

## Casus autonome bodemdaling Erik Kwast



### Ogen geopend

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) heeft de gevolgen van bodemdaling in 2016 onderzocht. Volgens het rapport 'Dalende bodems, stijgende kosten' kunnen de kosten van de bodemdaling in de steden oplopen tot ruim €21 miljard in 2050. In het landelijk gebied liggen de kosten een stuk lager: maximaal €1 miljard.

"Het rapport van het PBL heeft de ogen van veel bestuurders geopend. Wij hebben in Nederland altijd geaccepteerd dat de bodem daalde. Iedereen is het er nu wel over eens dat we alles op alles moeten zetten om het proces af te remmen", zegt Hilde Niesen, wethouder

# Inhoud

- Actualiteit autonome bodemdaling
- Wat is autonome bodemdaling en wordt dit meegenomen in de zettingsmodellen?
- Hoe kunnen we autonome bodemdaling bepalen en welke onzekerheden spelen hierbij?
- Wat zijn realistische zettingseisen voor infrastructuur en hoe wordt autonome bodemdaling daarbij meegenomen?
- Op welke wijze kan autonome bodemdaling in zettingsberekeningen worden meegenomen?
- Casus reconstructie Molenbuurt Harmelen
- Vragen en discussie

# Actualiteit autonome bodemdaling



S. (Sopie) E. ten Bosch  
Scientific Assistant, EPFL  
(vml. student TU Delft)



F. (Rik) Bisschop  
Senior Specialist  
Geotechniek Arcadis

## ZAKT NEDERLAND WERKELIJK ZO SNEL? DEEL 1: HET VEENWEIDEGEBIED

### Inleiding

In het deltagebied van Nederland komen veel slappe grondlagen (veen en klei) voor, die gevoelig zijn voor bodemdaling. Bodemdaling draagt onder andere bij aan een verhoogde kwetsbaarheid voor overstromingen, verminderde begaanbaarheid en vernatting van landbouwgronden, beschadigingen aan infrastructuur, pijpleidingen en gebouwen door differentieële bodemdaling en problemen met houten funderingen die boven het grondwater aanwezig zijn. Samen veroorzaken al deze problemen een verhoging in onderhoudskosten voor zowel waterkeringen als gebouwen en infrastructuur in Nederland.

Verschiedende oorzaken spelen een rol bij bodemdaling waarbij verschillende processen optreden. Kimenai et al. (2020) hebben recent de relevante processen in kaart gebracht en gekwantificeerd voor bodemdaling bij een project waarbij de grondwaterstand verlaagd zou worden. Overigens veroorzaakt niet alleen een verlaging van de

grondwaterstand bodemdaling, maar ophogingen vormen ook een belangrijke oorzaak. Om de effecten van bodemdaling te kunnen inschatten, is begrip noodzakelijk van de processen welke bijdragen aan de totale daling en hoe deze variëren in tijd en diepte. Als functie van de oorzaak van de bodemdaling en de processen die hierbij een rol spelen, zijn er verschillende strategieën mogelijk om de gevolgen van bodemdaling te beheersen. Een voorbeeld is het toepassen van licht ophogmateriaal als de daling voornamelijk door belasting wordt veroorzaakt en het verhogen (of niet meer verlagen) van het waterpeil in (veen)-weidegebieden.

Kimenai et al. (2020) gingen in op de bodemdaling in een gebied met relatief dunne veen- en leemlagen op enige diepte (2 m) uit een warmere periode in de Weichselien-ijstijd, waarbij niet alleen rekening is gehouden met bodemdaling in de vorm van zetting, maar ook krimp en oxidatie zijn meegenomen. In dit eerste artikel is ingegaan

op de verschillende processen die een rol spelen bodemdaling in veenweidegebieden (Holoc). Hierbij is niet alleen rekening gehouden met aerobe oxidatie maar ook met anaerobe oxidatie, de modellen die hiervoor zijn ontwikkeld, getoetst aan de hand van metingen op 1 locatie, de Krimpenwaard en Zeevang pc (achterland Markermeerdijken). Het tweede artikel gaat in op de bodemdaling bij ophoging in de vorm van een wegligzaam en waterkerin

### Bodemdalingsprocessen

Figuur 2 laat voor drie verschillende situaties (veen)weidegebieden, waterkeringen en bebouwd gebied de relevante bodemdalingprocessen: Voor (veen)weidegebieden spelen met name oxidatie (aerobe afbraak van organisch materiaal) en krimp (volumeverlies door uitdroging) bij de grondwaterstand en rol. Dit proces wordt versterkt door waterpeilverlagingen. Daarmee veroorzaken deze verlagingen een verhoging van de belasting (korrelspanning) op de ondergrond. Dit heeft tot gevolg welke bestaat uit initiatie van primaire consolidatie en kruip. Onder de waterstand treedt daarnaast anaerobe afbraak van organisch materiaal op.

Bij waterkeringen spelen onder de grondwaterstand dezelfde processen een rol. Het gedeelte van een dijkligzaam boven de grondwaterstand bestaat uit klei en/of organisch materiaal ondervindt naast oxidatie en krimp ook zetting als gevolg van het eigen gewicht van het dijkligzaam. Dit wordt ook wel klink genoemd.

Bij bebouwde en opgehoogde gebieden zullen woonwijken en/of infrastructuur zal voornamelijk sprake zijn van zetting als gevolg van de verhoging van de belasting op de ondergrond. Oxidatie en krimp zullen alleen nog optreden zolang oorspronkelijke ondergrond niet door de aangebrachte ophoging onder de grondwaterstand wegzakt. Klink van het ophogmateriaal zal een rol spelen, omdat zand een inert materiaal is waardoor oxidatie en uitdroging geen rol spelen. Een effect dat wel kan leiden tot klink van zand is de verdichting van los tot matig gepakt zand als gevolg van trillingen.



Figuur 1 - Projectgebied in Krimpenwaard polder.



ir. A.C.M. Kimenai  
Adviseur Geotechniek -  
Heijmans Infra BV



ir. G. Bakker  
Onderzoeker - Wageningen  
Environmental Research



ing. L. Tiggelman  
BIM-manager - Dura Vermeer (voorheen  
Adviseur Geotechniek - Heijmans Infra BV)

## BEPALING MAAIVELDZAKKING IS MEER DAN ALLEEN GEOTECHNIEK

### Inleiding

In mei 2012 heeft de Combinatie Heijmans/Boskalis het project 'Verbreding Wilhelminakanal' gegund gekregen van Rijkswaterstaat. Het project omhelst het verbouwen van het Wilhelminakanal te Tilburg tussen Sluis II en Sluis III tot een Klasse IV-vaarweg, de bouw van een nieuwe Sluis III en het verwijderen van Sluis II. Figuur 1 geeft een bovenaanzicht van de locatie van het project. Figuur 2 geeft een schematische doorsnede van het kanaal met de twee sluisen.

