

Schade Oostbuis Westerscheldetunnel

Resultaten van het onderzoek naar de veiligheid en de
(mogelijk) oorzaak - Publieke versie
N.V. Westerscheldetunnel

27-november 2023 - Public

The logo for VSVK, featuring a stylized orange and white arrow pointing right, followed by the letters "VSVK" in a bold, black, sans-serif font. The logo is mounted on a yellow metal structure.

VSVK

Contactpersoon

EVERT SONKE
Technical Director

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 4205
3006 AE Rotterdam
Nederland

Inhoudsopgave

1	Samenvatting	5
2	Inleiding	7
2.1	Achtergrond	7
2.2	Inhoud	8
2.3	Organisatie	8
2.4	Tijdslijn van het proces	8
3	Onderzoeksaanpak	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Aanpak	9
3.2.1	Schadebeeld	9
3.2.2	As-built informatie	9
3.2.3	Tunnelscans	10
3.2.4	Monitoring	10
3.2.5	Geotechnisch onderzoek	11
3.2.6	Constructieve beschouwingen	11
4	Resultaten	12
4.1	Globaal schadebeeld	12
4.2	As-built informatie	13
4.3	Tunnel scans	14
4.4	Monitoring	15
4.5	Geotechnisch onderzoek	16
4.6	Constructieve beschouwing	17
4.6.1	Aanpak	17
4.6.2	Oorzaak analyse	17
4.6.3	Kanttekening	18
4.6.4	Veiligheid	19
4.7	Herstel	19

5	Conclusies	20
5.1	Veiligheid	20
5.2	Oorzaak	20
5.3	Herstel	20
	Colofon	21

1 Samenvatting

Tijdens een onderhoudsafsluiting van de Oostbuis is eind 2022 een lekkage waargenomen. Het gaat om het laatste gedeelte van de Oostbuis vanuit Terneuzen richting Borssele nabij Ellewoutsdijk. Wat eerder een normale lekkage leek, bleek bij nadere inspectie om een scheur in enkele betonnen segmenten te gaan. In één segment van ring 3297 bleek zelfs sprake van een breuk waarbij later via endoscopie visueel is vastgesteld dat de wapening (deels) is gebroken. In juni 2023 is door de N.V. Westerscheldetunnel opdracht gegeven aan Arcadis Nederland BV (hierna Arcadis) om de stabiliteit van de constructie te beoordelen, de mogelijke oorzaak van de schade te onderzoeken en te adviseren over de te nemen maatregelen.

Er zijn door Arcadis diverse onderzoeken uitgevoerd om de situatie en de mogelijke oorzaak (beter) in kaart te brengen. Tijdens het onderzoek zijn onder andere (visuele) inspecties, aanvullend grondonderzoek, een beoordeling van as-buit informatie, data-analyse en constructieve en geotechnische analyses uitgevoerd.

De uitkomsten van het onderzoek bevestigen dat er sprake is van een situatie waarin geen direct gevaar bestaat voor de weggebruiker. Monitoring door middel van scheurwijdtemeters en vervormingsmetingen van enkele tunnelringen laat zien dat er sprake is van zeer geringe bewegingen en vervormingen van de tunnelringen. Dit primair onder invloed van het getij op de Westerschelde en de temperatuur in de tunnel. De monitoring van de schade en data-analyse leidt echter ook tot de conclusie dat er sprake is van een doorgaand proces in ring 3297 wat een licht toenemende scheurwijdte veroorzaakt.

Berekeningen tonen aan dat de tunnelconstructie herverdelingscapaciteit beschikbaar heeft, waardoor er op de korte termijn geen gevaar voor de stabiliteit van de tunnelringen is.

Ten aanzien van de mogelijke oorzaak van de schade wordt geconcludeerd dat er geen sprake is van één enkele duidelijke oorzaak. Het meest waarschijnlijk scenario is dat een samenstel van omstandigheden aanleiding tot de schade heeft gegeven met daarin een aantal belangrijke aspecten:

1. Zetting door kruip¹ van samendrukbare lagen tussen en naast de twee tunnelbuizen geven toenemende belastingen;

Tijdens de bouw van de Westerscheldetunnel is vermoedelijk eerst een gedeeltelijke grondverbetering uitgevoerd. Vervolgens is een ophoging uitgevoerd om de aankomst van de tunnelboormachine mogelijk te maken en de stabiliteit van de tunnelbuizen te waarborgen. Uitgevoerde geotechnisch analyses laten zien dat het mogelijk is dat hierdoor een langzame toename van belasting op de tunnelbuizen is ontstaan. Die belasting versterkt de toename van ovalisatie en snedekrachten in de tunnelkruin.

2. De interactie tussen de ringen is in wekelijkheid stijver dan in het ontwerp aangenomen.

De toepassing van triplexplaatjes tijdens de bouw als vulmateriaal tussen de tunnelringen creëert een stijver ring gedrag wat tot verhoogde snedekrachten² leidt. In combinatie met de relatief ondiepe ligging nabij de toerit constructie in Ellewoutsdijk en de daardoor relatief lage momentcapaciteit van de segmenten treedt bij de toegenomen snedekrachten een overschrijding van het scheurmoment op. De toepassing van permanente gekromde bouten in de schadegone versterkt dit effect

3. De aan de binnenzijde van de tunnelsegmenten aanwezige (en door de breuksnede doorlopende) wapening in ringrichting is (lokaal) niet voldoende gebleken om de opgetreden snedekrachten bij scheurvorming over te nemen en te beheersen.

Kort nadat door lokaal hoge momenten een scheur ontstond, is de wapening gaan vloeien en heeft de breuk in ring 3297 zich geopend. Dit gedrag hangt mede samen met de vastgestelde doorontwikkelde betonsterkte (C70/85) van de segmenten, die ruim boven de ontwerpsterkte ligt (C45/55) en het feit dat de toch al minimale wapening ter plaatse van de boutpockets is onderbroken.

¹ Voortgaande vervorming onder invloed van gelijkblijvende belastingen

² De optredende krachten in de constructie

Geconcludeerd wordt dat op termijn herstelmaatregelen in de Oostbuis moeten worden doorgevoerd om de voortgaande schade ontwikkeling te stoppen en de veiligheid en levensduur van de tunnel blijvend te waarborgen.

Op grond van inspecties in opdracht van de N.V. Westerscheldetunnel is nergens op andere locaties in de tunnel vergelijkbare schade waargenomen. Om deze reden zijn dan ook geen maatregelen noodzakelijk buiten de vastgestelde schadezone.

De onderzoeksresultaten geven de meest aannemelijke verklaring voor het ontstaan van scheurvorming in het schadegebied. De conclusies zijn gebaseerd op waarnemingen, metingen en op geotechnische en constructieve berekeningen.

