

'Earthquake retrofit' van de BART-tunnel onder San Francisco Bay



SAMENVATTING

De afgezonken BART-metrotunnel, gebouwd tussen 1964 en 1969, verzorgt dagelijks 150.000 reizigersbewegingen tussen San Francisco en de East Bay. De tunnel is direct na de grote aardbeving van 1989 van onschatbare waarde gebleken als levensader, op een moment dat de bovengrondse infrastructuur werd lamgelegd. Met het vooruitzicht op een nog sterkere aardbeving in de komende 30 jaar wordt het seismische gedrag van de huidige tunnel met de nieuwste inzichten getoetst. Waar nodig zijn maatregelen bedacht, zoals grondverdichting langs de tunnel en verankering van de tunnel met micropalen of zuigankers.

Dipl.-Ing. M. Schunk
Fugro Ingenieursbureau b.v.
ir. R. Vervoorn
Fugro Ingenieursbureau b.v.

INLEIDING

BART staat voor Bay Area Rapid Transit en is de naam van het metrosysteem dat de plaatsen rond de baai van San Francisco met elkaar verbindt (zie figuur 1 en 2). Alle metrolijnen (op één na) gaan door één en dezelfde tunnel onder de baai van San Francisco. Het metrostelsel heeft een totale lengte van 167 km en vervoert per dag een zeer groot aantal passagiers (ca. 330.000). Door de tunnelverbinding alleen worden per dag ca. 150.000 passagiers vervoerd. Tezamen met het feit dat er qua openbaar vervoer geen redelijk alternatief bestaat, geeft dit het belang weer van deze verbinding voor de regio. In dit artikel zal worden ingegaan op het tunneldeel onder de baai van San Francisco. De tunnel is gebouwd tussen 1964 en 1969 en bestaat uit afgezonken stalen tunneldelen, welke van binnen zijn voorzien van een betonnen lining met een dikte van ca. 50 cm. De betonnen lining heeft een driedelige functie als constructie-element, ballast en brandwering. Het afgezonken tunneldeel sluit bij de oever van San Francisco middels een overgangsconstructie aan op een geboorde tunnel die onder de stad doorloopt. Deze overgangsconstructie is dusdanig uitgevoerd dat deze ook dienst doet

als ventilatieschacht voor de tunnel. Aan de andere zijde bevindt zich een soortgelijke constructie. Het project ligt in een aardbevingsgebied waar volgens de U.S. Geological Survey een hoge waarschijnlijkheid bestaat (62%) voor het optreden van één of meerdere grote aardbevingen (met een magnitude groter dan 6,7 op de schaal van Richter) binnen de komende 30 jaar. De tunnel ligt tussen twee breuksystemen: aan de oostzijde ligt het Hayward breukenstelsel en aan de westzijde het San Andreas breukenstelsel (zie figuur 3). De afstanden van de hoofdbreuken tot de tunnel bedragen respectievelijk ca. 10 km en 15 km. Met het mogelijke optreden van aardbevingen is in het oorspronkelijk ontwerp reeds rekening gehouden. Zo zijn destijds bijvoorbeeld bij de aansluitingen van de tunneldelen op de overgangsconstructies geen vaste verbindingen gerealiseerd, maar speciale glijdende, die o.a. een seismische functie bezitten en in drie richtingen bewegingsvrijheid geven.

AANLEIDING VOOR HET HUIDIGE ONDERZOEK
Door de Loma Prieta aardbeving in 1989 is het belang van de tunnelverbinding als levensader



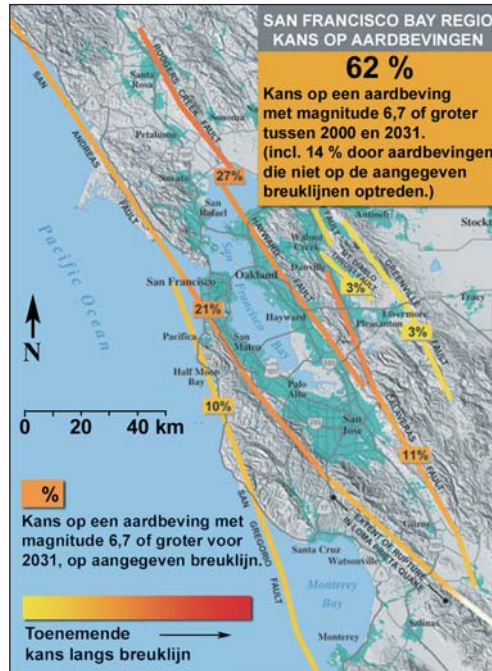
Figuur 1 Het BART metronetwerk



Figuur 2 Een metrostation van BART

voor de regio duidelijk geworden. Dit belang, tezamen met de verwachting van één of meerdere grote aardbevingen binnen de komende jaren, is voor BART aanleiding geweest om het BART Earthquake Safety Program in het leven te roepen.

