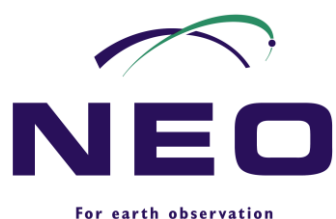
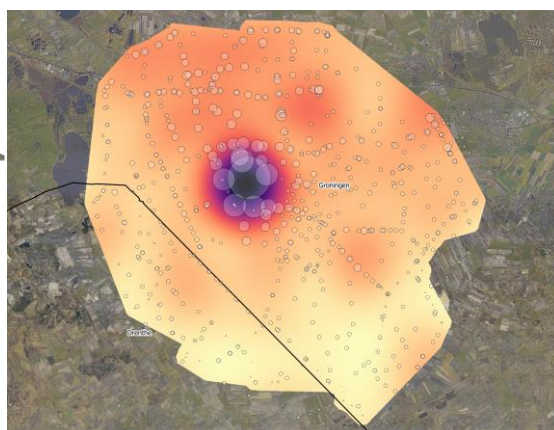
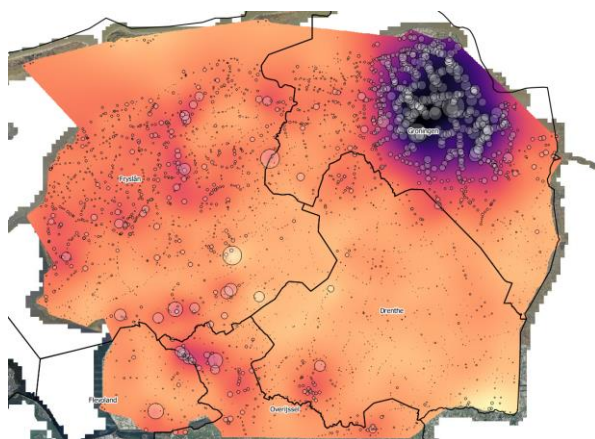


# RAPPORTAGE VERWERKEN BODEMDALINGSGEGEVENS

## RVO IMG

DECEMBER 2023



NEO, Netherlands Geomatics & Earth  
Observation B.V., Amersfoort

## Inhoud

1	Inleiding .....	3
1.1	Opdracht.....	3
1.2	Leeswijzer .....	4
2	Data en methodiek.....	4
2.1	Maaiveldhoogtedata .....	4
2.2	Verwijdering van uitbijters .....	5
2.3	Ruimtelijke interpolatie door middel van kriging.....	5
2.4	Bepalen van de kromming.....	6
2.5	Kwaliteit.....	6
3	Leveringen .....	7
3.1	Algemeen.....	7
3.2	Noord-Nederland .....	8
3.3	Veendam .....	8
4	Gevoeligheidsanalyse .....	10
4.1	Analyse op basis van peilmerkdata .....	10
4.2	Gevoeligheidsanalyse op de interpolatiemethode .....	10
4.2.1	Variatie met kriging parameters.....	12
4.2.2	Variatie met krigingmethode .....	17
5	Conclusies.....	25
	Bijlage 1: Kriging parameters .....	26
	Bijlage 2: Analyse van foutenvoortplanting in kromming- en bollingsrasters .....	29

## Colophon

Auteur	Organisatie	Versie	Datum	Goedgekeurd
Y. Xiong en S. Braakman	NEO	0.3	18 Dec 2023	Nee
S. Braakman	NEO	1.0	21 Dec 2023	Ja

NEO projectnummer: B143

# 1 Inleiding

## 1.1 Opdracht

In deze rapportage levert NEO de resultaten van de interpolatie van bodemdalingsgegevens op die voor het Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG) is uitgevoerd.

De Commissie Mijnbouwschade (CM) en IMG werken op dit moment samen om de gecombineerde effecten van meervoudige mijnbouwactiviteiten te bepalen. Dit is het geval in het werkgebied van het IMG waar er ook sprake is van diepe bodemdaling door gaswinning uit kleine velden of door zoutwinning. Om een goed totaalbeeld te krijgen van het verloop van de diepe bodemdaling in de tijd en ruimte hebben IMG en CM informatie nodig over bodemdaling. Specifiek gaat het om integrale interpolatie van de diepe bodemdaling in het gehele IMG-werkgebied (de “Huizinge cirkel” en twee deelgebieden rondom de Pekela’s en Norg, zie Figuur 1) en in daarnaast gelegen gebieden, voor zover daar diepe bodemdaling nog van belang kan zijn bij de beoordeling van indirecte effecten van diepe bodemdaling.



**Figuur 1** *Overzicht van de verschillende relevante meetgebieden (roodomlijnd). Onderliggend kaartblad laat de verschillende gas- en olievelden zien. De cirkel is de “Huizinge cirkel” en omvat het grootste deel van het IMG gebied*

Een geïntegreerde interpolatie betekent dat de gegevens van meerdere overlappende meetgebieden op een integrale wijze dient te worden geanalyseerd in tijd en ruimte. Er dient een betrouwbare ruimtelijke interpolatie van de totale gemeten bodembeweging te worden gebruikt. Specifieke aandacht dient uit te gaan naar de diepe bodemdaling door zoutwinning rondom Veendam. Hier is de diepe bodemdaling groter en de bodemdalingskom dieper en steiler dan in het omringende gebied.

De eerder gebruikte interpolatietechniek (Kriging) dient bij voorkeur gebruikt te worden. Op basis van de geïnterpoleerde bodemdalingskaarten dienen ook kaarten van de kromming te worden geproduceerd (in het Engels: *curvature maps*). Tot slot vraagt u om een gevoeligheidsanalyse van de krommingsdata.

## 1.2 Leeswijzer

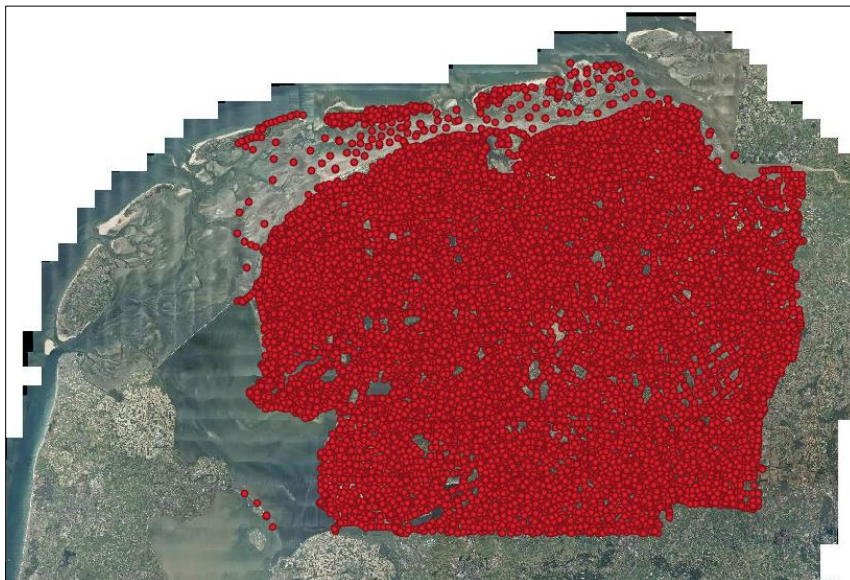
In Hoofdstuk 2 worden de data en methodiek van de interpolatie beschreven. De resultaten van de interpolaties worden gepresenteerd in Hoofdstuk 3 voor respectievelijk Noord-Nederland en Veendam. In Hoofdstuk 4 wordt een Gevoeligheidsanalyse voor de gebruikte interpolatiemethodiek behandeld.

## 2 Data en methodiek

### 2.1 Maaiveldhoogtedata

Startpunt voor de analyse zijn gegevens over maaiveldhoogte. NEO heeft van Rijkswaterstaat een dataset met historische NAP-metingen ontvangen. Deze dataset omvat peilmerken uit heel Noord-Nederland (zonder Noord-Holland), zoals weergegeven in Figuur 2. Alle geleverde resultaten zijn afgeleid van deze NAP-peilmerken uit Noord-Nederland.

De peilmerken bevatten hoogtemetingen die gedaan zijn tussen 1960 en 2021. Voor elk van deze jaren is een interpolatie gedaan van de bodemdaling tussen 1960 en het betreffende jaar. Deze interpolatie bestaat uit een lineaire interpolatie van de bodemdaling per punt, gevolgd door een ruimtelijke interpolatie door middel van kriging voor alle punten met meetwaarden over de betreffende periode.



**Figuur 2** Locatie van in interpolatie meegenomen NAP-peilmerken

Voor veel peilmerken is er maar elke 5-10 jaar een meting gedaan. Voor het maken van een ruimtelijke interpolatie is het wenselijk om zoveel mogelijk data te kunnen gebruiken. Daarom is er een lineaire interpolatie toegepast om gaten tussen metingen op te vullen. In deze lineaire interpolatie is alleen rekening gehouden met jaartallen en niet met de precieze datum binnen dat jaar waarop de metingen gedaan zijn.

## 2.2 Verwijdering van uitbijters

In de gemaakte dataset zijn uitbijters aangetroffen. Deze punten zorgen voor extra onzekerheid in de interpolatie (kriging). De onderstaande regels zijn gebruikt om deze punten te herkennen en verwijderen.

error_code =1	Bij dit punt is (een) meting(en) met een bodemdaling van meer dan 1000 mm.
error_code =2	Bij dit punt is (een) meting(en) met een bodemdaling van meer dan 100 mm.
outlier_sp = -1	Een handmatig geselecteerde uitbijter die tijdens ruimtelijke visuele inspectie van jaarlijkse bodemdaling (op een kaart) aan het licht gekomen is.
outlier_sp > =1	Het aantal jaren met waarin metingen op dit punt een z-waarde (statistische toets) van kleiner dan -30 of groter dan 30 hebben. Het berekenen van de Z-score wordt hieronder verder toegelicht.

De Z-score (of gestandaardiseerde vorm) is een statistische methode om een aantal waarden in een normale verdeling te zetten. De Z-score van alle punten is berekend op basis van alle punten binnen 2 km horizontaal en verticaal van een punt liggen. De maximale afstand van een punt binnen dat voor de Z-score nog meegenomen wordt is dus  $\sqrt{2^2 + 2^2} = 2.82 \text{ km}$  van het punt. Naarmate een kleiner bereik van Z-scores goedgekeurd wordt, worden steeds meer goede punten onterecht afgekeurd. Daarom is ervoor gekozen alleen heel extreme waarden, met een Z-score van kleiner dan -30 of groter dan 30, af te keuren.

De onderstaande punten zijn herkend als uitbijters:

011D0016, 011D0019, 011D0082, 012D0006, 016H0080, 021E0005, 022E0088, 003C0012, 006D0068, 011D0074, 011E0113, 011H0050, 021B0030, 015E0132, 006G0113, 008C0055, 016E0049, 016H0020.

## 2.3 Ruimtelijke interpolatie door middel van kriging

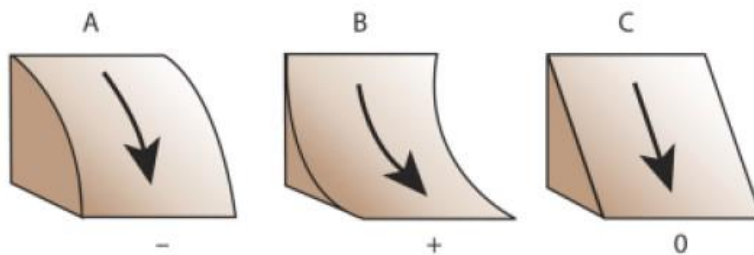
Door de hoogte t.o.v. het referentiejaar 1960 af te trekken van waarden van latere jaren, is de bodemdaling over de gekozen periode berekend. Met behulp van de programmeertaal R is er kriging (een uit de mijnbouw afkomstige interpolatiemethode, ontwikkeld in de jaren '60 door de Zuid-Afrikaanse mijnbouwkundige en statisticus Danie G. Krige) gebruikt voor ruimtelijke interpolatie. Kriging berekent een waarde voor elk mogelijk punt, door middel van een gewogen gemiddelde van de bekende waarden (peilmerken) in de omgeving.

Voor de ruimtelijke interpolatie d.m.v. kriging is programmeertaal R gebruikt. Kriging is gedaan met behulp van de functie `autokrige` (automatische kriging) uit het pakket *automap*. Deze functie kiest automatisch de parameterwaarden van het model met de kleinste resterende kwadratensom (residual sum-of-squares, RSS) op basis van 5 populaire modellen (Spherical, Exponential, Gaussian, Matern, M. Stein). Voor deze functie zijn default-instellingen gebruikt.

Om de resultaten reproduceerbaar te maken en om interpretatie te verbeteren, worden respectievelijk de gekozen parameterwaarden (*model*, *nugget*, *sill en range*) en de standard error-waarden van de interpolatie, die een indicatie geven van de betrouwbaarheid van het resultaat, meegeleverd. De gekozen parameterwaarden zijn opgenomen in bijlage 1 van dit rapport.

## 2.4 Bepalen van de kromming

Op basis van de geïnterpoleerde bodemdalingskaarten worden rasters van de kromming geproduceerd. Er worden verschillende termen gebruikt zoals kromming en bolling, de definities lichten we hier toe. Als waarden in dit raster precies 0 zijn, betekent dit dat het oppervlak vlak is: de helling is constant. Een positief getal geeft kromming aan (de bodemdalingskom, een 'dal'), een negatief getal geeft bolling aan (een 'piek'). Dit wordt gevisualiseerd in Figuur 3. Een grotere absolute waarde geeft een sterkere verandering aan de helling aan, dus een sterkere kromming of bolling. De eenheid van de kromming-/bollingsrasters is bodemdalingseenheid/(mapping unit)<sup>2</sup>, dus in dit geval mm/m<sup>2</sup>.



