

Geodetische aspecten bij het vaststellen van bodembeweging

Analyse ten behoeve van Gestapelde Effecten Meervoudige
Mijnbouwactiviteiten (GEMMA)

Martin Kodde en Hiddo Velsink

26 juni 2023

23-P043

Versie 1.0

Geodetische aspecten bij het vaststellen van bodembeweging

Analyse ten behoeve van Gestapelde Effecten Meervoudige
Mijnbouwactiviteiten (GEMMA)



Opdrachtgever: Instituut Mijnbouwschade Groningen
Cascadeplein 10
Groningen

Contactpersoon: dr. ir. A.E.C. van der Stoel
almer.vanderstoel@schadedoormijnbouw.nl

Opgesteld door: Ingenieursbureau Geodelta B.V.
Martin Kodde en Hiddo Velsink
martin@geodelta.com

Datum: maandag 26 juni 2023

Versie: 1.0

Kenmerk: 23-P043

Versiebeheer

Versie	Datum	Auteur	Wijziging	Gecontroleerd
0.3	14 juni 2023	Martin Kodde	Eerste concept versie	
0.4	19 juni 2023	Martin Kodde	Aangepaste conceptversie - Toevoeging over de IGP- software in 6.4. - Paragraaf 6.6 toegevoegd. - Toevoeging aan conclusie dat GNSS-metingen onderdeel moeten zijn van geïntegreerde vereffening en dat de effecten van schrinking onderzocht moeten worden.	Hiddo Velsink
1.0	26 juni 2023	Martin Kodde	Geen	

Inhoudsopgave

Versiebeheer	3
Inhoudsopgave	4
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding.....	6
1.2 Onderzoeksvragen.....	6
1.3 Methodologie	6
2 Geodesie, geometrie en bodembeweging	7
3 Geodetische metingen voor bodembeweging	9
3.1 Waterpassingen en het NAP	9
3.1.1 Technologie	9
3.1.2 Eigenschappen.....	10
3.2 Radarinterferometrie.....	11
3.2.1 Technologie	11
3.2.2 Eigenschappen.....	13
3.3 Laserscanning (AHN)	14
3.3.1 Technologie	14
3.3.2 Eigenschappen.....	15
3.4 Fotogrammetrie.....	17
3.5 Gravimetrie	17
4 Geodetische modellen	19
5 Geometriemodellen voor deformatieanalyse	21
5.1 Definitie van het begrip hoogte	21
5.2 Ruis, meetfouten en onzekerheid van modellen	21
5.3 Scheiding van ruis en model door vereffening.....	22
5.3.1 Basisgeometriemodel.....	22
5.3.2 Vereffening per punt.....	24
5.3.3 Integrale vereffening puntenveld	24
5.4 Nederlandse, landelijke referentiestelsels.....	25
5.5 Precisie van een puntenveld	26
5.5.1 Precisie van een punt is relatief	27
5.5.2 Werkelijke waarde	28
5.5.3 Correlatie van coördinaten	28
5.5.4 Spreidingsmaten.....	29

5.6	Schranking in ruimte en tijd	29
6	Geodetische deformatieanalyse in Nederland	30
6.1	Rijkswaterstaat: basisgeometriemodel	31
6.2	TU Delft: modellering per punt	31
6.3	TU Delft/NAM Integrale vereffening van puntenveld	31
6.4	TU Delft/NAM: double differences van hoogteschillen.	32
6.5	Bodembeweging en NAP-punten	32
7	Geodetische en geomechanische modellen	34
8	Conclusie	35
	Referenties	37

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Mijnbouwactiviteiten, met name de winning van gas uit het Groningenveld en de gasopslag in Norg, hebben significante gevolgen voor de omgeving. Deze activiteiten veroorzaken bodembewegingen, met name diepe bodemdaling en geïnduceerde bevingen, die leiden tot schade aan gebouwen en andere objecten. Het Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG) speelt een cruciale rol in de behandeling van deze schadegevallen.

De problematiek wordt gecompliceerder door de overlappende invloedsgebieden van diverse mijnbouwactiviteiten, waaronder gaswinning uit ongeveer 30 kleine velden, gasopslag in het veld Grijpskerk en zoutwinning op verschillende locaties. Deze stapeling van activiteiten kan leiden tot een gecombineerd effect, dat dieper en complexer is dan de som van de individuele effecten.

Daarnaast heeft diepe bodemdaling directe invloed op de hoogteligging van de bovenste grondlagen en het maaiveld. Deze verandering kan de waterhuishouding van een gebied beïnvloeden en tot aanpassingen van polderpeilen en boezempeilen leiden. Deze veranderingen kunnen op hun beurt weer invloed hebben op de stabiliteit en integriteit van gebouwen en andere structuren.

Het is daarom van belang om deze gecombineerde effecten van meervoudige mijnbouwactiviteiten grondig te onderzoeken. Het GEMMA-programma (Gestapelde Effecten Meervoudige Mijnbouw Activiteiten) is hiervoor opgezet.

Een nauwkeurige vaststelling van de mate van diepe bodemdaling is cruciaal voor het begrijpen van de totale impact van mijnbouwactiviteiten en het opvolgen van het bewijsvermoeden. In de afgelopen decennia is er veel onderzoek gedaan naar de wijze waarop diepe bodemdaling kan worden vastgesteld. Deze rapportage beoogt een samenvatting te geven van de methoden waarop diepe bodemdaling kan worden vastgesteld, welke data daarvoor in het kader van GEMMA geschikt is en hoe deze kennis door IMG kan worden toegepast.

1.2 Onderzoeksvragen

Ten behoeve van dit onderzoek zijn er drie onderzoeksvragen geformuleerd:

- Welke informatie is er voorhanden voor het bepalen van bodemdaling?
- Welke manieren zijn er om diepe bodemdaling vast te stellen en welke aanpak is voor toepassing door het IMG te adviseren?
- Wat is er nodig om op basis van het voorgaande tot een goede schatting van de historische diepe bodemdaling te komen en wat kan er gedaan worden om de best mogelijke schattingen van toekomstige diepe bodemdaling te verkrijgen?

1.3 Methodologie

Ten behoeve van dit onderzoek is er door Geodelta een literatuuronderzoek uitgevoerd. Hierbij hebben wij de vele publicaties uit de afgelopen decennia beoordeeld. Het resultaat is een samenvatting van de verschillende datasets en modellen die beschikbaar zijn. Omwille van het begrip biedt deze rapportage ook een beschrijving van de theorie die achter de toegepaste modellen ten grondslag ligt.

2 Geodesie, geometrie en bodembeweging

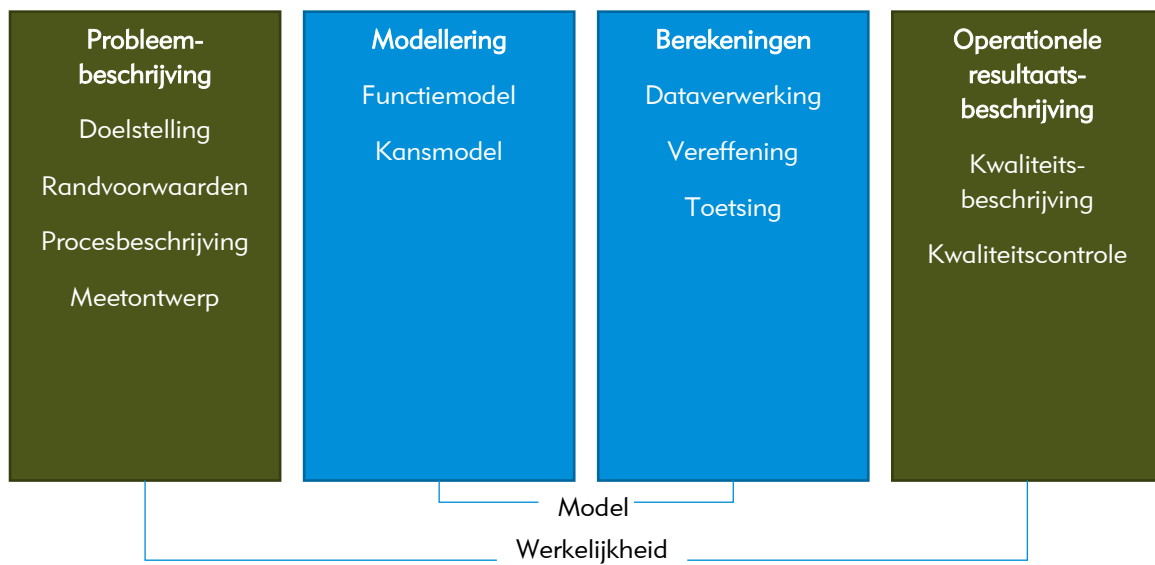
Geodesie wordt door de filosoof Aristoteles in de vierde eeuw voor Christus in een geschrift genoemd en gesteld tegenover Geometrie. Geodesie ziet hij als de praktische toepassing, met name in de landmeetkunde, van het theoretische raamwerk van de Geometrie, de meetkunde. Hiermee geeft hij al vroeg aan, dat de theorie van de wiskunde iets anders is dan de praktijk van het landmeten. Het verschil zit in wat we nu het in- en uitschakelen van het wiskundige model en de statistiek noemen. Het wiskundige model is in zichzelf gesloten en consistent. Om het toe te passen moet het worden vertaald naar de werkelijkheid: een punt in de wiskunde is een cirkel met straal nul, een lijn heeft geen breedte en een vlak is oneindig dun. Een punt in de werkelijkheid is iets, dat een zekere afmeting, hoe klein ook, heeft. Een lijn heeft een zekere dikte en is nooit exact recht. Een vlak is niet exact vlak en oneindig dun.

Om de beweging van de bodem en ondergrond in het Noorden van Nederland te meten, zijn er modellen beschikbaar, die beschrijven hoe die bodem en ondergrond eruit zien, waar die uit bestaan en hoe die bewegen. Deze **geomechanische modellen** zijn gebaseerd op theoretische beschouwingen en op metingen in het laboratorium (bijv. gedrag van materialen) en in het veld (grondboringen, spanningsmetingen enz.). Deze modellen voorspellen onder meer de bewegingen van bodem en ondergrond. Om de modellen te valideren, worden geodetische metingen uitgevoerd.

Geodetische metingen kenmerken zich door het feit, dat ze netwerken van gemeten punten, of rasters van metingen over grotere delen op, onder of boven het aardoppervlak vormen. Dat kunnen terrestrische metingen zijn (op de grond: waterpassing, tachymetrie, fotogrammetrie, laserscanning), of metingen vanuit drones en vliegtuigen (fotogrammetrie en remote sensing) en satellietmetingen (remote sensing). GPS-metingen kunnen als terrestrische metingen worden gezien (de metingen worden op de grond uitgevoerd) of als satellietmetingen (de metingen vinden via satellieten plaats).

Een beschouwing van methoden om de bodembeweging in Noord-Nederland vast te stellen, moet vanuit geodetisch perspectief dan ook bestaan uit zowel de meetmethodiek als de toegepaste modellen. Figuur 1 toont een schematische weergave van dit concept zoals dat in 1996 in de Handleiding voor Technische Werkzaamheden van het Kadaster werd vastgelegd. Op basis van de probleembeschrijving in de werkelijkheid wordt een model opgesteld. Binnen dit model worden de berekeningen uitgevoerd. Daarna wordt het model uitgeschakeld en kan de kwaliteit en toepasbaarheid van het resultaat beoordeeld worden.

In deze rapportage nemen zowel de geodetische metingen als de geomechanische modellen een centrale plek in.



Figuur 1 - Het inschakelen en uitschakelen van het model (naar HTW, 1996)

3 Geodetische metingen voor bodembeweging

3.1 Waterpassingen en het NAP

3.1.1 Technologie

Waterpassen is de oudste en tot op de dag van vandaag zeer regelmatig toegepaste methodiek voor het meten van hoogteverschillen. Het concept is uiterst simpel. Een instrument wordt waterpas geplaatst, ofwel: loodrecht op de vector die de richting van de zwaartekracht aanwijst. Daarna kan het hoogteverschil tussen twee bakken worden vastgesteld (Figuur 2).



Figuur 2 - Waterpassen voor vaststellen van het NAP

Door hoogteverschillen in een doorgaande waterpassing uit te voeren, kan het hoogteverschil ten opzichte van een referentiepunt worden vastgesteld. Op deze wijze kan een hoogtenetwerk worden aangelegd. Deze methodiek is in Nederland toegepast voor het Normaal Amsterdams Peil (NAP). Uitgaande van een referentiepunt, oorspronkelijk gelegen op de dam in Amsterdam, werden meetmerken door het hele land geplaatst en werd het hoogteverschil van dit meetmerk ten opzichte van het referentiepunt berekend. Dit hoogteverschil is de NAP-hoogte.

De eerste waterpassingen voor het NAP werden op verzoek van de Pruisische regering uitgevoerd vanaf 1875 (Weele, 1971). Deze metingen van de eerste nauwkeurigheidswaterpassing worden tegenwoordig als onbetrouwbaar beschouwd. De eerste betrouwbare metingen in Nederland stammen uit de tweede nauwkeurigheidswaterpassing van 1935. Daarmee is het NAP een dataset met de langste geschiedenis met betrekking tot hoogte-informatie in Nederland.

Het NAP is nooit bedoeld om bodembeweging vast te stellen en zonder extra bewerkingslagen is het NAP hier ook niet voor geschikt. Meetfouten, fouten in de registratie en een gebrek aan een kansmodel zijn hier debet aan. In Noord-Nederland zijn ten behoeve van de monitoring voor het Staatstoezicht op de Mijnen extra waterpassingen uitgevoerd die wel expliciet bedoeld zijn voor het monitoren van bodembeweging. Deze metingen zijn vaak ook opgenomen in de berekeningen van het NAP. Om het NAP te kunnen gebruiken voor het analyseren van bodembeweging moeten outliers verwijderd worden door middel van statistische toetsing. Veel beter is het om de ruwe meetdata te gebruiken om bodembeweging vast te stellen, zoals ook beschreven in paragraaf 5.3.3.