Dit programma heeft als taak, kwetsbare delen van het oorspronkelijke BART-netwerk te identificeren en volgens de modernste technieken te verbeteren om zodoende de veiligheid voor het publiek en BART-medewerkers te verzekeren. Deze verbeteringsmaatregelen ten aanzien van aardbevingen worden "earthquake retrofit" genoemd. Voor de oorspronkelijke netwerkdelen met de grootste passagiersaantallen, zoals de tunnel onder de baai, geldt bovendien de eis dat deze dusdanig worden verbeterd dat zij na een grote aardbeving weer snel (binnen twee weken) operationeel kunnen zijn. In dit kader is door Bechtel tussen 2000 en 2002 een globale toetsing van het gehele BART-netwerk uitgevoerd en is vastgesteld dat enkele constructieonderdelen mogelijk niet aan de gestelde eisen voldoen.



Figuur 3 Kans op aardbevingen in de San Francisco Bay regio

Voor de tunnel onder de baai zijn o.a. de volgende drie mogelijke problemen geconstateerd:

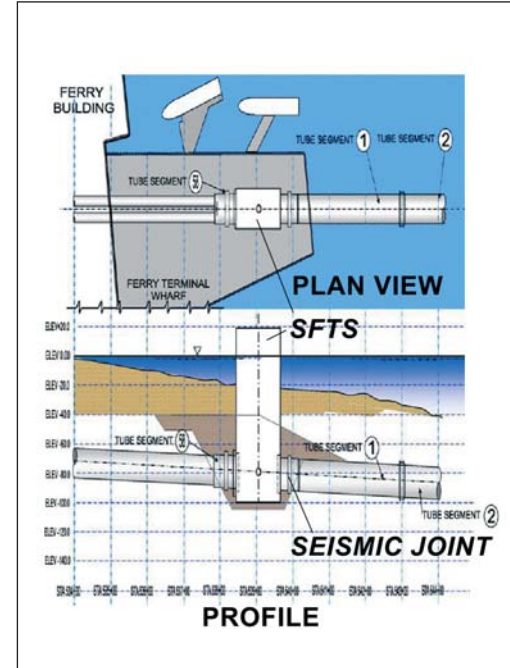
- Het afschuiven van de onderwateroever bij de overgangsconstructie aan de zijde van San Francisco door zettingsvloeiing, waardoor deze constructie tegen het tunneldeel zou kunnen botsen.
- Het optreden van liquefactie (zie kader) in de aanvulling aan de zijanten en onder de tunnel, waardoor de tunnel zou kunnen gaan opdrijven.
- Het optreden van onacceptabele spanningen in de lining van de tunnel door het passeren van de aardbevingsgolven langs deze "starre" constructie.

De bevindingen van Bechtel hebben ertoe geleid dat Fugro tezamen met zes Amerikaanse bedrijven de opdracht heeft gekregen om het

Liquefactie is het verschijnsel, dat door het trillen van de grond (bijvoorbeeld door een aardbeving) fijn zand of silt, welke met water is verzadigd, zich als een vloeistof (liquid) gaat gedragen.

Bron: website van Rob Houtgast, Faculteit der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam

In dit project zal het losgepakte aanvulmateriaal aan weerszijden van de tunnel gedurende een korte periode tijdens de aardbeving als het ware in suspensie kunnen gaan. Dit betekent dat de "waterdruk" aan de zijanten en onderzijde van de tunnel niet meer wordt bepaald door het volumieke gewicht van water, maar door het volumieke gewicht van de gehele suspensie, hetgeen tot gevolg heeft dat de "waterdruk" aan de onderzijde van de tunnel toeneemt. Aangezien de totale belasting op de bovenzijde van de tunnel niet toeneemt, zou dit bij onvoldoende veiligheidsmarge kunnen betekenen dat de tunnel gaat opdrijven.