**Figuur 3** Profielkromming. Links (A) negatieve waarden, dus bolling. In het midden (B) positieve waarden, dus kromming. Rechts (C): geen verandering in helling.

Doordat de gemeten bodemdalingsverschillen klein zijn, hebben de kromming- en bollingsrasters erg kleine waarden.

## 2.5 Kwaliteit

De kwaliteit van de geleverde producten is altijd gecontroleerd door een tweede persoon, om er zeker van te zijn dat het geleverde product voldoet aan de kwaliteitseisen.

## 3 Leveringen

### 3.1 Algemeen

De resultaten van interpolaties zijn in twee separate leveringen opgeleverd: Noord-Nederland en Veendam. In deze paragraaf worden de algemene aspecten van de leveringen benoemd. Bijzonderheden over de specifieke leveringen worden in de volgende paragrafen toegelicht.

Alle leveringen van geodata zijn gedaan in coördinatensysteem Rijksdriehoek (RD New, EPSG:28992). De onderstaande koppen komen steeds overeen met een in de levering opgenomen map. In de leveringen zijn steeds de volgende producten opgenomen:

#### *Peilmerken*

Peilmerken worden geleverd in ESRI shapefile formaat, met daarin alleen de peilmerken met bekende coördinaten. De attributen die in deze shapefiles aanwezig zijn, en hun betekenis, worden hieronder toegelicht:

- **punt:** *het ID van het peilmerk*
- **X:** *X-coördinaat in Rijksdriehoek (EPSG:28992)*
- **Y:** *Y-coördinaat in Rijksdriehoek (EPSG:28992)*
- **Nulmeting:** *Het jaar waarin de eerste meting (nulmeting) verricht is.*
- **hgtJAAR:** *De gemeten hoogte in het JAAR, in meters*
- **diffJAAR:** *Het gemeten verschil in hoogte tussen het JAAR en 1960, in millimeters.*
- **error\_code:** In de dataset bevinden zich enkele uitbijters: extreme waarden die waarschijnlijk onjuist zijn.
- **outlier\_sp:** *this Deze kolom duidt aan dat een punt herkend is als een lokale uitbijter. Dit wordt berekend door middel van de Z-score van alle punten binnen 2 km horizontaal en verticaal. Een punt is een uitbijter als de Z-score groter is dan 30 of kleiner dan -30. Outlier\_sp krijgt dan waarde 1. Als er visueel vastgesteld wordt dat een punt voor een verslechtering van de ruimtelijke interpolatie zorgt, wordt dit punt uitgesloten van kriging. Dit wordt gedaan door een waarde -1 toe te kennen aan attribuut outlier\_sp. Een waarde 0 betekent dat een punt niet als uitbijter gedetecteerd wordt. Dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 3.*

#### *Interpolated\_subsidence\_map*

Per jaar is er een ruimtelijke interpolatie van de geïnterpoleerde bodemdalingswaarden gedaan. De bodemdaling is dus eerst per peilmerk geïnterpoleerd door de tijd heen, en daarna ruimtelijk geïnterpoleerd door middel van kriging. Deze methode wordt verder toegelicht in hoofdstuk 3.2.

Op basis van beschikbare peilmerken wordt bepaald voor welk gebied bodemdaling geïnterpoleerd wordt. De oppervlakte van de meetplangebieden is gemaakt door een combinatie van enerzijds de 'concave hull'-functie (holle schil) en anderzijds de bufferfunctie, die een polygoon vergroot. De 'concave hull'-functie spant als het ware een elastiek om de bekende coördinaten van peilmerken. Een van de parameters van deze functie is de alfa-waarde. Deze is zo gekozen, dat de polygoon de buitenste peilmerken redelijk nauwkeurig volgt. Hiermee wordt voorkomen dat de polygoon veel groter als de peilmerken een onregelmatige vorm hebben. De bufferfunctie (afstand 50 meter) vergroot deze polygoon zodat ook het gebied iets buiten het buitenste peilmerk nog tot het meetplangebied

gerekend wordt. De bodemdaling is berekend tussen JAAR1 en JAAR2. Binnen dit project is JAAR1 altijd 1960. JAAR2 is een serie van alle jaren tussen 1961 en 2021. In de andere datasets verwijzen JAAR1 en JAAR2 steeds naar hetzelfde. Deze bestanden zijn afgeleid van het geïnterpoleerde bodemdalingsraster.

#### *Interpolated\_subsidence\_map\_StdError van de gedane interpolatie (kriging)*

Een van de bijproducten van kriging (en een belangrijke reden om voor Kriging te kiezen) is de productie van een Standard Error-raster. Dit product kwantificeert de onzekerheid in de interpolatie. Een lagere onzekerheid (meestal dicht bij peilmerken) betekent dat de interpolatie betrouwbaarder is.

#### *Contourlines*

Naast de geïnterpoleerde bodemdalingsrasters, standard errorrasters en een bijbehorende polygon van elk meetplangebied, worden er ook contourlijnen geleverd. Deze contourlijnen zijn lijnen van gelijke bodemdaling, afgeleid van de geïnterpoleerde bodemdalingsrasters, en hebben een verticaal interval van 1 mm. Deze dataset wordt geleverd als ESRI shapefile.

#### *Kriging\_settings*

Deze levering bestaat uit jaarlijkse interpolaties van bodemdaling in Noord-Nederland tussen 1960 en 2021. De kriging settings zijn opgenomen in Bijlage 1.

### **3.2 Noord-Nederland**

Alle geleverde rasters hebben een GeoTiff-formaat en een pixelgrootte van 100x100 meter.

De volgende bestanden zijn opgeleverd:

*Northfield\_peilmerken\_interpolated\_diff.shp* (19315 peilmerken)

*Northfield\_intp\_bodemdalingskommen\_DJAAR1\_JAAR2.tif* (61x)

*Northfield\_intp\_bodemdalingskommen\_DJAAR1\_JAAR2\_StdError.tif* (61x)

*Northfield\_intp\_kriging\_krommingenbolling\_DJAAR1\_JAAR2.tif* (61x)

*Northfield\_contourline\_DJAAR1\_JAAR2.shp* (61 shapefiles)

### **3.3 Veendam**

De nieuwe interpolaties van het meetplangebied Veendam zijn gedaan met een pixelgrootte van 5 meter. Deze resolutie is hoger dan eerdere interpolaties van Noord-Nederland. Voor Noord-Nederland is een pixelgrootte van 100 bij 100 meter gebruikt. Dit is terug te zien in de bestandsgrootte van de geïnterpoleerde bodemdalingsrasters ( $\pm 58$  MB voor Veendam versus  $\pm 5$  MB voor Noord-Nederland) en de hoeveelheid rijen en kolommen in de geleverde rasters ( $\pm 4300 \times 4300$  pixels voor Veendam versus  $\pm 1300 \times 1100$  voor Noord-Nederland)



Voor de periode 1996-2020 is voor elke twee jaar (1996-1998, 1998-2000, enz.) een interpolatie gemaakt.

In Bijlage 1 zijn de kriging parameters van de interpolaties te vinden. Duidelijk te zien is dat de kriging parameters steeds vergelijkbare waarden hebben (nugget kleiner dan 10, sill kleiner dan 100, range kleiner dan 5000) maar dat de interpolatie van de periode 2004-2006 sterk afwijkt.

De volgende bestanden zijn opgeleverd:

*Veendam\_peilmerken.shp (717 peilmerken)*

*Veendam\_intp\_bodemdalingskommen\_JAAR1\_JAAR2.tif (12x)*

*Veendam\_intp\_bodemdalingskommen\_JAAR1\_JAAR2\_StdError.tif (12x)*

*Veendam\_intp\_kriging\_krommingenbolling\_DJAAR1\_JAAR2.tif(12x)*

*Veendam\_contourline\_DJAAR1\_JAAR2.shp (12 shapefiles)*

#### *De interpolatie Veendam 2002-2004*

Na het verwijderen van diverse mogelijke uitbijters ziet de interpolatie van de bodemdaling er nog steeds niet realistisch uit: er zijn nog altijd “bulls-eye” patronen te zien. Van de resterende punten is niet duidelijk welke punten hiervan de oorzaak zijn, omdat alle punten voldoen aan de controles. Een mogelijke oorzaak zijn onnauwkeurige meetwaarden: sommige punten bevinden zich vlak bij elkaar (geometrisch gezien) maar hebben grote verschillen in bodemdaling. Dit is in andere jaren niet zo. Dit beïnvloedt de nauwkeurigheid van de kriging.

Voorbeelden hiervan zijn de volgende:

- 007H0278 en 007H0270 liggen 1 meter uit elkaar, maar hebben 12 mm verschil in bodemdaling;
- 012F0070 en 012F0186 liggen 20 meter uit elkaar, maar hebben 16 mm verschil in bodemdaling.

## 4 Gevoeligheidsanalyse

NEO heeft een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de interpolatiemethodiek. Er is gekeken naar twee aspecten: (1) vergelijking op basis van peilmerkdta en (2) een gevoeligheidsanalyse op de interpolatiemethode.

### 4.1 Analyse op basis van peilmerkdta

In eerste instantie is gekeken naar de propagatie van fouten in het proces om te komen van de peilmerkdta naar krommingsinformatie over de bodemdalingsverschillen. Op basis van deze data is het lastig conclusies te trekken over de propagatie van eventuele meetfouten. Uiteindelijk is ook de conclusie dat een vergelijking alleen op basis van de foutmarges in de meetfouten niet in overeenstemming is met de aanname dat de bodemdaling de vorm heeft van een bodemdalingskom. Een dergelijke analyse is derhalve niet zinnig. Er is voor het vervolg van de analyse aangenomen dat er geen fouten in de peilmerkdta aanwezig is (afgezien van de eerder gedefinieerde uitbijters).

Wel is de gebruikte bodemdalingsdata vergeleken met dat van andere meetcampagnes. Hieruit is gebleken dat de verschillende meetcampagnes in de provincies Groningen en Friesland tot vergelijkbare resultaten leiden. Er is ook gekeken naar de mogelijkheid om een vergelijk te maken met een andere meetmethode. Daarbij kwam één methode in beeld, namelijk deformatiemetingen op basis van satellietdata. Data van deze zogenaamde InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) techniek is open beschikbaar via de European Ground Motion Service<sup>1</sup> (EGMS), een dienst uit het Europese Copernicus programma. Een een op een vergelijk is echter niet zinvol in de context van dit project aangezien ook ondiepe bodemdaling in de InSAR metingen vertegenwoordigd is. De bevindingen van deze analyse zijn te vinden in Bijlage 2.

### 4.2 Gevoeligheidsanalyse op de interpolatiemethode

In tweede instantie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de interpolatiemethode van de bodemdalingsdata. Dit is gedaan op basis van variaties in de parameters van de Kriging methode. De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op één dataset waarvan we weten dat deze een significante bodemdalingskom met grote krommingswaarden bevat, namelijk het Veendam-gebied voor de bodemdaling over het tijdsinterval 1999-2018.

Het doel van de analyse is IMG inzicht te verschaffen in de variatie van de uitkomsten, zodat IMG een oordeel kan vormen over de gevoeligheid. We beschrijven de variatie van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse. Er zijn 5 verschillende scenario's uitgerekend. In Tabel 1 worden deze weergegeven.

---

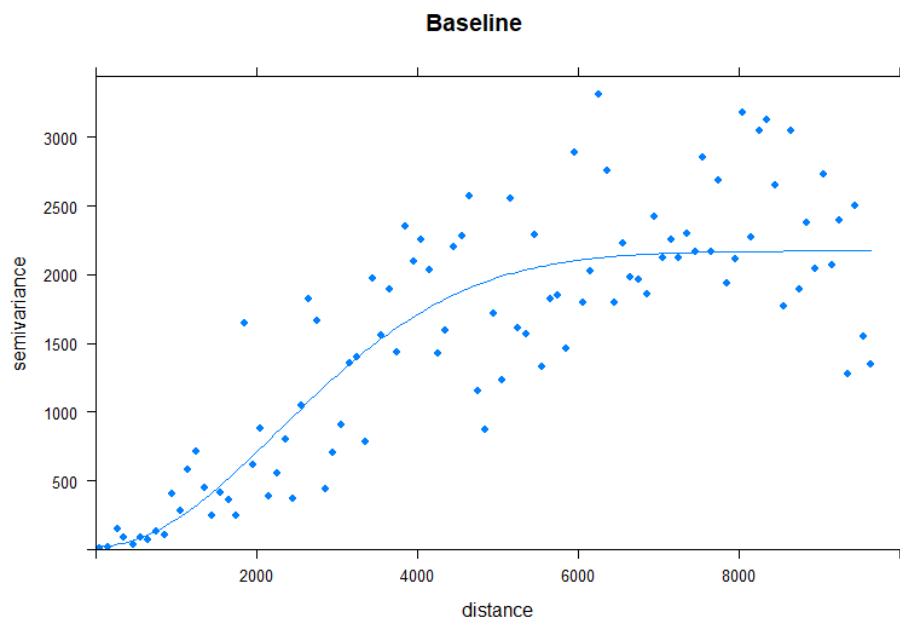
<sup>1</sup> Zie <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>

Tabel 1 De vijf scenario's die gehanteerd zijn voor de gevoeligheidsanalyse.

