

Kiltunnel biedt inzicht in tunnelconstructies

# Zettingsgedrag en capaciteit van mootvoegen in zinktunnels

Het rijkswegennet in Nederland telt 57 tunnels, belangrijke en veelal onmisbare schakels. Deze kostbare objecten vragen in beheer en exploitatie de nodige aandacht met name als ze de ontwerplevensduur naderen. Circa een derde, voornamelijk afgezonken tunnels, is halverwege deze levensduur.

DR.IR. A.H.J.M. VERVUURT / DR.IR.DRS. C.R. BRAAM / IR.I. SCHOLS

Een tijdsgebonden fenomeen dat bij zinktunnels aandacht vraagt in het beheer wordt veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Zinktunnels zijn zo ontworpen dat de tunnel optredende (ongelijkmatige) zettingen volgt zonder dat deze zettingen grote krachten in de constructie veroorzaken. De ontwerpgedachte hierbij is dat de tunnel zich als een ketting gedraagt. Analyse wijst echter uit dat het beoogde zettingsgedrag in werkelijkheid vaak niet optreedt en dat enkele tunnels daardoor inmiddels lekken. De vraag rijst daardoor welke krachten in de constructie ontstaan en welke gevolgen dit mogelijk heeft voor het functioneren van de tunnel. Dit was reden om het zettingsgedrag van tunnels te analyseren in een afstudeeronderzoek, uitgevoerd door Ivar Schols aan de TU Delft. Een projectteam van InfraQuest, een samenwerkingsverband op het gebied van civiele constructies en wegen, bestaande uit specialisten van Rijkswaterstaat, de TU Delft en TNO, begeleidde het onderzoek.

## Zinkvoegen

Zinktunnels worden meestal toegepast daar

### IN 'T KORT - ZETTINGSGEDRAG TUNNELS

Zettingsgedrag van zinktunnels is vaak niet in lijn met de ontwerpgedachte achter de tunnels

De beoogde gelijkmatige kettinglijn treedt vaak niet op bij het zettingsgedrag

De Kiltunnel verschaft genoeg data voor een analyse van het zettingsgedrag

De krachten die werken op de mootvoegen verstoren het voorspelde zettingsgedrag



Lekwater in Drechtunnel (links) en afgeboerd beton in het dak van een tunnel.

waar een verkeersweg een waterweg kruist. Het afgezonken deel is, globaal gesteld, opgebouwd uit vier tot zeven elementen met elk een lengte van 80 tot 130 m. De elementen worden tijdens het afzinken tegen elkaar geplaatst en verbonden via de zogenaamde zinkvoegen. De elementen krijgen na positionering meestal een fundering op zand. Daartoe wordt zand aangebracht in de ruimte tussen de zinksleuf en de onderkant van het element (meestal door zandinjecties). Elk element bestaat uit enkele stortmoten met een lengte variërend van 18 tot 25 m. Het verhardingsproces en de daarbij optredende trekspanningen in langsrichting bepaalt de lengte van de moten. De moten worden koud tegen elkaar aan gestort en krijgen een waterstop (ingestort rubberprofiel met staalplaten) om lekkage via de stortvoegen (mootvoegen) te voorkomen. Een tunnelement wordt voorzien van langsvoorspanning die door de mootvoegen is doorgezet. De voorspankracht zorgt ervoor dat een tunnelement zich tijdens het transport en afzinken gedraagt als een stijf geheel (de mootvoegen staan daarbij dus onder druk). De voorspanning wordt na het afzinken doorgeslepen. Dit maakt rotaties van de moten mogelijk zodat de tunnel zich als een ketting kan gedragen. De langswaapening wordt niet over de mootvoe-

gen doorgevoerd. Wel is er een constructieve verbinding tussen de moten, meestal in de vorm van een kraagconstructie die ervoor moet zorgen dat geen verschilzettingen tussen twee moten kunnen optreden maar dat wel rotaties mogelijk zijn voor het volgen van de kettinglijn. Bij diverse tunnels zijn lekkages waargenomen, veelal ter hoogte van mootvoegen. Vermoedelijk treedt ondanks de gekozen ontwerpfilosofie schade op. Analyse van het zettingsgedrag van zinktunnels wijst uit dat de beoogde gelijkmatige kettinglijn vaak niet optreedt. Dan rijst de vraag welke krachten in de mootvoegen ontstaan, welke gevolgen dit heeft voor het functioneren van de mootvoegen én voor de tunnel.