3.1.2 Eigenschappen

Tijdspanne	Vanaf 1935
Afgedekt gebied	Heel Nederland
Temporele resolutie	5 jaar (2)
Dichtheid	500 m
Geometrische kwaliteit bodemdaling	5 mm standaardafwijking (3)
Geometrische kwaliteit bodemrek	n.v.t. (4)

Tijdspanne

De oudst beschikbare metingen zijn afkomstig uit de eerste nauwkeurigheidswaterpassing die tussen 1875 en 1885 werd uitgevoerd. Deze metingen worden tegenwoordig als niet betrouwbaar verondersteld. De tweede nauwkeurigheidswaterpassing begon in 1926. De metingen in de regio Friesland, Groningen en Drenthe werden uitgevoerd tussen 1933 en 1935 (Waalewijn, 1979). Dit zijn derhalve de oudste metingen waarop teruggevallen kan worden.

Temporele resolutie

Voor het NAP bedraagt de vernieuwingsfrequentie tien jaar. In het noorden van het land wordt vanwege de mijnbouwactiviteiten echter een frequentie van vijf jaar aangehouden. Lokaal is de frequentie hoger, omdat er extra metingen worden of werden uitgevoerd door de concessiehouders. Deze metingen zijn ook opgenomen in het NAP.

Dichtheid

De mediane afstand tussen de peilmerken van het NAP bedraagt 500 m, maar er is sprake van een grote variantie in de onderlinge afstand. De meeste peilmerken liggen langs doorgaande wegen. Het kan zijn dat langs de weg de afstand 500 m bedraagt, maar dat de afstand haaks op de weg tot 5 kilometer groot is.

Geometrische kwaliteit bodemdaling

De standaardafwijking van de absolute hoogtes in het NAP bedraagt ongeveer 5 mm. Een betere kwaliteit kan worden behaald door te kijken naar de hoogteverschillen tussen twee peilmerken. Een gewaterpast hoogteverschil tussen twee punten op 1 km afstand bedraagt 0,5 mm. Om ervoor te zorgen dat de deformatieanalyse wordt uitgevoerd op zo hoog mogelijke kwaliteit, kunnen het beste de ruwe meetgegevens gebruikt worden voor de berekening van de deformaties. In paragraaf 5.3.3 komen wij terug op methoden om ruwe meetgegevens te gebruiken in de deformatieanalyse.

Geometrische kwaliteit bodemrek

De peilmerkdata is alleen beschikbaar in hoogte. Eventuele horizontale rek kan alleen modelmatig uit de data worden afgeleid.

3.2 Radarinterferometrie

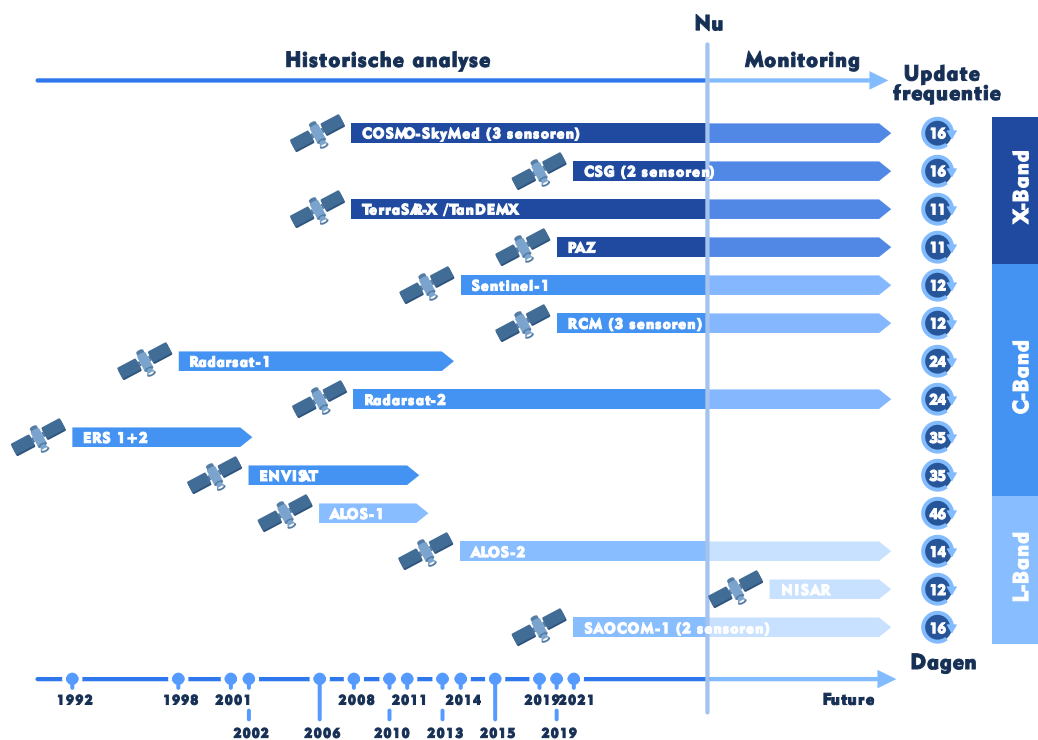
3.2.1 Technologie

Radarinterferometrie vanuit satellieten, bekend als Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), is een revolutionaire techniek die essentieel is geworden in het monitoren en meten van bodembeweging. InSAR maakt gebruik van het principe van radarinterferometrie, dat is gebaseerd op het vergelijken van fase-informatie van radarbeelden van hetzelfde gebied, verkregen op verschillende tijdstippen. Deze vergelijking maakt het mogelijk om zeer nauwkeurige metingen van oppervlaktevervorming te verkrijgen, op de orde van millimeters tot centimeters.

Het werkingsprincipe van InSAR bestaat eruit dat radarstralen vanuit een satelliet naar het aardoppervlak worden uitgezonden. Deze stralen worden gereflecteerd en opgevangen door de satelliet, waarbij de fase-informatie wordt opgeslagen. Door de fase-informatie van twee of meer beelden te vergelijken, kan de relatieve verandering in positie van het oppervlak worden afgeleid.

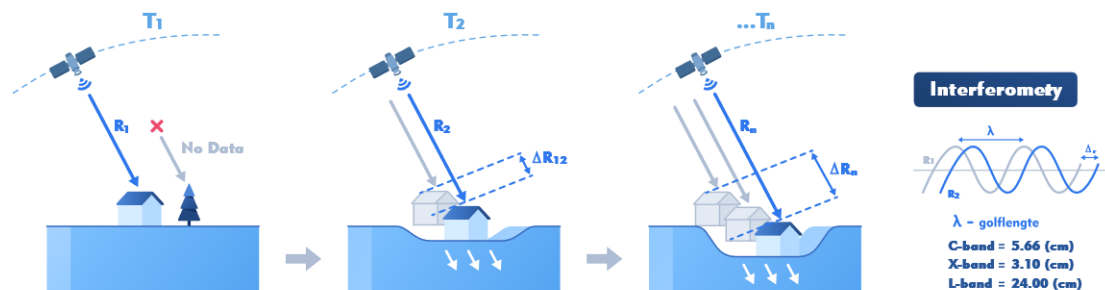
Een belangrijk concept binnen InSAR is Persistent Scatterers (PS) interferometrie. Persistent Scatterers verwijst naar de punten binnen een radarbeeld die een hoge reflectiviteit en stabiele fase-eigenschappen vertonen over de tijd. Dit betekent dat ze een stabiele radarresponse geven in meerdere radarbeelden, waardoor ze zeer geschikt zijn voor de detectie van kleine veranderingen in de oppervlaktehoogte. PS-interferometrie maakt het mogelijk om een tijdreeks van oppervlaktevervormingen te reconstrueren.

Er bestaat op dit moment een grote constellatie aan radarsatellieten voor het uitvoeren van interferometrie (Figuur 3). De oudste data stamt uit 1992, maar voor betrouwbare analyses kan het best teruggegrepen worden op data van Radarsat-2, TerraSAR-X en Sentinel. De Sentinel-data is gratis beschikbaar en maakt historische analyses vanaf ongeveer 2016 mogelijk. Met de data uit TerraSAR-X is het mogelijk om berekeningen met meer detail uit te voeren.



Figuur 3 - Radarsatellieten in het verleden, nu en in de toekomst.

Het radarsignaal wordt uitgezonden onder een hoek. Afhankelijk van de satelliet en de plaats op aarde is deze hoek tussen de 20 en 30 graden ten opzichte van de verticaal. De lijn die onder deze hoek van de satelliet naar het punt op de aarde loopt is de Line-Of-Sight (LOS). De deformatie die uit meerdere metingen wordt vastgesteld heeft betrekking op de beweging in deze richting (Figuur 4). Dit is dus geen verticale bodembeweging.



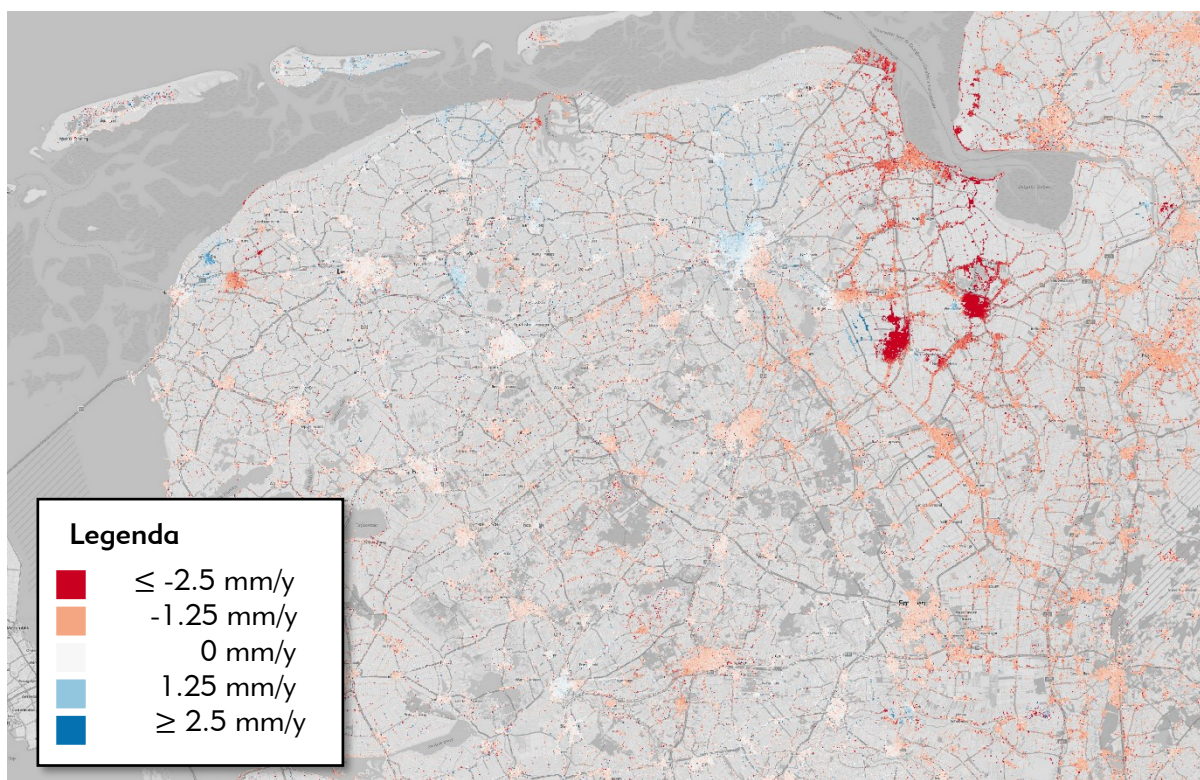
Figuur 4 - Vaststellen van bodembeweging in de Line-Of-Sight (LOS)

Er zijn technieken om uit deze diagonale beweging de verticale bodembeweging af te leiden. Eén methode is door aan te nemen dat er geen sprake is van horizontale beweging. Door het punt als zodanig te schranken, kan de verticale component worden berekend.

Een andere aanpak bestaat eruit InSAR data uit twee verschillende richtingen te combineren. Als voor een punt kan worden vastgesteld dat deze uit twee richtingen is waargenomen kan zowel een horizontale component als een verticale component worden vastgesteld. In de praktijk komt dit erop neer dat er een oost-westbeweging en een verticale beweging wordt gerapporteerd. Een eventuele noord-zuidbeweging is vanwege de dominanten noord-zuidrichting van de satellietbaan namelijk moeilijk vast te stellen. Figuur 5 toont een uitsnede van Noord-Nederland met daarin de oost-westbewegingen volgens EGMS.

Op basis van de Sentinel-data is voor heel Europa een bodembewegingskaart beschikbaar. Deze kaart is te vinden via <https://egms.land.copernicus.eu/>. Zowel de verticale als de oost-westcomponent zijn via deze service op te vragen. Merk op dat voor het onderscheiden van deze twee componenten modelaannames zijn gemaakt die niet noodzakelijk de beste zijn voor Nederland. Zo maakt EGMS gebruik van een raster van 100m x 100m en zijn alle punten daarin gemiddeld (Ferretti, Passera, & Capes, 2023) en samengevoegd tot één punt. Hierdoor gaat veel detail op pand niveau verloren. Verder is het belangrijk dat de bewegingen zijn weergegeven ten opzichte van een GNSS-netwerk dat de beste fit heeft voor heel Europa. Aangezien Nederland een kanteling maakt (postglaciale opheffing) is dit voor Nederland niet de best passende referentie. Verder bestaat het risico op fouten in de vaststelling van de fasemeerduidigheid. Dit kan met name het geval zijn bij zeer grote horizontale verschuivingen. Aan een opmerkelijke waarde in de EGMS kan dan ook nooit de conclusie worden verbonden dat er ook daadwerkelijk iets aan de hand is, zonder dat er extra onderzoek aan vooraf is gegaan.

