

## Bezwijkveiligheid van boortunnels

Eindrapportage

Met bijdragen van

Dr. ir. A.H.J.M. Vervuurt	- TNO
Ir. A. de Boer	- Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur
Ir. C. van der Vliet	- Arcadis
Ir. J.A. den Uijl	- Technische Universiteit Delft
Ir. Q.C de Rijke	- Arthe Civil & Structure

**Versie** 10 - definitief

**Datum** 15 december 2009

## Voorwoord

In de periode van 2004 tot en met 2008 is in het kader van Delft Cluster het onderzoeksproject “*Bezwijkveiligheid Boortunnels*” uitgevoerd. In het project is onderzoek gedaan naar het gedrag van boortunnels onder invloed van een ovaliserende bezwijkbelasting. Het onderzoek maakt onderdeel uit van het gezamenlijk onderzoek van het consortium DC-COB, het samenwerkingsverband tussen Delft Cluster en het Centrum Ondergronds Bouwen.

Het onderzoek is gefinancierd door Het Gemeenschappelijk Praktijkonderzoek Boortunnels (GPB) van het COB, Rijkswaterstaat Bouwdienst en de Delft Cluster partijen TNO en TU Delft. De onderzoekswerkzaamheden zijn uitgevoerd onder auspiciën van DC-COB begeleidingscommissie TC151. Het projectmanagement is in handen geweest van TNO Bouw en Ondergrond.

Gedurende de looptijd van het project hebben de volgende personen deel uit gemaakt van de begeleidingscommissie van het project:

Dr.ir. C.B.M. Blom	Gemeentewerken Rotterdam	
Ing. R. Boer	Consortium DC-COB	(2007)
Ir. A. de Boer	Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur	
Ir.W.H.N.C. van Empel	Witteveen en Bos.	
Ir.F.B.J. Gijsbers	TNO Bouw en Ondergrond.	
Ir. J.J. Heerema	Consortium DC-COB	(2007)
Ir. P.P.T. Litjens	Consortium DC-COB	(2006/2007)
	Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur <sup>*)</sup>	(vanaf 2007)
Ir. S.J. Lokhorst	Movares	(2004-2006)
Ir. D.J. Molenaar	Consortium DC-COB	(2004/2005)
Ing. B.K.J. Obladen	T&E Consult	
Ir. J.A. den Uijl	Technische Universiteit Delft	
Ir. Q.C. de Rijke	Movares	(2006-2008)
	Arthe Civil & Structure	(vanaf 2008)
Dr. ir. A.H.J.M. Vervuurt (secr)	TNO Bouw en Ondergrond	
Ir. C. van der Vliet (vz)	Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur	(t/m 2006)
	Arcadis Infra	(vanaf 2006)
Ir. A. Bezuijen <sup>*)</sup>	GeoDelft	
Ir.D.C. van Zanten <sup>*)</sup>	Gemeentewerken Rotterdam	

<sup>\*)</sup> corresponderende lid

## Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	5
1.1	Geschiedenis.....	5
1.2	Inhoud van het onderzoek .....	5
2	Literatuurstudie bezwijkveiligheid boortunnels .....	7
2.1	Inleiding .....	7
2.2	Bezwijkveiligheid in boortunnelprojecten .....	7
2.3	Bezwijkmechanismen.....	8
2.4	De rol van grond, grout en het boorproces .....	9
2.4.1	Inleiding .....	9
2.4.2	Bijdrage van de grond bij bezwijken bij ovaliseren.....	10
2.4.3	Bijdrage van grout bij bezwijken .....	10
2.5	Conclusies en aanbevelingen.....	10
3	Full-scale bezwijkproeven .....	12
3.1	Inleiding .....	12
3.2	Vorbereidingen.....	12
3.3	Proefopzet.....	12
3.4	Bespreking van de resultaten.....	13
3.5	Conclusies en aanbevelingen.....	15
4	Eindige elementenberekeningen .....	16
4.1	Inleiding .....	16
4.2	Benchmarking voeggedrag.....	16
4.2.1	Inhoud onderzoek.....	16
4.2.2	Conclusies en aanbevelingen .....	17
4.3	Veiligheidsbeschouwing ringwerking .....	18
4.3.1	Inleiding .....	18
4.3.2	Inhoud van het onderzoek .....	18
4.3.3	Conclusies en aanbevelingen .....	20
4.4	Validatie ULS-berekening.....	21
4.4.1	Inleiding .....	21
4.4.2	Modellering en berekeningen.....	21
4.4.3	Resultaten.....	21
4.4.4	Conclusies en aanbevelingen .....	23
4.5	ULS veiligheidsbeschouwing “snap through” gedrag boortunnelling.....	24
4.5.1	Inleiding .....	24
4.5.2	Verificatie “snap through” gedrag Botlek lining thesis Blom balkmodel.....	24
4.5.3	Unity check analyses balkmodel met veren of bedding.....	25
4.5.4	ULS veiligheidsbeschouwing “snap through” gedrag via de probabilistische methode als alternatief op de L500 UC methode.....	28

4.5.5	Unity check analyse "snap through" gedrag integraal lining-grond model fase 2.....	29
4.5.6	Vergelijking maatgevend scenario met model fase 1 .....	30
4.5.7	Conclusies en aanbevelingen .....	31
5	Conclusies en aanbevelingen .....	33
5.1	Inleiding .....	33
5.2	Conclusies met betrekking tot de hoofddoelstellingen van het onderzoek .....	33
5.3	Conclusies met betrekking tot de gebruikte modellen en het ontwerp.....	34
5.3.1	Toegepaste numerieke modellen.....	34
5.3.2	Conclusies voor een hoge axiale normaalkracht in de lining.....	34
5.3.3	Conclusies voor een lage axiale normaalkracht in de lining.....	35
5.4	Overige conclusies en aanbevelingen.....	35
5.5	Slotopmerking .....	36
6	Rapporten en publicaties.....	37
6.1	Rapporten .....	37
6.2	Overige publicaties.....	37
7	Literatuur .....	39

# 1 Inleiding

## 1.1 Geschiedenis

Met de bouw van de Tweede Heinenoordtunnel is in Nederland een omvangrijk meerjaren onderzoeksprogramma gestart om de aanvankelijke nationale kennisachterstand op het gebied van geboorde tunnels in te lopen. Onderzoek naar het constructiegedrag van gesegmenteerde boortunnels maakt deel uit van dat programma. In dit kader is in 1999 de grote tunnelproefopstelling in het Stevinlaboratorium van de TU Delft gebouwd, waarin onder gecontroleerde omstandigheden diverse belastingscenario's zijn gesimuleerd. De proefopstelling is gerealiseerd in een samenwerkingsverband van TNO Bouw, TU Delft, de projectorganisatie HSL Zuid en de Managementgroep Betuweroute. Daarnaast zijn ook onderzoeken uitgevoerd bij de aanleg van verschillende andere geboorde tunnels (waaronder de Botlekspoortunnel, de Sophiaspoortunnel, de tunnel onder het Pannerdensch Kanaal en de Groene Hart Tunnel).

De monitoringsprojecten en de proeven in de tunnelproefopstelling hebben tevens geleid tot de ontwikkeling van rekenmodellen in omgevingen zoals ANSYS en DIANA. Deze ontwikkelingen vormen een belangrijk hulpmiddel bij het ontwerpen van nieuwe tunnels. Nu kunnen bijvoorbeeld ontwerpvarianten vooraf worden beoordeeld op de effecten van ringopbouw in de TBM. Dit heeft al geleid tot aangepaste voegontwerpen als stap in de verdere evolutie van vorm en detaillering van segmenten.

Aansluitend op de eerste proevenseries in de tunnelproefopstelling is in het kader van de eerste tranche van Delft Cluster een experimenteel en numeriek onderzoek uitgevoerd, naar de krachtswerking in boortunnels die zijn opgebouwd uit segmenten [1]. Dit onderzoek, waarbij gebruik werd gemaakt van drie ringen uit de Botlekspoortunnel, was gericht op twee aspecten, namelijk (1) het constructiegedrag onder gebruiksbelastingen en (2) het effect van onnauwkeurigheden in de plaatsing van segmenten tijdens de montage.

Bovengenoemde onderzoeken hebben opgeleverd dat met de beschikbare numerieke modellen het constructiegedrag goed kan worden beschreven. Verder is zowel experimenteel als numeriek aangetoond dat te grote onvlakheden in de ringvoegen leiden tot ontoelaatbare scheurvorming in de segmenten van de tunnel.

Na het in de eerste tranche van Delft Cluster uitgevoerde onderzoek is in de tweede tranche van Delft Cluster onderzoek gedaan naar de bezwijkveiligheid van boortunnels. Voor het gedetailleerde projectvoorstel van dit onderzoek wordt verwezen naar [2]; een samenvatting is gegeven in paragraaf 1.2.

Na afloop van dit onderzoek is in 2005 de grote tunnelproefopstelling ontmanteld.

## 1.2 Inhoud van het onderzoek

De onderzoeksprojecten zoals omschreven in paragraaf 1.1 (praktijkonderzoeken en Delft Cluster studies), zijn gericht op gebruiksbelastingen (SLS), zowel in de bouwfase als in de gebruiksfase. Een nog onvoldoend beantwoorde vraag betrof de constructieve veiligheid van de constructie (ULS). Hierdoor is niet duidelijk welke marge er is tussen de aanwezige belastingen en de belasting die tot bezwijken van de

tunnelconstructie leidt. In verband hiermee wordt in de praktijk een conservatieve benadering gevolgd bij de dimensionering van tunnelconstructies. Het beter bekend zijn van de marges tussen aanwezige en bezwijkbelastingen kan leiden tot economischer constructies. Daarnaast zijn ook de ontwikkelde rekenmodellen tot nu toe slechts gevalideerd voor gebruikscondities (SLS).

Het doel van het project waarvan in het onderhavige rapport verslag wordt uitgebracht, is daarom antwoord krijgen op de volgende vragen:

- Wat wordt verstaan onder de constructieve veiligheid (kwalitatief) van gesegmenteerde boortunnels en hoe groot is deze (kwantitatief)?
- Hoe verhoudt de ontwerpbelasting zich tot de werkelijk aanwezige belasting?
- In hoeverre zijn de voor de gebruikstoestand (SLS) gevalideerde numerieke modellen ook geldig voor de bezwijktoestand (ULS), rekening houdend met nieuwe inzichten?

In overleg met de sector is het experimentele deel van het onderzoek gericht op het bezwijkgedrag van de tunnelling onder invloed van ovalisatie (ringwerking). Hieraan werd de voorkeur gegeven boven onderzoek naar de bezwijkveiligheid tegen afschuiven van de lining. Hierbij speelde ook een rol dat de bestaande tunnelproefopstelling geschikt was voor het aanbrengen van ovalisatiebelasting, terwijl voor het doen van afschuifproeven ingrijpende aanpassingen nodig waren. Bovendien zou elk van de proeven informatie geven over het gedrag van de ringvoegen, waarmee ook de andere belastingsituatie zou kunnen worden nagerekend.

Om antwoord te krijgen op bovengenoemde vragen met betrekking tot ovalisatie van de ringen, is een aanpak gehanteerd waarbij afzonderlijk op de verschillende deelaspecten is ingegaan. Het project is daartoe onderverdeeld in de volgende deelonderzoeken:

- Studie betreffende de resultaten van aan boortunnels gerelateerde praktijkonderzoeken in de laatste decennia;
- Experimentele bepaling van de bezwijkbelasting bij ovalisatie;
- Numerieke bepaling van de bezwijkbelasting en validatie van het model.

De resultaten van de verschillende deelonderzoeken zijn toegelicht in hoofdstuk 2 tot en met 4. De conclusies en aanbevelingen zijn gegeven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 omvat een overzicht van de rapporten en publicaties die in het kader van het project zijn uitgebracht. De referenties zijn gegeven in Hoofdstuk 7.

## 2 Literatuurstudie bezwijkveiligheid boortunnels

### 2.1 Inleiding

In het kader van het onderzoek naar de bezwijkveiligheid van boortunnels is naast de tunnelproefopstelling en de numerieke simulaties voorzien in een literatuuronderzoek. De literatuurstudie betreft circa 50 relevante publicaties.

Voor het literatuuronderzoek zijn twee doelstellingen geformuleerd:

- 1) Het doen van een uitspraak over de bezwijkveiligheid van geboorde tunnels. Wat wordt hiermee bedoeld, en wanneer is een lining bezweken? Wat is het belang van bezwijken door ovalisatie ten opzichte van andere bezwijkmechanismen?
- 2) Het doen van een uitspraak over de relatie tussen grondbelasting en de belasting die voor de lining van belang is. Wat is in de definitie van de uiterste grenstoestand (ULS) met betrekking tot ovalisatie en de aan te houden ontwerpbelasting voor deze toestand?

### 2.2 Bezwijkveiligheid in boortunnelprojecten

De studie beperkt zich tot het bezwijken van de tunnel onder “normale” belastingen. Er wordt geen bijzondere aandacht besteed aan het bezwijken ten gevolge van calamiteiten als brand of explosie. Informatie over calamiteiten waarbij sprake is van het bezwijken van de tunnel onder normale belastingen is zeer beperkt voorhanden. De beschikbare praktijkvoorbeelden betreffen meestal calamiteiten tijdens de uitvoering en dan vooral in verband met instortingen aan het boorfront. Voorbeelden in de literatuur van het bezwijken van de lining tijdens de uitvoering of tijdens exploitatie van de tunnel zijn zeldzaam.

Van een aantal boortunnelprojecten zijn de gehanteerde ontwerpfilosofieën voor de lining ten aanzien van bezwijken bestudeerd. Daarbij is speciaal gelet op de beschouwde bezwijkmechanismen en de gehanteerde factoren voor belasting en sterkte en de rol van de grond bij de beoordeling van de bezwijkveiligheid. In de praktijk wordt gebruik gemaakt van zowel overall veiligheidsfactoren als partiële factoren. De factoren worden ofwel ontleend aan algemene normen voor het ontwerpen van constructies ofwel speciaal voor het project gedefinieerd. In verschillende landen, waaronder de Verenigde Staten, Frankrijk, Japan en Nederland, bestaan echter wel richtlijnen voor het ontwerp van boortunnels.

#### *Bezwijkveiligheid in de ontwerppraktijk*

In de ontwerppraktijk voor tunnels wordt de tunnelconstructie beoordeeld op uiterste grenstoestanden veroorzaakt door lokale bezwijkmechanismen (detailniveau). De tunnel wordt geacht te zijn bezweken bij het optreden van bezwijkmechanismen in of tussen segmenten zoals het ontstaan van het eerste plastische scharnier, het bezwijken op dwarskracht, verschuivingen in voegen of het bezwijken van een kom-nok verbinding. Er wordt geen gebruik gemaakt van de beschikbare herverdelingscapaciteit (bijv. door de samenwerking tussen de ringen dankzij de axiale voorspanning).

Door de veiligheid als geheel (grond- en constructie) te beoordelen en door gebruik te maken van partiële factoren voor de sterkte, de belasting en de gebruikte modellen, kan de integrale systeemveiligheid worden bepaald. Binnen CUR-COB L500 [3] is hiertoe een semi-probabilistische methode ontwikkeld, gebaseerd op de veiligheidsfilosofie volgens NEN 6700, waarbij de verschillende onderdelen expliciet worden

benoemd en gemodelleerd. Het voordeel van deze methode is de compleetheid en algemene toepasbaarheid ervan. Een nadeel lijkt de bruikbaarheid te zijn (ogenschijnlijk moeilijk toepasbaar voor de ingenieurspraktijk). Een aanscherping van de toetsingsrichtlijn in de vorm van een (Nederlandse) ontwerpnorm kan dit mogelijk verbeteren.

### 2.3 **Bezwijkmechanismen**

Bezwijkmechanismen kunnen worden ingedeeld naar: sterktemechanismen, stabiliteitsmechanismen en vervormingsmechanismen. Bovendien kan onderscheid worden gemaakt in mechanismen op detailniveau en mechanismen op tunnelniveau. Het blijkt dat boortunnels in de praktijk worden ontworpen op mechanismen die plaatsvinden op detailniveau. Dat houdt in dat de tunnel wordt geacht te zijn bezwiken bij bijvoorbeeld het ontstaan van het eerste plastische scharnier of bij het afschuiven van een kom-nokverbinding.