Figuur 4 Overgangsconstructie (SFTS)

veiligheidsniveau van de tunnel en de overgangsconstructie aan de zijde van San Francisco in detail te toetsen en waar nodig een definitief aanpassingsontwerp te ontwikkelen.

PROJECTBESCHRIJVING

Het ontwerptraject voor de te onderzoeken en op te lossen drie problemen bestaat uit drie fases. In de eerste fase is een grote hoeveelheid aan mogelijke oplossingen gegenereerd.

Op basis van gedetailleerde analyses, waarvan het detailniveau met elke fase toeneemt, wordt vervolgens per fase een selectie gemaakt uit de beschikbare oplossingen; alleen de meest kansrijke, technisch robuuste en/of economisch aantrekkelijke gaan door naar een volgende fase. Zodoende wordt met elke fase een stap gemaakt in de richting van het definitieve

ontwerp.

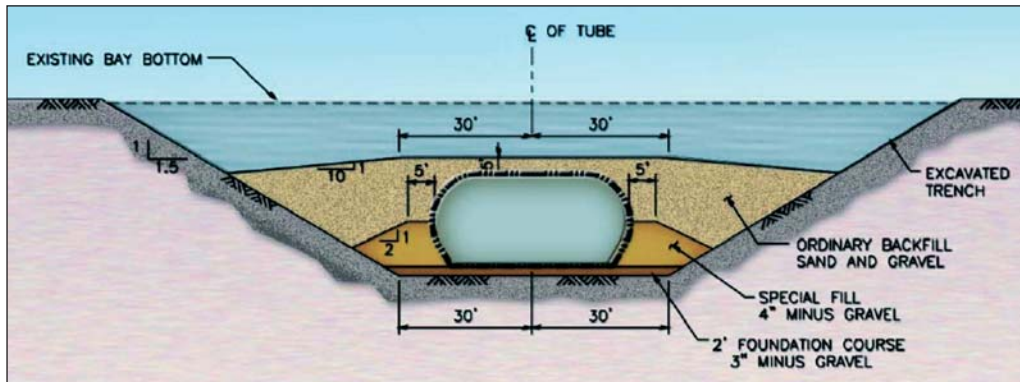
Door het vastgestelde tijdsbestek (BART wenst het ontwerp eind 2008 gereed te hebben) was het noodzakelijk dat oplossingen voor problemen tegelijkertijd werden uitgewerkt met de analyses die de omvang van de problemen nog moesten bepalen. Hierdoor was een grotere "engineering" inspanning noodzakelijk.

Het uitgangspunt voor het ontwerp van benodigde aanpassingen (earthquake retrofits) was om zo weinig mogelijk te veranderen aan de bestaande constructies en de omgeving daarvan, zodat de spanningstoestand van beide nagenoeg gelijk zou blijven. Zodoende wilde men binnen de oorspronkelijke ontwerpfilosofie blijven en voorkómen dat men onvoorziene problemen zou veroorzaken.

Het project is ingedeeld in twee te onderzoeken delen:

- De overgangsconstructie aan de zijde van San Francisco, ook SFTS genoemd (San Francisco Transition Structure), zie *figuur 4*. Hierbij is schade door instabiliteit van het overtalud mogelijk;
- Het afgezonken tunneldeel, ook TBT genoemd (Trans Bay Tube), zie *figuur 5*. Hierbij is schade door opdrijven mogelijk en schade door dynamische belasting.

Hierna wordt ingegaan op de genoemde problemen en de daarvoor uitgevoerde analyses en bedachte oplossingen.



Figuur 5 Doorsnede van de afgezonken tunnelbuis (TBT)

STABILITEIT ONDERWATER TALUD SAN FRANCISCO TRANSITION STRUCTURE (SFTS)

PROBLEEM

In de glijdende verbindingen tussen de SFTS en de tunnelbuizen is er ruimte voor beweging, waardoor de SFTS ca. 10 cm richting de afgezonken tunnelbuis en ca. 20 cm richting de oever mag verplaatsen (zie figuur 6). Tijdens een toekomstige aardbeving is het denkbaar dat door de helling van de oever de grond rondom de SFTS zettingsvloeiing vertoont. In dat geval zal de verplaatsende grond de SFTS tegen de tunnelbuis drukken. Als de glijdende verbinding over onvoldoende ruimte beschikt, zal de SFTS met een klap tegen de tunnelbuis slaan en mogelijk een schadelijke spanningspiek creëren.

