



*fib* Symposium

Dit artikel is eerder verschenen als  
paper voor het *fib* Symposium 2017  
in Maastricht.

Extra verdieping parkeergarage vraagt om  
herberekening Schipholspoortunnel

# Schiphol- spoortunnel: Eurocode, NEN 8700 of RBK?

*Pal voor de deur van Schiphol Plaza en boven op de Schipholspoortunnel bevindt zich de drielaagse parkeergarage P1. Schiphol heeft plannen om deze garage van een extra verdieping te voorzien. Hiermee zullen de geconcentreerde kolombelastingen met circa 50% toenemen. Toch hoeven hierdoor uiteindelijk maar een beperkt aantal locaties versterkt te worden in de tunnel. Dit is opmerkelijk gezien de omvang en grote variatie in uitvoering van het te beschouwen tunnelgedeelte.*

De Schipholspoortunnel is 5,8 km lang en bestaat uit twee tunnelbuizen die elk twee sporen bevatten. De eerste tunnel is voltooid in 1981, de tweede in 2001. Halverwege zijn de twee tunnelbuizen over een lengte van 550 m gecombineerd en vormen daar treinstation Schiphol Airport met zes sporen en drie perrons. Op deze locatie is over een lengte van 320 m tevens parkeergarage P1 gelegen: deels op de afzonderlijke tunnelbuizen en deels op de gecombineerde tunnelbuizen. Ten gevolge van plaatselijke omstandigheden en de destijds wijzigende ontwerpinzichten, hebben de 25 te beschouwen tunnelmoten verschillende eigenschappen en afmetingen. Daarom was het noodzakelijk om bij deze verdieping op de parkeergarage diverse moten te herberekenen. In dit artikel wordt slechts één moot, te weten moot Q8, beschouwd.

## Model

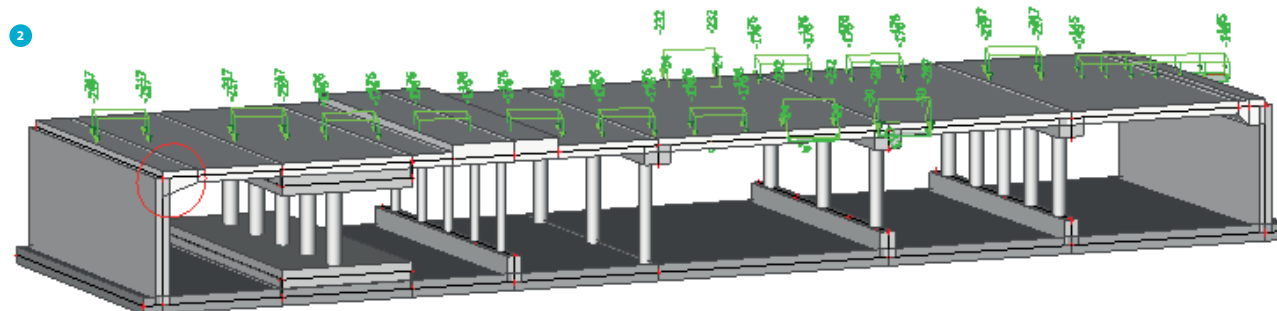
Ten behoeve van de herberekening is een 3D-eindige-elementenmodel opgezet. Figuur 2 bevat het model van moot Q8 en de daarop aanwezige geconcentreerde kolombelastingen uit P1. Tunnelbuis 1 (1981) bevindt zich aan de linkerkant (zuidzijde) en tunnelbuis 2 (2001) is gelegen aan de rechterkant (noordzijde).

Eigenschappen van het 3D-eindige-elementenmodel:

- *Palen*: de palen zijn gemodelleerd als horizontale/verticale verende ondersteuning waarbij in de verticale richting rekening is gehouden met het paaltype en het paalpuntniveau.
- *Geometrie*: de vloer, de wanden, de kolommen, het dak en de vouten (in de hoeken, zie rode cirkel figuur 2) zijn met hun werkelijke dikte ingevoerd en zodanig dat het model constructief zo veel mogelijk overeenkomt met de werkelijkheid.
- *Materialen*: er is sprake van gewapend beton en de hoeveelheid wapening varieert in langs- en dwarsrichting in geringe mate; daarom is isotropie gekozen. Vanwege scheurvorming is de elasticiteitsmodulus van het beton C35/45 met 50% gereduceerd.
- *Elementtype*: Kirchhoff, omdat de constructieve elementen als 'slank' zijn te beschouwen. De elementafmetingen variëren van  $h$  tot circa  $h/4$ .
- *Belastingen*: toegepast zijn zowel de voor spoorwegtunnels gebruikelijke belastingen als de belastingen op het dak, zijnde circa 1 m gronddekking, eigen gewicht van de parkeergarage en 2,0 kN/m<sup>2</sup> als veranderlijke belasting per parkeerlaag.

