

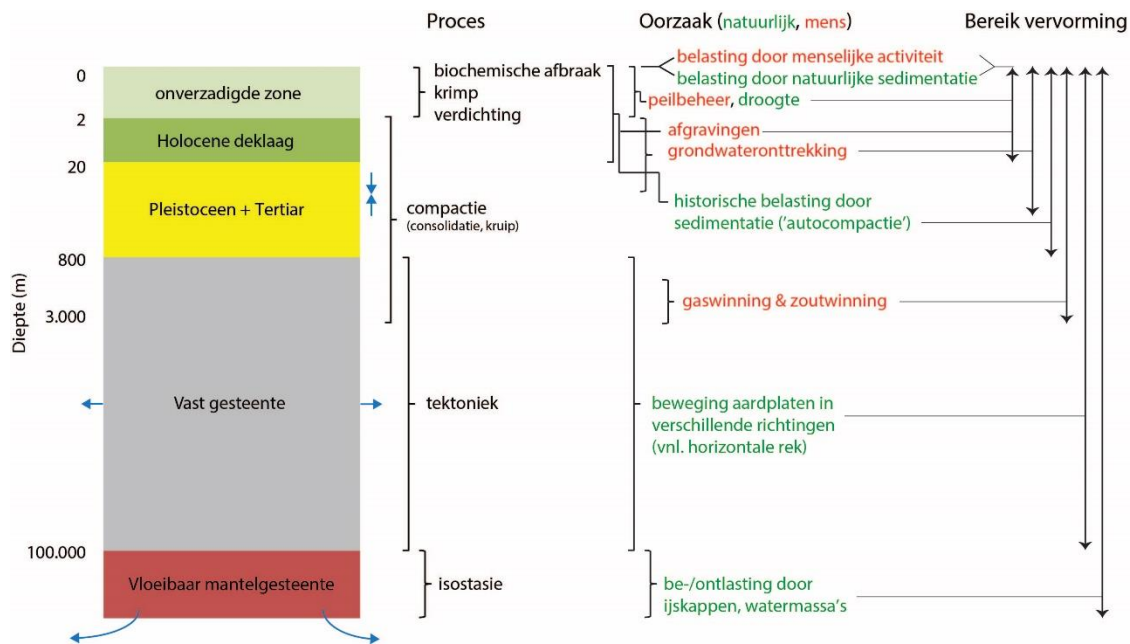
Deltafact: meetmethoden ondiepe bodemdaling

In gebieden met een slappe veen- en/of kleigrond, die op grote schaal voorkomen in West- en Noord-Nederland, leiden verschillende bodemprocessen tot seizoensgebonden verticale bodembeweging en lange-termijn bodemdaling. Het bepalen hiervan is belangrijk om (1) in kaart te brengen waar, wanneer en in welke mate bodemdaling optreedt en daarmee risicogebieden te kunnen identificeren, (2) het proces en onderliggende sturende factoren beter te begrijpen, (3) deze kennis te gebruiken om effectieve maatregelen te ontwikkelen en toe te passen om bodemdaling en de negatieve effecten ervan te verminderen, en (4) bodemdaling beter te kunnen voorspellen. In deze Deltafact worden meetmethoden om ondiep veroorzaakte bodembeweging en -daling te bepalen toegelicht.

1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. STRATEGIE
4. SCHEMATISCHE WEERGAVE
5. WERKING
6. KOSTEN EN BATEN
7. RANDVOORWAARDEN
8. GOVERNANCE
9. PRAKTIJKERVERVARINGEN EN LOPENDE INITIATIEVEN
10. KENNISLEEMTEN
11. BRONNEN EN LINKS
12. COLOFON
13. DISCLAIMER

1. Inleiding

Bodemdaling is het proces waarbij het maaiveld, of een niveau in de ondergrond, zakt ten opzichte van een referentievlak, bijvoorbeeld het Normaal Amsterdams Peil (NAP). Bodemdaling wordt veroorzaakt door verschillende processen, welke spelen op verschillende diepten (Figuur 1). De mate van bodemdaling en de relatieve bijdragen van de verschillende processen variëren in ruimte en tijd.



Figuur 1. Schematisch overzicht van processen die leiden tot bodemdaling en factoren die deze processen beïnvloeden (de oorzaken), waarbij het dieptebereik waarbinnen het proces of de oorzaak optreedt, en het bereik van de vervorming, grofweg is aangegeven. Van toepassing op de situatie in Nederland. Voor toelichting op de processen zie [Deltafact Bodemdaling](#).

Bodemdaling is wereldwijd een toenemend probleem in laaggelegen kustgebieden zoals Nederland, welke vaak dichtbevolkt zijn. Met een stijgende zeespiegel en dalend land, wordt het risico op overstromingen in dergelijke gebieden steeds groter. Ook leidt bodemdaling tot schade aan gebouwen en infrastructuur, tot nattere en daardoor minder bruikbare landbouwgrond, en tot verzilting. Zeker in dichtbevolkte gebieden leiden deze gevolgen tot hoge kosten om schade te verhelpen of tegen te gaan ([Van den Born e.a., 2016](#)).

Om effectieve maatregelen te ontwikkelen en toe te passen om bodemdaling, en de negatieve gevolgen hiervan, tegen te gaan is het in eerste instantie belangrijk om de mate en dynamiek van bodemdaling nauwkeurig te kunnen bepalen in ruimte en tijd. Dit geeft inzicht in waar en wanneer bodemdaling het meest optreedt, en daarmee in wat bodemdalingsrisicogebieden zijn. Voor het bepalen van de mate van bodemdaling in ruimte en tijd, en te onderzoeken welke processen in welke mate

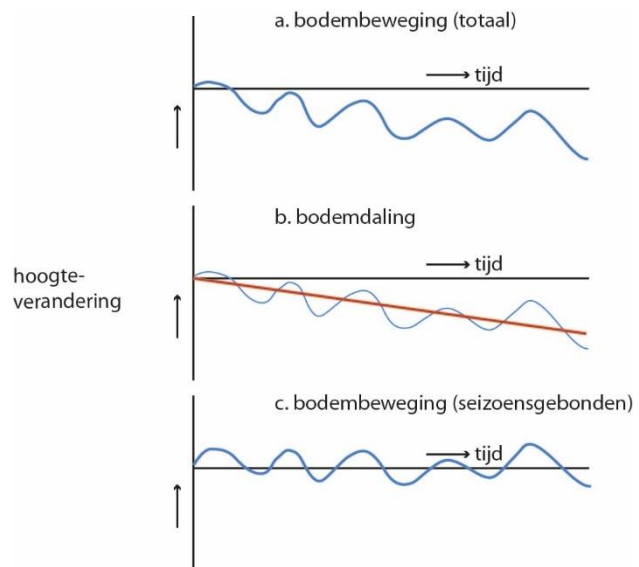
bijdragen aan de totale bodemdaling, zijn metingen nodig. Er kunnen op basis hiervan gerichte maatregelen worden genomen om bepaalde processen te beïnvloeden. Inzicht in bodemdalingsprocessen en hoe deze met elkaar samenhangen is ook belangrijk voor het voorspellen van bodemdaling met procesmodellen. Veldmetingen kunnen ook worden gebruikt voor het bepalen van het effect van toegepaste maatregelen om bodemdaling tegen te gaan.

Deze Deltafact richt zich op het bepalen ('schatten') van bodemdaling met behulp van verschillende meetmethoden. Elke meetmethode heeft zijn eigen kenmerken en onzekerheden ten gevolge van het type meting en de daarvoor noodzakelijke dataverwerking. Hierom spreken we ook wel over het 'schatten' van bodemdaling. Deze Deltafact focust op ondiepe bodemdaling (in Nederland tot rond de 20 meter diepte) in Holocene veen- en kleigronden, welke op grote schaal in het westen en noorden van Nederland voor komen. Er wordt dus niet ingegaan op het bepalen van diepe bodemdaling door bijvoorbeeld gaswinning, tektoniek of isostasie. De belangrijkste processen die ondiepe bodemdaling in organische gronden veroorzaken zijn veenafbraak, onomkeerbare krimp en samendrukking in de onverzadigde bodemzone en consolidatie en kruip in de verzadigde bodemzone (Tabel 1). Naast deze processen treden er in slappe veen- en kleigronden ook processen op die leiden tot omkeerbare bodembeweging: krimp en zwel in de onverzadigde bodemzone en poro-elastische vervorming in de verzadigde bodemzone. In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van onomkeerbare en omkeerbare bodembewegingsprocessen die voorkomen in de onverzadigde en verzadigde bodemzone. Het samenspel van al deze processen leidt tot een seizoensgebonden op- en neergaande beweging van de bodem. De totale bodembeweging over meerdere jaren tijd bestaat dus uit lange-termijn bodemdaling en seizoensgebonden bodembeweging (Figuur 2). Hierbij geldt dat de lange-termijn bodemdaling doorgaans een orde grootte kleiner is (millimeters per jaar) dan de seizoensgebonden op- en neergaande bodembeweging (centimeters per jaar; zie voorbeeld in Figuur 3).

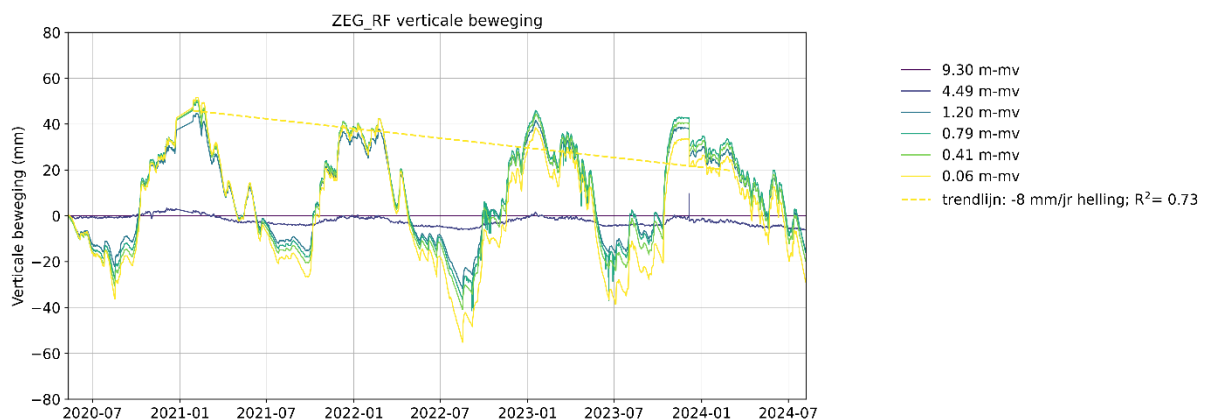
Tabel 1. Bodembewegingsprocessen in organische (veen- en klei)gronden. Voor verdere toelichting van de processen zie [Van Asselen e.a. \(2024b\)](#) en [Deltafact Bodemdaling](#).

Reversibel of irreversibel	Waar in de bodem	Proces	Omschrijving
Irreversibel (onomkeerbaar)	Onverzadigde zone	Veenafbraak	Afbraak van organisch materiaal in de bodem door micro-organismen. De afbraak gaat snel als er zuurstof (O ₂) aanwezig is. Langzamere anaerobe afbraak kan voorkomen in de met water verzadigde zone. Veenafbraak leidt tot het verdwijnen van koolstof (C) als CO ₂ , en verandert de vezelstructuur (kleinere vezels).
		Krimp en rijping	Volumeafname van de bodem als gevolg van uitdroging, waarbij de zuigspanning toeneemt. Bij rijping van kleigrond is irreversibele krimp het belangrijkste proces. Daarnaast zijn (bio-)chemische processen onderdeel van rijping, wat meer een bodemvormend proces is.
		Samendrukking	Samendrukking van de grond door externe belasting (feitelijk consolidatie van grond door uitdrukken van lucht uit de poriën).
	Verzadigde zone	Consolidatie	Samendrukking van de bodem doordat het gewicht op de grond toeneemt en grondwater uit de poriën stroomt. Hierdoor neemt de waterdruk af en de korrelspanning (de druk op de vaste delen van de grond onderling) toe.
		Kruip	Het langzaam samendrukken van de grond waarbij de gronddeeltjes zich heroriënteren onder gelijkblijvende druk.
		Compactie	De samendrukking van de bodem ten gevolge van consolidatie en kruip.
Reversibel (omkeerbaar)	Onverzadigde zone	Krimp en zwel	Volumeafname (krimp) als gevolg van uitdroging en volumetoe name (zwel) als gevolg van vernatting. Door uitdroging en vernatting van de bodem ontstaan er toe- en afnamen van de zuigspanning in de bodem.
	Verzadigde zone	Poroe lastische vervorming	Volumeafname en -toename van de bodem als gevolg van veranderingen in de waterdruk, waardoor ook de korrelspanning verandert.