Van de bezwijkmechanismen die relevant zijn voor een ovaliserende tunnel is het mechanisme met een plastisch scharnier het eenvoudigste voorbeeld. Uit onderzoeksprojecten blijkt echter dat bij een horizontaal ovaliserende belasting na het ontstaan van het eerste plastische scharnier de belasting nog aanzienlijk kan worden opgevoerd. In de dissertaties van Blom [4] en Bakker [5] worden mechanismen met meer plastische scharnieren beschreven. Belangrijke parameters bij deze mechanismen zijn de samenwerking tussen de ringen en de ondersteunende werking van de omringende grond.

De bezwijkveiligheid van de lining in de bouwfase (ontspanning grond, groutinjectie) is nog maar beperkt bestudeerd. De relevante publicaties gaan in op de invloed van groutdruk op de buigende momenten en de marge tot bezwijkmoment van een segmentdoorsnede. Er moet rekening worden gehouden met zowel horizontale als verticale ovalisering. Er zijn echter geen publicaties over de globale bezwijkmechanismen bij een verticale ovalisering gevonden.

Op basis van de informatie die is verzameld in de literatuurstudie is een beeld verkregen van het bezwijken van een tunnel door ovaliseren, zie Figuur 1. Aan de linkerzijde staan enkele oorzaken van (toenemende) ovalisering verdeeld naar de belastingen, eigenschappen van de lining en eigenschappen van de grond. Deze oorzaken gecombineerd met de eigenschappen van de langsvogegen en de mate van samenwerking tussen de ringen kunnen leiden tot wezenlijke veranderingen (gevolgscenario's) in het gedrag van het systeem van gesegmenteerde ringen die weer leiden tot uiterste grenstoestanden. Bij de uiterste grenstoestanden zijn enkele mechanismen genoemd.

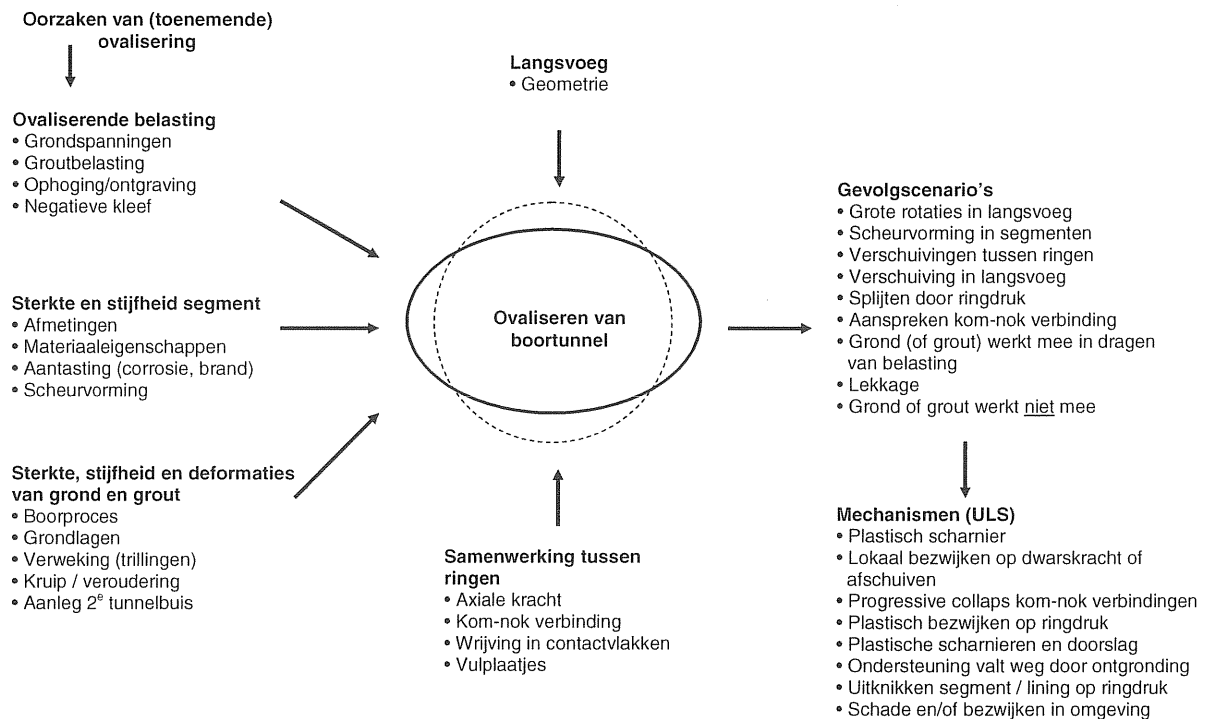
#### *Bezwijken bij horizontaal ovaliseren*

Uit onderzoek blijkt dat bij een horizontaal ovaliserende lining de ovaliserende belasting na het ontstaan van het eerste plastische scharnier nog aanzienlijk kan worden opgevoerd. Onder een toenemende ovaliserende belasting zal de ring in theorie uiteindelijk bezwijken op een drukspanning veroorzaakt door de ringnormaalkrachten en niet op buiging. Wordt ook de stabiliteit beschouwd, dan bezwijkt de tunnel bij meer plastische scharnieren door een doorslagmechanisme of door uitknikken bij een grote ringdrukkracht. In een homogene ring (de gesegmenteerde ringen werken goed samen), vindt een doorslag van de gehele tunnel plaats. In een enkele gesegmenteerde ring (de ringen werken niet goed samen) vindt de doorslag lokaal plaats. In deze mechanismen wordt vertrouwd op een ondersteunende rol van de grond.

In zijn dissertatie heeft Blom [4] de bezwijkbelasting van een enkele gesegmenteerde ring zonder en met een ondersteuning door grond gekwantificeerd. Daaruit blijkt dat bij een horizontale ovalisering dankzij de



ondersteuning van de grond de belasting waarbij het eerste plastische scharnier ontstaat, ca. 7 keer zo groot is als voor een ongesteunde ring en dat deze belasting nog eens met een factor 3 kan groeien tot een doorslag optreedt.



Figuur 1 Schematische weergave van oorzaken en invloedsfactoren die kunnen leiden tot ovaliseren van de tunnelling en tot bezwijkmechanismen in de uiterste grenstoestand.

## 2.4 De rol van grond, grout en het boorproces

### 2.4.1 Inleiding

Bij bezwijken door ovaliseren is de rol van grond in het ondersteunen van de ring afhankelijk van de stijfheidsverhouding tussen lining en grond. Onder gebruiksbelastingen kan een stijve grond al een aanzienlijk aandeel van de belasting op de tunnel naar zich toe trekken. Ook in een bezwijksituatie bij een horizontale ovalisering van de lining kan de grond een gunstige bijdrage leveren aan de bezwijkbelasting.

Tijdens het boorproces is er achter de TBM een zone waar de tunnelringen worden belast door het geïnjecteerde grout. Uit verschillende (COB-)onderzoeksprojecten is gebleken dat de tunnel door de groutbelasting kan ovaliseren (horizontaal of verticaal). Zolang het grout nog niet is verhard of geconsolideerd kan er (bij het bezwijken van de lining) niet worden vertrouwd op de ondersteuning van de lining door de achterliggende grond.

In de literatuurstudie worden grondverbetering en het toepassen van stalen segmenten genoemd als maatregelen die in tunnelprojecten kunnen worden genomen in verband met een slechte grondgesteldheid en de gevolgen daarvan voor de tunnelconstructie en op de onderlinge beïnvloeding van tunnelbuizen tijdens de aanleg.

#### 2.4.2 Bijdrage van de grond bij bezwijken bij ovaliseren

In een bezwijkmechanisme bij een horizontale ovalisering, kan de grond een zeer gunstige bijdrage leveren aan de bezwijkbelasting. Bij een goede ondersteunende werking van de grond in de flanken van de tunnel wordt door de grond een zodanige reactie gegenereerd dat er een geringe (of zelfs geen) netto ovaliserende belasting op de lining resteert. Deze reactie wordt in sterke mate bepaald door de afnemende stijfheid van de ring (scheurvorming of niet lineaire langsvoegrotaties).

Ondanks de gunstige werkende reactie van de grond gaat de ovalisering van de tunnel gepaard met grote vervormingen en verplaatsingen. Daardoor is het mogelijk dat andere bezwijkmechanismen worden geactiveerd nog voordat het beschreven bezwijkmechanisme bij horizontaal ovaliseren daadwerkelijk zal optreden. De ovalisering kan bijvoorbeeld aanleiding zijn voor ernstige lekkage en een daaruit voortvloeiende uitspoeling van de bedding van de tunnel.

#### 2.4.3 Bijdrage van grout bij bezwijken

Er wordt in Nederland maar ook internationaal veel onderzoek verricht naar de belastingsituatie van de tunnel tijdens de bouwfase (spanningsveranderingen in de grond, groutinjectie). De bezwijkveiligheid van de lining in deze fase is nog maar beperkt bestudeerd. De relevante publicaties gaan in op de invloed van groutdruk op de buigende momenten.

### 2.5 Conclusies en aanbevelingen

In de ontwerppraktijk voor boortunnels wordt de tunnelconstructie beoordeeld op de uiterste grenstoestanden veroorzaakt door locale bezwijkmechanismen. De tunnel wordt geacht te zijn bezweken bij het optreden van bezwijkmechanismen in of tussen segmenten, zoals het ontstaan van het eerste plastische scharnier, het bezwijken op dwarskracht, verschuivingen in voegen of het bezwijken van een kom-nok verbinding. Er wordt bij het ontwerp geen gebruik gemaakt van de beschikbare herverdelingscapaciteit. Indien de herverdelingscapaciteit wel zou worden beschouwd dan gaat de stabiliteit een rol spelen. Bij meerdere plastische scharnieren kunnen doorslagmechanismen of uitknikken plaatsvinden als gevolg van een grote ringdrukkracht.

In een bezwijkmechanisme bij een horizontale ovalisering kan de grond een zeer gunstige bijdrage leveren aan de bezwijkbelasting. Bij een goede ondersteunende werking van de grond in de flanken van de tunnel wordt door de grond een zodanige reactie gegenereerd dat een geringe (of zelfs geen) netto ovaliserende belasting op de lining resteert. Ondersteuning van de tunnel door de grond bij ovaliserende belasting gaat echter gepaard met grote vervormingen en verplaatsingen waardoor andere bezwijkmechanismen kunnen worden geactiveerd. De ovalisering kan bijvoorbeeld aanleiding zijn voor ernstige lekkage en een daaruit voortvloeiende uitspoeling van de bedding van de tunnel.

Uit de verschillende (COB-)onderzoeken is gebleken dat de tunnel door groutbelasting kan ovaliseren (horizontaal of verticaal). Zolang het grout nog niet is verhard of geconsolideerd kan er (bij bezwijken van de lining) niet worden vertrouwd op de ondersteuning van de lining door de achterliggende grond.

Naar aanleiding van de literatuurstudie zijn de onderstaande aanbevelingen geformuleerd.

#### 1) Modelonderzoek TC151

In de bezwijkproeven die zijn uitgevoerd in het kader van dit COB-project is er sprake van een netto ovaliserende belasting op de ringen. Immers er wordt alleen actief op belasting gestuurd en er is in de proefopstelling geen component aanwezig die de reactie van de omringende grond simuleert. In het project zal middels modelonderzoek het bezwijkgedrag van de tunnelringen uit

de proefopstelling worden geanalyseerd. Wanneer betrouwbare simulatie van het niet-lineaire vervormingsgedrag uit de proeven is verkregen, wordt aanbevolen ook het gedrag van de grond in dit model te introduceren en na te gaan hoe de samenwerking tussen de ringen het bezwijken van de tunnel in grond beïnvloedt. Door gebruik te maken van nieuwe beschikbare (probabilistische) methoden kan beter invulling worden gegeven aan nieuwe, beter gevalideerde, modelfactoren zoals die binnen CUR-COB L500 zijn geïntroduceerd en kunnen de waarden van de diverse parameters in de gebruikte modellen, beter worden ingeschat.

2) *Randvoorwaarden voor bezwijken bij ovaliseren*

Het wordt aanbevolen te onderzoeken wat de randvoorwaarden zijn om bezwijken middels horizontale ovalisering te realiseren, ofwel te onderzoeken welke bezwijkmechanismen van de tunnel worden geactiveerd door de gevolgen van extreme ovalisering en verschuivingen tussen segmenten (zoals uitspoeling door ernstige lekkage).

3) *Ontwerpfilosofie bouwfase*

Er is en wordt in verschillende (COB-)praktijkonderzoeken gewerkt aan metingen en modelvorming rond het boorproces en de gevolgen voor de lining en de omgeving. Het wordt aanbevolen om, naast het valideren van deze modellen met praktijkmetingen, de belastinggevallen tijdens de bouwfase die worden gemeten en/of voorspeld met deze modellen, te vergelijken met de belastinggevallen door de grond die traditioneel worden gebruikt voor het ontwerp van de lining. Daarnaast is het van belang te definiëren op welke wijze deze belastingen in een ontwerpfilosofie voor de lining moeten worden opgenomen (veiligheidsfactoren, ondersteunende rol van grout).

4) *Tangentiële belastingen*

Uitgaande van de initiële spanningssituatie in de grond kunnen de horizontale en verticale grondbelastingen voor een tunnelling worden getransformeerd in een radiale en een tangentiële belasting. In deze literatuurstudie is geen informatie gevonden over de bijdrage van tangentiële belastingen aan bezwijkmechanismen. Het wordt aanbevolen te onderzoeken of, en zo ja wanneer, rekening moet worden gehouden met tangentiële grondbelastingen en zo ja hoe deze belastingen moeten worden bepaald.

## 3 Full-scale bezwijkproeven

### 3.1 Inleiding

Met het model bestaande uit drie ringen van de Botlektunnel zijn in de periode van 1999 tot 2003 verscheidene series belastingproeven uitgevoerd gericht op de bouwfase en de gebruiksfase van een tunnelling opgebouwd uit geprefabriceerde gewapend betonnen segmenten. Voor het opbrengen van de belastingen werd gebruik gemaakt van de grote-tunnelproofopstelling, die was ontworpen voor beproeving onder gebruiksomstandigheden. Het doel van de onderhavige proeven was echter het draagvermogen vast te stellen onder ovalisatiebelasting. Om dit mogelijk te maken waren aanpassingen aan het model nodig. In dit hoofdstuk wordt kort stilgestaan bij de voorbereidingen die zijn getroffen aan het model, de opzet en uitvoering van de proeven en de belangrijkste resultaten. Voor nadere informatie wordt verwezen naar [12].

### 3.2 Voorbereidingen

Bij eerdere proeven waren enkele segmenten in de derde ring reeds gescheurd. Om de invloed van deze scheuren op de buigvervormingen van de ring onder ovalisatiebelasting zo klein mogelijk te doen zijn, is er voor gekozen het meest gescheurde segment te vervangen door een reservesegment en de derde ring over drie segmenten rechtsom te verdraaien, zodat de hoogste buigspanningen in weinig of niet gescheurde segmenten zouden optreden. Het reservesegment verschilde echter van het meest gescheurde exemplaar. Dit is opgevangen met op maat gemaakte vulplaten in de ringvoeg en vulplaten onder de lastverdelingsplaten van de axiale vijzels ter plaatse van de aansluiting op de buursegmenten.

Wanneer een gesegmenteerde ring wordt geovaliseerd bestaat het gevaar dat de ring “doorslaat”. Daarbij zal het draagvermogen plotseling sterk afnemen en zullen de verplaatsingen sterk toenemen. Gezien de grote hoeveelheid vervormingsenergie die hierbij vrij kan komen zou dit tot aanzienlijke schade kunnen leiden van model en opstelling, wat het beschrijven en interpreteren van het bezwijkgedrag ernstig zou kunnen bemoeilijken. Daarom is gezocht naar een mogelijkheid een tweede draagweg te vormen nadat het doorslaan heeft plaatsgevonden. Deze mogelijkheid is gevonden in het plaatsen van aluminium strippen in de langsvogen die bij doorslaan dichtgedrukt zouden worden. Mocht de ring doorslaan dan ontstaat een tweede draagweg, waarmee de momentcapaciteit van de langsvoeg aanzienlijk toeneemt.