Eerst is in kaart gebracht wat de kansen zijn dat het talud daadwerkelijk onderuit gaat. Dit is getoetst met tweedimensionale EEM-analyses, waarbij een horizontale versnelling werd opgelegd. Deze benadering bleek echter onrealistisch snel tot bezwijken te leiden, omdat niet de invloed van de driedimensionale vorm van de oever werd meegenomen. Daarom zijn ook driedimensionale EEM-analyses uitgevoerd, aangevuld met dieptemetingen waarmee het oever-

profiel nauwkeuriger in kaart is gebracht. Deze analyses toonden aan dat er een grotere veiligheidsmarge is, maar toch onvoldoende om stabiliteitsverlies uit te kunnen sluiten.

OPLOSSINGEN (RETROFIT MAATREGELEN)

Om te voorkomen dat de SFTS de afgezonken tunnelbuis zou raken, is in eerste instantie een oplossing ontwikkeld, waarbij vóór de SFTS aan weerszijden van de tunnelbuis twee lichamen, opgebouwd uit jetgroutkolommen, in de grond worden gevormd. Deze lichamen zouden doorgezet worden tot de stijve kleilaag die ongevoelig is voor zettingsvloeiing. Daarmee zouden de groutlichamen weerstand bieden tegen de verschuivende grond en de SFTS. Het principe berust op het feit dat het schuifvlak naar de diepere kleilaag wordt verplaatst, waardoor de stabiliteit toeneemt.

Driedimensionale EEM-analyses, waarin de groutlichamen werden gemodelleerd, waren van groot belang om de meest efficiënte geometrie van deze lichamen te bepalen. Hierbij werd bijvoorbeeld duidelijk dat de hoeveelheid grond tussen de groutlichamen en de SFTS een belangrijke invloed heeft op het resultaat. Om het meest effectieve resultaat te bereiken, c.q. de minste verplaatsing van de SFTS, was

het nodig om de groutlichamen contact te laten maken met de SFTS. Dit was echter niet gewenst, omdat dit zou afwijken van het uitgangspunt dat aanpassingen zo weinig mogelijk dienden te veranderen aan (de belastingen op) de bestaande constructie. Door direct contact zou de SFTS plaatselijk sterk worden belast.

Parallel hieraan werd de nulsituatie (geen jetgrout) gemodelleerd. Hieruit bleek dat de schokgolf, door het stoten van de SFTS tegen de tunnel, niet per definitie schade zou opleveren. Aangezien dit een zeer omvangrijke en langdurige analyse is, was het onderzoek naar mogelijke aanpassingsmaatregelen al ingezet. Op het moment van schrijven is besloten dat het risico van de optie "niets doen" niet groot genoeg is ten opzichte van de uitvoeringsproblemen en risico's die gepaard gaan met de mogelijke verbeteringsmaatregel van het aanbrengen van jetgroutlichamen. Om toch de kans op schade aan de tunnel te reduceren, is uiteindelijk voor een meer eenvoudige ingreep gekozen, waarbij rubberen bumpers worden geplaatst tussen de tunnelbuizen en de SFTS.

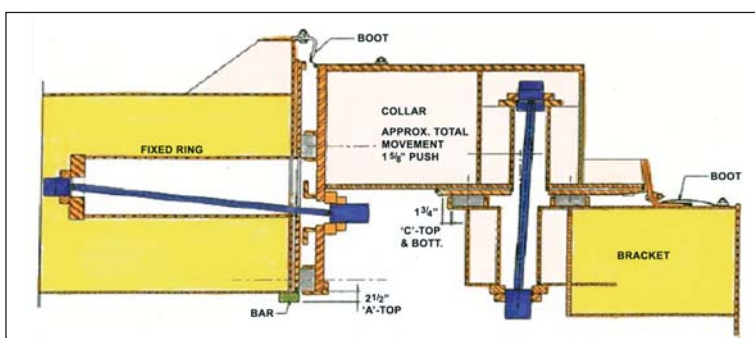
LIQUEFACTIE EN OPDRIJVEN VAN DE TUNNELBUIS TRANS BAY TUBE (TBT)