Anderzijds is de EGMS zeer eenvoudig beschikbaar en biedt het direct een schat aan inzicht. Dat maakt het EGMS uiterst geschikt voor een eerste inventarisatie, waarna detailstudies kunnen worden uitgevoerd op locaties die uit het EGMS zijn opgemerkt. Voor deze detailstudies kan dan bijvoorbeeld een detailstudie met TerraSAR-X worden uitgevoerd. Een combinatie met NAP-data op basis van een analyse van de ruwe hoogtemetingen is in deze aan te bevelen, maar dit vergt nog wel het nodige onderzoek.



Figuur 5 - Horizontale bodembeweging volgens het EGMS.

3.2.2 Eigenschappen

Tijdspanne	Vanaf 2010 (TerraSAR-X) of 2016 (EGMS via Sentinel)
Afgedekt gebied	Hele wereld
Temporele resolutie	Twee dagen
Dichtheid	Varieert. In EGMS 100m x 100m
Geometrische kwaliteit bodemdaling	Precisie van de trend: 1 mm/jaar (EGMS)
Geometrische kwaliteit bodemrek	Precisie van de trend: 1 mm/jaar (EGMS)

Tijdspanne

Zie Figuur 3.

Temporele resolutie

De temporele resolutie is afhankelijk van de satelliet en de locatie op aarde. In Nederland is een temporele resolutie van 2 dagen haalbaar. Ruim voldoende voor de toepassing van bodemdaling.

Dichtheid

In stedelijk gebied kunnen de persistent scatterers, de stabiele punten waarop een deformatieanalyse kan worden uitgevoerd, een dichtheid hebben tussen de 5 en 10 meter. Deze dichtheid is volledig afhankelijk van de aanwezigheid van voldoende stabiele reflecterende punten. In landelijk gebied is de dichtheid veel lager met vrijwel geen enkele punten op weilanden en bij akkerbouw. Voor gebiedsdekkende analyses is het gangbaar om meerdere punten samen

te voegen in een raster. Het EGMS, de European Ground Monitoring Service, gebruikt hiervoor een raster van 100 meter.

Geometrische kwaliteit bodemdaling

Het EGMS rapporteert een precisie van 1mm/jaar. Merk op dat er sprake kan zijn van systematische fouten zoals beschreven in de introductie (Kotzerke, 2022).

Geometrische kwaliteit bodemrek

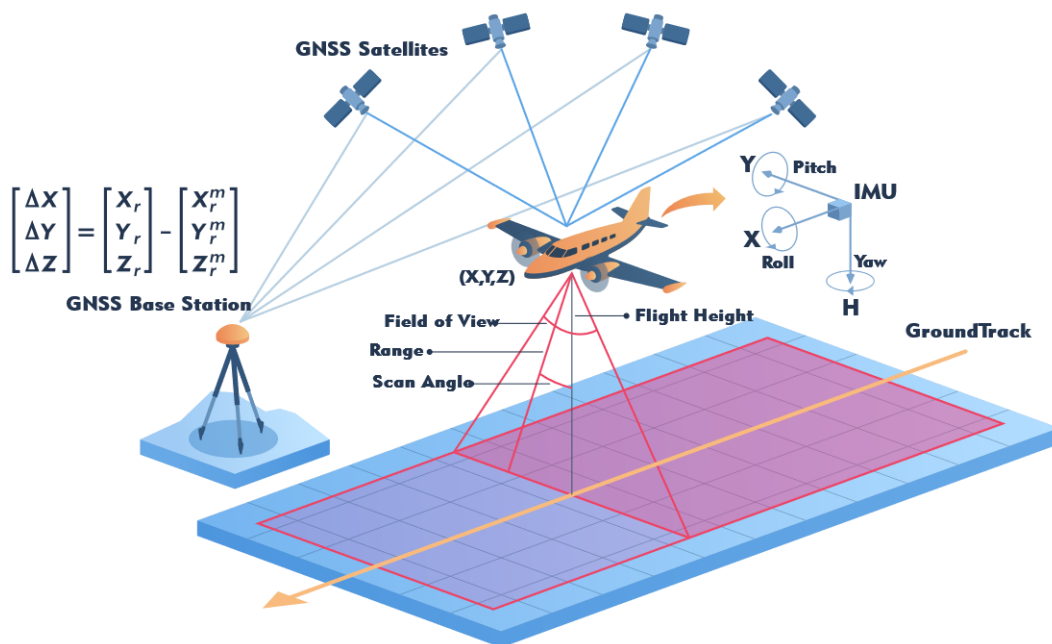
Het EGMS rapporteert een precisie van 1mm/jaar. Merk op dat er sprake kan zijn van systematische fouten zoals beschreven in de introductie (Kotzerke, 2022; Brouwer, 2021).

3.3 Laserscanning (AHN)

3.3.1 Technologie

Airborne Laser Scanning (ALS), ook bekend als Light Detection and Ranging (LiDAR), is een technologie die wordt gebruikt om gedetailleerde en nauwkeurige 3D-modellen van het aardoppervlak te creëren. De technologie is gebaseerd op de uitzending en ontvangst van laserpulsen vanuit een sensor die meestal aan boord van een vliegtuig of drone is gemonteerd.

Het werkingsprincipe van ALS is relatief eenvoudig. Een laserstraal wordt uitgezonden vanaf de airborne sensor en weerkaatst vanaf objecten op de grond. De teruggekaatste laserstraal wordt dan gedetecteerd door de sensor. De afstand tussen de sensor en het object wordt berekend op basis van de tijd die nodig is voor de laserstraal om terug te keren naar de sensor (de tijd van vlucht) en de snelheid van het licht. Door het combineren van deze afstandsmetingen met de exacte positie en oriëntatie van het vliegtuig op het moment van elke puls (gewoonlijk verkregen met behulp van GPS en een Inertial Measurement Unit), kan een zeer nauwkeurig 3D-punt van het oppervlak worden berekend (Figuur 6).



Figuur 6 - Het werkingsprincipe van Airborne Laser Scanning

Sinds 1997 wordt Airborne Laserscanning gebruikt om een landelijk hoogtebestand te maken. Dit bestand heet het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Een 3D-visualisatie van het AHN is getoond in Figuur 7. Het AHN is per definitie ongeschikt voor het vaststellen van bodembewegingen kleiner dan 16 centimeter. Geodelta heeft in samenwerking met Het Waterschapshuis een nieuwe berekeningsmethodiek ontwikkeld waarmee bodembeweging uit het AHN kan worden berekend met een precisie op centimeterniveau. Deze bodembeweging heeft dan echter uitsluitend betrekking op de ondiepe bodemdaling.



Figuur 7 - Het AHN4 gevisualiseerd bij de stad Groningen

3.3.2 Eigenschappen

Tijdspanne	Vanaf 2019 (1)
Afgedekt gebied	Heel Nederland
Temporele resolutie	3 jaar
Dichtheid	6 tot 14 punten per m ²
Geometrische kwaliteit bodemdaling	5 cm stochastisch en 5 cm systematisch
Geometrische kwaliteit bodemrek	Maximaal 80 mm fout

Tijdsspanne, temporele resolutie en dichtheid

Onderstaande tabel toont de opnametijdstippen voor het AHN in de regio Groningen.

Editie	Inwinperiode Groningen	Dichtheid
AHN1	1997-1999	1 punt/16 m ²
AHN2	2009	6 tot 10 punten/m ²
AHN3	2019	6 tot 10 punten/m ²
AHN4	2022	10 tot 14 punten/m ²
AHN5	2025	10 tot 14 punten/m ²

Geometrische kwaliteit bodemdaling

Vanaf het AHN2 schrijven de specificaties schrijven voor dat de hoogtecomponent een kwaliteit moet hebben van 5 cm stochastisch en 5 cm systematisch. Dit betekent dat punten in het AHN een systematische verschuiving tot 5 centimeter mogen hebben. Daarnaast mag er sprake zijn

van een ruisband van 5 cm. Door een ongunstige verwoording in het bestek, kan er in de praktijk sprake zijn van een systematische verschuiving tot ongeveer 8 centimeter.

Dit betekent dat bij een vergelijking van twee datasets de fout in hoogte tot 16 centimeter kan bedragen.

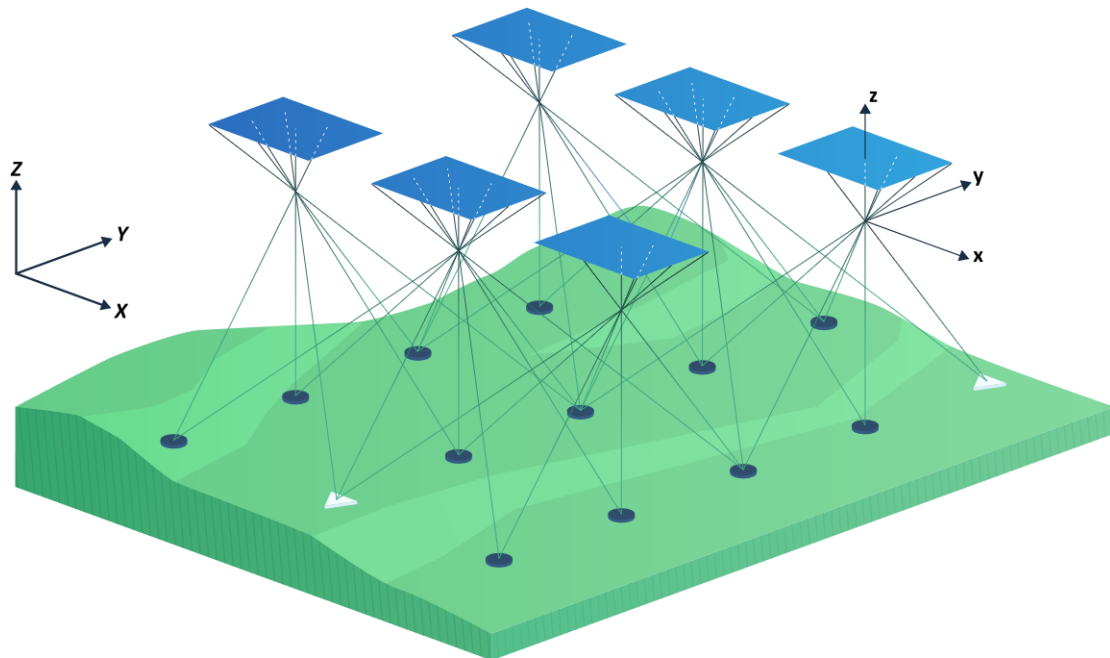
Geodelta heeft een nieuwe methodiek ontwikkeld om een betere hoogtevergelijking uit te voeren. Dit werk is gedaan ten behoeve van analyse in veen-weidegebieden, alwaar er doorgaans weinig reflectie aanwezig is uit InSAR-data. Deze methodiek wordt ingezet met het AHN3 als referentiepunt. De data uit het AHN2 is hiervoor ongeschikt. Met deze methodiek kan een precisie van de bodemdaling behaald worden op centimeterniveau. Het gaat er echter expliciet om ondiepe bodemdaling. Dit betekent dat het AHN ongeschikt is voor het vaststellen van diepe bodemdaling. Toch zou juist deze informatie nuttig kunnen zijn ten behoeve van GEMMA, bijvoorbeeld voor het vaststellen van de gevolgen van veranderingen in de grondwaterstand. Een integratie met zowel de NAP-data en de InSAR-data zou vanuit academisch perspectief zeer interessant zijn.

Geometrische kwaliteit bodemrek

De eisen die in het AHN worden gesteld aan de horizontale plaatsbepaling zijn zeer ruim. Een fout tot 80 centimeter is toegestaan. Het is technisch haalbaar om het AHN te gebruiken voor het vaststellen van relatieve verplaatsingen tussen panden over een afstand tot 100 meter op centimeterniveau. Dit is echter wel maatwerk.

3.4 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie is een techniek waarmee geometrie uit foto's kan worden afgeleid. Het principe bestaat eruit dat punten in het terrein uit meerdere foto's worden ingemeten, zodat er een 3D-coördinaat kan worden berekend uit de insnijding vanuit meerdere foto's (Figuur 8).



Figuur 8 - Werkingsprincipe van fotogrammetrie.

Het mooie van fotogrammetrie is dat deze techniek schaalonafhankelijk is. Dit wil zeggen dat fotogrammetrie op korte afstand en op hele lange afstand kan worden ingezet. De haalbare kwaliteit is direct afhankelijk van de afstand tussen foto en object. Geodelta heeft software ontwikkeld om deformaties aan kademuren fotogrammetrisch vast te stellen met een precisie van 2,5 mm. Zou dezelfde techniek worden ingezet vanuit luchtfoto's, dan volgt een precisie in de orde van centimeters.

We benoemen de technologie hier omdat er een hele lange historie bestaat van luchtfoto's in Nederland. De archieven met fotogrammetrische opnamen gaan terug tot het midden van de vorige eeuw. Het vaststellen van verticale en horizontale bodembeweging uit deze foto's is echter zeer bewerkelijk en zou onvoldoende precisie leveren voor de toepassing van het IMG.

Ook drones maken doorgaans gebruik van fotogrammetrie. Bij een voldoende lage vlieghoogte is het mogelijk om met drones een precisie te halen op centimeterniveau. Er bestaat op dit moment echter nog geen historie van dronebeelden waarmee terug in de tijd kan worden gekeken.