## Regelgeving

Voor de beoordeling van *nieuwe* bouwwerken zijn de Eurocodes beschikbaar, bijvoorbeeld NEN-EN 1990 (EC0), NEN-EN 1991 (EC1) en NEN-EN 1992 (EC2) [1]. Belastingen op bestaande bouwwerken kunnen gedurende de ontwerplevensduur wijzigen; dit geldt ook voor de functie van het bouwwerk alsmede het bouwwerk zelf. Voor die situaties is een serie normen ontwikkeld die voor de herbeoordeling van *bestaande* bouwwerken kunnen worden gebruikt. Deze normen, NEN 8700 [5] en NEN 8701 [6], komen qua onderwerpen en opbouw overeen met EC0 respectievelijk EC1. Ze betreffen alleen aanvullingen op c.q. aanpassingen van de Eurocodes qua belastingen en belastingscombinaties. Voor de toetsing van *bestaande* betonnen bouwwerken wordt de groene versie van NEN 8702, als aanvulling op EC2, dit jaar verwacht. Tot dan mag, mits afgesproken binnen het project, gebruik worden gemaakt van de Richtlijnen





3

Beoordeling Kunstwerken (RBK 1.1 [4]) van Rijkswaterstaat. Bij de herberekening van de Schipholspooortunnel is alleen gebruikgemaakt van de aanvullingen uit RBK 1.1 op EC2 met betrekking tot de dwarskrachtweerstand.

### Toetsing bestaande tunnel

Voor de bestaande Schipholspooortunnel zijn diverse situaties beschouwd, waarbij twee stappen (stap 1 en 2) zijn onderscheiden (tabel 1). Op verzoek van ProRail is in stap 1 de toekomstige situatie met drie verdiepingen (is vier lagen) beschouwd alsof het volledig nieuwbouw betreft (3NU in tabel). Ter vergelijking is ook de bestaande situatie met twee verdiepingen beschouwd (2NU). De toekomstige en bestaande situatie (3VU, 2VU) zijn in deze stap ook beschouwd, gebruikmakend van NEN 8700 en NEN 8701. Voor de toetsing van de betonconstructie is daarbij nog steeds EC2 toegepast. Het doorlopen van stap 1 had een duidelijk inzicht in het constructieve gedrag tot gevolg. In stap 2 (situatie 3VvU) is een aantal gunstige aspecten van RBK 1.1 gebruikt; dit betrof vooral de dwarskrachtweerstand  $V_{Rd}$ . Doel was het zo veel mogelijk voorkomen van versterkingsmaatregelen. Stap 2 was uiteindelijk bepalend bij het vaststellen van de constructieve veiligheid en de benodigde versterkingsmaatregelen.

De hier niet-gerapporteerde vervolgstappen betroffen onder andere:

- Het bepalen van mootcategorieën op basis van verschillen/overeenkomsten tussen de 25 moten en de daarop aanwezige kolombelastingen om daarmee het aantal daadwerkelijk en

Tabel 1 Aanpak herberekening

situatie	stap	belastingen en belastingscombinaties		toetsing beton	
		NEN-EN 1990/1991	NEN 8700/8701	EC2	RBK 1.1
3NU, 2NU	1	x		x	
3VU, 2VU	1		x	x	
3VvU	2		x		x