Opgemerkt wordt, dat dit een mogelijke verklaring is. Het geheel aan gemeten en berekende gegevens is onvoldoende eenduidig om met zekerheid te kunnen stellen dat dit enig juiste verklaring is

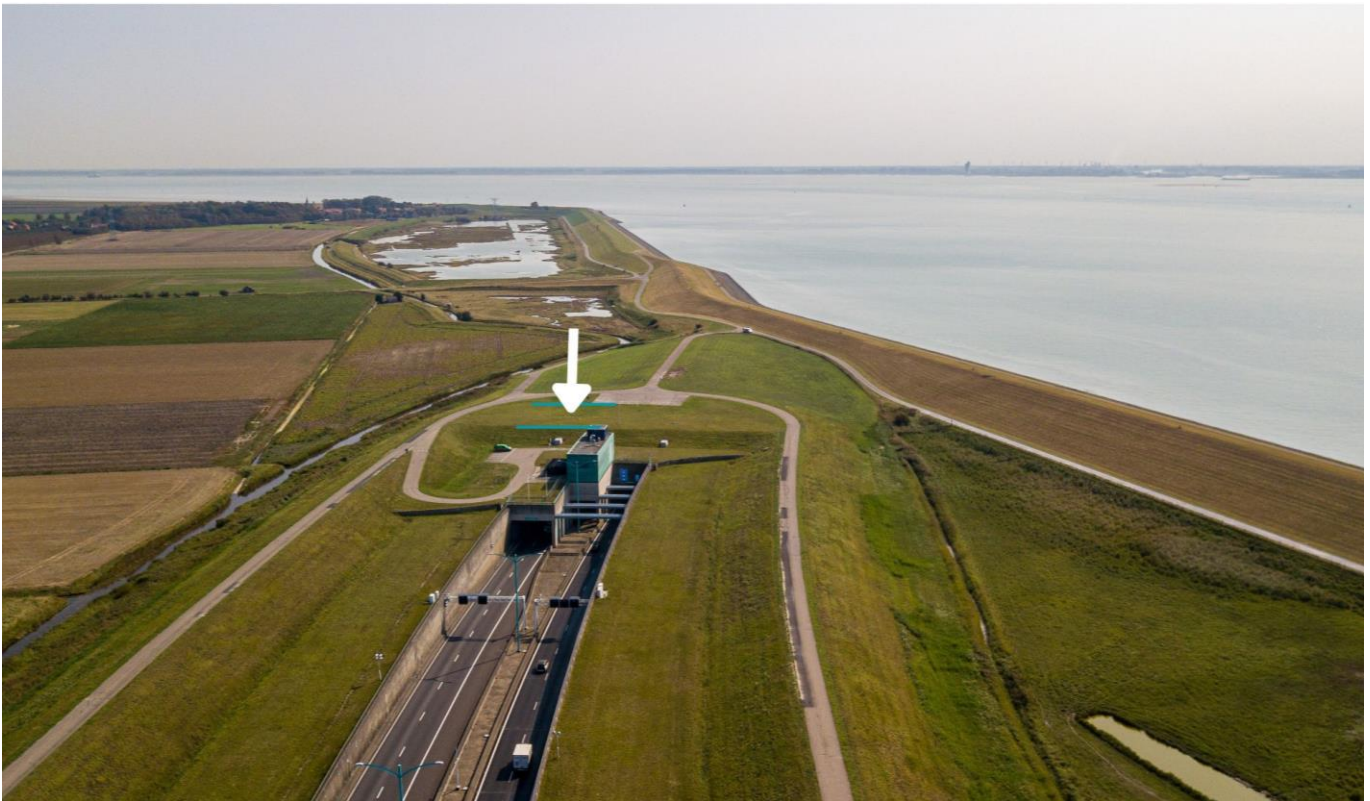
2 Inleiding

2.1 Achtergrond

Tijdens een reguliere onderhoudsafsluiting van de Oostbuis is eind 2022 een lekkage waargenomen. Het gaat om het laatste gedeelte van de Oostbuis vanuit Terneuzen richting Borssele nabij Ellewoutsdijk (Figuur 1). Wat eerder een normale lekkage leek, bleek bij nadere inspectie om scheurvorming in enkele betonnen segmenten te gaan. In één segment bleek zelfs sprake van een breuk waarbij via endoscopie visueel is vastgesteld dat de wapening (deels) is gebroken.

Door een groep van door de N.V. Westerscheldetunnel samengestelde deskundigen is volgend op deze constatering een eerste beoordeling gegeven van de situatie en de effecten op de veiligheid voor de weggebruiker. Geoordeeld is dat sprake is van een stabiele en niet acute situatie. Monitoring van de situatie, nader onderzoek naar de schadeoorzaak en het uitwerken en zo nodig uitvoeren van een herstelmaatregel is echter wel noodzakelijk.

In juni van 2023 is door de N.V. Westerscheldetunnel opdracht gegeven aan Arcadis om de veiligheid van de constructie te beoordelen, de mogelijke oorzaak van de schade te onderzoeken en te adviseren over de te nemen maatregelen.



Figuur 1 Indicatieve locatie van het waargenomen schadegebied nabij toerit Noord (Ellewoutsdijk).

2.2 Inhoud

De onderzoeken en resultaten zijn door Arcadis uitgebreid gerapporteerd aan de N.V. Westerscheldetunnel. Dit rapport is een samenvatting van het totale onderzoek naar de veiligheidsbeoordeling van de constructie en de conclusies met betrekking tot de mogelijke oorzaak.

Het rapport gaat eerst in op de aanpak (hoofdstuk 3) die is gevolgd bij het onderzoek van de ontstane schade en de beoordeling van de veiligheid voor de weggebruiker. Hoofdstuk 4 gaat op hoofdlijnen in op de verschillende bevindingen waarin uiteindelijk hoofdstuk 5 de samenvattende conclusies weergeeft.

2.3 Organisatie

Het onderzoek is uitgevoerd door deskundigen van Arcadis waarbij in een technische werkgroep naast medewerkers van Arcadis, ook specifieke kennis vanuit Wayss & Freytag (Duitsland), Nebest en het technische beheer van de N.V. Westerscheldetunnel betrokken zijn.

Voor specifieke werkzaamheden met betrekking tot monitoring en nader (materiaal) onderzoek hebben de firma's SWECO, FUGRO en SGS-Intron in opdracht van Arcadis hun bijdrage geleverd aan de onderzoeken.

Voor de waarborging van de technische kwaliteit van het onderzoek en de daaruit af te leiden conclusies is een Review Board ingesteld. Voorstellen tot aanpak van het onderzoek, voorlopige resultaten en de conclusies zijn door de Review Board beoordeeld. De Review Board kent de volgende leden:

- Prof.dr.ir. M.A.N. (Max) Hendriks – Leerstoel Concrete Structures - Technische Universiteit Delft
- Dr.ir. W. (Wout) Broere – Leerstoel Underground Space Technology - Technische Universiteit Delft
- Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes – Leerstoel Tunneling and Construction Management – Ruhr-Universiteit Bochum (D)

2.4 Tijdlijn van het proces

Op 18 oktober 2022 wordt tijdens een reguliere afsluiting een lekkage gevonden waarvan wordt gepland deze in de volgende onderhoudsnacht te repareren.

Tijdens de volgende onderhoudsnacht op 20 december 2022 wordt de scheur in ring 3297 gevonden en in een opeenvolgend risicoanalyse bepaald dat er geen acute acties noodzakelijk zijn maar verder onderzoek nodig is. Op 7 februari 2023 wordt aanvullend onderzoek uitgevoerd en wordt de breuk in ring 3297 blootgelegd door het verwijderen van hittewerende bekleding. De N.V. Westerscheldetunnel oordeelt opnieuw dat er geen acute acties noodzakelijk zijn.

