

# VOORSPELLEN VAN BODEMDALING LANGS EEN WEG IN FRIESLAND: EEN MULTIDISCIPLINARIE AANPAK

*Multi-data settlement prediction along a road section integrating InSAR and coastal subsurface information with data assimilation*

In het onderzoeksprogramma LOSS wordt gewerkt aan de kennisbasis van bodemdaling: waarom en hoe daalt de bodem, hoe kun je bodemdaling voorspellen en welk beleid is relevant is bij het omgaan ermee of voorkomen ervan? Manon Verberne is promovendus binnen het LOSS programma en focust op het ontrafelen van de oorzaken van het totale signaal van bodemdaling. Het onderzoek wordt uitgevoerd bij TNO en de Universiteit Utrecht. Dit is de samenvatting van de bevindingen uit de paper 'Multi-data settlement prediction along a road section integrating InSAR and coastal subsurface information with data assimilation, gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek langs een sectie van de N31 in Friesland.

Het artikel is te citeren als:

*Verberne, M., Koster, K. & Fokker, P. A. (2023). Multi-data settlement prediction along a road section integrating InSAR and coastal subsurface information with data assimilation. Frontiers in Earth Science: Sec. Sedimentology, Stratigraphy and Diagenesis, Volume 11, <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1323874>*

Het is online te vinden via:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2023.1323874/full>

*Dit onderzoek is onderdeel van het NWA project Living on Soft Soils: Subsidence and Society (grantrnr.: NWA.1160.18.259).*

## Samenvatting

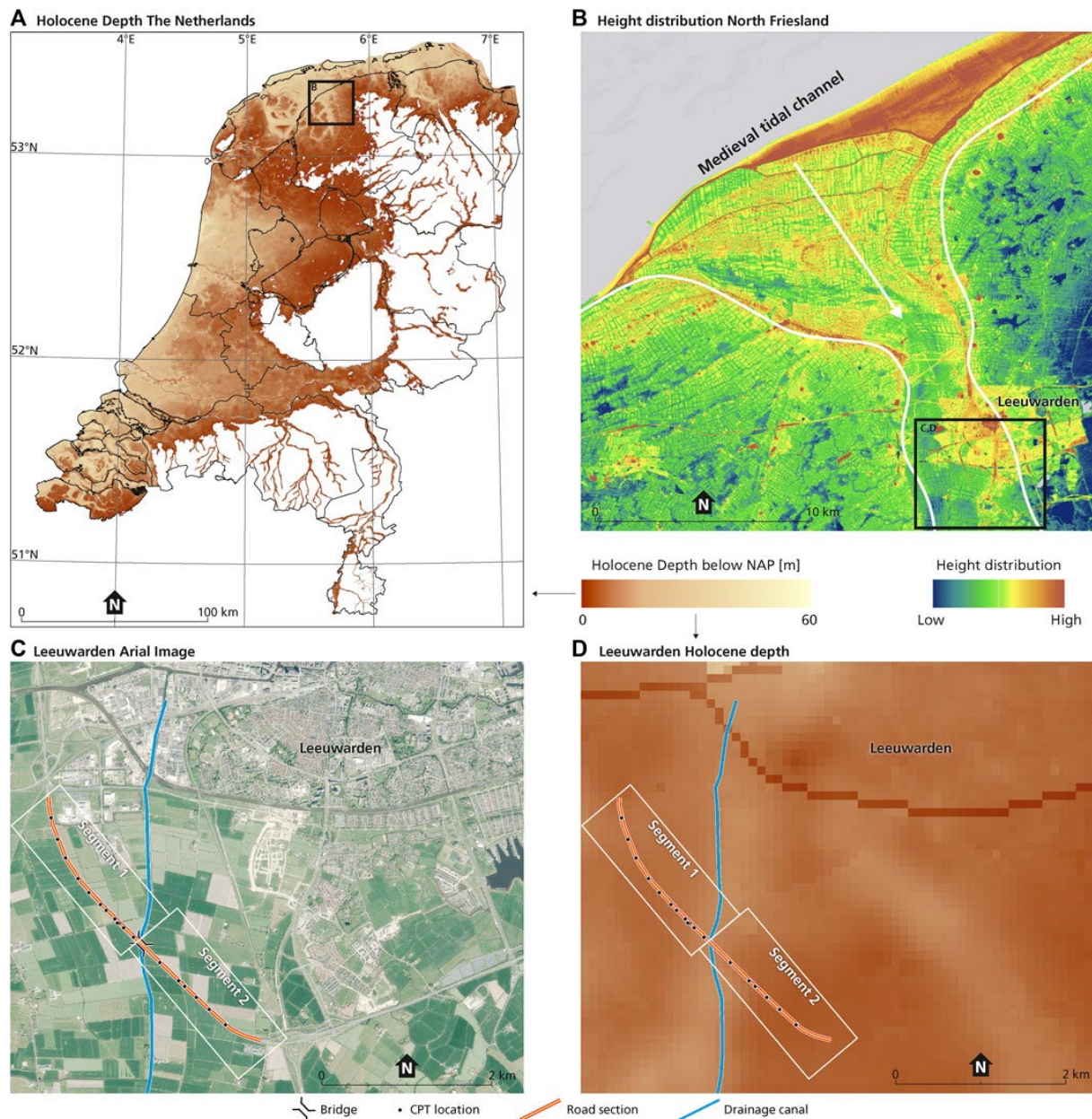
Deze studie richt zich op een specifieke wegsectie in Friesland waar significante verschillen in zetting worden waargenomen. Ongelijke zetting kan aanzienlijke schade veroorzaken aan de wegsectie en mogelijk leiden tot gevaarlijke situaties voor het verkeer. Het is dus van groot belang om de omvang van verwachte zettingen te voorspellen en de oorzaken nauwkeurig te identificeren. In deze studie onderzoeken wij hoe de samenstelling van Holocene kustafzettingen bijdraagt aan het zettingspatroon. We hebben daarbij een reeks gegevensbronnen gebruikt, waaronder satellietbeelden, sonderingen en geologische modellen, om snel en effectief de relatie tussen ondergrond en bodemdaling te analyseren.