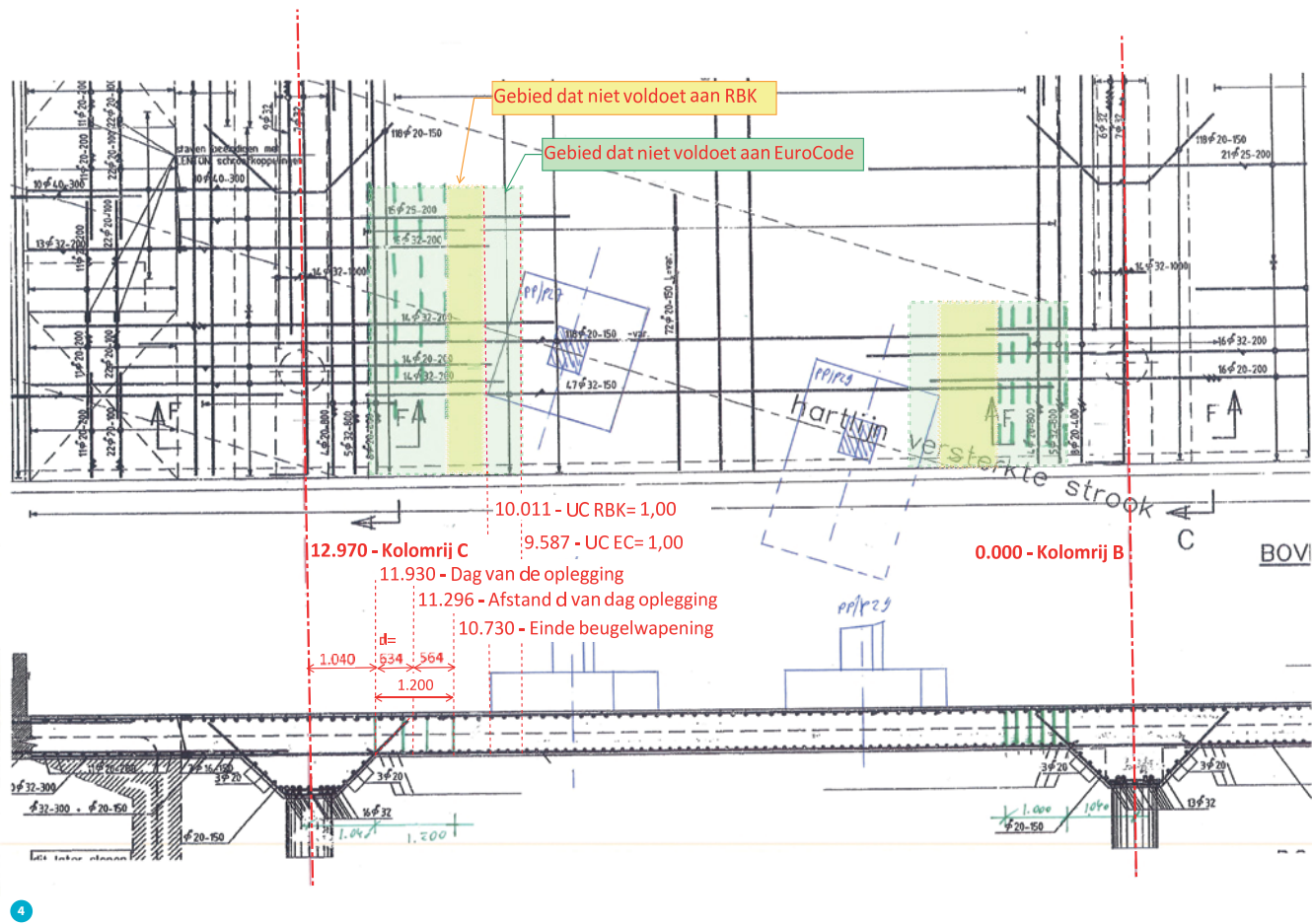
Toelichting gebruikte afkortingen tabel 1:

- 3NU, 3 verdiepingen, Nieuwbouw, Uiterste grenstoestand;
- 2NU, 2 verdiepingen, Nieuwbouw, Uiterste grenstoestand;
- 3VU, 3 verdiepingen, Verbouw, Uiterste grenstoestand;
- 2VU, 2 verdiepingen, Verbouw, Uiterste grenstoestand;
- 3VvU, 3 verdiepingen, Verbouw, verbeterde beoordeling sterkte, Uiterste grenstoestand.

‘volledig’ her te berekenen moten te beperken. Van de vastgestelde zes categorieën zijn 5 representatieve moten volledig herberekend en van 1 representatieve moot is alleen het dek herberekend. De resultaten hiervan zijn geëxtrapoleerd naar de overige 19 moten.

- Beoordelen bruikbaarheidsgrenstoestand: alleen zettingsverschillen en de waterdichtheid.

De toetsing van de tunnel (lees: diverse tunnelmoten) betreft het paaldraagvermogen, de vloer, de wanden, de kolommen, het dak en diverse details. In dit artikel wordt alleen het dak van moot Q8 in detail behandeld. Analoog aan de deling van tabel 1 komt in dit artikel eerst aan de orde de regelgeving qua ‘belastingen en belastingscombinaties (stap 1)’ en vervolgens ‘toetsing beton (stap 1 en 2)’. Qua toetsing ligt hier de focus op de als kritisch te beschouwen dwarskracht en wordt, alleen



4

voor de situatie 3VvU en omwille van onderhavig artikel, een vergelijking gemaakt tussen EC2 en RBK 1.1. Vervolgens worden enkele details beschouwd: de toetsing van buiging en dwarskracht van slanke vouten en de dwarskrachtweerstand bij opstortingen. Afgesloten wordt met een toelichting van potentiële versterkingsmaatregelen.

### Toepassing regelgeving bestaande tunnel

Zoals eerder al is toegelicht, zijn zowel de Eurocodes (*nieuwe* bouwwerken) als de NEN 8700-serie (*bestaande* bouwwerken) toegepast. De tunnel bestaat uit twee tunnelbuizen van verschillende leeftijden. Conform NEN 8700 (bijlage F) behoort daarom

een verschillend veiligheidsniveau te worden gebruikt:

- Tunnelbuis 1 is omstreeks 1981 voltooid en daarom mag dit gedeelte als een 'verbouwsituatie' conform de NEN 8700-serie worden beoordeeld.
- Tunnelbuis 2 is omstreeks 2001 voltooid. Bij aanvang herberekeningen was de constructie minder dan 15 jaar oud en dus gelden voor deze tunnelbuis de nieuwbouweisen conform de Eurocodes.