## Analyses

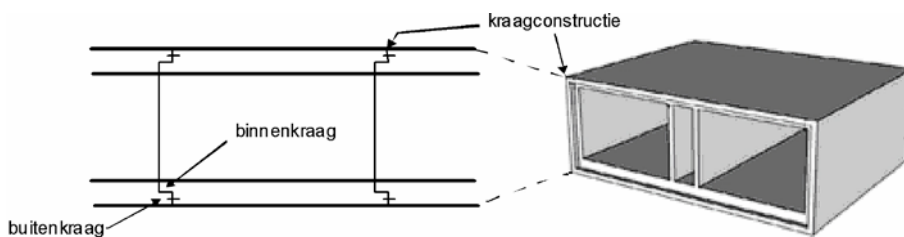
Schols analyseerde voor zijn afstudeeronderzoek het zettingsgedrag van de Kiltunnel, een tunnel waarvan veel metingen beschikbaar zijn, wat een nadere analyse vereenvoudigde. De Kiltunnel laat zien dat de tijdens het ontwerp aangenomen zettingslijn zich niet volgens verwachting heeft ontwikkeld. Uit een analyse van de zettingsmetingen blijkt dat de vervormingen (en rotaties in de voegen) zich concentreren in één van de mootvoegen binnen een element. Tevens trad er in het verleden lekkage op, vermoedelijk

FOTOS: LIJNG, L. LEEUWEN (R.I.R. G. WOLSKINK)

door scheuren in de aansluiting tussen de twee moten. De Kiltunnel ligt onder de rivier de Dordtsche Kil en verbindt de N217 vanuit 's-Gravendeel met de N3 richting Dordrecht.

### Liggermodelberekeningen

De krachtsverdeling in de lengterichting van de tunnel ontstaat uit de interactie van de tunnel met de omliggende grond en het water. Uit de zettingslijnen blijkt dat de moten zijn te beschouwen als oneindig buigstijve liggers die met elkaar zijn verbonden door rotatieveren die de moot- en zinkvoegen representeren. De zettingslijn kan worden gebruikt om de dwarskracht, die ontstaat door de verticale verhinderde vervorming tussen de moten, te berekenen. Om het gedrag van de tunnel als geheel te onderzoeken is eerst gebruikgemaakt van een liggermodel, opgebouwd uit balkelementen (voor de tunnel), translatieveren (voor de omringende grond) en rotatieveren (voor de voegen). De stijfheidsrelaties (M-j-relaties) van de moot- en zinkvoegen zijn bepaald door er vanuit te gaan dat de doorsnede alleen drukspanningen kan opnemen. Verder is verondersteld dat de rekken in de doorsnede een invloedsgebied ter weerszijden van een voeg hebben ter grootte van de tunnelhoogte (vergelijk de St-Venantse storingszone). De discrete verplaatsingen zijn zo gelijk aan de rek in de mootvoeg vermenigvuldigd met tweemaal de tunnelhoogte. De voegrotatie wordt vervolgens berekend uit de discrete verplaatsingen en de lengte van het invloedsgebied. Door zo te modelleren nam Schols tevens de invloed van de voorspanning uit de waterbelasting en de relaxtatie daarvan in de tijd mee in het model. De eigenschappen van de ondergrond (de bedding) en de mate van ondersteuning van de tunnелеlementen zijn onbekend. Daarom is geen directe relatie tussen de zettingslijn van en de krachtsverdeling in de tunnel bekend. Voor de bepaling van de krachtsverdeling in de tunnel zijn derhalve aannames gedaan en is de volgende, iteratieve werkwijze gehanteerd: de geschatte oplegdruck van de tunnel wordt als lijnbelasting in het liggermodel ingevoerd. Daarna wordt ook voor de beddingsconstante een aanname gedaan. Na een eerste niet-lineaire analyse wordt een bepaalde zettingslijn gevonden. De beddingsconstante wordt nu lokaal zodanig



### Voorbeeld van een kraagconstructie

aangepast dat de gewenste (gemeten) zettingslijn beter wordt benaderd. Herhaling hiervan levert een benadering van de bijbehorende dwarskrachtverdeling in de tunnel op.

### Atena

In de (moot)voeg belast de dwarskracht de kraagconstructie in de vloer of het dak. Het gedrag en het draagvermogen van de kragen is nader geanalyseerd met het eindige elementenpakket Atena. Hierbij is van de doorsnede een 2D-model opgesteld. Het betonstaal is als discrete staven met perfecte aanhechting gemodelleerd.