De N.V. Westerscheldetunnel besluit een expertteam met deskundige samen te stellen die op 18 april 2023 voor het eerst bijeenkomt. Op basis van de gegeven informatie stelt dit expertteam dat niet sprake lijkt van een acute maar wel zorgelijke situatie. Het expertteam begint informatie door te nemen en er wordt besloten tot de installatie van scheurwijdtemeters die 27 juni dan ook worden geplaatst. Arcadis wordt aangesteld om de projectleiding voor de onderzoeken op zich te nemen en studie te verrichten naar de veiligheid en mogelijke oorzaak als voorbereiding op herstel.

Op 5 september 2023 wordt aanvullende monitoring geïnstalleerd om de vervorming van de ringen beter te kunnen opvolgen.

In parallel aan de metingen werkt Arcadis met het technisch team aan de onderbouwing van de veilig geachte situatie en het onderzoek naar de oorzaak als voorbereiding op het herstel.

3 Onderzoeksaanpak

3.1 Inleiding

In juni 2023 is door de N.V. Westerscheldetunnel opdracht gegeven aan Arcadis om de veiligheid van de constructie te beoordelen, de mogelijke oorzaak van de schade te onderzoeken en te adviseren over de te nemen maatregelen.

Het onderzoek richt zich op de beantwoording van de volgende onderzoeksvragen

1. Is de constructieve veiligheid van de tunnel nog voldoende geborgd?
2. Wat is de (mogelijke) oorzaak van de geconstateerde schade?
3. Zijn herstelmaatregelen noodzakelijk?
4. Hoe ziet het ontwerp van de herstelmaatregelen eruit?

Dit rapport gaat in op het onderzoek en de beantwoording op vragen één tot en met drie. Het ontwerp van herstelmaatregelen zal later worden uitgewerkt en is daarmee geen onderdeel van dit rapport.

3.2 Aanpak

Het onderzoek kent een aantal onderdelen waarmee inzicht in de situatie is verkregen om uiteindelijk de vraagstelling te kunnen beantwoorden.

1. Documenteren van het schadebeeld.
2. Het doorgronden van as-built informatie
3. De beoordeling van uitgevoerde tunnelscans.
4. Monitoring van de huidige toestand inclusief onderzoek naar de huidige mate van rondheid van de ringen.
5. Het uitvoeren van geotechnisch onderzoek.
6. Het uitvoeren van constructief onderzoek.

Elk van de onderdelen wordt nader uitgewerkt in de volgende paragrafen.

3.2.1 Schadebeeld

Via inspecties is een meer compleet beeld ontstaan van de daadwerkelijke schade zoals deze zich toont in de Oostbuis van de Westerscheldetunnel. Dit is gedaan door het uitvoeren van visuele inspecties van de schadelocatie en het uitvoeren van een endoscopisch onderzoek van de scheur in een segment in de kruin van ring 3297.

3.2.2 As-built informatie

Na afronding van de bouw van de Westerscheldetunnel is door aannemer KMW v.o.f. as-built informatie overgedragen aan de N.V. Westerscheldetunnel. As-built informatie verwijst naar gegevens en documentatie die de werkelijke constructie- en installatiewerkzaamheden weergeven zoals uitgevoerd tijdens de bouwfase van een project. Het omvat gedetailleerde en nauwkeurige informatie over de daadwerkelijke uitvoering, afmetingen, materialen, locaties en configuraties van de gebouwde elementen. As-built informatie wordt verzameld tijdens of na de bouw en documenteert eventuele wijzigingen, afwijkingen of toevoegingen die zijn aangebracht ten opzichte van de oorspronkelijke ontwerpdocumenten. Deze informatie is essentieel voor het bijwerken van de oorspronkelijke ontwerpen en kan worden gebruikt voor verschillende doeleinden, zoals onderhoud, renovaties, toekomstige uitbreidingen, compliance met regelgeving en het creëren van een betrouwbare basis voor facilitair beheer.

In dit geval is het relevant om te beoordelen of er vanuit de bouw een oorzaak te vinden zou kunnen zijn voor de aangetroffen schade en te beschikken over het uiteindelijke ontwerp om de situatie te kunnen beoordelen.

3.2.3 Tunnelscans

Door de firma SPACETEC zijn in opdracht van de N.V. Westerscheldetunnel in 2005, 2012, 2018 en 2023 scans uitgevoerd van zowel de Oost- als Westbuis. SPACETEC is gecontracteerd om zogenaamde hoge resolutie scans uit te voeren met behulp van een high-end tunnelscanner die op een voertuig is gemonteerd. De scan betreft een gecombineerde laser profiel (3D) en thermografische scan die daarnaast fotomateriaal oplevert over het zichtbare oppervlak van de tunnelringen. De resultaten worden met behulp van algoritmes geanalyseerd op relevante veranderingen in de tunnel. Door de opgebouwde historie is het mogelijk om terug te kijken in de data van de uitgevoerde scans en deze met elkaar te vergelijken. Hiervoor is een algoritme ontwikkeld om data over elkaar te leggen en in de tijd verschillen te duiden. De eindresultaten zijn in rapportvorm geleverd aan de N.V. Westerscheldetunnel.

De metingen zijn toegespitst op lekkagedrag, profiel van vrije ruimte en laagdikteverschillen in de hittewerende bekleding en het profiel van de tunnel.

3.2.4 Monitoring

Voor de veiligheidsbeoordeling en het onderzoek naar de oorzaak zijn twee typen meetapparatuur geplaatst. Met behulp van de ingestelde monitoring kan worden gevolgd:

- a. Of sprake is van voortschrijdende vervormingen en;
- b. Hoe de tunnelringen zich gedragen zodat daaruit kennis kan worden verkregen voor wat betreft de mogelijke oorzaak.

De twee typen van geplaatste monitoring worden hieronder kort toegelicht. De resultaten worden in hoofdstuk 4 nader uitgewerkt.

Scheurwijdte metingen

Het meten van scheurwijdte met scheurwijdtemeters is een eenvoudige, nauwkeurige en niet-destructieve methode om de breedte van scheuren in constructies te meten. Het biedt gemak, precisie en veiligheid bij het monitoren van de integriteit van constructies. De scheurwijdtemeters hebben een betrouwbaarheid van 0,003 mm en zijn geplaatst op een viertal locaties. Deze locaties zijn gekozen op basis van het schadebeeld, zoals de primaire schade in ring 3297, of als referentie meting, zoals de meting van de langsvoeg in ring 3291.

Vervormingsmetingen

Voor het kunnen opvolgen van eventuele vervormingen van de tunnelbuizen is een Robotic Total Station (RTS) met bijbehorende prisma's geïnstalleerd in de Oostbuis. Het meten van vervormingen met een RTS en prisma's is een effectieve methode om nauwkeurige en betrouwbare gegevens te verkrijgen. Een RTS is een geavanceerd instrument dat wordt gebruikt om verschillende metingen uit te voeren, zoals het bepalen van hoeken, afstanden en hoogtes. Bij het meten van vervormingen wordt een RTS gecombineerd met speciale prisma's. Deze prisma's worden op strategische punten op de ringen geplaatst. Het RTS instrument maakt vervolgens gebruik van infrarood om de prisma's te detecteren en meet de afstanden en hoeken tot deze prisma's.

