



Maastunnel in herstel

Nieuw beton voor ondervloer en rijvloer



↓
**PROJECT
GEGEVENS**

opdracht

Renovatie en
Restauratie Maastunnel
opdrachtgever

Gemeente Rotterdam

opdrachtnemer

Combinatie Aanpak
Maastunnel (CAM),
bestaande uit
TBI-ondernemingen
Mobilis, Croonwalter
& dros en Nico de Bont

contractvorm

Maatwerkcontract

leverancier vezels

Bona Confiber

leverancier

brandwerende platen

Promatect

aanneemsom

€ 65 miljoen

uitvoering

zomer 2017 - zomer 2019

website

[www.rotterdam.nl/
maastunnel](http://www.rotterdam.nl/maastunnel)

Sinds juli 2017, zes jaar nadat betonaantasting van de constructieve ondervloer was geconstateerd, wordt gewerkt aan de renovatie en restauratie van de Maastunnel in Rotterdam. Hierbij bleek constructief betonherstel nodig. 150 mm van de constructieve ondervloer is met hydrojetten verwijderd en met een met kunststofvezels versterkt betonmengsel hersteld.

Er waren, 75 jaar na opening, diverse redenen om de Maastunnel te renoveren. Vanuit betonoogpunt was de belangrijkste reden de schade aan de constructieve ondervloer, onder de ventilatiekanalen. Die kanalen bevinden zich onder de betonnen rijdekken, onder elke buis drie (fig. 2). De aantasting bleek te zijn veroorzaakt door chloriden uit dooizouten, die de vloer bereikten via dwarskokers in het ventilatiesysteem en door scheuren in het rijdek.

Andere redenen voor renovatie waren beschadiging van het kenmerkende tegelwerk, moderniseren van de tunneltechnische installaties (TTI) en een upgrade op het gebied van veiligheid, mede ingegeven door de tunnelwetgeving die enkele jaren geleden is vernieuwd.

Meer over de redenen van de renovatie en de aanpak staat in het artikel 'Tweede leven Maastunnel' uit *Cement* 2016/7. In dit tweede artikel wordt dieper ingegaan op het herstel van het beton.

Constructief betonherstel

Om de problemen met het beton voor zowel de ondervloer als de rijvloer op te lossen, zijn verschillende herstelvarianten

beschouwd. De twee belangrijkste waren kathodische bescherming (KB) voor zowel ondervloer als het rijdek en constructief betonherstel tot achter de bovenste wapening van de ondervloer inclusief de gehele vervanging van de rijvloer.

Beide varianten bleken haalbaar, maar gekozen is voor het constructief betonherstel met de gehele vervanging van het rijdek. Voornaamste voordeel hiervan is dat door het verwijderen van het rijdek de ondervloer goed bereikbaar is voor werkzaamheden. Daarnaast heeft deze variant minder onderhoud en beheer nodig.

Bij constructief betonherstel wordt zowel het met chloriden verontreinigde beton verwijderd als de wapening gereinigd via hydrojetten. Dit is een methode waarbij het beton met extreem hoge waterdruk wordt verwijderd. De wapening wordt vervolgens door nieuw aangebracht beton omhuld, waardoor de wapening weer voor minstens 50 jaar is gepassiveerd. Om de werkzaamheden uit te voeren, wordt de autotunnel buis voor buis afgesloten, eerst de westelijke en vervolgens de oostelijke. Daardoor is tijdens de werkzaamheden steeds één tunnelbuis beschikbaar voor het verkeer van zuid naar noord.

auteurs



DR. IR. KEES BLOM

**Senior Adviseur
Constructies**

Ingenieursbureau
gemeente Rotterdam /
TU Delft, fac. CiTG



**IR. ALEX
GELLWEILER**

**Projectleider
Betonherstel**

Ingenieursbureau
gemeente Rotterdam



IR. ERIK TAFFIJN

Hoofdconstructeur

Ingenieursbureau
gemeente Rotterdam

Ontwikkeling betonmengsel

Om te bepalen welk betonmengsel het meest geschikt was voor het herstel van de onder-vloer, zijn vijf mengsels ontworpen en beproefd, zowel in het laboratorium als in proefvakken in de tunnel zelf.