### 3.3 Proefopzet

Bij ovalisatie van de ringen zijn twee situaties te onderscheiden die betrekking hebben op het al dan niet samenwerken van opeenvolgende ringen. Bij een lage normaalkracht in de lining zal de wrijving tussen de contactvlakken in de ringvoegen niet genoeg zijn om verschuiving van de ene ring ten opzichte van de andere te voorkomen. Elke ring moet de daarop uitgeoefende radiale belasting zelf opnemen. In dat geval zullen de langsvogen ter plaatse van het hoogste buigende moment maatgevend zijn. Is daarentegen de normaalkracht in de lining voldoende om slippen van de contactvlakken in de ringvoegen te voorkomen dan kan krachtsuitwisseling tussen opeenvolgende ringen plaats hebben. Doordat de lining in halfsteensverband is opgebouwd zal in het laatste geval de buigsterkte van een segment maatgevend zijn. Om de inwendige samenhang van het model te waarborgen is eerder de eis gesteld dat de axiale belasting 2,3 keer de uniforme radiale belasting moet bedragen. Bij een uniforme radiale belasting van 225 kN/vijzel bedraagt de axiale kracht dan ten minste 500 kN/vijzel. Gekozen is voor 800 kN/vijzel, wat in eerdere proeven het minimum was. In proef C01 bleek echter dat bij deze axiale kracht de samenwerking tussen de opeenvolgende ringen volledig in stand bleef. Voor proef C02 is daarom, na analyse van de opgetreden

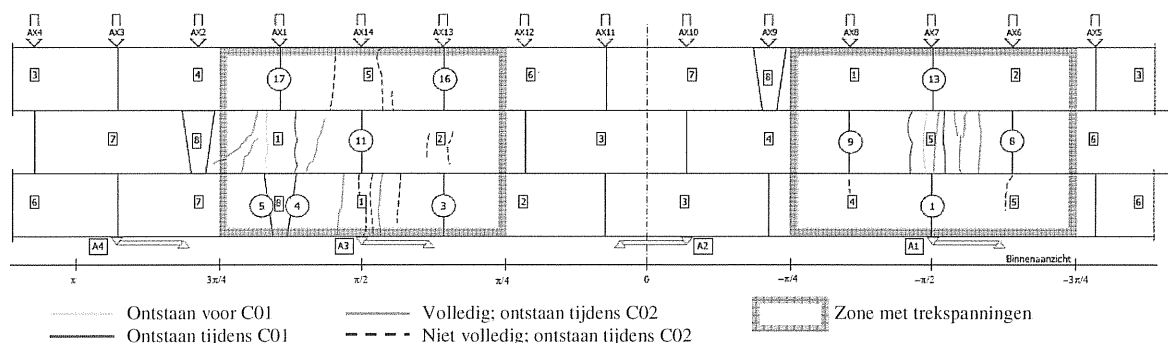
torsiekrachten in eerdere proeven met het oog op inwendig evenwicht, gekozen voor een veel lagere axiale kracht van 100 kN/vijzel.

Een belastingcyclus bestaat uit het stapsgewijze opbrengen van eerst de axiale en de uniforme radiale belasting en vervolgens de ovaliserende belasting. Na het bereiken van de gewenste situatie worden de belastingen in omgekeerde volgorde afgebouwd. Na elke stap worden de meetwaarden geregistreerd. Deze metingen bestaan uit de axiale, radiale en tangentiële vijzelkrachten, de globale verplaatsingen in radiale richting van de tunnelwand en het belastingframe, voegverplaatsingen en betonrekken aan de binnen- en buitenzijde van de tunnelwand en de radiale verplaatsing van de drie ringen met zes laseropnemers bevestigd aan een ronddraaiend frame.

Ten einde zo tijdig mogelijk te kunnen ingrijpen in de vooraf vastgelegde belastingprocedure als het gedrag van het model daartoe aanleiding zou geven, zijn de hoekverdraaiingen van de meest kritieke langsvogen on-line zichtbaar gemaakt. Daarnaast was via twee op afstand bestuurbare videocamera's de binnenzijde van het model voortdurend in beeld en kon op elk deel van de binnenwand worden ingezoomd. Zo is met belasten in proef C01 gestopt toen het ontstaan van buigscheuren in de hoogst belaste segmenten werd waargenomen.

### 3.4 Bespreking van de resultaten

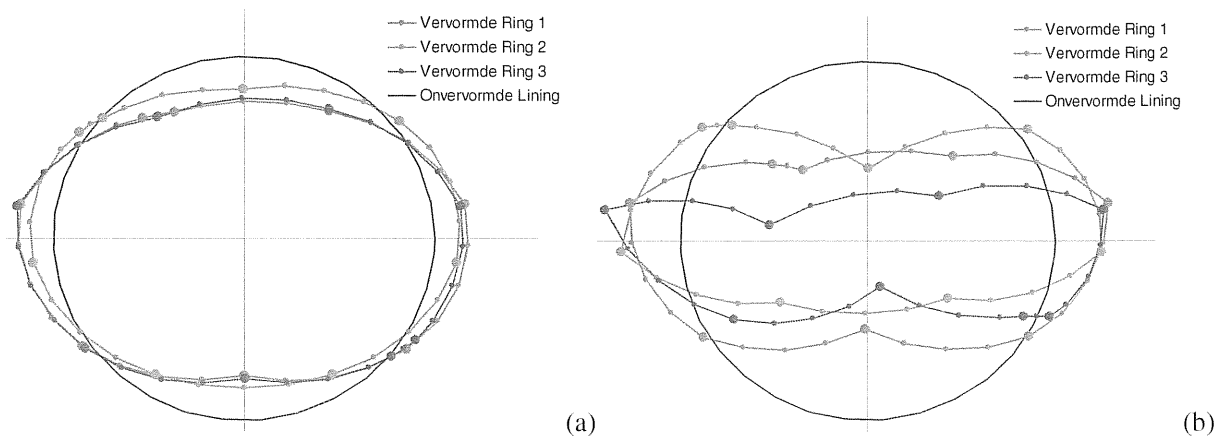
In proef C01 is de ovaliserende belasting opgevoerd tot stap 29 toen bleek dat aan de binnenzijde van de lining in ring 2 scheuren ontstonden. Dit gebeurde in de segmenten met de hoogste buigtrekspanningen, te weten segment 5 en segment 1. In beide gevallen gebeurde dit nabij een snede waarbij in de aanliggende ringen een langsvog aanwezig was, zoals uit Figuur 2 valt op te maken.



Figuur 2 Scheurontwikkeling aan binnenzijde van tunnelling voor en tijdens proef C01 en tijdens proef C02

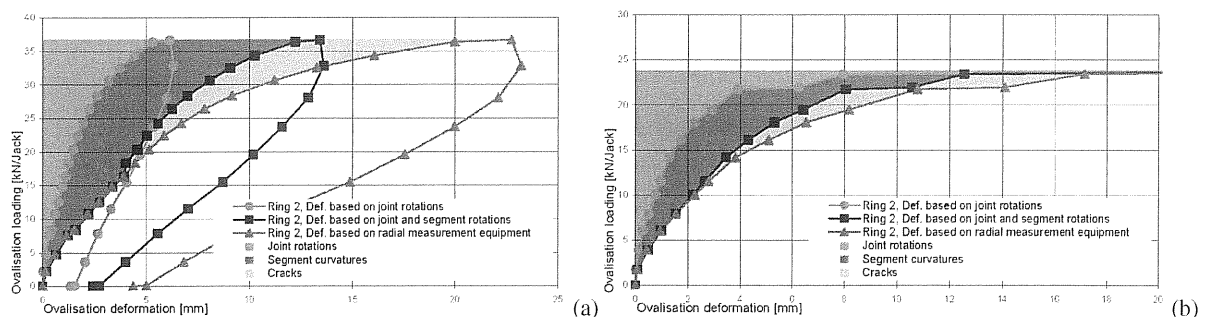
Uit de vervormingsmetingen viel op te maken dat bij deze ovalisatiebelasting van 36 kN/vijzel, zijnde de maximale waarde van de sinusvormige radiale belasting gesuperponeerd op de uniforme radiale belasting van 225 kN/vijzel, een plateau was bereikt. Een andere overweging om vanaf dit punt de belasting niet verder op te voeren was de wens de segmenten niet nodeloos verder te verzwakken met het oog op het zinvol kunnen uitvoeren van een volgende proef. In tegenstelling tot de oorspronkelijke verwachting bleven de ringen in proef C01 tot het einde in redelijke mate samenwerken. Dit kan worden opgemaakt uit Figuur 3a, waar de vervormde ringen 1, 2 en 3 zijn afgebeeld juist nadat begonnen was de ovalisatiebelasting af te bouwen. Te zien is dat ring 1 en 3 vrijwel samenvallen en dat de vorm van ring 2 daarvan enigszins afwijkt. Dit vindt zijn oorzaak in het feit dat de radiale verplaatsingen zijn opgebouwd uit langsvogrotaties en vervormingen van de segmenten. Doordat de langsvogen slapper zijn dan de segmenten levert dit een niet-gelijkmatige verdeling van de vervormingen langs de omtrek van de ringen. Uit Figuur 4 komt naar voren

dat met toenemende ovaliserende belasting het aandeel van de segmentvervormingen in de totale vervorming toeneemt. In proef C01 draagt vanaf ongeveer 20 kN/vijzel ook de scheurvorming in de segmenten daaraan in toenemende mate bij.



Figuur 3 Vervormingen ( $\times 50$ ) in proef C01 bij stap 30 (a) en proef C02 bij stap 28(b) bij maximale ovaliserende belasting

Om de kans op volledig samenwerken van de ringen zo klein mogelijk te maken is de axiale belasting, die in proef C01 800 kN/vijzel bedroeg, in proef C02 verlaagd naar 100 kN/vijzel. Tot een ovalisatiebelasting van 22 kN/vijzel bleken de ringen nog steeds goed samen te werken, maar bij het bereiken van deze belasting namen de ovalisatievervormingen bij gelijkblijvende belasting sterk toe. Daarbij verschoven en verdraaiden segmenten in naast elkaar gelegen ringen ten opzichte van elkaar, zoals ook te zien is in Figuur 3. Deze verplaatsingen traden op bij gelijkblijvendende krachten. De ovaliserende belasting nam pas weer toe toen nokken in de ringvoegen gingen aanliggen. Na het verhogen van de ovaliserende belasting tot 24 kN/vijzel ontstonden nieuwe scheuren in segment 1 van ring 1 en de segmenten 1 en 5 van ring 3 zoals te zien is in Figuur 2. De positie van deze scheuren geeft aan dat in deze fase een deel van de krachtoverdracht tussen de ringen via de nokken in de ringvoegen is verlopen. Locale stuikvervormingen van de nokken en de inkassingen, die bij demontage van het model zichtbaar werden, bevestigen deze veronderstelling.



Figuur 4 Ovalisatievervorming van ring 2 betrokken op de straal van de tunnel versus ovalisatiebelasting in proef C01 (a) en proef C02 (b)

Bij de opgebrachte ovalisatiebelasting zijn geen langsvoegen doorgeslagen; kennelijk was de weerstand die door de nokken in de ringvoegen werd geleverd voldoende om doorslaan te voorkomen. Bij de opgetreden verplaatsingen tussen de segmenten waren al wel veel verplaatsingsopnemers buiten werking geraakt. Zou verder zijn doorbelast dan waren waarschijnlijk een of meer nokken afgeschoven (of inkassingen zijn

uitgebroken). Gezien het feit dat de bezwijkfase duidelijk was aangebroken is er van afgezien de belasting verder op te voeren.

De resultaten van Figuur 3 en Figuur 4 zijn niet direct af te lezen uit de primaire metingen, maar wel zijn deze primaire metingen van groot belang voor het valideren van de modellen voor het simuleren van de vervormingen die tijdens de twee proeven zijn opgetreden. Bij deze simulatie kwam naar voren dat zich ook belangrijke normaalkrachten in de ringen kunnen ontwikkelen. Deze kunnen worden toegeschreven aan het opspannen van delen van een ring in omtreksrichting tussen contactpunten in de ringvoegen als gevolg van verschillen in verplaatsing bij een langsvog of een doorgaand segment.

### 3.5 Conclusies en aanbevelingen

De laatste serie proeven in de grote-tunnelproefopstelling was gericht op de veiligheid tegen bezwijken onder ovaliserende belasting. Daarbij is de axiale kracht gevarieerd. In de eerste proef is een axiale kracht van 800 kN/vijzel gekozen. Tijdens de proef bleek deze voldoende om de samenwerking van de drie ringen gedurende het gehele traject waarin op een uniforme radiale belasting van 225 kN/vijzel een ovaliserende belasting van  $\pm 36$  kN/vijzel werd gesuperponeerd, te waarborgen. Het opvoeren van de belasting werd gestopt toen de segmenten begonnen te scheuren. In de tweede proef is de axiale belasting verlaagd tot 100 kN/vijzel. Daarbij bleef de samenwerking tussen de ringen in stand tot een ovaliserende belasting van  $\pm 22$  kN/vijzel. Verder belasten leidde tot het verschillend vervormen van de ringen. Bij een ovaliserende belasting van  $\pm 24$  kN/vijzel gingen de nokken in de ringvoegen aanliggen in de inkassingen en ontstonden nieuwe scheuren.

Met modellen die met gebruikmaking van de meetgegevens zijn ontwikkeld bleek het mogelijk het vervormingsgedrag van de tunnelling te beschrijven. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de vervormingen veroorzaakt door verdraaiing van de langsvog en die veroorzaakt door de vervorming van de segmenten, zowel de elastische als die ten gevolge van scheurvorming.

Met deze proeven is voor het eerst experimenteel vastgesteld wat de weerstand tegen bezwijken is van een tunnelling die is opgebouwd uit segmenten. De resultaten van deze studie vormen een belangrijke toetssteen voor het valideren van eindige-elementenmodellen.

## 4 Eindige elementenberekeningen

### 4.1 Inleiding

Aansluitend aan de grootschalige proeven die zijn uitgevoerd door TNO en de TU Delft (hoofdstuk 3), is een aantal numerieke onderzoeken uitgevoerd waarbij de verschillende aspecten die bij het bezwijken van boortunnels onder invloed van ovalisatie een rol spelen, nader zijn geanalyseerd. De resultaten van deze onderzoeken zijn beschreven in het onderhavige hoofdstuk.

Eén van de belangrijke parameters voor het constructiegedrag van een gesegmenteerde lining is het langsvoeggedrag. In het eerste deel van het numerieke onderzoek is daarom gedetailleerd onderzoek gedaan naar het voeggedrag. Vervolgens zijn hier benchmarks voor opgesteld (paragraaf 4.2) en is nagegaan in hoeverre 2D-balkmodellen met voldoende nauwkeurigheid kunnen worden toegepast voor de voorspelling van het gedrag bij lage en hoge normaalkrachten van de tunnelboormachine. De resultaten van deze berekeningen zijn vervolgens gevalideerd op basis van de proeven en meer geavanceerde 2.5D-berekeningen waarbij de lining met schaalementen en de voegen conform de aanwezige geometrie zijn gemodelleerd (paragraaf 4.4). Tot slot zijn de resultaten gebruikt om de betrouwbaarheidsindex te bepalen (paragraaf 4.5). Aansluitend is per deelonderzoek een korte samenvatting gegeven.

### 4.2 Benchmarking voeggedrag

#### 4.2.1 Inhoud onderzoek

Voor de beschrijving van het langsvoeggedrag in rekenmodellen wordt doorgaans gebruik gemaakt van de eenvoudige analytische formulering van Janßen [6]. Deze relatie vormt de basis voor een recent ontwikkeld materiaalmodel in DIANA [7] voor interface-elementen in een schalenconfiguratie. De Janßen-relatie is gebaseerd op een aantal vereenvoudigingen, waardoor deze relatie voor de postdictieberekeningen in het Delft-Clusteronderzoek wellicht niet de gewenste nauwkeurigheid heeft.

Het deelonderzoek is gestart met het uitvoeren van een serie eindige-elementenberekeningen van het voeggedrag. Uit de vergelijking van de resultaten met de Janßen-relatie blijkt dat de Janßen-relatie de stijfheid van de voeg overschat, met name aan het begin van het niet-lineaire deel van de moment-rotatie-curve. Het verschil tussen de numerieke resultaten en de analytische Janßen-relatie verschilt per voegconfiguratie: bij een relatief brede voeg (ten opzichte van de segmentdikte) komen de resultaten beter overeen dan bij een smalle voeg waarbij de voeghoogte aanzienlijk kleiner is dan de segmentdikte.