3.5 Gravimetrie

Het aantrekkingsveld dat door de aarde wordt opgewekt door zijn massa, bekend als gravitatiekracht, beïnvloedt alle voorwerpen. Daarnaast ervaren roterende objecten op aarde een

centrifugale kracht. De gezamenlijke werking van deze krachten resulteert in wat we de zwaartekracht noemen. Interessant is dat, wanneer de aarde in verticale richting beweegt - zoals tijdens processen van diepe bodemdaling, de zwaartekracht op een meebewegend object toeneemt. Het bijhouden van deze zwaartekrachtfluctuaties kan dus helpen bij het identificeren van verticale bodembewegingen.

Geavanceerde zwaartekrachtmetingen, ontwikkeld om dit fenomeen te volgen, zijn in staat om zwaartekrachtveranderingen te detecteren die aanzienlijk kleiner zijn dan de algemene zwaartekracht. Het gebruik van deze instrumenten biedt een uniek voordeel ten opzichte van andere meettechnieken zoals die eerder in deze rapportage zijn beschreven, namelijk dat ze de mogelijkheid hebben om absolute bodembewegingen te meten. Het is echter belangrijk om te erkennen dat om een nauwkeurige meting van absolute bodembeweging te verkrijgen, langdurige observaties noodzakelijk zijn op specifiek geselecteerde locaties.

In Nederland zijn we sinds de jaren '90 actief bezig met het monitoren van de zwaartekracht op verschillende locaties. De TU Delft voert sinds 2005 deze observaties jaarlijks uit, wat resulteerde in een netwerk van zes stations (Kootwijk, Westerbork, Epen, Zundert, Oudemirdum en Texel). Westerbork en Epen hebben de meest uitgebreide en accurate tijdreeksen, terwijl de stations Oudemirdum en Texel relatief nieuw zijn en nog in de beginfase van gegevensverzameling verkeren.

Het belang van deze zwaartekrachtmetingen ligt erin de stabiliteit van het NAP-nulvlak te evalueren. Dit vlak wordt vastgelegd door stabiel-veronderstelde ondergrondse merken op de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug. De aanname is dus dat de hoogte van deze punten in de loop der tijd niet veranderen. Het is de vraag of deze aanname klopt. Met zwaartekrachtmetingen kan dit gemeten worden.

Het belang voor de bepaling van diepe bodemdaling ligt erin dat een mogelijke kanteling van het NAP-nulvlak niet zichtbaar is in bijvoorbeeld de analyse zoals beschreven in paragraaf 3.1. Voor de analyse van bodemdaling op gebouwniveau zal dit effect naar ons inzicht echter verwaarloosbaar zijn, waardoor we het in deze rapportage niet verder uitwerken.

4 Geodetische modellen

De verleiding is groot om geodetische metingen te zien als onweerlegbare informatie over feitelijke bewegingen. Helaas zijn geodetische metingen niet onfeilbaar. Zij hebben een beperkte precisie (hoe goed die vaak ook is - cm-niveau, mm-niveau, of daaronder), die met standaardafwijkingen wordt beschreven. Ook kunnen de metingen onderling (statistisch) gecorreleerd zijn, waar meestal weinig over bekend is.

Naast de beperkte precisie speelt mee, dat de kwaliteit van geodetische metingen afhankelijk is van de gebruikte **geodetische modellen**. Deze geodetische modellen onderscheiden we hier in:

1. modellen van het instrumentarium, de meettechniek en de meetomgeving, hierna aangeduid als **meetmodellen**;
2. modellen van de geometrie van de gemeten objecten op, onder en boven het aardoppervlak en van het aardoppervlak en de aarde zelf, hierna aangeduid als **geometriemodellen**.

Meetmodellen beschrijven hoe de metingen tot stand komen. Als voorbeeld kan een afstandsmeting met een laserafstandsmeter dienen. Inwendig in de laserafstandsmeter wordt een laserstraal gegenereerd en verzonden. De laserstraal gaat door de lucht naar het punt, waarnaar de afstand wordt gemeten. Het meetmodel bepaalt, waar in het instrument het beginpunt is van de afstandsmeting, met welke snelheid de laserstraal zich door de lucht beweegt (hangt af van luchtdichtheid, luchtvochtigheid enz.), volgens welk pad (rechtlijnig of gekromd; afhankelijk van de refractie-index van de lucht) en, tenslotte, wat precies het reflecterende, te meten punt is. Bij verdere analyse zal blijken, dat door het instrument nog meer modellen worden gehanteerd, afhankelijk van de meettechniek van de laserafstandsmeter (bijv. wordt interferometrie gebruikt, maar hoe precies?). In het algemeen zal een laserafstandsmeter niet vertrouwen op slechts een enkele meting, maar zal hij in een fractie van een seconde vele metingen uitvoeren, waarop meteen al data-analyse wordt uitgevoerd: foute waarnemingen eruit halen en de resterende middelen. Als de laserafstandsmeter in beweging is, kunnen de metingen van een traagheidsnavigatiesysteem (een INS) worden gebruikt om via een Kalmanfilter de gemeten afstanden te middelen. De gebruiker merkt er niets van, krijgt er zelfs geen informatie over, als hij de fabrikant van het instrument erom vraagt. Het uiteindelijke resultaat is een getalletje, dat de afstand in meters geeft. Soms wordt dit getalletje aangeduid als de *ruwe meting*, d.w.z. de meting, waar nog geen bewerkingen mee zijn uitgevoerd. Het moge uit het voorgaande duidelijk zijn, dat zelfs een ruwe meting al vele bewerkingen heeft ondergaan, afhankelijk van het gehanteerde meetmodel.

Geometriemodellen beschrijven hoe de geodetische metingen zich verhouden tot de geometrie van de objecten, waarvan men de beweging wil weten. Als voorbeeld kan het meten van de hoogtes van waterpasbouten dienen. Met een waterpasinstrument zijn barcodes op waterpasbaken geautomatiseerd gelezen. Via meetmodellen zijn daaruit de hoogteverschillen tussen alle gemeten bakken bepaald. Maar wat zeggen die over de NAP-hoogtes van de bouten, waarop de bakken hebben gestaan? Het aardoppervlak is gekromd (de aarde is bij benadering een bol) en het nulvlak van NAP is een gekromd vlak dat ergens onder of boven ons loopt, geheel onzichtbaar en met plaatselijke afwijkingen door lokale afwijkingen van de massadichtheid van de aarde en de atmosfeer. We moeten een geometriemodel aannemen (en een gravimetrisch model voor de beschrijving van de zwaartekracht) om onze gemeten hoogteverschillen zodanig te vereffenen, dat we zo goed mogelijke NAP-hoogtes krijgen.

Bij bodemdalingsanalyses gaat het om veranderingen in de geometrie. Bij de geodetische vereffeningsberekeningen spelen nu naast de standaardafwijkingen van het instrumentarium ook de temporele ruis van het geometriemodel en de wiskundige beschrijvingen van geometrieveranderingen een grote rol.

Met de **temporele ruis** worden voortdurend in de tijd optredende, onvoorspelbare, alle kanten opgaande, maar altijd kleine bewegingen van de waterpasbouten (of andere meetpunten) bedoeld. De oorzaak kan verandering van temperatuur, luchtdruk, vochtigheid en dergelijke zijn, of andere fysieke oorzaken, zoals verkeer, bouwactiviteiten of mijnbouw. De oorzaak kan lokaal zijn, maar ook vanaf grotere afstand werken. De temporele ruis kan een elastische beweging veroorzaken, wat betekent, dat het meetpunt beweegt rond een vastliggend punt (een soort gemiddelde), maar er kan ook een langzame, maar merkbare drift plaatsvinden, zeker als de oorzaak bodembeweging is. Zo een drift wordt mooi geïllustreerd door de beweging van kademuuren in een stad als Amsterdam. Te constateren is, dat in de binnenstad een kademuur langs een gracht tussen twee bruggen in de loop van honderden jaren is gaan uitbuiken in het midden tussen de twee bruggen, terwijl dicht bij de bruggen er geen beweging van de kademuur is geweest. De uitbuiking kan tot 20 cm oplopen.

Een **wiskundige beschrijving van geometrieveranderingen** is bijvoorbeeld, dat een waterpasbout recht evenredig met de tijd aan het zakken is, met een knikpunt (een abrupte wijziging in de dalingssnelheid) op een zeker tijdstip. Dat noemen we een *functionele beschrijving* en heeft invloed op de vereffeningsberekeningen en dus op de geschatte daling per tijdseenheid. Als een wiskundige beschrijving van geometrieveranderingen kunnen ook de standaardafwijkingen van geomechanische processen in de ondergrond worden gezien. Zij zijn op een of andere manier in het geodetische geometriemodel opgenomen. Deze standaardafwijkingen zijn meestal vele malen groter dan de standaardafwijkingen, die in de meet- en geometriemodellen optreden. Er moet steeds zorgvuldig beoordeeld worden, of de meetmodellen, de geometriemodellen en de geomechanische modellen goed op elkaar zijn afgestemd. De meetmodellen hebben meestal een hoge precisie, de geomechanische een lage en de geometriemodellen zitten daartussenin. Juist de geometriemodellen spelen een cruciale rol. Schijnbaar kleine wijzigingen in deze modellen kunnen ingrijpende gevolgen hebben voor de conclusies die over bewegingen worden getrokken.

5 Geometriemodellen voor deformatieanalyse

Eenieder die zich bezighoudt met de bodemdaling in Noord-Nederland meent te weten, dat het meten van de bodemdaling neerkomt op het meten op twee of meer tijdstippen van de hoogten van punten en het van elkaar aftrekken van die hoogten. Toch is dat slechts een heel eenvoudig geometriemodel. We zullen dit eenvoudige model hierna het *basisgeometriemodel* noemen. Dit model *voldoet in veel gevallen niet*. Daar zijn verschillende redenen voor, die te maken hebben met:

- de definitie van het begrip hoogte;
- de meetruis, meetfouten, de temporele ruis, en de onzekerheid van de meet-, geometrie- en geomechanische modellen;
- de schranke in ruimte en tijd.

Hierop wordt in de komende paragrafen nader ingegaan.

5.1 Definitie van het begrip hoogte

Het van elkaar aftrekken van twee gemeten hoogten van hetzelfde punt om een deformatie te bepalen, is iets anders dan het van elkaar aftrekken van bijvoorbeeld twee gemeten lengtes van een staaf, eerst gemeten bij 0°C en daarna bij 20°C. Bij de staaf zijn het beginpunt en het eindpunt duidelijk. Bij een hoogtemeting is dat niet zo. Moeten we voor een hoogte gemeten ten opzichte van NAP voor het beginpunt naar het nulpunt in Amsterdam gaan? Verderop gaan we daar nader op in. Daar zal duidelijk worden, dat het gemeten hoogteverschil van één punt geen waarde heeft. Daarmee wordt een belangrijk uitgangspunt van het basisgeometriemodel onderuit gehaald.

5.2 Ruis, meetfouten en onzekerheid van modellen

Een verschil in hoogte, dat wordt gemeten op twee verschillende tijdstippen, is niet alleen het gevolg van bijvoorbeeld bodembeweging, maar er zijn ook andere oorzaken.

- De meetruis van het waterpasinstrument zorgt voor kleine verschillen in de waarnemingen. Daar is niet aan te ontkomen. De mogelijke grootte van de verschillen wordt door de standaardafwijking beschreven.
- Er zijn fouten gemaakt bij het uitvoeren van de metingen, die niet zijn opgemerkt, ondanks de controlemetingen.
- Het meetmodel klopt niet. Het meetmodel gaat er bijvoorbeeld van uit, dat de lichtstraal in een rechte lijn van baak naar waterpasinstrument is gegaan, maar door heet asfalt zijn in de lucht variaties van temperatuur ontstaan, waardoor de lichtstraal is gaan trillen.
- Het geometriemodel of het geomechanische model klopt niet, of beide kloppen niet, of kloppen slechts in grote lijnen, wat betekent, dat ze een te grote versimpeling zijn, of slechts onder bepaalde omstandigheden gelden.

Om een goede schatting te krijgen van de bodembeweging, moet bekend zijn, hoe groot de genoemde ruis, fouten en onzekerheden zijn. Het basisgeometriemodel kan daar geen uitspraken over doen en voldoet daarom niet. Om er wel een uitspraak over te kunnen doen, moeten de waarnemingen getoetst worden aan de modellen om ruis en model van elkaar te scheiden. Dit wordt soms het *scheiden van signaal en ruis* genoemd, waarbij het model gelijk is aan het signaal. Soms wordt de term *signaal* gereserveerd voor afwijkingen en details van het model, die onderdeel

van het model zijn, maar in de berekeningen als ruis, dat wil zeggen als een stochastisch verschijnsel worden behandeld.

5.3 Scheiding van ruis en model door vereffening

In de geodesie is het een goede gewoonte om ervoor te zorgen, dat er altijd controlemetingen zijn. Doordat elke waarneming op een of andere wijze is gecontroleerd, kunnen alle waarnemingen worden **vereffend**. Dat betekent, dat ze zodanig worden aangepast, dat ze gezamenlijk aan het model voldoen.