Het beton voor het herstel moet de bestaande wapening weer conserveren en daarnaast ervoor zorgdragen dat het beton en de wapening weer constructief samenwerken. Vandaar dat eisen zijn gesteld aan de hechting met de ondergrond, het vormen van een basisch milieu, 50 jaar levensduur, het niet loskrimpen en de toelaatbaarheid van een beperkte mate van scheurvorming.

Op basis van deze eisen zijn mengsels beproefd in het laboratorium (fig. 3) op basis van tras en hoogovenslak met toevoeging van PVA-microvezels of PP-macro- of -microvezels (PPM). Daarbij is ook gevarieerd in cementshoeveelheid, trashhoeveelheid, aandeel vulstof (kalksteenmeel), fijne en grove toeslag, type superplastificeerder en nabehandelingmethode.

De testen bestonden uit standaardbeproevingen, maar ook gerichte proeven zoals drie- en vierpuntsbuigproeven (fig. 3) om het nascheurgedrag te bepalen, mengen verwerkingstesten (invloed van grote hoeveelheden vezels), pull-off-testen (hechting) en een versnelde corrosietest (gedrag bij eventuele nieuwe corrosie, zie kader

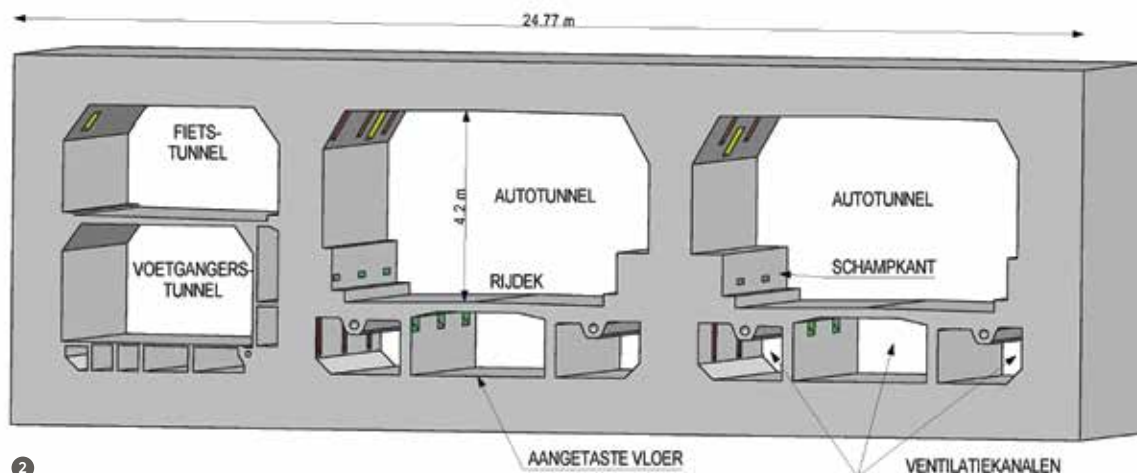
'Versnelde corrosietest'). Het onderzoek heeft geleid tot de keuze van vijf betonmengsels (tabel 1) die verder zijn beproefd in de proefvakken in de tunnel.