Overeengekomen binnen dit project was om in eerste instantie (stap 1) de beoordeling in duplo uit te voeren: de complete tunnel op basis van zowel 'verbouw' als 'nieuwbouw' (zie ook tabel 1). Tevens was afgesproken, en zoals tegenwoordig

- 3 Uitgang van de parkeergarage
- 4 Bovenaanzicht karakteristieke situatie met  $V_{Ed}$  groter dan  $V_{Rd}$

Tabel 2 Belastingfactoren voor gebouwen/CC3: NEN-EN 1990 versus NEN 8700

situatie	norm	$\beta$	G, ECO vgl. 6.10a		G, ECO vgl. 6.10b		Q treinen		Q auto's		Q wind
			$\gamma_{G,sup}$	$\gamma_{G,inf}$	$\gamma_{G,sup}$	$\gamma_{G,inf}$	$\gamma_{Q,1}$	$\alpha$	$\varphi_2$	$\gamma_{Q,1}$	$\gamma_{Q,1}$
nieuwbouw	ECO	4,3	1,5	0,9	1,3	0,9	1,5	1,21	1,46	1,65	1,65
bestaande bouw, verbouw	NEN 8700	3,6	1,2	0,9	1,2	0,9	1,3	1,00	1,46	1,5	1,5
bestaande bouw, afkeur	NEN 8700	3,3	1,2	0,9	1,2	0,9	1,25	1,00	1,46	1,3	1,5

Noot bij tabel 2

- 1 De omgevingsvergunning voor het bouwen van de Schipholspoortunnel is verleend onder het Bouwbesluit 2003 of daarvoor. Daarom is conform NEN 8700 een extra reductie van  $\gamma_{G,sup}$  toegepast.
- 2 Ten behoeve van nieuwbouw schrijft de Nederlandse Nationale Bijlage bij EC1-2 als 'classificatiefactor voor de belasting'  $\alpha = 1,21$  voor. In ontwerpberekeningen kan door middel van deze factor  $\alpha$  zwaarder/lichter treinverkeer dan normaal in rekening worden gebracht. Voor bestaande constructies schrijft NEN 8700  $\alpha = 1,00$  voor.
- 3 Voor de belastingen door spoorwegverkeer is de dynamische vergrotingsfactor niet gedifferentieerd.
- 4 Uitgaande van 100 jaar als ontwerplevensduur is de restlevensduur 65 jaar (tunnelbuis 1) en 85 jaar (tunnelbuis 2). Daarom is het volgens NEN 8700 toegestaan de gelijkmatig verdeelde veranderlijke belasting door de auto's in/op de parkeergarage te reduceren. Bij de combinatiefactor  $\psi_0 = 0,7$  is de reductie slechts 0,2%; dit is verwaarloosd.
- 5 De situatie 'afkeur' is bij de herberekening van de Schipholspoortunnel niet gebruikt en is in de laatste rij van tabel 2 volledigheidshalve, en ter vergelijking gegeven.

gebruikelijk voor deze groep bouwwerken (tunnels), het gebruik van gevolgklasse 3 (CC3). Het oorspronkelijke ontwerp is gebaseerd op veiligheidsklasse 3 conform de TGB 1990-serie. Dit komt grofweg overeen met CC2 conform de Eurocodes.

**Belastingsfactoren**

In de Eurocodes wordt onderscheid gemaakt in onder andere *gebouwen* en *bruggen*; tunnels zijn niet als een aparte categorie beschouwd. Daarom is gebruikgemaakt van paragraaf 4.2, artikel A.1.3.1 van de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken (ROK 1.3 [3]) van Rijkswaterstaat. Daar staat dat ten behoeve van tunnels de belastingsfactoren  $\gamma_f$  en de verminderingfactor  $\xi$  conform *gebouwen* moeten worden toegepast. Analoog aan ROK 1.3 is een uitzondering gemaakt voor de belastingsfactor voor verkeersbelastingen conform EC1-2 (hier LM71, SW/0): deze is gebaseerd op *bruggen*. Rekening houdend met het voorgaande zijn in tabel 2 onder andere de diverse belastingsfactoren gegeven. Dit zowel conform EC0 (nieuwe *gebouwen*, betrouwbaarheidsindex  $\beta = 4,3$ ) als conform NEN 8700 (bestaande *gebouwen*,  $\beta = 3,6$  voor de situatie ‘verbouw’ en  $\beta = 3,3$  voor de situatie ‘afkeur’). Zie ook de verklarende noten na de tabel.

**Dwarskrachtweerstand, NEN-EN 1992-1-1 versus RBK 1.1**

Voor de beoordeling van de dwarskrachtweerstand  $V_{Rd}$  zijn zoals gezegd de aanvullingen uit RBK 1.1 op EC2 gebruikt. Hierbij is al rekening gehouden met een, naar verwachting in 2017 in RBK 1.2 te publiceren verfijning. Dit betreft de (kortere) lengte waarover de in rekening te brengen bovenwapening voorbij de beschouwde doorsnede moet doorlopen (zie EC2-1-1 figuur 6.3). Toetsing van dwarskracht op basis van RBK 1.1 is gunstiger dan volgens EC2. Redenen daarvoor zijn (zie ook tabel 3):

- Indien  $V_{Ed} > V_{Rd,c}$  mogen het aandeel dwarskrachtwapening  $V_{Rd,s}$  en het aandeel beton  $V_{Rd,c}$  bij elkaar worden opgeteld; meer specifiek  $V_{Rd} = V_{Rd,c(A)} + V_{Rd,s}$ .
- Het gebruik van de factor  $k_{cap} = 1,2$  voor massieve gewapende

betonnen platen waarbij wordt opgemerkt dat dan het midden van de dwarskracht  $V_{Ed}$  over  $4 \times d$ , zoals beschreven in RBK 1.1 artikel 6.2.1 (10), niet is toegestaan.

