

# MONITORING ALS WAAKHOND IN WAASLANDTUNNEL

## IMPACT RENOVATIE KAAIMUREN MINUTIEUS IN KAART GEBRACHT

De historische Scheldekaaien in Antwerpen vertonen al langer stabiliteitsproblemen. Om calamiteiten te voorkomen, worden sinds 2014 ingrijpende renovatie- en vernieuwingswerken aan de kaaimuren uitgevoerd. De stabilisering ervan boven de Waaslandtunnel was een bijzonder precaire fase in dit masterplan. Daarom werd met een intensieve monitoring-campagne nagegaan of deze werken geen nefaste invloed op deze infrastructuur zouden hebben.



Belastingsproef ter verificatie van de stabiliteit van de kaaimuur met behulp van betonpuin.

De kaaimuren langs de Schelde in Antwerpen zijn nooit een toonbeeld van geslaagde infrastructuur geweest. Vrij snel na hun bouw (eind 19de eeuw) ontstonden er stabiliteitsproblemen die nooit volledig konden worden verholpen. “De grote boosdoener is de ondergrond van Boomse klei die overgeconsolideerd is”, aldus Koen Segher, projectingenieur bij de Vlaamse Waterweg. “Van zodra deze grondlaag ruimte krijgt of wordt ontlast, heeft ze steeds de neiging om uit te zetten. Daarnaast is er te weinig rekening gehouden met de grondwaterstand. Hierdoor zijn de kaaimuren onvoldoende voorzien op de wisselende waterstanden ten gevolge van de getijden. Bovendien zorgen de klimaatwijziging en de verdieping van de Schelde ervoor dat het verschil tussen hoog- en laagtij alsmaar groter wordt. Om een duurzame bescherming op lange termijn te bieden, moeten de kaaimuren gestabiliseerd en gedeeltelijk vernieuwd en/of verhoogd worden. Dit project werd in een masterplan gegoten. Het onderdeel kaaimuurstabilisatie is intussen voor meer dan de helft uitgevoerd.”

### Oplossing gezocht en gevonden...

Maar liefst zeven kilometer Scheldeoever moest onder handen worden genomen. Het traject werd opgedeeld in verschillende zones met elk hun eigen uitdagingen. Voor elke sectie was een onderzoek naar de meest geschikte stabilisatiemethode vereist. Wim Salens, projectingenieur bij studiebureau SBE: "Volgens onze berekeningen was het ontlasten van de bestaande kaaimuren in de meeste gevallen de beste oplossing. Aan de landzijde voorzagen we een nieuwe diepwand die met groutankers is verankerd. De ruimte tussen de kaaimuur en de diepwand werd uitgegraven tot aan de laagwaterlijn van de Schelde en overdekt met een dakplaat. Door vervolgens in de oude kaaimuur gaten te boren, kan het water tijdens de getijden deze holle ruimte in- en uitstromen. Het is een oplossing die de waterdruk op de oude kaaimuur neutraliseert, wat zich logischerwijze vertaalt in een positief effect op de stabiliteit. Daarnaast werd aan de teen van de oude kaaimuur ook een steunberm van breuksteen geplaatst."

### ... met uitzondering van stuk boven tunnel

Deze oplossing bleek bijzonder interessant en waardevol te zijn, weliswaar met uitzondering van de zone tussen het Loodswezen en het Steenplein waaronder zich de Waaslandtunnel bevindt. "De schuine groutankers introduceren een grote verticale kracht in de diepwand die op haar beurt aanleiding zou geven tot een grote verticale belasting op het dak van de tunnel", verduidelijkt Wim Salens. "Daarom stelden we voor om daar lokaal met een horizontale verankering van de diepwand te werken, via legankers verbonden met diepwandbaretten. Zo viel

de verticale kracht in de diepwand weg. Het Agentschap voor Wegen en Verkeer eiste echter bewijzen dat ook deze oplossing geen schadelijke krachten op de tunnel zou uitoefenen. Een intensieve monitoring lag voor de hand, en dit zowel voor en tijdens als na de werken."