Tabel 1: Selecteerde mengsels voor het veldonderzoek

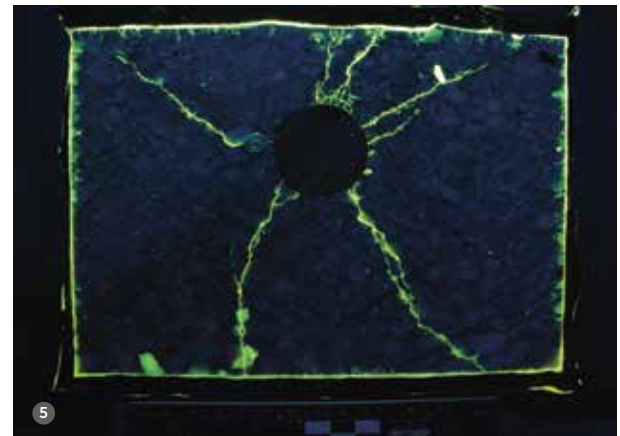
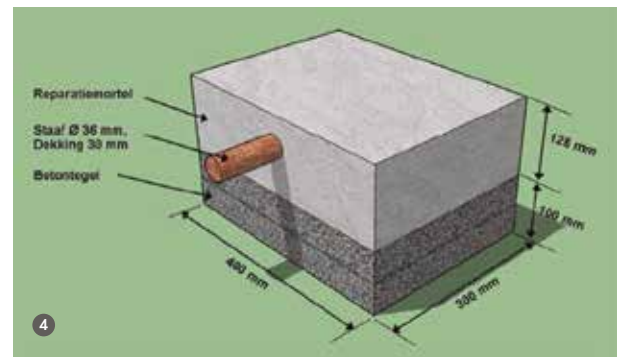
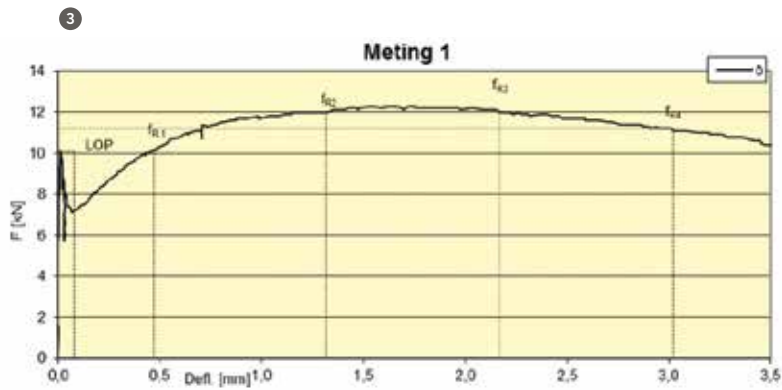
recept OG26	proefvak N4	26 kg/m ³ PVA-microvezels in mortel
recept ON06	proefvak N3	6 kg/m ³ PP-macrovezels in beton
recept ON25	proefvak N1	25 kg/m ³ PP-macrovezels in beton
recept ON01	proefvak N5	1,35 kg/m ³ PP-microvezels in beton
recept OG15	proefvak N2	15 kg/m ³ PVA-microvezels in beton

Mengselkeuze

Uiteindelijk zijn alle laboratorium- en veldonderzoeksresultaten geëvalueerd, waarbij ook uitvoeringsaspecten als meng-, transporteer-, verdicht- en afwerkbaarheid zijn meegewogen. Dit heeft geleid tot de keuze van een betonmengsel van 420 kg CEM III/B, met slechts 1,35 kg/m³ PP-microvezels (Confiber) en een maximale korrelgrootte van het toeslagmateriaal van 16 mm. Dit mengsel presteert beter op onder andere de te verwachten krimp, hechting en uitvoeringsaspecten, maar minder op het nascheurgedrag. Een verminderd nascheurgedrag is ondergeschikt omdat in het her-stelde beton en de gereinigde wapening geen nieuwe corrosie optreedt.