Door herhaaldelijk metingen uit te voeren op verschillende tijdstippen, kan de RTS de veranderingen in positie en vervorming van de prisma's nauwkeurig vastleggen. Dit stelt de onderzoekers in staat om de vervormingen van de tunnelringen te monitoren. In totaal zijn vijf ringen voorzien van prisma's. Drie ringen (3296, 3297 en 3298) zijn gekozen vanwege de nabijheid van de primaire schade (breuk) in ring 3297. Ring 3284 wordt gemonitord als de laatste ring in de zone met scheurvorming. De laatste gemeten ring is ring 3250. Deze ring bevindt zich buiten de schadezone en geldt als referentie voor "normaal" gedrag. De betrouwbaarheid van dit type meting bedraagt ongeveer 1.0 mm.

Als onderdeel van het onderzoek is de huidige mate van ovalisering van in totaal zeven ringen, waaronder de ringen waarvan de vervorming wordt opgevolgd, door FUGRO bepaald met behulp van een Point Cloud 3D laserscan. De vervormingsmonitoring geeft dan de mate van verandering aan ten op zichte van de gemeten ovaliteit.

3.2.5 Geotechnisch onderzoek

Het geotechnisch onderzoek kent twee primaire ingezette onderzoeken. De eerste betreft het uitvoeren van modelberekeningen om mogelijk oorzaak hypothesen te onderzoeken en de tweede betreft het ter plaatse uitvoeren van geotechnisch onderzoek met behulp van boringen en sonderingen.

Modelberekeningen

Het modelleren van grond mechanisch gedrag met behulp van Eindige-Elementen-Methode (EEM) software is een krachtige en veelgebruikte techniek in de geotechnische engineering. De EEM is een numerieke techniek die wordt gebruikt om complexe constructies te analyseren en hun gedrag onder verschillende belastingen te voorspellen. Door de EEM toe te passen, kunnen we de spanningen, vervormingen, reactiekrachten en andere relevante parameters van de constructie berekenen. De EEM maakt een gedetailleerde analyse mogelijk van de constructie, waarbij rekening wordt gehouden met de interactie tussen verschillende elementen en belastingen en maakt het mogelijk om het gedrag van de constructie te voorspellen onder verschillende belasting scenario's, waardoor we inzicht krijgen in de veiligheid en prestaties.

Specifiek is voor het onderzoek PLAXIS gehanteerd. PLAXIS is een softwareprogramma dat speciaal is ontworpen voor het analyseren en simuleren van grond mechanische vraagstukken. Het programma maakt gebruik van de eindige-elementenmethode, een numerieke techniek om de interactie tussen grond en constructie te simuleren. Het modelleren met PLAXIS begint met het maken van een digitaal model van de grond. Hierbij worden de geometrie, materialen en grenscondities van het systeem gedefinieerd. Vervolgens kunnen verschillende belastingsscenario's worden gesimuleerd. Het programma berekent dan het gedrag van de grond, inclusief vervormingen, spanningen, en eventuele faalmechanismen.

Aanvullende grondonderzoek

Om de geotechnische modellering zo veel als mogelijk te laten aansluiten op de werkelijkheid zijn in opdracht van Arcadis geotechnische onderzoeken ter plaatse van de schade uitgevoerd. Dit betrof tien sonderingen en één enkele boring. Dit om te toetsen of de omstandigheden overeenkomen met de in het ontwerp aangenomen werkelijkheid en voor het vaststellen van ontwerpuitgangspunten van een in latere fase te ontwikkelen ontwerp van herstel.

Een sondering is een geotechnisch onderzoekstechniek die wordt gebruikt om informatie te verkrijgen over de draagkracht en de samenstelling van de grondlagen onder het aardoppervlak. Bij een sondering wordt een speciaal ontworpen sonde, ook wel een sondeerpunt genoemd, in de grond gedrukt. Deze sonde is uitgerust met meetinstrumenten om de weerstand en de wrijving tijdens het penetreren van de grond te registreren. De verkregen meetgegevens worden geanalyseerd om informatie te verkrijgen over de eigenschappen van de grondlagen. Dit omvat onder andere het bepalen van de draagkracht van de grond, het identificeren van verschillende bodemlagen en het detecteren van eventuele bodemlagen met afwijkende eigenschappen.

Tijdens het boren voor een boring worden bodemonsters genomen op verschillende dieptes. Dit gebeurt door middel van een buis of casing die in de grond wordt geplaatst en vervolgens wordt opgehaald met behulp van een boorkernbuis of een grondboor. Deze monsters worden verzameld om de eigenschappen van de bodemlagen te beoordelen. De verzamelde bodemonsters en meetgegevens worden vervolgens geanalyseerd in een laboratorium om de grondeigenschappen verder te beoordelen.

3.2.6 Constructieve beschouwingen

Met de constructieve beschouwingen (berekeningen) worden twee aspecten van de vraagstelling nader onderzocht. In de eerste plaats wordt een beeld gevormd van de veiligheid van de constructie. Dit betreft dan de vraag in hoeverre er een risico is op het bezwijken van de tunnelringen. Op de tweede plaats wordt de tunnelconstructie beoordeeld aan de hand van inzichten in modellering en krachtswerking zodat er inzichten ontstaan in mogelijke hypothesen ten aanzien van de oorzaak van het ontstaan van schade.

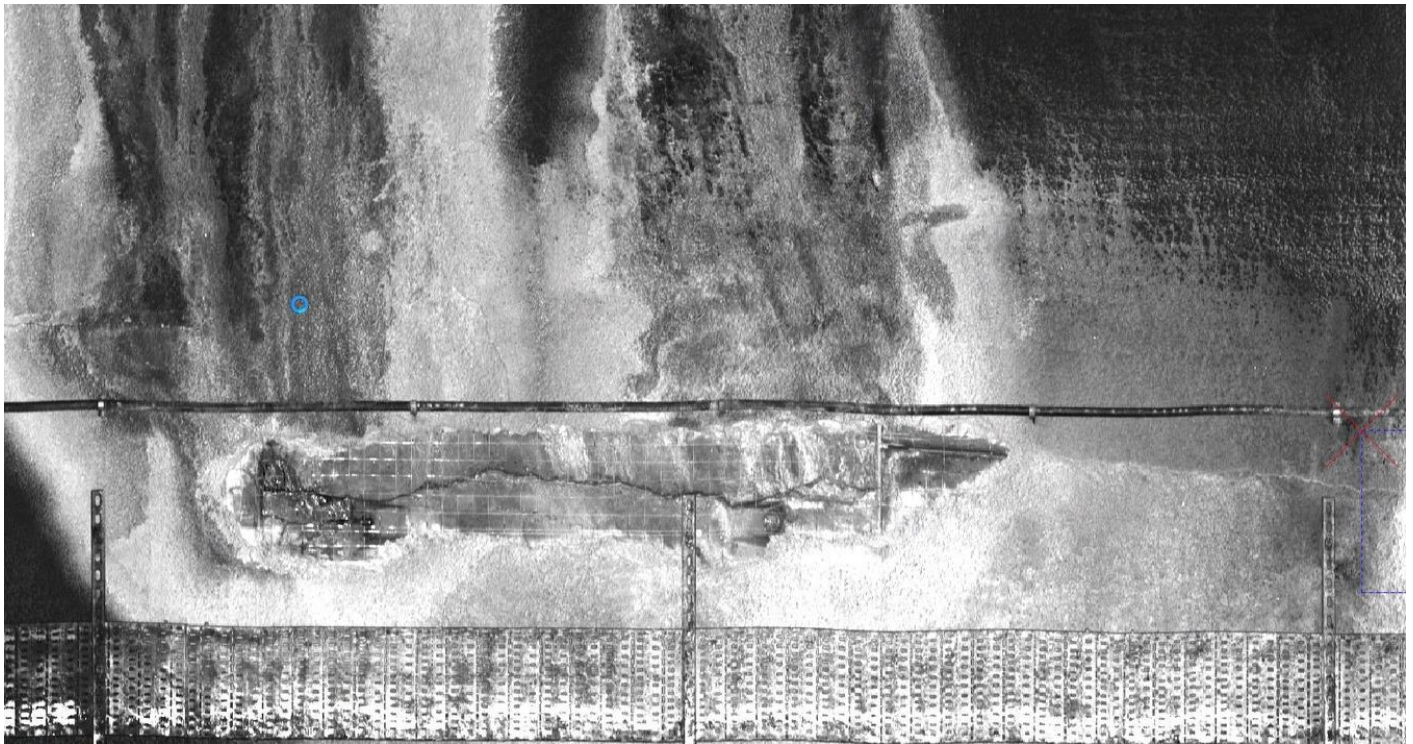
Het uitvoeren van de constructieve beschouwingen gebeurt met behulp van de Eindige-Elementen-Methode (EEM) software DIANA.