De wrijvingscoëfficiënt van beton op beton in de voegen is gevarieerd tussen 0,5 en 1,0, omdat over de uitvoeringswijze geen precieze gegevens beschikbaar zijn. Door het opnemen van de wrijvingscoëfficiënt in het model worden mogelijke schuifkrachten tussen de voegvlakken in de berekeningen meegenomen. Om krachtinleidingseffecten te voorkomen, zijn de vloer en het dak gemodelleerd als uitkragende liggers met een lengte gelijk aan tweemaal hun hoogte. De berekening is vervolgens verplaatsingsgestuurd uitgevoerd, waarbij is gestuurd op de verticale verplaatsing van de tand. De gelijkmatige verdeelde belasting is op het horizontale vlak van de tand aangebracht.

De resultaten tonen aan dat bij deze tandbelasting in de keel van de tand haarscheuren ontstaan die uiteindelijk een doorgaande scheur onder een hoek van ongeveer 45 graden vormen.

Dit gebeurt vrij plotseling (bros). De resultaten van de vier berekeningen, overeenkomend met de vier tandconstructies in de vloer en in het dak (binnenkraag of buitenkraag, vloer of dak), geven aan dat de verwachte sterkte van de kragen

varieert tussen de 0,8 en 1,3 MN/per strekkende meter tandlengte. De variatie wordt bepaald door de beschouwde tand.

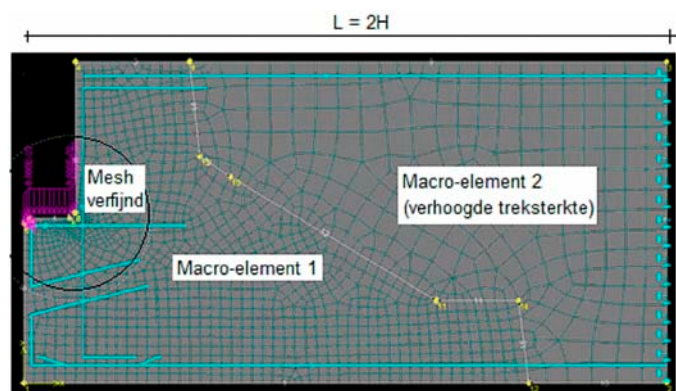
Bij het vergelijken van de weerstand en de optredende dwarskracht moet de vraag worden beantwoord over welke lengte de kraag bijdraagt. Omdat een wand stijver reageert (door de schijfwerking in lengterichting van de tunnel) trekt deze zone dwarskracht naar zich toe.

Op basis van verschillende voorschriften blijkt dat de meewerkende kraagbreedte bij een eindwand ongeveer 3,5 m is en 6,0 m bij een tussenwand. Indien hier rekening mee wordt gehouden en de weerstand wordt bepaald en deze wordt vervolgens vergeleken met de optredende dwarskracht (bepaald uit het liggermodel), dan blijkt dat geen sterkteproblemen te verwachten zijn.

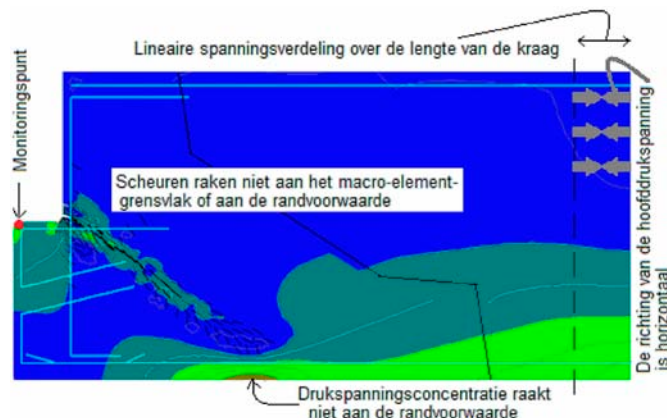
Een kanttekening hierbij is dat rotaties om de lengte-as van de tunnel ('torsie') mogelijk zijn, waardoor de tunnel gaat 'dragen' op de hoeken van de kraag. Die rotaties zijn niet onderzocht, maar er lijkt geen sprake te zijn van een tekort aan weerstand.

Tot slot zijn, eveneens met Atena, de aansluitingen van de tussenwand met de vloer en het dak onderzocht. Deze verbindingen blijken de zwakke schakels in de mootvoeg van de Kiltunnel te zijn. In de Kiltunnel is schade aangetroffen nabij een buitenwand. Vervolgonderzoek naar het gedrag van de aansluitingen van een tussenwand op het dak en de vloer moet uitwijzen of de conclusies met betrekking tot een tussenwand ook daar van toepassing zijn.

*Adri Vervuurt werkt bij TNO, René Braam is verbonden aan de TU Delft, faculteit CiTG en aan Adviesbureau ir.J.G. Hageman BV. Ivar Schols is werknemer bij Royal HaskoningDHV.*



Model van de buitenkraag in de vloer.



Model van scheurvorming en hoofddrukspanningen.