PROBLEEM

Tijdens de bouw zijn de afgezonken tunneldelen aangebracht op een grindbed van ca. 70 cm en vervolgens aangevuld met grind en zand tot ongeveer 70 cm boven de tunnel. Ter plaatse van de scheepvaartroutes is de tunnelbuis tevens bedekt met stenen en betonplaten om beschadiging van de tunnel door het werpen van ankers te vermijden (zie figuur 9). Bij de eerste veiligheidsanalyses, uitgevoerd door Bechtel, is men tot de conclusie gekomen dat bij de maatgevende aardbevingsbelastingen het risico bestaat dat in het aanvulzand rondom de tunnel liquefactie zal optreden. Het ontwerp van dergelijke afzinktunnels is zodanig dat deze vanuit het bouwdok drijven en na afzinken en ballasten net niet opdrijven. Door het optreden van liquefactie rondom de tunnel, is het mogelijk dat de tunnel zal opdrijven.

AANPAK

Het bepalen of liquefactie optreedt, is geen exacte bezigheid. Daarom is voor elk tunneldeel van zowel een best-estimate als een worstcase scenario uitgegaan. Op basis van sonderingen, SPT's (Standard Penetration Tests) en shear wave velocity tests is het potentieel voor liquefactie bepaald, o.a. volgens de methode



Figuur 6 Detail van de glijdende verbinding bij de SFTS

van Seed and Harder (1990). Dit leverde het inzicht dat over het grootste deel van het tracé liquefactie op zou kunnen treden.

Om het opdrijven te vermijden, zijn er in de eerste ontwerpfase een groot aantal mogelijke oplossingen bedacht. In de tweede fase is dit aantal teruggebracht tot drie kostengunstige en beproefde, en/of technisch interessante methodieken. Met name oplossingen, waarbij verbeteringsmaatregelen vanuit de tunnel uitgevoerd kunnen worden, waren wenselijk aangezien daardoor de inzet van een ponton niet noodzakelijk zou zijn en de drukke scheepvaart-routes niet belemmerd zouden worden. Op deze drie opties wordt hierna dieper ingegaan.

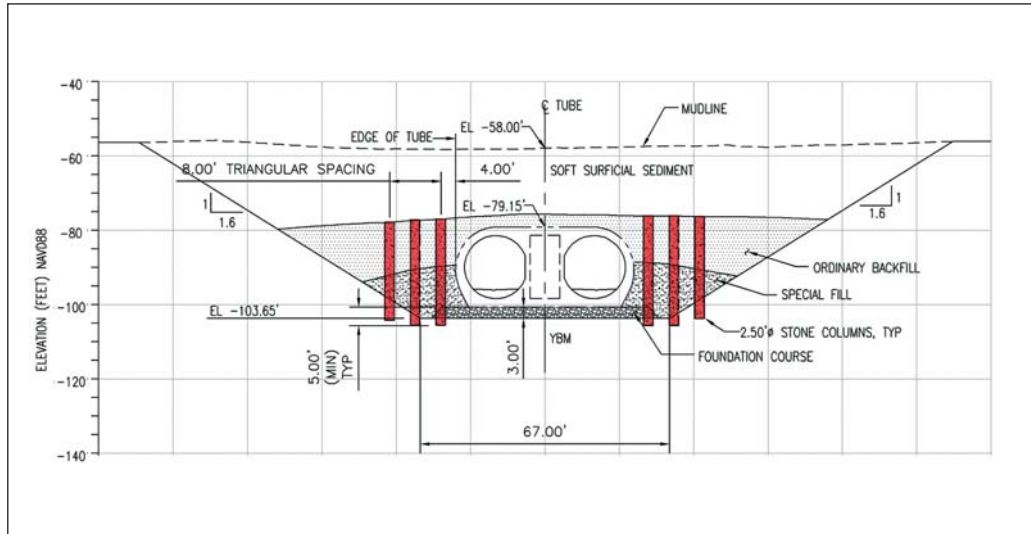
Parallel aan de uitwerking van deze oplossingen is de nulsituatie onderzocht, waarbij er geen verbeteringsmaatregelen worden genomen. De hiervoor uitgevoerde dynamische analyses zijn complex, waardoor de resultaten lang op zich lieten wachten. Gebleken is dat de TBT in enkele zones langs het tunneltracé "slechts" ca. 15 cm zal opdrijven, waarbij de verplaatsingsverschillen tussen de tunnelsegmenten beperkt zal blijven tot ca. 5 à 10 cm. Dergelijke verschillen kunnen volgens de constructeurs door de bestaande constructie worden opgenomen. Op de betreffende locaties zullen derhalve geen verbeteringsmaatregelen noodzakelijk zijn. Voor de locaties waar dit niet het geval is, kan één van de onderstaande oplossingen worden toegepast.