Het verschil wordt veroorzaakt door het vereenvoudigde spanningsverloop in het contactvlak in de Janßen-relatie. Janßen gaat uit van een lineair spanningsverloop, terwijl uit de elasticiteitstheorie een sterk niet-lineair spanningsverloop volgt. Door Gladwell [8] is op basis van de elasticiteitstheorie een analytische formulering afgeleid voor het moment-rotatiegedrag van een strip op een elastische halfruimte.

Deze formulering is gebruikt als basis voor een analytisch-empirische relatie. In het verificatierapport wordt beschreven hoe de Gladwell-formulering wordt gefit op de eindige-elementenresultaten. Parameter in deze fit is de verhouding  $\beta$  tussen de voeghoogte  $h$  en de segmentdikte  $d$ . De analytisch-empirische relatie is vervolgens geïmplementeerd als User Supplied Subroutine naast de reeds geprogrammeerde



Janßen-relatie in het DIANA-materiaalgedrag voor shell-interfaces. Het geïmplementeerde materiaalgedrag is gecontroleerd met enkele eenvoudige testberekeningen. Voor toepassing in boortunnelmodellen is het raadzaam eerst enkele 'benchmarks' door te rekenen – hiervoor worden aanbevelingen gegeven.

In het kader van het praktijkonderzoek aan de Tweede Heinoordtunnel zijn door TNO voeggedragexperimenten uitgevoerd [9]. Uit de proefresultaten bleek dat de lineaire stijfheid van de voegen veel lager was dan de theoretische stijfheid op basis van de voegafmetingen. Het verschil wordt veroorzaakt door voegonvlakheid, en neemt af bij toenemende normaalkracht. Deze experimenten zijn nagerekend met beide voeggedrag-materiaalmodellen. Uit vergelijking van proef- en rekenresultaten bleek dat zowel de Gladwell-resultaten als de Janßen-resultaten initieel te stijf zijn. Wanneer de resultaten worden gecorrigeerd voor het initiële stijfheidsverschil, blijken de Gladwell-resultaten over het algemeen beter overeen te komen met de proefresultaten dan de Janßen-resultaten. Het experiment met hoge tangentiële normaalkracht vormt hierop een uitzondering. Waarschijnlijk is hierbij sprake is geweest van plastisch gedrag van het beton in het contactvlak.

In een vervolgonderzoek (niet gerapporteerd in het verificatierapport) is afgeleid hoe de initiële stijfheid van de voeg afhangt van de normaalspanning in het contactvlak, op basis van de proefresultaten van Hordijk en Gijsbers. Deze relatie is gerapporteerd in het postdictierapport [18].

#### 4.2.2 Conclusies en aanbevelingen

##### Conclusies

- 1) Door de niet-lineaire spanningsverdeling over het contactvlak in de langsvoeg gedraagt de voeg zich stijver dan gevonden wordt op basis van de betonscharnier-theorie. Hierdoor verschilt het moment-rotatiegedrag op basis van EEM-resultaten met de Janßen-relatie. De verschillen zijn afhankelijk van de verhouding tussen voeghoogte en segmentdikte.
- 2) De analytische Gladwell-relatie op basis van de 2D-elasticiteitstheorie komt goed overeen met EEM-resultaten. Op basis van deze relatie is een analytisch-empirische moment-rotatiere relatie afgeleid. Deze gefitte relatie geeft voor alle waarden voor de verhouding tussen voeghoogte en segmentdikte een goede beschrijving van het moment-rotatiegedrag.
- 3) De analytisch-empirische relatie is gebaseerd op volledig elastisch gedrag van beton. In werkelijkheid zal het moment-rotatiegedrag slapper worden bij toenemend moment als gevolg van plasticiteit in de zones met hoge contactspanningen. Wat ontbreekt in deze relatie is de invloed van de snelheid van belasting op de stijfheid. Beide tekortkomingen gelden ook voor de Janßen-relatie.
- 4) De analytisch-empirische relatie gaat uit van een perfect vlak contactvlak. In werkelijkheid zal het contactvlak nooit helemaal vlak zijn, waardoor de werkelijke rotatiestijfheid bij lagere normaalkrachten beduidend lager kan zijn dan de analytisch-empirische bepaalde waarde.

##### Aanbevelingen

- 1) Onderzoek de invloed van de belastingsnelheid op de stijfheid van het moment-rotatiegedrag en bepaling van de variatie waarmee in deze relatie rekening gehouden moet worden.
- 2) Onderzoek het effect van onvlakheid van de langsvoeg op het moment-rotatiegedrag en breidt het gedrag eventueel uit met een 'onvlakheidsfactor' (inmiddels gebeurd, zie postdictierapport).
- 3) Neem zo nodig plasticiteit op in het moment-rotatiegedrag.
- 4) Voer een verificatiestudie uit om de voegmodellering te optimaliseren.

## 4.3 Veiligheidsbeschouwing ringwerking

### 4.3.1 Inleiding

Voor de berekening van de bezwijkveiligheid van gesegmenteerde boortunnels onder invloed van ovalisatie van de lining kan gebruik worden gemaakt van verschillende hulpmiddelen, zoals analytische grondslagen, empirische modellen en numerieke modellen. Om de meest gedetailleerde beschrijving van het werkelijke gedrag te beschrijven worden 3D-modellen het meest geschikt geacht. Vanuit de perspectieven rekentijd en eenvoud van de modellen is er echter behoefte voor constructeurs om eenvoudige modellen ter beschikking te hebben waarmee betrouwbare resultaten kunnen worden verkregen. Voor de voorspelling van het bezwijkgedrag door ovalisatie zijn in dit opzicht 2D-ringmodellen het meest voor de hand liggend. Beperking van een dergelijk model is echter dat het in rekening brengen van niet te verwaarlozen 3D-effecten met kunstgrepen moet worden gerealiseerd. Enerzijds is dit niet wenselijk, anderzijds biedt de eenvoud en rekensnelheid van deze modellen zulke grote voordelen dat de nadelen van ondergeschikte betekenis blijken.

In het onderdeel *Veiligheidsbeschouwing Ringwerking* van het Delft Cluster onderzoek *Bezwijkveiligheid Boortunnels* is onderzoek gedaan naar de bezwijkveiligheid van de tunnelling onder invloed van een ovalisatiebelasting. Ten behoeve van het onderzoek is een 2D model ontwikkeld waarmee de verschillende invloeden zijn onderzocht. De resultaten van de uitgevoerde proeven zijn gebruikt om het model te valideren. Een volledige omschrijving van het onderzoek en de resultaten is gegeven in [10]. Een samenvatting is gegeven in [11]. Tijdens het onderzoek is een literatuurstudie uitgevoerd, waarbij in detail is gekeken naar het gedrag van de lining onder invloed van een ovalisatiebelasting in de uiterste grenstoestand. Vervolgens zijn de resultaten van de proeven in detail geanalyseerd en is op basis van de resultaten een balkmodel ontwikkeld dat is gevalideerd op basis van de proefresultaten [12]. Met een uitgebreide variatiestudie zijn de verschillende modelonderdelen in detail onderzocht.

### 4.3.2 Inhoud van het onderzoek

Om inzicht te krijgen in het vervormingsgedrag van de proefstukken van de in 2005 uitgevoerde experimenten (respectievelijk proef C01 en proef C02), zijn de meetgegevens uitvoerig geanalyseerd. De analyse betreft een aanvulling op de analyse zoals gerapporteerd in [12]. Hiertoe is onder andere nagegaan welk deel van de vervorming door ovalisatie wordt veroorzaakt door:

- kromming van de segmenten (ongescheurd);
- rotaties van de langsvogen en
- scheurvorming in de segmenten

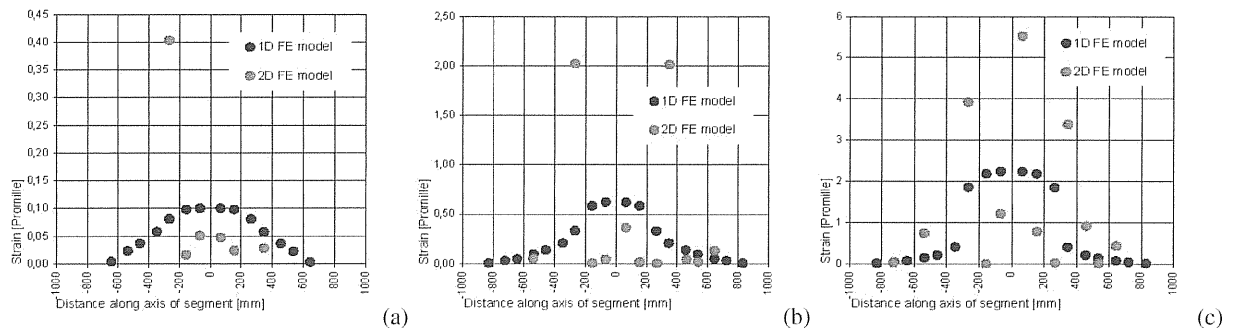
De resultaten van deze analyse zijn voor proef C01 en C02 weergegeven in [12] en voor een belangrijk deel beschreven in paragraaf 3.4. Hieruit blijkt dat in proef C01 een hoge axiale normaalkracht is aangebracht in vergelijking tot proef C02. Hierdoor is in proef C01 een goede samenwerking tussen de ringen aanwezig. Uit de resultaten bleek dat de bijdrage van scheurvorming op het ovalisatiegedrag in proef C01 erg groot is, terwijl in proef C02 de vervormingen worden gedomineerd door de rotatie van de langsvogen (zie Figuur 4 in paragraaf 3.4). Uit het onderzoek volgt verder dat tijdens de vervormingen in de buitenste ringen van proef C01 voornamelijk worden bepaald door de rotaties in de voegen en krommingen in de segmenten.

De voegrotaties in de middelste ring waren significant kleiner en een aanzienlijk deel van de vervormingen in deze ring werd veroorzaakt door scheurvorming in de segmenten.

Op basis van de resultaten van de proeven is met behulp van een eindige-elementenmodel vervolgens nagegaan in hoeverre de resultaten kunnen worden gesimuleerd. Hierbij is gebruik gemaakt van het eindige elementenprogramma DIANA. Er is een balkmodel van de ringen ontwikkeld dat in belangrijke mate vergelijkbaar is met in de ingenieurspraktijk gebruikte modellen. In het model zijn voor de segmenten balk-elementen gebruikt en voor de ringvoegen is gebruik gemaakt van zogenaamde koppelstaven. Voor de modellering van het langsvoeggedrag is gebruik gemaakt van het Janßen concept waarbij is voortgeborduurd op de resultaten van het deelonderzoek *Benchmarking* (paragraaf 4.2).

Uit de resultaten blijkt dat een balkmodel met koppelstaven voldoende nauwkeurig het bezwijkgedrag kan beschrijven. Belangrijk verschil met ringmodellen die normaliter worden gebruikt, is dat de afmetingen van de ringvoegen in tangentiële richting zijn mee gemodelleerd. Verder is gebleken dat het nascheurgedrag (tension softening) een verklaring kan zijn geweest voor de waargenomen hoge bezwijklast in proef C01. In de tweede proef (C02) was de axiale belasting aanzienlijk lager en was slippen van de ringvoegen en bezwijken van de langsvoegen maatgevend voor het draagvermogen van de lining.

Uit validatieberekeningen van het balkmodel (1D) met een ringmodel opgebouwd uit membraan-elementen (2D) is gebleken dat het globale ovalisatiegedrag voldoende nauwkeurig wordt beschreven indien wordt uitgegaan van een balkmodel. Op lokaal niveau traden echter verschillen op. In het bijzonder de plaats van scheurinitiatie en scheurlokalisatie was anders, zie Figuur 5. Uit de figuur blijkt dat het 1D-model gelijkmatig verdeelde scheuren over de lengte van het segment vertoont terwijl het 2D-model meer discrete scheuren op 300 a 400 mm uit het segmentmidden ontstaan en lokaliseren. Hierdoor levert het balkmodel een meer ductiel (mogelijk onveiliger) gedrag dan het membraan-model.



Figuur 5 Scheurrekken in de uiterste vezel van de doorsnede van het meest kritische segment in de middelste ring bij een belasting van 10 kN/vijzel (a), 20 kN/vijzel (b) en 30 kN/vijzel (c).

Voor wat betreft de langsvoegmodellering is gebleken uit [13] dat een modellering volgens het Janßen concept, ook voor de uiterste grenstoestand volstaat. Gebleken is dat de initiële stijfheid van de langsvoegen lager is dan voorgesteld door Janßen [6] en Gladwell [8]. Dit is in overeenstemming met resultaten van eerder COB-onderzoek [14] en met proeven op voegelementen [9].

Zoals eerder opgemerkt werd bezwijken in de tweede proef (proef C02) gedomineerd door bezwijken van de langsvoegen en slippen van de ringvoegen. De berekeningen hebben laten zien dat ook dit bezwijkmechanisme met het numerieke model wordt voorspeld. De uiterst opneembare schuifspanning is hierbij bepalend. In proef C01 werd de schuifsterkte in de ringvoegen niet bereikt.

### 4.3.3 Conclusies en aanbevelingen

#### Conclusies

- 1) Het uitgevoerde onderzoek heeft aangetoond dat ringmodellen opgebouwd uit balken, koppelstaven en langsvoeegen conform het Janßen-concept ook in de uiterste grenstoestand kunnen worden toegepast voor het bepalen de opneembare ovalisatiebelasting
- 2) Samenwerking tussen de ringen wordt bepaald door de grootte van de axiale TBM-belasting en is dominant voor de maximale ovalisatiebelasting. Zelfs een relatief lage axiale belasting kan in dit verband leiden tot een goede interactie tussen de ringen waardoor in de uiterste grenstoestand bezwijken van de segmenten maatgevend is. Het beschouwen van een enkele ring levert, zoals verwacht, een ondergrens van de maximaal opneembare belasting.
- 3) Uit het onderzoek is gebleken dat de grote capaciteit zoals waargenomen in proef C02 in volgorde van importantie wordt bepaald door de volgende aspecten:
  - Het lage wapeningspercentage in combinatie met het treksofteninggedrag van het beton en het daarmee samenhangende maximaal opneembare moment van de segmenten
  - Herverdeling van de tangentiële momenten in omtreksrichting van de lining
  - Een herverdeling van de tangentiële normaalkracht tussen de ringen
- 4) Doordat een lage axiale normaalkracht al volstaat voor een goede ringinteractie, behoort ondiep boren in Nederland wellicht tot de mogelijkheden. Voorwaarde is dat de normaalkracht gedurende de gebruiksduur van de tunnel ook daadwerkelijk aanwezig blijft.

#### Aanbevelingen

- 1) Gebleken is dat het al dan niet meenemen van het softeninggedrag van het beton onder trek een grote invloed heeft op de maximaal opneembare ovalisatiebelasting. Gezien de grote onzekerheid over de grootte van deze bijdrage wordt voor de praktijk aanbevolen dit aandeel niet mee te nemen in het ontwerp. Opgemerkt wordt dat ook het aanwezige wapeningspercentage in dit geval een grote rol speelt.
- 2) Het gebruik van het Janßen concept voor het modelleren van de langsvoeegen is ook voor de uiterste grenstoestand valide, mits de initiële stijfheid van de gebruikte voegelementen wordt gereduceerd conform eerder (experimenteel) onderzoek.
- 3) In het gebruikte model is voor de ringvoegen gebruik gemaakt van een normaalkracht onafhankelijk gedrag (constante axiale normaalkracht). Voor praktijktoepassingen met grond is het noodzakelijk hiervoor normaalkracht afhankelijk veren toe te passen.
- 4) In het onderzoek is uitgegaan van koppelstaven met een gelijke geometrie als in de proeven, terwijl in praktijkmodellen veelal gebruik wordt gemaakt van puntveren. Het effect hiervan is niet onderzocht, maar aanbevolen wordt het effect hiervan alsnog te onderzoeken.
- 5) Ringmodellen opgebouwd uit balk-, en voegelementen en koppelstaven kunnen goed worden gebruikt voor het voorspellen van de capaciteit van de lining in de uiterste grenstoestand, vooropgesteld dat de niet-lineaire eigenschappen van de verschillende onderdelen worden meegenomen (inclusief scheurvorming). Voorwaarde voor de waargenomen samenwerking tussen de ringen is dat de normaalkracht gedurende de gebruiksduur van de lining in de ringvoegen aanwezig blijft. Aanbevolen wordt om na te gaan in hoeverre hier vanuit mag worden gegaan.
- 6) De waargenomen extra capaciteit van de lining wordt in [10] mede verklaard uit de ringinteractie en het herverdeling van de normaalkracht en het moment van de buitenste ringen naar de middenring. De wijze waarop de normaalkracht wordt overgedragen is daarbij afhankelijk van de

geometrie van de voegen en de afmetingen van de segmenten in axiale richting. Aanbevolen wordt om het effect hiervan te onderzoeken. Dit kan bijvoorbeeld worden gedaan met een volume- of schaalmodel.