Wat "het model" is, kan met een **voorbeeld** worden geïllustreerd. Stel, dat er vijf waterpasbouten zijn, genaamd A, B, C, D en E. De bouten zijn in gebouwen geplaatst en de kleinste afstand tussen twee bouten is 500 m en de grootste afstand 3 km. Met een waterpasinstrument worden hoogteverschillen tussen baken gemeten, waarbij de afstand tussen twee baken steeds ongeveer 60 m is. Startend met een baak op bout A wordt met slagen van 60 m gewaterpast naar punt B, dan naar C, naar D en tenslotte naar E. Dan wordt de "waterpaskring" gesloten door van E rechtstreeks naar A te waterpassen. De resulterende hoogte van A moet overeenkomen met de uitgangshoogte van A. Anders gezegd: alle in de kring gemeten hoogteverschillen moeten bij elkaar opgeteld op nul uitkomen. Dit is de eerste "voorwaarde". Dan wordt rechtstreeks gewaterpast van A naar C en uiteindelijk van C naar E. Dat levert twee extra voorwaarden op en er kunnen op verschillende manieren kringen worden gevormd, waarvan de gemeten hoogteverschillen op nul zouden moeten uitkomen. We kiezen de kringen: ABCA, ACEA, CDEC. Via een vereffening met de methode van de kleinste kwadraten worden de gemeten hoogteverschillen zodanig aangepast, dat de waarnemingen aan de drie kringvoorwaarden gaan voldoen (de som van de hoogteverschillen in de kring zijn nul). De drie kringen vormen het **model** en we zeggen, dat de vereffende waarnemingen aan het model voldoen. Daarmee sporen we niet alleen fouten in de waarnemingen op, maar de aangepaste waarnemingen (de vereffende waarnemingen) hebben ook een **betere precisie** (kleinere standaardafwijking) dan de niet aangepaste waarnemingen.

Voor het bepalen van bodemdaling wordt vervolgens een tweede model ingezet, het **deformatiemodel**. Voor het opstellen van het deformatiemodel veronderstellen we, dat op een later tijdstip, bijvoorbeeld een jaar later, opnieuw de hoogteverschillen tussen de vijf waterpasbouten A, B, C, D en E worden gemeten. We voeren opnieuw een vereffening uit en constateren, dat de vereffende hoogteverschillen sterk lijken op de hoogteverschillen, die een jaar eerder zijn gemeten, maar toch iets anders zijn. Er zijn verschillende oorzaken voor de gewijzigde hoogteverschillen aan te wijzen, zoals de meetruis, de temporele ruis en natuurlijk deformaties, zoals bodemdaling.

Het deformatiemodel zegt, dat ofwel de hoogteverschillen tussen de vijf punten op het eerste en tweede tijdstip *gelijk* zijn, ofwel een *verandering* hebben ondergaan. De verandering wordt bijvoorbeeld veroorzaakt door de verzakking van twee punten, C en D. Er zijn drie manieren mogelijk om de grootte van de verzakking van beide punten te bepalen.

5.3.1 Basisgeometriemodel

Het meest gebruikelijk is het basisgeometriemodel. Uit de vereffende hoogteverschillen worden eerst de hoogten van de vijf punten berekend voor elk van beide meettijdstippen. De hoogten worden in een spreadsheet gezet en de verschillen tussen het eerste en twee meetmoment worden uitgerekend. Deze verschillen worden beschouwd als de verzakkingen. Het probleem, dat zich nu voordoet, is dat *alle* punten verschillen tussen beide tijdstippen zullen laten zien. Daarom wordt een **drempelwaarde** gekozen, waaronder een verschil niet als een verzakking of deformatie wordt

gezien. De keuze van de drempelwaarde is lastig statistisch te onderbouwen. Meestal wordt een ervaringswaarde gekozen zonder goede onderbouwing.

Als niet hoogteverschillen worden gemeten, maar er worden metingen gedaan, waaruit twee- of driedimensionale coördinaten (2D of 3D) worden berekend, wordt op een vergelijkbare wijze gewerkt. De x- en y-coördinaten (2D) of x-, y- en z-coördinaten (3D) worden in een spreadsheet gezet en de verschillen worden per coördinaattype (x, y, z) uitgerekend. Ook nu is een drempelwaarde nodig.

De keuze van de drempelwaarde is niet het enige probleem. Het rechtstreeks met elkaar vergelijken van coördinaten van twee verschillende tijdstippen betekent, dat de referentiestelsels op beide tijdstippen gelijk moeten zijn geweest. Het gaat om de *operationeel gedefinieerde* referentiestelsels, die afhankelijk zijn van de keuze van de *grondslag*. Deze begrippen worden verderop nader toegelicht. Hier wordt alleen geconstateerd, dat de operationele definitie voor onnauwkeurigheid zorgt. Het gevolg is, dat deze onnauwkeurigheid rechtstreeks in de berekende verschillen terugkomt. Dat is te voorkómen door de coördinaten van het tweede tijdstip te **transformeren**. Het betreft een gelijkvormigheidstransformatie of een congruentietransformatie. Bij de eerste wordt een rotatie, translatie en schaalverandering toegepast, bij de tweede alleen een rotatie en translatie. Voor hoogtemetingen wordt alleen een translatie uitgevoerd. Vaak worden de transformatieparameters berekend door de coördinaten van een of twee of drie punten in respectievelijk 1D, 2D en 3D, op beide tijdstippen aan elkaar gelijk te maken. We noemen dit punt of deze punten de basis, rekenbasis of **schrankingsbasis**. Het probleem is, dat de daarna berekende coördinaatverschillen afhankelijk zijn van de schrankingsbasis: een andere **basiskeuze** geeft andere coördinaatverschillen. Het is mogelijk om de basis te kiezen als een soort gemiddelde van alle punten, waardoor het effect iets minder groot is, maar beter zou het zijn om deformaties te schatten op een manier die **basisonafhankelijk** is. En dat kan, maar wordt in de praktijk zelden gedaan.

We constateren, dat in het basisgeometriemodel:

- per punt coördinaten worden berekend in een operationeel gedefinieerd referentiestelsel;
- een gelijkvormigheidstransformatie of een congruentietransformatie van alle coördinaten van het tweede tijdstip naar het referentiestelsel van het eerste tijdstip nodig is;
- per punt basisafhankelijke coördinaatverschillen tussen twee tijdstippen worden berekend;
- de coördinaatverschillen worden vergeleken met een drempelwaarde, die niet statistisch is onderbouwd.

In het basisgeometriemodel worden de berekende coördinaatverschillen vergeleken met de drempelwaarde om te toetsen, welke verschillen een deformatie vertegenwoordigen. Ook zijn de coördinaatverschillen de schatting van de grootte van de deformatie. Helaas zijn de coördinaatverschillen niet optimaal geschikt om mee te toetsen en zijn zij ook niet de optimale schattingen van de deformaties. Voor een statistisch verantwoorde toetsing moet een andere aanpak worden gekozen. De toetsing moet plaatsvinden door de verhouding tussen een functie van de coördinaatverschillen en de precisie waarmee die verschillen zijn bepaald, te berekenen. Daarmee kan de toetsing worden uitgevoerd. De schatting van de grootte van de deformatie kan vervolgens worden berekend op zodanige wijze, dat de schatting niet anders wordt, als met een andere schrankingsbasis wordt gewerkt. Voordat we beschrijven, hoe dat in zijn werk gaat, beschrijven we eerst, hoe een vereffening een betere schatting van de deformaties kan realiseren.

5.3.2 Vereffening per punt

Het is mogelijk - we komen terug bij het zojuist gegeven voorbeeld van vijf waterpasbouten A, B, C, D en E - een aanname te doen over de verzakking, bijvoorbeeld dat die evenredig is met de tijd (een punt zakt elke maand over een gelijke afstand). Vervolgens kunnen we een vereffening van de verzakking uitvoeren, waardoor we een schatting in millimeters ervan krijgen. Het is gebruikelijk de **vereffening voor een enkel punt voor alle tijdstippen van meting** uit te voeren. Dit wordt ook wel aangeduid met de term *filteren* of *regressie*. Als de formules van de regressie lineair zijn (hier wordt niet uitgelegd, wat daarmee wordt bedoeld) is er sprake van *lineaire regressie*.

Door de vereffening wordt de ruis gescheiden van het model. Uit de eerdere paragrafen is duidelijk geworden, dat zowel de ruis als het model uit verschillende delen bestaan, dat wil zeggen uit verschillende soorten ruis en verschillende deelmodellen. De soorten ruis en hun gedrag worden beschreven in het **kansmodel**. De verschillende deelmodellen in het **functiemodel**. Het goed formuleren van het kansmodel en het functiemodel zijn cruciaal voor het trekken van de juiste conclusies. Vaak is het moeilijk om van alle soorten ruis goede getalswaarden (meestal standaardafwijkingen en correlatiecoëfficiënten) en voor alle deelmodellen goede (wiskundige) beschrijvingen te krijgen. Belangrijk is het steeds in ieder geval een inschatting te maken van de orde van grootte van de verwaarlozingen, als eenvoudige aannames voor standaardafwijkingen, correlaties en deelmodellen worden genomen.

De vereffening zorgt voor een betere schatting van de beweging, die een punt heeft ondergaan, dan rechtstreeks het coördinaatverschil op een bepaald tijdstip daarvoor te nemen. Maar als de coördinaatverschillen basisafhankelijk zijn, zijn de vereffende waarden dat ook. Dat kan beter en dat wordt beschreven in de nu volgende derde manier om de deformaties te bepalen.

5.3.3 Integrale vereffening puntenveld

De derde manier om de deformaties te bepalen is de **integrale vereffening van het puntenveld**, dat op twee of meer tijdstippen is gemeten (Velsink, *The Elements of Deformation Analysis - Blending Geodetic Observations and Deformation Hypotheses*, 2018).

Bij gebruik van het basisgeometriemodel - de eerste manier om deformaties te bepalen - worden de verschillen berekend tussen twee tijdstippen. Bij het vereffenen van elk punt afzonderlijk - de tweede manier om deformaties te bepalen - worden de metingen van meer dan twee tijdstippen gebruikt. We hebben gezien, dat er voor beide manieren twee problemen zijn: 1.) de keuze van de schrankingsbasis en de invloed daarvan op de berekende coördinaatverschillen en 2.) het ontbreken van een statistische onderbouwing voor de drempelwaarde. De integrale vereffening van het puntenveld ondervangt deze twee problemen. Een beknopte beschrijving volgt hierna. Iets uitgebreider is de vereffening beschreven in (Velsink, *Statistisch toetsen van deformaties*, 2020).

De vereffening start met de constatering, dat als geen enkel punt van het puntenveld zich heeft bewogen ten opzichte van enig ander punt van het puntenveld, de berekende coördinaten van alle punten op het eerste, tweede en elk volgend tijdstip gelijk zouden moeten zijn. Er is in dat geval wel van uitgegaan, dat de verschillende deelmodellen de werkelijkheid goed beschrijven. Als er verschillen zijn, moeten die verklaard kunnen worden als meetruis of temporele ruis, of eventueel als een resterend signaal. De vereffening zorgt ervoor, dat de coördinaten van elk punt voor alle twee of meer tijdstippen gelijke waarden krijgen. Daarvoor moeten alle coördinaten **correcties** krijgen. Deze correcties zijn de basis voor de toetsing, maar er is meer nodig. In de kleinste-kwadratenvereffening worden ook de standaardafwijkingen van deze correcties berekend. Nu kunnen (dimensieloze) **functies van de correcties en hun standaardafwijkingen en correlaties** worden berekend, die basisonafhankelijk zijn en statistisch getoetst kunnen worden op

significante deformaties. Zij zijn de **toetsgrootheden**. De drempelwaarde heet nu de **kritieke waarde** en is statistisch onderbouwd.

Als toetsgrootheden worden verworpen, is de vraag welke punten door deformatie zich hebben bewogen. Daartoe worden één of meer punten “losgelaten” in de vereffening. Dat betekent, dat voor dat punt of die punten niet geëist wordt, dat de coördinaten voor alle tijdstippen gelijk zijn. De verschillen na vereffening zijn aldus de kleinste-kwadratenschattingen van de deformaties.

Het is belangrijk, dat de toetsgrootheden basisonafhankelijk zijn. Dat wordt gerealiseerd door de coördinaten van elk tijdstip te transformeren naar een referentietijdstip, bijvoorbeeld het tijdstip van de nulmeting. Dit moet een gelijkvormigheidstransformatie of een congruentietransformatie zijn, omdat we geïnteresseerd zijn in *deformaties*, dat wil zeggen in veranderingen van de vorm of van de vorm en grootte ((Latijn: forma = vorm; deformatie = vormverandering). Een gelijkvormigheidstransformatie laat de *vorm* van het puntenveld ongewijzigd, een congruentietransformatie laat de *vorm en grootte* ongewijzigd. Na de transformatie zijn de resterende verschillen alleen door een andere vorm of vorm en grootte te verklaren, ofwel door een deformatie.

Door de gelijkvormigheidstransformatie of de congruentietransformatie worden twee coördinatensets van hetzelfde puntenveld op dezelfde schrankingsbasis gebracht. Niet alleen de coördinaten moeten worden getransformeerd, maar ook de standaardafwijkingen en correlaties. Die zijn voor een heel puntenveld samengenomen in de zogenaamde covariantiematrix. We zeggen daarom, dat de covariantiematrix naar de basis van het referentietijdstip moet worden geschrinkt. Voor hoogtemetingen is de transformatie gewoonlijk eendimensionaal en betreft alleen een verschuiving (= translatie) en eventueel een schaalverandering (dat laatste is in het algemeen niet nodig, omdat de schalen van meetinstrumenten en van het NAP zeer weinig van elkaar verschillen). Het kan zijn, dat de hoogtes door de transformatie niet veranderen, maar de covariantiematrix wel.

In paragraaf 3.5 wordt ingegaan op het begrip schranke. Daarvoor is het nodig inzicht te hebben in de wijze, waarop in Nederland de landelijke referentiestelsels zijn gedefinieerd. Daarom wordt daar eerst op ingegaan.