Het gevolg hiervan is dat voor het bepalen van de lange-termijn bodemdaling er lang gemeten (jarenlang) moet worden om de seizoensgebonden bodembeweging, en met name jaarlijkse variaties hierin, eruit te kunnen filteren. Een ander gevolg is dat bij het toepassen van metingen met een lage meetfrequentie er goed rekening moet worden gehouden met het moment van meten: wordt er gemeten in een natte periode in het jaar en het maaiveldniveau relatief hoog is, of wordt er gemeten in een droge periode wanneer het maaiveldniveau juist relatief laag is?



Figuur 2. Schematische weergave van (totale en seizoensgebonden) bodembeweging en lange-termijn bodemdaling (Bron: [Van Asselen e.a., 2024b](#)).



Figuur 3. Voorbeeld van een extensometermeetreeks te Zegveld (Utrecht), waarbij goed is te zien dat de seizoensgebonden bodembeweging (orde grootte centimeters) veel groter is dan de lange-termijn gemiddelde bodemdaling (orde grootte millimeters per jaar). De verschillende kleuren geven verschillende meetdiepten aan (zie legenda). De lineaire trendlijn is gefit op de wintermetingen in de maanden januari en februari.

De meetmethoden die in deze Deltafact worden besproken zijn: extensometers, zakplaatjes, GNSS, waterpassing, laser scannen (LiDAR) en satelliet radarinterferometrie (InSAR). De verschillende methoden hebben verschillende ruimtelijke en temporele resoluties. Dit brengt verschillen in toepasbaarheid met zich mee, welke ook zullen worden toegelicht in deze Deltafact.

2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts

Deze Deltafact is gerelateerd aan de [Deltafact Bodemdaling](#), waarin met name processen die leiden tot bodemdaling worden toegelicht. Ook wordt er ingegaan op het modelleren van bodemdaling en op hoofdlijnen ook op het meten en schatten van bodemdaling.

3. Strategie





Het schatten van ondiepe bodemdaling in gebieden in Nederland met een veen- en/of kleiondergrond is begonnen in de jaren '50, naar aanleiding van de toenemende vraag naar diepere drainage van de veengronden om zodoende de draagkracht te verbeteren ([Schothorst 1977](#)). Om het effect van diepere drainage op bodemdaling te onderzoeken (hier ontstonden zorgen over) is toen op drie locaties in het westelijke veenweidegebied een experiment opgezet waarbij in verschillende delen van percelen verschillende slootpeilen zijn toegepast. De maaiveldhoogte is vervolgens jaren lang drie keer per jaar gemeten met waterpassingen op 50 vaste punten per meetveld. Ook is er met waterpassing gemeten aan zakplaatjes op verschillende diepten in de ondergrond (zie hoofdstuk 5). Dit experiment wordt ten dele tot op de dag van vandaag voortgezet door Wageningen Environmental Research.

Er is momenteel nog geen nationale strategie of aanpak met betrekking tot ondiepe bodemdaling in Nederland, maar dit onderwerp komt wel steeds vaker op de politieke agenda, zo blijkt bijvoorbeeld uit:

- [Kamerbrief Bodem en Water sturend](#), waarin de problematiek rondom bodemdaling veelvuldig benoemd wordt, en ook specifiek voor laagveengebieden. Er wordt hierbij ingezet op een minimalisatie van bodemdaling en CO₂ uitstoot door veenafbraak door te streven naar grondwaterstanden van 20 tot 40 cm beneden maaiveld.
- [RLI rapport 'Stop Bodemdaling in veenweidegebieden'](#), waarin door het RLI advies aan het Rijk en regionale partijen wordt gegeven om bodemdaling in veenweidegebieden sterk te reduceren.
- Veenweidestrategieën ontwikkeld door de 'veenprovincies' in het noorden en westen van Nederland, wat voortvloeit uit een verplichting uit het [Klimaatakkoord](#) (2019) om broeikasgasemissie uit veenweidegebieden te reduceren met 1 megaton CO₂-equivalenten per jaar in 2030.

- [Veenplan eerste fase](#), kamerbrief over de inzet van maatregelen in veenweidegebieden.
- [PBL beleidsstudie Dalende bodems, stijgende kosten \(2016\)](#), over de kosten van gevolgen van bodemdaling en mogelijke maatregelen om bodemdaling tegen te gaan.

4. Schematische weergave

Veldmetingen - puntmeting	<p>Extensometer</p>  <p>Puntmeting Hoge tijdsresolutie Meerdere niveaus in de ondergrond</p>	<p>Zakplaatjes</p>  <p>Puntmeting Lage tijdsresolutie Meerdere niveaus in de ondergrond (één niveau per zakplaatje)</p>	<p>GNSS</p>  <p>Puntmeting Hoge tijdsresolutie Meerdere niveaus in de ondergrond (één niveau per GNSS antenne)</p>	<p>Waterpassen</p>  <p>Puntmetingen langs transecten Lage tijdsresolutie Oppervlaktmeting</p>
Veldmetingen - vlakdekkend	<p>LiDAR vanaf statief</p>  <p>Vlakdekkend (ca 5x5 m) Lage tijdsresolutie Oppervlaktmeting</p>			
Metingen vanuit de lucht	<p>LiDAR vanaf dynamisch platform</p>  <p>Vlakdekkend (perceelschaal) Lage tijdsresolutie Oppervlaktmeting</p>	<p>InSAR</p>  <p>Vlakdekkend (regionaal) Hogee tijdsresolutie Oppervlaktmeting</p> <p><small>Bron: European Space Agency (ESA)</small></p>		

Bron: foto's genomen door medewerkers van Deltares, TU Delft en WENR.

5. Werking

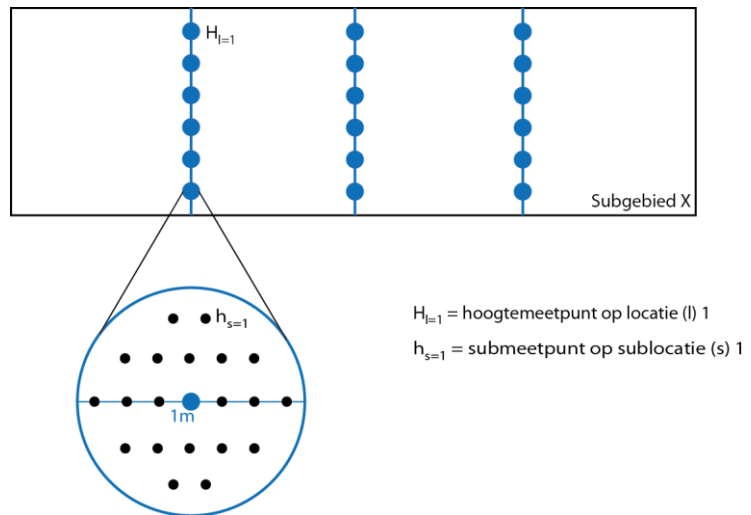
Om ondiepe bodembeweging en -daling te bepalen in gebieden met veen- en kleigronden worden er op dit moment verschillende meettechnieken toegepast op verschillende schaalniveaus. Deze worden hieronder besproken in volgorde van puntmetingen op lokale schaal tot vlakdekkende metingen op regionale schaal.

Waterpassing

Om bodemdaling in veenweidegebieden te bepalen kan waterpassing worden toegepast (bijvoorbeeld [Beuving en van den Akker, 1996](#); [Erkens e.a., 2021](#); [Van den Akker e.a., 2021](#); [Hoekstra en van Schie, 2022](#); Van Asselen, 2024; [Van Asselen e.a., 2024a](#)). Net als bij het waterpassen van zakplaatjes geldt ook bij deze methode dat er jarenlang, in dezelfde periode(n) in het jaar, gemeten moet worden om seizoensgebonden variaties te kunnen bepalen en eruit te kunnen filteren om een betrouwbare lange-termijn trend te kunnen vaststellen. Elke meetcampagne wordt er met waterpasinstrument en baak gemeten op meetlocaties die niet met een peilmerk zijn vastgelegd, meestal met een vast interval langs dwars- en lengteraaian over een perceel. Deze hoogtemeetlocaties kunnen worden uitgezet met behulp van GNSS en meetlinten. Er wordt gemeten ten opzichte van een lokaal referentiepunt, dat stabiel wordt verondersteld. Dit kan een nabijgelegen NAP peilmerk (bout) zijn of een voor de gelegenheid geïnstalleerd lokaal (stabiel verondersteld) referentiepunt, zoals een stalen buis of stang welke is gefundeerd in de stabiele zandondergrond en waarvan de hoogte met waterpassing is ingemeten ten opzichte van het dichtstbijzijnde NAP peilmerk.

Een veenweideperceel heeft geen vlak en glad oppervlak maar heeft een grillig maaiveld als gevolg van onder andere graspollen en koeiensporen. Dit creëert lokale hoogteverschillen in de orde grootte van centimeters, terwijl lange-termijn bodemdaling optreedt in de orde grootte van millimeters per jaar. Er zijn verschillende manieren om met waterpassing, rekening houdend met het onregelmatige reliëf van een weiland, een representatieve hoogte van een meetlocatie of perceel te bepalen, en daarmee ook hoogteveranderingen in de loopt van de tijd. Ten eerste kunnen er meerdere locaties binnen een cirkel van ongeveer 1 m rondom een hoogtemeetlocatie worden ingemeten (Figuur 4), waarbij de mediaan van de hoogtemetingen wordt toegekend aan de betreffende hoogtemeetlocatie. Deze aanpak wordt bijvoorbeeld toegepast door het Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden (zie Van Asselen, 2021). Een andere

manier is het gebruik van een vierkant plaatje van 10x10 cm aan de onderkant de baak wat het oppervlak enigszins vereffent (Figuur 5). Ook kan er gekozen worden om één meting per hoogtemeetlocatie te doen zonder plaatje aan de onderkant. Het is dan wel belangrijk om te realiseren dat de baak een keer in een kuiltje of op een pol terecht kan komen.



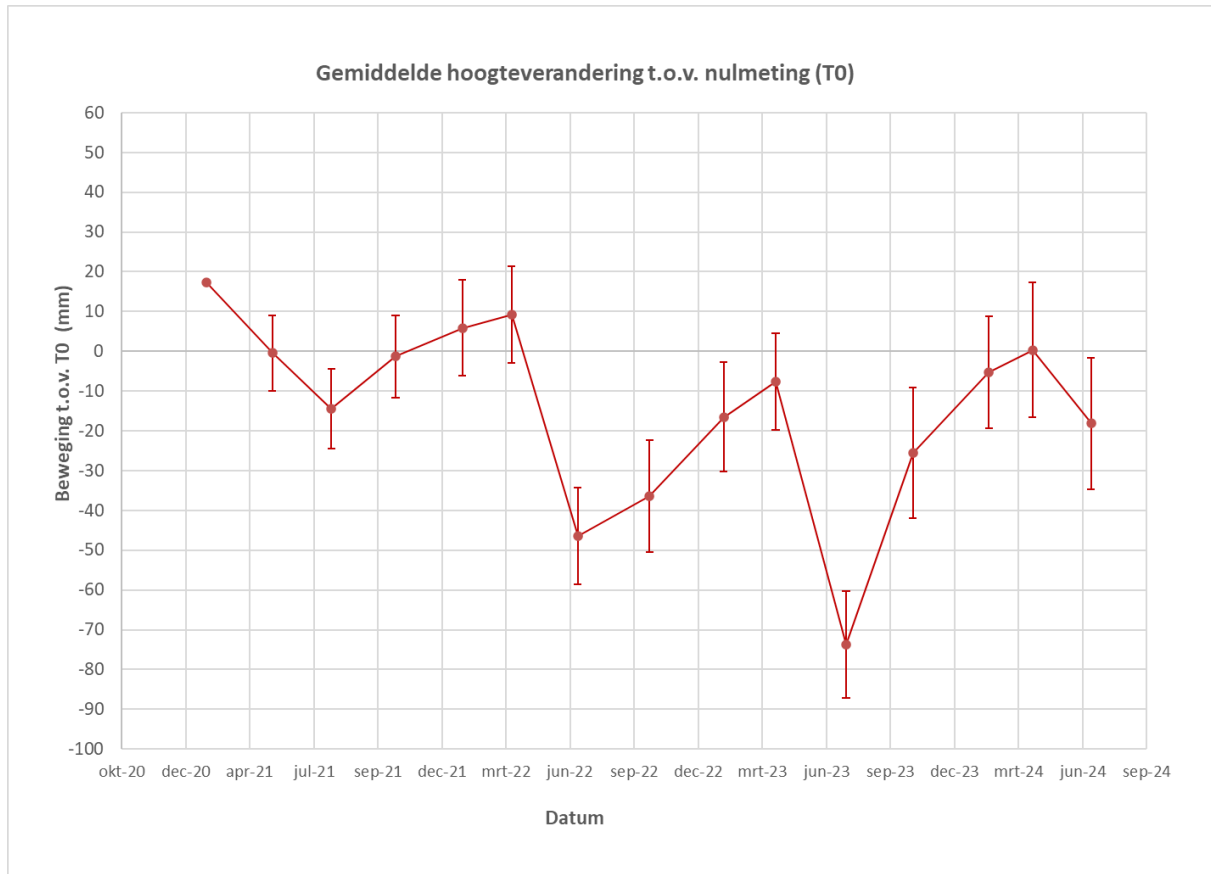
Figuur 4. Schematische weergave van submeete punten rondom een hoogtemeetpunt (Bron: Van Asselen, 2021).

