
Onderzoek naar falen fundering Prinses Margriettunnel

Oorzaak onderzocht op basis van forensic engineering,
om tunnelvisie te voorkomen



In de week van 13 december 2022 constateerde een weginspecteur van Rijkswaterstaat schade aan het wegdek in de noordelijke toerit van de Prinses Margriettunnel (1976) in de snelweg A7 bij Sneek. Een bepaald deel van de tunnelbak, een zogenaamde tunnelmoot, was door druk van het grondwater omhoog gekomen. De schade bleek zo ernstig, dat de A7 tussen Sneek en Joure in beide richtingen moest worden afgesloten. Na het nemen van noodmaatregelen is Rijkswaterstaat gestart met het ontwerp en de uitvoering van de benodigde herstelwerkzaamheden. Gelijktijdig is een onderzoek gestart naar de oorzaak van het incident.

Nadat de schade was geconstateerd werden enkele noodmaatregelen genomen. Om ervoor te zorgen dat de tunnelmoot niet nog verder omhoog zou komen, werden eerst 1750 big bags met zand over de volle breedte van beide rijbanen van de moot geplaatst en daarna nog eens 750 stuks. Om de kans te verkleinen dat één of meerdere andere moten ook omhoog zouden komen, zijn ook op de andere tunnelmoten bigbags geplaatst, nog eens 7500 stuks (foto 1).

Onderzoek

Nadat de noodmaatregelen waren voltooid, is direct begonnen met een onderzoek naar de oorzaak van het incident [1]. Dat onderzoek is uitgevoerd door een team van onderzoekers van TNO en Deltares. Dit team heeft intensief samengewerkt met de projectleiding van Rijkswaterstaat en de medewerkers van Van Hattum en Blankevoort, die het aannemerswerk voor het veldonderzoek hebben uitgevoerd.

Bij de gevolgdde methodiek van onderzoek is gebruikgemaakt van forensic engineering, meer in het bijzonder de bottom-up methode zoals beschreven in [2]. Het schade-

beeld is als uitgangspunt aangehouden en daarover is historische informatie verzameld. Op basis daarvan is, zowel via veld- als laboratoriumonderzoek, onderzocht welke faalmechanismen de betreffende schade veroorzaakt zouden kunnen hebben. Dat is stapsgewijs uitgevoerd, door steeds op een dieper niveau naar het schadebeeld te kijken. Op elk niveau is onderzocht welke faalmechanismen kunnen zijn opgetreden (verificatie) en welke faalmechanismen kunnen worden uitgesloten (falsificatie). Daardoor kon de hoeveelheid uit te voeren onderzoek op een aantal niveaus worden ingeperkt, zonder gevaar voor tunnelvisie.

Er is bij het onderzoek gebruikgemaakt van de faalboom die was opgesteld in het kader van het vergelijkbare incident in de Vlaketunnel in 2010 [3]. De faalboom bevat een geordend en stapsgewijs overzicht van mogelijke oorzaken. Deze zijn gegroepeerd, zodat deze systematisch kunnen worden beoordeeld en zo mogelijk worden uitgesloten.

Op basis van archiefonderzoek rees al snel het vermoeden dat het bezwijken is ontstaan door een afname van de sterkte van de paalfundering en niet door een overbelasting vanuit hoogwater. Omdat de →

auteurs



IR. HUIBERT BORSJE

Forensisch Ingenieur
TNO



DR. IR. PAUL HÖLSCHER

Senior Adviseur
Grond Dynamica
Deltares



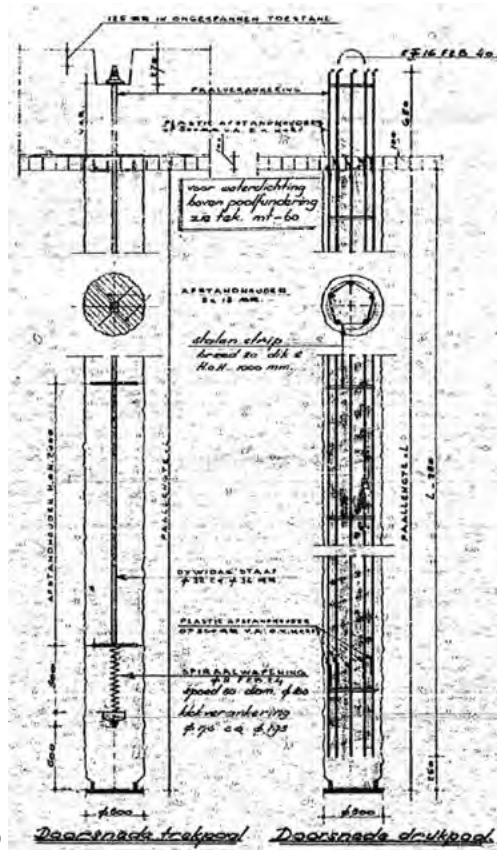
IR. PAUL LITJENS

Technisch Manager
Rijkswaterstaat



IR. IVO HUISKES

Technisch Adviseur
Tunnels
Rijkswaterstaat



2

moot met een beperkte belasting (lager dan de verwachte maximale draagkracht onder druk) weer kon worden teruggedrukt, leek er geen sprake van geotechnisch bezwijken van de fundering, maar van constructief bezwijken. Dit laatste moest door onderzoek aan de constructie worden bevestigd.