## Het gebied

De onderzochte wegsectie maakt deel uit van de N31, die in 2014 werd geopend en bekend staat als 'de haak om Leeuwarden' (Fig. 1C). Deze weg kruist een in de 19<sup>e</sup> eeuw gekanaliseerde getijdengeul uit de Middeleeuwen, de Zwette, welke onderdeel uitmaakt van de historische Elfstedentocht route.

De afzettingen waarop de weg zich bevindt zijn een opeenvolging van veen, getijden- en kustafzettingen, uit het Holocene tijdperk. In het Pleistocene tijdperk (de periode van ijstijden voor het Holoceen) vormden lokale bekkens een dal, dat later werd opgevuld door veen (Basisveen Laag), opgevolgd door getijden afzettingen (Laagpakket van Wormer). Toen de relatieve zeespiegelstijging afnam vormden zich opnieuw veen in het

gebied (Formatie van Nieuwkoop). De twee kanten van de Zwette zijn goed in te delen als twee segmenten met ieder een eigen geologische opeenvolging. Segment 1 wordt gekarakteriseerd door "Middelzee" getijden afzettingen die reiken tot 5-12 meter diep (Fig 2A-D), welke ingesneden zijn in de oudere kust afzettingen. De overgang tussen segment 1 en 2 komt ongeveer overeen met de oostelijke grens van deze Middelzee getijdengeul, daarvoor zijn in segment 2 nog steeds de oudere afzettingen van Basisveen, Wormer en Nieuwkoop te vinden, welke niet geërodeerd zijn (Fig 2A).



**Figuur 1: A) Kaart van Nederland met de dikte van het Holocene pakket. B) Hoogte kaart (AHN) van het gedeelte van Friesland waar de wegsectie zich bevindt. In het wit staat de in de Middeleeuwen actieve getijden geul aangegeven, welke nog steeds zichtbaar is op de hoogtekartaat. C) Luchtfoto van het gebied van de snelweg, met het kanaal de Zwette aangegeven. D) Zelfde locatie als de luchtfoto van C) met nu de dikte van het Holocene pakket, welke dikker is rond de oude getijden geul (de Zwette).**

## Databronnen

Voor het onderzoek zijn drie verschillende databronnen geïntegreerd: satellietdata (InSAR), sonderingen en GeoTOP.

De satellietdata zijn InSAR gegevens van Sentinel-2. Bodembeweging kan hiermee tot op de millimeter nauwkeurig worden geschat. De satellieten zijn actief sinds het voorjaar van 2015, dus vanaf dat moment zijn deze data beschikbaar.

Sonderingen worden gebruikt om de bodem te karakteriseren. Een staaf met een kegelvormige punt wordt met een vaste snelheid de grond ingeduwd. Hierbij wordt de weerstand van de punt en de wrijving aan de zijkant gemeten met een resolutie van twee centimeter. De methode is internationaal gestandaardiseerd en maakt het mogelijk om voor elke paar centimeter de bodemsoort (lithologie: klei, zand, veen etc.) vast te stellen.

GeoTOP is een drie-dimensioneel ondergrondmodel van TNO – de geologische dienst van Nederland. Dit model bestaat uit cellen van 100x100 meter met een dikte van een 0.5 meter. Voor elk van deze cellen is de lithologie (bijvoorbeeld zand, klei) en stratigrafische eenheid (afzettingsmilieu en tijd) waar het toe behoort (bijvoorbeeld Wormer member, Nieuwkoop formatie) vastgesteld. Het model is gemaakt op basis van duizenden grondboringen, welke zijn geïnterpoleerd naar een compleet continu model.