- De gunstige invloed van een lage(re) vloeigrens van het betonstaal op  $V_{Rd,c(B)}$ . Dit is met name van invloed bij tunnelbuis 1 in verband met het daar toegepaste FeB400.

**Invloed langswapening op berekende dwarskrachtweerstand**

In de formule voor  $V_{Rd,c}$  (zowel bij NEN-EN 1992-1-1 als RBK, 6.2.a) komt de aanwezige langswapening tot uitdrukking in de term  $\rho_p$ , de wapeningsverhouding van de trekwapening die verder dan  $[l_{bd} + d]$  voorbij de beschouwde doorsnede doorloopt. Dit betekent dus dat bij het vaststellen van  $V_{Rd,c}$  van een snede voor het bepalen van de in te vullen term  $\rho_p$ , rekening moet worden gehouden met:

- de vraag of de boven- ofwel de onderwapening actief is. Voor een juiste bepaling van  $V_{Rd,c}$  is het dus van belang ook de momentenlijn en de ligging van het momentnulpunt te weten;
- de lengte die de aanwezige wapening doorloopt voorbij de beschouwde snede in relatie tot de verankeringslengte  $l_{bd}$ . Bij de berekening van  $V_{Rd,c(A)}$  is verondersteld dat de langswapening  $A_{sl}$  over de lengte  $l_{bd}$  geleidelijk toeneemt van 0 tot 100%.

Door de grote variatie in langswapening ( $\rho_{l,max} = 1,5\%$ ,  $\rho_{l,min} = 0,2\%$ ) varieert per dwarsdoorsnede ook de berekende dwarskrachtweerstand  $V_{Rd}$ . Daarom is het van belang om over de lengte van het dek een dwarskrachtdeckingslijn vast te stellen, zodat een optimaal beeld van de aanwezige capaciteit ontstaat en onnodige versterkingsmaatregelen worden vermeden.

**Dwarskrachttoets tunneldak**

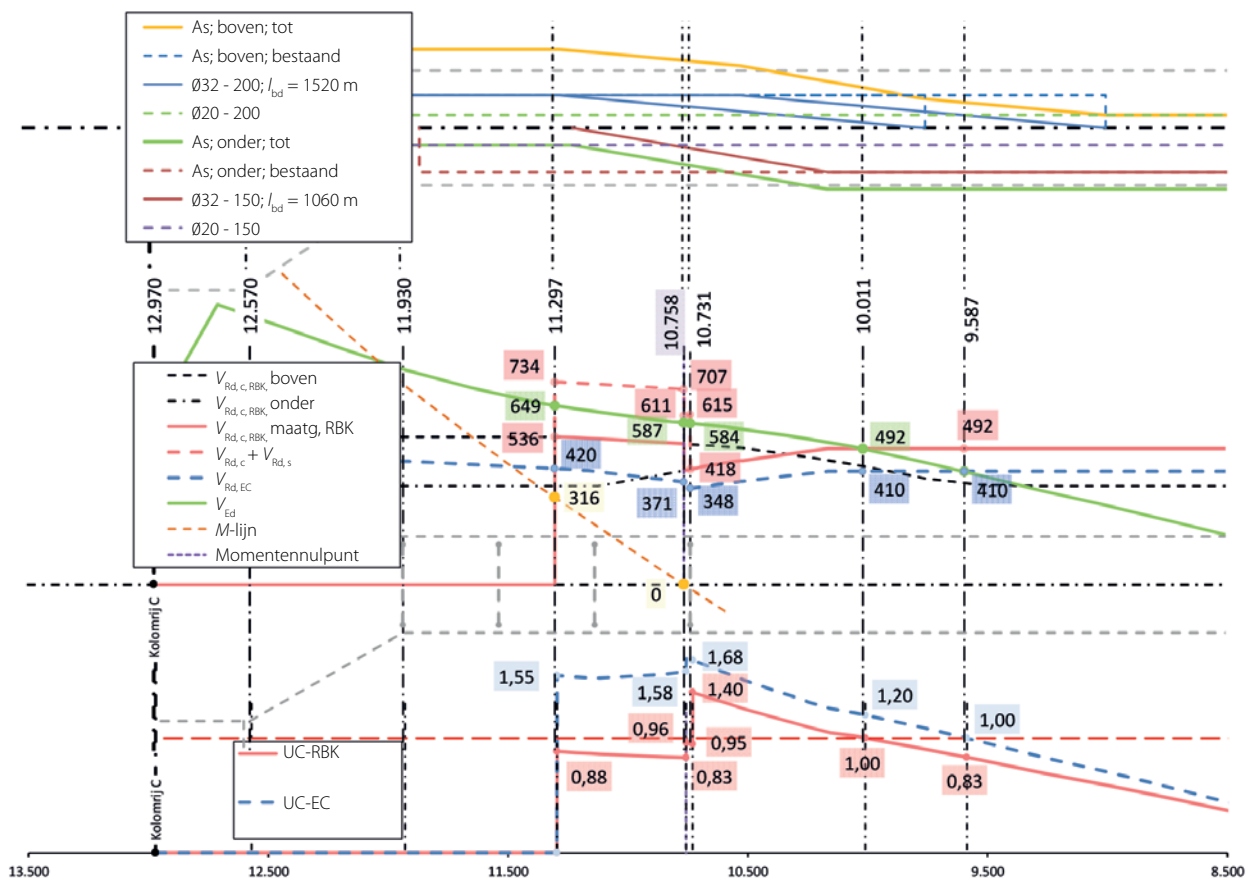
De dwarskrachttoets is uitgevoerd in gebieden op een afstand die groter is dan  $d$  uit de dag van de oplegging (NEN-EN 1992-1-1, 6.2.1(8)). Bij vouten die steiler zijn dan  $45^\circ$  is de dag van de route aangehouden als dag van de oplegging, bij flauwere vouten de dag van de wand. Vanzelfsprekend is de extra beschikbare hoogte ten gevolge van flauwere vouten wel in rekening gebracht.