Opbouw van de toeritten

De Prinses Margrietunnel is een verkeers-tunnel die is gesitueerd in rijksweg A7, tussen Joure en Sneek, onder het Prinses Margrietkanaal. De tunnel is gebouwd in de periode 1976-1978 [4] en was ten tijde van het incident dus circa 45 jaar oud. De constructie is opgebouwd uit een aquaductdeel met daarboven het Prinses Margrietkanaal en aan elke zijde daarvan een half open toerit; één aan de zuid-oost zijde (Joure) en één de noord-west zijde (Sneek).

De beide toeritten van de tunnel zijn opgebouwd uit U-vormige betonmoten met een breedte van circa 33 m. Deze moten hebben elk een lengte van 18 m, met tussen de moten een dilatatieprofiel voor de waterdichting (W9U profiel).

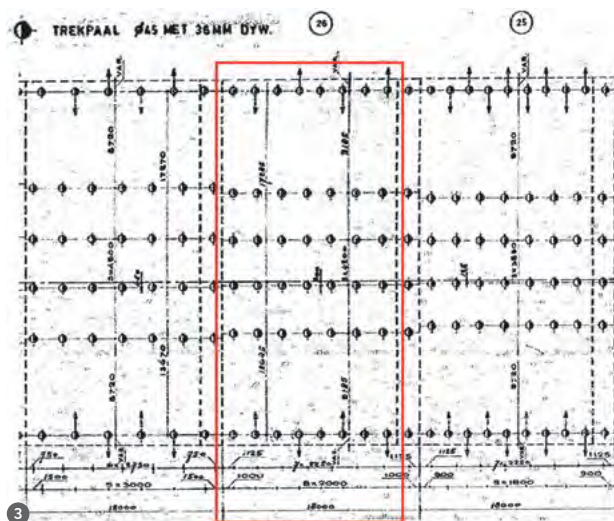
De zuidelijke toerit heeft 22 moten, die vanaf de zuidzijde tot aan de tunnel zijn genummerd van 1 tot en met 22. De noordelijke toerit heeft 26 moten, die vanaf de tunnel tot aan de noordzijde zijn genummerd van 23 tot en met 48. De diepst gesitueerde moot, moot 22, ligt met de onderzijde van de vloer op circa NAP -14 m en heeft een vloerdikte van circa 1,8 m. Bij een gemiddelde grondwaterstand van NAP -1.3 m is op deze moot een grondwaterdruk van bijna 13 m waterkolom aanwezig. Naarmate de moten hoger zijn gesitueerd nemen zowel de waterdruk als de vloerdikte af.

Funderingspalen De dieper gelegen moten van de beide toeritten zijn gefundeerd op betonnen trekpalen (Vibropalen) met een diameter van 450 mm (fig. 2) en een lengte variërend van 10 - 12 m. Deze palen zijn uitgevoerd met een centrale stalen Dywidag voorspanstaaf Ø32 mm dan wel 36 mm. Om aanhechting met het beton te voorkomen, zijn die voorspanstaven omhuld met Denso-band, een koud verwerkbare vetbandage. Verder zijn de voorspanstaven voorzien van afstandhouders, met een hart-op-hart-afstand van 2 m, om ze te centreren in de paal. In het bestek en op de beschikbare constructietekeningen is geen informatie gegeven over de staalkwaliteit van de voorspanstaven. Vermoedelijk betreft het staalkwaliteit FeP 1030/1050.

De trekpalen met een voorspanstaaf Ø32 mm zijn in het bestek aangeduid als 45-tons trekpalen met een aanvangsvoorspanning van 55 ton (550 kN). De trekpalen met een voorspanstaaf Ø36 mm zijn 60-tons trekpalen met een aanvangsvoorspanning van 70 ton (700 kN). Het aantal trekpalen varieert van 16 in de ondiepe moten tot meer dan 50 in de diepste moten.