4 Resultaten

4.1 Globaal schadebeeld

In de kruin van de Oostbuis is schade in enkele tunnelsegmenten van een aantal opeenvolgende tunnelringen aangetroffen. De zone waarin visueel schade is vastgesteld ligt tussen ring 3284 en ring 3304³. Enkele van de segmenten in deze zone tonen in de kruin één of meerdere scheuren over de volledige breedte van de segmenten (2 meter brede segmenten). In deze zone zijn vanaf ring 3290, conform het ontwerp, de ringen permanent met elkaar verbonden door (gekromde) bouten.

De belangrijkste scheur in ring 3297 (Figuur 2) heeft een gemeten wijde van c.a. 10mm en loopt van boutpocket⁴ naar boutpocket, wat een logische plek voor scheurvorming is omdat de boutpocket een verzwakking is van de betondoorsnede. Van de wapening in de scheur in ring 3297 is visueel middels endoscopie vastgesteld dat deze is gebroken (Figuur 3).



Figuur 2 Detail opname van de scheur/breuk in ring 3297(noot – de witte vlekken zijn het gevolg van het met water verwijderen van de hittewerkende bekleding om de scheur zichtbaar te maken).

De schade in ring 3297 geeft een overlast gevende lekkage⁵ die is vastgesteld op ca 0.6 liter/uur. Andere gevonden scheuren in de diverse segmenten zijn significant kleiner (orde van tiende van millimeters breedte/openstand van de scheur) en geven geen lekkage.

Van een aantal van de segmenten, waaronder ring 3297, is vastgesteld dat de boutpockets zijn uitgebroken. Dit toont zich door scheurvorming bij de boutpockets (Figuur 4).

³ Ring 3304 is de laatste complete ring van de Oostbuis. Deze ring is verbonden met toerit Noord

⁴ Opening voor (permanente) boutverbinding tussen ringen

⁵ Voor verkeer overlast gevende lekkage, die kan leiden tot enkele waterspatten/druppels op passerende voertuigen.



Figuur 3 Gebroken staaf in de breuk in ring 3297.

Het hier beschreven schadebeeld is gebaseerd op dat wat visueel is waar te nemen na het verwijderen van de hittewerende bekleding. Aangezien er verder geen andere duidelijke aftekening van schade is waar te nemen in de hittewerende bekleding, is verdere grote schade niet aannemelijk alhoewel deze niet volledig kan worden uitgesloten.

4.2 As-built informatie

De onderzochte informatie betreft onder meer de ringbouw database, ploeg-protocollen die gebeurtenissen uit de bouwfase documenteren, ringbouw protocollen die de kwaliteit van de ring na ringbouw documenteren en afwijkingsrapporten die zijn opgesteld tijdens de bouw ten gevolge van vastgestelde afwijkingen tijdens de bouw. Er zijn geen uitvoeringsfouten gevonden die een mogelijk oorzaak kunnen zijn voor de ontstane schade.

Op basis van onderzoek aan betonkernen is vastgesteld dat de sterkte van het beton van de segmenten is doorontwikkeld naar een betonsterkte (C70/85), die ruim boven de ontwerpsterkte ligt (C45/55), dit is relevant voor het gedrag van het beton in samenhang met de toegepaste wapening.



Figuur 4 Detail van een boutpocket met scheurvorming zichtbaar. Het wapeningsgaas is onderdeel van de laag de hittewerende bekleding (die is wegehaald voor het onderzoek).

4.3 Tunnel scans

Scans en rapportage van de metingen sinds 2005 hebben op geen enkel moment gewezen op het ontstaan van de schade, simpelweg omdat er voorheen geen redenen waren om de scans te beoordelen op dit soort type schade. Achteraf is de ontwikkeling echter te signaleren op basis van het beeldmateriaal.

De metingen en de rapportage zijn tot recent toegespitst geweest op lekkagedrag, profiel van vrije ruimte en laagdikte verschillen in de hittewerende bekleding (fendolite) en het profiel van de tunnel. Uit de scans zijn slechts enkele lokale knelpunten gesignaleerd. Dit betreft vooral aandachtspunten in veranderende dikte van de fendolite, ten gevolge van het eroderen van de fendolite nabij lekkages. Op grond van de rapportages is geen veranderend tunnelprofiel vast te stellen. Opgemerkt wordt dat de gemeten verschillen kleiner dan 15 mm als onbetrouwbaar moeten worden gezien.

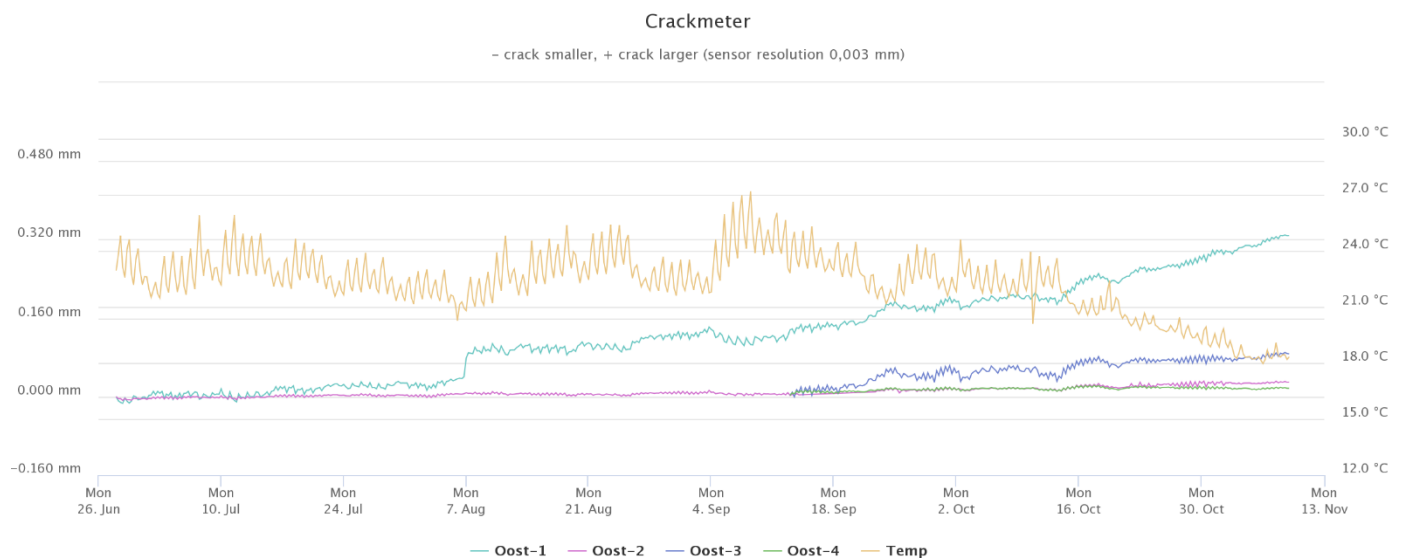
Met de kennis van de schade is in de data gekeken naar de specifieke schadelocatie in ring 3297. Op grond van het beeldmateriaal is te stellen dat de eerste aanwijzingen voor het ontstaan van schade zich begint af te tekenen in de fendolite in 2005 en is een doorgaande ontwikkeling te zien in 2012 en 2018 met tenslotte de blootgelegde schade in 2023.

