bij hoge punten komen lage waarden voor met hoogte met hoogte van ca. -1 m NAP.



Figuur 12 Histogram van de snelheid van de punten van Figuur 11B. De 'punten op gebouwen' zijn hier te herkennen door de zwarte kleur.

## Bijlage B; scripts

```
import xarray as xr
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from simulate import run_atlantis_gouda
from simulate_column import run_column

path_parameters = r'../data/1-external/parameters_pzh.tsv'
path_dataset = r'../data/1-external/Atlans_PZH_input.nc'
path_output = r'../data/3-model/temp.nc'

# Open ondergrondmodel
template = xr.open_dataarray(r'../data/2-interim/template.nc')
x_slice = slice(template.x.min().item(),template.x.max().item())
y_slice = slice(template.y.max().item(),template.y.min().item())
dataset = xr.open_dataset(path_dataset).sel(x=x_slice, y = y_slice)

# valid where lithology is not -1
valid = dataset.lithology != -1

# define start OCR
pop_ocr = xr.full_like(dataset.lithology.astype(float), 1.25).where(valid)
valid_peat = dataset.lithology == 1
valid_clay = dataset.lithology == 2
fact = 2.23 / 1.56 # veen / klei
pop_ocr = pop_ocr.where(~valid_peat,fact).where(valid)
pop_ocr = pop_ocr.where(~valid_clay,1.).where(valid)

# open InSAR observation grid
observations = xr.open_dataset(r'../data/2-interim/tsx_comb_ds_gridded.nc')['perct_25']
obs = observations.values

# start simulation
ny, nx = template.shape

ocr_clay_final = template.copy()
ocr_peat_final = template.copy()
sub_final = template.copy()

for i in range(ny): # loop over rows
    for j in range(nx): # loop over columns
        observation = obs[i,j]
        if ~np.isnan(observation) & ~np.isnan(dataset.isel(y=i,x=j).phreatic_level):
            subsidence_init = run_column(path_parameters,
dataset.isel(y=i,x=j),pop_ocr.isel(y=i,x=j))
            dif = subsidence_init - observation
            if dif > 0:
                valid_peat_col = dataset.lithology.isel(y=i,x=j) == 1
                valid_clay_col = dataset.lithology.isel(y=i,x=j) == 2
                ocr = pop_ocr.isel(y=i,x=j)
```

```

count = 0
ocr_clay = 1.0
while (dif > 0.001) & (count <= 50): #continue raising OCR until dif (sim - obs) is <
1 mm/jaar or max of 50 iterations

    ocr_peat = ocr_clay * fact
    ocr[valid_clay_col] = ocr_clay
    ocr[valid_peat_col] = ocr_peat
    subsidence = run_column(path_parameters, dataset.isel(y=i,x=j),ocr)
    dif = subsidence - observation
    # print(dif, ocr_clay, ocr_peat)
    count += 1
    ocr_clay += 0.02
ocr_clay_final[i,j] = ocr_clay
ocr_peat_final[i,j] = ocr_peat
sub_final[i,j] = subsidence

# write output
ocr_clay_final.to_netcdf(r'../data/3-model/ocr_clay_final_ds_dsc.nc')
ocr_peat_final.to_netcdf(r'../data/3-model/ocr_peat_final_ds_dsc.nc')
sub_final.to_netcdf(r'../data/3-model/sub_final_ds_dsc.nc')

```

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)