De omhoog gekomen moot is moot 26, de vierde moot aan de noordzijde van de tunnel. Aan de hoge zijde heeft deze moot een totale hoogte van bovenzijde wand tot onderzijde vloer van circa 9,3 m en aan de lage zijde circa 9,9 m. Onder moot 26 staan 50 trekpalen met een Dywidag voorspanstaaf Ø36 mm en een lengte van circa 12 m (fig. 3).

Bij het open hakken van de vloer bleek een aantal voorspanstaven in de trekpalen gebroken



Opgetreden schade

De schade betreft het omhoog komen van moot 26 van de noordelijke toerit van de tunnel, over een afstand van circa 6 cm. Direct na constatering hiervan is gestart met het inrijden van ballast. Circa een week na het incident is er een geautomatiseerd monitoringsysteem aangebracht, om eventuele nieuwe vervormingen tijdig te kunnen signaleren.

Sinds 2010 werden reeds elke vier jaar reguliere hoogtemetingen uitgevoerd op meetpunten op de bovenzijde van de wanden van de toeritten, nabij de mootvoegen. Het doel van die metingen was het constateren van eventuele deformaties. Deze meetpunten zijn in december 2022, nadat de schade was geconstateerd en er al ballast van 1750 big bags (ongeveer 26.000 kN) in moot 26 aanwezig was, opnieuw ingemeten. De resultaten van deze metingen laten zien dat op

dat moment, de oostwand van moot 26 nog circa 40 mm hoger was gepositioneerd dan de aangrenzende moten (fig. 4). De westwand was op dat moment nagenoeg teruggebracht in de oorspronkelijke positie.

De resultaten van de eerder uitgevoerde vierjaarlijkse metingen zijn ook geanalyseerd. Uit deze analyse blijkt, met de kennis van nu, dat tijdens de meting in juni 2021, circa anderhalf jaar voor het incident, bij moot 26 al een afwijkend gedrag te zien was ten opzichte van de overige moten (fig. 5). De hoek van de moot aan de zuid-oostzijde was toen circa 4 – 5 mm meer omhoog gekomen dan de overige moten. Tot en met de meting in november 2017 was bij moot 26 geen afwijkend gedrag te zien.

Na deze constatering zijn ook alle deformatiemetingen van de andere →

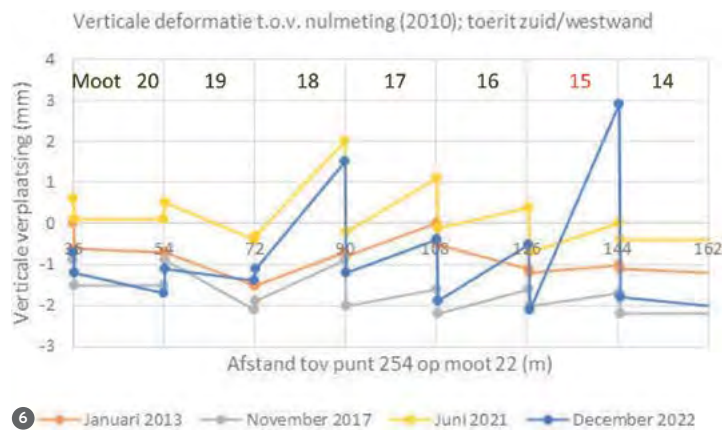


3 Palenplan onder moot 26

4 Hoogtemetingen oostwand noordelijke toerit een week na het incident

5 Hoogtemetingen oostwand noordelijke toerit tot aan juni 2021

De afgeslepen delen van de voorspanstaven zijn in het laboratorium van TNO onderzocht



moten beoordeeld. Daaruit bleek dat in december 2022 bij moot 15 sprake was van een vergelijkbare situatie als bij moot 26 in 2021 (fig. 6). In december 2022 was bij de westwand van moot 15 een afwijkend gedrag te zien ten opzichte van de overige moten. De westwand was aan de zijde van moot 14 circa 5 mm omhoog gekomen ten opzichte van de overige moten. Tot en met de metingen in juni 2021 was bij moot 15 geen afwijkend gedrag te zien.

Hieruit wordt geconcludeerd dat het bezwijken van moot 26 gefaseerd heeft plaatsgevonden en dat moot 15 zich in een beginfase van bezwijken bevond ten tijde van het onderzoek. Nader onderzoek van moot 15 bood daarmee de mogelijkheid om het begin van bezwijken te onderzoeken. Daarom lag de focus van het onderzoek niet alleen op moot 26 maar ook op moot 15.