## Modelleren

De verschillende databronnen zijn gecombineerd in een statistisch model, waarbij zetting wordt gemodelleerd aan de hand van een aantal parameters. Deze parameters worden toegekend aan de verschillende soorten pakketten, volgens de ondergrondkarakterisatie van GeoTOP en de sonderingen. Ze kwantificeren hoe de pakketten compacteren onder een gegeven gewicht (bijvoorbeeld een weg), volgens een zettingsmodel. Het model dat wij hebben gebruikt is een veelgebruikt zettingsmodel in de civiele techniek in Nederland en daarbuiten, het NEN-Bjerrum model. Met het statistische model zoeken we welke waarden voor de parameters van de verschillende eenheden van de bodemopbouw het beste passen bij de uit de satellietdata afgeleide daling. Met het resultaat kunnen we vaststellen hoe snel de verschillende ondergrondpakketten compacteren onder gewicht en wat de relatieve bijdragen van die pakketten zijn.

Het GeoTOP model is een continu model met cellen van 100x100 meter horizontaal en 0.5 meter dikte. De sonderingen bevatten data met hoge verticale resolutie, maar zijn beperkt tot een beperkt aantal boringen. Daarmee hebben we dus twee databronnen, met elk hun eigen merites. GeoTOP biedt data op lagere verticale resolutie, maar continu langs het oppervlak. Sonderingen hebben een hogere verticale resolutie maar zijn onregelmatig verdeeld langs het oppervlak. In deze studie hebben wij de informatie van beide bronnen gecombineerd om het gedrag van de ondergrond zo goed mogelijk te begrijpen.

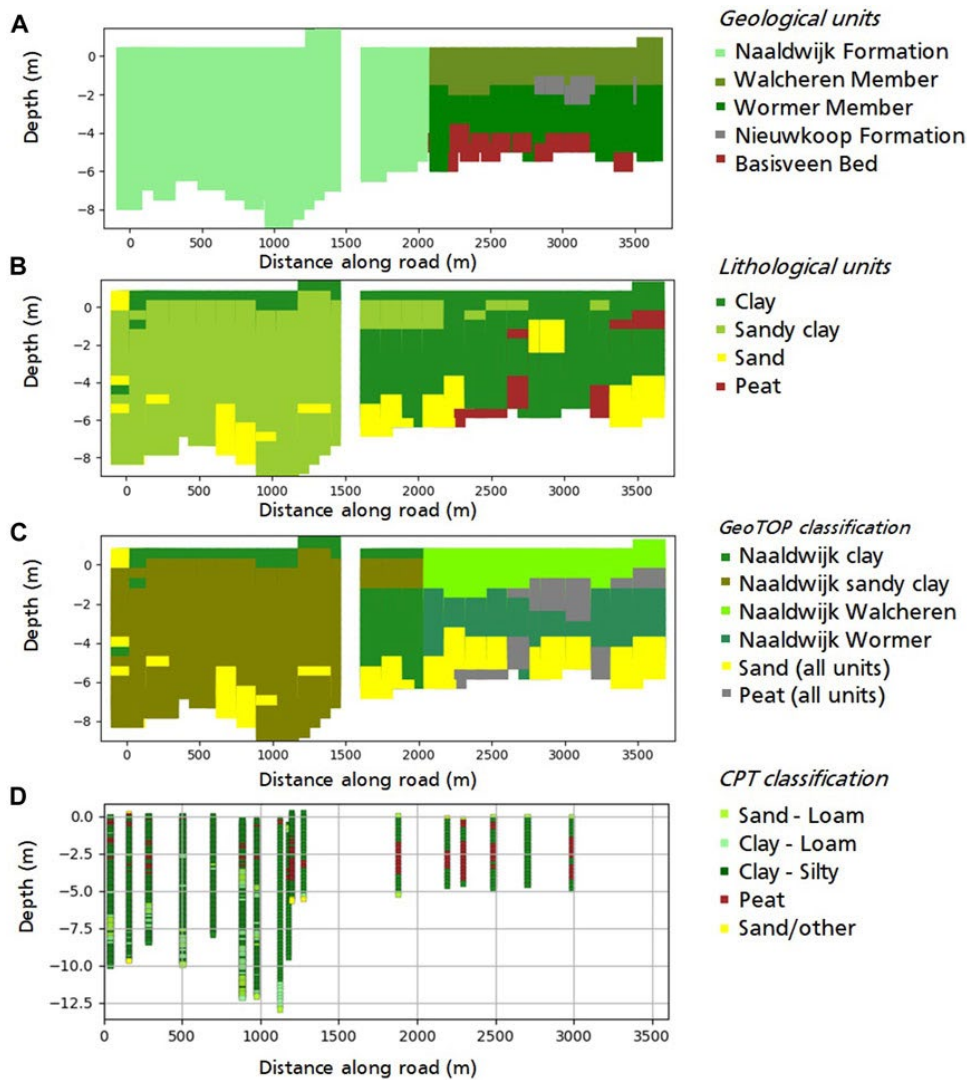
## Het combineren van data nodig voor begrip van de processen