De positie van het momentennulpunt is bepaald bij dezelfde belastingscombinatie als die de maatgevende  $V_{Ed}$  oplevert; ter weerszijden van dit punt is  $V_{Rd,c}$  berekend met de boven- respectievelijk onderwapening. Over de lengte van het dak varieert de maatgevende belastingscombinatie.

De laagst toegestane belastingsfactoren en de hoogst mogelijke dwarskrachtweerstand zijn gebruikt. Daarom was het strikt voldoen aan de regelgeving vereist:  $UC = V_{Ed}/V_{Rd}$  moest kleiner/gelijk aan 1,00 zijn.

Tabel 3 Vergelijking  $V_{Rd,c}$ : NEN-EN 1992-1-1 versus RBK 1.1

vgl.	norm	formules (in rood de verschillen)
6.2.a	EC2	$V_{Rd,c(A)} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$ met $C_{Rd,c} = 0,12$
	RBK	$V_{Rd,c(A)} = [0,12 k_{cap} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$ met $k_{cap} = 1,2$ voor massieve betonnen platen $k_{cap} = 1,0$ voor overige constructies en/of bij middelen over $4 \times d$
6.2.b	EC2	$V_{Rd,c(B)} = [v_{min} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$ met $v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$
	RBK	$V_{Rd,c(B)} = [v_{min} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$ met $v_{min} = 0,83 k_{cap}^{3/2} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} / f_{yk}^{1/2}$



5

In de eerst gerealiseerde tunnelbuis (1981) werd op alle locaties voldaan vanwege de kleinere overspanningen, het feit dat de garagekolommen dicht bij de steunpunten zijn gesitueerd en tegelijk op voldoende afstand van de rand van de moot. In de tweede tunnelbuis (2001) werd bij de zwaarbelaste kolommen over het algemeen niet voldaan. De gebieden met overschrijding bevonden zich meestal tussen de kolompoeren en de dichtstbijzijnde tunnelkolom (fig. 4).

De belangrijkste oorzaken voor de overschrijdingen van  $UC = 1,00$  in de tweede tunnelbuis zijn:

- In deze tunnelbuis bevinden zich de kolompoeren van de parkeergarage dicht bij de mootvoegen met een geringere spreiding van de belasting tot gevolg.
- Er is circa 0,70 m afstand tussen de destijds aangebrachte beugels en de kolompoeren.
- De ligging van het momentennulpunt leidde er op een aantal locaties toe dat een ongunstige hoeveelheid langswapening in rekening moest worden gebracht. Bij in rekening brengen van de bovenwapening zou het dak voldoen; de lagere hoeveelheid onderwapening diende echter in rekening te worden gebracht met  $UC > 1,0$  tot gevolg.