	Scenario	Intp. Interval	Model	Grid size (m)	# subs. map	# vario-grams	#curv . maps	#Curv . Diff. Map Abs.	#Curv . Diff. Map Pct.
1	Referentie - default fit	1999_2018	Gaussian	10	1	1	1	NA	NA
2	Ref - up limit fit	1999_2018	Gaussian	10	1	1	1	1	1
3	Ref - low limit fit	1999_2018	Gaussian	10	1	1	1	1	1
4	ModelOption 2 -default fit	1999_2018	Ste	10	1	1	1	1	1
5	ModelOption 3 -default fit	1999_2018	Exp	10	1	1	1	1	1

Er wordt gevarieerd in de fitting methode van de kriging (Gaussian, Matern Steins parametrisation en Exponential modellen) en in de kriging parameters (nugget, sill en range). Deze krigingparameters volgen automatisch uit variaties in de fitting curve die samenhangt met kriging methode.

Scenario 1 is de referentie. Dit is het model dat wordt uitgevoerd met een set automatisch gegenereerde model- en Kriging-parameters. Het referentiemodel gebruikt de Gaussian fitting methode. In het semi-variogram van de peilmerken bodemdalingsdata in Veendam, zie Figuur 4, zijn de bodemdalingsdata met een grouping van 100m afstand weergegeven. Ook de fitting curve is getekend. De curve is bepaald met een Gaussian fitting methode. Uit het semivariogram worden vervolgens de fitting parameters (nugget sill en range) afgelezen (zie Tabel 2). Met deze parameters wordt de interpolatie naar een bodemdalingskaart uitgevoerd.



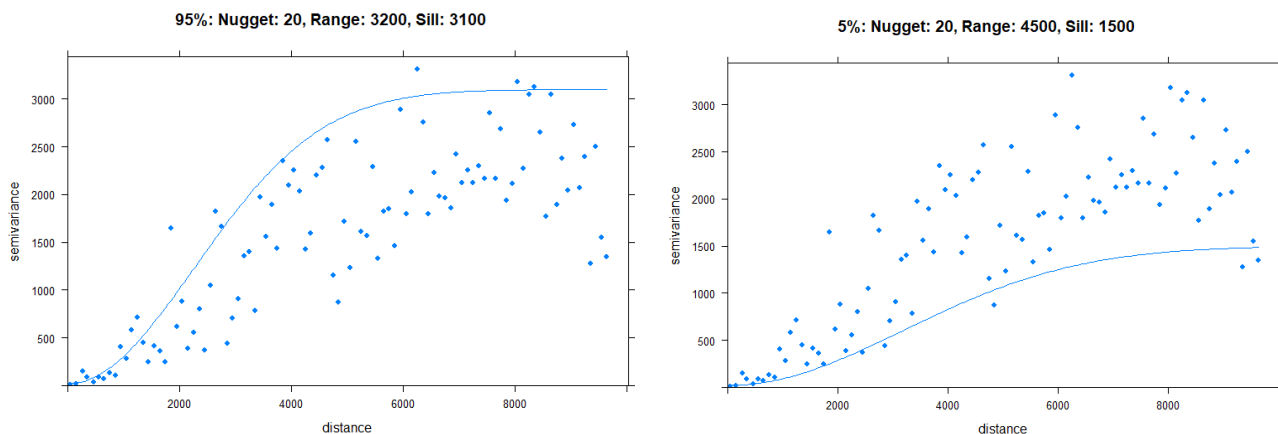
Figuur 4 Semivariogram en fitting curve voor het referentiescenario.

Tabel 2 automatically fitted model and kriging parameters.

Model setting	Nugget	Sill	Range
Gau	20.97015	2151.409	3219.335

#### 4.2.1 Variatie met kriging parameters

Scenario's 2 en 3 hebben dezelfde fitting methode gebruikt als de referentie, alleen hebben we gevarieerd met de fitting door de puntenwolk in het semivariogram. Scenario 2 is gefit door de bovengrens van de puntenwolk (*upper*) en Scenario 3 is gefit door de ondergrens van de puntenwolk (*lower*), zie Figuur 4. Deze twee fittingen leveren elk een andere set aan kriging parameters op en dus elk een ander resultaat aan interpolatie van bodemdalingsgegevens.



Figuur 1 Left: curve that fit upper bound of the point cloud. Right: curve that fit lower bound of the point cloud.

Om de gevoeligheidsanalyse op deze uit te voeren hebben we 4 soorten kaarten gemaakt, te weten:

1. Drie geïnterpoleerde bodemdalingskaarten met behulp van de 3 sets krigingparameters (de referentie, boven, onder);
2. Drie krommingskaarten gebaseerd op de drie geïnterpoleerde bodemdalingskaarten;
3. Twee krommingsverschilkaarten (referentieverschil met de bovenste, referentieverschil met de onderste): krommingsverschilkaart = bovenste of onderste aangepaste krommingskaart – basislijnkrommingskaart;
4. Twee percentagekaarten voor krommingsverschillen: percentage krommingsverschillen = kaart voor krommingsverschillen/basislijnkrommingkaart.

Voor het gemak worden de kaarten ook geleverd in een Qgis-project.

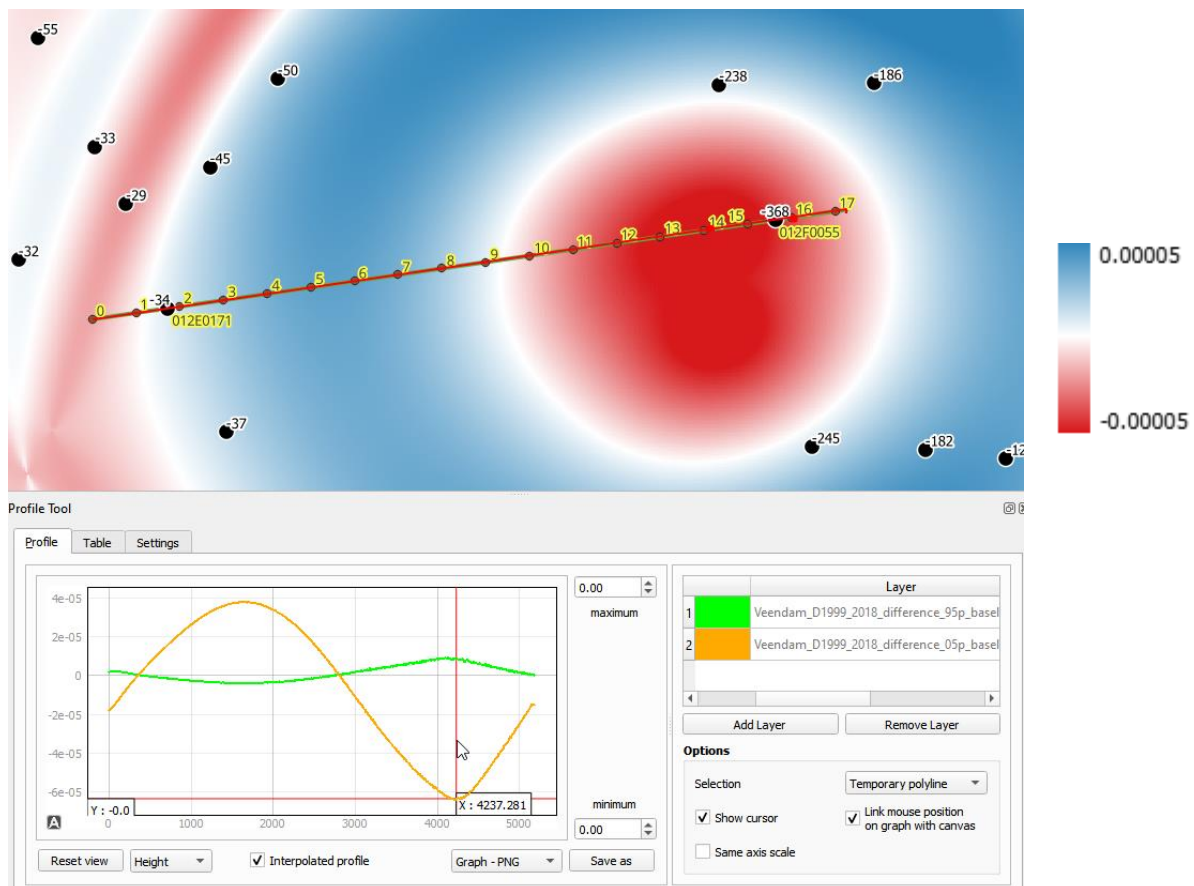
Ter ondersteuning van de beoordeling door IMG zijn twee dwarsdoorsneden over de bodemdalingskom gebruikt. Langs de doorsneden hebben we punten langs de doorsneden geplaatst en de werkelijke waarden van de verschillende kaarten toegevoegd (bodemdaling, kromming, verschillen, etc.). Dit maakt een praktijkgericht beeld mogelijk van de effecten van de bovenste en onderste benaderingen van de Kriging-aanpassing van de bodemdalingswaarden.

Er werden twee lijnen gekozen: lijn 1 ongeveer oost-west door de dalingskom, en lijn 2 ongeveer loodrecht op lijn 1. Langs de lijn hebben we elke 300 meter virtuele punten uitgezet en per punt worden de waarden van de datasets expliciet gemaakt. Ook zijn de peilmerken-datapunten verwerkt.

## Lijn 1

Lijn 1 wordt weergegeven in Figuur 5. Het gevisualiseerde raster is de Lowerfit\_baseline\_difference-kaart: het verschil in kromming tussen de referentie en de ondergrens, scenario 3. De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingwaarden in mm tussen 1999-2018.

Lijn 1 kruist de twee peilmerken (012E0171 en 012F0055). Het grootste verschil in kromming bevindt zich rond punt 6 (1800m) en punt 14 (4200m). Het krommingsverschil in Punt 6 ligt tussen  $3.95E-06$  en  $3.73E-05$  en het krommingsverschil in Point14 ligt tussen  $8.87E-06$  en  $-6.36E-05$ , zie Tabel 3.



**Figuur 5** Schermafbeelding van lijn1. Het gevisualiseerde raster is de Lowerfit\_baseline\_difference-kaart: het verschil in kromming tussen de referentie en de ondergrens, scenario 3. In het onderste deel van de figuur ziet u een profielgrafiek (dwarsdoorsnede): de oranje lijn is het verschil tussen de ondergrens fit (scenario 3) en de kromming van de referentie. De groene curve is het verschil tussen de bovengrens fit (scenario 2) en de kromming van de referentie.

Mogelijk is voor IMG de maatgevende indicator hoeveel de kromming tussen de scenario's verschilt op het punt van maximale en minimale kromming of bolling. In Tabel 3 kan ter hoogte van punt 4 worden afgelezen dat de bolling daar maximaal is (met waarde 0.000125238). De kromming van scenario 3 ondergrens is op dat punt 50% lager. De kromming van scenario 2, bovengrens, is 7% hoger.



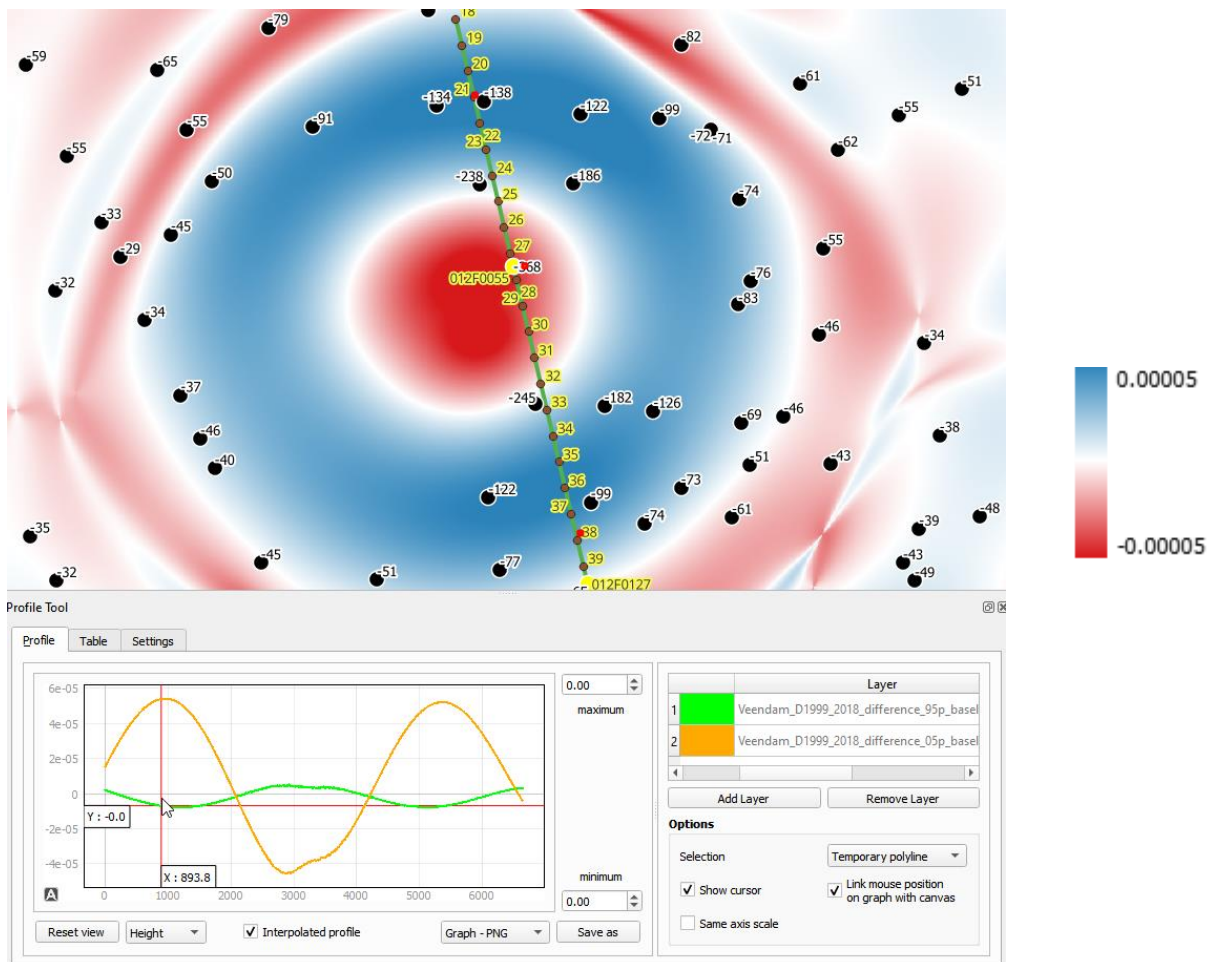
Tabel 3 Virtuele punten (18) en peilmerken (2) langs profiellijn 1. In geel de lokale maximale waarden.