Op basis van de ontwikkeling van de aftekening van de schade in de fendolite in de tunnel scans, is het aannemelijk vast te stellen dat de schade al vroeg is ontstaan na opening van de tunnel en dat een eventuele schadeoorzaak al vroeg na openstelling van de tunnel is opgetreden of aanwezig was.

4.4 Monitoring

De monitoring van zowel de scheurwijdte als ook de vervormingsmetingen laten zeer geringe bewegingen zien wat een aanwijzing is voor een stabiele situatie. De scheurwijdte meetresultaten worden aantoonbare beïnvloed door het getij op de Westerschelde en temperatuur in de tunnel.

Op basis van de meetdata en data-analyse kunnen geen conclusies worden getrokken die bijdragen aan de precieze vaststelling van de oorzaak. Wel kan worden gesteld dat er geen sprake is van een zich snel progressief ontwikkelende schade wat gunstig is voor de veiligheidsbeoordeling. Echter, wordt wel geconcludeerd dat er sprake is van een licht doorgaand proces van schadeontwikkeling van de primaire schade in ring 3297.



Figuur 5 Meetdata Scheurwijdte (resultaten tot 9 November 2023).

Toelichting op figuur 5

Figuur 4 geeft een overzicht van alle data zoals deze door de scheurwijdtemetingen wordt gerapporteerd.

De diverse meetlocaties Oost-1 tot en met Oost-4 betreffende de vier geïnstalleerde meters waarbij Oost-1 de primaire schade (breuk) in ring 3297 betreft. Naast scheurwijdte wordt ook de temperatuur in de tunnel gemeten en weergegeven. Oost-2 en Oost-4 meten de wijdteontwikkeling over twee scheuren met beperkte initiële wijdte

Oost-3 is de meting over een normale voeg tussen twee segmenten in een ring als referentie voor het gedrag van de andere meetlocaties

De locaties Oost-3 en Oost-4 zijn sinds 13 september actief, waar Oost-1 en Oost-2 al sinds 28 juni data rapporteren.

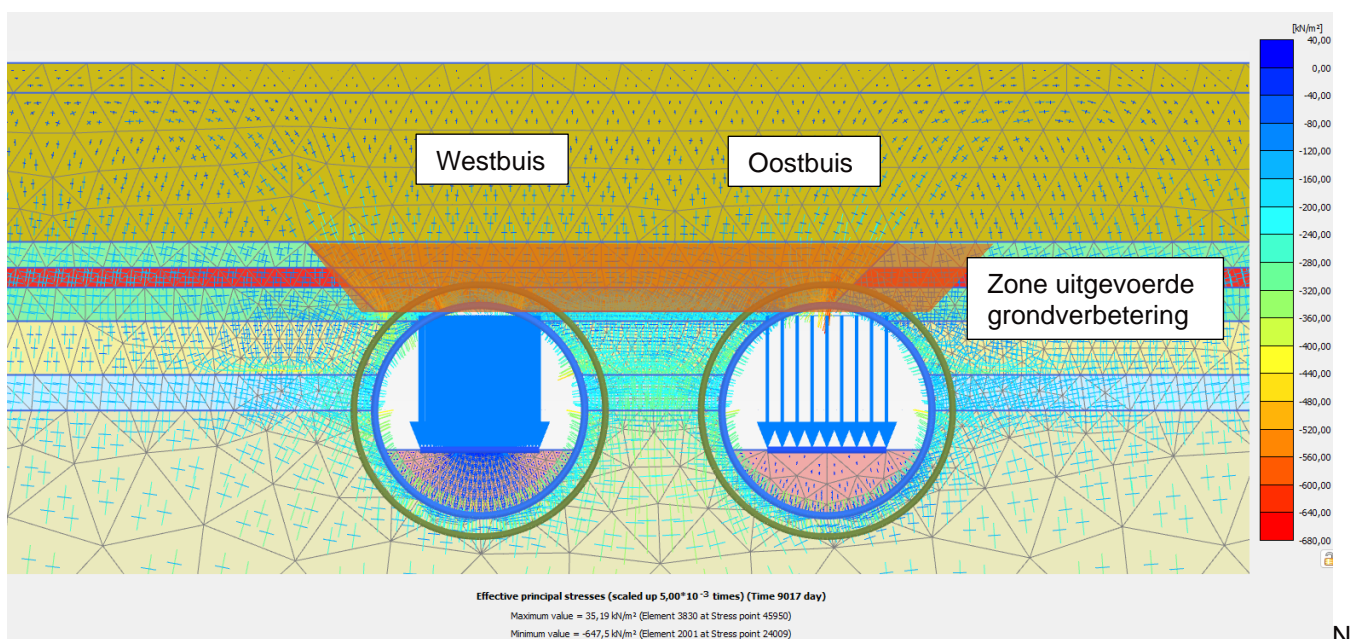
Door middel van een Point Cloud 3D scan is de mate van rondheid van een aantal ringen gemeten. De analyse van de rondheid laat ovalisatie van de ringen zien met waarden die in lijn der verwachting liggen, passend bij een ring van deze diameter uitgaande van vergelijkbare ongunstige situatie (geringe gronddekking, wat slappere lagen).

4.5 Geotechnisch onderzoek

Op basis van geotechnische analyses en aanvullend grondonderzoek, is onderzoek verricht naar mogelijke geotechnische redenen voor het ontstaan van de schade. Er zijn een groot aantal verschillende modelleringen van het tunnelboorproces onderzocht met een gevoeligheidsanalyse

Uit de resultaten van de onderzoeken volgt dat vanwege zetting door kruip van samendrukbare grondlagen tussen en naast de twee tunnelbuizen, extra belasting uit de ophoging naar de bovenzijde van de tunnelbuis wordt toegetrokken. Hierdoor kan worden geconcludeerd dat een ongunstige positie van een grondverbetering in combinatie met zetting van de samendrukbare lagen mogelijk een belangrijke bijdrage aan het ontstaan van de schade levert.