Voorausgaand aan de realisatie is de milieueffectrapportage (MER 2010) [2] opgesteld. Eén van de hierin genoemde effecten is gebouwzetting ten gevolge van maaiveldzetting. De maaiveldzetting is in de MER 2010 alleen bepaald vanuit een geotechnische bril door de berekening van zetting van samendrukbare bodemlagen ten gevolge van een belasting door grondwaterstandverlaging. Bodemkundige processen die kunnen leiden tot maaiveldzetting zijn niet beschouwd. Naast zetting kan ook maaiveldzetting optreden door

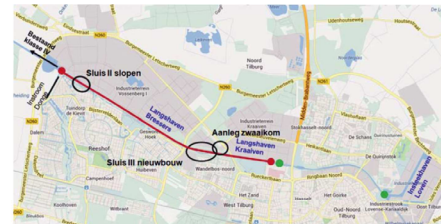
oxidatie van organisch materiaal en krimp van leem-, klei- en/of veenlagen. Zie bijvoorbeeld het droogte onderzoek in Zevenaar dat is uitgevoerd door Deltares [3].

Tijdens de realisatie van het project is door Rijkswaterstaat in 2017 aan de Combinatie gevraagd een nadere studie uit te voeren naar het effect van de permanente kanaalpeilverlaging op het deel tussen de sluisen II en III t.g.v. het slopen van sluis II. Wageningen Environmental Research (WER) is aan het onderzoeksteam van de Combinatie toegevoegd vanwege de expertise die ze bezitten op het gebied van bodemprocessen. Deze studie is bedoeld als een kwalitatieve verdieping van de bestaande MER 2010. Onderzoek is of en in welke mate bodemkundige processen een bijdrage leveren aan de maaiveldzetting met gebouwzetting als mogelijk gevolg.

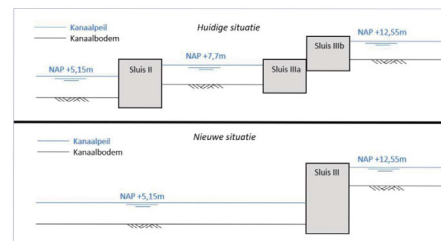
### Methodologie

Figuur 3 geeft een schematische weergave van de gehanteerde methodologie betreffende de beschouwing van de effecten van kanaalpeilverlaging op de bestaande bebouwing. Voor het berekenen van de te verwachten grondwaterstandverlaging is gebruik gemaakt van een geotechnisch model in combinatie met de verwachte kanaalpeilverlaging. Dit resulteert in 50 verschillende grondwaterstandverlagingen waarmee alle eventueel optredende scenario's onderzocht zijn. Naast de grondwaterstandverlaging zijn ook bodemeigenschappen, zetting door de resulterende verhoging van de korrelspanning en bodemprocessen als oxidatie en krimp beschouwd als bijdragende factoren voor maaiveldzetting. De studie naar deze factoren is in de onderstaande paragrafen toegelicht.

Om tot slot de maaiveldzetting te kunnen vertalen naar gebouwzetting, is een gedetailleerd funderingsonderzoek uitgevoerd voor woningen in de woonwijk Reeshof. Afhankelijk van de funderingswijze is de berekende maaiveldzetting vertaald naar een gebouwzetting. Tot slot zijn op basis van de SBR 1998 [6] en de te verwachten gebouwzettingen, schadecategorieën aan de gebouwen toegekend. In dit artikel is niet ingegaan op de toetsing van de grondwaterstandverlagingen, de gevolgen van maaiveldzetting op gebouwzetting en de uiteindelijke schadecategorieën.



Figuur 1 - Kernelementen van de Visievariant.



Figuur 2 - Doorsneden oude en nieuwe situatie Wilhelminakanal te Tilburg.



# Actualiteit autonome bodemdaling

Dr. K. Koster  
TNO - Geological Survey  
of the Netherlands,  
dpt. Geomodelling,  
Geomodeller



Dr. J. Staffeu  
TNO - Geological Survey  
of the Netherlands,  
dpt. Geomodelling,  
Geomodeller



Drs. D. Muljers  
TNO - Geological Survey  
of the Netherlands,  
dpt. Geomodelling,  
Geomodeller/deputy  
research manager



Dr. M.J. van der Meulen  
TNO - Geological Survey  
of the Netherlands,  
dpt. Geomodelling,  
Research manager

## GEOTOP: A STANDARD IN 3D LAND SUBSIDENCE STUDIES IN THE NETHERLANDS

### Introduction

The Geological Survey of the Netherlands (TNO-GDN) has developed a suite of 3D geological subsurface models. In this contribution we address the protocol used for developing one of these models: GeoTOP. We show its applied value in recent subsidence studies, focusing on the coastal plain of the Netherlands, and provide a perspective on its future use by governmental decision makers and other users under the newly implemented Key Register of the Subsurface.

### GeoTOP

GeoTOP is a high-resolution voxel model that covers the subsurface down to 50 m below mean sea level (Figure 1). Each voxel is a volumetric cell in a regular, rectangular grid bounded laterally by

regionally delimited model boundaries. GeoTOP has a grid resolution of 100 x 100 x 0.5 m, and its millions of cells are attributed with lithostratigraphy, lithology, and associated probabilities (Staffeu et al., 2011; 2020). It is based on approximately 455,000 coded borehole descriptions from the national subsurface database DINO, operated by TNO, complemented with 125,000 borehole logs from Utrecht University. At present, GeoTOP consists of eight model areas, covering most of the subsidizing lowlands.

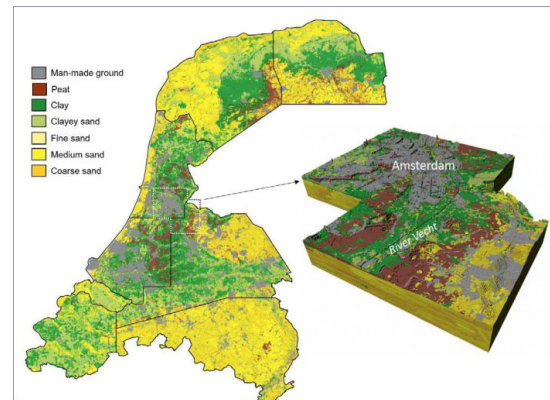
### Drivers of subsidence

Prime subsidence-governing processes in the shallow subsurface are oxidation of peat, as well as shrinkage and compression of Holocene peat and clay. These processes are human-induced.

They result from artificially low phreatic groundwater levels and from overburden pressure generated by man-made overburdens of sand, put in place to ensure that planned buildings or infrastructure will have long-term stability. The low groundwater levels results in aeration of the peat, which facilitates oxidation of organic matter, leading to emission of CO<sub>2</sub>. In the past, subsidence was locally exacerbated by peat mining for fuel. Altogether, approximately half of the coastal plain has subsided to below mean-sea level.