## 4.4 Validatie ULS-berekening

### 4.4.1 Inleiding

In het onderdeel Validatie ULS van het Delft Cluster onderzoek Bezwijkveiligheid Boortunnels zijn met behulp van een schaalementenmodel postdictieberekeningen gemaakt van de bezwijkproeven op de drie tunnelringen in het Stevinlab van de TU Delft (Hoofdstuk 3). De postdictieberekeningen zijn evenals de andere numerieke berekeningen uitgevoerd met het eindige elementenpakket DIANA en vormen een aanvulling op berekeningen met een balkenmodel (paragraaf 4.3). De berekeningen hebben tot doel om de resultaten van de eenvoudigere modellen te onderbouwen en de meerwaarde van een geavanceerde aanpak te verkennen.

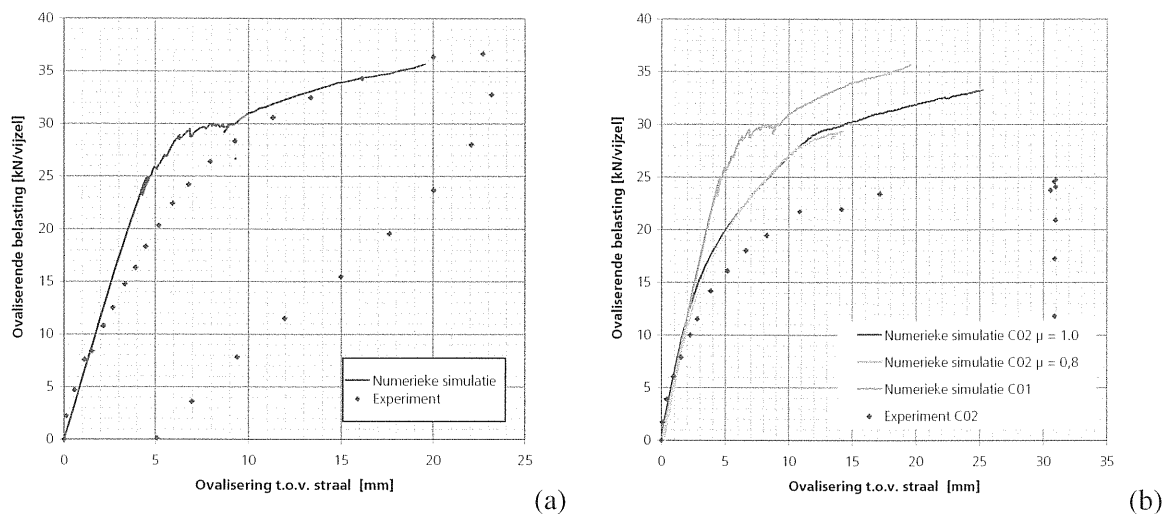
### 4.4.2 Modelling en berekeningen

Voor de validatieberekeningen is een 2,5D-model gebruikt. De impliciete aanname is hierbij dat de constructie zich gedraagt als een dunwandige constructie. De uitgangspunten voor modellering en materiaalgedrag zijn vastgesteld op basis van de beschikbare tekeningen en literatuur. Waar nodig zijn bestaande materiaalformuleringen verbeterd en nieuwe ontwikkeld. Met betrekking tot de formulering van het langs- en ringvoeggedrag is gebruik gemaakt van de in dit project ontwikkelde modellen (paragraaf 4.2). De berekeningen zijn uitgevoerd met niet-lineair materiaalgedrag (scheurvorming, afschuiving in voegen, plasticiteit in de wapening).

In totaal zijn twee berekeningen uitgevoerd. De uitgevoerde berekeningen komen overeen met de in Hoofdstuk 3 beschreven proeven (respectievelijk C01 met een hoge axiale normaalkracht en C02 met een lage normaalkracht). Voor de modellering van de tweede proef (C02) is rekening gehouden met de belastinggeschiedenis en scheurvorming in de eerder uitgevoerde proef C01. Verder is er rekening mee gehouden dat de wrijvingscoëfficiënt van de triplex-beton voegen anders is bij een hoge en lage axiale normaalkracht.

### 4.4.3 Resultaten

Een overzicht van de berekeningsresultaten van de uitgevoerde berekeningen is gegeven in Figuur 6. In de figuur zijn de berekenende ovalisatievervormingen gegeven. Uit de figuur blijkt dat er voor proef C01 (Figuur 6a) een goede overeenstemming is tussen numerieke en experimentele resultaten. Ook met betrekking tot de voorspelde scheurvorming en het waargenomen bezwijkmechanisme is geconcludeerd dat een betrouwbare voorspelling van het constructiegedrag gedaan kan worden gemaakt met een best guess van materiaalparameters, voor de gegeven belastingsituatie.



Figuur 6 Overzicht van de berekende ovalisatievervormingen in proef C01 (a) en C02 (b)

Het belangrijkste verschil tussen de berekening en proef C01 is gelegen in de stijgende tak van het diagram (tussen 10 kN/vijzel en 30 kN/vijzel). Gebleken is dat dit verschil tussen de berekening en het experiment terug is te voeren op de initieel ongescheurde staat van het numerieke model. Na scheurvorming benaderen de berekende waarden de experimentele resultaten goed. De verschillen tussen het waargenomen en het berekende scheurpatroon kunnen zijn veroorzaakt tussen de historie van het experiment, en door verschillen in materiaaleigenschappen (inhomogeniteit, gemiddelde waarde).

Proef C01 wordt zowel in de berekening als in de proef gekenmerkt door scheurvorming als het dominant mechanisme. Afschuiving in de ringvoegen treedt niet of nauwelijks op als gevolg van de hoge normaalkracht.

Voor de belastingsituatie van experiment C02 (Figuur 6b) blijkt het model veel minder goed in staat het constructiegedrag te voorspellen dan voor experiment C01. Evenals in de proef worden de vervormingen in deze berekening voor een belangrijk deel veroorzaakt door afschuiving in de ringvoegen. De verplaatsingen worden echter sterk onderschat, terwijl de bezwijkbelasting wordt overschat. De verschillen kunnen zijn veroorzaakt door een te vergaand vereenvoudigd materiaalgedrag van de triplexplaten (verwaarlozing dalende tak) en door de verwaarlozing van tweede-orde-effecten.

In Figuur 6b is de berekende ontwikkeling van de ovalisatie vergeleken met de gemeten verplaatsingen. In de figuur zijn twee simulatieresultaten getoond voor verschillende eigenschappen van de triplex voegplaten:  $\mu = 1,0$  (behorende bij proef C02) en  $\mu = 0,8$  (behorende bij proef C01). Beide berekeningen zijn doorgezet tot de berekening (numeriek) instabiel werd. Dit trad in beide situaties op bij een maximale belasting van ongeveer 30 kN/vijzel. Het verloop van de ovalisatie is in beide berekeningen gelijk tot een belasting van 28 kN/vijzel – vanaf dat moment nemen de berekende verplaatsingen voor  $\mu = 0,8$  enigszins sneller toe. Omdat het enige verschil tussen deze berekeningen de afschuifsterkte van de ringvoegplaten was, kan worden geconcludeerd dat het verschil in stijfheid tussen berekening en proef niet is veroorzaakt door een te hoge afschuifsterkte in de berekening.

#### 4.4.4 Conclusies en aanbevelingen

##### Conclusies

- 1) De resultaten van de postdictieberekening van experiment C01 komen goed overeen met de experimentele resultaten. Verschillen tussen metingen en berekening zijn voornamelijk het gevolg van de initieel ongescheurde staat van het rekenmodel, waardoor de stijfheid in eerste instantie wordt overschat. Na het ontwikkelen van buigscheuren in de segmenten benaderende en gemeten resultaten elkaar goed. Zowel de bezwijklast als de bijbehorende verplaatsingen verschillen minder dan 5% van de experimenteel gevonden waarden.
- 2) De resultaten van de postdictieberekening van experiment C02 verschillen aanzienlijk van de experimentele resultaten. De bezwijklast wordt overschat met ca. 30%, de berekende verplaatsingen blijven sterk achter bij de gemeten waarden. De verschillen kunnen zijn veroorzaakt door een combinatie van onder meer de volgende punten:
  - a. Voorafgaand aan de berekening van C02 is C01 doorgerekend, om zo de initiële staat van het model beter aan te laten sluiten bij het experiment. Deze berekening is minder ver doorgezet dan het experiment om numerieke problemen te voorkomen. Mogelijk was de scheurvorming nog niet ver genoeg ontwikkeld, wat de te hoge stijfheid in berekening C02 verklaart.
  - b. Het afschuifgedrag van het triplex-betoncontact in de ringvoegen wordt gekarakteriseerd door een afnemende schuifsterkte bij doorgaande vervorming. Bij een verplaatsing van 4 mm blijkt de schuifsterkte ca. 25% lager te zijn dan de initiële waarde. Deze dalende tak is in de berekeningen niet meegenomen.
  - c. Voorafgaand aan de berekeningen is aangenomen dat tweede-orde-effecten geen invloed zouden hebben. Onder invloed van de relatief grote tangentiële normaalkracht kunnen de buigende momenten echter met tientallen procenten toenemen, waardoor bij lage ringinteractie grotere vervormingen optreden en bezwijken eerder optreedt.
- 3) In berekeningen met het balkmodel (paragraaf 4.3) is wel een goede overeenstemming gevonden tussen experiment C02 en de berekening. Dat model verschilt echter op een aantal aspecten van het schalenmodel, in het bijzonder de scheurenergie (deze was in de berekeningen met het balkmodel hoger). Verder was de afschuifstijfheid en -sterkte van de ringvoegen in het balkmodel lager – de stijfheid was 57,5% lager en de sterkte was 27% lager dan in het schalenmodel). Daarnaast is in het balkmodel geen interactie van de sluitstenen met de segmenten in de naastgelegen ring(en) meegenomen en zijn de last-verdeelbalken boven en onder de ringen niet meegenomen. In hoeverre deze modelverschillen de resultaatverschillen verklaren is niet onderzocht.

Afsluitend kan worden gesteld dat meerwaarde van een meer geavanceerd model primair ligt in het feit dat meer inzicht wordt verkregen in het gedrag van de constructie, zoals herverdeling van momenten en normaalkrachten in de nabijheid van langsvoegen. Zolang de axiale belasting uniform is en niet in de tijd varieert biedt de 2,5D-benadering weinig voordelen. Wanneer de axiale belasting langs de omtrek of in de tijd varieert kan een schalenmodel voordelen bieden, omdat de interactie tussen de ringen in dat geval nauwkeuriger en minder bewerkelijk kan worden gemodelleerd.

##### Aanbevelingen

- 1) Onderzoek de invloed van tweede-orde-effecten op het gedrag van de constructie, en de mate waarin deze invloed afhangt van de axiale interactie tussen de ringen.
- 2) Onderzoek de invloed van de dalende tak in het afschuifgedrag van ringvoegen op het gedrag van de constructie.

## 4.5 ULS veiligheidsbeschouwing “*snap through*” gedrag boortunnelling

### 4.5.1 Inleiding

Rondom de aanpak om te komen tot een ULS beschouwing bestaan sinds het uitbrengen van het L500 rapport [3] in 2000 verschillende gedachtes. De L500 aanpak komt overeen met een beschouwing op basis van Unity Checks, waarbij een aantal analyses dient te worden uitgevoerd om te komen tot een acceptabel ontwerp van de lining. Naarmate er meer onzekerheden zijn in de parameters van de lining of omringende grondlagen, wordt het bewerkelijker om een Unity Check analyse te volbrengen en voldoende zekerheid te hebben over de betrouwbaarheid van het resultaat. Deze methode komt overeen met de gebruikelijke methode van ULS toetsing bij beton- en staalconstructies.

Een eenvoudiger methode is gepresenteerd door Blom [4]. Daarin wordt de ovaliserende belasting weergegeven als functie van de verplaatsing van de top van de ring. Hieruit blijkt dat de veiligheidsfactor eveneens berekend kan worden uit de verhouding tussen  $M_{ULS}$  en  $M_{pII}$  in de lining. Deze wijze van analyseren is snel en eenvoudig vergeleken met de L500-methode, maar niet opgenomen als alternatief in het L500-rapport [3].

Een niet-lineaire analyse van een constructie kent een zeer lage acceptatiegraad binnen de huidige ingenieurspraktijk. Het gebruik is beperkt en wordt als zeer specialistisch ervaren.

Plasticiteit is een robuust niet-lineair proces, echter zodra scheurvorming van de betonlining meegenomen dient te worden in de analyse kan het niet lineaire proces minder robuust worden. Het zal dan ook nog een aantal jaren duren voor de niet lineaire analyse geaccepteerd zal zijn als volwaardig alternatief voor de Unity Check methode. Binnen de ingenieurspraktijk is het gebruikelijk zoveel mogelijk te dimensioneren aan de hand van lineair elastische, statische analyses. Met de acceptatie van lichte scheurvorming in de betonlining blijft het niet-lineaire proces robuust en kan via een (semi-)probabilistische aanpak toch een betrouwbaarheidsindex berekend worden. Hierbij worden de (grote) aantallen Unity Check analyses gereduceerd tot enkele probabilistische analyses.

Aan de hand van de lining van de Botlek-spoortunnel zullen de diverse stappen binnen de genoemde methodes gedemonstreerd worden. De keuze voor de Botlek configuratie is in overeenstemming met de overige onderdelen van het onderhavige onderzoek.

### 4.5.2 Verificatie “*snap through*” gedrag Botlek lining thesis Blom balkmodel

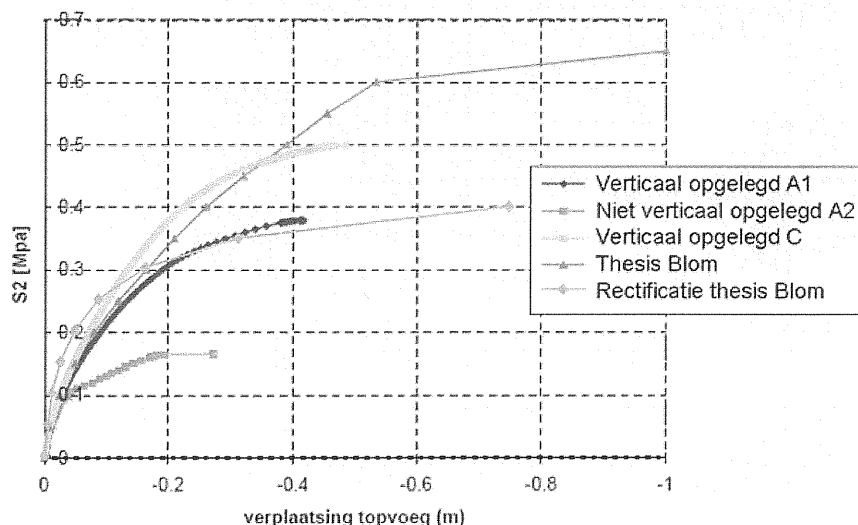
Aangezien de Botlek lining de basis vormt voor alle onderdelen binnen dit onderzoek is ook voor dit onderdeel gekozen voor de Botlek Spoorweg lining. Dit betekent dat er dus niet een doorstart gemaakt wordt op basis van de Tweede Heineoord lining, zoals beschreven in het L500 rapport. Een nieuwe lining configuratie betekent nieuwe basis Unity Check resultaten, die afhankelijk zijn van het gekozen rekenmodel. De Botlek lining is qua geometrie en belastingen uitgebreid beschreven in de thesis van Blom [4]. Van belang bij het zogenaamde *snap through* gedrag zijn de uniforme en ovaliserende belasting op de lining. Blom heeft binnen zijn thesis een balkenmodel gebruikt, wat binnen dit onderzoek dan ook vergelijkbaar is met het basismodel A. Er zijn in totaal vier rekenmodellen opgezet (model A-D), die variëren in opzet van de modellering.. Model A bestaat uit een lining van balkelementen met veren aan



weerszijden van de lining voor de simulatie van het grondgedrag. De langsvogen zijn meegenomen via 2-knoops rotatieveer elementen, voorzien van de Janßen-karakteristiek. Een variatie is gemaakt met betrekking tot de opleggingen. In model A1 zijn de opleggingen aan de top en de bodem van de lining aangebracht. In model A2 liggen de opleggingen in verticale zin aan weerszijden van de lining, oftewel 90 graden gedraaid ten opzicht van model A1. Deze opleggingen veroorzaken echter een sprong in de normaalkrachtenlijn ter plaatse van deze verticale oplegknooppunten. Deze configuratie is hier toch meegenomen omdat deze overeenkomt met het rekenmodel van Blom's thesis. In model B worden de veren door bedding-lijnelementen vervangen; dit levert gelukkig geen significante verschillen in resultaten zodat deze resultaten verder niet worden gebruikt. In model C zijn de rotatieveer-elementen van de langsvogen vervangen door kleine balkjes, die qua materiaaleigenschappen voorzien zijn van scheurvorming (geen trekspanning mogelijk in de langsvog). In het laatste rekenmodel in deze serie (model D) zijn de balkelementen uit de lining vervangen door vlakspanningstoestand elementen. Hiermee is de geometrie qua dikte van de lining beter te beschrijven.