Het is mogelijk dat de geometrie van de grondverbetering en het resterende deel van de kleilaag ongunstiger is ter plaatse van de Oostbuis waardoor alleen daar schade wordt waargenomen.



Figuur 6 Effectieve hoofdspanning in de ondergrond inclusief spanningsrichting – spanningsconcentratie bij de schadelocatie aan bovenzijde Oostbuis (betreft hier een van de ongunstigste scenario's van de ligging van de grondverbetering)

Toelichting figuur 6

Figuur 6 is een weergave van het geotechnisch model

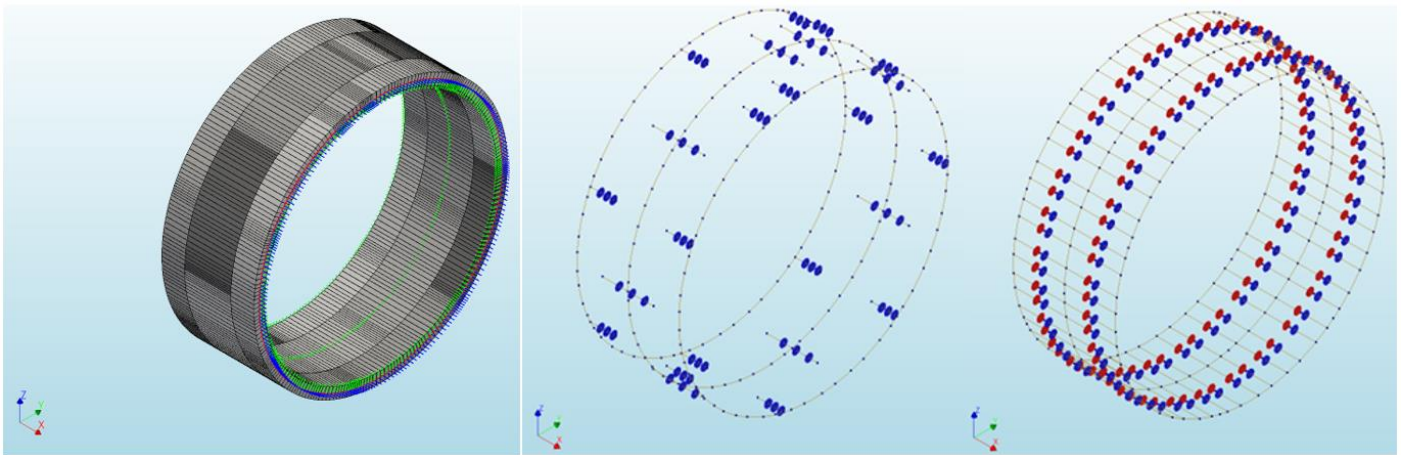
- Toont zowel de Oost- als de Westbuis;
- Toont de diverse grondlagen (in diverse kleuren);
- Toont een vereenvoudigde weergave van de tunnelringen;
- De getoonde situatie is een ongunstig scenario om de invloed van de positie van de grondverbetering te laten zien;
- Toont de spanningsrichting in de grond.

4.6 Constructieve beschouwing

4.6.1 Aanpak

Het constructieve gedrag van de beschadigde segmenten van de Oostbuis van de Westerscheldetunnel is op verschillende wijzen geanalyseerd:

- Met een model van drie ringen is de samenwerking tussen tunnelringen geanalyseerd voor en na het ontstaan van de breuk in de kruin van ring 3297. Het ringmodel is gemodelleerd met een Eindig Elementen Model. In dit model (Figuur 7) is ring 3297 met de daadwerkelijke segmentconfiguratie gemodelleerd met de twee naastgelegen ringen. Het ringmodel is gevalideerd met behulp van ontwerpgegevens van het oorspronkelijk ontwerp waarna in het model aanpassingen zijn doorgevoerd om de feitelijke situatie te benaderen;
- Met een detailmodel van de zone rond de breuk is het lokale gedrag van de breuk onderzocht;
- Met behulp van een doorsnede-berekening is het ontstaan van de breuk geanalyseerd.



Figuur 7 Weergave ringenmodel

Toelichting figuur 7

In figuur 7 zijn van links naar rechts weergegeven:

1. Het ringenmodel bestaande uit ring 3297 en twee naastliggende ringen (als halve ringen gemodelleerd)
2. Weergave van de verbinding tussen de ringen op basis van het oorspronkelijke ontwerp (zo geheten kom-nok verbinding)
3. Weergave van het toegenomen aantal verbindingen tussen de ringen ten gevolge van de toepassing van triplex als ringvoeg materiaal

4.6.2 Oorzaak analyse

De interactie tussen de ringen is in wekelijkheid stijver dan in het ontwerp aangenomen met grotere snede krachten tot gevolg. In het ontwerp is gerekend met 2 kom-nokverbindingen per segment per ringvoeg. In werkelijkheid zijn per segment per ringvoeg 8 triplexplaatjes aanwezig, per 2 gegroepeerd met daarnaast nog permanente bouten in de schadegzone. Hierdoor is sprake van een zeer stijf halfsteensverband, dat pas stijfheid verliest als een segment scheurt of wanneer de triplexplaatjes afschuiven.

Alle uitgevoerde berekeningen laten mede ten gevolge van het stijf ringgedrag relatief hoge momenten⁶ zien in het bereik van de kruin, met een momentpiek ter plaatse van de breuklocatie. De berekeningen met grondverbetering in de vorm van een zandcunet zijn het meest representatief voor de werkelijke situatie. Deze gronddrukken zijn het gevolg van een relatief stijve laag boven de tunnel en een slappe laag ter hoogte van de schouder.

De momenten in de segmenten zijn hierdoor lokaal hoger geweest dan waarop is ontworpen, waardoor het ontwerpuitsgangspunt dat de segmenten niet zouden scheuren ongeldig is gebleken. De wapening in ringrichting was niet voldoende om een eventuele scheur te beheersen; dit kan samenhangen met de doorontwikkelde betonsterkte (C70/85), die ruim boven de ontwerpsterkte ligt (C45/55), en met het feit dat de toch al minimale wapening ter plaatse van de boutpockets is onderbroken.

Kort nadat door lokaal hoge momenten een scheur ontstond, is de wapening in de scheur in het segment in ring 3297 gaan vloeien. De scheurwijdte werd niet meer beheerst door de wapening, maar was eerder het resultaat van de samenwerking tussen de ringen. De naast ring 3297 liggende ringen worden op dat moment vervorming gestuurd belast en laten een andere schadeontwikkeling zien met kleinere (mogelijk meerdere) scheuren.

Wisselingen van de belastingen op de segmenten (getij, temperatuurvariatie) leiden tot 'ademen' van de breukvoeg in ring 3297; omdat de wapening al plastisch is, is deze gevoelig voor vermoeiing. Het rechte breukvlak in een aantal staven wijst op vermoeiingsbreuk.

4.6.3 Kanttekening

Genoemde verklaring is gebaseerd op waarnemingen, metingen en op geotechnische en constructieve berekeningen. Opgemerkt wordt, dat dit een mogelijke verklaring is. Het geheel aan gemeten en berekende gegevens is onvoldoende eenduidig om met zekerheid te kunnen stellen dat dit enig juiste verklaring is.



Figuur 8 Toepassing van triplex als ringvoeg materiaal

⁶ Een moment is de benaming van een kracht die niet iets in een bepaalde richting probeert te duwen maar een kracht die iets rond wil laten draaien of roteren.