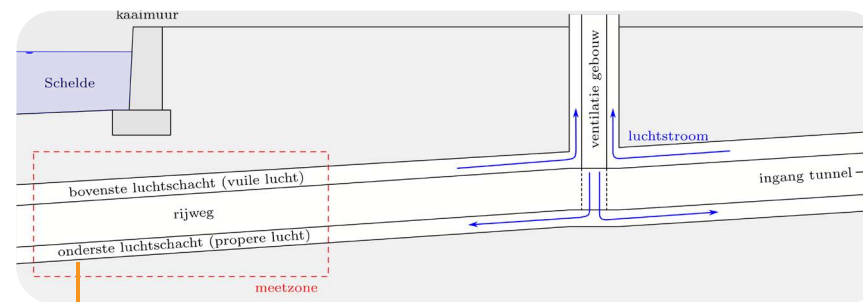
### Totaalpakket van monitoring

SBE besloot zelf een plan van aanpak op het vlak van monitoring uit te werken. "Dit was geen evidente opdracht omdat het gedrag van een tunnel zich moeilijk laat definiëren", legt Wim Salens uit. "Er zijn immers veel factoren die voor krachten en vervormingen kunnen zorgen. Uiteindelijk hebben we ons op meerdere studies en een analyse van de Liefkenshoekspoorwegtunnel gebaseerd om een monitoringpakket samen te stellen. Om een totaalbeeld van het gedrag te verkrijgen, opteerden we voor een cocktail van rekstrookjes en trillings-, afstands- en temperatuurmetingen. Sowieso wilden we de invloed van temperatuur, de getijden, het verkeer in de tunnel, en de werken aan de kaaimuur gedetailleerd in kaart brengen. De monitoring moest zich toespitsen op de versterkte zone van de tunnel, waar trekstaven in

het dak boven de rijweg instaan voor het opnemen van extra belastingen afkomstig van de bovenliggende kaaimuur."

### Plan vertaald naar praktijk

Het eisenpakket werd in een offertevraag gegoten die uiteindelijk aan de afdeling Bouwmechanica (departement Burgerlijke Bouwkunde) van de KU Leuven werd toegekend. "Wij gingen aan de slag met de aanzet die SBE had gegeven", vertelt Kristof Maes, postdoctoraal onderzoeker aan de afdeling Bouwmechanica van de KU Leuven. "Het was onze taak om de juiste apparatuur te kiezen om zodoende een nauwkeurige monitoring mogelijk te maken. Voor de rekmetingen op het beton en de trekstaven werden klassieke resistieve rekstrookjes gebruikt. De ovalisatie van de tunnel werd opgemeten met behulp van nauwkeurige lasergebaseerde afstandsmeters. De temperatuur van het beton en de lucht werd met behulp van thermokoppels in kaart gebracht. Ten slotte kregen we een beeld van de trillingen van de dakplaat boven de rijweg met behulp van versnellingsopnemers. Om een verstoring van het verkeer bij het installeren van de sensoren te vermijden, besloten we ze te plaatsen in de luchtschachten die voor de toevoer van propere lucht en de afvoer van vuile lucht zorgen. Deze bevinden zich immers respectievelijk onder het wegdek en boven het



Tunnelprofiel met aanduiding van de meetzone.

ren van de sensoren te vermijden, besloten we ze te plaatsen in de luchtschachten die voor de toevoer van propere lucht en de afvoer van vuile lucht zorgen. Deze bevinden zich immers respectievelijk onder het wegdek en boven het

dak van de tunnelkoker. De uitleesunit installeerden we in het verluchtingsgebouw op de rechteroever van de Schelde, zodanig dat deze te allen tijde voor eventuele interventies bereikbaar was.”