In Figuur 7 is de invloed van de opleggingen voor de bovenbeschreven rekenmodellen weergegeven, met als aanvulling een correctie op de resultaten van Blom's thesis. De resultaten van de rekenmodellen kwamen niet overeen met de Blom resultaten, gepresenteerd in figuur 67 op pagina 91 [4]. Blom blijkt een aangepast belastingschema gehanteerd te hebben. Hij heeft dit aangepast, waarmee de ontwikkeling van de ovaliserende belasting uitgezet tegen de verticale verplaatsing van de topvoeg van de genoemde modellen verklaarbaar is en overeenkomstig is met het resultaat van model A.

Figuur 7 laat zien dat er een goede overeenkomst is tussen de gecorrigeerde resultaten van Blom en het verticaal opgelegde model A1. Aanpassing van de opleggingen onafhankelijk van de verticale richting geeft de meest ongunstigste ovaliserende belasting. Dit is dan ook de basisrun voor het vervolg van deze paragraaf.



Figuur 7 Ovaliserende belasting versus de verticale verplaatsing topvoeg lining

#### 4.5.3 Unity check analyses balkmodel met veren of bedding

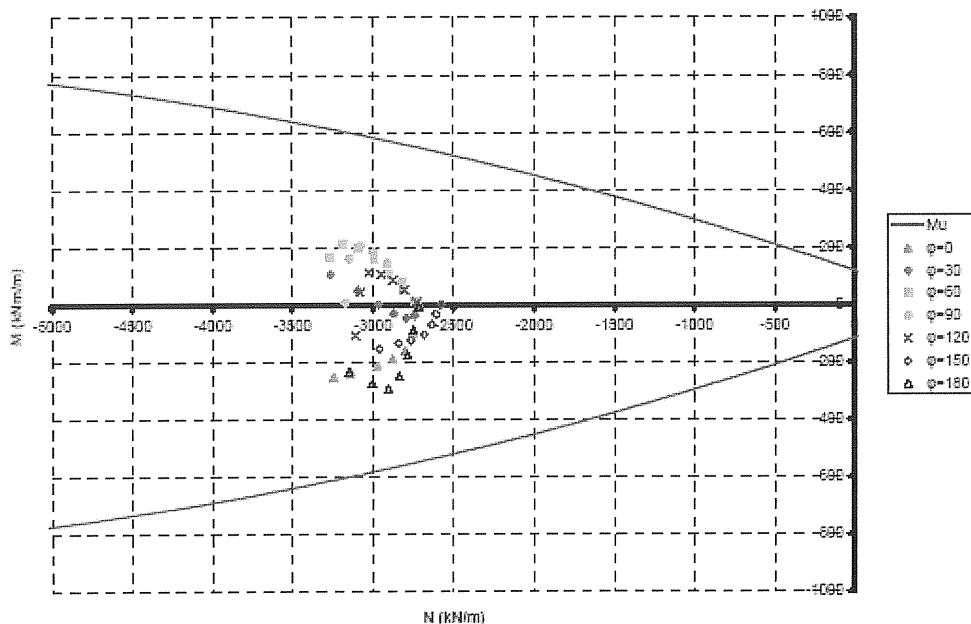
Het rapport L500 geeft richting aan de strategie die gevolgd kan worden om tot een betrouwbaarheidsindex te komen op basis van unity checks. De meest voor de hand liggende variatie in invoerparameters zijn de

invoerwaarden voor de elasticiteitsmodulus voor het beton, de stijfheid van de grond en de uniforme belasting op de lining. Met een hoge en lage waarde voor de elasticiteitsmodulus van het beton wordt indirect ook de langsvoegstijfheid aangepast. Aangezien de grond over de diepte van de tunnel varieert, is de grondstijfheid gevarieerd in een uniforme, een tweelaagse en een vierlaagse grondopbouw. Met een hoge en lage waarde voor de grondstijfheid levert dit in totaal 8 analyses. De laatste gevarieerde invoerparameter is de uniforme lining belasting (hoge versus lage belasting). Uit deze drie sets van analyses is een zogenaamde maatgevende set van invoerparameters vastgesteld (de meest ongunstigste voor het *snap through* gedrag voor de tunnel). Tabel 1 geeft een overzicht van de invoerparameters met de bijhorende variatie.

Tabel 1 Invoerparameters analyses fase 1

X	omschrijving	eenheid	$\mu$	V	verdeling	$X_d^L$	$X_d^U$
$E'_b$	E-modulus beton	MPa	$40,0 \times 10^3$	0,10	Standaardnormaal	$33,4 \times 10^3$	$46,6 \times 10^3$
$E_{oed}$	Stijfheid grond	MPa	38,0	0,25	Lognormaal	25,2	57,3
$\sigma_0$	Uniforme belasting	MPa	0,5	0,10	Standaardnormaal	0,418	0,582

In Tabel 1 zijn de  $X_d^L$  en  $X_d^U$  de lage en hoge rekenwaarde voor de te variëren invoerparameters van de genoemde rekengrootheden. Via de relatie tussen opneembaar moment en toelaatbaar bezwijkmoment kan een Unity Check opgesteld worden. Daarnaast is ook gekeken of de combinatie van berekend moment en bijbehorende normaalkracht binnen de gestelde grenzen ligt.

Figuur 8 Resultaten  $M_d$  en bijbehorende  $N_d$  bij verschillende locaties van de top tot de voet van de lining

In Figuur 8 is duidelijk is te zien dat de resultaten van  $M_d$  en  $N_d$  binnen de beide omhullingslijnen liggen die behoren bij het uiterst opneembaar moment  $M_u$  met bijbehorende  $N_d$ . De locaties lopen van de top tot de voet van de lining in stappen van 30 graden. Er blijft uiteindelijk een combinatie van 2 sets invoerparameters over, die elk hun eigen type *snap through* gedrag hebben. In Tabel 2 zijn de resultaten weergegeven van beide maatgevende sets.

Tabel 2 Maatgevende sets invoerparameters fase 1

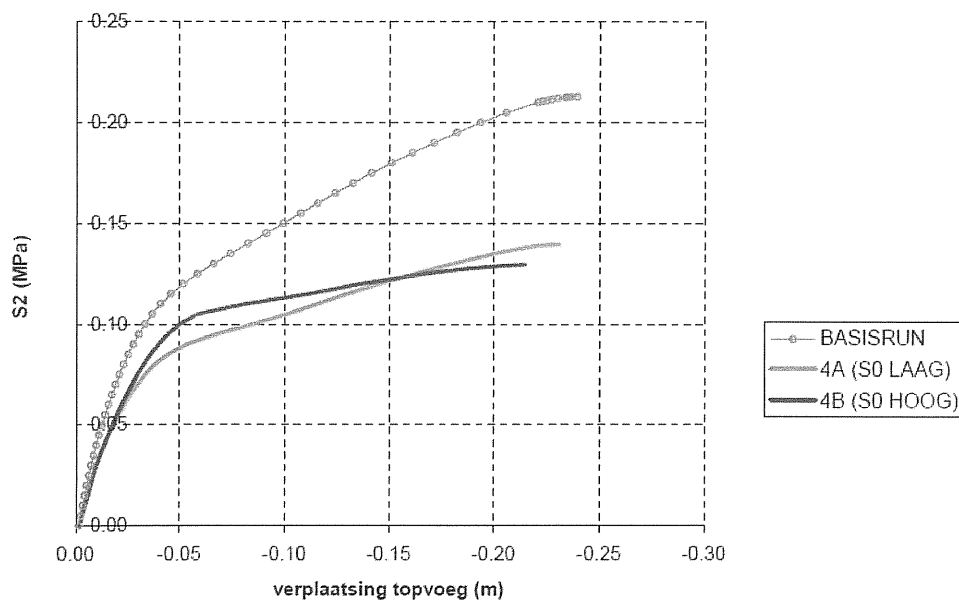
Set	$E'_b$	$E_{\text{langvoeg}}$	$E_{\text{oed}}$	$\sigma_0$	$M_d$	$N_d$	$M_u$	$M_u/M_d=1/UC$
Basis	$40,0 \times 10^3$	$2,353 \times 10^{11}$	38,0	0,5	159	-2340	498	3,14
Maatgevend	$33,4 \times 10^3$	$1,965 \times 10^{11}$	25,2	0,582	296	-2905	571	1,93

In Tabel 2 zien we dat alle invoerparameters de laagste waarde gaan aannemen, met uitzondering van de uniforme belasting die juist de hoogste waarde aanneemt. Het moment  $M_d$  is vervolgens het hoogste voorkomende ringmoment bij  $\Phi_2 = 0,05$  MPa, zijnde 10% van de uniforme belasting. Vervolgens kan met de uitgevoerde analyses de  $\Phi_{2,u}$  bepaald worden en daarmee de UC op *snap through*.

Tabel 3 Snap through parameters

Set	$\Phi_{2,i}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\Phi_{2,u}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\Phi_{2,u}/\Phi_{2,i}$
Basis	50	213	4,26
Maatgevend	50	129	2,58

Net als bij de bepaling van de UC waarden bij  $M_d/M_u$ , kan er ook een gelijkwaardige ratio voor het *snap through* gedrag berekend worden door middel van  $\Phi_{2,u}/\Phi_{2,i}$ . Deze waarde vermenigvuldigd met de waarde van de  $\sigma_2$ , de ovaliserende belasting geeft de definitieve maatgevende kracht-verplaatsing relatie voor de topvoeg.



Figuur 9 Ovaliserende belasting versus verticale verplaatsing topvoeg lining

Het is duidelijk dat de maatgevende ovaliserende belasting een lagere waarde kent dan de basisrun en daarmee automatisch ook kleiner wordt ten opzichte van Figuur 7. Beide maatgevende sets zijn weergegeven in Figuur 9. Bij een hoge waarde van  $\sigma_0$  wordt een lagere UC voor het *snap through* gedrag gevonden, vanwege het feit dat beide ontwikkelingslijnen van  $s_2$  elkaar snijden.

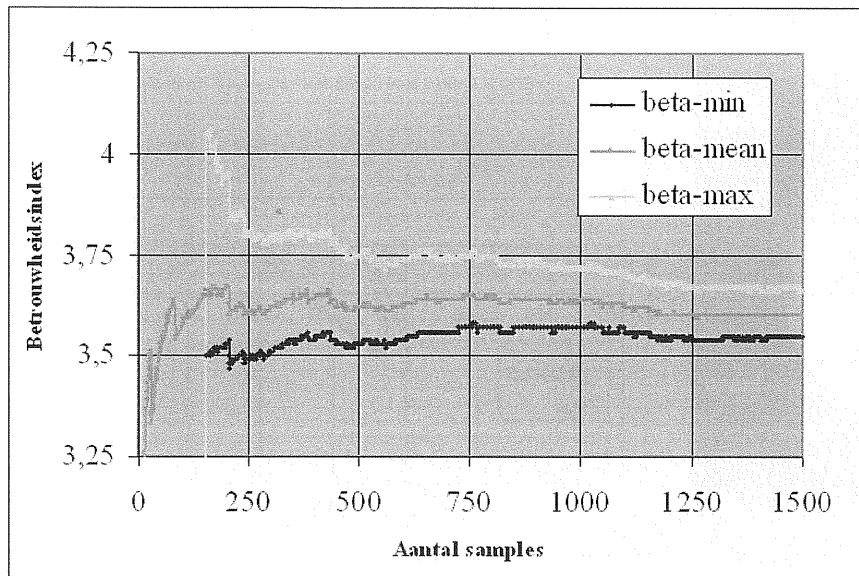
#### 4.5.4 ULS veiligheidsbeschouwing “snap through” gedrag via de probabilistische methode als alternatief op de L500 UC methode

In Tabel 1 zijn de waarden van de verschillende invoerparameters, inclusief hun verdelingen, vermeld. De waarden en verdelingen kunnen worden gebruikt bij een probabilistische analyse, waaruit dan automatisch een maatgevende set van invoerparameters bepaald wordt. Om het probabilistische rekenproces te bespoedigen is er in de jaren 2000-2005 in Delft-Clusterverband een probabilistisch module ontwikkeld, die gekoppeld is aan het FE pakket DIANA. Met de huidige kracht van de computers heeft een probabilistische analyse bij dit type modellen een acceptabele doorlooptijd. Aangezien de invoer al is gegeven in Tabel 1, wordt hier volstaan worden met het noemen van de limietparameter en de bijbehorende waarde. De limietparameter is uiteraard de maximaal toelaatbare verticale verplaatsing van de topvoeg van de lining. De meest realistische waarde van het *snap through* fenomeen van de topvoeg zou rechtstreeks horen te komen uit de afmetingen van de lining en is sterk gerelateerd aan de diameter van de lining. Deze waarde bedraagt meters en staat in geen verhouding tot de 0,22 meter uit Figuur 9, zijnde de maximale verticale verplaatsing van de topvoeg. Pragmatisch nemen we in dit geval een waarde van  $3 \times 0,22 = 0,66$  meter. Het aantal stochasten in de analyse is vier, de eerder genoemde drie basisvariabelen en de langsvoegstijfheid die gecorreleerd is aan de betonstijfheid. Dit levert de volgende resultatentabel op (Tabel 4).

Tabel 4 Resultaten probabilistische analyse lining snap through gedrag fase 1

Analyseproces aspect	Resultaat	Stochast	Resultaat
Probability of failure ( $P_f$ ):	0,159E-03	$E'_b$	0,386E+11
Reliability index (beta):	3,60	$E_{\text{langsvoeg}}$	0,454E+10
Confidence interval (beta lower - beta upper):	3,55 – 3,66	$E_{\text{oed}}$	0,558E+07
Coefficient of variation of reliability index	0.112	$\sigma_0$	-3,82
Number of samples	1.500		
Number of iterations:	546.951	Limiet	Waarde
Number of Core calculations:	1937	$u_{\text{top}}$	-0,660E+00

De procesresultaten (linker deel van Tabel 4) laten zien dat er een betrouwbaarheidsindex gehaald is van 3,6 met een variatiecoëfficiënt van 0,1. Er zijn in totaal iets meer dan een half miljoen trekkingen geweest, terwijl die geleid hebben tot 1937 analyses. De kans op falen is  $0,159 \times 10^{-3}$ . Het resultaat van de invoerparameters (de stochasten) laat zien dat de elasticiteitsmodulus van de beton omlaag gegaan is, de daaraan gecorreleerde langsvoegstijfheid ook en eveneens de stijfheid van de grond. In tegenstelling tot de maatgevende set parameters van fase 1 bij de UnityCheck methode gaat ook de uniforme belasting omlaag. Dit valt te verklaren uit het verschil in meerdere grondlagen bij de Unity Check paragraaf ten opzichte van één grondlaag bij de probabilistische analyse. Tenslotte wordt de ontwikkeling van de betrouwbaarheidsindex nog gegeven, zijnde een indicatie of de probabilistische analyse eerder had kunnen stoppen, aangezien de variatie en de kans op falen redelijk klein is. Deze resultaten zijn gegeven in Figuur 10. De figuur laat zien dat de zowel de waarde van de betrouwbaarheidsindex na ongeveer 1200 samples gelijk blijft, terwijl ook de variatie van de index hierna nauwelijks afneemt.