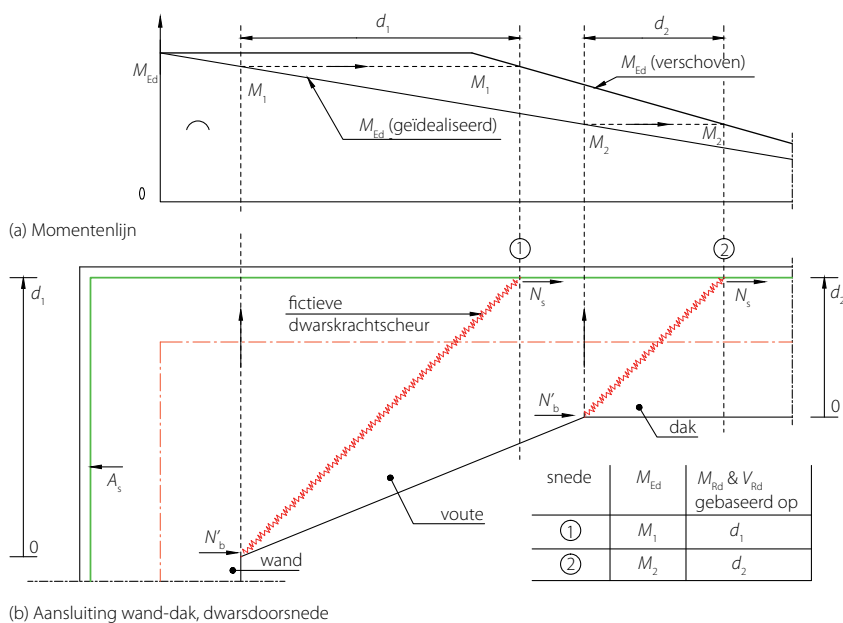
*Noot: deze situatie geldt niet voor het voorbeeld in figuur 4 en 5.*

In figuur 5 is de toetsing van dwarskracht van het linkerdeel van figuur 4 afgebeeld. In deze figuur is onderscheid gemaakt in toetsing volgens EC2 en RBK 1.1 en is de invloed op  $V_{Rd}$  van de beugelwapening en van de ligging van het momentennulpunt zichtbaar.

De overschrijdingen treden op in gebieden in de nabijheid van het momentennulpunt, dus daar waar de betonspanningen laag zijn. Daarom is aanvullend gekeken of toetsen met behulp van methoden die hiermee rekening houden tot gunstiger resultaten zouden leiden, zoals NEN-EN 1992-1-1, 12.6.3. Voorwaarde hiervoor is dat de hoofdspansingen beperkt blijven; dit bleek maar over een zeer beperkte lengte het geval te zijn en daarom is geconcludeerd dat deze methode geen oplossing bood.

### Toetsing buiging/dwarskracht bij slanke vouten

Niet alleen de als 'standaard' te beschouwen onderdelen (bijvoorbeeld constante dikte) zijn beschouwd maar ook enkele specifieke details; onder andere de buiging en dwarskracht bij slanke vouten. Dit vormt geen onderdeel van EC2. Daarom is gebruikgemaakt van de inmiddels vervallen TGB 1990-serie. De geïdealiseerde en de bijbehorende verschoven momentenlijn



6

zijn bepaald van de aansluiting wand-dak van tunnelbuis 1. Deze zijn afgebeeld in figuur 6. Over een lengte van 1600 mm varieert daar de dakdikte van 700 mm tot 1340 mm: een toename van 1:2,5. De buigendmoment-weerstand  $M_{Rd}$  en de dwarskrachtweerstand  $V_{Rd}$  in sneede 1 en 2 zijn gebaseerd op de nuttige hoogte  $d_1$  respectievelijk  $d_2$  ter plaatse van het einde van de fictieve dwarskrachtscheuren ofwel daar waar de betondrukzone zich ontwikkelt. Er is geen voorspanning aanwezig, daarom is als helling van deze scheur de gebruikelijke 45° aangehouden. Bij sneede 1 heeft de grote nuttige hoogte  $d_1$  een significante toename van de weerstand tot gevolg, zowel bij  $M_{Rd}$  als bij  $V_{Rd}$ . Qua toetsing op buiging wordt dit gunstige effect deels tenietgedaan omdat tegelijkertijd de momentenlijn over dezelfde grotere hoogte  $d_1$  moet worden verschoven. Dit op basis van de zogenoemde verschuivingsregel (EC2 artikel 9.2.1.3).

### Dwarskrachtweerstand bij opstortingen

Bij de bouw van de tweede tunnel, en de daarmee in verband staande omlegging van een aantal sporen, bleek het noodza-

kelijk in tunnelbuis 1 een aantal tussensteunpunten (wanden/ kolommen) te herpositioneren. Gevolg daarvan was dat steunpuntmomenten ontstonden in plaats van de initieel aanwezige veldmomenten en dat daar ter plaatse de dwarskrachten toenamen. Op die locaties is de dikte van het dak vergroot. Ten behoeve van de berekening van de dwarskrachtweerstand is voor deze situatie in EC2 geen specifieke informatie gegeven. Daarom is *fib Model Code 2010* [2] gebruikt waarin een effectieve nuttige hoogte ( $d_e$ ) is gedefinieerd en een daarop gebaseerd wapeningspercentage ( $\rho_l$ ). Zie figuur 7 voor enige toelichting; de invloed van voorspanstaal (hier afwezig) is daarin buiten beschouwing gelaten. De formules houden er rekening mee dat de buitenste wapening effectiever is qua beperking van de scheurgrootte dan de binnenste wapening. De formule voor  $d_e$  is gebaseerd op lineair-elastisch materiaalgedrag en daarom is het verschil in betonstaalsoorten verwaarloosd.