ID	distance	baseline_subsidence	Lowerfit_subsidence	Upperfit_subsidence	baseline_curvature	Lowerfit_curvature	Upperfit_curvature	Lowerfit_baseline_diff	Upperfit_baseline_diff	Lowerfit_baseline_diffperc	Upperfit_baseline_diffperc
0	0	-24.921263	-22.167059	-25.108438	-1.04E-05	-2.89E-05	-8.77E-06	-1.85E-05	1.68E-06	176.65	-16.08
1	300	-27.459898	-28.515924	-27.395922	-3.43E-05	-3.70E-05	-3.34E-05	-2.75E-06	8.50E-07	8.02	-2.48
012EO 171	514.8	-31.22277	-35.065662	-30.97064	-4.73E-05	-4.03E-05	-4.78E-05	7.02E-06	-4.60E-07	-14.83	0.97
2	600	-33.457363	-38.41519	-33.130554	-5.21E-05	-4.12E-05	-5.30E-05	1.09E-05	-8.70E-07	-20.94	1.67
3	900	-43.772385	-51.687756	-43.266785	-6.42E-05	-4.17E-05	-6.64E-05	2.25E-05	-2.22E-06	-34.99	3.46
4	1200	-60.035954	-69.083534	-59.525845	-7.07E-05	-3.88E-05	-7.39E-05	3.19E-05	-3.18E-06	-45.13	4.5
5	1500	-82.55815	-89.984146	-82.31462	-6.96E-05	-3.24E-05	-7.33E-05	3.71E-05	-3.78E-06	-53.4	5.43
6	1800	-110.13843	-112.97762	-110.4548	-6.03E-05	-2.30E-05	-6.43E-05	3.73E-05	-3.95E-06	-61.88	6.55
7	2100	-143.87631	-138.66843	-145.10323	-4.26E-05	-1.08E-05	-4.58E-05	3.18E-05	-3.23E-06	-74.71	7.58
8	2400	-181.27682	-165.21869	-183.68982	-1.76E-05	3.22E-06	-1.98E-05	2.09E-05	-2.18E-06	-118.27	12.36
9	2700	-219.88281	-191.27086	-223.62794	1.18E-05	1.80E-05	1.17E-05	6.23E-06	-1.20E-07	52.75	-1.02
10	3000	-255.9616	-214.71834	-261.00745	4.26E-05	3.24E-05	4.46E-05	-1.02E-05	1.95E-06	-23.93	4.58
11	3300	-289.09576	-235.85927	-295.3186	7.30E-05	4.56E-05	7.64E-05	-2.74E-05	3.41E-06	-37.53	4.67
12	3600	-314.88516	-252.46863	-321.9171	9.85E-05	5.55E-05	0.00010437	-4.30E-05	5.82E-06	-43.63	5.91
13	3900	-331.25067	-263.51334	-338.63623	0.000116555	6.22E-05	0.000124043	-5.43E-05	7.49E-06	-46.6	6.43
14	4200	-337.7351	-269.0303	-344.96463	0.000125238	6.17E-05	0.000134107	-6.36E-05	8.87E-06	-50.74	7.08
15	4500	-332.5788	-267.97675	-339.09723	0.000115514	5.96E-05	0.00012192	-5.59E-05	6.41E-06	-48.38	5.55
012FO 055	4688.5	-324.82718	-264.5576	-330.73676	0.000104896	5.90E-05	0.000109678	-4.59E-05	4.78E-06	-43.72	4.56
16	4800	-317.9252	-261.19934	-323.3732	9.64E-05	5.76E-05	0.00010064	-3.88E-05	4.27E-06	-40.24	4.43
17	5100	-293.93503	-248.5463	-298.0054	7.05E-05	5.01E-05	7.13E-05	-2.04E-05	8.50E-07	-28.91	1.21

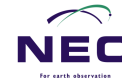
**Lijn 2**

Lijn 2 wordt weergegeven in de onderstaande afbeelding. Het gevisualiseerde raster is ook een Lowerfit\_baseline\_difference-kaart. Lijn 2 kruist de twee peilmerken (012F0055 en 012F0127), langs deze lijn zijn er nog meer meetpunten in de buurt. In Tabel 4 kunnen we zien dat het grootste verschil zich bevindt rond punt 22 (1200m), 012F0055 (2849m) en punt 35-36. Het krommingsverschil op punt 21-22 ligt tussen  $-7,79E-06$  en  $5,40E-05$ . Het krommingsverschil bij 012F0055 ligt tussen  $-4,59E-05$  en  $4,78E-06$ . Het krommingsverschil bij 35-36 ligt tussen  $-7,94E-06$  en  $5,20E-05$ .

Mogelijk is voor IMG de maatgevende indicator hoeveel de kromming tussen de scenario's verschilt op het punt van maximale en minimale kromming of bolling. In Tabel 4 kan ter hoogte van punt 28 worden afgelezen dat de kromming daar maximaal is (met waarde 0.000107108). De kromming van scenario 3 ondergrens is op dat punt plm 41% lager. De kromming van scenario 2, bovengrens, is plm 4% hoger.



**Figuur 6** Schermafbeelding van lijn2. Het gevisualiseerde raster is de Lowerfit\_baseline\_difference-kaart: het verschil in kromming tussen de referentie en de ondergrens, scenario 3. In het onderste deel van de figuur ziet u een profielgrafiek (dwarsdoorsnede): de oranje lijn is het verschil tussen de ondergrens fit (scenario 3) en de kromming van de referentie. De groene curve is het verschil tussen de bovengrens fit (scenario 2) en de kromming van de referentie.



Tabel 4 Virtuele punten en peilmerken (2) langs profiellijn 2. In geel de lokale maximale waarden.

ID_1	distance	baseline_subsidence	Lowerfit_subsidence	Upperfit_subsidence	baseline_curvature	Lowerfit_curvature	Upperfit_curvature	Lowerfit_baseline_diff	Upperfit_baseline_diff	Lowerfit_baseline_diffperc	Upperfit_baseline_diffperc
18	0	-94.27044	-107.50803	-94.659805	-5.13E-05	-3.50E-05	-4.95E-05	1.63E-05	1.81E-06	-31.73	-3.53
19	300	-103.11409	-120.909584	-102.53762	-6.78E-05	-3.30E-05	-6.96E-05	3.48E-05	-1.83E-06	-51.3	2.7
20	600	-118.26733	-137.63841	-116.866295	-7.57E-05	-2.75E-05	-8.08E-05	4.82E-05	-5.10E-06	-63.7	6.74
21	900	-139.39317	-156.22807	-137.60918	-7.29E-05	-1.89E-05	-8.00E-05	5.40E-05	-7.11E-06	-74.12	9.75
22	1200	-166.4609	-176.29506	-164.87834	-5.85E-05	-7.89E-06	-6.62E-05	5.06E-05	-7.79E-06	-86.5	13.32
23	1500	-198.0937	-196.83205	-197.34607	-3.36E-05	4.38E-06	-4.04E-05	3.80E-05	-6.74E-06	-113.03	20.05
24	1800	-233.1814	-217.35472	-233.86447	1.69E-07	1.81E-05	-4.32E-06	1.80E-05	-4.49E-06	10638.19	-2661.03
25	2100	-266.45837	-235.32835	-268.85037	3.67E-05	3.14E-05	3.53E-05	-5.32E-06	-1.40E-06	-14.51	-3.82
26	2400	-295.4208	-250.14746	-299.50015	7.05E-05	4.36E-05	7.29E-05	-2.69E-05	2.49E-06	-38.15	3.53
27	2700	-317.06363	-260.8122	-322.48654	9.66E-05	5.41E-05	0.000100817	-4.25E-05	4.21E-06	-43.97	4.36
012F0055	2849.4	-324.82718	-264.5576	-330.73676	0.000104896	5.90E-05	0.000109678	-4.59E-05	4.78E-06	-43.72	4.56
28	3000	-328.90488	-266.50406	-335.05328	0.000107108	6.27E-05	0.000111066	-4.44E-05	3.96E-06	-41.48	3.7
29	3300	-329.4641	-266.6812	-335.56137	0.000104181	6.62E-05	0.000107819	-3.80E-05	3.64E-06	-36.49	3.49
30	3600	-318.9316	-261.36942	-324.2356	9.61E-05	6.19E-05	9.91E-05	-3.42E-05	3.04E-06	-35.57	3.16
31	3900	-297.47592	-250.2758	-301.34335	7.54E-05	5.41E-05	7.65E-05	-2.13E-05	1.14E-06	-28.21	1.51
32	4200	-267.9138	-234.24664	-270.02786	4.51E-05	4.35E-05	4.36E-05	-1.61E-06	-1.50E-06	-3.57	-3.32
33	4500	-233.18378	-214.1319	-233.56752	1.19E-05	3.13E-05	7.14E-06	1.94E-05	-4.76E-06	162.74	-40.01
34	4800	-195.37628	-190.27539	-194.33649	-2.07E-05	1.69E-05	-2.75E-05	3.76E-05	-6.85E-06	-181.83	33.14
35	5100	-159.83902	-165.34068	-158.00194	-4.59E-05	2.76E-06	-5.38E-05	4.86E-05	-7.94E-06	-106	17.31
36	5400	-128.27286	-140.29459	-126.30136	-6.23E-05	-1.03E-05	-6.94E-05	5.20E-05	-7.11E-06	-83.5	11.42
37	5700	-101.44047	-115.61125	-99.94305	-6.87E-05	-2.21E-05	-7.36E-05	4.66E-05	-4.89E-06	-67.85	7.12
38	6000	-79.90485	-92.05945	-79.3462	-6.51E-05	-3.18E-05	-6.68E-05	3.33E-05	-1.76E-06	-51.14	2.7
39	6300	-64.803246	-71.947205	-65.3259	-5.40E-05	-3.81E-05	-5.29E-05	1.59E-05	1.03E-06	-29.37	-1.91
012F0127	6495.3	-57.623474	-60.6216	-58.8115	-4.42E-05	-4.04E-05	-4.17E-05	3.83E-06	2.54E-06	-8.66	-5.74
40	6600	-54.51769	-55.101814	-56.018223	-3.86E-05	-4.11E-05	-3.55E-05	-2.50E-06	3.13E-06	6.48	-8.11



### QGIS project

Het QGIS project Veendam\_sensibility\_analysis1999\_2018 bevat de volgende data:

1. Veendam peilmerken shapefile, met punten die data bevatten voor zowel 1999 als 2018
2. Drie subsidence geïnterpoleerde maps: baseline map met Gaussian automatische kriging fitting, ondergrens fitting en bovengrens fitting geïnterpoleerde maps;
3. Drie corresponderende afgeleide krommings maps
4. Twee verschilkaarten van krommingen scenario 2 en 3 vergeleken met die van de referentie.
5. Twee verschilkaarten van krommingen scenario 2 en 3 vergeleken met die van de referentie, in procenten.
6. De profiellijnen (punten en lijnen)

#### 4.2.2 Variatie met krigingmethode

In scenario's 4 en 5 (zie Tabel 1) is gevarieerd met de krigingmethode. Naast de referentie die met Gaussian is uitgevoerd zijn er twee extra kriging modellen toegepast:

- Scenario 4 Matern Steins parametrization (Ste)
- Scenario 5 Exponential (Exp)

De semivariogrammen voor beide scenario's zijn weergegeven in Figuur 7 Semivariogrammen voor de automatische kriging fit met Ste model (links) en Exp model (rechts) Figuur 7. Het linker variogram maakt gebruik van het Ste-model. De curve is vergelijkbaar met Gau: in het begin is de curve tamelijk vlak en stijgt naarmate de afstand groter wordt. Op de grotere afstand (bereik 6000+) stijgt de semi-variantie van Ste nog steeds, terwijl in de Gau-grafiek (Figuur 4) de semi-variantie vlakker is. Het rechter variogram maakt gebruik van het Exp-model. Deze curve begint anders met nugget 0, hij groeit in het begin snel en groeit nog steeds als de afstand groter wordt dan 8000.