Er is geen test gedaan naar verschillen in meetresultaten tussen de hiervoor beschreven verschillende manieren van waterpassing. Het is vooral belangrijk dat er binnen een meetreeks steeds dezelfde methode wordt toegepast, en dat de stabiliteit van de gebruikte referentiepunten met regelmaat wordt gecontroleerd. Voor het



Figuur 5. Een vierkant plaatje aan de onderkant van een baak.

bepalen van lange-termijn bodemdaling (of stijging) is het aan te raden om jaarlijks een meting uit te voeren aan het einde van de winter, wanneer de bodem meestal grotendeels verzadigd is en het maaiveld daardoor hoog staat. Later in het jaar zal de maaiveldhoogte meer variëren als gevolg van meer variaties in neerslag en verdamping, waardoor er (in wisselende mate) krimp-zwel en poro-elastische vervorming optreedt (Tabel 1). Om inzicht te krijgen op de seizoensgebonden bodembeweging kan er ook in de lente, zomer en herfst gemeten worden, wanneer het maaiveld doorgaans lager zal liggen (zie voorbeeld in Figuur 6).



Figuur 6. Voorbeeld van de gemiddelde hoogteverandering ten opzichte van de nulmeting (oktober 2020) met standaarddeviaties aangegeven met verticale lijnen, voor meetlocatie 'Assendelft' van het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweide (meetlocatie is beschreven in [Erkens et al, 2021](#)).

Extensometer

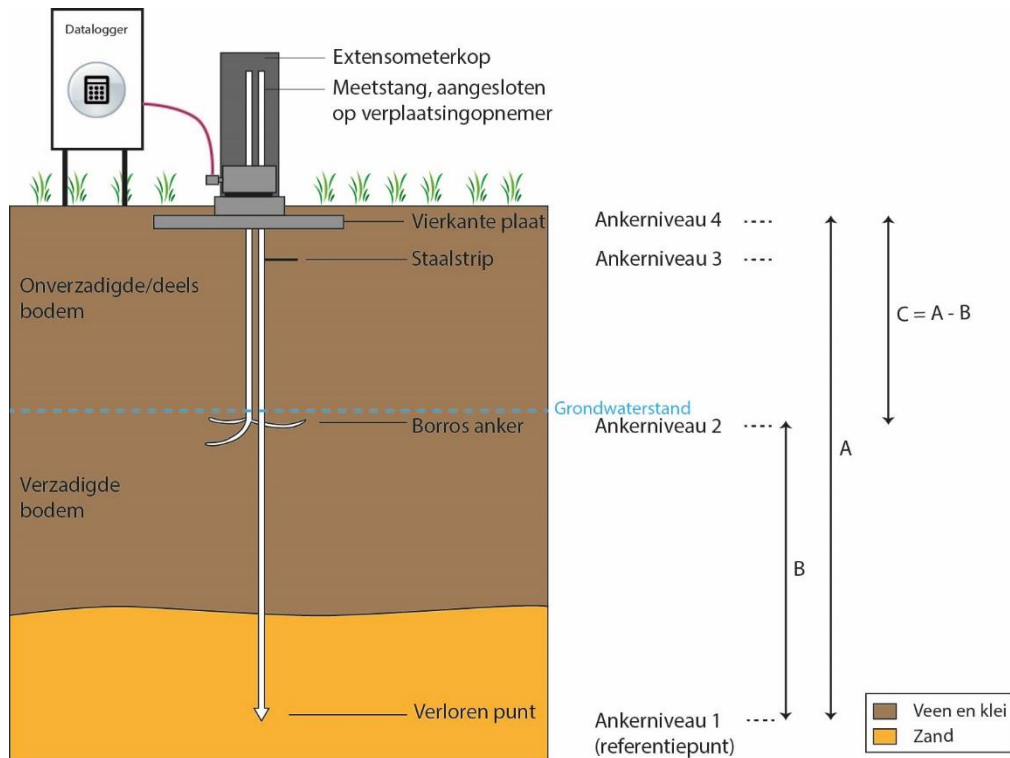
Een extensometer is een instrument dat is ontworpen om kleine veranderingen te meten in de afstand tussen twee referentiepunten. Er zijn verschillende soorten extensometers welke worden gebruikt voor het bepalen van verticale bodembeweging (zie bijvoorbeeld Kooi en van Waardenberg, 2024). Voor het meten van bodembeweging in slappe veen- en kleigronden is door Deltares een extensometer ontwikkeld welke de verticale verplaatsing van een anker (meetniveau) in de ondergrond meet ten opzichte van een referentieanker, met (sub)millimeter nauwkeurigheid en met hoge tijdsresolutie (één meting per uur). Het ontwerpproces van de ontwikkelde extensometer is beschreven door Van Asselen e.a. (2024).

De ontwikkelde extensometer meet op één locatie de beweging van meerdere (anker)niveaus in de ondergrond. Hieruit kan de bodembeweging op verschillende diepten, én de bijdrage van verschillende bodemlagen (diepte-intervallen) aan de totale beweging, c.q. vervorming, van de ondergrond worden afgeleid. Om de

beweging van een bepaald diepteniveau in de ondergrond te bepalen wordt er gebruik gemaakt van verschillende typen ankers, waarbij deze ankers worden geplaatst op hydrologische en/of geologische overgangen in de ondergrond (Figuur 7):

- Ankerniveau 1 is een massieve punt met gekoppelde stangen tot aan maaiveld. Het anker staat in de stabiele zandondergrond en dient als referentie voor de metingen op de andere ankerniveaus. De diepte van dit anker is ingemeten ten opzichte van NAP. Voor het plaatsen van dit anker wordt er meestal een sondering gezet. Op basis van de sondeergegevens kan goed bepaald worden op welke diepte de stabiele (Pleistocene) zandlaag begint (dit geeft een hoge weerstand). Het anker is vervolgens met het sondeervoertuig in de stabiele zandlaag gedrukt. Als de zandondergrond ondiep begint kan dit anker ook met een handheij worden geplaatst.
- Ankerniveau 2 is een Borros anker¹. Voor het plaatsen van het Borros anker is voorgeboord met een guts. Nadat het anker op diepte is gebracht zijn de ankerhaken aan de onderkant van de staaf hydraulisch in de naastgelegen slappe bodemlaag gedrukt. Voor één extensometer kunnen er op meerdere niveaus Borros ankers worden geplaatst, afhankelijk van de dikte van het Holocene pakket.
- In het ondiepe bereik, op ongeveer 0.4 m onder maaiveld kan geen Borros anker worden gebruikt (vaak net onder een kleidek of kleiige bovengrond). Dit anker (ankerniveau 3 in Figuur 7) bestaat uit een verticaal staafje met onderaan een horizontale staalstrip. De strip wordt vanuit een smalle gegraven sleuf horizontaal de ongeroerde grond in gedraaid. De sleuf wordt aangevuld met uitgekomen grond.
- Het bovenste anker (ankerniveau 4 in Figuur 7) bestaat uit een vierkante geperforeerde RVS plaat van 0.5 x 0.5 meter die is ingegraven op ongeveer 5 cm onder maaiveld. De plaat zorgt ervoor dat dit meetniveau met de grond meebeweegt. De horizontale plaat wordt niet precies op maaiveld geplaatst omdat dat te verstoringgevoelig is door bijvoorbeeld grasgroei. De extensometerkop is op deze plaat bevestigd.

¹ Bijvoorbeeld: <https://www.geosense.com/products/rod-settlement-system-geo-xr-2/>.



Figuur 7. Schematische weergave van een extensometeropstelling. Er wordt op maximaal 5 diepteniveaus gemeten, ten opzichte van een 6^{de} referentieniveau (in het voorbeeld hier kunnen er dus nog twee Borros ankers worden toegevoegd).

Om wrijving van zakkende grond op de staven tussen de ankers en de meetkop te vermijden worden vaak slangen geleverd. Deze standaard slangen zijn vaak een soort stugge PE waterleidingbuis. Omdat er in veengronden relatief grote deformatie wordt verwacht is in plaats van deze niet flexibele slang een beter rekkende ribbelslang gebruikt om kleef en krachten door de vervormende grond op de meetstaven te voorkomen. De ankerstaven komen uit in de extensometerkop, welke is bevestigd op de RVS plaat en vormt zo anker 4 (Figuur 7 en 8). In de extensometerkop worden met verplaatsingsopnemers de hoogteveranderingen van alle ankers gemeten, ten opzichte van het referentieanker. Er wordt gebruik gemaakt van trillende snaar sensoren of lineaire potentiometers. Het meetpunt wordt afgeschermd met een beschermkap die 30 á 35 cm boven maaiveld uitsteekt. Voor technische details van de door Deltares gebruikte extensometer wordt verwezen naar de website van Geosense². De verplaatsingsopnemers zijn verbonden met een datalogger die in een kast naast het meetpunt staat. Er wordt automatisch ieder uur de hoogte ten opzichte van het diepste anker gemeten. De nauwkeurigheid van de verplaatsingsopnemers is 0.1 mm (Kooi en van Waardenberg, 2024). In Figuur 3 is een voorbeeld gegeven van een extensometermeetreeks.

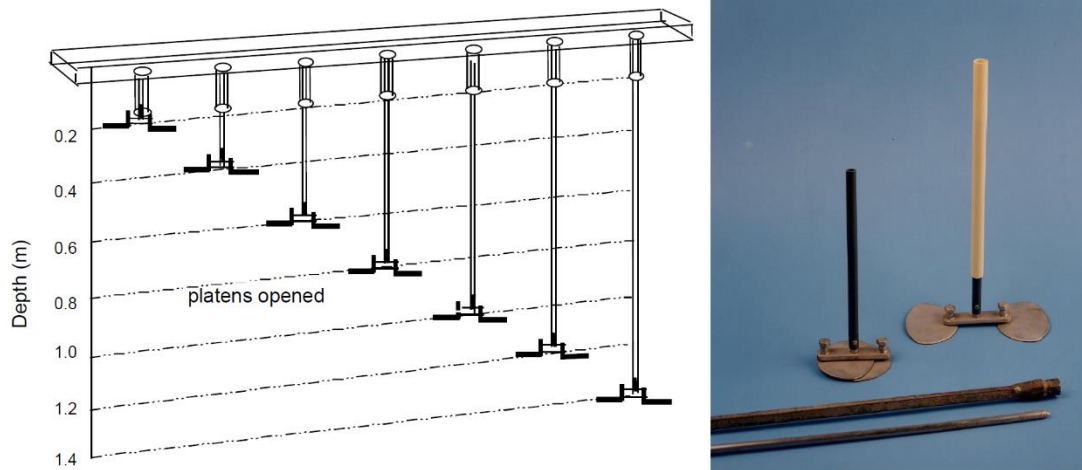
² <https://www.geosense.co.uk/products/borehole-rod-extensometer-geo-xb2-series/>



Figuur 8. Links: de bovenkant van een extensometer met een RVS plaat, flens en opnerhuis. Rechts: De meetsensoren van de extensometer, afgedekt met een kap, zijn met kabels bevestigd aan een datalogger met zonnepaneel.