Veldonderzoek

Om te onderzoeken of de trekpalen geotechnisch of constructief zijn bezweken, moesten voorspanstaven van de palen worden onderzocht. Hiertoe is bij een aantal trekpalen de vloer opengehakt, zodat de voorspanstaaf kon worden bereikt. Vervolgens is op de kop van de voorspanstaven een koppelmof geschroefd en is met een kraan aan de voorspanstaven getrokken (foto 7). Daarbij bleek dat een aantal voorspanstaven was gebroken. Deze gebroken voorspanstaven waren relatief eenvoudig uit de paal te trekken. Dit onderzoek gaf de volgende resultaten:

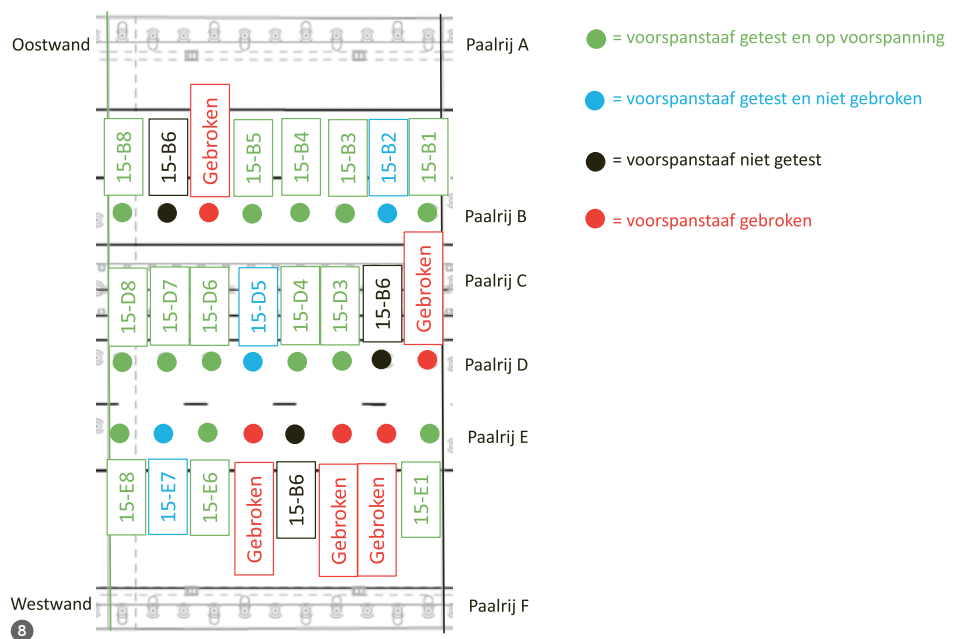
→ Door de aanwezige ballast, was bij moot 26 slechts één rij met acht palen bereikbaar. De voorspanstaven van zeven palen bleken gebroken, op een diepte die varieerde van 3,2 m tot 7,9 m onder de vloerverankering. De voorspanstaaf van de achtste paal was ook gebroken, maar uit het archiefonderzoek bleek dat dat al in de bouwfase was gebeurd, bij het voorspannen.