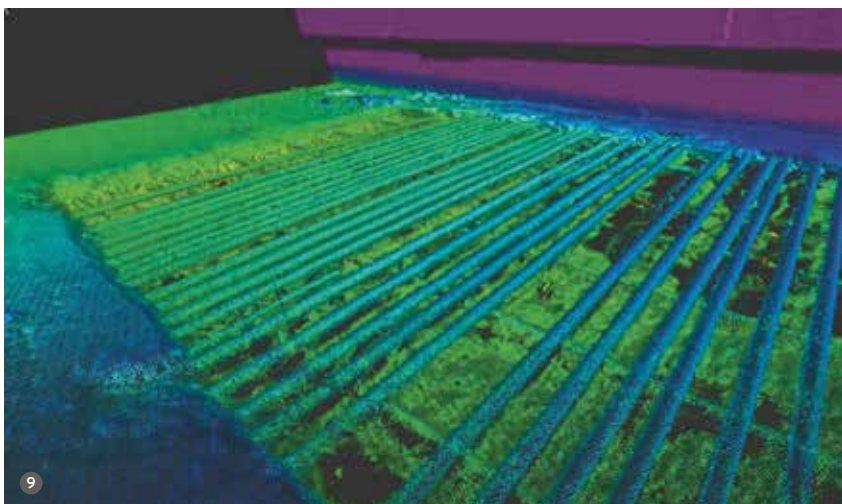


2



VERSNELDE CORROSIE TEST

Het doel van een versnelde corrosietest is het inzichtelijk maken van scheuren in het beton ten gevolge van expanderende roestproducten op de wapening. Door stroom op de wapening te zetten, kan het corroderen worden beïnvloed (omgekeerd aan kathodische bescherming. Nu wordt juist corrosie opgewekt in plaats van voorkomen). Beton waarbij na het ontstaan van de scheur nog meer kracht via de scheur kan worden overgedragen (vezels, strain-hardening), zal meer, maar kleine, scheuren vertonen. Foto 5 geeft een karakteristiek resultaat van het fluorescentieonderzoek van beton met weinig vezels.



Om te bepalen of hydrojetten de bestaande door chloride aangetaste wapening afdoende reinigt, zijn op uitgezaagde betonstaven uit een proefvak analyses uitgevoerd op het chloridegehalte voor en na hydrojetten (met de Bresle-test). Het gemiddelde chloridegehalte op de staven bleek door het hydrojetten te zijn gedaald van 51 mg/m² tot 16 mg/m². Deze laatste waarde is, gebaseerd op eisen vanuit de staalindustrie, voldoende laag om het toekomstige risico op corrosie ten gevolge van restproducten zeer klein in te schatten. De toevoer van nieuwe chloriden wordt gestopt door het nieuwe ventilatieconcept, een goede kwaliteit rijvloer en de toepassing van een vloeistofdicht membraan op de rijvloer.

Verhoogd tunneldak

Een van de eerste activiteiten in de periode vóór de afsluiting van de westelijke autotunnelbuis in juli 2017, was het aanbrengen van verhoogde tunneldaken ter plaatse van de tunnelmonden. Dit om het plaatsen van ventilatoren in de tunnelbuis mogelijk te maken, die nodig waren voor het gewijzigde ventilatieconcept. Tijdens de afsluiting is dit deel van het oude dak vervolgens weggezaagd en afgevoerd (foto 6).

Sloop rijvloer

Vervolgens is de rijvloer gesloopt. Hierbij moest rekening worden gehouden met de asbesthoudende ventilatiekokers die om de 3 m in de rijvloer aanwezig waren. Daarom is gekozen voor het in stukken zagen en afvoeren, waarbij de asbesthoudende delen zijn verpakt (foto 7).

Sloop ondervloer

Zoals gezegd is met behulp van hydrojetten het aangetaste beton van de ondervloer verwijderd en de wapening gereinigd. Er is in totaal circa 150 mm van de bovenzijde van de vloer verwijderd. Hierbij zijn waterstralen toegepast met circa 1000 bar. Voor de westbuis is gewerkt in repeterende vakken (om de 30 m) van 6,8 m breed en 6 m lang, 94 stuks in totaal (foto 8). Ook de voutes aan de langsijden van de ondervloer zijn gesloopt met een voor dit doel aangepaste hydrojetmachine.