OPLOSSINGEN (RETROFIT MAATREGELEN)

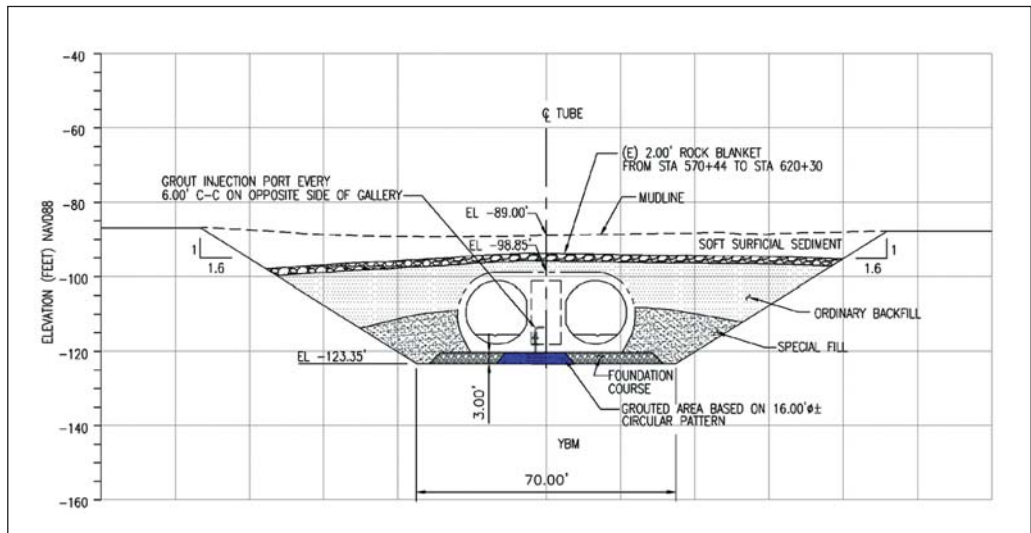
VERDICHTING VAN LOSGEPAKTE AANVULLAGEN MET BEHULP VAN VIBROCOMPACTIE EN TOEPASSING VAN STEENKOLOMMEN

Door deze maatregel wordt bereikt dat er in de aanvullagen naast de tunnel geen of slechts nog beperkt liquefactie zal optreden. De verdichting veroorzaakt dat de grondkorrels dichter op elkaar gaan zitten waardoor deze tijdens een aardbeving minder snel het contact met elkaar verliezen. Bij een dichtere pakking blijven tijdens een aardbeving de effectieve spanningen in het korrelskelet eerder in stand (zie figuur 7).

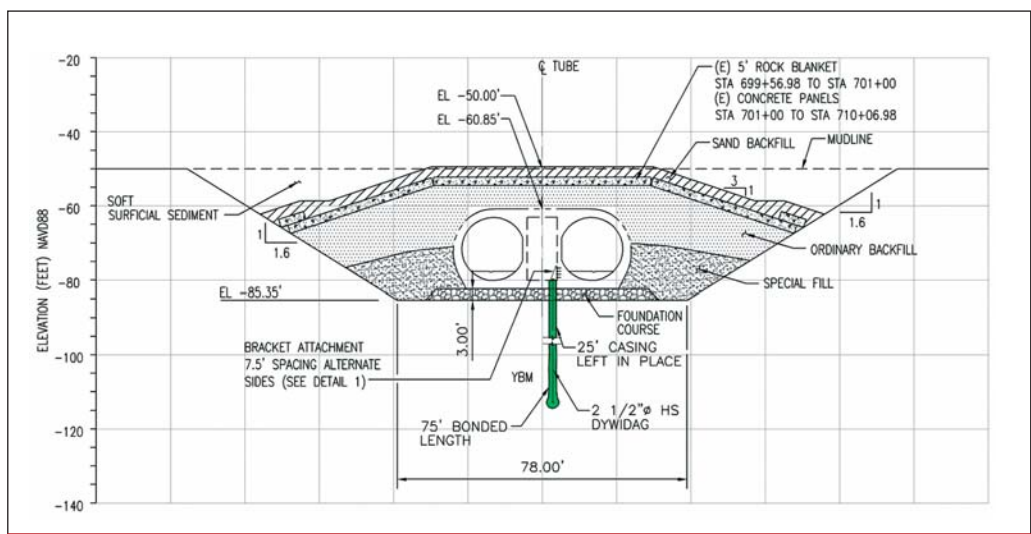
Daarnaast zorgen de steenkolommen voor een drainerende werking. De door liquefactie veroorzaakte wateroverspanningen kunnen door de grote doorlatendheid van de kolommen (sneller) dissiperen. Grondverdichting met vibrocompactie, eventueel in combinatie met het realiseren van een