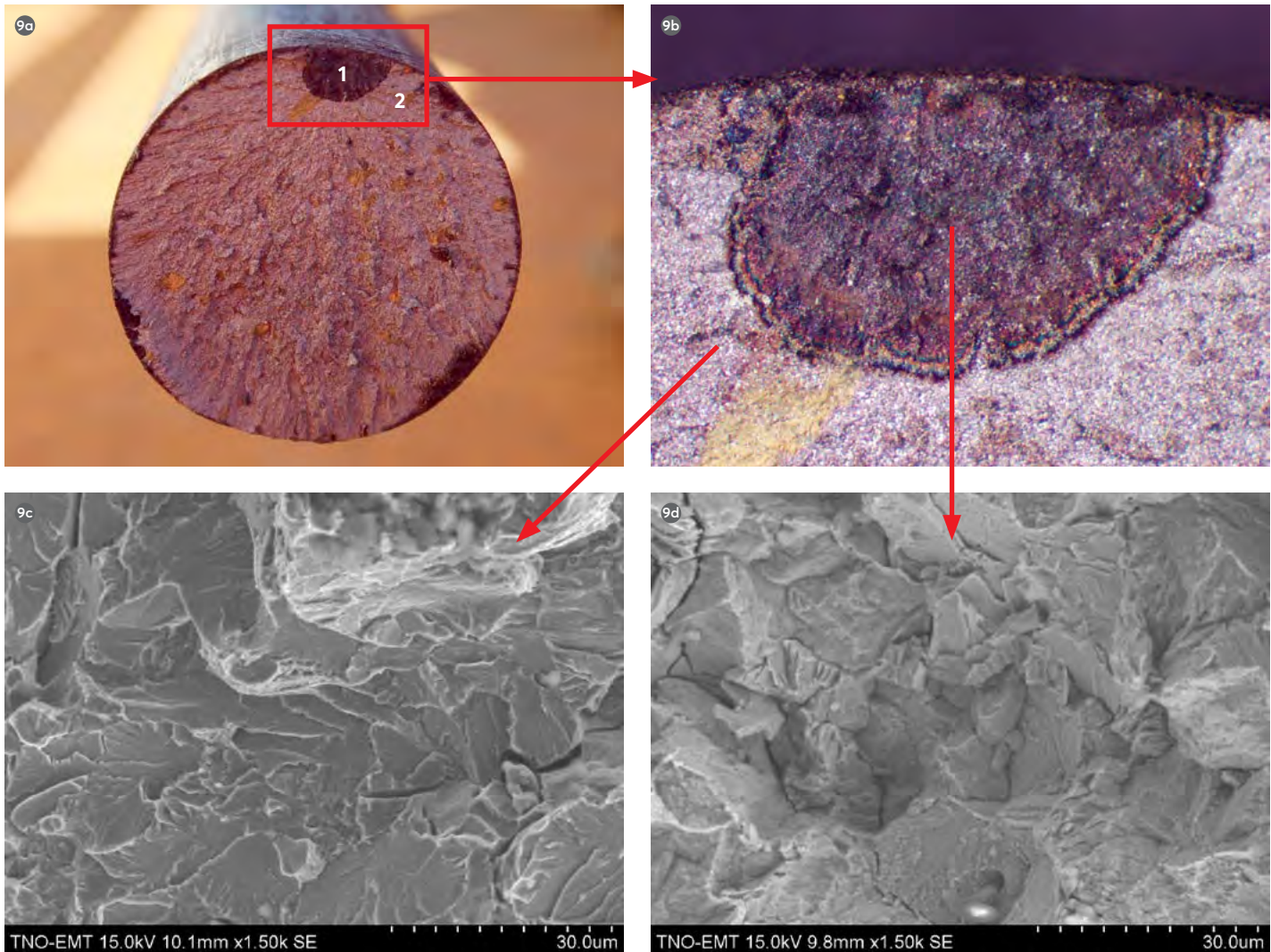
→ Bij moot 15 waren drie rijen van acht trekpalen bereikbaar om te testen. Van die 24 trekpalen was bij vijf stuks de voorspanstaaf gebroken, op een diepte die varieerde van 2,5 m tot 7,5 m (fig. 8).

→ Bij andere moten, waar geen aanwijzingen waren voor een begin van bezwijken, zijn steekproefsgewijs trekpalen gecontroleerd. Daarbij bleek dat nog eens drie van de 27 geteste voorspanstaven waren gebroken (oftewel 11%), op een diepte die varieerde van 1,9 m tot 4,9 m.

Alle gebroken voorspanstaven zijn direct visueel beoordeeld. Daarbij zijn over de lengte van de staven geen bijzonderheden waargenomen. De breukvlakken waren relatief vlak, zonder een duidelijke insnoering van de staven (fig. 9). Daarna is van alle gebroken voorspanstaven het deel met het breukvlak afgeslepen en veilig gesteld voor nader onderzoek in een laboratorium.

Bij een aantal niet-bezweken trekpalen is de voorspankracht in de staven gemeten. Dit is gedaan door met een vijzel een trekkracht op de voorspanstaaf in stappen van 50 kN →





aan te brengen en de verplaatsing van de staafkop te meten. De belasting waarbij de kop van de voorspanstaaf omhoog begint te komen is de voorspankracht in de staven. De gemiddelde voorspankracht die is gemeten in 19 geteste (60-tons) trekpalen bedraagt 629 kN, net boven de beoogde voorspankracht van 600 kN. Bij deze testen bezweek één voorspanstaaf, nadat op die voorspanstaaf een trekkracht was aangebracht van 700 kN (de oorspronkelijk aangebrachte voorspankracht). Om breuk van meer voorspanstaven te voorkomen, zijn er na dit incident alleen in moot 15 nog voorspanstaven getest met een kleinere belastingstap van 20 kN. Hierbij is geen verdere schade ontstaan.

Laboratoriumonderzoek

Om de oorzaak van het breken van de voorspanstaven te achterhalen, zijn de afgeslepen delen van de voorspanstaven in het laboratorium van TNO onderzocht.