Als eerste laten de resultaten zien dat de dikte van het Holocene pakket alleen als indicatie niet voldoende is om het patroon van zetting van de weg te begrijpen. Dit is op zichzelf al een belangrijk gegeven, omdat internationaal deze aanname vaak wordt gedaan.

Uit onze analyse is verder naar voren gekomen dat als we afgaan op de lithologische opbouw (bodemsoort) alleen, we de zetting langs de weg ook niet kunnen verklaren. Een geologische interpretatie is nodig. Als voorbeeld zien we dat in segment 1 zandige klei dominant is (Figuur 2B). Een zandigere klei zou naar verwachting minder



compacteren dan een wat fijnere klei. Echter, de zandige kleien van de Naaldwijk formatie liggen verder onder het oppervlakte dan de Naaldwijk klei (Figuur 2C). Deze kleien zijn in hun geschiedenis regelmatig gedraineerd geweest en hebben hierdoor op dit moment een lagere zettingspotentie. We zien dat de combinatie van lithologie met stratigrafie essentieel is om de variërende bodemdaling langs de wegsectie te verklaren.

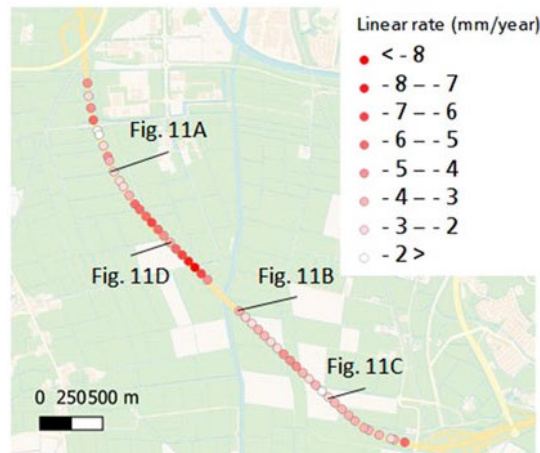


**Figuur 2: De verschillende classificaties van met diepte voor de wegsectie. Segment 1 loopt van 0-1500 meter en segment twee bevindt zicht voorbij de grens van de 1500 meter vanaf het begin van de wegsectie. A) De geologische eenheden volgens de GeoTOP classificatie. Segment 1 bestaat uit de jongere Naaldwijk formatie, welke de oudere Holocene lagen heeft geërodeerd die grotendeels bewaard zijn gebleven in segment 2. B) De lithologische eenheden volgens GeoTOP. C) De combinatie gemaakt van uit de lithologische en geologische eenheden van GeoTOP. D) De lithologische classificatie van het Holocene pakket, uit de sonderingen afgeleid.**

### Combineren van kennis en data voor toekomstbestendig bouwen

Onze studie demonstreert het belang van het combineren van kennis en verschillende databronnen over de ondergrond om bodemdaling te begrijpen. Voor toekomstbestendig bouwen is het cruciaal om voldoende metingen van de samenstelling van de ondergrond beschikbaar te hebben, van bijvoorbeeld sonderingen en grondboringen. Door deze te combineren met satellietmetingen is het niet nodig om ook laboratoriumtesten uit te voeren. Met data-assimilatie kunnen we de historische zetting langs een weg verklaren en de verwachte zetting schatten. Wel is uit onze analyse

gebleken dat rekening houden met alleen de lithologie (bodempopbouw), zonder stratigrafische interpretatie, niet voldoende is om zetting in het holocene kustvlak goed te kunnen begrijpen. Het is van belang om oog te houden op wat voor informatie de verschillende databronnen ons kunnen verschaffen, op welke schaal deze ons iets kunnen vertellen en wat we kunnen leren door de verschillende datasets te combineren. De opgedane kennis in de specifieke studie langs dit stuk weg kan gebruikt worden bij het ontwikkelen van het Nederlandse holocene kustlandschap.



**Figuur 3: Dalingssnelheden van de snelweg, afgeleid uit de satelliet data in millimeter per jaar. Duidelijk is dat van noordwest naar zuidoost eerst de snelheid van daling toeneemt, waarna deze vervolgens sterk afneemt. Op een afstand van een kilometer is er een differentiële daling van >5 mm/jaar zichtbaar. De aangegeven punten verwijzen naar locaties van afbeeldingen in het paper zelf.**