### Subsidence studies

GeoTOP is the standard tool in land-subsidence studies at TNO-GDN. It covers most of the subsidizing coastal plain, has sufficient vertical resolution, and schematizes the distribution of



**Figure 1** – The eight model areas of GeoTOP, and zoomed-in view of the peat-rich area of Amsterdam. The voxels are attributed with the most likely lithology.



Ir. F.J.M. Hoefsloot  
Fugro



Ing. W.R. Wiersma  
Hogeschool Rotterdam / Dura Vermeer

## EVALUATIE EN VOORSPELLEN ZETTINGEN HOOGBOUW OP BASIS VAN SATELLIETDATA

### Inleiding

Gebouwen met een hoogte van meer dan 100m worden steeds vaker gerealiseerd. Dergelijke hoogbouw wordt meestal op palen gefundeerd met een paalpuntniveau in een draagkrachtige zandlaag. In het westen van het land zijn dit door-gaans de Pleistocene afzettingen op een diepte van orde NAP -25 m. Onder het funderingsniveau worden vaak nog samendrukbare lagen aangetroffen. Onder invloed van de permanent aanwezige hoge funderingsdruk ten gevolge van het eigen gewicht moet rekening worden gehouden met samendrukking van deze lagen en zakking van de hoogbouw. Met betrekking tot hoogbouw in Rotterdam heeft Hannink [1] voor een tiental gebouwen een mooi overzicht van het vraagstuk gegeven. Hannink komt tot de conclusie dat de belastingtoename in de ondergrond voldoende nauwkeurig kan worden berekend maar dat er onvoldoende meetdata voorhanden zijn om het

tijdsafhankelijke zakkingsgedrag te toetsen.

In het kader van een afstudeeronderzoek voor de Hogeschool Rotterdam is gekeken of satellietdata gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de trend van de zetting van hoogbouw en hiermee het ontbrekende puzzelstukje in het zettingsmodel kan worden ingevuld.

### Satellietdata - InSAR

Sinds 1992 zijn er satellieten in de lucht welke, gebruikmakend van een techniek genaamd InSAR, beelden van de aarde maken. Deze beelden kunnen voor verschillende doeleinden gebruikt worden. Monitoren van zettingen van gebouwen is hier één van.

Het verwerken van de ruwe satellietdata naar bruikbare en bewerkbare gegevens is een specifieke en tijdrovende klus. Wanneer er voldoende data is verkregen kunnen van objecten verticale

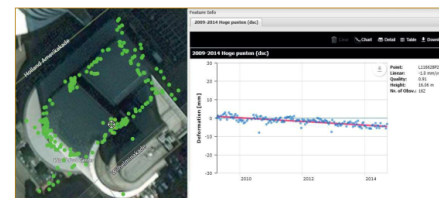
verplaatsingen bepaald worden, welke worden weergegeven zoals in figuur 1.

InSAR staat voor Interferometric Synthetic Aperture Radar. Vanaf een satelliet worden er radargolven uitgezonden naar de aarde. Na weerkaatsing op aarde wordt deze straling vervolgens opgevangen door dezelfde satelliet. De opgevangen radargolven bevatten een amplitude en een fase. De amplitude van de straling geeft een 2D-beeld. De fase van de straling geeft een fasebeeld. Door twee fasebeelden met elkaar te vergelijken kan er een interferogram gemaakt worden. Deze stappen zijn visueel weergegeven in figuur 2, 3 en 4.

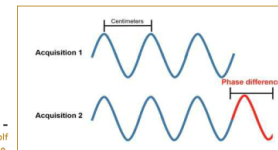
Door interferogrammen te vergelijken kunnen terugkerende punten gevonden worden, zogeheten coherente verstrooiers. Doordat het faseverschil bekend is, kan voor ieder punt de verticale verplaatsing worden berekend. De hoek waaronder de satelliet radarsignaal uitzendt is bekend, waaruit met de stelling van Pythagoras de verticale verplaatsingen worden berekend. Met deze methode is een nauwkeurigheid van 1 tot 2 millimeter te behalen. De exacte hoogtebepaling volgt niet uit het vergelijken van de interferogrammen en verschilt per methode. Bij hogeresolutiedata ligt de nauwkeurigheid van de absolute hoogtebepaling in de orde van 1 à 1,5 m en in het horizontale vlak in de orde van 1 à 2 m [2].

Iedere passage van een satelliet levert een interferogram op. Belangrijk is dat objecten bij iedere passage in dezelfde staat aanwezig zijn. Wanneer dit niet het geval is zal het object uit de data worden gefilterd. Voorbeelden zijn een geparkeerde auto welke niet iedere passage op dezelfde plaats staat, een boom waarvan de takken en bladeren door de wind veel bewegen maar ook een gebouw welke in de steigers wordt gezet. In figuur 5 is weergegeven hoe bij verschillende objecten de straling reflecteert.

Een satelliet heeft een bepaalde baan rond de aarde. Door de beweging van de satelliet ten opzichte van het roteren van de aarde kan een bepaald punt vanaf twee verschillende invalshoeken bekeken worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een klimmende en dalende baan.