Breukvlakken In totaal zijn zeven van de veertien beschikbare breukvlakken metalurgisch onderzocht. De breukvlakken van deze zeven voorspanstaven vertonen alle eenzelfde bezwijkpatroon. Op de breukvlakken zijn nabij de buitenomtrek één of meer relatief kleine ‘corrosiegebiedjes’ duidelijk zichtbaar, met bij elk breukvlak, vanuit één van die gebiedjes, een waaivormig breukpatroon (fig. 9). Die kleine corrosiegebiedjes blijken initiële scheurtjes te zijn, van waaruit

een waaivormige splijtbreuk is ontstaan. De waargenomen splijtbreuk is typisch voor breuk die optreedt met een zeer hoge scheurgroeiensnelheid en duidt op bros bezwijken van de voorspanstaaf. Nader onderzoek van de delen van het breukvlak wees uit dat in de corrosiegebiedjes sprake is van interkristalijn verlopende scheurtjes; scheurtjes die langs de korrelgrenzen van het staal lopen. In de splijtbreuk is sprake van een transkristallijne scheurgroei; scheurtjes die door de korrels van het staal lopen.

Uit een EDS-analyse (Energie Dispersie Spectroscopie) blijkt dat op de breukvlakken (zowel op de corrosiegebiedjes als op de splijtbreukvlakken) sporen van Na, Ca, K en Mg aanwezig zijn. Dit zijn geen elementen van het staal en moeten dus afkomstig zijn uit het omringende milieu, zeer waarschijnlijk uit het beton.

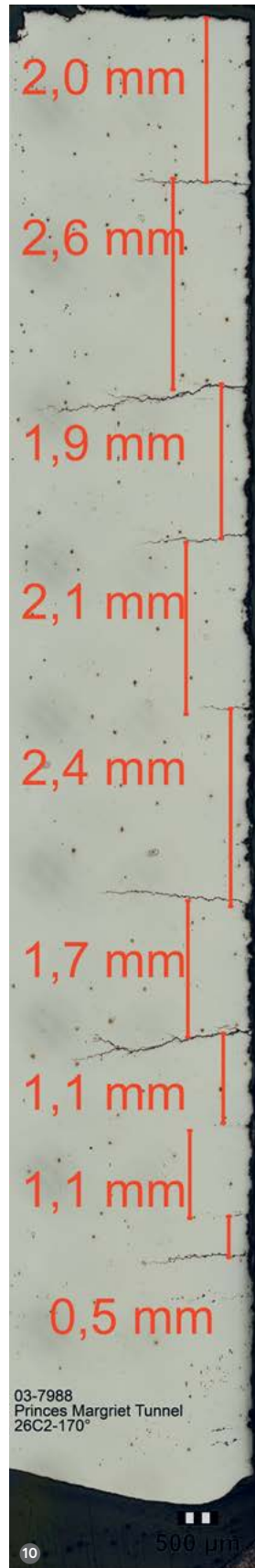
Buitenontrek Op de buitenomtrek van de voorspanstaven is, ter hoogte van de breukvlakken, geen visueel waarneembare corrosie aanwezig. Wel zijn in de buitenomtrek van enkele voorspanstaven scheurtjes aangetroffen in de zone direct boven het breukvlak, 'secundaire scheuren' genoemd.

Bij twee voorspanstaven is aan de buitenzijde van de voorspanstaaf een verticale doorsnede gemaakt tot circa 20 mm boven het breukvlak. In die twee doorsneden is een groot aantal secundaire scheuren zichtbaar die interkristalijn verlopen en veelal meerdere vertakkingen hebben (fig. 10). Vanaf een zekere scheurdiepte treedt transkristalijn scheurgroei op (scheuren door de korrels van het staal), dat overeenkomt met een splijtbreuk.

Oorzaken Het waargenomen breukbeeld kan in principe zijn veroorzaakt door de volgende mechanismen:

- vermoeiing als gevolg van een wisselende belasting;
- galvanische corrosie;
- microbiële corrosie/aantasting (MIC);
- waterstofverbrossing;
- spanningscorrosie.

De eerste drie mechanismen zijn op basis van de kenmerken van de breukvlakken en



Om tunnelvisie te voorkomen is een stapsgewijze scenarioanalyse uitgevoerd

HERSTEL

Om de veiligheid van de tunnel op lange termijn te kunnen garanderen, wordt de gehele fundering vernieuwd en versterkt, en worden de tunnelwanden steviger verankerd. Dat wordt gedaan door meer dan 1.000 nieuwe trekpalen te plaatsen. De nieuwe trekpalen worden met behulp van een speciale methode door de betonnen vloer de grond in geboord, tegen de waterdruk in. Deze methode is zo uitgevoerd dat er geen water in de tunnel omhoog kan komen tijdens het aanbrengen van de trekpalen. Bemaling van het grondwater is daardoor niet nodig. Het op deze wijze herstellen van de tunnel duurt langer, maar de kans op schade aan omliggende bebouwing wordt hiermee geminimaliseerd. Voor meer informatie zie <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/projectenoverzicht/a7-herstel-prinses-margrietunnel>.

de corrosieproducten gefalsificeerd. De falsificatie van MIC is tevens onderschreven door een separaat, microbiologisch onderzoek.