Figuur 7 Semivariogrammen voor de automatische kriging fit met Ste model (links) en Exp model (rechts)

Om de gevoeligheidsanalyse op deze uit te voeren hebben we 4 soorten kaarten gemaakt, te weten:

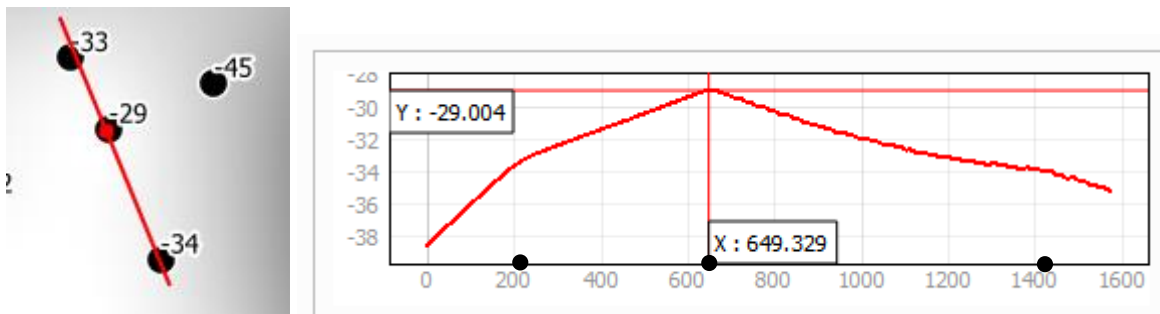
1. Drie geïnterpoleerde bodemdalingskaarten met behulp van de 3 sets krigingparameters (de referentie, Ste, Exp);
2. Drie krommingskaarten gebaseerd op de drie geïnterpoleerde bodemdalingskaarten;

3. Twee krommingsverschilkaarten (referentieverschil met Ste, referentieverschil met Exp):  
krommingsverschilkaart = Ste of Exp krommingskaart – referentie krommingskaart;
4. Twee percentagekaarten voor krommingsverschillen: percentage krommingsverschillen =  
kaart voor krommingsverschillen / referentie krommingkaart.

Voor het gemak worden de kaarten ook geleverd in een Qgis-project.

Ter ondersteuning van de beoordeling door IMG zijn de twee eerder genoemde dwarsdoorsneden over de bodemdalingskom gebruikt.

De geïnterpoleerde kaarten gegenereerd op basis van Gau en Ste kriging modellen komen redelijk goed overeen. De geïnterpoleerde kaart van het Exp-model verschilt echter sterk van de andere twee modellen. In de bodemdalingskaart uit het Exp-model hebben de geïnterpoleerde bodemdalingswaarden dichtbij peilmerken scherpe knikken in plaats van een vloeiende overgang. In Figuur 8 is een voorbeeld opgenomen. Een dwarsdoorsnede door het bodemdalingsraster langs 3 meetpunten laat duidelijk zien dat er scherpe knikpunten zijn bij de peilmerken. Dit komt niet overeen met de realiteit. Het afgeleide krommingsraster laat grote variaties zien: grote pieken in kromming rond de peilmerken en (logisch bij scherpe knikpunten) en tussen de punten redelijk vlakke krommen (dus lage krommingswaarden). Al met al is onze conclusie dat deze methode van interpolatie van de meetgegevens niet goed aansluit bij het principe van bodemdaling.

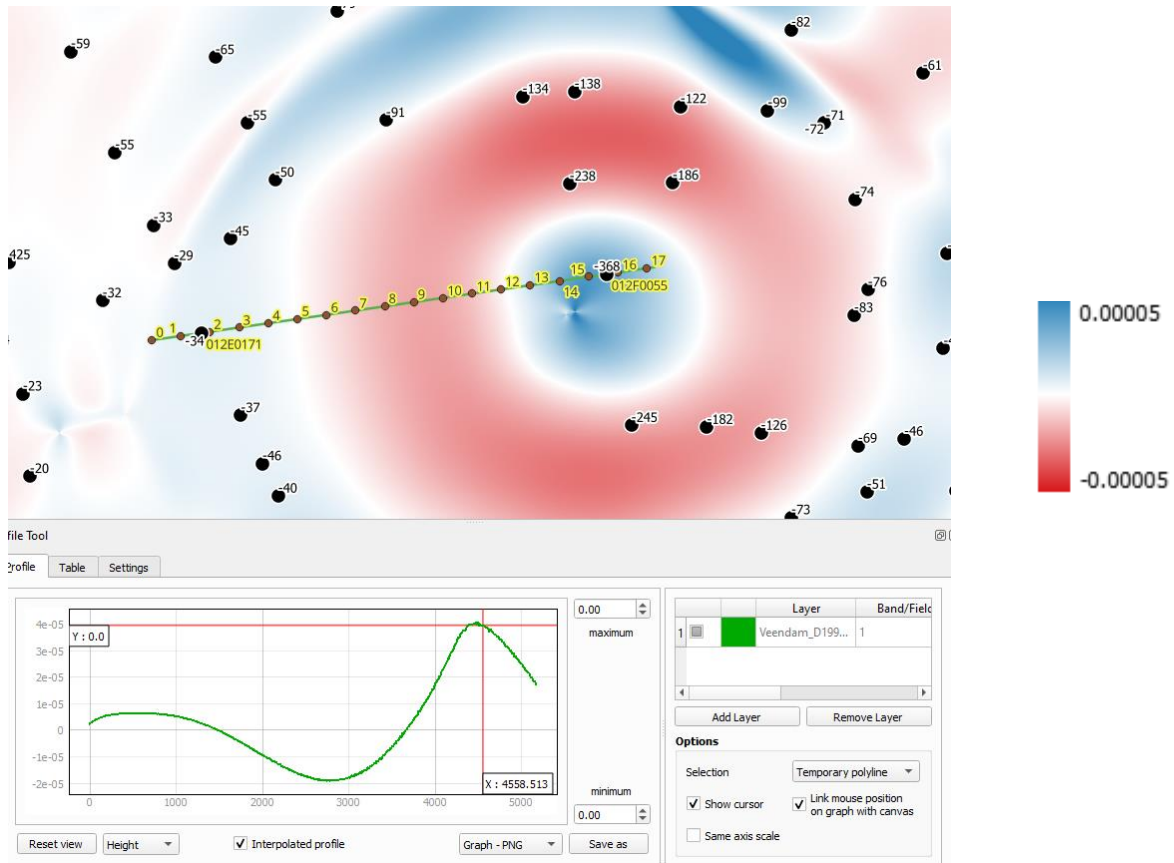


**Figuur 8 Dwarsdoorsnede langs 3 peilmerken over het bodemdalingsraster van na interpolatie met het Exp model.**

Ter ondersteuning van de beoordeling door IMG zijn twee dwarsdoorsneden over de bodemdalingskom gebruikt. Langs de doorsneden hebben we punten langs de doorsneden geplaatst en de werkelijke waarden van de verschillende kaarten toegevoegd (bodemdaling, kromming, verschillen, etc.). Dit geeft inzicht in de effecten van de het toepassen van de verschillende kriging modellen. Er werden twee lijnen gekozen: lijn 1 ongeveer oost-west door de dalingskom, en lijn 2 ongeveer loodrecht op lijn 1. Langs de lijn hebben we elke 300 meter virtuele punten uitgezet en per punt worden de waarden van de datasets expliciet gemaakt. Ook zijn de peilmerken-datapunten verwerkt.

### Lijn 1

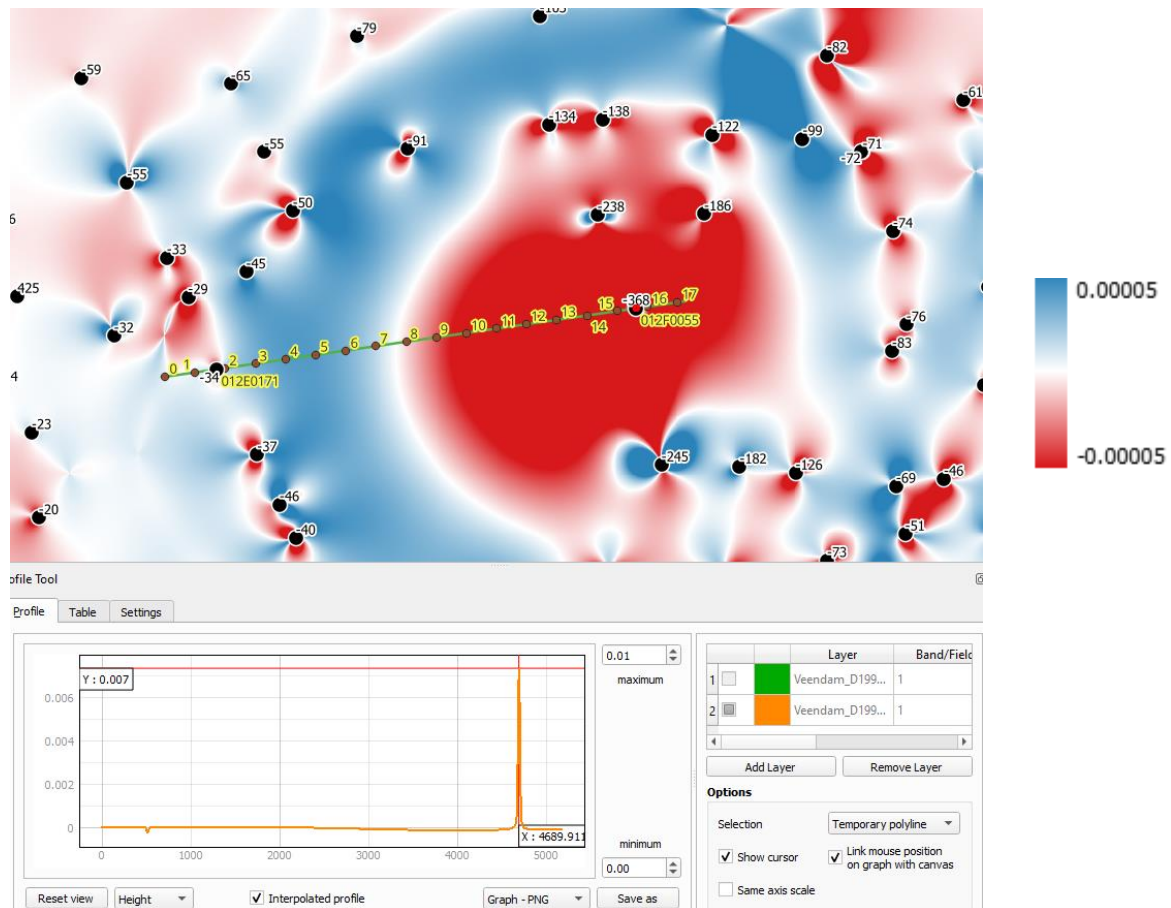
De twee geïnterpoleerde rasters langs Lijn 1 worden apart weergegeven in twee figuren. In Figuur 9 wordt het raster van het verschil tussen de Ste en de referentie (ste\_gau\_difference) weergegeven. De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingswaarden in mm tussen 1999-2018. In het onderste deel van de figuur is de dwarsdoorsnede langs lijn 1 weergegeven.



**Figuur 9** Schermafbeelding van lijn1. Het gevisualiseerde raster is de het verschil tussen de Ste en de referentie (ste\_gau\_difference) De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingswaarden in mm tussen 1999-2018. In het onderste deel van de figuur is de dwarsdoorsnede langs lijn 1 weergegeven met in groen het profiel over het raster.

In Figuur 10 is het verschil tussen de Exp en de referentie (exp\_gau\_difference) weergegeven De oranje lijn (de dwarsdoorsnede laat zoals eerder benoemd hoge pieken met daartussen lage krommingswaarden zien. Al met al is onze conclusie dat deze methode van interpolatie van de meetgegevens niet goed aansluit bij het principe van bodemdaling en dat vergelijking van de krommingswaarden derhalve geen nuttige inzichten oplevert.

Mogelijk is voor IMG de maatgevende indicator hoeveel de kromming tussen de scenario's verschilt op het punt van maximale en minimale kromming of bolling. In Tabel 5 worden de waarden van de relevante rasters langs de profiellijnen weergegeven. Ter hoogte van punt 14 is de kromming van de referentiekromme maximaal. De kromming van het Ste model is hier ca 24% hoger.



**Figuur 10** Schermafbeelding van lijn1. Het gevisualiseerde raster is het verschil tussen de Exp en de referentie (exp\_gau\_difference). De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingswaarden in mm tussen 1999-2018. In het onderste deel van de figuur is de dwarsdoorsnede langs lijn 1 weergegeven met in oranje het profiel over het raster.