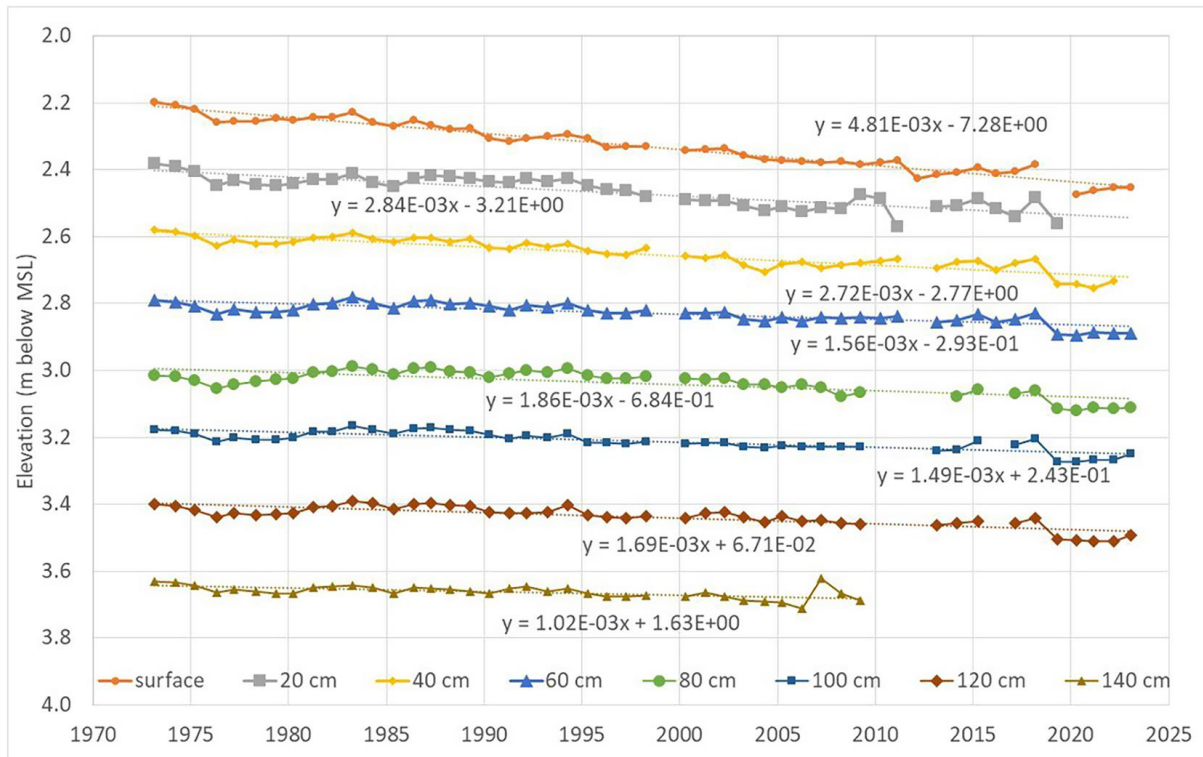
Zakplaatjes

Net als bij een extensometer kunnen zakplaatjes worden gebruikt om hoogteveranderingen van bepaalde niveaus in de ondergrond te detecteren. Ook bij deze methode gaat het om een puntmeting. Zakplaatjes bestaan uit twee aan elkaar verbonden metalen plaatjes (Figuur 9; [Hessel e.a., 2024](#)). De plaatjes worden via een boorgat geïnstalleerd. Als ze op de gewenste diepte zijn gebracht kunnen ze worden gedraaid, zodat ze in het veen snijden en op een bepaalde diepte in de ondergrond gefixeerd worden. De plaatjes zijn via een pvc-buis verbonden met het maaiveld. De hoogte van de zakplaatjes wordt periodiek gemeten met waterpassing. Hiervoor wordt er een metalen staaf van bekende lengte in de pvc-buis gestoken totdat deze op het zakplaatje rust, waarna de hoogte van de bovenkant van de staaf wordt ingemeten met waterpassing ten opzichte van een lokaal stabiel referentiepunt. Dit referentiepunt is een ijzeren stang welke tot in het Pleistocene zand is gebracht. De hoogte van de top van deze ijzeren stang is ingemeten ten opzichte van een vast NAP peilmerk in de buurt. Eens in de paar jaar wordt de hoogte van het referentiepunt opnieuw ingemeten om te controleren of deze daadwerkelijk stabiel is ten opzichte van het NAP peilmerk (waarvan de stabiliteit ook periodiek getoetst moet worden). Door een serie van zakplaatjes naast elkaar op verschillende diepten te installeren kunnen hoogteveranderingen op verschillende diepten, en de vervorming van verschillende bodemlagen, worden bepaald (zie voorbeeld in Figuur 10). De meetopstelling wordt beschermd door een houten kist die de bovenkant van de buizen omsluit. Tijdens elke meetcampagne worden ook tien waterpasmetingen rondom de kist met zakplaatjes gedaan om zo de gemiddelde maaiveldhoogte te bepalen.



Figuur 9. Zakplaatjes.

De temporele resolutie hangt af van hoe vaak de hoogte van de zakplaatjes wordt ingemeten met waterpassing. In de praktijk gebeurt dit één tot een paar keer per jaar. Bijvoorbeeld, in KTC Zegveld zijn zakplaatjes jaarlijks ingemeten sinds de jaren 70 ([Massop e.a., 2024](#)). Als het doel is om de lange-termijn bodemdaling te bepalen is het van belang dat ieder jaar in dezelfde periode wordt gemeten, bij voorkeur aan het einde van de winter als de bodem doorgaans maximaal verzadigd is en daarmee maximaal gezwollen is. Op deze manier wordt de invloed van seizoensgebonden bodembeweging en jaarlijkse variaties hierin geminimaliseerd. Omdat ook in opeenvolgende seizoenen de (weers)omstandigheden zullen variëren is het noodzakelijk om lang te meten (>10 jaar) voor het nauwkeurig kunnen bepalen van bodemdaling.



Figuur 10. Voorbeeld van een meetreeks sinds de jaren '70 van zakplaatjesmetingen in Zegveld (Utrecht). Uit: Massop e.a. (2024). Voor elk zakplaatje (diepte) is een lineaire trend gefit om de gemiddelde bodemdalingssnelheid te bepalen voor de meetperiode. De vergelijking van deze trendlijnen zijn weergegeven in de grafiek.

GNSS

Met Global Navigation Satellite Systems (GNSS) kunnen 3D posities worden bepaald, dus ook de hoogte (Tiberius e.a., 2022) van een GNSS ontvanger op een 'drijvend' met het maaiveld meebewegend rooster (Figuur 11) of een dieper geplaatst anker vergelijkbaar met één niveau van een extensometer opstelling. Tijdreeksen van deze metingen kunnen daarmee worden gebruikt voor het bepalen van bodembeweging. GNSS maken gebruik van een constellatie van satellieten, met aan boord nauwkeurige atoomklokken, die elk een radio tijdsignaal uitzenden. Een GNSS-ontvanger kan uit de tijdsignalen van meerdere satellieten de 3D positie en tijd van een ontvanger afleiden (Figuur 12). Hiervoor zijn minimaal de signalen van vier satellieten nodig, maar in de praktijk zijn dit er veel meer (tot wel 40 tegelijkertijd). Dit is mogelijk doordat er meerdere GNSS-systemen bestaan die gezamenlijk gebruikt kunnen worden. De bekendste is het Amerikaanse GPS systeem, maar daarnaast zijn er ook het Europese Galileo, het Russische Glonass en de Chinese Beidou constellaties.

Voor schattingen met een hoge nauwkeurigheid, zoals gewent is voor het bepalen van bodembeweging in veenweidegebied op millimeterschaal, worden geodetische



Figuur 11. GNSS ontvanger in de Weerribben, met links de GNSS antenne gemonteerd op een "drijvend" rooster, en rechts de GNSS ontvanger, 4G OpenWrt data logger, en solar batterij.

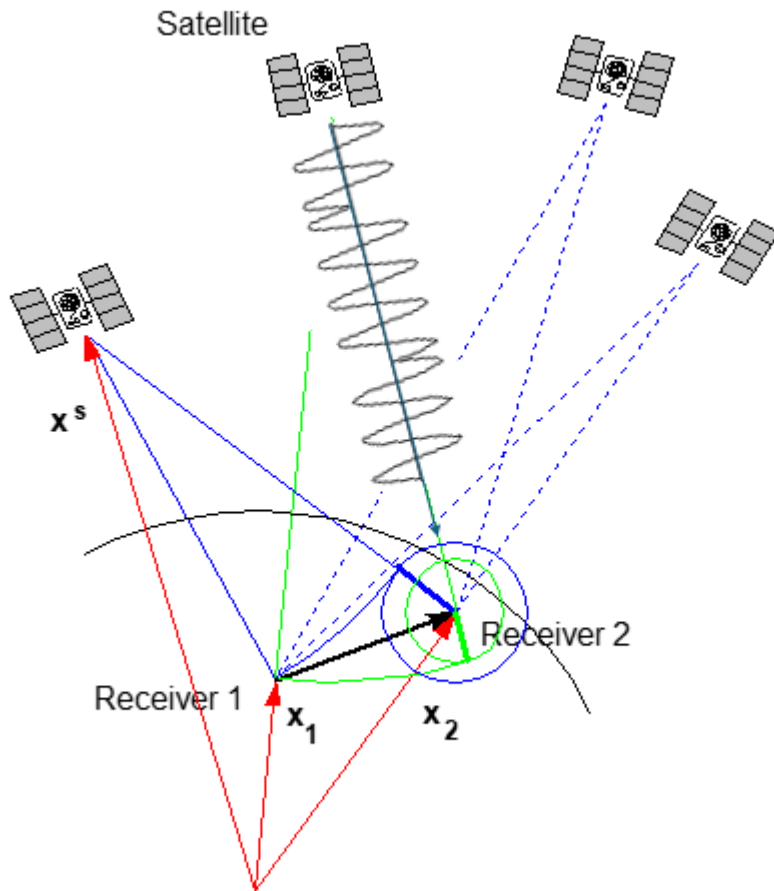
ontvangers gebruikt. Dit zijn andere ontvangers dan degene in bijvoorbeeld mobiele telefoons, die een precisie van enkele meters hebben. De geodetische ontvangers gebruiken de fase van het inkomende signaal op verschillende draaggolffrequenties om afstandsverschillen tot de satelliet te meten, waaruit heel nauwkeurige posities zijn af te leiden. De nauwkeurigheid in hoogte hangt vooral af van de meetduur. Een instantane meting heeft een precisie van 1-2 cm, echter na enkele uren meten is de precisie op millimeterniveau. Dit heeft o.a. te maken met het feit dat de GNSS-fasemetingen, alhoewel erg precies, behept zijn met een aanvankelijk onbekende fase meerduidigheid die eerst bepaald moet worden. Anderzijds zijn de signalen erg gevoelig voor interferentie van reflecties in de directe omgeving (bijvoorbeeld van de grond) en heeft het enige tijd nodig voordat dit effect uit middelt. Verder is de precisie in de hoogte een factor drie slechter dan de precisie in de horizontale positie, doordat alle satellieten boven de horizon staan en door atmosferische signaalvertraging.

Belangrijk is dat GNSS een techniek is die hoogte- en positieverandering kan bepalen t.o.v. een referentieontvanger die op enkele tientallen kilometers afstand kan staan, zie Figuur 12. Hierdoor is het mogelijk bodembeweging te schatten met een enkele

ontvanger op maaiveldhoogte; er hoeft niet per-sé ook een referentie in het proefgebied zelf te zijn. Ook is het gebruik van een (landelijk, regionaal of globaal) netwerk van referentie ontvangers mogelijk met als bijbehorend voordeel dat hoogte- en positieveranderingen worden gegeven in een goed gedefinieerd referentiesysteem (bv NAP).

De positie, en daarmee de eventuele beweging, die de GNSS-ontvanger meet is afhankelijk van de verankering van de antenne in de ondergrond. Voor het bepalen van de beweging van het maaiveld is een 'drijvende' constructie nodig, zie Figuur 11, waarbij de antenne op een rooster is geplaatst. Voor andere toepassingen, bijvoorbeeld voor referentiesystemen, is installatie op een stabiel gebouw of mast wenselijk. Een voorbeeld hiervan is een Integrated Geodetic Reference Station (IGRS), zie ook het onderwerp 'InSAR'.

Door het gebruik van zonnepanelen voor de stroomvoorziening en een dataverbindingen met een mobiele telefoonnetwerk, is een onafhankelijke installatie mogelijk. Door meerdere ontvangers en antennes naast elkaar te plaatsen, verankerd op verschillende diepten, kan een geodetische extensometer (Gext) worden gecreëerd, als alternatief voor een extensometer (Figuur 13). Daarbij kan hetzelfde type ankers worden gebruikt als voor een extensometer, die door middel van een staaf of buis wordt verbonden met de GNSS-antenne. Er kan ook een ander type anker gebruikt worden.



Figuur 12. GNSS meetprincipe voor hoog-nauwkeurige relatieve positie bepaling m.b.v. fasemetingen. Receiver 1 is een referentie ontvanger op een bekende positie, receiver 2 is de ontvanger op het station dat in positie gemonitord wordt.



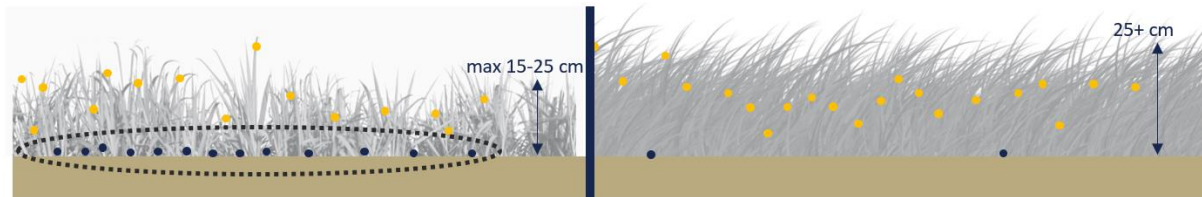
Figuur 13. Een GNSS, c.q. geodetische extensometer (GExt) opstelling op KTC Zegveld.