De laatste twee mechanismen hebben veel vergelijkbare kenmerken en zijn moeilijk van elkaar te onderscheiden. Naar het oordeel van TNO is loog-spanningscorrosie de meest waarschijnlijke oorzaak van het breken van de voorspanstaven. Dit is spanningscorrosie die is geïnitieerd doordat de voorspanstaaf in contact is geweest met loog (cement- en/of poriewater). Dit is geconcludeerd op basis van de op de breukvlakken aangetroffen elementen, de interkristallijne scheurgroei in de breukvlakken en de secundaire, interkristallijne scheuren in de zone boven de breukvlakken. Op verzoek van Rijkswaterstaat heeft Element Materials Technology een second opinion gegeven op de conclusie van TNO [6, 7]. Element heeft daarbij aangegeven dat naar hun oordeel scheurvormige waterstofschaade het meest waarschijnlijk is. Hierbij is initieel sprake van waterstofvormende corrosie en vervolgens breuk als gevolg van waterstofverbrossing.

Scenarioanalyse

Tijdens het veldonderzoek is geconstateerd dat een aantal voorspanstaven van de moten 15 en 26 zijn gebroken. Het ligt voor de hand om dat direct te zien als oorzaak van het omhoog komen van de moten. Dit kan echter tunnelvisie zijn. Het veldonderzoek heeft namelijk niet uitgewezen waar het bezwijken van de moten is begonnen, waardoor op voorhand niet kan worden uitgesloten dat het bezwijken is begonnen met een ander schademechanisme en dat de breuk in de voorspanstaven gevolgschaade is. Om deze reden is een stapsgewijze scenarioanalyse uitgevoerd, waarbij is gestart bij de opgetreden schade, bij de beginfase van het bezwijken van de moten 15 en 26, waarbij die moten aan één zijde circa 5 mm omhoog zijn gekomen.

In het algemeen geldt dat het omhoog komen van een moot ontstaan moet zijn doordat de paalfundering niet meer in staat is om de opwaartse belasting door het water te weerstaan. Omdat de paalfundering al circa 45 jaar heeft gefunctioneerd, is het

zeer onwaarschijnlijk dat de initiële sterkte van de paalfundering onvoldoende was. Dat betekent dat de schade moet zijn ontstaan door de volgende bezwijkmechanismen of een combinatie van beide:

- De opwaartse waterbelasting is dusdanig ver toegenomen dat de paalfundering daarvoor is overbelast en bezwaken.
- De sterkte van de paalfundering is in de loop van de tijd afgenomen, totdat de paalfundering niet meer in staat was om de optredende waterbelasting op te nemen.

Ten aanzien van de waterbelasting geldt dat er geen aanwijzingen zijn dat er nabij de tunnel sprake is geweest van een substantiële verhoging van de waterdruk tegen de tunnelvloer waardoor de paalfundering is overbelast. De waterbelasting is onder alle moten tegelijk aanwezig. Als de fundering onder één moot door waterbelasting bezwijkt, zal deze omhoog komen en roteren. Door deze rotatie loopt de moot klem tussen zijn buurmoten. De rotatie is zichtbaar in de vervormingsmetingen. Het is onwaarschijnlijk dat de naastgelegen moten dan zowel de verhoogde waterdruk als de extra belasting uit de bezwaken moot kunnen opnemen.

Het optreden van een eventuele overbelasting is ook gecontroleerd op basis van het gedrag van de paalfundering, in relatie tot de opgetreden vervorming van circa 5 mm in de beginfase van bezwijken. Dat gedrag wordt enerzijds bepaald door de geotechnisch weerstand van de trekpalen, dat wil zeggen de weerstand tegen het uit de grond trekken, en anderzijds door de constructieve weerstand van de verbinding van de trekpalen met de tunnelvloer, de verbinding die is gerealiseerd met de voorspanstaven.

Ten aanzien van het geotechnische gedrag van een paal dan wel een paalgroep geldt dat de vervormingscapaciteit circa 10 mm bedraagt voordat deze geotechnisch bezwijkt. Omdat het begin van het bezwijken bij de moten 15 en 26 is opgetreden bij een verticale verplaatsing die beduidend minder is dan 10 mm, namelijk circa 5 mm, is het zeer onwaarschijnlijk dat de palen, geotechnisch gezien, zijn overbelast.

Ten aanzien van het constructief gedrag van de verbinding van de vloer met de

trekpalen geldt dat de vervormingscapaciteit van de voorspanstaven beduidend meer zou moeten zijn dan 5 mm voordat gevaar van breuk optreedt. De bij het begin van bezwijken opgetreden verplaatsing van circa 5 mm vormde voor de palen en voorspanstaven in principe een toelaatbare constructieve belasting.