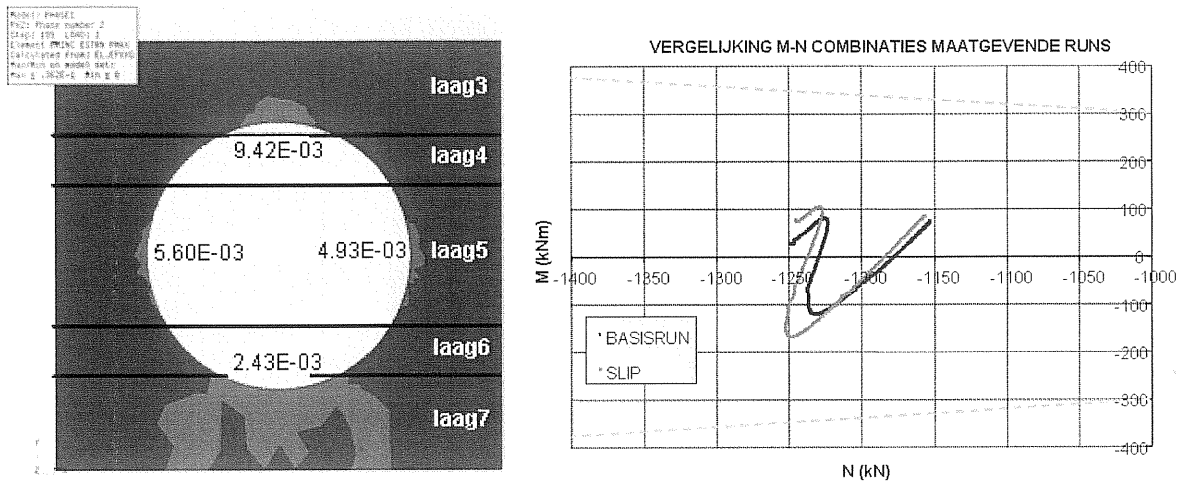


Figuur 10 Ontwikkeling betrouwbaarheidsindex ULS *snap through* gedrag topvoeg

#### 4.5.5 Unity check analyse "snap through" gedrag integraal lining-grond model fase 2

Het integrale lining-grond model is een vlakke spanningstoestand model waarbij ook de lining opgezet wordt met vlakke spanningstoestand elementen in plaats van balkelementen. Het interfacegedrag tussen lining en grond kan binnen dit type model beter volgens de werkelijkheid meegenomen worden. Bij dit model kunnen dezelfde variaties worden toegepast als bij de ULS *snap through* analyse met een balkmodel. Daarnaast is het actie-reactie gedrag van de lining op grond en omgekeerd ook toegevoegd aan de variaties, evenals het niet lineaire gedrag van de grondlagen zelf. Uitgaande van een lengteprofiel van de bodem bij de Botlektunnel betekent dit een zevental grondlagen, waarvan er vier aansluiten aan de lining zelf, evenals bij het balkmodel uit de vorige paragraaf. Om het analysewerk enigszins te beperken, zijn geen variaties uitgevoerd met de bovenste twee grondlagen waarin de lining zich niet bevindt. De elasticiteitsmodulus, de hoek van inwendige wrijving en de daaraan gecorreleerde neutrale grondrukcoëfficiënt, de volumieke massa en de cohesie (Mohr-Coulomb gedrag grond) zijn de gevarieerde parameters voor de grond. Daarnaast is voor de lining de elasticiteitsmodulus van het beton ook gevarieerd. Ten opzichte van het balkenmodel wordt de lining nu volledig ingebed met grondlagen, terwijl bij het balkenmodel de lining alleen aan weerszijden ondersteund werd door grondveren of door een bedding. Daarnaast wordt er geometrisch niet-lineairiteit toegevoegd aan de niet-lineaire analyse in verband met de te verwachten grote vervormingen bij zeer lage grondstijfheden.

Als kenmerkend resultaat worden ook hier M-N-diagrammen getoond, in overeenstemming met de eerdere analyses (zie Figuur 8). Tevens geven de optreden plastische gebieden van de grond een inzicht in de mate van bezwijken van grond en daaraan gekoppeld de krachtswerking in de lining, zijnde de gebruikelijke normaalkracht-, dwarskracht- en momentenlijnen. Uit deze set van analyses komt uiteindelijk weer een maatgevende set van parameters voor zowel grond en beton, die als invoer gebruikt wordt voor de variatie rondom de interactie van lining met grond. Hier zijn beide extreme situaties met elkaar vergeleken, zijnde volledige aanhechting en slip. Het resultaat van deze laatste variatie is dat het rekenmodel met slip de meest maatgevende variatie is met de laagste Unity Check waarde 2,11. Deze waarde ligt iets hoger dan de Unity Check bij het balkenmodel.



Figuur 11 Plasticiteitsgebieden grondlagen model met slip + bijbehorend M-N diagram fase 2

Figuur 11 laat zien dat zowel in de flanken als in de top en bodemvoeg plasticiteit optreedt in de verschillende grondlagen. De maximale waarden van de verschillende plasticiteitsgebieden is numeriek weergegeven in de figuur. De plasticiteitsgebieden beperken zich tot het getoonde gebied. Het werkelijke rekenmodel is uiteraard vele malen groter dan het getoonde gebied. De rechterzijde van Figuur 11 laat het M-N diagram zien van zowel het basismodel als van het maatgevende model met slipgedrag tussen de lining en de grond. De resultaten blijven ruimschoots binnen de toelaatbare (groene) omhullenden. In vergelijking tot het balkenmodel zijn de waarden van het moment en de normaalkracht echter aanzienlijk kleiner. Het balkenmodel gedraagt zich stijver, wat ook overeenkomt met de algemene verwachting van dit type model.

#### 4.5.6 Vergelijking maatgevend scenario met model fase 1

In fase 1 is een maatgevende set parameters samengesteld, op analoge wijze als in deze rapportage. De maatgevende set parameters voor model fase 1 is als volgt (UC):

$$\begin{aligned} E'_b &= \text{hoog} \\ E_{\text{ocd}} (\text{alle lagen}) &= \text{laag} \\ S_0 &= \text{laag} \end{aligned}$$

De maatgevende parameterset (fase 2) is als volgt samengesteld:

$$\begin{aligned} E'_b &= \text{hoog} \\ E_{\text{grond}} \text{ laag 3 \& 4} &= \text{hoog} \\ E_{\text{grond}} \text{ laag 5, 6 \& 7} &= \text{laag} \quad (\text{laag 5} = \text{flanken, equivalent aan lage overall grondstijfheid in model fase 1.}) \end{aligned}$$

Een lage stijfheid in laag 5 (fase 2) komt overeen met het toepassen van een lage overall-stijfheid in model fase 1. Laag 5 heeft, door zijn ligging aan de flanken, een grote invloed op de stijfheid van het systeem. In fase 1 was vooral de grondstijfheid van invloed op de vervormingen en snedekrachten in de ring. De UC nam bij model fase 1 toe respectievelijk af met 14,1% en 29,8%. In de in deze rapportage beschreven berekeningen is de invloed van de stijfheid van de grond ook dominant gebleken. De invloed is echter

beperkter dan in model fase 1. In Tabel 5 staat de vergelijking tussen de maatgevende runs uit de voorgaande fase en de huidige fase weergegeven:

Tabel 5 Vergelijking UC's fase 1 en 2

	fase 1			fase 2(slip)		
	UC	%	$\Delta\%$	UC	%	$\Delta\%$
Gemiddeld	3,26	100,0	0,0	2,79	100	0,0
Maatgevend	1,93	59,2	-40,8	2,11	75,6	-24,4

De UC bij het model uit fase 1 met maatgevende parameterset ondergaat een verlaging van 40,8%, versus 24,4% voor het model uit fase 2. De relatief geringe gevoeligheid van de tunnel in het grondcontinuüm (fase 2) voor de stijfheid van de grondlagen aan de flanken ten opzichte van fase 1 is grotendeels terug te voeren op de aanwezigheid van bedding aan de boven- en onderzijde van de tunnel. Deze bedding is in het fase 1 model niet aanwezig.

#### 4.5.7 Conclusies en aanbevelingen

##### Conclusies

- Het in fase 1 gehanteerde model op basis van een gedeeltelijk lineair ingebedde tunnel is slechts kwalitatief vergelijkbaar met het in fase 2 gehanteerde model op basis van een continuümmodellering van de grond.
- Een hoge betonstijfheid leidt tot verhoging van de snedekrachten. De toename van de doorsnede-capaciteit door de hogere betonsterkte wordt overtroffen door de toename in de buigend moment. De resulterende veiligheid neemt hierdoor af. Deze conclusie kan zowel voor het in veren als in continuüm ingebedde tunnelmodel worden getrokken.
- De cohesie heeft in het beschouwde geval een verwaarloosbare invloed op de veiligheid van de constructie. De invloed van cohesie kon in het in veren ingebedde tunnelmodel niet worden beschouwd.
- De grondstijfheid heeft een grote invloed op de grootte van de radiale verplaatsingen en buigende momenten. Een stijvere grondslag reduceert de vervormingen en krachten in de tunnel. Deze conclusie kan zowel voor het in veren als in continuüm ingebedde tunnelmodel worden getrokken.
- Het beeld van plasticiteit in de grond is in alle runs globaal hetzelfde. Variaties in grondstijfheid leveren lokaal kleine extra plastische zones op, waar deze in de basisrun niet voorkwamen. De invloed van plasticiteit kon in het in veren ingebedde tunnelmodel niet worden beschouwd.
- Een hogere hoek van inwendige wrijving levert een lagere waarde voor  $K_0$ , waardoor de horizontale korrelspanningen afnemen. De amplitude van de ovaliserende belasting neemt hierdoor toe, waardoor grotere momenten en vervormingen ontstaan. De grond aan de flanken heeft hierop de meeste invloed. De veiligheid neemt af bij toenemende hoek van inwendige wrijving. In het in veren ingebedde tunnelmodel wordt middels de expliciet opgegeven ovaliserende belasting (deels bepaald door  $K_0$ ) kwalitatief dezelfde gevoeligheid gevonden.
- De volumieke massa van de grond heeft in het beschouwde geval een zeer geringe invloed op de UC van de tunnel (ongeveer 3,0%). Het plastische gedrag van de grond wordt nauwelijks beïnvloed door de volumieke massa van de grond.

##### Aanbevelingen

Met bijdragen van dr. ir. A.H.J.M. (Adri) Vervuurt, ir. A (Ane) de Boer, ir. C. (Coen) van der Vliet, ir. J.A. (Joop) den Uijl, ir. Q.C (Quirijn) de Rijke

Aanbevolen wordt om, in navolging van het door TNO uitgevoerde onderzoek naar de bezwijkveiligheid van boortunnels, met een gekoppeld ringmodel te rekenen. In de praktijk is feitelijk altijd sprake van gekoppelde tunnelringen, hetzij door vizelplaten, hetzij door nokken. Hiermee kan inzicht in de invloed van ringkoppeling op het bezwijkmechanisme van de tunnelring worden verkregen. De in het geval van ontkoppelde tunnelringen missende dimensie met betrekking tot vorming van plastische scharnieren in de gewapend betonnen doorsnede kan met een gekoppeld ringmodel worden beschouwd. Wederom dient de onderlinge verhouding tussen een veiligheidsfilosofie op basis van de Unity Check methode en geometrisch niet-lineair ringbezwingen te worden beschouwd.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Inleiding

In de periode van 2004 tot en met 2008 is in het kader van Delft Cluster het onderzoeksproject “Bezwijkveiligheid Boortunnels” uitgevoerd. In het project is onder auspiciën van DC-COB begeleidingscommissie TC151 onderzoek gedaan naar het gedrag van boortunnels onder invloed van een ovaliserende bezwijkbelasting. Gedurende de looptijd van het project zijn op verschillende deelgebieden onderzoeken uitgevoerd om het inzicht te vergroten in het bezwijkgedrag van gesegmenteerde boortunnels.

De hoofddoelstellingen van het onderzoek waren [2]:

1. Wat wordt verstaan onder de constructieve veiligheid (kwalitatief) van gesegmenteerde boortunnels en hoe groot is deze (kwantitatief)?
2. Hoe verhoudt de ontwerpbelasting zich tot de werkelijk aanwezige belasting?
3. In hoeverre zijn de voor de SLS-toestand gevalideerde numerieke modellen ook geldig voor de ULS, rekening houdend met nieuwe inzichten?

In het kader van het onderzoek is gebruik gemaakt van een groot aantal numerieke modellen. Ten behoeve van het onderzoek zijn verder een aantal specifieke proeven uitgevoerd met de grote tunnelproefopstelling die gedurende enkele jaren in het Stevinlaboratorium van de Technische Universiteit beschikbaar is geweest. Met de proefopstelling is het draagvermogen van de lining bepaald onder invloed van een ovaliserende belasting bij een hoge en een lage axiale normaalkracht in de lining. Om deze bezwijkbelasting te kunnen bepalen is de opstelling aangepast en geschikt gemaakt voor de beproevingen in de Ultimate Limit State (ULS). De commissie is van mening geweest dat de beschikbaarheid van de proefresultaten een belangrijke toegevoegde waarde heeft voor de conclusies die aan de numerieke voorspellingen worden verbonden.

### 5.2 Conclusies met betrekking tot de hoofddoelstellingen van het onderzoek

In de ontwerp praktijk wordt algemeen de tunnel als bezweken beschouwd wanneer de buigende momenten in de tunnel leiden tot het eerste plastisch scharnier. De tunnel bezit echter na het bereiken van dit mechanisme nog reservecapaciteit. Uit de literatuurstudie die in het kader van dit onderzoek is verricht blijkt dat in verschillende onderzoeken een reservecapaciteit (veiligheidsfactor) wordt gevonden, variërend in grootte van 1 tot 13 (!). Met betrekking tot doelstelling 1 (zie paragraaf 5.1) is gebleken dat er meerdere mogelijkheden zijn voor de definitie van constructieve veiligheid. Het samenspel van de tunnelling met het omringende grout en grond zorgt ervoor dat na het ontstaan van het eerste plastische scharnier, er nog veel reservecapaciteit over is. Bij toenemende belasting zullen zich meerdere plastische scharnieren ontstaan die kunnen leiden tot verschillende mechanismen zoals door- en uitslag of grote vervormingen van de tunnel die leiden tot ernstige lekkages met kans op uitspoeling van de bedding van de tunnel.

Omdat in het onderzoek voornamelijk gebruik is gemaakt van de resultaten van de laboratoriumproeven waarbij een netto-belasting op de lining is aangebracht, is in het onderzoek weinig aandacht besteed aan de relatie tussen de ontwerpbelasting en de werkelijk aanwezige belasting (doelstelling 2). In de berekeningen zoals gerapporteerd in [15] en [16] is de grond wel meegenomen in de modellering.

Met betrekking tot de modellering van het bezwijkgedrag (doelstelling 3) is aangetoond dat de gehanteerde numerieke modellen betrouwbaar kunnen worden toegepast voor de uiterste grenstoestand. Aansluitend wordt hier in meer detail op ingegaan.