CONSTRUCTIEVE VEILIGHEID TIJDENS UITVOERING

Omdat het beton tot op 30 mm achter de wapening wordt verwijderd, was het belangrijk de constructieve veiligheid tijdens de bouwfase te analyseren. Dit omdat tijdens de uitvoering alle belastingen aanwezig zijn, met name de 25 m waterdruk. Handberekeningen, niet-lineaire (DIANA, ATENA, fig. 10) en probabilistische analyses zijn uitgevoerd om aan te tonen dat de veiligheid was verzekerd.

Het risico op het optreden van een enkele scheur, en daardoor minder hechting tussen het nieuwe en oude beton, is verkleind door de toepassing van vakken van maximaal 6 m lengte met een hart-op-hartafstand van 30 m. Een andere voorwaarde was dat de ondervloer en voutes nooit gelijktijdig gesloopt mochten zijn. Tijdens de uitvoering is aanvullend ook de opbolling van de ondervloer gemonitord.

Omdat bij het hydrojetten toch enige schaduwwerking optreedt, bleek lokaal handmatig sloopwerk noodzakelijk.

De diepte van het slopen is per vak handmatig bijgehouden. Om een beeld te krijgen van de gemiddelde sloopdiepte over een volledig vak is voor een van de vakken een 3D-scan gemaakt (fig. 9). Daaruit bleek dat een gemiddelde sloopdiepte was gerealiseerd van 0,15 m, waarmee aan de eisen van veiligheid en voldoende ruimte onder het bovenwapeningsnet (30 mm) werd voldaan.

Desondanks bleek bij een aantal vakken lokaal dieper te zijn gesloopt, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van ingestorte onderdelen, een niet optimale afstelling van de nozzles en/of overlappingen. Hoewel in de analyses al was geanticipeerd op lokaal dieper slopen, zodat het hydrojetproces zo weinig mogelijk werd verstoord, moest bij enkele vakken een nadere rekenkundige

beschouwing van de veiligheid uitsluitend geven.

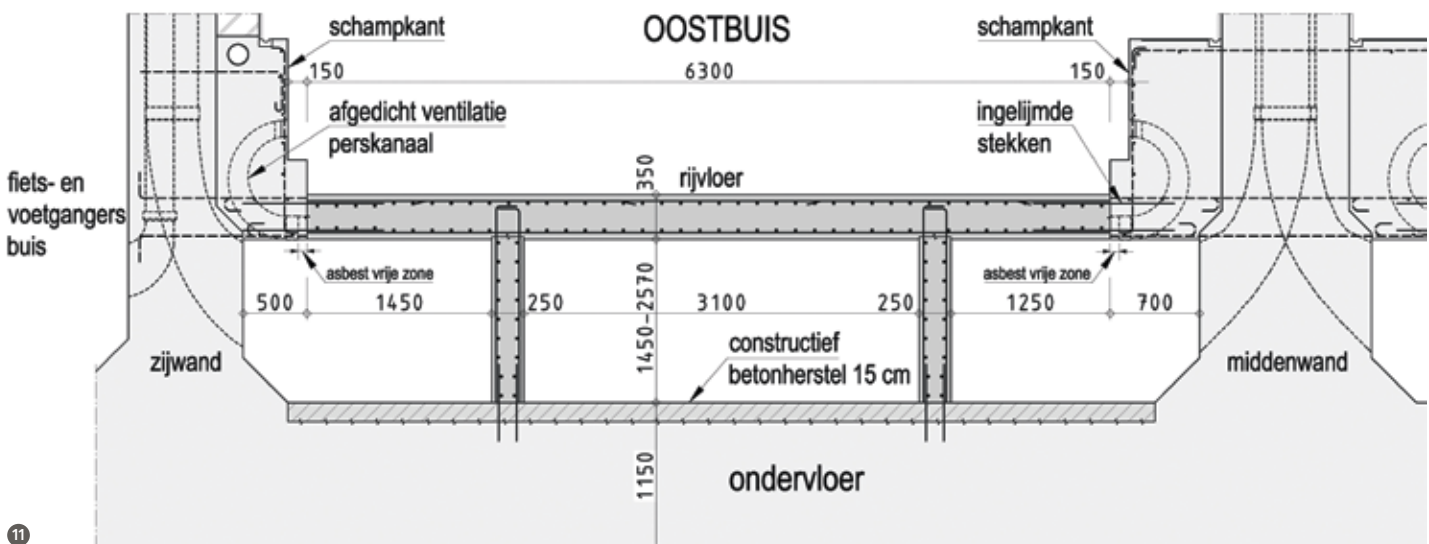
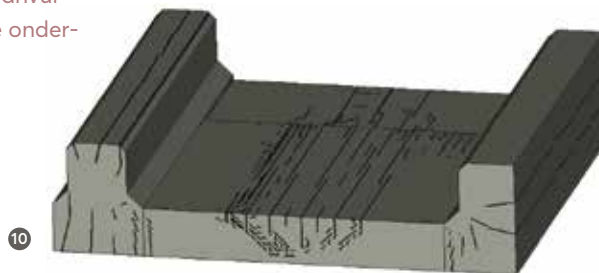
Na het hydrojetten werd het betonpuin verwijderd door een grondzuigwagen. Hierbij werd gecontroleerd of de betonstaalwapening aan de onderzijde minimaal 30 mm vrij was. Er werd vooraf rekening mee gehouden dat er eventuele scheuren in het vrijgekomen oppervlak moesten worden geïnjecteerd, maar dat bleek niet nodig.