Bovenstaande analyses falsificeren een overbelasting van de fundering door een toename van de opwaartse waterbelasting. Dat betekent dat de sterkte van de paalfundering in de loop van de tijd is afgenomen. De geotechnische capaciteit van een trekpaal dan wel een groep trekpalen neemt gedurende de levensduur van de paalfundering in principe niet af. De sterkte van de verbinding van de vloer met de trekpalen kan in de tijd wel afnemen. Vermoeiing en corrosie kunnen namelijk resulteren in een afname van de belastbaarheid van de voorspanstaven in de tijd.

Samenvattend volgt uit het bovenstaande dat het zeer waarschijnlijk is dat het begin van het bezwijken van de moten 15 en 26 is veroorzaakt door een afname van de belastbaarheid van één of meer voorspanstaven in de tijd, hetgeen aansluit bij de waargenomen gebroken voorspanstaven bij het veldonderzoek. Dit wordt ook onderschreven door de voorspanstaaf die bij een trekproef reeds bezweek bij 700 kN.

Oorzaak bezwijken voorspanstaven Uit het in het laboratorium uitgevoerde metallurgisch onderzoek is geconcludeerd dat loog-spanningscorrosie of scheurvormige waterstofschade de meest waarschijnlijk oorzaak is van het breken van de voorspanstaven. Voor beide mechanismen zijn drie randvoorwaarden noodzakelijk:

- Het staal moet gevoelig zijn voor spanningscorrosie en/of waterstofschade.
- Er moet sprake zijn van een substantiële trekspanning in de voorspanstaven.
- De voorspanstaven moeten zich in een corrosief milieu bevinden.

In het algemeen geldt dat alle koolstofstaal-soorten een zekere gevoeligheid hebben

voor loog-spanningscorrosie en voor scheurvormige waterstofschade. Dit geldt dus ook voor het staal waarmee de voorspanstaven zijn geproduceerd. Vanwege de voorspanning in de staven is er ook sprake van een permanente, substantiële trekspanning.

Ten aanzien van het milieu geldt in principe dat de voorspanstaven door beton en Denso-band worden afgeschermd voor het omringende milieu. Bij het metallurgisch onderzoek is vastgesteld dat op de breukvlakken sporen van Na, Ca, K en Mg aanwezig waren. Dat zijn geen elementen van het staal, maar zeer waarschijnlijk elementen afkomstig uit het beton van de trekpalen. Dit impliceert dat er zeer waarschijnlijk sprake is geweest van onvolkomenheden in de Denso-band. Via die onvolkomenheden is dan cement- en/of poriewater door de Denso-band gepenetreerd en doorgedrongen tot aan de voorspanstaven, waarmee het corrosieve milieu is ontstaan. Het uitgevoerde onderzoek heeft vooralsnog geen uitsluitend gegeven over de oorzaak voor het mogelijk ontstaan van onvolkomenheden in de Denso-band.

Conclusies van het onderzoek

Het onderzoek heeft uitgewezen dat moot 26 gefaseerd is bezweken doordat de sterkte van de paalfundering in de loop van de tijd is afgenomen. Dit proces wordt veroorzaakt door het breken van de voorspanstaven in de trekpalen. De voorspanstaven zijn gebroken als gevolg van loog-spanningscorrosie of scheurvormige waterstofschade. Dit ontstaat zeer waarschijnlijk door onvolkomenheden in de omhulling om de voorspanstaven, waardoor cement- of poriewater vanuit het beton is doorgedrongen tot aan de voorspanstaven.

Het onderzoek heeft tevens uitgewezen dat bij andere moten van de toeritten sprake is van hetzelfde proces, maar nog in een minder ver gevorderd stadium. ●

LITERATUUR

- 1 Onderzoek oorzaak falen fundering Prinses Margrietunnel – Eindrapportage; Deltares/TNO, 29 september 2023.
- 2 Borsje, H., Terwel, K., Wat is forensisch engineering? *Cement* 2024/1.
- 3 Vlaketunnel - Uitwerking kijkproef moten 8, 9, 10 en 12 Oost; verslag en analyse resultaten, Deltares, januari 2011.
- 4 Kieft, P., Tunnel onder het Prinses Margrietkanaal. *Cement* 1976/4.
- 5 <http://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws>.
- 6 Second opinion rapportage schadegevallen Vlaketunnel en Prinses Margriet Tunnel, Element Materials Technology, 10 oktober 2023.
- 7 Beoordeling second opinion corrosiemechanisme voorspanstaven Prinses Margrietunnel, Deltares, 16 november 2023.