### 5.3 Conclusies met betrekking tot de gebruikte modellen en het ontwerp

#### 5.3.1 Toegepaste numerieke modellen

Zoals bovenstaand opgemerkt, is gebruik gemaakt van verschillende (ontwerp)numerieke modellen. Deze modellen varieerde van eenvoudige analytische (ring)modellen tot geavanceerde niet-lineaire schalenmodellen waarin het voeggedrag waarheidsgetrouw is nagebootst. Samengevat zijn de volgende numerieke modellen gebruikt en geëvalueerd:

- Een analytisch ringmodel in Excel [12].
- Een balk-ringmodel met een Duddeck ondersteuning voor de grond [15] en zonder grondondersteuning [10].
- Een 2D-plane strain model van de lining (vierhoekige elementen) met grond [16]. Een vergelijkbaar model is eveneens toegepast voor het opstellen van een bechmark voor het voeggedrag [13]
- Een 2D membraan-ringmodel zonder grond [10]. In dit model is de lining in dikterichting met vierhoekige elementen gemodelleerd. De eenheidsdikte van het model komt overeen met de breedte van één ring.
- Een 2,5D schalenmodel, zowel lineair waarbij reeds aanwezige scheuren in rekening zijn gebracht door een verlaging van de stijfheid [17] als niet-lineair met scheurvorming [18].

Een toelichting op de conclusies met betrekking tot het gebruik van deze modellen voor het voorspellen van de bezwijkveiligheid en het gebruik in de ontwerppraktijk is gegeven in de aansluitende paragrafen.

#### 5.3.2 Conclusies voor een hoge axiale normaalkracht in de lining

Bezwijken van de lining wordt bij een hoge axiale normaal kracht en daaraan gerelateerde goede interactie tussen de ringen gedomineerd door het bezwijken van de segmenten. De langsvogen spelen in dat geval een minder grote rol. Voor deze situatie worden de volgende conclusies getrokken:

- Gebleken is dat zelfs een als laag gekarakteriseerde normaalkracht voldoende groot was voor een goed ringinteractie. Indien in het ontwerp voor het opnemen van de belastingen rekening wordt gehouden met deze ringinteractie, dan dient de axiale normaalkracht gedurende de gebruiksduur van de tunnel aanwezig te zijn en te blijven.
- Het globale bezwijkmechanisme bij een goede ringinteractie kan zonder problemen door de verschillende numerieke modellen worden voorspeld. De stijfheid en wrijvingscoëfficiënt van de ringvoegen speelt een minder grote rol omdat hierin geen slip optreedt. Voor de modellering van de langsvogen volstaat een beschrijving volgens Janßen.

Het onderzoek heeft aangetoond dat eenvoudige (balk)modellen vaak voldoende nauwkeurig zijn voor het voorspellen van het bezwijkgedrag, in het bijzonder indien dit betrekking heeft op het globale ovalisatiegedrag. Voor het nauwkeurig beschrijven van lokale effecten bieden meer complexe modellen betere mogelijkheden.

- Op basis van de uitgevoerde proeven en de daaraan gerelateerde berekeningen is geconcludeerd dat de reservecapaciteit van de onderzochte tunnelconstructie substantieel is, in het bijzonder indien het bezwijkgedrag wordt bepaald door het bezwijken van de segmenten. Deze 'reservecapaciteit' is echter voor een belangrijk deel toe te wijzen aan de (buigtrek)sterkte van het beton en het nascheurgedrag van het beton in combinatie met het lage wapeningspercentage in de segmenten. Met het oog op het brosse gedrag van beton onder trek is het echter aan te bevelen deze reserves in het ontwerp niet aan te spreken. Hierdoor zou de robuustheid van de constructie kunnen worden aangetast.

### 5.3.3 Conclusies voor een lage axiale normaalkracht in de lining

Bij een minimale axiale normaalkracht wordt bezwijken gedomineerd door het falen van de langsvogen. Het niet-lineaire gedrag van de segmenten is van minder groot belang. Voor de bepaling van de bezwijklast kan in dat geval mogelijk zelfs worden uitgegaan van lineair gedrag van de segmenten (dit is echter niet gecontroleerd). Voor deze situatie worden verder de volgende conclusies getrokken:

- Het gedrag van de voegen is bepalend voor het draagvermogen van de constructie. Daar staat tegenover dat uit een vergelijking van de resultaten is gebleken dat het draagvermogen bij een lage axiale normaalkracht aanzienlijk minder betrouwbaar kan worden voorspeld.
- Een model waarin slechts een enkele ring wordt beschouwd, geeft een onderschatting van de capaciteit. Voor het ontwerp wordt daarom aanbevolen om bij een lage axiale normaalkracht uit te gaan van een enkele ring.
- In het bijzonder bij slippen van de ringvoegen treden grote vervormingen op (meer dan 100 mm ovalisatie). In het onderzoek is geen aandacht besteed aan eventuele 2<sup>e</sup> orde effecten en de invloed daarvan op het bezwijkgedrag. Het verdient aanbeveling hier in meer detail aandacht aan te besteden en de gevolgen daarvan voor de opneembare ovalisatiebelasting te kwantificeren.
- Het voeggedrag speelt een cruciale rol in het bezwijkgedrag, en in het bijzonder bij een lage axiale normaalkracht wanneer de ringvoegen slippen en de langsvogen roteren. Voor de modellering van de langsvogen (normaalkrachtafhankelijke rotaties) zijn de theoretische modellen volgens het Janßen- of het Gladwell-concept in principe voldoende nauwkeurig. Wel dient rekening te worden gehouden met de verschillen tussen deze theoretische modellen en de praktijksituatie. De stijfheid is in de praktijk veelal aanzienlijk lager dan de theoretische modellen aangeven.
- Met betrekking tot de balkmodellen is het is onvoldoende gelukt om het gedrag van koppelstaven te kwantificeren. Deze conclusie is in het bijzonder gebaseerd op een vergelijking van de berekeningen van Luttkholt en Van der Vliet voor de berekeningen met een lage axiale normaalkracht.
- Tenslotte wordt opgemerkt dat met name bij grote vervormingen van de lining, het grondgedrag een grote rol kan spelen. Ook op dit punt verdient het aanbeveling om nader onderzoek uit te voeren naar de gevolgen hiervan voor de bezwijkveiligheid.

## 5.4 Overige conclusies en aanbevelingen

De resultaten van het onderzoek hebben laten zien dat het bezwijkgedrag van gesegmenteerde boortunnels goed kan worden voorspeld wanneer de belasting waaraan de tunnel onderhevig is bekend is, in het bijzonder indien de ringen onderling samenwerken. Om het constructieve gedrag op een correcte wijze te voorspellen is het belangrijk dat de grond, het grondgedrag en de grond-tunnelinteractie correct wordt meegenomen in de modellen, evenals de koppeling tussen de ringen. Zoals eerder opgemerkt is dit een aspect waar in het onderhavige onderzoek slechts beperkt aandacht aan is besteed, met uitzondering van de

berekeningen met het balkmodel en het model met vlakspanningselementen, zie [15] en [16]. Hieruit is gebleken dat het gebruik van een balkmodel een stijver model tot gevolg heeft waarme grotere snedekrachten worden berekend. In de vele eerdere COB onderzoeken is eveneens aandacht besteed aan de belastingen uit de grond en de mate van ondersteuning van de grond voor de tunnelling. Het verdient aanbeveling de resultaten van deze eerdere onderzoeken te betrekken op de resultaten van het onderhavige onderzoek.

In het onderzoek is alleen aandacht besteed aan een ovaliserende belasting. Bezwijken onder invloed van dwarskracht (afschuiven) is niet beschouwd. Indien echter het voeggedrag (ring- en langsvogen) met voldoende betrouwbaarheid kan worden gemodelleerd, mag er vanuit worden gegaan dat ook het afschuifgedrag voldoende nauwkeurig kan worden voorspeld. Opgemerkt wordt dat deze conclusie niet is onderbouwd met experimenten en berekeningen maar is gebaseerd op de veronderstelling dat afschuifbezwijken eveneens wordt gedomineerd door de interactie tussen de segmenten. Aanbevolen wordt dit nader te onderzoeken.

## **5.5 Slotopmerking**

Sinds de bouw van de eerste boortunnel in Nederland halverwege de jaren 90 van de vorige eeuw, is door COB een schat aan informatie verzameld en kennis ontwikkeld met betrekking tot het gedrag en de veiligheid van dergelijke tunnels. Voorafgaand daaraan is in L500-verband een aanzet gegeven voor een richtlijn voor het ontwerpen van boortunnel.

Tot op heden is de sindsdien ontwikkelde kennis relatief smal toegepast binnen de individuele praktijk-onderzoeken. De commissie is van mening dat het aanbeveling verdient om de resultaten van de verschillende onderzoeken te bundelen en op basis daarvan een handreiking, aanbeveling of ontwerprichtlijn op te stellen voor het ontwerp van gesegmenteerde boortunnels. Een dergelijke richtlijn zou in feite een aanscherping moeten geven van het eerdere L500 onderzoek.

## 6 Rapporten en publicaties

### 6.1 Rapporten

Vervuurt, A.H.J.M. e.a. (2004). *Delft Cluster Workpackage voorstel: Bezwijkveiligheid boortunnels*. TNO rapport **2004-CI-R0155** (inclusief update november 2006).

Vervuurt, A.H.J.M. en Den Uijl, J.A. (2007). *Bezwijkveiligheid Boortunnels: Meetrapport en Evaluatie Proevenserie C*. TNO rapport **2005-CI-R0232** en COB-onderzoeksrapport **TC151-07-04**.

Vervuurt, A.H.J.M. *Metingen met Fibre Bragg Gratings (FBG) in de grote tunnelproefopstelling in het Stevin II laboratorium*. TNO rapport **2005-D-R0154**, april 2006.

Vervuurt, A.H.J.M. en Bauruelle, J.C. *Failure safety of segmented bored tunnels. Preliminary study on the effect of cracked segments in full scale tunnel tests*. TNO report **2004-CI-R0204**, december 2004.

Lokhorst, S.J. *Literatuurstudie bezwijkveiligheid van boortunnels*. COB-onderzoeksrapport **TC151-07-06**, februari 2007

Luttikholt, A.J.T. *Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining – Results of full-scale tests compared to finite element analysis*. Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft, juli 2007. TNO report **2007-D-R0767**, juli 2007

Vervuurt, A.H.J.M. *Resultaten Delft Cluster onderzoek “Bezwijkveiligheid Boortunnels – Veiligheidsbeschouwing Ringwerking”*. TNO rapport **2007-D-R0768**, juli 2007

Empel, N. van. *Onderzoek gevoeligheid van tunnelveiligheid voor spreiding in invoerparameters*. Witteveen en Bos, rapportnummer **RW1658-1/kleb2/003**, d.d. 31 augustus 2007

Empel, N. van. *Onderzoek gevoeligheid van tunnelveiligheid voor spreiding in invoerparameters, fase 2*. Witteveen en Bos (ongerefererd), **d.d. 12 februari 2008**

Vliet, C. van der. *Langsvoeggedrag op basis van de elasticiteitstheorie, een aanscherping van de Janssen relatie*. COB-onderzoeksrapport in voorbereiding (RWS conceptrapport, 15 maart 2007)

Vliet, C. van der. *Bezwijkveiligheid Boortunnels. Validatieberekening ULS-modellering met schalenmodel*. Arcadis-rapport, conceptversie 0.2, 22 april 2008.

### 6.2 Overige publicaties

Den Uijl, J.A. *Bijdrage COB dag*, 15 december 2005

Vervuurt, A.H.J.M. *Bijdrage COB Nieuws* (Tunnel in het lab), nummer 28, 2005

Vervuurt, A.H.J.M. en Uil, J.A. den. *Bijdrage COB Nieuws* (Hoe bezwijkveilig is een boortunnel), nummer 31, 2005

Uijl, J.A. den. *Bijdrage Stand* (Delft Cluster magazine). Nummer 1, 2005

Uijl, J.A. den. *Presentatie en bijdrage COB technologiesymposium*. 15 juni 2005

Lokhorst, S.J. *Publicatie Cement bezwijkveiligheid van boortunnels*. *Cement* nr 2, 2007

Luttikholt, A.J. en Vervuurt, A.H.J.M. *Bijdrage International users meeting DIANA Ontwikkelingsvereniging (DOV)*, Porto, Portugal. 19 april 2007

Vervuurt, A.H.J.M., Uijl, J.A. en Luttikholt, A.J. Failure behavior of segmented tunnel linings: Numerical modeling validated by full scale tests. *In Proc. EUROTUN Conference*, Vienna, augustus 2007.

Luttikholt, A.J., Vervuurt, A.H.J.M. en Uijl, J.A. den. Full-scale failure tests on a segmented tunnel lining. *International fib symposium*, Amsterdam, May 2008 (accepted for presentation).

Luttikholt, A.J. Vervuurt, A.H.J.M. Ultimate Limit State analysis of a segmented tunnel lining.. *Civiele Techniek*

## 7 Literatuur

- [1] Vervuurt, A.H.J.M., Uijl, J.A. den, Gijsbers., F.B.J. en Veen, C. van der. *Aanvullende Proeven in de Tunnelproefopstelling: Constructiegedrag Onder Gebruiksbelastingen en het Effect van Plaatsings-  
onnauwkeurigheden. Deel 1 en 2: Opzet en Resultaten van Serie A en B*, Delft Cluster Rapport **DC 01.06.02-01 en DC 01.06.02-02**, 2003.
- [2] Vervuurt, A.H.J.M. e.a.. *Delft Cluster Workpackage voorstel: Bezwijkveiligheid boortunnels*. TNO rapport **2004-CI-R0155**, 2004
- [3] CUR-COB L500. *Toetsingsrichtlijn voor het ontwerp van boortunnels voor weg- en railinfrastructuur*; **COB-Eindrapport**, 2000
- [4] Blom, C.B.M. *Design Philosophy of Concrete Linings for Tunnels in Soft Soils*. PhD-thesis Delft University of Technology, 2002.
- [5] Bakker, K.J. *Soil retaining structures; development of models for structural analysis*; PhD-thesis Delft University of Technology, 2000.
- [6] Janßen, P.. *Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings*. Dissertatie Braunschweig, 1983
- [7] Schreppers, G.M.A.. *User Supplied Subroutine voor interface shell-elementen*. TNO-DIANA-rapport **2004-DIANA-R012**, Delft, 2004
- [8] Gladwell, G.M.L.. *Contact problems in the classical theory of elasticity*. Alphen aan den Rijn, 1980.
- [9] Hordijk, D.A. en F.B.J. Gijsbers. *Laboratoriumproeven Tunnelsegmenten*, TNO rapport **96-CON-R0708/03**. Delft, 1996.
- [10] Luttikholt, A.J.T. *Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining – Results of full-scale tests compared to finite element analysis*. Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft, juli 2007. TNO report **2007-D-R0767**, juli 2007
- [11] Vervuurt, A.H.J.M. *Resultaten Delft Cluster onderzoek “Bezwijkveiligheid Boortunnels – Veiligheids-  
beschouwing Ringwerking”*. TNO rapport **2007-D-R0768**, juli 2007
- [12] Vervuurt, A.H.J.M. en Den Uijl, J.A. *Bezwijkveiligheid Boortunnels – Meetrapport en Evaluatie Proe-  
venserie C*. TNO Rapport **2005-CI-R0232** (COB onderzoeksrapport **TC151-07-04**), maart 2007
- [13] Vliet, C. van der. *Langsvoeggedrag op basis van de elasticiteitstheorie, een aanscherping van de  
Janssen relatie*. COB-onderzoeksrapport in voorbereiding (RWS conceptrapport, 15 maart 2007)
- [14] Vervuurt, A.H.J.M. en Gijsbers, F.B.J. *Eerste orde evaluatie tunnelconstructie: Predictiemodellen,  
postdictieberekeningen en vergelijking met meetresultaten*, **K100 Praktijkonderzoek boortunnels**,  
November 1999
- [15] Empel, N. van. *Onderzoek gevoeligheid van tunnelveiligheid voor spreiding in invoerparameters*.  
Witteveen en Bos, rapportnummer **RW1658-1/kleb2/003**, d.d. 31 augustus 2007
- [16] Empel, N. van. *Onderzoek gevoeligheid van tunnelveiligheid voor spreiding in invoerparameters, fase  
2*. Witteveen en Bos, rapportnummer **RW1658-2/kleb2/003**, d.d. 12 februari 2008

- [17] Vervuurt, A.H.J.M. en Bauruelle, J.C. *Failure safety of segmented bored tunnels. Preliminary study on the effect of cracked segments in full scale tunnel tests*. TNO report **2004-CI-R0204**, december 2004.
- [18] Vliet, C. van der. *Bezwijkveiligheid Boortunnels. Validatieberekening ULS-modellering met schalenmodel*. Arcadis rapport, 8 augustus 2008 (versie 1.0).