LiDAR

Een methode om de vlakdekkende kaarten van de hoogte van een object of oppervlak te verkrijgen is LiDAR: *Light Detection and Ranging*. Deze techniek maakt gebruik van laserlicht. Er wordt een laserpuls uitgezonden vanuit een scanner, welke reflecteert op een oppervlak en na enige tijd wordt de reflectie weer opgevangen door de scanner. De afstand van de laserscanner tot het object of oppervlak wordt bepaald door de tijd te meten die verstrijkt tussen het uitzenden van een puls en het opvangen van een reflectie van die puls. Op deze manier kan voor stabiele objecten met goede reflectie heel nauwkeurig (beter dan één centimeter, bovenkant mm range) de hoogte worden bepaald, in geval van een statische meting waarbij de laserscanner is bevestigd aan een stabiel statief. Bij een dynamische meting vanaf een bewegend platform (drone, vliegtuig, helikopter) wordt de precisie van de meting iets kleiner (beter dan één decimeter, bovenkant cm range) omdat onzekerheden worden geïntroduceerd bij het bepalen van de plaats en oriëntatie van de bewegende laserscanner. Elke scan resulteert in een puntenwolk, welke na bewerking (o.a. correcties voor bewegend platform, filtering afhankelijk van het doel van de meting, zie bijvoorbeeld '[AHN: The making of](#)') kan worden omgezet naar een grid met verschillende ruimtelijke resolutie (gridcelgrootte): dit is het uiteindelijke hoogtemodel. Een bekend voorbeeld van een LiDAR-product in Nederland is het [Actueel Hoogtebestand Nederland](#).

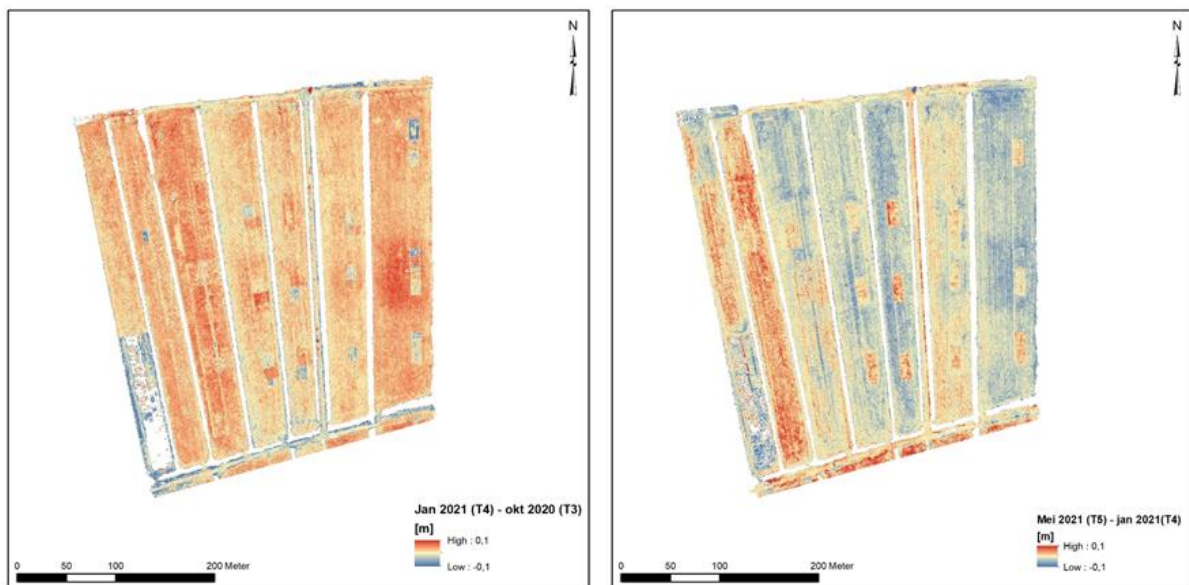
Bij het toepassen van deze techniek in veenweidegebied voor het bepalen van de hoogte en hoogteverandering van het maaiveld van een perceel zijn er een aantal factoren van invloed op de betrouwbaarheid van de uiteindelijke hoogtebepaling (Van Asselen e.a., 2022):

1. Nauwkeurigheid van het (al dan niet bewegende) systeem zelf.
2. Stabiliteit van gebruikte referentievlakken/-objecten in het veenweidegebied en het refereren van de puntenwolk hiernaartoe. Hierbij speelt dat in veenweidegebied er meestal relatief weinig stabiele objecten aanwezig zijn waarop een laserpuls goed reflecteert. Dit kan soms worden opgelost door zelf referentiepunten te installeren in het gebied waar wordt gemeten (Zandbergen, 2020; 2024).



Figuur 14. De invloed van graslengte en -dichtheid op laserreflecties.

- De manier waarop de grootte en (hoogte)waarde van een gridcel wordt bepaald: keuze voor welke (in het grasland gereflecteerde) punten op welke manier worden gebruikt voor het bepalen van de hoogte van de gridcel. Hierbij speelt de invloed van grashoogte op veenweidepercelen. Laserpulsen reflecteren namelijk deels op het gras en deels op het daadwerkelijke maaiveld. Bij kort gras zal nog een redelijk groot deel op het maaiveld reflecteren, maar bij lang en dicht gras zal slechts een enkele (of geen) laserpuls het maaiveld bereiken (Figuren 14 en 15). Ook als alleen de laagstgelegen punten binnen een gridcel worden gebruikt, leidt lang gras vaak tot een minder nauwkeurige schatting, en vaak overschatting, van de maaiveldhoogte (Zandbergen, 2020; 2024). Als er alleen op lokale schaal wordt gemeten kan dit grotendeels verholpen worden door voorafgaande van de meting te maaien, maar voor metingen op regionale schaal is dit operationeel niet haalbaar, en is de betrouwbaarheid van deze techniek onvoldoende voor het bepalen van millimeter grote hoogteveranderingen in veenweidegebied (Van Asselen e.a., 2022).

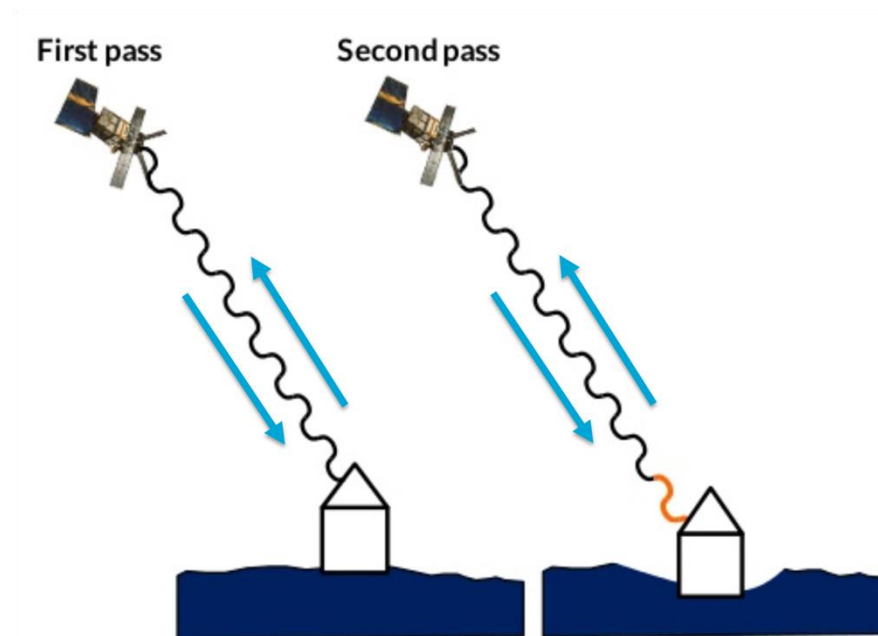


Figuur 15. Voorbeeld van twee hoogteveranderingskaarten op basis van LiDAR van veenweidepercelen op KTC Zegveld. Bron: [presentatie Erkens en Van Asselen op LOSS symposium, 1-10-2024](#). Omheinde meetplots op de percelen, met een ander maaieregime, zijn duidelijk zichtbaar door de invloed van gewashoogte.

InSAR

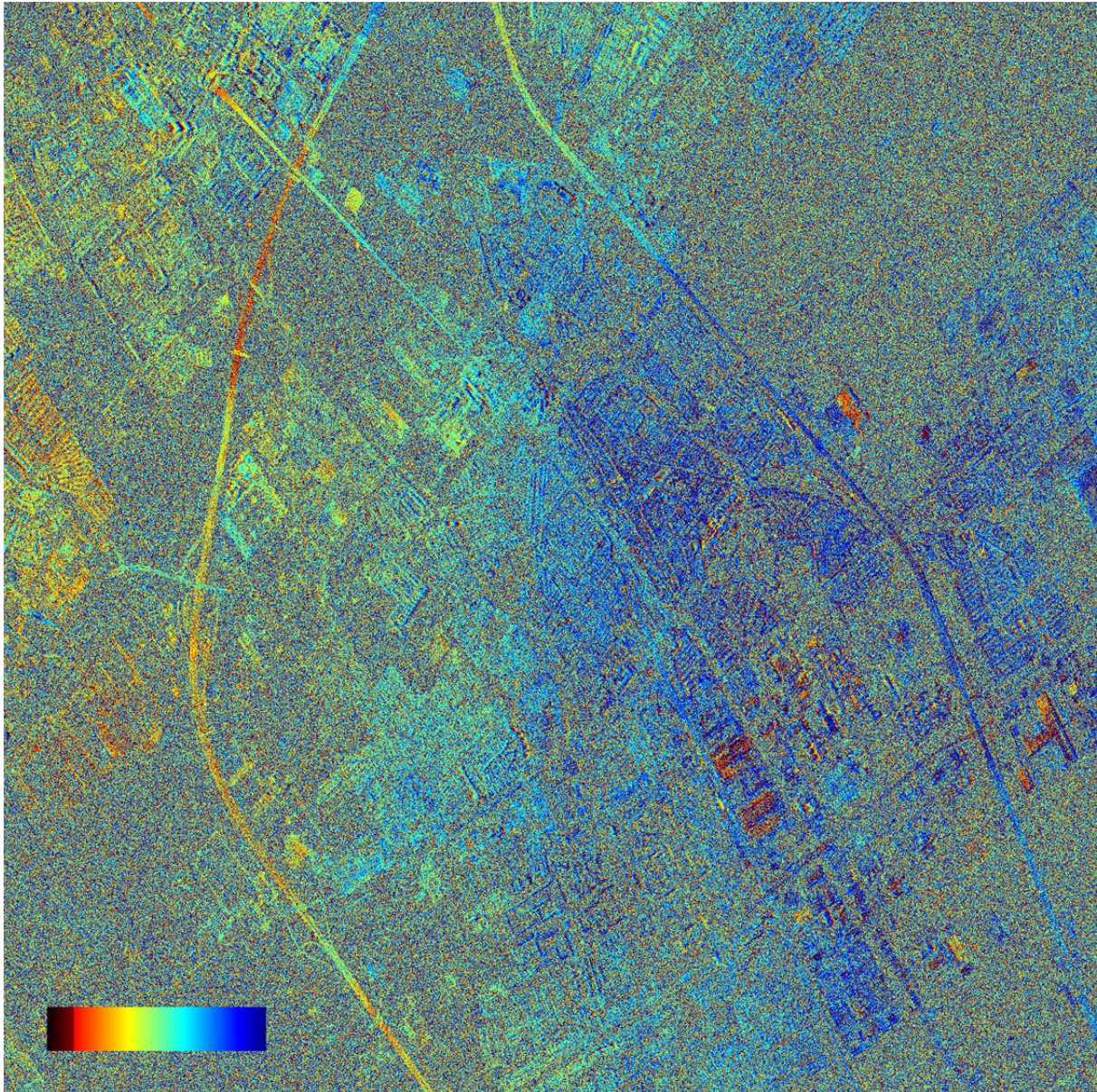
InSAR staat voor Interferometric Synthetic Aperture Radar (Hanssen, 2001). Deze techniek wordt al veel gebruikt voor het bepalen van bewegingen van harde objecten, maar de toepassing in veenweidegebieden is heel recent ([Conroy et al, 2023a](#)). InSAR gebruikt radarbeelden die van de aarde worden gemaakt vanuit een satelliet.