4.6.4 Veiligheid

Voor de belastingen zijn worst-case-waarden aangehouden, terwijl weerstand biedende parameters aan de veilige kant worden aangenomen (rekenwaarden of ongunstige inschatting). Wanneer onder deze belastingen evenwicht kan worden gevonden terwijl de vervormingen binnen het geldigheidsbereik van de aannames vallen, is sprake van een veilige situatie.

Voor alle uitgevoerde berekeningen geldt dat de belastingen konden worden gedragen zonder verlies van evenwicht. Bij een aantal varianten treden daarbij grote kruinverplaatsingen op (breuk als scharnier, tangentiële belastingcomponent meegenomen), maar niet altijd gaat dat gepaard met grote rotaties in de breuk. Detailanalyses wijzen uit dat de breuk relatief veel rotatie aankan. De berekeningen laten zien dat het systeem van samenwerkende ringen in constructief opzicht stabiel blijft bij vervormingen die groter zijn dan nu is opgetreden.

Het lokale model bevestigt dat de ringconstructie van de tunnel voldoende herverdelingscapaciteit heeft om de stabiliteit van de ring(en) te waarborgen.

4.7 Herstel

Alhoewel er geen direct gevaar is voor het falen van de tunnel is het onwenselijk de huidige situatie te handhaven en is constructief herstel noodzakelijk. Hoe deze herstelmaatregel eruit komt te zien is onderdeel van verdere studie. Middels de monitoring wordt de lichte doorgaande ontwikkeling van schade opgevolgd tot het moment van uitvoeren van de herstelmaatregel. Hierbij worden interventiewaarden gehanteerd om ongewenste ontwikkelingen vroegtijdig te signaleren.

Het definitieve herstel zal binnen afzienbare termijn worden gerealiseerd echter gelet op de beoordeling dat geen sprake is van een acuut risico kan voor de voorbereiding enig tijd worden genomen om dat gedegen neer te zetten. Wel blijft het nodig de monitoring en opvolging van resultaten door te zetten. Als ontwikkelingen met betrekking tot de monitoring en daaraan gekoppelde schade daartoe aanleiding geven kan nog besloten worden tot een tijdelijke maatregelen (zekering van het gescheurde element, veiligheidsnet of beplating om eventueel vallen gruis of lekwater op te vangen) alvorens de definitieve maatregel wordt gerealiseerd.

5 Conclusies

5.1 Veiligheid

De uitkomsten van het onderzoek bevestigen dat sprake is van een situatie waarin geen direct gevaar bestaat voor de weggebruiker. Monitoring door middel van scheurwijdtemeters en vervormingsmetingen van enkele tunnelringen laten zien dat sprake is van zeer geringe bewegingen en vervormingen van de tunnelringen. Dit primair onder invloed van het getij en de temperatuur in de tunnel. De monitoring van de schade en data-analyse leidt ook tot de conclusie dat er sprake is van een doorgaand proces in ring 3297 wat een licht toenemende scheurwijdte veroorzaakt. Berekeningen tonen aan dat de tunnelconstructie nog herverdelingscapaciteit beschikbaar heeft waardoor er op de korte termijn geen gevaar voor de stabiliteit van de tunnelringen is.

5.2 Oorzaak

Ten aanzien van de mogelijke oorzaak van de schade wordt geconcludeerd dat er geen sprake is van één enkele duidelijke oorzaak maar dat het meest waarschijnlijke scenario is dat een samenstel van omstandigheden aanleiding tot de schade heeft gegeven met daarin drie belangrijke componenten:

1. Zetting door kruip van samendrukbare lagen tussen en naast de twee tunnelbuizen geven toenemende belastingen;
2. De interactie tussen de ringen is in wekelijkheid stijver dan in het ontwerp aangenomen;
3. De aan de binnenzijde van de lining aanwezige (en door de breuksnede doorlopende) wapening in ringrichting is niet voldoende om de opgetreden snedekrachten bij scheurvorming over te nemen.

Tijdens de bouw van de Westerscheldetunnel (1997-2003) is ter plaatse van het schadegebied vermoedelijk eerst een gedeeltelijke grondverbetering uitgevoerd door de slappe klei en veenlagen ter plaatse van de tunnelbuizen grotendeels te verwijderen. Vervolgens is een ophoging uitgevoerd om de aankomst van de tunnelboormachine mogelijk te maken en de stabiliteit van de tunnelbuizen te waarborgen. Uitgevoerde geotechnisch analyses laten zien dat het mogelijk is dat door kruipzetting onder invloed van deze ophoging ten gevolge van consolidatie van de samendrukbare grondlagen naast de tunnel extra belasting uit de ophoging naar de bovenzijde van de tunnelbuis is geleid. Deze tijdsafhankelijke kruip geeft een langzame toename van belasting op de tunnelbuizen wat vervolgens weer een toename van ovalisatie en snedekrachten in de tunnelkruin ter plaatse van de beschadigde ringen geeft.

Na het scheuren van het segment in ring 3297 blijkt dat de wapening onvoldoende in staat is om de scheurwijdte te beperken. De spanningen nemen dan direct snel toe, wat de wapening gevoelig maakt voor vermoeiing ten gevolge van temperatuurwisselingen en getij. De belastingafdracht op de kruin van de tunnel neemt met de tijd verder toe. Bij toenemende scheuropening begint de wapening te vloeien, en breken staven als gevolg van de cyclische belasting onder invloed van het getij en temperatuurwisselingen. De spanningswisselingen in de resterende staven neemt toe, waardoor ook deze breken.

Op grond van inspecties in opdracht van de N.V. Westerscheldetunnel is nergens op andere locaties in de tunnel vergelijkbare schade waargenomen.

5.3 Herstel

Geconcludeerd wordt dat op termijn herstelmaatregelen moeten worden doorgevoerd om een eventuele voortgaande schade-ontwikkeling te stoppen en de veiligheid en levensduur van de tunnel blijvend te waarborgen.

Als ontwikkelingen met betrekking tot de monitoring en het daaraan gekoppelde schadebeeld daartoe aanleiding geven kan besloten worden tot tijdelijke technische maatregelen (zekering) alvorens de definitieve maatregel wordt gerealiseerd.

Colofon

SCHADE OOSTBUIS WESTERSCHELDETUNNEL
RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK NAAR DE VEILIGHEID EN DE (MOGELIJK) OORZAAK - PUBLIEKE
VERSIE

KLANT

N.V. Westerscheldetunnel

AUTEUR

Evert Sonke

PROJECTNUMMER

30179897

ONZE REFERENTIE

EQRHWWSAHC6D-1359584860-33457:2.0

DATUM

27 november 2023

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

Coen van der Vliet
Senior Specialist

VRIJGEGEVEN DOOR

Bart Duijvestijn
Head of Department Tunnel

Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende ontwerp- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij helpen onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Wij zijn met 36.000 mensen actief die in ruim zeventig landen meer dan €4,2 miljard aan omzet genereren. Wij helpen UN-Habitat met onze mensen, die kennis en expertise leveren om de moeilijke leefomstandigheden te verbeteren in gebieden die lijden onder de gevolgen van klimaatverandering.

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 4205
3006 AE Rotterdam
Nederland

T +31 (0)88 4261 261