Figuur 7 Retrofit maatregel TBT - Vibrocompactie met steenkolommen



Figuur 8 Retrofit maatregel TBT - Zuigankers d.m.v. gouten van de funderingsbasis



Figuur 9 Retrofit maatregel TBT - Micropalen vanuit de tunnel

grondverdringende steenkolom ter beperking van de door de verdichting optredende zettingen, is een reeds beproefde methode om losgepakte grondlagen te verdichten en het gevaar voor liquefactie weg te nemen. Voor dit project is echter besloten om op twee proeflocaties e.e.a. nader te onderzoeken en de meest optimale configuratie van deze verdichtingsmaatregel te bepalen. De uitkomst hiervan was o.a. dat de verdichting goed werkt en dat een zorgvuldige uitvoering van groot belang is.

GROUTEN VAN DE FUNDERINGSBASIS TER REDUCTIE VAN DE DOORLATENDHEID, MET ALS DOEL ZOGENAAMDE ZUIGANKERS TE VERKRIJGEN

Het principe van deze maatregel is enerzijds dat het oppervlak waarop oprijvende krachten kunnen aangrijpen, wordt verkleind en anderzijds dat de oprijvende krachten welke in de constructie terechtkomen, naar de diepere ondergrond geleid worden. Het geleiden van de reactiekrachten op de ondergrond gaat volgens het principe van een zuiganker, waarbij de waterspanning onder de funderingsbasis bij opdrijven afneemt en zich niet meteen kan aanpassen (zie figuur 8).

Op basis van de best mogelijke inschatting van de doorlatendheid van het funderingsmateriaal beneden de tunnel wordt verwacht dat door injectie daarvan vanuit de tunnelgalerij een groutstrook met een breedte van ca. 5 m gerealiseerd kan worden. Hiervoor zal in lengterichting om de 2 m geïnjecteerd moeten worden, waarbij de injectiepunten zich afwisselend links en rechts van de centrale lijn zullen bevinden en een diameter moeten krijgen van ca. 9 cm. Deze injectiepunten zullen worden afgedicht met een ventiel.

Omtrent de betrouwbaarheid van deze innovatieve oplossing zijn nog niet alle betrokken partijen het eens. Derhalve worden hiervoor thans nog aanvullende onderzoeken en analyses uitgevoerd. Hierbij wordt ook geanalyseerd wat er zou gebeuren als deze maatregel plaatselijk niet geheel volgens het bedoelde principe

zou werken, bijvoorbeeld als er een spleet tussen constructie en grout mocht ontstaan en het water zijdelings toe kan stromen. Er is aangetoond dat zelfs in dit geval het probleem nog wel zal verminderen.

INSTALLATIE VAN MICROPALLEN VANUIT DE TUNNEL TER VERANKERING VAN DE TUNNEL-BUIS AAN DE DIEPERE ONDERGROND

Door deze maatregel zullen de op de constructie werkende oprijvende krachten overgedragen worden naar de diepere grondlagen. Hiervoor zullen om de 2,5 m micropalen geïnstalleerd moeten worden met een trekdraagvermogen van ca. 1.300 kN. Voor de uitvoering daarvan zal het nodig zijn om in de tunnelvloer gaten te boren met een diameter van ca. 25 cm. Deze gaten zullen meteen worden afgedicht en voorzien van een speciaal ventiel, waardoor later de boringen uitgevoerd kunnen worden en de casing kan worden geïnstalleerd. De grote diameter van deze gaten herbergt echter ook een aanzienlijk risico. Mocht er namelijk iets misgaan met het ventiel, dan zal het erg moeilijk zijn om de toestroming van water te beheersen. Verder is deze oplossing uitvoeringstechnisch moeilijk, omdat de beschikbare werkhoogte voor het installeren van de micropalen gelimiteerd is tot ca. 2,1 m. Deze optie is daarom in volgende ontwerpfasen vooralsnog buiten beschouwing gelaten (zie figuur 9).