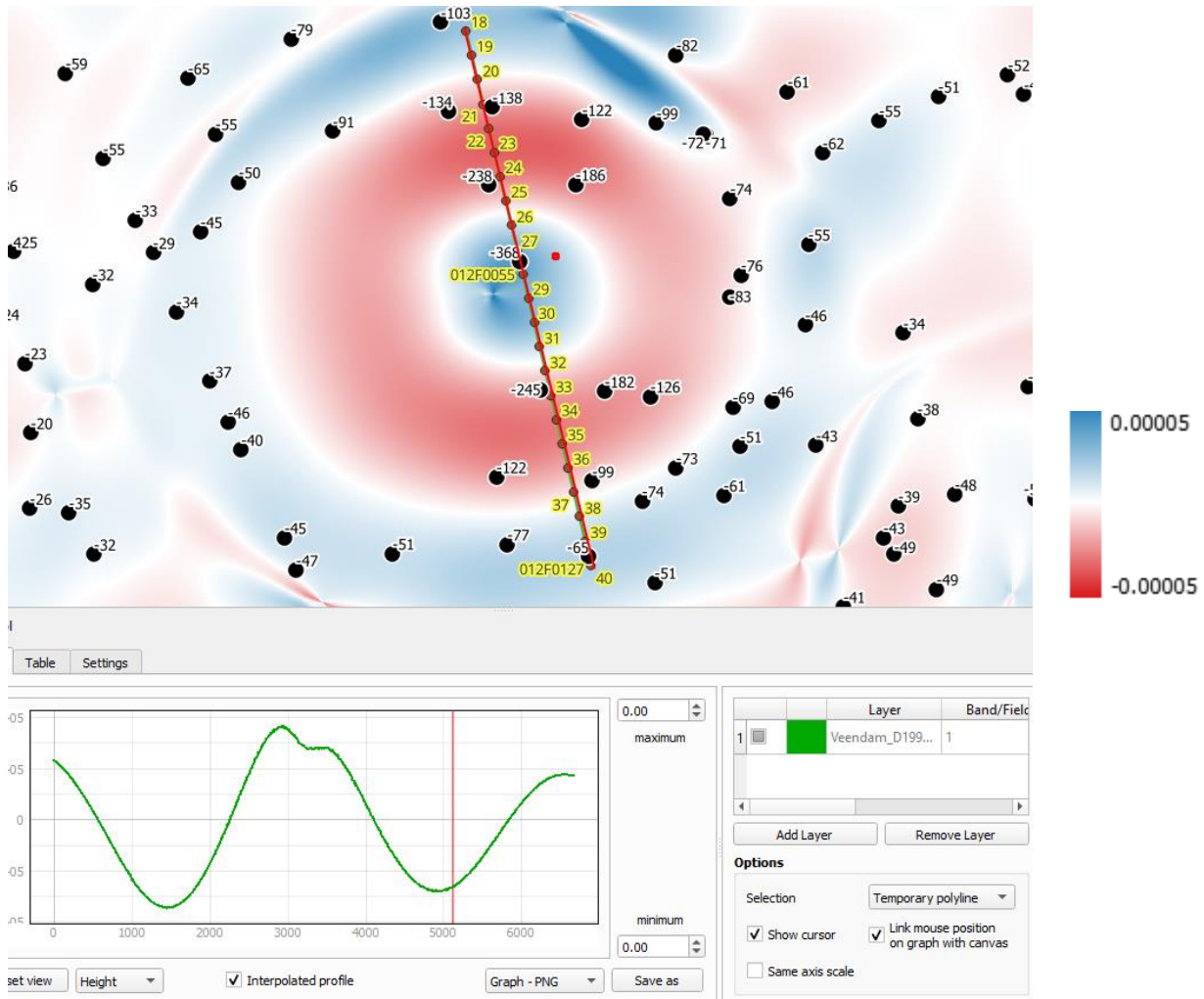


Tabel 5 Virtuele punten (18) en peilmerken (2) langs profiellijn 1. In geel de lokale maximale waarden.

ID_1	distance	ste_subsidence	Exp_subsidence	Gau_baseline_subsidence	Ste_curvature	Exp_curvature	Gau_baseline_curvature	Ste_Gau_diff	Exp_Gau_diff	Ste_Gau_diffperc	Exp_Gau_diffperc
0	0	-26.384975	-28.822918	-24.921263	-7.95E-06	-4.38E-06	-1.04E-05	2.50E-06	6.07E-06	-23.92	-58.09
1	300	-28.739477	-30.94889	-27.459898	-2.82E-05	-2.90E-05	-3.43E-05	6.04E-06	5.26E-06	-17.62	-15.35
012E0171	514.8	-32.075306	-33.94961	-31.22277	-4.10E-05	-3.10E-04	-4.73E-05	6.36E-06	-2.63E-04	-13.43	555.31
2	600	-34.0446	-36.224705	-33.457363	-4.57E-05	-3.41E-05	-5.21E-05	6.38E-06	1.80E-05	-12.24	-34.56
3	900	-43.159306	-45.595753	-43.772385	-5.85E-05	-3.30E-05	-6.42E-05	5.73E-06	3.12E-05	-8.93	-48.57
4	1200	-57.681904	-58.21403	-60.035954	-6.71E-05	-3.12E-05	-7.07E-05	3.59E-06	3.95E-05	-5.08	-55.82
5	1500	-78.14386	-73.666466	-82.55815	-6.98E-05	-2.99E-05	-6.96E-05	-2.70E-07	3.96E-05	0.39	-56.95
6	1800	-103.76161	-91.18918	-110.13843	-6.57E-05	-2.87E-05	-6.03E-05	-5.40E-06	3.16E-05	8.95	-52.4
7	2100	-135.97768	-111.82151	-143.87631	-5.39E-05	-2.71E-05	-4.26E-05	-1.13E-05	1.55E-05	26.46	-36.37
8	2400	-172.90997	-134.92026	-181.27682	-3.40E-05	-2.55E-05	-1.76E-05	-1.64E-05	-7.84E-06	92.87	44.45
9	2700	-212.57246	-160.36205	-219.88281	-7.07E-06	-2.39E-05	1.18E-05	-1.89E-05	-3.57E-05	-159.87	-302.13
10	3000	-251.33481	-187.03133	-255.9616	2.47E-05	-2.20E-05	4.26E-05	-1.79E-05	-6.46E-05	-41.98	-151.54
11	3300	-288.84344	-216.60182	-289.09576	6.07E-05	-1.88E-05	7.30E-05	-1.23E-05	-9.18E-05	-16.82	-125.79
12	3600	-320.05884	-247.91089	-314.88516	9.59E-05	-1.42E-05	9.85E-05	-2.67E-06	-1.13E-04	-2.71	-114.42
13	3900	-341.82065	-279.5037	-331.25067	1.28E-04	-8.12E-06	1.17E-04	1.12E-05	-1.25E-04	9.63	-106.96
14	4200	-352.96716	-313.0814	-337.7351	1.56E-04	1.11E-06	1.25E-04	3.05E-05	-1.24E-04	24.33	-99.11
15	4500	-350.4526	-347.04456	-332.5788	1.56E-04	2.50E-05	1.16E-04	4.04E-05	-9.05E-05	34.97	-78.35
012F0055	4688.5	-343.20947	-367.6229	-324.82718	1.41E-04	1.20E-02	1.05E-04	3.65E-05	1.19E-02	34.82	11323.26
16	4800	-336.0764	-351.19943	-317.9252	1.30E-04	3.46E-05	9.64E-05	3.32E-05	-6.18E-05	34.43	-64.11
17	5100	-310.06143	-305.6043	-293.93503	9.05E-05	-9.33E-06	7.05E-05	2.00E-05	-7.98E-05	28.37	-113.24

## Lijn 2

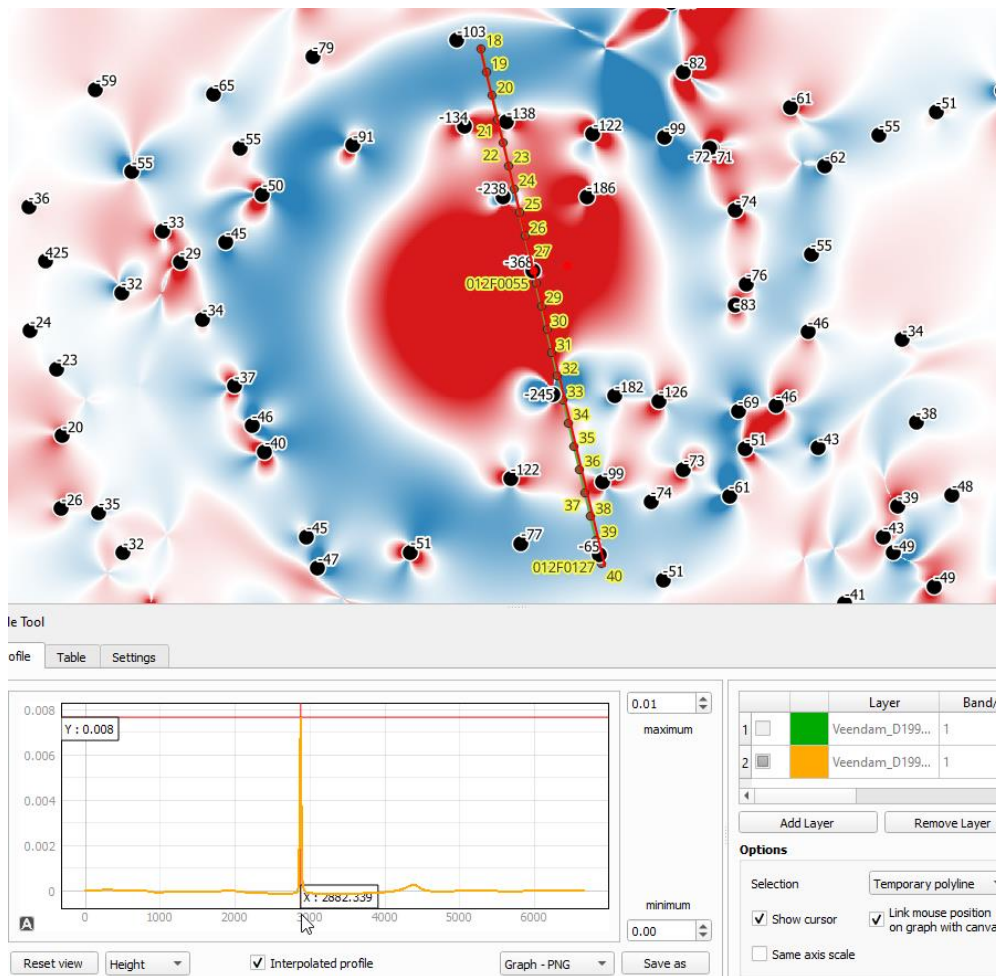
De twee geïnterpoleerde rasters langs Lijn 2 worden apart weergegeven in twee figuren. In Figuur 11 wordt het raster van het verschil tussen de Ste en de referentie (ste\_gau\_difference) weergegeven. De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingswaarden in mm tussen 1999-2018. In het onderste deel van de figuur is de dwarsdoorsnede langs lijn 2 weergegeven.



**Figuur 11** Schermafbeelding van lijn2. Het gevisualiseerde raster is de het verschil tussen de Ste en de referentie (ste\_gau\_difference). De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingswaarden in mm tussen 1999-2018. In het onderste deel van de figuur is de

In Figuur 12 is het verschil tussen de Exp en de referentie (exp\_gau\_difference) weergegeven. De oranje lijn (de dwarsdoorsnede) laat zoals eerder benoemd hoge pieken met daartussen lage krommingswaarden zien. Al met al is onze conclusie dat deze methode van interpolatie van de meetgegevens niet goed aansluit bij het principe van bodemdaling en dat vergelijking van de krommingswaarden derhalve geen nuttige inzichten oplevert.

Mogelijk is voor IMG de maatgevende indicator hoeveel de kromming tussen de scenario's verschilt op het punt van maximale en minimale kromming of bolling. In Tabel 6 kan ter hoogte van punt 28 worden afgelezen dat de kromming daar maximaal is (met waarde 0.000107108). De kromming van Ste is op dat punt plm 33% hoger.



**Figuur 12** Schermafbeelding van lijn2. Het gevisualiseerde raster is het verschil tussen de Exp en de referentie (exp\_gau\_difference). De gele punten zijn de virtuele punten, met hun nummer-ID's als labels. De zwarte stippen met cijfers zijn peilmerken locaties met bodemdalingswaarden in mm tussen 1999-2018. In het onderste deel van de figuur is de dwarsdoorsnede langs lijn 2 weergegeven met in oranje het profiel over het raster.



Tabel 6 Virtuele punten (18) en peilmerken (2) langs profiellijn 2. In geel de lokale maximale waarden.