**Figure 1** – Data for a point found on the World Port Centre in Rotterdam.



**Figure 2** – Radar interferometry interpretation.

# Actualiteit autonome bodemdaling

Datum: 14-09-2022  
© Copyright CROW  
info@kwastconsult.nl



Construeren met  
grond

# Wat is autonome bodemdaling en wordt dit meegenomen in de zettingsmodellen?

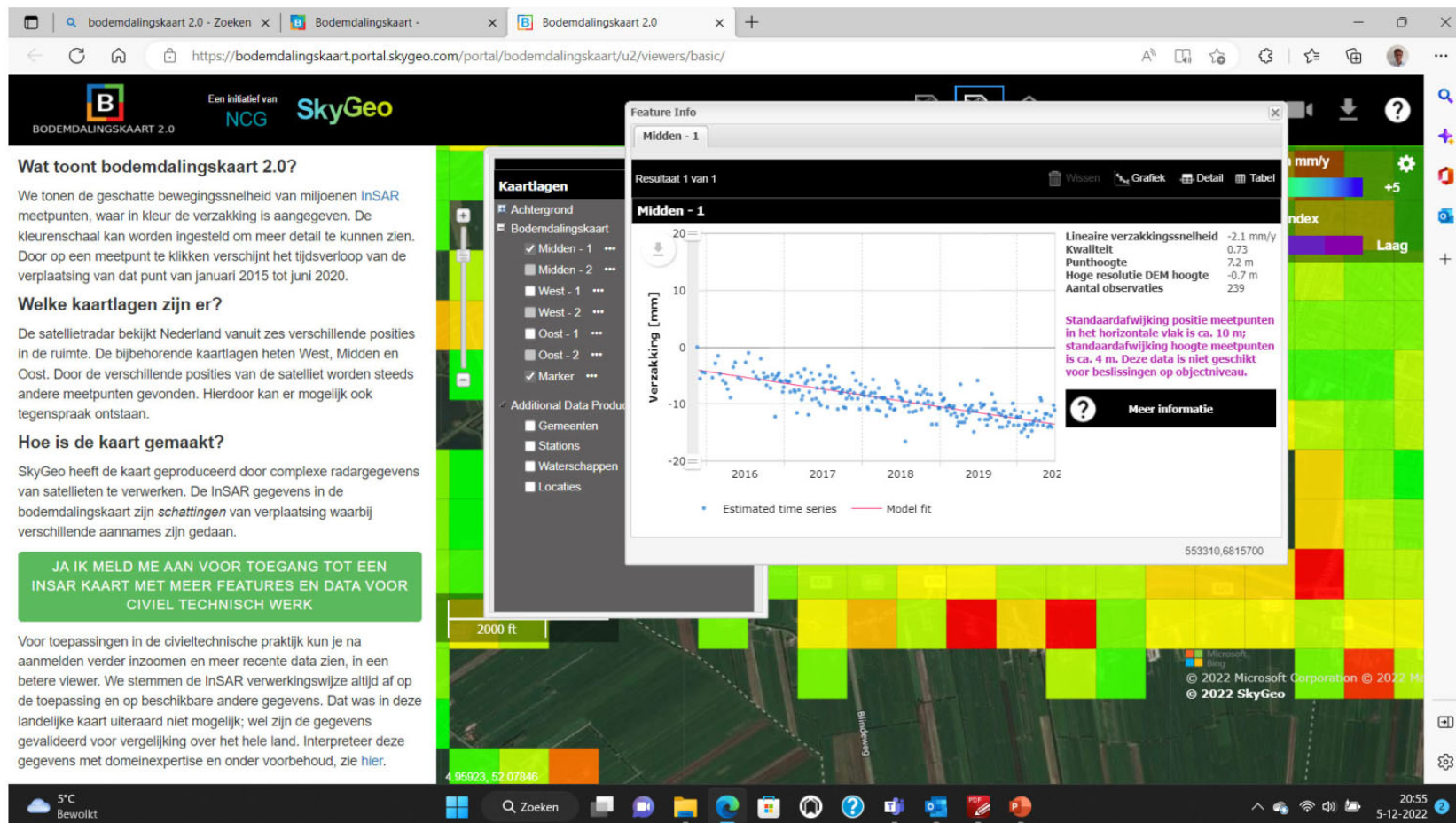
- Volgens CROW/CUR-rapport 162 (2022)

| Begrip                                               | Omschrijving                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Achtergrondzetting of Autonome zetting / bodemdaling | Zetting die plaatsvindt onder ongewijzigde omstandigheden bijvoorbeeld ten gevolge van oxidatie en inklinking in polders door eerdere polderpeilverlagingen, voortgaande zetting door vroegere ophogingen, gas- en zoutwinning en natuurlijke processen. |

Achtergrondzettingen zijn geen onderdeel van de modellen die voor zettingsberekeningen worden gebruikt en moeten daarom handmatig worden verdisconteerd. De ontwerper moet zich hiervan bewust zijn en project-specifiek beoordelen of de gevolgen van achtergrondzettingen relevant zijn of niet.

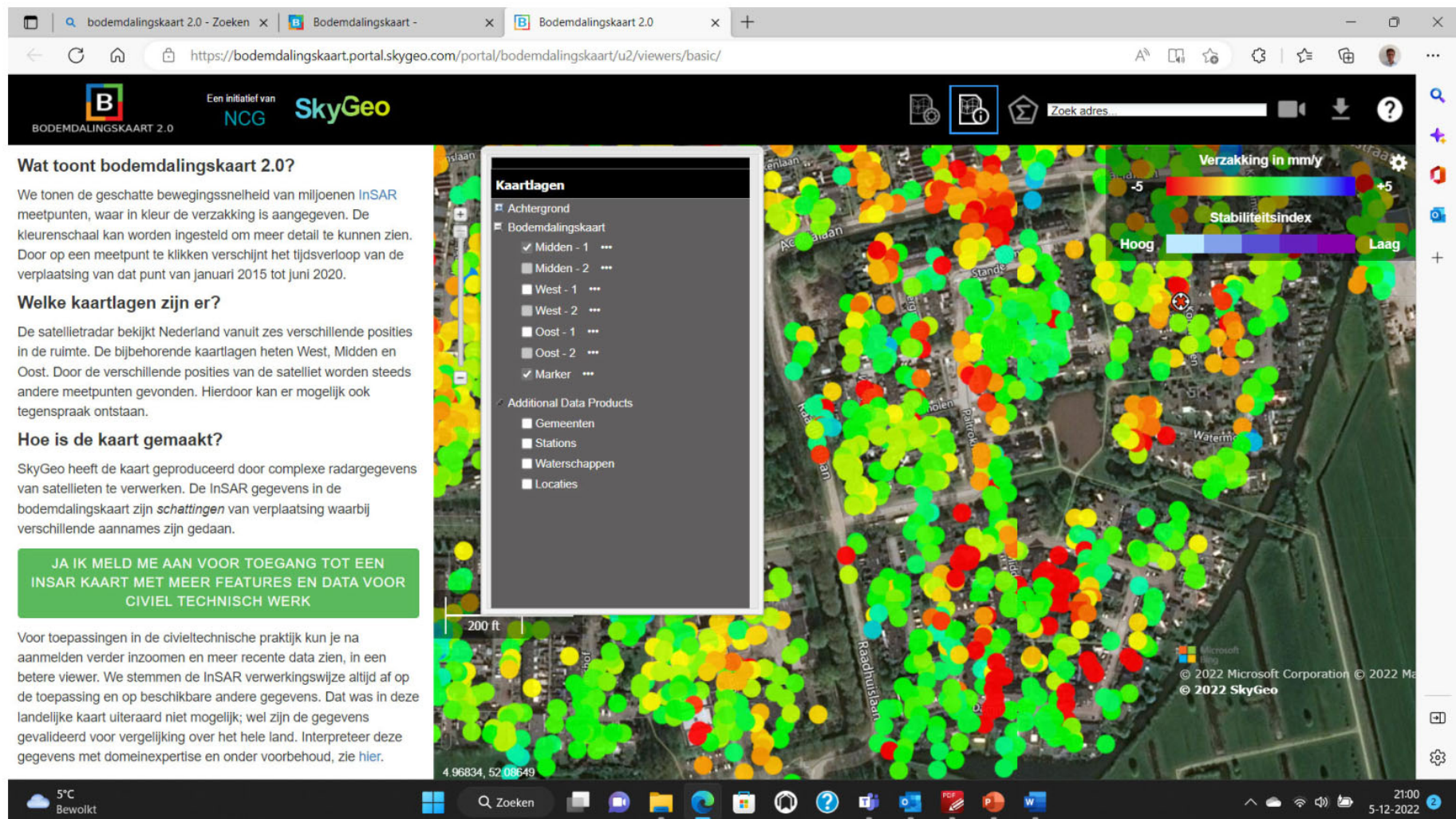
# Hoe kunnen we autonome bodemdaling bepalen en welke onzekerheden spelen hierbij?