Met een visuele beoordeling kon worden vastgesteld of de wapening voldoende was gereinigd. Hierbij dienden foto's uit een vooraf uitgevoerde analyse van het chloridegehalte in het betonstaal als referentiekader. Vervangende betonstaalwapening was niet noodzakelijk.

Uitvoering betonherstel ondervloer

Vóór het storten van het nieuwe beton werden eventuele plassen verwijderd en waar nodig werd het beton juist bevochtigd. Vervolgens werd het beton gestort.

Het treintje van de sanering verliep dusdanig dat circa drie dagen na het hydrojetten en aanstorten van een vak van 6 m 50% van de betonsterkte was behaald. Op dat moment kon een vaklengte van 6 m



Er is in totaal circa 150 mm van de bovenzijde van de vloer verwijderd. Hierbij zijn waterstralen toegepast met circa 1000 bar

worden opgeschoven. Op deze wijze lag er nooit meer dan 6 m bovenwapening vrij over een tunnallengte van 30 m. Deze lengte was bepaald in de analyses van de constructieve veiligheid.

De nabehandeling van de vakken bestond uit het dichtschuren van het oppervlak en adequaat afdekken gedurende één week.

De uiteindelijk behaalde kwaliteit van het betonherstel moet worden getoetst aan de eisen die hieraan zijn gesteld. Slechts bij enkele vakken is lokaal in het midden lichte scheurvorming geconstateerd ($< 0,1$ mm), ook na inmiddels één jaar. In de stortvlakken in langs- en dwarsrichting is geen scheurvorming geconstateerd. Uit in-situ metingen op geboorde cilinders bleek dat de gemiddelde hechtsterkte tussen het nog aanwezige beton en het nieuw gestorte beton $1,4$ N/mm² bedraagt.

Nieuwe rijvloer

Na de ondervloer was de nieuwe rijvloer aan de beurt (fig.11). Deze is via twee wandjes verbonden met de ondervloer en met de twee zijwanden. De stortmoten van de rijvloer hadden een lengte van 15 m, de stortmoten van de wandjes onder de rijvloer 45 m (op verzoek van de aannemer). Als betonmengsel is een traditioneel CEM III/B C35/45 toegepast.