ID_1	distance	ste_subsidence (mm)	Exp_subsidence (mm)	Gau_baseline_subsidence (mm)	Ste_curvature	Exp_curvature	Gau_baseline_curvature	Ste_Gau_diff	Exp_Gau_diff	Ste_Gau_diffperc	Exp_Gau_diffperc
18	0	-101.43282	-106.88349	-94.27044	-2.88E-05	-1.62E-05	-5.13E-05	2.25E-05	3.51E-05	-43.78	-68.37
19	300	-106.88968	-113.23443	-103.11409	-5.61E-05	-2.69E-05	-6.78E-05	1.17E-05	4.09E-05	-17.22	-60.28
20	600	-117.56295	-122.37032	-118.26733	-7.98E-05	-4.86E-05	-7.57E-05	-4.07E-06	2.71E-05	5.38	-35.76
21	900	-134.67117	-135.8444	-139.39317	-9.29E-05	-1.47E-04	-7.29E-05	-2.00E-05	-7.36E-05	27.38	101
22	1200	-159.4226	-159.18373	-166.4609	-8.97E-05	-7.05E-05	-5.85E-05	-3.13E-05	-1.20E-05	53.49	20.54
23	1500	-191.48073	-189.60905	-198.0937	-6.77E-05	-6.13E-05	-3.36E-05	-3.41E-05	-2.77E-05	101.37	82.24
24	1800	-230.227	-225.91649	-233.1814	-2.57E-05	-3.02E-06	1.69E-07	-2.59E-05	-3.19E-06	-15349.8	-1890.57
25	2100	-269.50092	-261.78302	-266.45837	2.75E-05	-2.02E-05	3.67E-05	-9.19E-06	-5.69E-05	-25.06	-155.07
26	2400	-305.46814	-300.70007	-295.4208	8.36E-05	-3.41E-05	7.05E-05	1.31E-05	-1.05E-04	18.64	-148.34
27	2700	-333.22455	-344.27243	-317.06363	1.28E-04	-1.91E-05	9.66E-05	3.15E-05	-1.16E-04	32.6	-119.77
012F0055	2849.4	-343.20947	-367.6229	-324.82718	1.41E-04	1.20E-02	1.05E-04	3.65E-05	1.19E-02	34.82	11323.26
28	3000	-348.59586	-352.40692	-328.90488	1.42E-04	1.65E-06	1.07E-04	3.54E-05	-1.05E-04	33.02	-98.46
29	3300	-349.09216	-322.74942	-329.4641	1.33E-04	-2.13E-05	1.04E-04	2.84E-05	-1.26E-04	27.24	-120.47
30	3600	-335.0276	-297.60257	-318.9316	1.22E-04	-2.13E-05	9.61E-05	2.57E-05	-1.17E-04	26.73	-122.13
31	3900	-307.63797	-275.02722	-297.47592	8.64E-05	-9.32E-06	7.54E-05	1.10E-05	-8.47E-05	14.65	-112.37
32	4200	-271.34094	-254.96353	-267.9138	3.83E-05	9.22E-05	4.51E-05	-6.83E-06	4.71E-05	-15.13	104.33
33	4500	-230.72633	-229.57834	-233.18378	-8.96E-06	5.42E-05	1.19E-05	-2.09E-05	4.23E-05	-175.26	355.65
34	4800	-189.06064	-190.63509	-195.37628	-4.83E-05	-3.61E-05	-2.07E-05	-2.76E-05	-1.54E-05	133.54	74.46
35	5100	-152.53362	-155.21388	-159.83902	-7.23E-05	-4.61E-05	-4.59E-05	-2.64E-05	-2.40E-07	57.54	0.52
36	5400	-122.44192	-124.53033	-128.27286	-8.00E-05	-6.26E-05	-6.23E-05	-1.78E-05	-3.20E-07	28.57	0.51
37	5700	-98.78001	-100.268875	-101.44047	-7.38E-05	-9.83E-05	-6.87E-05	-5.11E-06	-2.97E-05	7.44	43.19
38	6000	-81.04003	-83.522964	-79.90485	-5.74E-05	-4.83E-05	-6.51E-05	7.68E-06	1.68E-05	-11.8	-25.83
39	6300	-68.94911	-71.44771	-64.803246	-3.81E-05	-2.90E-05	-5.40E-05	1.59E-05	2.50E-05	-29.45	-46.24
012F0127	6495.3	-62.999557	-64.95382	-57.623474	-2.65E-05	-2.91E-05	-4.42E-05	1.77E-05	1.51E-05	-40.03	-34.15
40	6600	-60.23186	-61.774223	-54.51769	-2.10E-05	-1.83E-05	-3.86E-05	1.76E-05	2.02E-05	-45.51	-52.45



### QGIS project

Het QGIS project Veendam\_sensibility\_analysis1999\_2018\_different\_model bevat de volgende data:

1. Veendam peilmerken shapefile, met punten die data bevatten voor zowel 1999 als 2018
2. Drie subsidence geïnterpoleerde maps: baseline map met Gaussian automatische kriging fitting, Ste model fitting en Exp model fitting geïnterpoleerde maps;
3. Drie corresponderende afgeleide krommings maps
4. Twee verschilkaarten van krommingen scenario 4 en 5 vergeleken met die van de referentie.
5. Twee verschilkaarten van krommingen scenario 4 en 5 vergeleken met die van de referentie, in procenten.
6. De profiellijnen (punten en lijnen)

## 5 Conclusies

In deze rapportage levert NEO de resultaten van de interpolatie van bodemdalingsgegevens op die voor het Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG) is uitgevoerd. Naast het uitvoeren en het opleveren van de interpolaties heeft NEO ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Het doel van de gevoeligheidsanalyse is IMG inzicht te verschaffen in de variatie van de uitkomsten, zodat IMG een oordeel kan vormen over de gevoeligheid.

In eerste instantie is gekeken naar de propagatie van fouten in het proces om te komen van de peilmerkdata naar krommingsinformatie over de bodemdalingsverschillen. Uiteindelijk is de conclusie dat een vergelijking alleen op basis van de foutmarges in de meetfouten niet in overeenstemming is met de aanname dat de bodemdaling de vorm heeft van een bodemdalingskom. Wel is de gebruikte bodemdalingsdata vergeleken met andere meetcampagnes. Hieruit is gebleken dat de verschillende meetcampagnes in de provincies Groningen en Friesland tot vergelijkbare resultaten leiden.

In tweede instantie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de interpolatiemethode van de bodemdalingsdata. Dit is gedaan op basis van variaties in de parameters van de kriging methode. De resultaten van deze analyse geven IMG inzicht in de te verwachten variaties in de bepaalde kromming als gevolg van de variaties in de parameters van de kriging methode.

## Bijlage 1: Kriging parameters

Om de resultaten reproduceerbaar te maken en om interpretatie te verbeteren, worden respectievelijk de gekozen parameterwaarden (*model*, *nugget*, *sill* en *range*) en de standard error-waarden van de interpolatie, die een indicatie geven van de betrouwbaarheid van het resultaat, opgeleverd. De eenheid van de *nugget* en *sill* is mm. De eenheid van *range* is meter. De eenheid van de standard error-waarden is mm. In onderstaande tabellen worden de gekozen parameterwaarden gepresenteerd.

### Kriging parameters Noord-Nederland

Meetplangebied	Intp. Kolom	Model	Nugget	Sill	Range
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1961	Ste	0.339616124	1.56168853	3657.934269
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1962	Ste	0.992612446	6.171149856	4646.860959
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1963	Ste	3.424303119	12.18501467	5861.968425
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1964	Ste	8.193232403	18.78118965	6926.701296
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1965	Ste	12.51619016	29.51631722	6686.083009
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1966	Ste	42.98853942	16.21255189	10074.22659
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1967	Ste	57.74161448	21.5814158	9989.400042
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1968	Ste	75.92800537	26.42591949	11644.34932
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1969	Sph	105.4414857	21.62001579	18676.35876
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1970	Sph	125.8957275	31.89191033	22094.31187
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1971	Sph	148.8977472	44.85485661	23756.30607
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1972	Sph	175.1336814	60.69129603	25472.61629
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1973	Sph	200.0966752	79.27428603	28492.77271
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1974	Ste	232.9956008	104.7076489	15555.71676
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1975	Ste	262.4309636	142.4533695	16251.36958
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1976	Ste	297.9656366	199.5933022	18459.71208
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1977	Ste	326.318019	270.9877768	20228.79343
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1978	Ste	311.2095671	359.6193885	24917.40155
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1979	Ste	317.4666199	455.8398548	29489.93624
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1980	Ste	340.8217905	643.0168588	41685.18052
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1981	Exp	364.0321122	3087.964903	190401.5361
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1982	Exp	362.9919533	1640.633951	85168.82203
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1983	Exp	365.2111141	1652.984829	73457.05145
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1984	Exp	386.551948	2180.572071	86632.37005
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1985	Ste	425.7934115	1617.790677	64972.16671
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1986	Ste	426.5011482	1850.582583	62326.39376
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1987	Exp	435.5750242	2614.398486	65110.15207
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1988	Exp	462.782474	2395.007349	56872.43374
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1989	Exp	422.4788995	3264.934498	72894.04584
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1990	Ste	466.8857437	2326.728939	58534.48055
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1991	Ste	495.9100274	2477.031436	58360.56839

Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1992	Exp	504.9431417	3640.602708	64780.19402
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1993	Ste	559.8694129	2683.828363	54224.3878
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1994	Ste	510.667442	2888.329333	59505.93502
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1995	Ste	464.0853586	4733.992454	120404.8526
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1996	Ste	483.1443725	5484.846149	137055.3016
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1997	Ste	490.0018883	5762.438913	132582.5372
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1998	Ste	561.6698799	4109.930963	66630.14294
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff1999	Ste	578.023373	4899.011408	82267.78625
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2000	Ste	541.7405548	18399.51916	529474.8852
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2001	Ste	569.1755772	425746.611	25645657.94
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2002	Ste	661.0833751	7695.768837	120242.9328
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2003	Ste	693.438894	9143.725209	138716.4139
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2004	Exp	732.5265198	8992.383783	95499.5178
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2005	Ste	751.0136128	8796.88447	124322.0826
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2006	Ste	659.664195	90984.51465	2882698.501
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2007	Ste	679.4403575	41985.5305	1043083.134
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2008	Ste	689.7915553	22837.54134	456477.1226
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2009	Ste	697.0970041	24256.77241	478540.9684
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2010	Ste	730.9879577	27136.63834	528553.9631
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2011	Ste	747.7428627	27636.75265	509626.8107
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2012	Ste	766.296123	27381.97416	471003.4039
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2013	Ste	784.003484	28267.14667	464754.0821
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2014	Ste	850.4519058	433730.3801	14446933.08
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2015	Ste	705.2727911	21855.45851	275028.6579
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2016	Ste	720.7330705	21578.82073	253409.0481
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2017	Ste	745.6312425	26804.70409	320337.3311
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2018	Ste	769.0594782	23098.91002	241685.4954
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2019	Ste	783.140953	1164.05007	3101.674136
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2020	Ste	1186.901798	695.3802617	1793.624113
Northfield_peilmerken_interpolated_diff	diff2021	Ste	1220.825947	1208.028162	61694.68897

*Kriging parameters Veendam*

Meetplangebied	Intp. Kolom	Model	Nugget	Sill	Range
Veendam_peilmerken	D1996_1998	Sph	10.48031849	23.68787975	4522.738306
Veendam_peilmerken	D1998_2000	Ste	7.678499014	14.3526495	1360.736205
Veendam_peilmerken	D2000_2002	Ste	17.45548883	46.28651182	2050.497611
Veendam_peilmerken	D2004_2006	Ste	6.30373	18.65948	2796.845
Veendam_peilmerken	D2002_2004	Ste	21.21587	28.7231	5810.066
Veendam_peilmerken	D2006_2008	Ste	10.40154892	40.7520663	4432.767516
Veendam_peilmerken	D2008_2010	Ste	2.803205883	14.6564276	4161.603093
Veendam_peilmerken	D2010_2012	Ste	5.923667741	50.9353396	3677.524284

<b>Veendam_peilmerken</b>	D2012_2014	Ste	6.59526095	11.25391146	2331.225823
<b>Veendam_peilmerken</b>	D2014_2016	Ste	3.713366852	49.926039	4151.569189
<b>Veendam_peilmerken</b>	D2016_2018	Gau	5.772487532	97.7429776	2858.887501
<b>Veendam_peilmerken</b>	D2018_2020	Gau	3.426957724	234.7100727	3102.225059

## Bijlage 2: Analyse van foutenvoortplanting in kromming- en bollingsrasters

Onderstaande analyse is eerder in het project uitgevoerd. Uiteindelijk de conclusie getrokken dat een vergelijking op basis van de foutmarges in de meetfouten niet in overeenstemming is met de aanname dat de bodemdaling de vorm heeft van een bodemdalingskom. Er is voor het vervolg van de analyse aangenomen dat er geen fouten in de peilmerkdatabasis aanwezig is (afgezien van de eerder gedefinieerde uitbijters). Voor de volledigheid is onderstaande analyse wel opgenomen in deze bijlage.

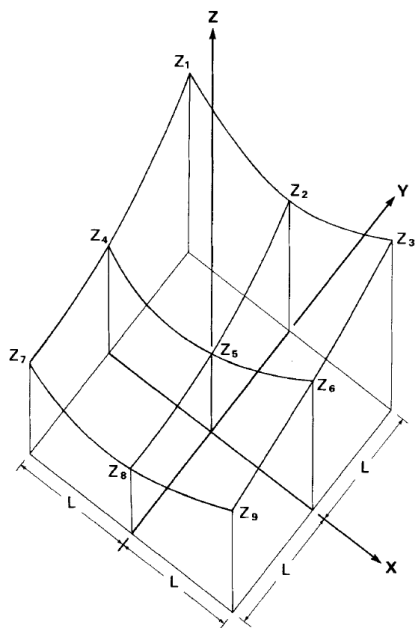
Binnen deze studie is onderzocht in hoeverre er in het verleden onderzoek is gedaan naar de foutgevoeligheid van kromming- en bollingsrasters. Deze worden verder in deze rapportage steeds “kromming” genoemd. We hebben geen relevante studies kunnen vinden. Daarom hebben we gekeken naar de theoretische achtergrond en hoe een bekende standard error de kromming beïnvloedt.

### *Theoretische achtergrond*

Voor de geleverde interpolaties is de QGIS SAGA Morphometry-module **Slope, Aspect, Curvature** gebruikt. Deze module is in 2001 ontwikkeld door Dr. Olaf Conrad. De documentatie van SAGA ([https://saga-gis.sourceforge.io/saga\\_tool\\_doc/2.2.5/ta\\_morphometry\\_0.html](https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.5/ta_morphometry_0.html)) en ook de kromming- en bollingsmethode die door ESRI gebruikt wordt (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-curvature-works.htm>), verwijzen beiden naar een paper van L.W. Zevenbergen (QUANTITATIVE ANALYSIS OF LAND SURFACE TOPOGRAPHY) als uitgangspunt voor hun kromming- en bollingscripts.