### Zelflerende systeemidentificatie

Een jaar voor de start van de werken werd met de monitoring een aanvang genomen. Dit betekende meteen ook de start van een enorme data-acquisitie. Alle verzamelde gegevens werden door KU Leuven gebruikt om een model te ontwikkelen dat het gedrag van de tunnel in normaal regime kan voorspellen (dus wanneer er geen werken plaatsvinden). Hiertoe werd gebruikgemaakt van zogenaamde *machine learning*-technieken. “Eenvoudig gesteld, vergelijkt deze applicatie de nieuwe meetgegevens constant met deze die voorheen werden verzameld”, legt professor Stijn François van de afdeling Bouwmechanica aan de KU Leuven uit. “De software legt daarbij verbanden tussen de verschillende meetgegevens. Zoals dat klassiek het geval is, worden bij het overschrijden van bepaalde drempelwaarden van vervormingen of verplaatsingen alarmen gegenereerd. Daarbovenop kan echter ook erg nauwkeurig worden nagegaan of de tunnel zich al dan niet anders gedraagt onder invloed van een gewijzigd belastingspatroon of ten gevolge van een eventueel structureel probleem. In deze case gaven bijkomende modelsimulaties een gedetailleerd inzicht in het gedrag van de tunnel. Zo leerden we bijvoorbeeld dat thermische inertie een belangrijke rol speelt, naast de temperatuur in het algemeen en de getijdenwerking.

### Belastingsproef kaaimuur

Uiteindelijk werd beslist om in de zone boven de Waaslandtunnel geen stabilisatie van de kaaimuur toe te passen. “Door lokale omstandigheden bleek het niet mogelijk te zijn om de voorziene verankering te plaatsen”, verduidelijkt Wim Salens. “Als alternatief werd op de kaaimuur een belastingsproef uitgevoerd om na te gaan of deze onder de gegeven ontwerpbelasting stabiel was. Gedurende een periode van twee weken werd stapsgewijs een belasting van drie ton per vierkante meter aangebracht. Hierbij volgden we de bewegingen van de kaaimuur op door middel van inclinometers en topografische metingen.” Kristof Maes vervolgt: “Tegelijkertijd controleerde KU Leuven nauwgezet de impact op de tunnel. Het was heel interessant om te zien hoe de invloed van de belastingsproef zo gedetailleerd in kaart kon worden gebracht. De monitoring bleek bijgevolg een bijzonder accurate ‘waakhond’ te zijn. Dankzij de alarmering zouden potentiële problemen met overbelasting meteen kunnen worden gedetecteerd. Uiteindelijk werden geen zorgwekkende overschrijdingen vastgesteld. Toch was deze aanpak geen overbodige luxe aangezien de Waaslandtunnel de hele tijd openbleef voor het verkeer.”

### Win-win voor alle partijen

Twee maanden na de werken werden de sensoren verwijderd. “Natuurlijk zou het vanuit onderzoekstandpunt interessant zijn om het gedrag van de tunnel blijvend in kaart te brengen”, legt Stijn François uit. “Voor de Vlaamse Waterweg – die de monitoring financierde – zou dat echter weinig toegevoegde waarde met zich



Laser-gebaseerde afstandsmeter gebruikt voor het opmeten van de ovalisatie van de tunneldoorsnede.

meebrengen. Bovendien was het monitoringprogramma opgesteld om voor de duur van de werken mee te gaan. Bij een meting gedurende de volledige levensduur van de constructie zouden we wellicht voor andere sensoren en bevestigingen hebben geopteerd.” Wim Salens vervolgt: “Het was een project dat voor elke betrokken partij interessant was. Voor ons bleek monitoring in deze case een bijzonder betrouwbaar middel voor het bewaken van moeilijk te modelleren kritieke infrastructuur.” Koen Segher: “Ook voor de Vlaamse Waterweg was het een erg positieve ervaring. We zijn onder de indruk van deze meetcampagne en de achterliggende analysetechnieken. Het is duidelijk dat zo’n oplossing toelaat om alles erg nauwkeurig op te volgen en de minste afwijkingen van het normale gedrag te detecteren. Daarom is de kans reëel dat we dergelijke technieken ook voor andere projecten zullen inschakelen.”