Per jaar worden honderden vlakdekkende beelden gemaakt van hetzelfde gebied. Deze beelden worden gebruikt om gedetailleerde tijdreeksen van hoogteverandering van een bepaald oppervlak af te leiden. InSAR maakt daarvoor gebruik van de fase van de golf van het bij de satelliet terugkerende signaal, nadat het op het oppervlak is gereflecteerd (Figuur 16). De gemeten fase is dus de waarde van de golf bij aankomst (getal tussen 0 en 2π), het geheel aantal golflengten (de 'fasemeerduidigheden') is onbekend. Er is dus geen sprake van een absolute tijdmeting tussen vertrek en aankomst van de puls zoals bij LiDAR. De fase in een enkel radarbeeld bevat geen interpreteerbare informatie. Echter, wanneer het verschil wordt genomen tussen twee beelden ontstaat een interferogram, waaruit informatie over hoogteverandering kan worden gehaald, zie Figuur 17. Wanneer er



Figuur 16. Meetprincipe van hoogteveranderingsmetingen door InSAR (bron: SkyGeo).

een deformatie van het oppervlak heeft opgetreden tussen de twee opnamen is de relatieve afstand tussen de satelliet en oppervlak veranderd, wat daardoor zichtbaar wordt in het interferogram (Figuur 17).

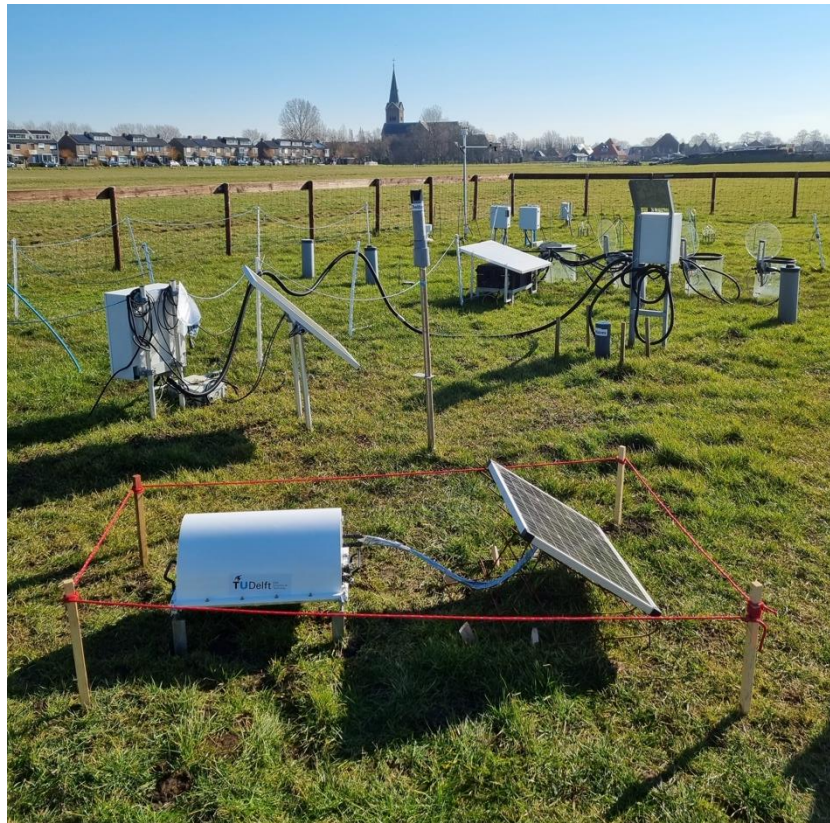


Figuur 17. Voorbeeld van een interferogram voor Delft en omgeving, gebaseerd op data van de TerraSAR-X satelliet. De kleurenschaal laat de fase tussen 0 en 2π zien.

Een enkel interferogram bevat nog verschillende verstoringseffecten, zoals atmosferische signaalvertraging. Door in plaats van een interferogram een hele tijdreeks van interferogrammen te gebruiken, kunnen deze effecten worden geschat en daarmee zo goed mogelijk worden verwijderd. Het doel is het isoleren van de deformatietijdreeks. Dit is niet voor elk pixel³ in de interferogrammen mogelijk. Door veranderingen van het aardoppervlak, zoals in geval van vegetatie, die de reflectie van het radarsignaal veranderen, ontstaat er ruis. Deze ruis is minimaal in geval van harde objecten (huizen, bruggen), waardoor het mogelijk is een deformatietijdserie te schatten voor individuele pixels. In geval van vegetatie lukt dat niet rechtstreeks.

³ De pixelgrootte varieert van zo'n 2x2 meter voor tot 15x5 m, afhankelijk van het type satelliet.

Door op een slimme manier pixels te groeperen en te middelen, lukt het echter steeds beter om voor weilanden alsnog een schatting van de bodembeweging te verkrijgen (Conroy e.a., [2022](#), [2023a](#)). Ter validatie van de metingen worden ook actieve radar transponders ingezet (Figuur 18). Deze transponders kunnen als kunstmatige reflectoren worden

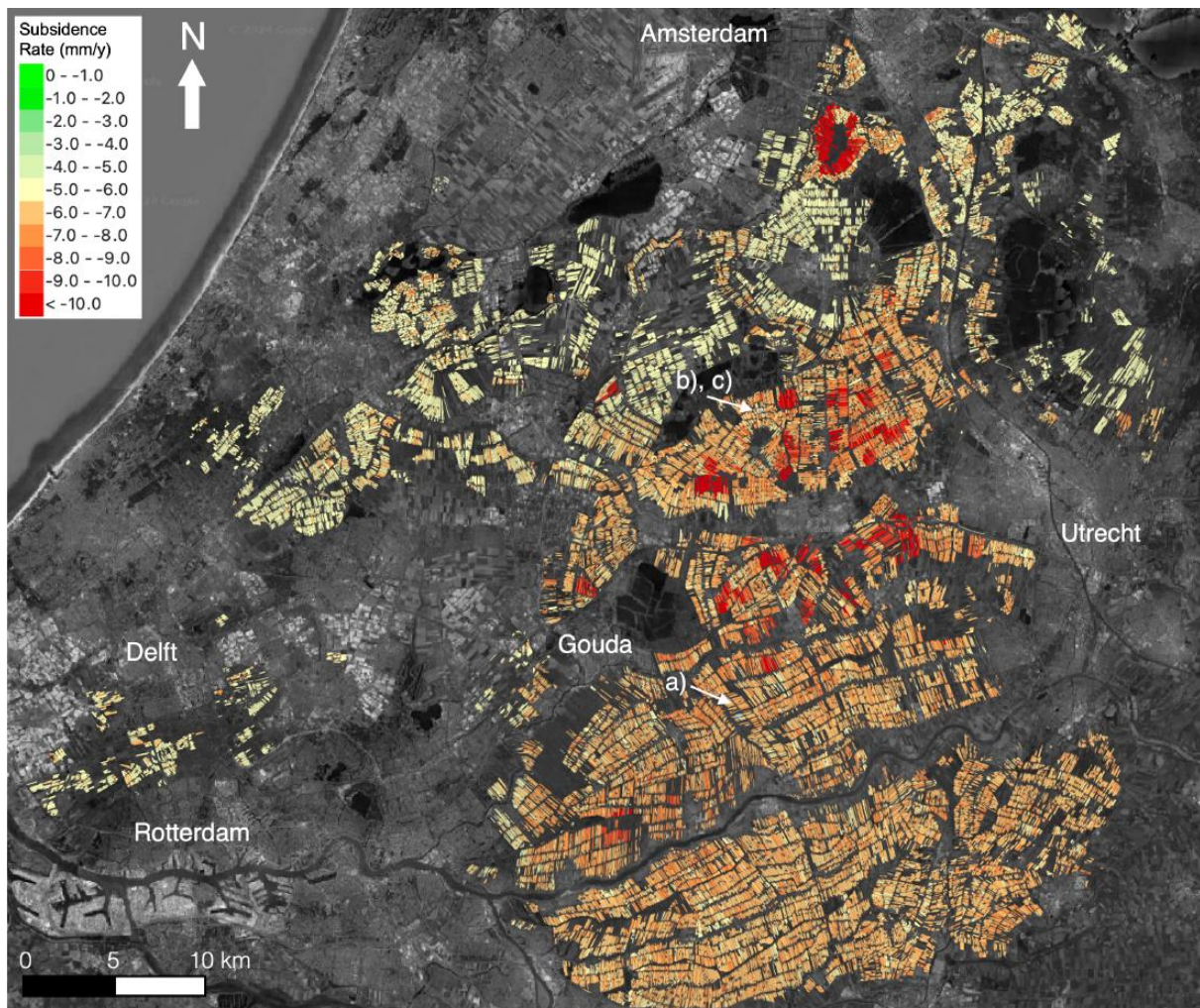
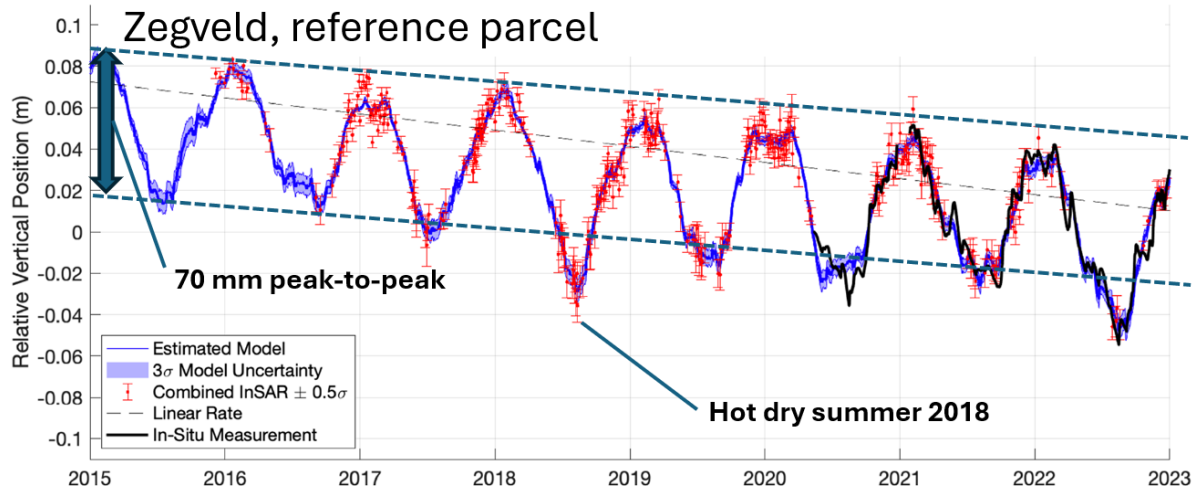


Figuur 18. Op de voorgrond een transponder meetopstelling in Assendelft.

gezien. De transponders

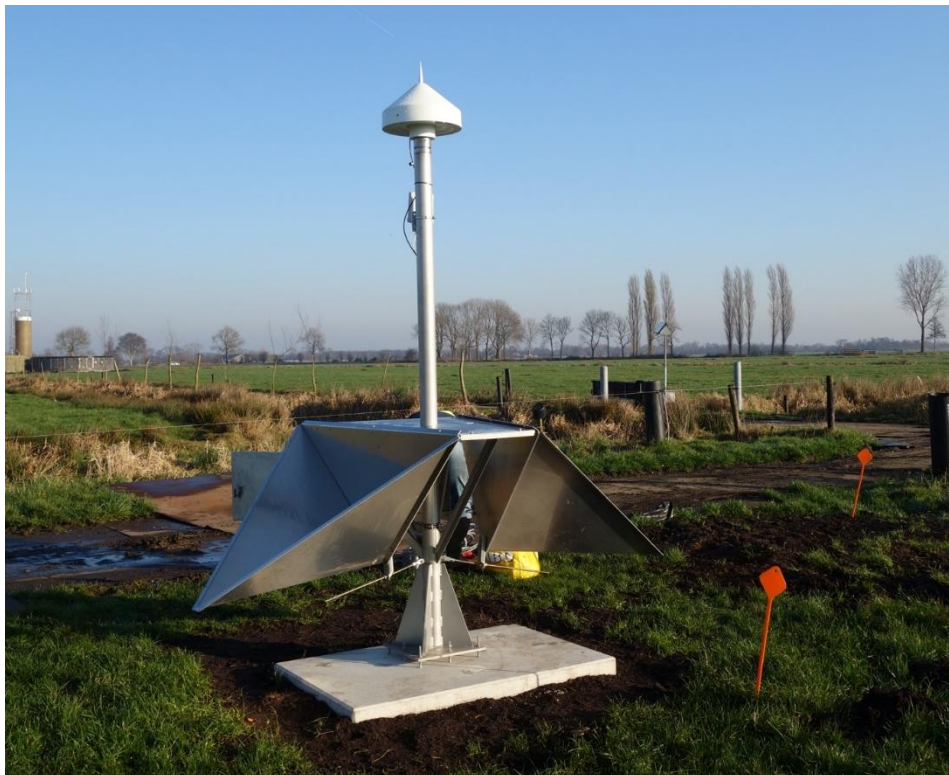
zijn geïnstalleerd op een manier waardoor ze meebewegen met het oppervlak. Deze signalen representeren daarmee de beweging van het grasoppervlak, en kunnen rechtstreeks met alternatieve validatiemetingen worden vergeleken, bijvoorbeeld verkregen door een extensometer.