Speciale aandacht ging met name uit naar de kwaliteit van de verbinding met de wanden inclusief schampkanten. Deze verbinding is uitgevoerd via ingelijmde stekken. Aandacht was met name nodig omdat er om de 3 m in de schampkant asbesthoudende ventilatiekokers en doorvoeren voor kabels en leidingen aanwezig waren. Hierdoor werd de effectieve betondoorsnede voor het aanbrengen van stekken met circa 30% gereduceerd. De asbesthoudende ventilatiekokers zijn al tijdens een asbestsanering in 2012 afgedicht met schuimbeton.

Deze schampkanten, feitelijk betonnen consoles, moesten om monumenttechnische redenen worden gehandhaafd. Om het zaagwerk ten behoeve van het slopen van de rijvloer te vergemakkelijken, is

150 mm breedte van de bestaande vloer gehandhaafd. Wel was de onderzijde van deze schampkant lokaal door dooizouten aangetast, waardoor deze gerepareerd moet worden.

Landtunnels en open toe- en afritten

In de landtunnels en bij de open toe- en afritten is slechts lokaal betonherstel uitgevoerd omdat de betonaantasting daar beperkt was. Op de open toe- en afritten is ook de coatinglaag op de betonwanden vervangen en zijn de dilatatievoegen lokaal hersteld.

Leermomenten en optimalisaties

Voor de oostelijke tunnelbuis is een aantal optimalisaties doorgevoerd. Uit financieel oogpunt zijn bij het slopen van de rijvloer alleen de delen rondom de asbesthoudende kokers weggezaagd. De rest is via knippen gesloopt.

Bij de ondervloer is het hydrojetvak gehalveerd tot $3,4 \times 6$ m² (fig. 8). Dit ten behoeve van een betere logistiek. Dit was acceptabel omdat in de eerste buis de stortvoegen van goede kwaliteit bleken te zijn. Ook is een betere afstelling van de hydrojetmachine doorgevoerd met als resultaat dat de sloopdiepte overal binnen de toleranties is gebleven.

Bij de nieuwe rijvloer is meer aandacht geschonken aan het bepalen van de juiste positie van de boorgaten ten behoeve van de in te lijmen stekken. Dit vergde meer voorbereiding die zich wel heeft uitbetaald in een kwalitatief betere en snellere uitvoering. Meer aandacht is gegeven aan het nieuwe membraan, met name naast het asfalt ter plaatse van de schampkanten.

In zijn algemeenheid is gebleken dat in een contractvorm waarbij externe controles en toetsingen zijn ingebouwd er toch meer toezicht vanuit de opdrachtgever benodigd is. Alles met het gezamenlijke doel om op tijd en binnen de kosten tot een kwalitatief goed product te komen.

Monitoring

Bij de uitvoering zijn verschillende typen monitoring toegepast. Zo is de gronddekking



CONSTRUCTIEVE BRANDWERENDHEID

De wettelijke minimale eisen met betrekking tot constructieve brandwerendheid bedragen 60 minuten voor de riviertunnel en 30 minuten voor de landtunnel. Vanuit analyses en een brandproef in de landtunnel (foto 12) is gebleken dat een 60 minuten RWS-brand kan worden opgenomen, mede dankzij de vanuit de bouw aanwezige hittebestendige chamottetegels. Ter plaatse van de tunnelmonden, waar nieuwe daken zijn gemaakt, is een bescherming met Promatect-T-beplating toegepast boven de nieuwe ingangsv ventilatoren (foto 13). Deze spelen een essentiële rol in het nieuwe tunnelveiligheidsconcept.

op de tunnel regelmatig gescand gedurende het slopen van de ondervloer en de rijvloer tot en met het aanbrengen van de nieuwe rijvloer. De minimaal benodigde gronddekking is gedurende de werkzaamheden niet onderschreden.

Ook is de globale ligging van de tunnel gemonitord. Daaruit bleek dat deze niet werd beïnvloed door de (sloop)werkzaamheden. Wel was de invloed van het getijde merkbaar. Lokaal is tijdens het hydrojetten het inwendige hoogteverschil van de tunnel gemeten met als doel een indicatie van de doorbuiging van de vloer te verkrijgen. Het resultaat was nagenoeg nihil.