Lees meer: Maes, K., Salens, W., Feremans, G., Segher, K., Francois, S. (2021). Anomaly detection in long-term tunnel deformation monitoring. *ENGINEERING STRUCTURES*, 250, Art.No. ARTN 113383. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113383>

### Partners

#### Opdrachtgever:

De Vlaamse Waterweg

#### Studiebureau:

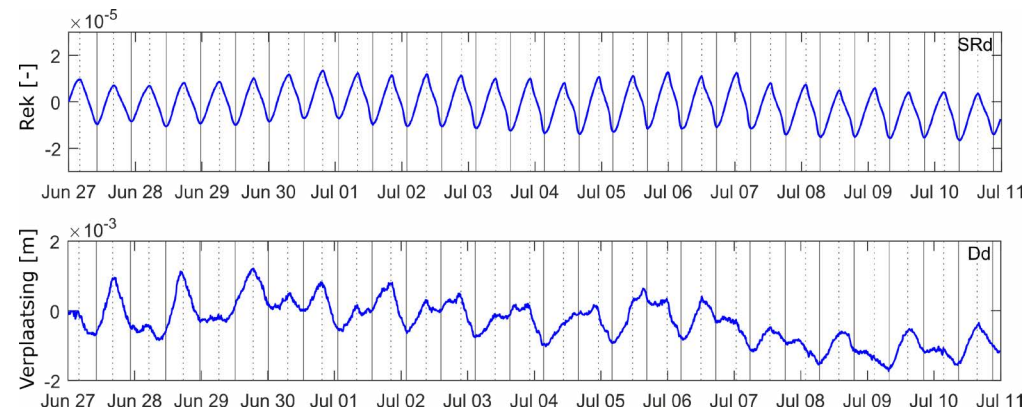
SBE

#### Monitoring:

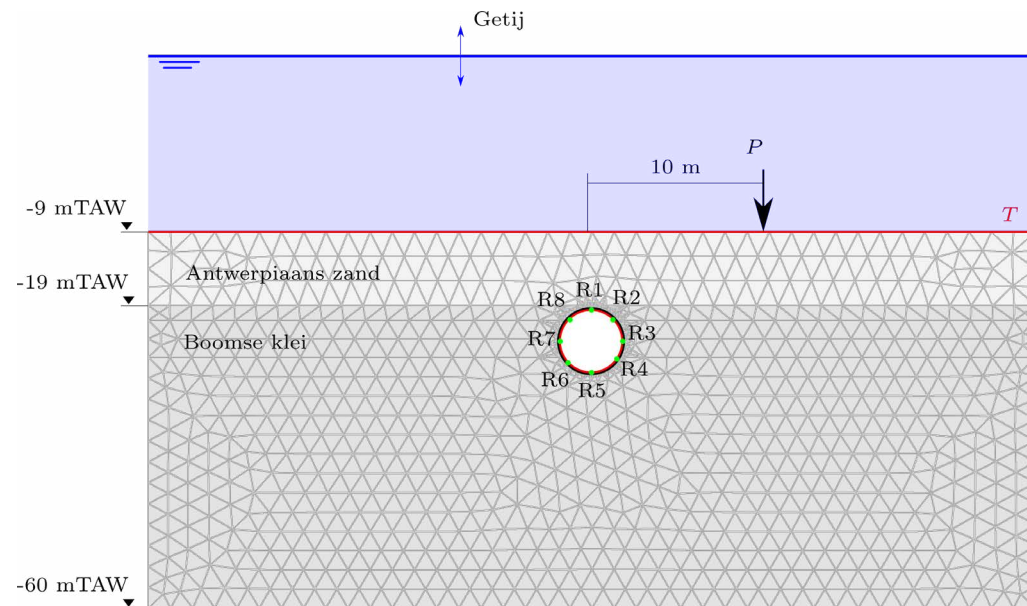
KU Leuven

### Te onthouden:

- Een uitdagende zone bij de renovatie van de Scheldekaaien in Antwerpen was de kruising met de Waaslandtunnel.
- Om een eventuele negatieve impact van de werken op de onderliggende tunnel vroegtijdig te detecteren, werd deze vanaf een jaar voor de werken grondig gemonitord.
- De combinatie van de metingen en machine learning-technieken liet toe om op erg nauwkeurige wijze anomalieën in het vervormingsgedrag van de tunnel te detecteren.
- Dankzij de monitoring konden de werken worden uitgevoerd terwijl de Waaslandtunnel in alle veiligheid voor het verkeer openbleef.



Variatie van de rek in de trekstaven (boven) en ovalisatie van de tunnel (onder) ten gevolge van getij- en temperatuurschommelingen.



Numeriek model opgesteld door KU Leuven voor het verkrijgen van bijkomend inzicht in het vervormingsgedrag van de tunnel.