Bij het schatten van de bodembeweging moet ook een oplossing worden gevonden voor het onbekend aantal hele golflengten in de verschillen tussen de metingen die gebruikt zijn voor de interferogrammen. Hiervoor moeten er aannamen voor de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het deformatiesignaal worden gemaakt. Hoe beter de oorzakelijke processen van bodembeweging worden begrepen (bijvoorbeeld veenoxidatie, gaswinning en/of degradatie van infrastructuur), bijvoorbeeld door contextuele informatie, hoe beter de schattingen. Uiteindelijk kunnen er meerjarige deformatietijdreeksen worden geschat, waarvan de afgeleide bodemdalingssnelheid een precisie heeft van minder dan een millimeter per jaar (zie voorbeeld in Figuur 19).



Figuur 19. Boven: deformatiemeetreeks voor de NOBV meetlocatie Zegveld. De blauwe lijn geeft de geschatte bodembeweging weer op basis van de InSAR analyse. De zwarte lijn geeft de bodembeweging weer zoals gemeten met de extensometer op deze locatie (veenweideperceel). Onder: kaart met gemiddelde bodemdaling per veenweideperceel voor de periode 2015-2023, met daarop locaties aangegeven van drie testgebieden: a) Vlist, b) Zegveld (referentie: voor deze locatie is bovenstaande deformatiereeks weergegeven, en c) Zegveld maatregel. Voor verdere toelichting van deze resultaten zie Van Leijen e.a. (2024). Zie ook [Hanssen \(2001\)](#) en [Conroy e.a. \(2023b\)](#).

De bodemdalingsschattingen zijn relatief, zowel ruimtelijk als in tijd. De waarden moeten dan ook zodanig worden geïnterpreteerd. Dit is in veel gevallen afdoende, wanneer de beweging van een locatie ten opzichte van de omgeving van belang is. Als het toch wenselijk is de tijdseries te refereren aan een geodetisch referentiestelsel, dan kan een Integrated Geodetic Reference Station (IGRS; Figuur 20) worden gebruikt. Een IGRS is een gefundeerde mast met daaraan een GNSS antenne en twee grote hoekreflectoren voor het reflecteren van de InSAR radarsignalen. Daarnaast bevat de IGRS een horizontale plaat welke gebruikt kan worden als referentieniveau voor LiDAR hoogtemetingen en een referentiepunt voor waterpas- en zwaartekrachtmetingen. Hiermee biedt het IGRS de mogelijkheid om verschillende meettechnieken te koppelen aan hetzelfde referentiefraam. Door de hoogteveranderingsmetingen bepaald met InSAR te refereren aan het gefundeerde IGRS kunnen absolute waarden van de hoogteverandering relatief ten opzichte van een geodetisch referentiesysteem (bijvoorbeeld NAP), en de zakkingsnelheid, met grotere precisie en betrouwbaarheid worden bepaald. Tevens kan worden bepaald of de Pleistocene ondergrond op de meetlocaties daadwerkelijk, zoals aangenomen, een stabiele laag is, of dat deze laag mogelijk toch verticale bewegingen vertoont. Het IGRS dient dus als referentiepunt.



Figuur 20. Voorbeeld van een Integrated Geodetic Reference Station (IGRS).

6. Kosten en baten

De kosten van de verschillende meetmethoden genoemd in deze Deltafact zijn afhankelijk van verschillende factoren, zoals (1) tot welke diepte in de ondergrond er meetsensoren of -opstellingen geïnstalleerd moeten worden, (2) het aantal meetniveaus of meetpunten dat een meetmethode geeft, (3) de toegankelijkheid van de meetlocatie, en (4) of er onderdelen van een meetopstelling gecombineerd kunnen worden met andere meetopstellingen (bijvoorbeeld een referentiepunt of datalogger). Ook kunnen de kosten verschillend gerepresenteerd worden, bijvoorbeeld in € of in €/m², en door wie zij gedragen worden. Zo worden bijvoorbeeld de kosten van de GNSS- en radarsatellieten niet meegenomen. Dit in acht nemende geeft Tabel 2 een grove indicatie van de kosten per meetmethode.

Tabel 2. Indicatie van de kosten van de installatie van een meetopstelling en de kosten per meting voor de verschillende meetmethoden.

Methode	Installatie	Meting
Extensometer	Materiaal en arbeidsuren nodig; kosten afhankelijk van o.a. aantal en diepten meetniveaus. Orde grootte €10.000 á €20.000.	€0 (meet automatisch)
Zakplaatjes	Materiaal en arbeidsuren nodig voor zakplaatjes en referentiepunt. Orde grootte enkele duizenden euro's.	Paar (arbeids)uur per meting
GNSS	Materiaal en arbeidsuren nodig. Orde grootte enkele duizenden euro's.	Abonnementskosten en mogelijk kosten voor referentiestation data. Enkele tientallen euro's per maand.
Waterpassen	Materiaal en arbeidsuren voor installatie referentiepunt. Orde grootte enkele duizenden euro's.	Afhankelijk van aantal in te meten punten; 2 personen nodig
LiDAR	Mogelijk materiaal en arbeidsuren nodig voor installatie van referentieobjecten in de meetgebied. Orde grootte enkele duizenden euro's.	Afhankelijk van welk platform gebruikt wordt en voor hoelang (drone, helikopter, vliegtuig) inclusief dataverwerking. Orde grootte enkele duizenden tot tienduizenden euro's.
InSAR	€0 (meet automatisch)	€0 (meet automatisch)

Hier kunnen altijd incidentele kosten bijkomen voor reparatie van defecte onderdelen van veldmeetopstellingen. Bij een meer geavanceerde meetopstelling zoals een extensometer of een GNSS is het risico op relatief hogere incidentele kosten groter dan bij een meetopstelling voor waterpasmetingen, omdat de onderdelen in de meeste gevallen duurder zullen zijn. Aan de andere kant komen er bij de gebruikte extensometer opstelling vrijwel nooit storingen voor. Ook kunnen verschillende manieren van dataverwerking verschillende kosten met zich meebrengen. Voor referentieniveaus zoals gebruikt bij bijvoorbeeld waterpassen, zakplaatjes en dynamische LiDAR metingen is het belangrijk dat deze periodiek worden ingemeten om de stabiliteit ervan te controleren.

7. Randvoorwaarden

De verschillende meetmethoden genoemd onder hoofdstuk 5 hebben verschillende toepasbaarheid. Er kan daarbij onderscheid worden gemaakt tussen lokale veldmetingen en vlakdekkende schattingen van bodembeweging.

Lokale veldmetingen

Extensometers, zakplaatjes en GNSS zijn beperkt tot één of enkele locaties in het veld. Hierdoor kunnen er géén uitspraken worden gedaan over de variatie in bodembeweging en -daling in een groter gebied. Daarom is het belangrijk om de locatie van dit soort meetopstellingen zorgvuldig te kiezen. Als je bodembeweging wilt bepalen die representatief is voor een perceel of een deel ervan, kan de meetlocatie het beste bepaald worden op basis van kennis over de opbouw van de ondergrond en ruimtelijke variaties hierin, en in de lokale hydrologie.

Een groot (van andere meetmethoden onderscheidend) voordeel van de extensometer, zakplaatjes, en GNSS methode is dat er op meerdere niveaus in de ondergrond kan worden gemeten, en daarmee de bijdragen van verschillende bodemlagen aan de totale vervorming van de ondergrond kan worden bepaald. Een extensometer en GNSS opstelling meten daarbij op hoge frequentie, meestal één meting per uur of vaker, waardoor op korte tijdschalen bodembeweging en invloeden hierop (zoals de grondwaterstandsdynamiek) goed gevolgd en geanalyseerd kunnen worden. De extensometer is minder geschikt voor installatie in heel natte veengebieden welke voor een groot deel van het jaar onder water staan. In dergelijke zeer natte omstandigheden kan de met het maaiveld meebewegend rooster niet goed worden geïnstalleerd en is er een groter risico dat de

verplaatsingsopnemers in de meetkop snel stuk gaan of minder goed functioneren door invloed van vocht. De ankers, stangen en meetkop zijn ook te zwaar in heel natte grond, dit zou de meting kunnen beïnvloeden. In dergelijke natte omstandigheden kan een GNSS opstelling in het voordeel zijn. Deze laatste is ook goedkoper, maar op het moment van schrijven nog wel experimenteel.

Bij de extensometer zoals ontwikkeld door Deltares voor het bodemdalingsonderzoek in veenweidegebied moet er rekening mee worden gehouden dat het ondiepste anker een paar centimeter onder maaiveld wordt geïnstalleerd. Plaatsing precies op maaiveldniveau is vooral door grasgroei te storingsgevoelig. De consequentie hiervan is dat bodembeweging van de bovenste paar centimeter wordt zo gemist. Bij een test in Zegveld (Utrecht), waarbij de door Deltares ontwikkelde extensometeropstelling is vergeleken met een andere soort extensometer met een anker op maaiveldniveau, is gebleken dat er op deze locatie minimaal verschil zat tussen de bodembeweging gemeten met de twee sensoren ([Van Deijl e.a., 2022](#)). Op andere locaties, met een andere opbouw van de ondergrond, zouden er grotere verschillen kunnen zijn, bijvoorbeeld als de bovenste laag bestaat uit zwelgevoelige veen of klei.

Waterpassen is ook een veldmeting en in principe een locatiemeting waarbij de maaiveldhoogte wordt ingemeten. Omdat bij de toepassing voor het bepalen van bodemhoogte in veenweidegebied doorgaans meerdere hoogtemeetlocaties langs transecten worden ingemeten kan met deze methode al enig inzicht worden verkregen in ruimtelijke variaties van de hoogte en hoogteverandering. Een beperking van deze methode is dat het arbeidsintensief is, en de meetfrequentie daardoor laag (meestal één tot een paar keer per jaar). Daarmee zijn het momentopnamen, die niet persé representatief zijn voor de periode waarin wordt gemeten, of aansluiten bij het doel van de meting. Is het doel bijvoorbeeld om in de zomer de laagste maaiveldhoogte te bepalen -en de meting valt samen met een relatief natte periode, dan wordt de daadwerkelijke laagste maaiveldhoogte van dat jaar mogelijk niet gemeten. Met een hoge resolutie meting zoals met een extensometer wordt dit wel bereikt ([Van Asselen e.a., 2024a](#)). Om lange-termijn bodemdaling te bepalen met waterpassing (en zakplaatjes) moet voor langer tijd (> ongeveer 10 jaar) jaarlijks gemeten worden in dezelfde periode, bij voorkeur aan het einde van de winter. Maar ook deze periodes kunnen van jaar tot jaar verschillen in de mate van neerslag en verdamping, en daarmee in bodemhoogte, wat onzekerheid

met zich meebrengt bij het bepalen van bodembeweging en -daling. Voor het bepalen van de lange-termijn bodemdaling geldt dan ook hoe langer gemeten wordt, hoe betrouwbaarder de geschatte bodemdalingssnelheid is ([Van Asselen e.a., 2024b](#)).

Voor alle veldmetingen geldt dat er een referentiepunt nodig is ofwel een referentiepunt waarvan de beweging als bekend of stabiel mag worden verondersteld. In de praktijk moet dit punt dus over de hele meetperiode regelmatig worden gecontroleerd.

Vlakdekkende metingen

LiDAR en InSAR resulteren beide in vlakdekkende schattingen van de hoogteverschillen en hoogteverandering. Het (ruimtelijke) meetbereik van radarsatellietbeelden is hierbij groter dan het meetbereik van laserscanmetingen vanuit een statief, drone, helikopter of vliegtuig. Ook is de herhaalfrequentie van de radarsatellietbeelden groter dan die van laserscanmetingen, wat net als waterpassen momentopnamen zijn, waardoor bodembeweging met InSAR beter in beeld kan worden gebracht. Ook de invloed van gewaslengte en -dichtheid bij LiDAR (zie hoofdstuk 5) maakt deze methode onvoldoende betrouwbaar voor het vlakdekkend monitoren van bodembeweging op millimeter schaal nauwkeurigheid in veenweidegebied (Van Asselen e.a., 2022). Dit is anders bij InSAR vanwege de veel langere golflengte van de radarsignalen (orde van centimeters in plaats van micrometers), waardoor een groot deel van het signaal wel tot het grondoppervlak kan doordringen. Laserscanmetingen vanaf een stabiel statief kunnen lokaal wel worden gebruikt voor het monitoren van veenaangroei. Ook voor InSAR geldt dat het toepassen ervan in een veenweidegebied voor het schatten van bodembeweging lastiger is dan in bebouwd gebied, als gevolg van een kleinere consistentie van gereflecteerde radarsignalen. Binnen met name het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweide ([NOBV](#)) en de Regiodeal Bodemdaling Groene Hart ([RDBGH](#)) zijn de laatste jaren door de TU Delft, in samenwerking met Deltares, echter grote stappen gezet in het gebruik van InSAR voor het schatten van bodembeweging in veenweidegebieden. Op dit moment is de verwachting dat er betrouwbare schattingen van seizoensgebonden bodembeweging en lange-termijn bodemdaling op perceelschaal kunnen worden gemaakt met behulp van deze techniek.