SPANNINGSVERANDERING IN DE BETON-LINING DOOR DYNAMISCHE BELASTING OP DE TUNNELBUIS TRANS BAY TUBE (TBT)

Tijdens de aardbeving zal de grond rondom de tunnel bewegen. Door de lengte en stijfheid van de tunnel zal deze op een andere wijze verplaatsen dan de omliggende grond. Hierdoor zal de grond krachten op de tunnel uitoefenen die spanningen in de tunnel opwekken. Dankzij een nauwe samenwerking met constructeur Moffat & Nichol is een berekening van het volledige systeem uitgevoerd, waarbij de

werkelijke interactie tussen grond en constructie realistisch kon worden nagebootst. De spanningen en vervormingen zijn op deze manier berekend en getoetst. Om de grondreactie in horizontale en verticale richting te bepalen, zijn door Fugro tweedimensionale EEM-analyses uitgevoerd (zie figuur 10). Hierbij werd een horizontale of verticale verplaatsing op de tunnel opgelegd en werd de reactiekracht van de grond berekend. Door deze analyse voor verschillende verplaatsingen uit te voeren, werd een veerkromme verkregen die de grondreactie vertegenwoordigt en in constructieve modellen gebruikt kan worden. Hetzelfde is gedaan voor de axiale richting van de tunnel met behulp van driedimensionale EEM-analyses. Dergelijke modellen zijn opgesteld voor verschillende gevallen, zoals het wél of niet optreden van liquefactie en met of zonder verbeteringsmaatregelen (earthquake retrofits). Door deze variaties uit te voeren, kunnen de gevolgen van verschillende retrofit maatregelen worden bepaald en kan een goed oordeel worden geveld over de geschiktheid daarvan.

CONCLUSIES

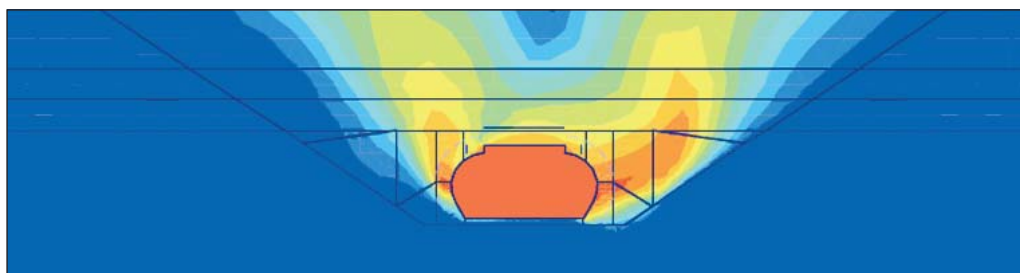
Een van de wijze lessen van dit project is dat het al te gemakkelijk is om meteen oplossingen te zoeken. Het is belangrijk om het probleem goed in kaart te brengen, met name om de daadwerkelijke omvang daarvan goed in te kunnen schatten. Fugro heeft aangetoond dat bepaalde maatregelen niet nodig zullen zijn, bijvoorbeeld omdat de TBT plaatselijk niet voldoende zal "oprijven" om verbeteringsmaatregelen te rechtvaardigen.

Daarnaast is in het eerste traject een breed scala aan oplossingsmogelijkheden op serieuze manier beschouwd. Dit kan leiden tot creatieve en economisch gunstige oplossingen, zoals het toepassen van zuigankers.

Tot slot moet worden opgemerkt dat op dit moment de ontwerpfase nog niet is afgerond en er nog steeds nader onderzoek wordt uitgevoerd, waardoor de in dit artikel genoemde bevindingen alsnog kunnen wijzigen.

INFORMATIEBRONNEN

- www.bart.gov (figuur 1 en figuur 5)
- pubs.usgs.gov (figuur 3)
- Kramer, Steven Lawrence, *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1996 ■



Figuur 10 Gronddeformatie bij een opgelegde horizontale verplaatsing op de tunnelbuis naar rechts