5.4 Nederlandse, landelijke referentiestelsels

Het begrip **schranke** wordt in de geodesie gebruikt om aan te geven, dat voor praktische toepassingen coördinaten en hoogten berekend worden in een operationeel gedefinieerd referentiestelsel. Er zijn verschillende typen coördinaten, zoals Cartesiaanse of rechthoekige coördinaten, bolcoördinaten, ellipsoïdische coördinaten, cilindercoördinaten, barycentrische coördinaten enzovoorts. Hier beperken we ons tot de rechthoekige coördinaten, hoewel voor de geodesie de andere type coördinaten ook van belang zijn. Voor het betoog is het voldoende alleen de rechthoekige coördinaten te beschouwen. Hoogten worden hier beschouwd als coördinaten in een eendimensionaal referentiestelsel.

Twee **landelijke geodetische referentiestelsels** zijn van belang voor de bodemdaling in Nederland: het **stelsel van de Rijksdriehoeksmeting** (het RD-stelsel) en het **Normaal Amsterdams Peil** (het NAP-stelsel).

Met het **RD-stelsel** kunnen punten in Europees Nederland met een x- en een y-coördinaat worden vastgelegd in een plat vlak. Het vlak doorsnijdt de aardbol met een cirkel, die als middelpunt de Onze Lieve Vrouwetoren in Amersfoort en als straal ongeveer 122 km heeft. De aardbol wordt

hierbij verondersteld een ellipsoïde te zijn volgens de parameters, zoals die ooit door Bessel zijn vastgesteld. De ligging van de ellipsoïde ten opzichte van de aarde is begin twintigste eeuw bepaald door eerst richtingsmetingen uit te voeren in een driehoeksnet met zijden van ongeveer 30 km. Vervolgens is het hele netwerk ten opzichte van Nederland geïmplementeerd door astronomische metingen op een aantal sterrenwachten. Daaruit zijn de RD-coördinaten van het landelijke driehoeksnet afgeleid. Deze RD-punten vormen de **operationele definitie** van het RD-stelsel. In het jaar 2000 is de definitie van het RD-stelsel veranderd op zodanige wijze, dat de basis nu wordt gevormd door negentien punten, verspreid over Nederland, die continu met GPS en andere plaatsbepalingssystemen in positie worden vastgelegd. Het zijn de punten van het [Actief GNSS Referentie Systeem](#). Het RD-stelsel wordt beheerd door het Kadaster.

De hoogten van punten in Europees Nederland kunnen worden vastgelegd ten opzichte van het **NAP-stelsel**. Het nulpunt van dit eendimensionale stelsel ligt in Amsterdam, maar dat punt is niet stabiel. Net als het RD-stelsel is het NAP-stelsel operationeel gedefinieerd door een groot aantal, over Nederland verspreid liggende punten. Deze punten vormen samen een netwerk. Het netwerk wordt regelmatig gemeten met nauwkeurigheidswaterpassingen. De vijfde landelijke nauwkeurigheidswaterpassing heeft in 2004 tot aanpassingen van de hoogten van alle NAP-punten geleid. De stabiele basis van het NAP-stelsel wordt gevormd door een aantal punten op de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug. Het NAP-stelsel wordt beheerd door Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat en het Kadaster werken samen om RD en NAP als een gezamenlijk driedimensionaal netwerk te kunnen gebruiken.

Om de positie van punten te bepalen, wordt bijna altijd direct of indirect gebruik gemaakt van GPS (en in bredere zin van **Global Navigation Satellite Systems** (GNSS), waaronder naast het Amerikaanse GPS ook het Europese Galileo, het Russische Glonass, het Chinese Beidou en andere satellietplaatsbepalingssystemen vallen). Een GNSS-ontvanger levert de coördinaten van het centrum van de antenne in het *World Geodetic System 1984* (WGS84). Dit referentiestelsel gebruikt een ellipsoïde, die andere parameters heeft en anders is geïmplementeerd ten opzichte van de aarde dan de ellipsoïde van de RD- en NAP-stelsels. Er is daarom een **transformatie** nodig, die voor extra onnauwkeurigheid zorgt, zeker voor de hoogte. De hoogte wordt minder goed bepaald doordat alleen satellieten ruim boven de horizon kunnen worden gebruikt en doordat een model van het aardse zwaartekrachtsveld (de **geoïde**) nodig is voor de transformatie. Opgemerkt moet worden, dat GNSS direct gebruikt kan worden voor plaatsbepaling, maar ook gebruikt wordt voor de plaatsbepaling van drones, vliegtuigen en satellieten, die voor andere plaatsbepalingstechnieken worden ingezet (fotogrammetrie, remote sensing, InSAR).

5.5 Precisie van een puntenveld

Gebruikelijk wordt over de benodigde **precisie van een punt** gesproken. Men bedoelt de mogelijke afwijking, die de coördinaten van het punt kunnen of mogen hebben (hierna wordt ook over coördinaten gesproken, als hoogten worden bedoeld). Het gaat om de afwijkingen ten opzichte van de *werkelijke positie*. Als maat voor die afwijkingen wordt (in Europa) meestal de standaardafwijking genomen. Hoewel deze interpretatie van de precisie van een punt veel voorkomt, is zij problematisch. Vier redenen kunnen daarvoor worden genoemd:

1. De precisie van een punt heeft alleen betekenis in relatie tot een *puntenveld* van minimaal drie (1D en 2D) of vier punten (3D).
2. Definiëren, wat het begrip *werkelijke waarde* inhoudt, is niet eenvoudig.
3. De statistische *correlatie* tussen coördinaten is naast de standaardafwijking een belangrijk onderdeel van de precisie van een puntenveld.

4. De standaardafwijking is wat anders dan de *maximale spreiding*.

Dit wordt in de volgende vier deelparagrafen uitgewerkt.

5.5.1 Precisie van een punt is relatief

Uit de voorgaande paragraaf is duidelijk geworden, dat het niet mogelijk is de coördinaten van een punt rechtstreeks in het RD- en NAP-stelsel te meten, d.w.z. rechtstreeks de positie en oriëntatie ten opzichte van de coördinaatassen te meten. Dat geldt ook voor het meten van coördinaten in een lokaal stelsel. Men moet via een **geodetisch netwerk** het punt in positie bepalen ten opzichte van punten, waarvan de coördinaten al bekend zijn, de grondslagpunten. Als men een lokaal referentiestelsel gebruikt voor zijn netwerk (dat een omvang van honderd bij honderd meter kan hebben, of een hele provincie kan omvatten), moet men eerst een grondslag creëren. Ook als men GNSS gebruikt, gebruikt men een grondslagnetwerk, meestal een netwerk, dat commercieel wordt aangeboden of door de overheid wordt beheerd, zodat men het niet zelf hoeft in te richten.

De consequentie is, dat het zinloos is over de precisie van een enkel punt te spreken. Men moet altijd erbij vermelden (wat helaas zelden gebeurt) **ten opzichte van welke grondslag** de precisie is. Een voorbeeld van waar dit misging is de hoogte van het eerste perron van het station Den Haag Centraal. Deze hoogte werd bij de bouw uitgezet ten opzichte van een andere grondslagbout dan de hoogten van de andere perrons. Het hoogteverschil is duidelijk zichtbaar. Merk op dat met NAP-hoogten werd gewerkt. Door de operationele definities van het RD- en het NAP-stelsel is er niet één RD-stelsel en één NAP-stelsel, maar wordt er elke keer een nieuwe operationele definitie gerealiseerd door de keuze van de grondslagpunten.

Bij deformatiemetingen gaat het om de veranderingen in de vorm en grootte van objecten op, onder of boven het aardoppervlak, van dat aardoppervlak of de aarde zelf. In het platte vlak kun je over de vorm van een driehoek spreken, niet over de vorm van een recht lijnstuk. Er zijn daarom drie punten nodig om over vorm te kunnen spreken. Zij zijn samen een **puntenveld** en drie punten zijn het kleinst mogelijke puntenveld. In de driedimensionale ruimte bestaat het kleinst mogelijke puntenveld uit vier punten, die samen een **viervlak** of **tetraëder** vormen.

Stel dat we de **precisie van drie punten in het platte vlak** willen vastleggen met standaardafwijkingen. De drie punten vormen een driehoek en we willen de precisie van de **vorm en grootte** van de driehoek weten om daarmee iets te kunnen gaan zeggen over de precisie van een deformatie van de driehoek. We hebben uit metingen de coördinaten van de drie punten bepaald en we willen dat op een later tijdstip nogmaals doen ten behoeve van de deformatieanalyse. We zijn niet geïnteresseerd in de ligging van de driehoek ten opzichte van het RD- of NAP-stelsel. Misschien kunnen die stelsels wel helpen in de deformatieanalyse, maar als het zonder kan, is het ook goed. We moeten om de precisie van de driehoek te bepalen eerst een **schrankingsbasis** kiezen. Dat betekent, dat we voor drie coördinaten van de driehoek willekeurige waarden kiezen, bijvoorbeeld een van de punten krijgt de coördinaten (0,0) en een ander punt de coördinaten (100 m, y), met y een nog niet gespecificeerde waarde. Nu kunnen de standaardafwijkingen van de resterende drie coördinaten worden berekend vanuit de metingen (en hun standaardafwijkingen), waarmee de coördinaten worden berekend. We zien, dat voor dit puntenveld van drie punten de standaardafwijkingen worden relateert aan een schrankingsbasis (ook wel rekenbasis of S-basis genoemd) van drie coördinaten. Elke standaardafwijking van een x- of y-coördinaat in het platte vlak geldt ten opzichte van een schrankingsbasis van drie coördinaten. Een schrankingsbasis kan ook uit meer punten bestaan, maar op de rekentechniek, die daarvoor nodig is, wordt hier niet ingegaan.

Een puntenveld, waarvan de x-, y- en z-coördinaten in de **driedimensionale ruimte** bekend zijn, heeft een schrankingsbasis van zes coördinaten van minimaal drie punten nodig. In de **eendimensionale ruimte** (hoogten bepaald uit hoogteverschilmetingen) is het begrip vorm niet meteen vanzelfsprekend, maar kan gedefinieerd worden door de verhouding van twee hoogteverschillen. Daaruit volgt, dat een schrankingsbasis van drie punten nodig is.

De **conclusie** is, dat standaardafwijkingen van coördinaten in een puntenveld altijd relatief zijn ten opzichte van een schrankingsbasis. Een standaardafwijking noemen zonder deze relatie te specificeren kan tot fouten leiden.

5.5.2 Werkelijke waarde

Een standaardafwijking is hierboven beschreven als de afwijking van de **werkelijke waarde**. Maar hoe is de werkelijke waarde gedefinieerd? Dit is een filosofische vraag en het raakt aan de vraag, of en hoe wij de wereld kunnen kennen. Hier gaan we er niet uitgebreid op in. We beperken ons tot de constatering, dat we met onze metingen een *schatting* krijgen van iets, waarvan we denken, dat het zo iets als de werkelijke waarde is. De *precisie* van die schatting is dus ook lastig te definiëren. We gebruiken verschillende maten, bijvoorbeeld de standaardafwijking, om de precisie te beschrijven en baseren hun definities op de statistiek, dat wil zeggen op het herhalen van metingen, het maken van histogrammen, het berekenen van getallen voor die histogrammen enzovoorts. We hopen daarmee een goede uitspraak over de precisie van de meetresultaten te doen.

5.5.3 Correlatie van coördinaten

De standaardafwijking is een maat voor de precisie van een coördinaat. Voor een goede beschrijving van de precisie is het belangrijk ook informatie te hebben over de statistische correlatie tussen coördinaten, zowel tussen de twee of drie coördinaten van hetzelfde punt als tussen coördinaten van verschillende punten. We zijn er tegenwoordig gewend aan geraakt, dat we metingen in grote hoeveelheden aangeleverd krijgen. Zonder het daar verder over te hebben, wordt meestal aangenomen, dat al die metingen onafhankelijk van elkaar zijn, wat wil zeggen, dat elke meting een nieuw stukje informatie is, dat iets over de werkelijkheid zegt. Toch is dat vaak niet het geval. De metingen zijn vaak zwaar gecorreleerd. Dat betekent, dat van bijvoorbeeld een miljoen metingen er misschien maar honderd onafhankelijk van elkaar zijn en de rest geen extra informatie bevat. Laten we dat illustreren met een heel eenvoudig voorbeeld.

Laten we een afstand van 100 meter tussen A en B twee keer meten. We doen dat met een laserafstandsmeter, waarvan we weten (uit ijking), dat de standaardafwijking 2 mm is. We middelen de twee afstanden en vragen ons af, wat de standaardafwijking van dat gemiddelde is. Een standaardstatistiekboek vertelt ons, dat de standaardafwijking \sqrt{n} maal zo klein als de standaardafwijking van de enkele meting is. In dit geval dus $2 / \sqrt{2} \times 2 \text{ mm} \approx 1,4 \text{ mm}$. De precisie wordt dus beter, want de standaardafwijking van 2 mm gaat omlaag naar 1,4 mm. Het tweemaal meten heeft zin.

Laten we nu veronderstellen, dat de beide gemeten afstanden gecorreleerd zijn. Een gebruikelijke maat voor de correlatie is de correlatiecoëfficiënt, een getalletje tussen -1 en +1, waarbij 0 het ontbreken van correlatie aangeeft, +1 volledige positieve correlatie (als de ene variabele groter wordt, wordt de andere ook groter) en -1 volledige negatieve correlatie (als de ene variabele groter wordt, wordt de andere kleiner). Laten we voor de correlatiecoëfficiënt achtereenvolgens 0, 0,5 en 0,9999 nemen. We berekenen de standaardafwijking van het gemiddelde door de methode van de kleinste kwadraten toe te passen. We krijgen de volgende tabel met de standaardafwijking van het gemiddelde (s.a. gem.) voor vier waarden van de correlatiecoëfficiënt (c.c.).

c.c.	s.a. gem.
0	1,41 mm
0,5	1,73 mm
0,9	1,95 mm
0,999	1,99 mm

Te zien is, dat bij een correlatiecoëfficiënt van 0,9999 de tweede meting vrijwel niets extra's levert. De waarneming had net zo goed achterwege kunnen blijven.