8. Governance

In het geval van veldmetingen in het veenweidegebied waarbij er vaste meetopstellingen in het veld staan is het belangrijk om ervoor te zorgen dat deze meetopstellingen niet overgroeid worden door de vegetatie. Daarom moet er in het groeiseizoen een aantal keer worden gemaaid, afhankelijk van hoe hard de vegetatie groeit. Het is hierbij belangrijk dat er zorgvuldig wordt gemaaid, om te voorkomen dat meetinstrumenten en/of kabels worden beschadigd. In het geval van een extensometer is het daarbij belangrijk dat de vierkante plaat dat fungeert als bovenste anker niet wordt betreden. Rondom dit soort kwetsbare meetopstellingen zal met de hand moeten worden gemaaid. Zeker in broedvogelgebieden zullen goede afspraken met de terreineigenaren/-beheerders moeten worden gemaakt over de maaiwerkzaamheden in het broedvogelseizoen. Vaste veldmeetopstellingen zullen ook moeten worden beschermd tegen bijvoorbeeld vee door middel van een hekwerk rondom de meetopstelling. Dit kan ook (jaarlijkse) kosten met zich meebrengen indien er een vergoeding moet worden betaald voor het huren van het stukje grond.

Voor meetmethoden die gebruik maken van een lokaal referentievlak, zoals waterpassing (van maaiveldhoogte en zakplaatjes) en LiDAR vanaf een bewegend platform, is het belangrijk om de stabiliteit van het referentievlak periodiek te meten om te controleren of dit daadwerkelijk stabiel is.

Daarnaast kunnen er meetopstellingen en -sensoren kapotgaan, welke moeten kunnen worden gemaakt door een deskundig persoon. Per meetmethode zal de benodigde expertise hiervoor verschillen. Ook voor de dataverwerking, en voor de interpretatie van verwerkte data, is de juiste expertise nodig, zeker als het gaat om bijvoorbeeld het verwerken van GNSS, LiDAR en InSAR metingen.

9. Praktijkervaringen en lopende initiatieven

Er zijn verschillende onderzoeksprogramma's waarbinnen onderzoek wordt gedaan naar bodemdaling in veenweidegebied in Nederland, waarbij verschillende methoden voor het meten en schatten hiervan worden ontwikkeld en ingezet. Voorbeelden hiervan zijn:

- [Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweide](#) (NOBV)
- [Regiodeal Bodemdaling Groene Hart](#)
- [Living on Soft Soils](#) (LOSS)
- [DeepNL](#)

- [Bodemdalingsonderzoek WENR, o.a. zakplaatjes op diverse locaties \(zie bijvoorbeeld Massop e.a., 2024\).](#)

Daarnaast zijn er andere lokale en regionale projecten en initiatieven rondom het meten, schatten en begrijpen van bodemdaling, zoals:

- [Projecten binnen het Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden](#) (o.a. Spengen en Lange Weide)
- [Pilot Drukdrainage binnen Stichting Blauwzaam](#)
- Langjarige monitoring door WENR op proefboerderij KTC Zegveld.
- [Pilot onderwaterdrainage Rouveen](#)

10. Kennisleemtes

Op dit moment zijn met name de InSAR en GNSS-technieken volop in ontwikkeling voor toepassing binnen het bodembewegingsonderzoek. Dit levert verschillende kennisvragen op.

Zoals beschreven wordt de InSAR techniek veelvuldig toegepast voor het bepalen van bewegingen in stedelijk gebied en van infrastructuur. Voor toepassing in veenweidegebieden zijn overtuigende resultaten geboekt, maar moeten deze nog verder worden aangescherpt en kan de dataverwerking nog verder worden verbeterd. Bij het schatten van de bodembeweging wordt contextuele informatie gebruikt. Ook is het wenselijk te onderzoeken of ook resultaten kunnen worden verkregen voor gebieden met een ander landgebruik dan de graslanden in de veenweidegebieden, zoals akkers. Hierbij moeten oplossingen worden gevonden voor de invloeden van de groei van de gewassen en het ploegen van de velden. Daarnaast komen in de nabije toekomst nieuwe SAR satellietmissies beschikbaar, met beter geschikte golflengten van het radarsignaal, die moeten worden geïntegreerd in de dataverwerking.

De GNSS-techniek kent een lange ontwikkeling en heeft inmiddels vele toepassingen in verschillende wetenschappelijke disciplines en de beroepspraktijk. De toepassing van GNSS voor het bepalen van nauwkeurige hoogteveranderingen is altijd al een uitdaging geweest, zeker bij het bepalen van hoogteveranderingen op tijdschalen van minder dan een dag. De oorzaak is de gevoeligheid van GNSS voor reflecties van naburige objecten zoals de bodem: de technische term hiervoor is multipath. Dit is deels te ondervangen door gebruik van dure en zware antennes, maar dit is geen

optie voor de bepaling van bodembeweging in veengronden. Dit probleem kan deels ondervangen worden door specialistische processing technieken, die deels nog in ontwikkeling zijn. Anderzijds biedt multipath ook kansen: het is theoretisch mogelijk – uit de interferentie patronen – de hoogte tussen de bodem en de antenne af te leiden. Hier is verder onderzoek voor nodig. Een ander punt van onderzoek betreft de fundering en ontwerp van de antenne installatie. Voor een IGRS in het veenweidegebied moet deze zo stabiel mogelijk zijn. Voor een “drijvende” installatie, of een geodetische extensometer toepassing, gelden heel andere eisen. Het ontwerp voor deze is nog relatief nieuw en kan zeker verbeterd worden.

Vooralsnog is het belangrijk om ook extensometers en zakplaatjes te blijven gebruiken. Deze veldmetingen leveren waardevolle meetreeksen op met millimeter schaal nauwkeurigheid, welke nodig zijn om de kennis rondom bodemdalingsprocessen en het zo optimaal mogelijk meten hiervan te vergroten (welke processen treden waar en wanneer op in de bodem?). Ook zijn deze metingen nodig voor validatie van bodembewegingsschattingen gedaan met andere methoden.

11. Bronnen en links

Beuving, J., van den Akker, J.J.H. (1996) Maaiveldsdaling van veengrasland bij twee slootpeilen in de polder Zegvelderbroek - vijftwintig jaar zakkingsmetingen op het ROC Zegveld, [rapport 377](#), DLO-Staring Centrum, Wageningen.

Conroy, P., Van Diepen, S. A. N., Van Asselen, S., Erkens, G., Van Leijen, F. J., & Hanssen, R. F. (2022). Probabilistic Estimation of InSAR Displacement Phase Guided by Contextual Information and Artificial Intelligence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-11. Article 5234611. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9874898>.

Conroy, P., van Diepen, S. A. N., & Hanssen, R. F. (2023a). SPAMS: A new empirical model for soft soil surface displacement based on meteorological input data. *Geoderma*, 440, Article 116699. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116699>.

Conroy, P., Van Diepen, S.A., Van Leijen, F.J. and Hanssen, R.F., 2023b. Bridging Loss-of-Lock in InSAR Time Series of Distributed Scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10308580>.

Erkens, G., van Asselen, S., Hommes-Slag, S., Melman, R., Kooi, H., van Essen, H., van den Berg, M., Aben, R., Fritz C., Boonman, C., Velthuis, M., Heuts, T., Nouta, R., Hessel, R. van de Craats, D., Massop, H., Gerritsen, P., van 't Hull, J., Velthof, G., van den Akker, J., van Houwelingen K, van der Velde, Y., Boonman, J., Lootens, R., van Huissteden, K. Hefting, M., Hutjes, R., Kruijt, B., Harpenslager, S.F., van Dijk, G., van de Riet, B., Smolders, F. (2021) Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (NOBV) - Data-analyse 2020-2021, STOWA. Online beschikbaar: <https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2021/11/NOBV-Data-analyse-2020-2021.pdf>.

Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry. Remote Sensing and Digital Image Processing. <https://link.springer.com/book/10.1007/0-306-47633-9>

Hessel, R., Gerritsen, P., van den Akker, J.J.H., Massop, H., Gerritsen, F. (2024) Zakplaatjes en C-profielen: een methode om de C-voorraad en CO₂-emissies van veengronden te bepalen. Wageningen, Wageningen Environmental Research, [Rapport 3347](#).

Hoekstra, J., van Schie, A. (2022) Sturen met grondwater – Bedrijvenproef Spengen 2017-2021, Eindrapportage mei 2022, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Online beschikbaar: file:///C:/Users/asselen/Downloads/eindrapportage_sturen_met_grondwater_bedrijvenproef_spengen_2017_2022_lage_resolutie.pdf.

Kooi, H., van Waardenberg, E. (2024) Evaluation of alternative extensometer designs and methods - desk study report for Regio Deal Bodemdaling Groene Hart project 44.

Massop, H. T. L., Hessel, R., van den Akker, J. J. H., van Asselen, S., Erkens, G., Gerritsen, P. A., & Gerritsen, F. H. G. A. (2024). Monitoring long-term peat subsidence with subsidence platens in Zegveld, The Netherlands. *Geoderma*, 450, Article 117039. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117039>

Schothorst, C.J. (1977) Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands, *Geoderma* 17, 265-291.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016706177900891>.

Tiberius, C. C. J. M., van der Marel, H., Reudink, R. H. C., & van Leijen, F. J. (2022). *Surveying and Mapping*. TU Delft OPEN Publishing. <https://doi.org/10.5074/T.2021.007>

Van Asselen, S. (2021) Evaluatie bodembewegingsmetingen in polder Spengen. Deltares rapport 11206541-002-BGS-0003.

Van Asselen, S., Erkens, G., Zandbergen, S., de Zeeuw, R., de Graaf, F. (2022) Bodemdaling meten met LiDAR, *Land+Water*, nr 7/8, juli 2022.

Van Asselen, S. (2024) Effecten van waterinfiltratiesystemen op bodembeweging in veenweidegebied - Een onderzoek in het peilgebied Kostverloren- en Kloosterzijk, Overijssel, Deltares rapport 11202992-010-BGS-0001.

Van Asselen, S., Erkens, G., Fritz, C., Hessel, R., and van den Akker, J. J. H. (2024a) Effects of subsurface water infiltration systems on land movement dynamics in Dutch peat meadows, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2024-152>, in review.

Van Asselen, S., Hessel, R., Erkens, G., van Essen, H. (2024b) NOBV jaarrapportage 2024 Integratierapport Bodemdaling. Online beschikbaar: <https://www.nobveenweiden.nl/wp-content/uploads/2024/10/NOBV-Rapportage-2024-Bodemdeling-Integratierapport.pdf>.

Van den Akker, J.J.H. Massop H., Gerritsen P., Gerritsen, F., van Houwelingen, K.M. (2021) Evaluation of 50 years subsidence monitoring of a peat meadow parcel to compare several methods to determine CO₂ emissions, Geneva Eurosoil 2021 PO446 poster presentation. Online beschikbaar: <https://edepot.wur.nl/562725>.

Van Deijl, D., van Asselen, S., Voortman, B., Erkens, G., van den Eerthwegh, G. (2022) Verticale beweging van de veenbodem: meettechnieken en ervaringen te Zegveld, *Stromingen* 2022 (28), nr 2: <https://www.nhv.nu/wp->

content/uploads/2022/07/330434_NHV_02_Stromingen-2-2022-ARTIKEL-DEIJL-LR.pdf.

Van den Born, G.J., Kragt, F., Henkens, D., Rijken, B. van Bommel, B., van der Sluis, S. (2016) Dalende bodems, stijgende kosten - Mogelijke maatregelen tegen veenbodemdaling in het landelijk en stedelijk gebied, PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag, [PBL-publicatienummer: 1064](#).

Zandbergen, S. (2020) Analyse LiDAR hoogtemetingen Rouveen 2018/2020, Shore Monitoring.

Zandbergen, S. (2024) Monitoring bodemhoogte veenweidegebied Zegveld – Data analyse, Shore Monitoring.

12. Colofon

Deze Deltafact is opgesteld door S. van Asselen (Deltares), Ramon Hanssen (TU Delft), Hans van der Marel (TU Delft) en Freek van Leijen (TU Delft), met input van Rudi Hessel (WENR). Veel van de opgedane kennis gebruikt voor deze Deltafact is verkregen vanuit het [Nationale Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweide](#), het [Regiodeal Bodemdaling Groene Hart project 44](#), en bodemdalingsonderzoek vanuit WENR, Deltares en de TU Delft.

Versie 1.0, datum: 19-12-2024.

13. Disclaimer

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.