In deze paper van L.W. Zevenbergen wordt de aanname gemaakt dat een oppervlak exact door de negen omliggende hoogtewaarden (submatrix elevations) gaat. Dit oppervlak wordt weergegeven door door de gedeeltelijke vierdegraadsvergelijking (partial quartic equation) (1). Daaruit kan de helling berekend worden zoals in vergelijking (2), en de hellingsrichting in vergelijking (3). De hieruit berekende profielkromming (profile curvature) is te vinden in vergelijking (4).

$$Z = AX^2Y^2 + BX^2 + CXY^2 + DX^2 + EY^2 + FXY + GX + HY + I \quad (1)$$



**Figuur 1:** de negen submatrices die een oppervlak Z beschrijven, uit de paper van L.W. Zevenbergen.

De  $\theta$  in vergelijking 3 beschrijft de richting van de steilste helling, ook wel aspect genoemd.

$$\text{SLOPE} = - (G^2 + H^2)^{1/2} \tag{2}$$

$$\theta = \arctan (- H/ - G) \tag{3}$$

$$\text{PROF\_CURVATURE} = - 2(D \cos^2\theta + E \sin^2 \theta + F \cos\theta\sin\theta) \tag{4}$$

Uit vergelijking (1) blijkt dat de kromming grotendeels afhangt van het kleine oppervlak dat weergegeven wordt door 9 punten (pixelwaarden) en de hellingsrichting van dit kleine oppervlak. Op basis van alleen deze vergelijking kan niet worden gekwantificeerd hoe de standard error deze kromming beïnvloedt. In het volgende hoofdstuk worden daarom wat gedachten gedeeld over hoe we deze marges alsnog kunnen vinden.

*Foutgevoeligheid van krommingswaarden*

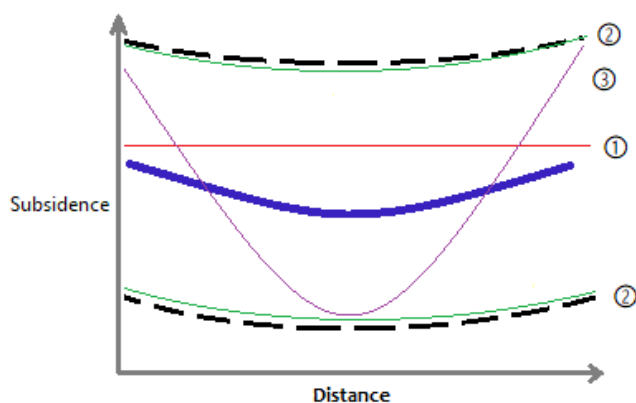
Om de foutgevoeligheid van krommingswaarden te kunnen evalueren, schetsen we hieronder een aantal scenario's. In de onderstaande tabel staat hiervan een voorbeeld uit de bodemdalingsraster van 1960-1966 van Noord-Nederland. De weergegeven waarden in de drie tabellen van tabel 1 zijn de pixelwaarden van negen aan elkaar grenzende pixels. In elk van de drie tabellen zijn dezelfde pixels weergegeven. Te zien is dat de kromming van de middelste pixel 1.18E-05 is als we de in de kriging voorspelde waarde gebruiken.

**Tabel 1:** een submatrix van 9 pixels in een bodemdalingsraster, standard error raster en krommingsraster.

Geïnterpoleerde bodemdaling			Standard error		
-5.075391	-5.094555	-5.04339	7.1731124	7.171675	7.177386
-5.2266755	-5.286305	-5.14386	7.164194	7.158072	7.174551
-5.2394695	-5.28455	-5.16958	7.169534	7.165291	7.178642

Kromming

-1.72E-08	1.46E-07	-8.24E-07
7.73E-06	1.18E-05	1.29E-06
6.30E-06	8.97E-06	7.70E-07



Figuur 2: De drie hieronder genoemde scenario's, grafisch weergegeven.

In de onderstaande tekst worden drie scenario's beschreven die de spreiding tussen mogelijke krommingswaarden uitleggen. Deze drie scenario's worden gevisualiseerd in figuur 2. In figuur 2 staat de afstand op de horizontale as en de bodemdaling op de verticale as. De blauwe lijn toont de in tabel 1 voorspelde bodemdalingswaarden. De twee zwart gestreepte lijnen bovenaan en onderaan tonen de minimum en maximumwaarde, berekend met behulp van de standard error. De rode lijn ① beschrijft scenario 1. De twee groene lijnen ② beschrijven de situatie in scenario 2. De paarse lijn ③ beschrijft de situatie in scenario 3. Elk van deze drie scenario's wordt hieronder verder toegelicht.

**Scenario 1:** de bodemdaling is overal gelijk

Als we aan elke pixelwaarde een klein getal toevoegen waardoor de geïnterpoleerde bodemdaling een plat oppervlak wordt, worden de waarden van A, B, C, D, E en F in vergelijking (1) 0, omdat de bodemdaling dan al berekend kan worden met alleen het X- en Y-coördinaat.

**Scenario 2:** de standard error (positief en negatief) wordt toegevoegd aan de bodemdaling

In tabel 2 zijn bodemdaling en kromming berekend wanneer de standard error opgeteld en afgetrokken wordt van de bodemdaling. In dit geval zijn de krommingswaarden vergelijkbaar, of we de standard error nu optellen bij de bodemdaling of ervan aftrekken.

Tabel 2: de boven- en ondergrenzen van de bodemdaling en daaruit berekende kromming van de 9 pixels.

Bodemdaling + standard error			Bodemdaling – standard error		
2.097721	2.07712	2.133997	-12.2485	-12.2662	-12.2208

1.937519	1.871767	2.0306945
1.930065	1.880741	2.009058

kromming van bodemdaling + standard error

-1.57E-07	7.60E-09	-1.15E-06
8.38E-06	1.30E-05	1.06E-06
6.75E-06	9.73E-06	5.41E-07

-12.3909	-12.4444	-12.3184
-12.409	-12.4498	-12.3482

kromming van bodemdaling - standard error

1.25E-07	2.85E-07	-4.98E-07
7.07E-06	1.06E-05	1.55E-06
5.88E-06	8.27E-06	1.06E-06

**Scenario 3:** het meest extreme geval – de 8 buren van de pixel in het midden krijgen de standard error bij de bodemdaling opgeteld, bij de pixel in het midden wordt de standard error vanaf getrokken. In dit geval zijn de krommingswaarden heel anders dan de oorspronkelijke krommingswaarden (zonder standard error).

**Tabel 3: de 9 pixelwaarden van het meest extreme scenario, en de bijbehorende bodemdaling.**

Bodemdaling in het meest extreme scenario.

-12.2485	-12.2662	-12.2208
-12.3908	1.871767	-12.3184
-12.409	-12.4498	-12.3482

Kromming in het meest extreme scenario.

0.000198	0.001417	0.000286
0.001428	-0.00285	0.001418
0.000218	0.001431	-9.6E-06

### Discussie

Een van de moeilijkheden bij het evalueren van de variaties in kromming is dat de werkelijke kromming niet bekend is. Er is dus geen referentiepunt waarmee de huidige krommingsrasters vergeleken kunnen worden. Onze huidige krommingsrasters zijn bepaald op basis van de statistische methode kriging, en de kromming is daaruit berekend met behulp van een wiskundig model. Het is bekend dat alle modellen de werkelijkheid slechts simuleren en dat ze daarom allemaal tot op zekere hoogte afwijken van de werkelijkheid. Zonder een validatiedataset is het erg moeilijk om de kwaliteit te evalueren.

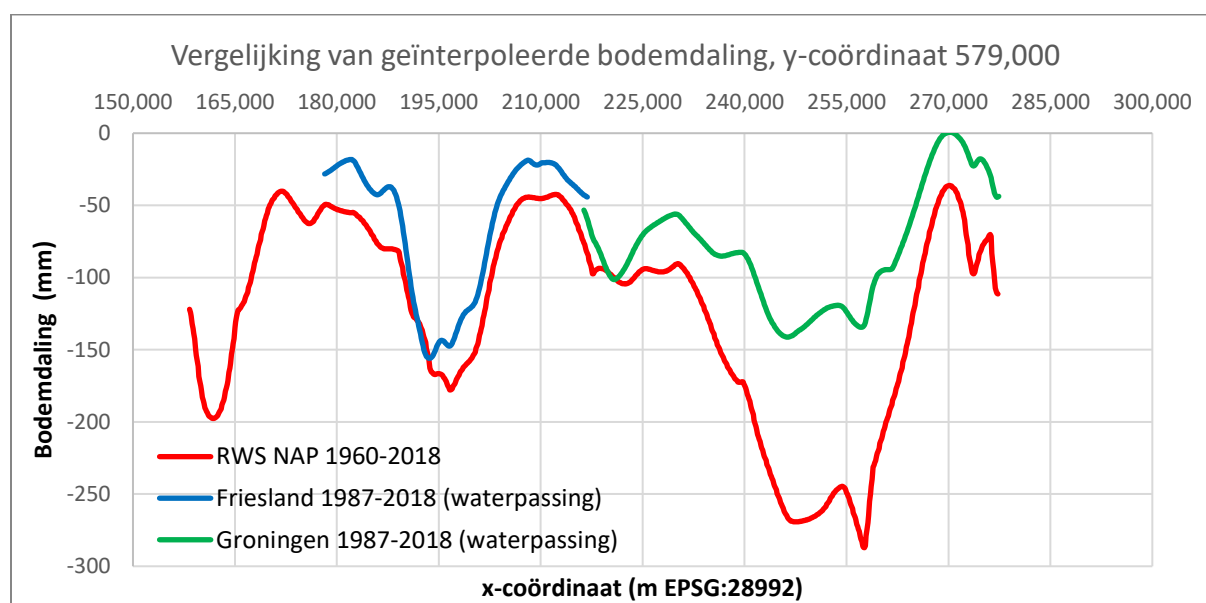
In de afgelopen jaren heeft NEO regelmatig ruimtelijke interpolaties van bodemdaling gemaakt. Hiervoor zijn in 2021 en 2022 waterpassingen gebruikt die uitgevoerd zijn in opdracht van mijnbouwbedrijven. In 2023 is een interpolatie gemaakt op basis van NAP-metingen van Rijkswaterstaat. Om deze datasets kwalitatief beter te kunnen waarderen, kunnen de resultaten van deze interpolaties vergeleken worden. NEO heeft daartoe in 2022 aan RVO geleverde interpolaties vergeleken met in 2023 aan het Instituut Mijnbouwschade geleverde waarden.



Voor de meetplangebieden in Noord-Nederland zijn op basis van beide bronnen interpolaties gemaakt. Het startjaar is hierin anders: 1960 voor de Rijkswaterstaat NAP-metingen en 1987 voor de metingen op basis van de waterpassingen.

De vergelijking is gemaakt op basis van een transect van west naar oost op het Rijksdriehoek y-coördinaat 579.000. In figuur xx is te zien dat beide meetmethoden duidelijk dezelfde patronen volgen, met de meeste bodemdaling rond het x-coördinaat 195.000 en 255.000. Tevens is te zien dat de bodemdaling over de periode 1960-2018 op de meeste plaatsen fors groter is dan de bodemdaling over de periode 1987-2018.

Op sommige plaatsen vond pas recentelijk bodemdaling plaats (rond x-coördinaat 195.000 en 220.000) en liggen beide lijnen dicht bij elkaar. Op andere plaatsen begon bodemdaling vroeger en is de totale bodemdaling ongeveer twee keer zo groot als de bodemdaling sinds 1987 (rond x-coördinaat 260.000). De maximale bodemdaling tussen 1960 en 2018 was hier zo'n 300 mm.



Figuur 3: vergelijking van resultaten van de ruimtelijke interpolatie van bodemdalingsmetingen rond het EPSG:28992 y-coördinaat 579.000 (een 'horizontale lijn' dwars door Friesland en Groningen)

Binnen kriging wordt voor het gehele onderzoeksgebied één set instellingen (nugget, sill en range) gebruikt. Dit werkt goed als de omstandigheden in een onderzoeksgebied uniform zijn. De geleverde interpolaties zijn echter gedaan over geheel Noord-Nederland, waarin dus verschillende grondsoorten zijn (<https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen/kaart>), en verschillen in recent land- en ondergrondgebruik.

Voor de recente levering is gebruik gemaakt van lineair geïnterpoleerde bodemdalingswaarden. Hiervoor is alleen het jaar waarin de meting plaatsgevonden heeft, meegenomen. Dit heeft twee consequenties:

- Metingen uit januari worden op dezelfde manier verrekend als metingen uit december. Daardoor beschrijven niet alle gebruikte meetpunten dezelfde periode, waardoor de bodemdaling over die

periode op sommige plaatsen over- of onderschat wordt. Dit effect is groter voor korte tijdsintervallen.

- De lineaire interpolatie neemt aan dat bodemdaling lineair verloopt. In werkelijkheid is het mogelijk dat bodemdaling niet lineair verloopt door de tijd, maar bijvoorbeeld langzaam begint en versnelt als de hoeveelheid activiteit in de ondergrond toeneemt. Hierdoor kan de bodemdaling over- of onderschat worden ten opzichte van de werkelijkheid.

### *Conclusie*

In deze studie is gekeken naar de theoretische achtergrond van de berekening van kromming en bolling, en worden drie scenario's geschetst die een idee geven over hoe de kromming verandert door meetfouten.

In de discussie is bodemdaling van verschillende meetmethoden vergeleken. Hieruit is gebleken dat de verschillende meetmethoden in de provincies Groningen en Friesland tot vergelijkbare resultaten leiden.

In de discussie worden ook andere factoren genoemd die de verwachte geïnterpoleerde bodemdaling kunnen beïnvloeden en zo ook de kromming beïnvloeden, zoals de precieze datum waarop de bodemdaling gemeten is.

Om zeker te zijn van een goede kwaliteit kromming-/bollingsrasters, is meer kennis van de wiskundige achtergrond (de betekenis van de verschillende parameters in de vergelijking) en kennis van de situatie ter plaatse in gebieden met bodemdaling noodzakelijk. Voor een meer specifieke studie over de voortplanting van meetfouten in ruimtelijke interpolaties zijn dus modellering en veldwerk nodig. Naar ons inzien is NEO niet de beste organisatie om dit te bestuderen.