- Indicatief met de Bodemdalingskaart 2.0 o.b.v. satellietgegevens InSAR (data 2016 - 2020)





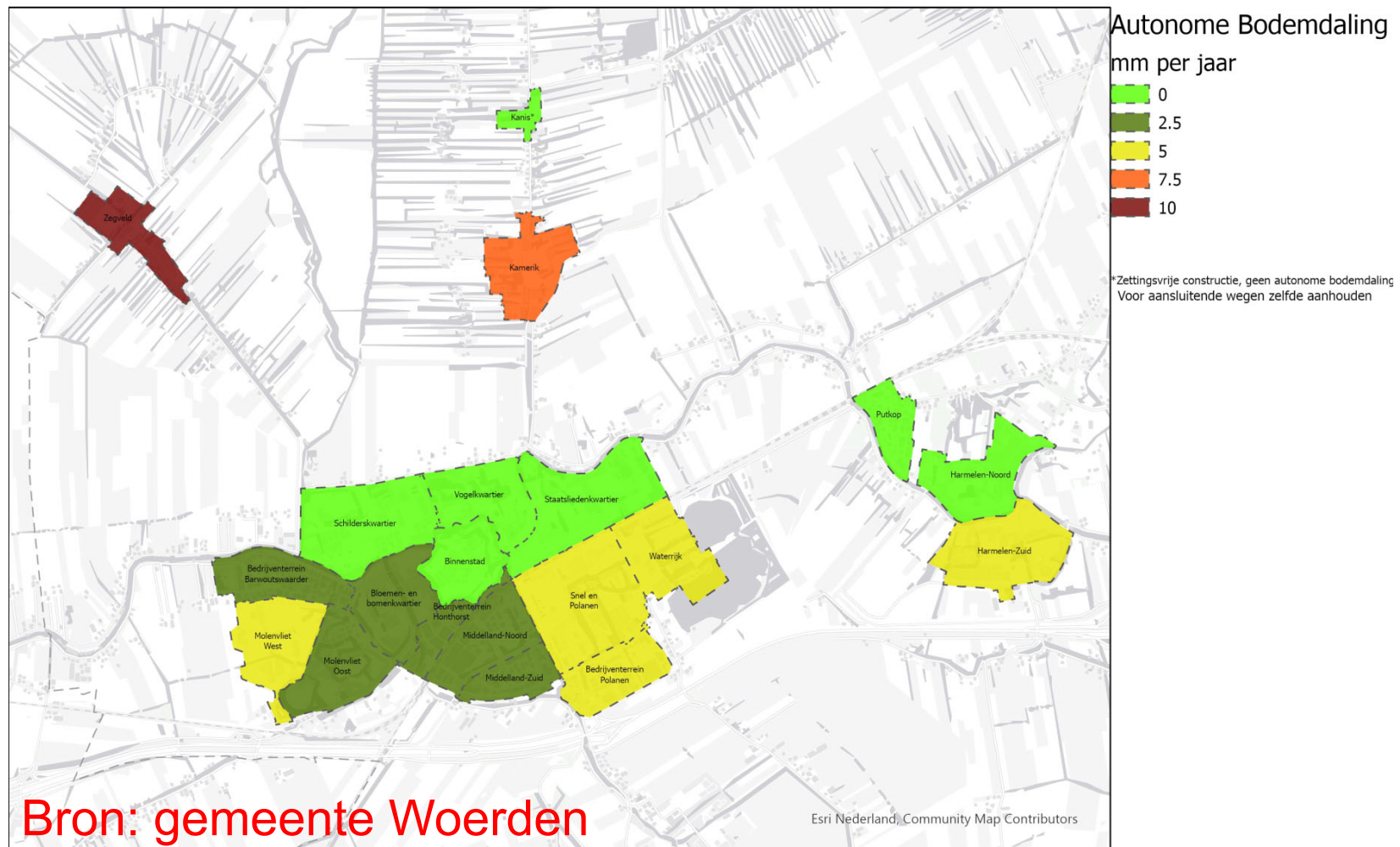
# Hoe kunnen we autonome bodemdaling bepalen en welke onzekerheden spelen hierbij?





# Hoe kunnen we autonome bodemdaling bepalen en welke onzekerheden spelen hierbij?

## Autonome bodemdalingskaart



Wat zijn realistische zettingseisen voor infrastructuur en hoe wordt autonome bodemdaling daarbij meegenomen?

- Voorbeeld “oude” restzettingseis gemeente Woerden voor reconstructies:

**Restzettingseis**

De restzettingseis bedraagt maximaal 0,05 m na 10 jaar en 0,10 m na 30 jaar, exclusief autonome bodemdaling.

# Wat zijn realistische zettingseisen voor infrastructuur en hoe wordt autonome bodemdaling daarbij meegenomen?

- Voorbeeld “nieuwe” restzettingseisen gemeente Woerden voor nieuwbouw:

4.2 Restzetting wegen, openbare ruimte en particuliere terreinen  
*De geprognoseerde restzetting na 60 jaar dient maximaal 0,30 m te bedragen, vanaf aanleg wegverharding en openbare ruimte en inclusief autonome bodemdaling. Voor de bepaling van de autonome bodemdaling dient gebruik gemaakt te worden van de Autonome bodemdalingskaart van de gemeente Woerden.*

- Voorbeeld “nieuwe” restzettingseisen gemeente Woerden voor reconstructies:

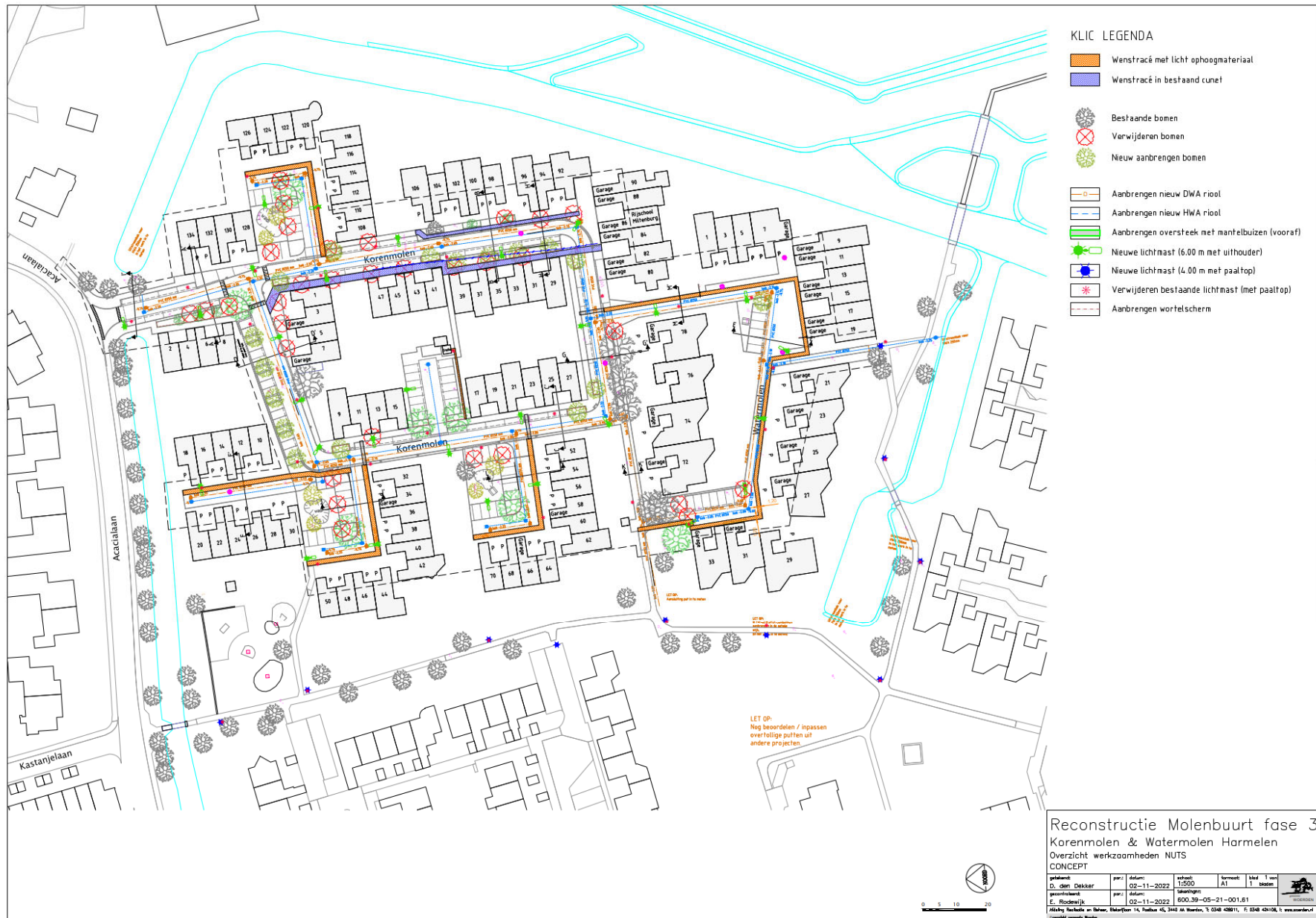
5.2 Restzetting wegen en openbare ruimte  
*De geprognoseerde restzetting na 40 jaar dient maximaal 0,40 m te bedragen, vanaf aanleg wegverharding/openbare ruimte en inclusief autonome bodemdaling. Voor de bepaling van de autonome bodemdaling dient gebruik gemaakt te worden van de Autonome bodemdalingskaart van de gemeente Woerden.*



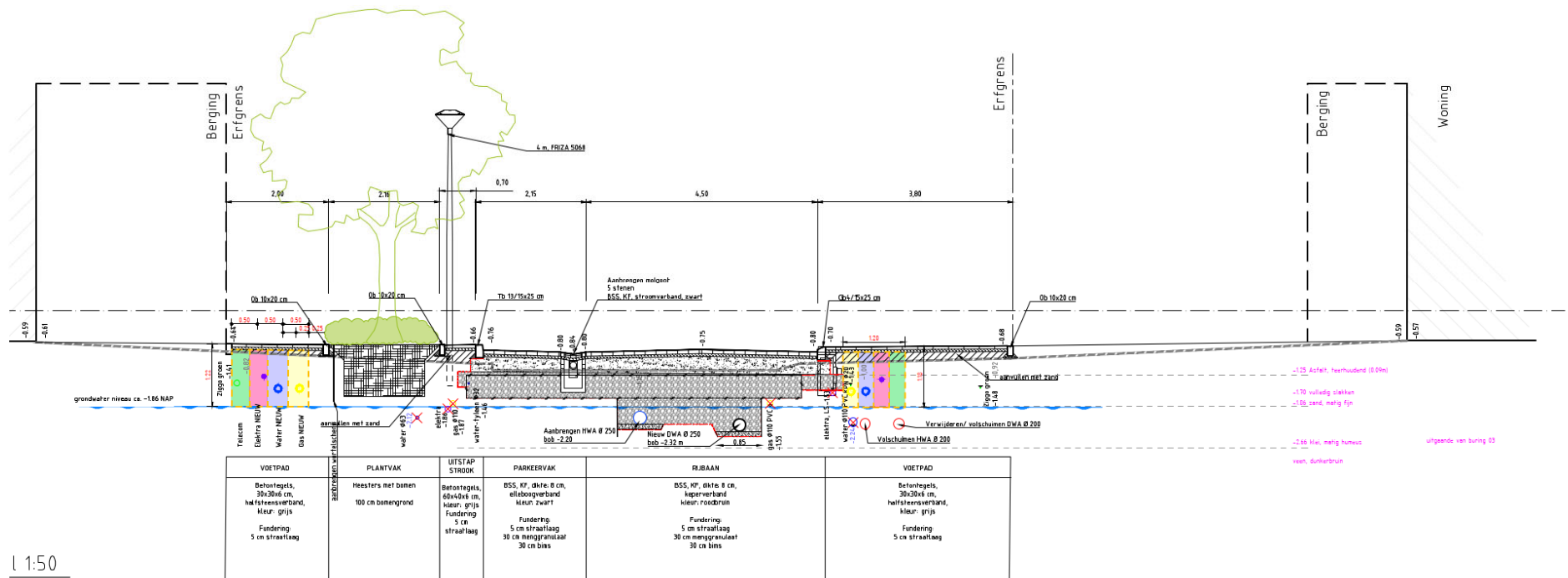
# Op welke wijze kan autonome bodemdaling in zettingsberekeningen worden meegenomen?