Voor een puntenveld, dat met laserscanning of met InSAR is gemeten, betekent dit, dat er veel minder waardevolle informatie kan zijn verzameld, dan het op het eerste gezicht lijkt.

5.5.4 Spreidingsmaten

De standaardafwijking is een veel gebruikte maat om de precisie te beschrijven. Als het over één variabele gaat, die normale kansverdeling (kansverdeling van Laplace-Gauss) heeft, kunnen we een plaatje tekenen, met daarin de standaardafwijking aangegeven. Op internet is dat [hier](#) gedaan. Daaruit blijkt, dat slechts 68% van de metingen binnen de standaardafwijking blijft. Dat komt, omdat de standaardafwijking een soort "gemiddelde afwijking" is en het dus zeer goed mogelijk is, dat metingen een waarde hebben die, losjes gezegd, daarbuiten vallen. Vaak wordt daarom niet de standaardafwijking, maar twee keer de standaardafwijking als maat genomen. De waarde "twee" is dan de afronding van het getal 1,96. Dat getal is de waarde waarbinnen, losjes gezegd, 95% van de waarnemingen blijft, als het over één variabele gaat. Als er meer variabelen in het spel zijn (zoals bij twee- of driedimensionale coördinaten), gelden andere waarden.

Dit betekent, dat geen enkele waarde van de standaardafwijking iets met 100% zekerheid zegt over de maximale spreiding, die een meting kan hebben. Er zijn wel waarden te berekenen voor 95%, 99% of 99,9%, maar dat zijn geen standaardafwijkingen. Vaak wordt in zulke gevallen gesproken over *betrouwbaarheidsintervallen*.

5.6 Schrancking in ruimte en tijd

In de vorige paragrafen zijn verschillende redenen genoemd, waarom het basisgeometriemodel niet voldoet voor een goede deformatie-analyse. In deze paragraaf gaan we specifiek in op de reden, dat een analyse met het basisgeometriemodel afhankelijk is van de schrancking in ruimte en tijd.

We hebben in paragraaf 3.3.1 gezien, wat een schrankingsbasis is. Het betrof daar een schrankingsbasis *in de ruimte*. In paragraaf 3.3.3 hebben we gezien, hoe een toetsing van deformaties kan plaatsvinden die onafhankelijk is van de schrankingsbasis in de ruimte. Ook *in de tijd* is schrancking noodzakelijk. Een deformatie wordt gemeten vanaf een bepaald moment in de tijd. Dat nultijdstip is de schrankingsbasis in de tijd. De keuze van het nultijdstip is lastig. Punten verdwijnen en nieuwe worden gecreëerd. Er zijn weinig punten, waarvan gedurende de gehele periode, waarover men informatie wil, de hoogteligging is vastgelegd. Bovendien is de geografische verspreiding van de punten meestal niet regelmatig. Een bijkomend probleem is, dat verschillende meettechnieken verschillende punten gebruiken.

Via functionele modellen en covariantiefuncties (Kriging, collocatie, Kalmanfilter enzovoorts) kan alles aan elkaar worden gerekend (Kenselaar & Qvadlieg, 2001), zowel in de drie ruimtelijke dimensies (x, y, z), als in de tijd. Daarbij is het belangrijk goed in de gaten te houden, waar de schrankingsbases liggen en hoe de gelijkvormigheidstransformaties of congruentietransformaties moeten worden uitgevoerd.

6 Geodetische deformatieanalyse in Nederland

We hebben gezien, dat voor geodetische deformatieanalyse geodetische modellen (bestaande uit meetmodellen en geometriemodellen) en geomechanische modellen nodig zijn. Op de geometriemodellen is dieper ingegaan om te laten zien, hoe schattingen van deformaties bepaald moeten worden en hoe de precisie daarvan beschreven hoort te worden. In dit hoofdstuk kijken we naar de wijze, waarop geodetische deformatieanalyse in Nederland wordt uitgevoerd. Er kunnen in Nederland zeven sectoren worden onderscheiden, waarvoor geodetische deformatieanalyse essentieel is.

1. Woning- en utiliteitsbouw. Bij de bouw en het onderhoud van bouwwerken wordt geodetische deformatieanalyse vooral ingezet voor het monitoren van gewenste en ongewenste bewegingen van het onderhanden werk zelf en van de omgeving. De particuliere sector en de overheid zijn hier actief: projectontwikkelaars, aannemingsmaatschappijen, Rijksdiensten, provincies en gemeenten. Een belangrijke rol is weggelegd voor de Verbond van Verzekeraars, waarbij aannemingsmaatschappijen zich verzekeren tegen door henzelf veroorzaakte schade. Voor deze zogenaamd CAR-verzekeringen stellen de verzekeringsmaatschappijen eisen, onder andere, dat adequate monitoring plaatsvindt.
2. Waterbouw en waterinfrastructuur. Bij de aanleg en het onderhoud van waterwegen, havens en overig oppervlaktewater en bij de aanleg en het onderhoud van de watervoorziening zorgt de geodetische deformatieanalyse voor het monitoren van bewegingen die door het menselijk handelen en door natuurlijke oorzaken optreden. Vooral de overheid is hier actief: Rijkswaterstaat, de waterschappen, de provincies en de gemeenten.
3. Weginfrastructuur. Bij de aanleg en het onderhoud van wegen is het monitoren van de wegen op bewegingen cruciaal voor de veiligheid van het transport en van de omgeving. Vooral de overheid is hier actief: Rijkswaterstaat, de provincies en de gemeenten.
4. Railinfrastructuur. De aanleg en het onderhoud van spoorwegen en tramlijnen vergt veel monitoring. De ligging van de rails moet op millimeterniveau goed zijn en blijven, de ondergrond mag niet bewegen en de omgeving mag geen schade ondervinden. ProRail is hier een belangrijke speler, evenals de gemeenten die tramlijnen exploiteren.
5. Mijnbouw. De winning van delfstoffen (steenkolen, gas, olie, zout enz.) vergt veel geodetische deformatieanalyse.
6. Industriële installaties. Olieraffinaderijen, waterzuiveringsinstallaties, grote industriële complexen en dergelijke veroorzaken bewegingen van de eigen installaties en bouwwerken, van de ondergrond en mogelijk van de omgeving. Daarvan is monitoring nodig.
7. Langetermijnbewegingen van het aardoppervlak (continentale drift, aardbevingen, bewegingen door klimaatwijziging enzovoorts). Vooral aan academische universiteiten wordt onderzoek gedaan naar de langetermijnbewegingen van het aardoppervlak.

Binnen deze zeven sectoren opereren drie grote opdrachtgevers, waarvan de invloed op de geodetische deformatieanalyse verder reikt dan alleen de eigen taakstelling. Hun invloed is groot, doordat ze continu in een behoorlijke omvang werkzaamheden betreffende geodetische deformatieanalyse aanbesteden, waarvoor zij richtlijnen publiceren, die gedetailleerd zijn en daardoor mede bepalen, wat als goede en slechte geodetische deformatieanalyse wordt gezien. Het zijn Rijkswaterstaat, de NAM (met als regulerende overheidsinstantie het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM)) en ProRail. De richtlijnen van deze organisaties worden hier kort genoemd.

1. Rijkswaterstaat publiceert een productspecificatie voor het uitvoeren van deformatiemetingen van kunstwerken (Rijkswaterstaat, 2020). Dit protocol wordt

- ook bij de aanbesteding van werkzaamheden van veel andere opdrachtgevers (gemeenten, waterschappen, aannemers enz.) gebruikt.
2. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) heeft nog in de vorige eeuw het initiatief genomen voor het opstellen van een leidraad voor de uitvoering van deformatiemetingen (Tcbb, 2014). De leidraad is in samenspraak met de mijnbouwbedrijven, waaronder de NAM de grootste is, tot stand gekomen. De leidraad wordt beheerd door de Technische commissie bodembeweging <https://tcbb.nl>.
 3. ProRail heeft richtlijnen voor bijvoorbeeld het meten van een meetkundige grondslag en voor de absolute spoorgeometrie.

In de volgende paragrafen wordt behandeld, welke van de geometriemodellen, behandeld in de paragrafen 3.3.1 t/m 3.3.3, door wie worden gebruikt.

6.1 Rijkswaterstaat: basisgeometriemodel

In de productspecificatie voor deformatiemetingen aan kunstwerken van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 2020) wordt het in paragraaf 3.3.1 behandelde *basisgeometriemodel* gebruikt. De eerder beschreven nadelen van dit model kleven daarom ook aan deze productspecificatie. Genoemd kunnen worden:

- Het kunnen vergelijken van niet meer dan steeds twee tijdstippen met elkaar.
- Het zware gewicht van de resultaten van de nulmeting in vergelijking met de andere metingen.
- Het niet gebruiken van beschikbare precisie-informatie bij de deformatieanalyse.
- Het trekken van conclusies op basis van coördinatenverschillen en niet op basis van statistische toetsen.
- De puntsgewijze benadering (niet als puntenveld).
- De afhankelijkheid van de conclusies van de keuze van de schrankingsbasis.

6.2 TU Delft: modellering per punt

Op 14 december 1990 werd een samenwerkingsovereenkomst getekend voor het onderzoeksproject 'Geodetische Deformatie-analyse' tussen de Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (NAM), de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat (MD) en het Laboratorium voor Geodetische Rekentechniek (LGR) van de Faculteit der Geodesie van de Technische Universiteit Delft. Dit heeft geresulteerd in een eindrapportage (De Heus, Joosten, Martens, & Verhoef, 1994) en een software-pakket, SCAN-1DEFO. De methode, die in het onderzoek is ontwikkeld, is gebaseerd op waterpasmetingen en bestaat uit twee fasen. In de eerste fase wordt het geodetische netwerk van waterpasmetingen vereffend volgens de methode van de kleinste kwadraten en getoetst op stabiliteit. In de tweede fase wordt per punt een polynoom geschat, waarbij de vereffende hoogten van alle tijdstippen, waarop is gemeten, worden gebruikt. Dit is de methode die in paragraaf 3.3.2 is beschreven. De methode wordt gekenmerkt door de bezwaren die daar vermeld staan.

6.3 TU Delft/NAM Integrale vereffening van puntenveld

In het artikel van (Kenselaar & Quadvlieg, 2001) wordt een methode beschreven, die overeenkomst met wat in paragraaf 3.3.3 is beschreven: een integrale vereffening van het

puntenveld. Over de methode, die in de vorige paragraaf 4.2 is beschreven, staat in de inleiding van het artikel het volgende:

Although this procedure worked quite well, certain drawbacks were experienced. Absolute deformation analysis, by connection of the levelling networks to stable benchmarks, was complicated by the expanding subsidence area and the suspicion of unstable reference points. Stability analysis, in order to identify stable reference points, turned out to be the most difficult part of the data processing. Moreover, the benchmark-oriented analysis was frustrated because many benchmarks disappeared during the years, and new benchmarks in larger levelling networks had to be established to cover the growing subsidence area. Finally, the smooth spatial and temporal character of the subsidence bowl was not fully exploited in the analysis. Although it was possible to estimate spatial-temporal polynomials to model the behavior of local groups of benchmarks, their interpretation was rather indiscriminate.

Ir. F. Kenselaar (TU Delft) en Ir. R.C.H. Quadvlieg (NAM) stelden een alternatief voor, dat naar de mening van de auteur van deze notitie het beste voorstel is om bodemdalingsanalyses uit te voeren. Wat deze methode als belangrijke aanvulling heeft op de methode van de vorige paragraaf 4.2, is dat **covariantiefuncties** worden ingezet om metingen zonder gemeenschappelijke punten met elkaar te kunnen combineren. De techniek die daarvoor wordt gehanteerd staat onder vele namen bekend en kent vele varianten: Kriging, collocatie, Kalmanfilter, Wiener-Kolmogorov-filtering, smoothing enzovoorts.

6.4 TU Delft/NAM: geïntegreerde geodetische verwerking.

Naast waterpassing zijn in deze eeuw GNSS en InSAR als belangrijke nieuwe technieken voor bodemdalingsmetingen erbij gekomen. (Van Leijen, Van der Marel, & Hanssen, 2021) beschrijven de manier, zoals volgens de huidige inzichten van de Technische Universiteit Delft deze verschillende technieken gezamenlijk gebruikt kunnen worden om tot een zo goed mogelijke schatting van de bodemdaling te komen. Daarvoor is specifieke software ontwikkeld (Integrated Geodetic Processing [IGP] genoemd), die met behulp van transformaties en gespecialiseerde dataopslag massale hoeveelheden meetgegevens kan verwerken.

6.5 Bodembeweging en NAP-punten

De bodembeweging die wordt veroorzaakt door mijnbouw moet volgens de mijnbouwwet gemonitord worden. Het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) houdt vanuit de overheid toezicht hierop. In opdracht van de SodM is door de mijnbouwsector een leidraad voor monitoring opgesteld (Tcbb, 2014).

Het idee om de door Rijkswaterstaat gepubliceerde NAP-hoogtes van duizenden bouten te gebruiken om te analyseren, welke bewegingen deze bouten hebben ondergaan, is niet nieuw. In een gesprek met Bas Alberts, medewerker van Rijkswaterstaat, zei hij, dat hij dat soort berekeningen al eerder heeft uitgevoerd, maar de resultaten daarvan niet openbaar heeft gemaakt, omdat hij ze te onbetrouwbaar vindt: er is te weinig bekend over de vroegere berekeningen van de hoogtes en er is te weinig bekend over de ligging en ondergrond van de bouten.