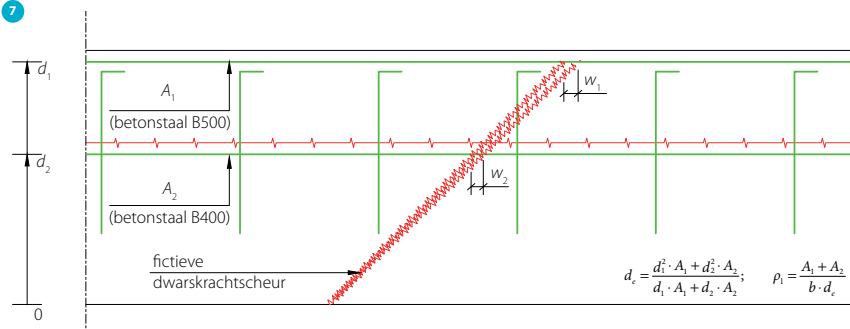
### Versterkingsmaatregelen

Toetsing op basis van RBK 1.1 in plaats van EC2 resulteerde in een significante afname van het aantal locaties waar de dwarskrachtweerstand niet voldoende groot was. Derhalve zijn minder versterkingsmaatregelen vereist. Maatregelen aan de onderzijde van het dak, ofwel binnen in de tunnelbuizen, waren praktisch gezien onmogelijk vanwege de grote invloed op de exploitatie van het treinverkeer. In die situaties met onderwapening als buigtrekwapening bood het toevoegen van gewapend beton aan de bovenzijde geen oplossing. Een grotere nuttige hoogte heeft immers een reductie van  $\rho_l$  en dus van een beperking van de toename van  $V_{Rd}$  tot gevolg. Bovendien ontstaat een niet-gelijkmatige verdeling van de schuifspanningen: schuifspanningen door de huidige belastingen concentreren zich in de oorspronkelijke dikte en alleen de schuifspanningen door de nieuwe/extra belastingen verdelen zich over de totale hoogte (oorspronkelijk + opstort). Het ontlasten van het tunneldak, bijvoorbeeld door parkeervakken tijdelijk buiten dienst te nemen, heeft een gunstige maar tegelijk ook beperkte invloed.

Andere nog beschouwde versterkingsmaatregelen zijn:

- vergroten kolompoeren parkeergarage: grotere lastvlakken;
- ankers achteraf en door-en-door aanbrengen als dwarskrachtwapening;
- achter insnijpende ankers achteraf aanbrengen als dwarskrachtwapening.

7





8

Uiteindelijk boden al deze maatregelen geen oplossing. Achtereenvolgend omdat: onvoldoende invloed op krachtsverdeling; ontoelaatbare impact op treinexploitatie; en (on) betrouwbaarheid oplossing. Daarom worden momenteel (medio 2017) oplossingen uitgewerkt waarbij de extra aan te brengen parkeerlaag door middel van lokale overkluisingsconstructies direct op de onderbouw (wanden, kolommen) wordt afgedragen.

### Tot slot

Herinrichting van de openbare ruimte waaronder daken van landtunnels biedt interessante mogelijkheden voor opdrachtgevers, bestuurders en/of omwonenden. Ondanks de 'nieuwe' en strengere regelgeving (Eurocodes) is berekeningstechnisch veel mogelijk. Onder andere door de speciaal voor de beoordeling van bestaande bouwwerken beschikbare regelgeving (NEN 8700-serie) in combinatie met specifieke regelgeving van Rijkswaterstaat (RBK). Na weliswaar uitgebreide berekeningen is in onderhavig project, waar de kolombelastingen op het tunneldak met circa 50% worden vergroot, gebleken dat het aantal te versterken locaties beperkt is. Vanwege de grote impact op de exploitatie van het treinverkeer in de Schipholspoortunnel is uiteindelijk besloten om vooral overkluisingsconstructies toe te passen. Duidelijk is ook geworden dat een in hoge mate geoptimaliseerd wapeningsontwerp de constructieve speelruimte in de toekomst beperkt. ☒

### LITERATUUR

- 1 Eurocodes: NEN-EN 1990 (Grondslagen van het constructief ontwerp), NEN-EN 1991 (Belastingen op constructies), NEN-EN 1992 (Ontwerp en berekening van betonconstructies).
- 2 *fib* Model Code for Concrete Structures 2010 (MC2010), *fib* CEB-FIP. Ernst & Sohn, Duitsland.
- 3 Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken, ROK 1.3. Rijkswaterstaat – Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- 4 Richtlijnen Beoordelen Kunstwerken, RBK 1.1. Rijkswaterstaat – Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- 5 NEN 8700 Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren – Grondslagen.
- 6 NEN 8701 Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren – Belastingen.

### PROJECTGEGEVENS

**project** Schipholspoortunnel - Uitbreiding parkeergarage P1  
**opdrachtgever herberekeningen** Schiphol Nederland BV  
**beheerder tunnel** ProRail  
**review namens ProRail** TNO Bouw  
**herberekeningen tunnel** Movares Nederland BV  
**ontwerp uitbreiding parkeergarage** Royal HaskoningDHV