- Zettingsmodel: NEN-Bjerrum, abc isotachen methode in D-Settlement of Soft Soil Creep (SSC) in Plaxis
- Fitten van de kruipparameters aan de grootte van de autonome bodemdaling zonder belastingverhoging
- Met gefitte kruipparameters berekening van de zettingen ten gevolge belastingverhoging inclusief autonome bodemdaling

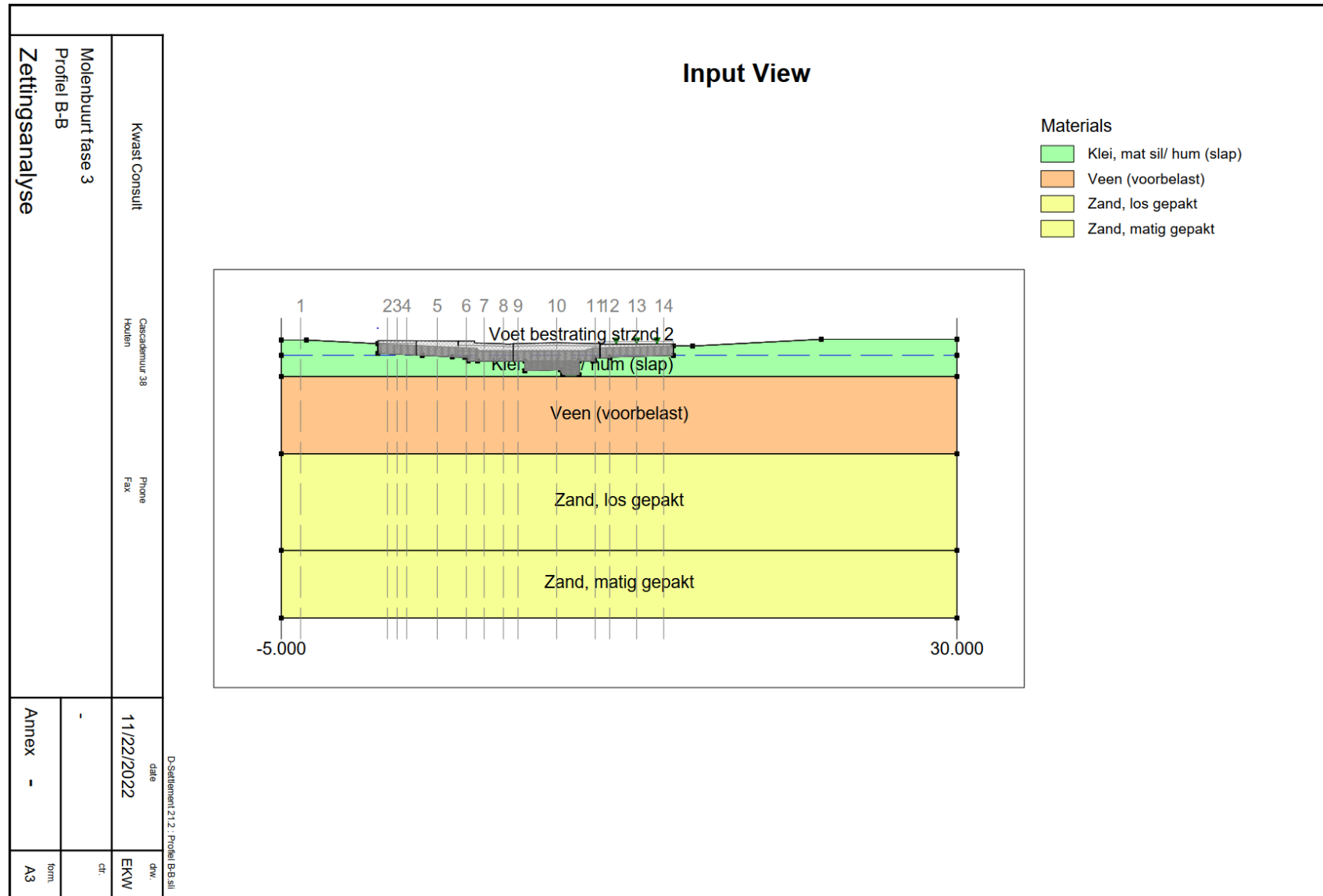
# Casus reconstructie Molenbuurt (fase 3) Harmelen