In een vak van de herstellende ondervloer in de oostbuis zijn sensoren opgenomen die temperatuur en geleiding meten. Het doel daarbij was het opsporen van delaminatie. Delaminatie leidt immers tot een ander vochtgehalte in de vloer en daarmee een betere geleidbaarheid. Verder heeft de TU Delft smart-aggregates-sensoren geplaatst, waarbij een verandering in de golfsnelheid een indicatie van de betonkwaliteit (delaminatie/scheurvorming) betekent. Het komende jaar zijn de resultaten te verwachten.

TTI

Bijna alle bestaande TTI-componenten zoals luidsprekers en camera's zijn vervangen door nieuwe. Daarnaast zijn nieuwe TTI-componenten toegevoegd in verband met het nieuwe tunnelveiligheidsconcept. Hierbij kan worden gedacht aan de ingangsv ventilatoren. De nieuwe TTI-componenten zijn zorgvuldig ontworpen en ingepast omdat de Maastunnel een rijksmonument is. Bij de keuze en locatie van de TTI-componenten in de tunnel zijn continu afwegingen gemaakt om te voldoen aan het tunnelveiligheidsconcept en/of het behouden van de monumentale waarde.

Tegelwerk

Een belangrijk monumentaal aspect is het tegelwerk. De originele tegels op de wanden die voldoende hechting hadden, zijn behouden. Dit geldt vooral voor de originele tegels op de buitenwand van de riviertunnel die op een metselwerkondergrond in de mortel zijn gezet. Delen van de tunnelwanden zijn namelijk voorzien van metselwerkvoorzetswanden (foto 15). De overige tegels, met name op de binnenwand van de riviertunnel en de wanden van de landtunnels, worden vervangen door replicategels die zijn

12 Brandproef in de landtunnel, bron: Efectis

13 Verhoogd tunneldak met Promatect-T-beplating, nieuwe ingangsv ventilatoren en tegelwerk



COMPLEXE LOGISTIEK

Vanwege de sloop- en bouwtijd van één jaar per tunnelbuis, de vele multidisciplinaire activiteiten (vervangen TTI-componenten, herstel en vervanging betonconstructies en vernieuwen tegelwerk op de wanden) en de beperkte toegang tot het 1 km lange bouwterrein (in- en uitgang van de tunnel) is de afstemming van de werkzaamheden en de daarbij behorende logistiek complex.

Er zijn vijf mengsels beproefd op basis van tras en hoogovenslak met toevoeging van micro- en macrovezels



geproduceerd in Spanje. Het betreft circa 570.000 tegels voor de beide autotunnelbuizen (per vierkante meter worden 32 tegels toegepast). Nadat de oude tegels zijn verwijderd, worden de wanden uitgevlakt en op hoogte gebracht met een cementgebonden stuc. Vervolgens worden de nieuwe tegels op de nieuwe stuclaag gelijmd. Deze methode is voortgekomen uit de diverse proefvakken.

Vanwege de grote lengte van de betegelde wanden worden op regelmatige afstanden verticale dilatatievoegen toegepast. Uit proeven blijkt dat de hechting van de nieuwe tegels ruim voldoende is.

Planning

Eind december 2018 is het hydrojetten van de ondervloer van de tweede bus gereedgekomen. April 2019 was het betonherstel van de ondervloer en de rijvloer gereed alsmede het tegelwerk. Aan het vervangen van de tunneltechnische installaties in de tweede bus wordt de laatste hand gelegd. In augustus 2019 wordt de autotunnel weer opengesteld, waarna de fiets- en voetgangerstunnel worden gerenoveerd en gerestaureerd.

De eerste autobuis is gereed, de tweede nagenoeg. Het project ligt op schema: in augustus 2019 kan het autoverkeer de Nieuwe Maas weer in twee richtingen kruisen. ●