In de eerder genoemde leidraad van SodM lezen we in paragraaf 4.6.1:

- Peilmerkbewegingen zijn niet noodzakelijkerwijs representatief voor bodembeweging als gevolg van mijnbouwactiviteiten. Autonome bewegingen en identificatiefouten kunnen in een 'per epoche' analyse niet worden gedetecteerd;
- Alleen tijdseries met hetzelfde referentiepunt en gelijke begin epoche kunnen direct met elkaar vergeleken worden;
- Het resultaat van bovenstaande twee punten is, dat interpolatie van het bodemdalingssignaal niet representatief is. De resultaten kunnen alleen op peilmerkniveau worden bekeken.

Ook verder bevat de leidraad veel informatie over de juiste omgang met peilmerken en de interpretatie van hun hoogten en hoogteverschillen.

6.6 Geodetische deformatieanalyse van Velsink

In het proefschrift van Velsink (Velsink, *The Elements of Deformation Analysis - Blending Geodetic Observations and Deformation Hypotheses*, 2018) wordt beschreven, hoe een integrale vereffening en toetsing van een puntenveld ten behoeve van geodetische deformatie-analyse, zoals beschreven in paragraaf 5.3.3, kan worden uitgevoerd. Ten behoeve van het proefschrift is software ontwikkeld om de beschreven methoden daadwerkelijk uit te voeren. De software betreft de pakketten CoDefAn en MeDefAn. Deze software is specifiek op de geodetische deformatie-analyse ingericht dan het softwarepakket, dat op de Nederlandse geodetische markt de de-facto-standaard is, MOVE3. De volgende punten worden hier als voordelen van de methode vermeld.

1. Er zijn geavanceerde methoden geïmplementeerd om naar de beste deformatiehypothese te zoeken.
2. Het ongewijzigd blijven van punten in een tijdsinterval kan strikt worden getoetst ("harde" restricties worden getoetst) en hun grenswaarden (bij welke waarde overschrijdt een deformatie een gespecificeerde kans op detectie?) kunnen worden berekend.
3. In tegenstelling tot traditioneel gehanteerde methoden, vereist de methode geen stabiele punten om de deformatie-analyse uit te voeren. De deformaties die worden gedetecteerd zijn bewegingen van delen van het puntenveld ten opzichte van andere delen van het puntenveld. Het puntenveld wordt zo groot gekozen als nodig is om die bewegingen te detecteren die risico's inhouden of die relevant zijn voor welke toepassing dan ook.
4. In tegenstelling tot veel traditioneel gehanteerde methoden, worden meer dan twee tijdstippen van meting tegelijk geanalyseerd, zodat trends via kleinste-kwadratenvereffening geschat kunnen worden.

In twee door de overheid gesubsidieerde onderzoeksprojecten (DefoGuide en ValidDefo) zijn in samenwerking met een uitgebreide vertegenwoordiging van het beroepenveld van de geodetische deformatieanalyse de methoden gevalideerd. In de rapportages is onder meer beschreven, hoe de methoden kunnen worden gebruikt ten behoeve van normering van geodetische deformatie-analyse (Velsink, Eindrapport van het project DefoGuide, 2016).

Inmiddels wordt de methode in de praktijk toegepast, bijvoorbeeld voor deformatie-monitoring met fotogrammetrie, zie Geodelta (Geodelta, 2023), waarvoor de geodetische techniek is gebruikt (Kodde & Velsink, 2020).

7 Geodetische en geomechanische modellen

In hoofdstuk 1 en 2 hebben we gezien, dat voor de geodetische deformatieanalyse drie typen modellen nodig zijn:

1. meetmodellen;
2. geometriemodellen;
3. geomechanische modellen.

De meetmodellen en geometriemodellen samen vormen de *geodetische* modellen. We hebben ook gezien, dat de **meetmodellen het beste** zijn in de zin, dat we vrij goed weten (in de orde van millimeters of minder), hoe onze metingen tot stand komen en wat we moeten doen om de precisie nog beter te krijgen. De **geometriemodellen zijn veel minder goed** (van centimeters tot decimeters) in de zin, dat de afwijkingen van de werkelijkheid veel groter kunnen zijn. De **geomechanische modellen geven de grootste afwijkingen** (van meters tot honderden meters) van de werkelijkheid. Het gevolg is, dat men vaak denkt, dat de geodetische meetgegevens gebruikt kunnen worden om de geomechanische modellen te **valideren**. “Die geodetische centimeters zijn toch ruim voldoende om de geomechanische meters te verifiëren?”, is de gedachte. Toch ligt dat gecompliceerder. Met de meetmodellen zit het meestal wel goed, maar de geometriemodellen en de geomechanische modellen zitten toch regelmatig in dezelfde orde van grootte van afwijkingen van de werkelijkheid. Daardoor moeten geodetische en geomechanische modellen via een **cyclisch proces** verbeterd worden: geodetische metingen zorgen voor aanpassingen van de geomechanische modellen en geomechanische inzichten zorgen voor aanpassingen van de geodetische modellen. Zo kan het geomechanische inzicht, dat er een trendbreuk in de tijd is, ervoor zorgen dat een ander geodetisch vereffeningsmodel wordt gebruikt, waaruit andere voorspellingen volgen, wat het geomechanische inzicht vergroot en opnieuw voor wijzigingen in het geomechanische model kan zorgen. Waarna, door het verloop van de tijd en het uitvoeren van nieuwe metingen, opnieuw nieuwe geodetische en geomechanische inzichten kunnen ontstaan.

8 Conclusie

In deze conclusie geven we antwoord op de onderzoeksvragen die we ten behoeve van deze rapportage hebben gesteld. Voorts geven we advies over te nemen vervolgstappen.

Welke informatie is er voorhanden voor het bepalen van diepe bodemdaling?

Datasets die geschikt zijn om deze diepe bodemdaling te bepalen moeten voldoen aan de volgende eisen:

- Voldoende historie om de bodemdaling gedurende de mijnbouwactiviteiten te volgen.
- Voldoende resolutie om de effecten lokaal vast te kunnen stellen.
- Voldoende nauwkeurigheid.
- Afdekking van het gehele gebied in Noord-Nederland.

Uit de analyse van beschikbare data volgt dat twee datasets het meest relevant zijn: de NAP-data en InSAR data. Andere datasets, zoals laserscanning en gravimetrie zijn nuttig als aanvulling. Zowel de NAP-data als de InSAR data zijn behept met beperkingen, maar bieden voldoende aanknopingspunten om de bodemdaling te analyseren. Bovendien zijn beide datasets direct beschikbaar en biedt InSAR ook de mogelijkheid om horizontale beweging te analyseren.

Voor beide datasets geldt dat er geen zekerheid is dat de ruwe metingen betrekking hebben op diepe bodemdaling. Dat geldt in het bijzonder voor de InSAR data en in mindere mate voor de NAP-data. Hier moet in de verdere verwerking rekening mee gehouden worden.

Welke manieren zijn er om diepe bodemdaling vast te stellen en welke aanpak is voor toepassing door het IMG te adviseren?

In hoofdstuk 6 zijn verschillende manieren beschreven waarop diepe bodemdaling kan worden vastgesteld. De verschillende methoden variëren in de wijze waarop met verschillende foutenbronnen en referenties (schrinking) wordt omgegaan.

Het is te adviseren een analyse uit te voeren die losstaat van de aansluiting op de het NAP-nulvlak. Deze aansluiting brengt onnauwkeurigheden met zich mee die op kunnen lopen tot centimeterniveau, hetgeen teveel is voor de toepassing door IMG. De absolute hoogte in het NAP is voor de onderhavige analyse ook niet van belang, de relatieve beweging wel.

De aan te bevelen methodiek bestaat er uit om de ruwe metingen te gebruiken en de gemeten hoogteverschillen in één grote deformatieanalyse van een puntenveld uit te voeren, zoals beschreven in paragraaf 5.3.3. Voor de beste oplossing worden deze metingen geïntegreerd met de InSAR-metingen, die dan zoveel mogelijk gefilterd moet worden op punten die betrekking hebben op gebouwen. Beide datasets versterken elkaar, doordat ze onderling kunnen dienen als een onafhankelijke toets. Ook wordt aanbevolen GNSS-metingen in de integratie mee te nemen. Een zorgvuldige analyse van het mogelijk voorkomen van fouten en effecten van schrinking (met een mogelijk funeste invloed op de conclusies over bodemdaling) is noodzakelijk.

Problematisch blijft de toetsing om te controleren of metingen betrekking hebben op diepe bodemdaling of ondiepe bodemdaling. Geen enkele dataset biedt de garantie dat deze alleen betrekking heeft op één van deze twee effecten. Ook problematisch blijft de betrouwbare interpolatie tussen de meetpunten in. De meest effectieve oplossing is in deze de metingen te combineren met geomechanische modellen. Hiermee kan getoetst worden of de gemeten beweging zich gedraagt volgens de verwachtingen die volgen uit deze modellen. Daar waar dat niet zo is, moet worden bepaald of dat het gevolg is van een modelfout of van een meetfout dan

wel een punt dat ondiepe bodemdaling representeert. De toepassing van deze geomechanische modellen biedt ook direct een oplossing voor de interpolatie. Reeds op dit moment worden geodetische metingen gebruikt om de geomechanische modellen te kalibreren.

Voor het vaststellen van horizontale verplaatsingen ten behoeve van het vaststellen van de rek en relatieve rotatie is het aan te bevelen de oost-westcomponent uit de InSAR-data te gebruiken. Ook hier geldt dat de metingen betrekking hebben op de diepe en ondiepe ondergrond. Het is op dit moment echter niet duidelijk welke interactie er bestaat tussen de diepe en ondiepe ondergrond voor wat betreft de horizontale verplaatsing. Om die reden zouden de horizontale metingen als een eerste goede schatting kunnen dienen. Een punt van onderzoek is op dit moment nog wel of deze metingen voldoende geometrische kwaliteit hebben om de relatieve rotatie met voldoende precisie en betrouwbaarheid vast te stellen.

Wat is er nodig om op basis van het voorgaande tot een goede schatting van de historische diepe bodemdaling te komen en wat kan er gedaan worden om de best mogelijke schattingen van toekomstige diepe bodemdaling te verkrijgen?

Wij adviseren een bodemdalingsanalyse uit te voeren op basis van de ruwe NAP-meetdata. Bij voorkeur worden daarin de InSAR-data geïntegreerd. Indien haalbaar zouden de geomechanische modellen kunnen worden ingezet om de punten te toetsen ter onderscheiding van diepe en ondiepe bodemdaling.

Referenties

- Brouwer, W. (2021). *An analysis of the InSAR displacement vector decomposition: InSAR fallacies and the strap-down solution*. Delft. Retrieved from <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9bea6424-c03b-4e0b-95b9-cc6871959f2d>
- De Heus, H. M., Joosten, P., Martens, M. H., & Verhoef, H. M. (1994). *Geodetische Deformatie Analyse "1D-deformatieanalyse uit waterpasnetwerken"*. Delft: LGR-Series Publications of the Delft Geodetic Computing Centre No. 5, Technische Universiteit Delft.
- Ferretti, A., Passera, E., & Capes, R. (2023). *Algorithm Theoretical Basis Document*. EGMS ORIGINAL Consortium. Retrieved from <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-algorithm-theoretical-basis-document>
- Geodelta. (2023). *MODUPS*. Retrieved from <https://geodelta.com/software/modups>
- Kenselaar, F., & Quadvlieg, R. (2001). *Trend-signal modelling of land subsidence*. Orange, California, USA: 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19–22 maart, 2001, blz. 336–345.
- Kodde, M., & Velsink, H. (2020). Fotogrammetrie volgens de Delftse School. *Geo-Info*(2021-4), pp. 55-57. Retrieved from <https://geoinformatienederland.nl/artikelen/fotogrammetrie-volgens-de-delftse-school/>
- Kotzerke, P. (2022). *Quality Control Report*. EGMS Original. Retrieved from <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-quality-control-report>
- Rijkswaterstaat. (2020). *Deformatiemetingen kunstwerken*. Delft: Rijkswaterstaat. Retrieved from <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/zakendoen-met-rijkswaterstaat/werkwijzen/werkwijze-in-gww/data-eisen-rijkswaterstaatcontracten/deformatiemetingen-kunstwerken>
- Tcbb. (2014). *Industrieleidraad Geodetische basis voor Mijnbouw - Versie 1.0*. Retrieved from <https://www.nlog.nl/documenten-rapporten>
- Van Leijen, F., Van der Marel, H., & Hanssen, R. (2021). *Towards the Integrated Processing of Geodetic Data*. Brussel, België: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, blz. 3995-3998.
- Velsink, H. (2016). *Eindrapport van het project DefoGuide*. Hogeschool Utrecht, Technische Universiteit Delft. Retrieved from https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit_hu:oai:surfsharekit.nl:19877487-64cc-4f30-b235-72dbac51b555
- Velsink, H. (2018). *The Elements of Deformation Analysis - Blending Geodetic Observations and Deformation Hypotheses*. Delft: Proefschrift, TU Delft. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ad7132920-346e-47c6-b754-00dc5672b437>
- Velsink, H. (2020). *Statistisch toetsen van deformaties*. *Geo-Info* 2020-3. Retrieved from <https://geoinformatienederland.nl/app/uploads/2021/07/Geo-Info-2020-3.pdf>

Waalewijn, A. (1979). *De tweede nauwkeurigheidswaterpassing van Nederland 1926-1940*. Delft: Rijkscommissie voor Geodesie. Retrieved from <https://ncgeo.nl/downloads/22Waalewijn.pdf>

Weele, v. d. (1971). *De geschiedenis van het N.A.P.* Delft: Rijkscommissie voor Geodesie.