# Casus reconstructie Molenbuurt (fase 3) Harmelen

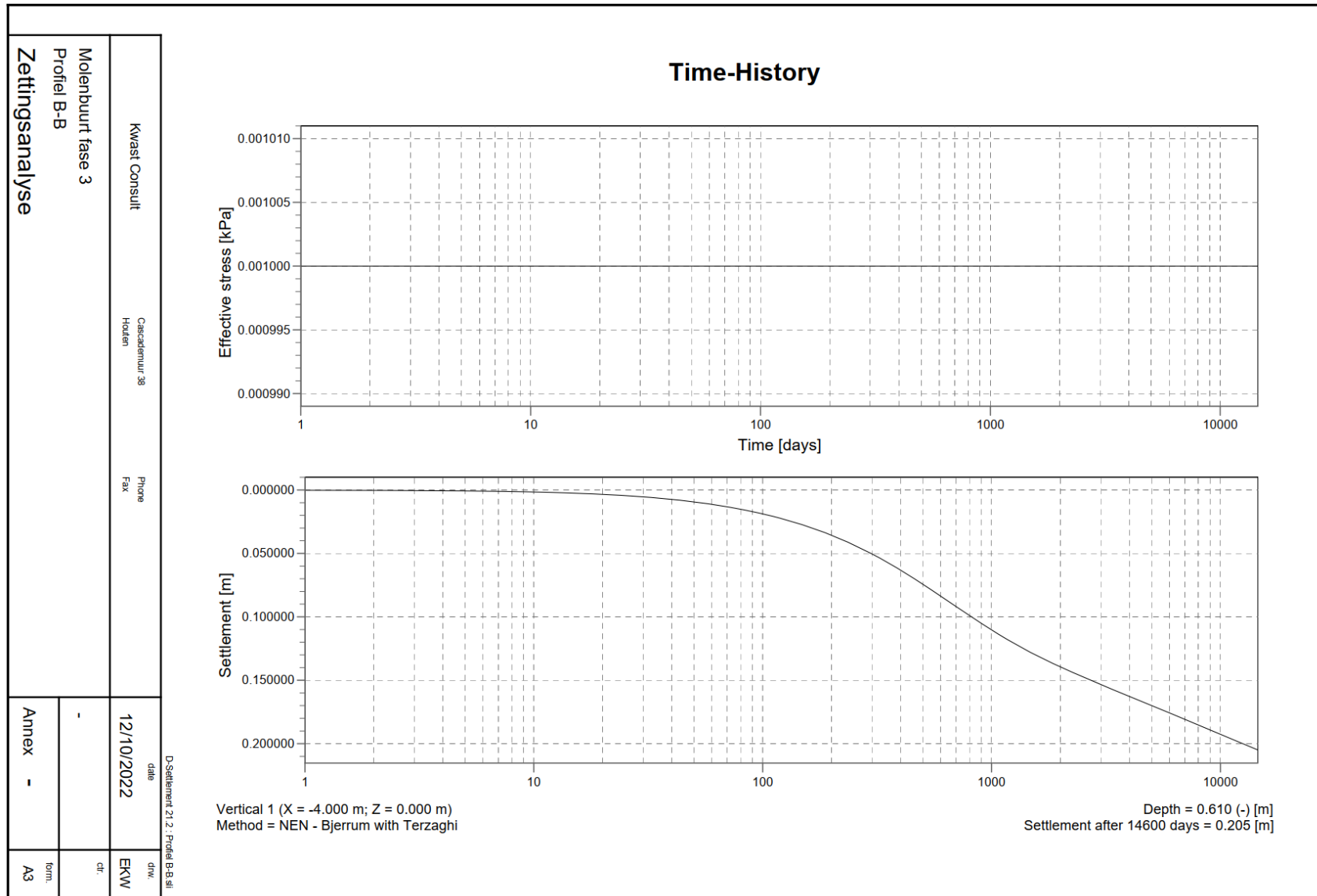


# Casus reconstructie Molenbuurt (fase 3) Harmelen

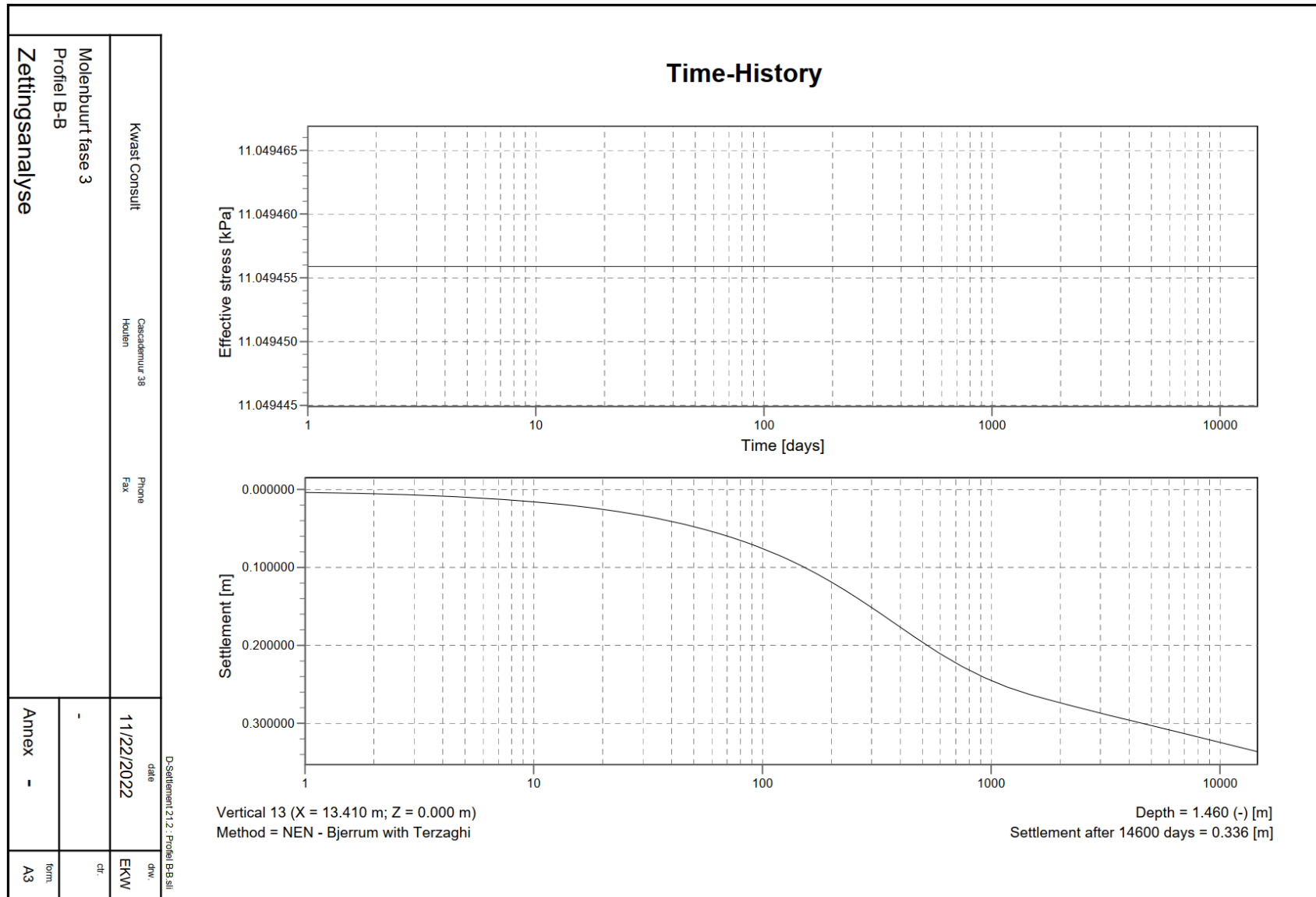




# Casus reconstructie Molenbuurt (fase 3) Harmelen



# Casus reconstructie Molenbuurt (fase 3) Harmelen



# Casus reconstructie Molenbuurt (fase 3) Harmelen

Voor de zettingsberekening inclusief autonome bodemdaling is de kruipparameter  $C_\alpha$  voor de klei- en veenlaag gefit ( $C_{\alpha;\text{initieel klei}} = 0,0092$  en  $C_{\alpha;\text{gefit klei}} = 0,0094$  tot  $0,0104$  en  $C_{\alpha;\text{initieel veen}} = 0,0153$  en  $C_{\alpha;\text{gefit veen}} = 0,0156$  tot  $0,0173$ ) aan de autonome bodemdaling van 5 mm/jaar (0,20 m na 40 jaar) voor de rekenverticaal voor de natuurlijke bodemopbouw zonder wegconstructie.

Tabel 3.5a: Resultaten zettingsberekeningen Bims-ophoging (toetsing restzetting), Profiel B-B'.

| Locatie    | Verticaal | Eindzetting na 40 jaar [m] | Zetting na 3 maanden [m] | Restzetting na 40 jaar [m] | Toetsing restzettingseis |
|------------|-----------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Parkeervak | 6         | 0,29                       | 0,05                     | 0,24 ( $\leq 0,40$ )       | Voldoet                  |
| Rijbaan    | 11        | 0,27                       | 0,05                     | 0,22 ( $\leq 0,40$ )       | Voldoet                  |
| Voetpad    | 13        | 0,34                       | 0,07                     | 0,27 ( $\leq 0,40$ )       | Voldoet                  |

## Vragen en discussie

