

Voorwoord

Dit rapport maakt deel uit van mijn afstudeerwerk bij de sectie Betonconstructies aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen (Citg) van de TU Delft. Dit rapport is als voorstudie de aanzet naar mijn afstudeeronderzoek.

Het rapport is geschreven in opdracht van het projectbureau Noordelijk Holland van de Hogesnelheidslijn-Zuid (HSL-Zuid).

Dit afstudeeronderzoek had niet tot stand kunnen komen zonder de hulp van mijn begeleiders, dr. ir. C. van der Veen (hoofdbegeleider, TU Delft), dr. ir. A.G. Kooiman (HSL-Zuid) en ir. C.B.M. Blom (Holland Rail Consult/ TU Delft).

Daarnaast wil ik bij deze Erik Libochant (Technical Quality Engineer, Bouygues) bedanken en mijn collega's van de projectorganisatie HSL Zuid, waarvan in het bijzonder E. van der Cingel, S. Slingerland, J. Ruitenbergh en R.J. Aartsen.

Paul Warmerdam

Leiderdorp, juni 2002

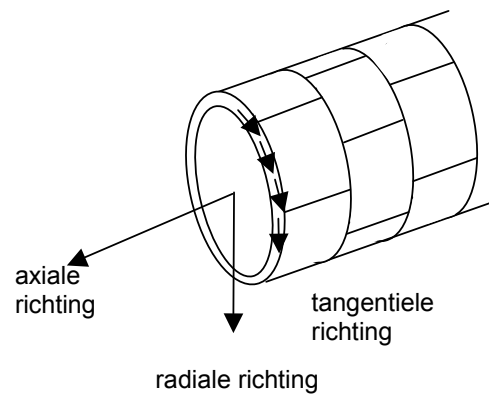
Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Inhoudsopgave	ii
Notaties en symbolen	iii
1 Inleiding	1
2 Belastingen Botlek spoortunnel en Tweede Heinenoordtunnel	3
2.1 <i>Vijzelbelastingen</i>	3
2.1.1 Axiale belasting	4
2.1.2 Excentrische vijzelplaatsing	4
2.1.3 Plaatsen segmenten	5
2.1.4 Plaatsen sluitsteen	6
2.1.5 Spanningen door ringvoegonvlakheid	8
2.2 <i>Grout- en grondbelasting</i>	10
2.2.1 Groutbelasting	11
2.2.2 Grondbelasting	14
2.2.3 Trompeteffect	15
2.2.4 Ovaliseren	15
3 Schademechanismen Botlek spoortunnel en Tweede Heinenoordtunnel	18
3.1 <i>Betonschade</i>	18
3.2 <i>Scheurvorming</i>	20
3.3 <i>Voeglekkages</i>	22
4 Vergelijking met boortunnel Groene Hart	23
4.1 <i>Ontwerp</i>	23
4.1.1 Vijzelconfiguratie	23
4.1.2 Ontwerp segmenten	23
4.2 <i>Vijzelbelastingen</i>	26
4.2.1 Axiale belasting	26
4.2.2 Plaatsen sluitsteen	26
4.2.3 Spanningen door ringvoegonvlakheid	26
4.3 <i>Grout- en grondbelasting</i>	26
4.3.1 Invloed gesegmenteerde lining	27
5 Conclusies en plan van aanpak	28
5.1 <i>Conclusies voorstudie</i>	28
5.2 <i>Plan van aanpak voor het eindrapport</i>	29
Literatuur	30
Figuren	32

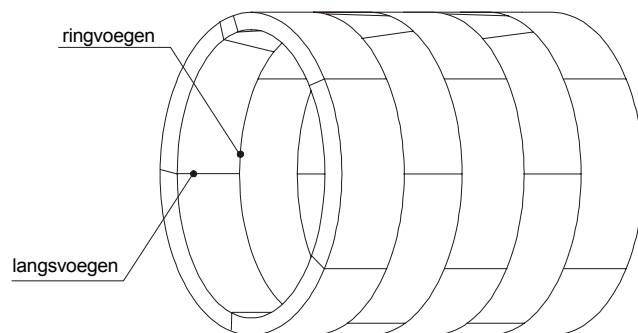
Notaties en symbolen

TBM	Tunnelboormachine
BGH	boortunnel Groene Hart
BST	Botlek spoortunnel
THT	Tweede Heinenoordtunnel
$\sigma_{1,2}$	hoofdspanningen
$\sigma_{xx,yy}$	normaalspanningen
$\sigma_{xy,yx}$	schuifspanningen
τ_s	schuifspanning
φ	richting hoofdtrekspanning
σ_w	waterdruk
σ_{grout}	groutdruk
γ_{grout}	soortelijke massa grout
D_{uitw}	uitwendige diameter tunnelbuis
θ	hoek t.o.v. onderkant tunnelbuis
e	excentriciteit vijzelkracht
u_2	radiale verplaatsing geovaliseerde ring
d	ringvoegverschil

De tunnelbuis is een driedimensionale constructie. De drie richtingen zijn als volgt gedefinieerd.



De ringvoegen en langsvoegen tussen de segmenten zijn in onderstaande tekening aangegeven. De ringvoegen lopen in tangentiële richting en de langsvoegen in radiale richting.



1 Inleiding

Het boren van tunnels wordt pas enkele jaren toegepast in Nederland. Deze ontwikkeling is lang tegengehouden door de slappe grond en hoge grondwaterspiegel in Nederland. Ook internationaal is hier weinig ervaring mee opgedaan. De toenemende waarde die men hecht aan de omgeving en het steeds intensievere grondgebruik, hebben ervoor gezorgd, dat boortunnels in Nederland hun kans kregen.

De boortunnels worden gedimensioneerd op de gebruiksfase. De modellen die gebruikt worden, nemen niet de spanningen mee die ontstaan tijdens de bouwfase. Bij uitvoering van de eerste boortunnels in Nederland is schade ontstaan aan de segmenten van de tunnelbuizen. Deze beschadigingen zijn gerepareerd. Het is de vraag of de geëiste levensduur van 100 jaar gehaald kan worden zonder (hoge) onderhoudskosten. Daarom zijn onderzoeken gestart binnen het COB-onderzoeksprogramma en aan de TU Delft. In het Stevin II laboratorium van de TU Delft is een grote tunnelproef opgezet. Met behulp van deze onderzoeken is duidelijk geworden dat de meeste schade en vervormingen aan de tunnelbuis ontstaan tijdens de bouwfase van de boortunnels. Daarnaast kunnen een deel van de spanningen die ontstaan tijdens de bouwfase, aanwezig blijven tijdens de gebruiksfase.

Doordat nu meer bekend is over de spanningen en vervormingen in de bouwfase, kan een deel van de schademechanismen verklaard en voorkomen worden.

Behalve de boortunnel Groene Hart (figuur 1) en de boortunnel onder het Pannerdensch kanaal, worden alle boortunnels met grote diameter in Nederland, geboord door Duitse aannemers. De boortunnel Groene Hart is de eerste boortunnel die gebouwd wordt door Franse aannemers. De Franse en Duitse aannemers gebruiken ieder hun eigen methode. Het verschil in beide methoden is de vijzelconfiguratie en de voegen van de segmenten waaruit de tunnelbuis is opgebouwd. De vijzels zorgen voor de voortgang van de tunnelboormachine door zich af te zetten op de reeds gebouwde tunnel. De voegen zorgen voor de koppeling van de segmenten binnen een ring en de koppeling van de ringen onderling. Bij de boortunnel Groene Hart lijken nu aanzienlijk minder schadegevallen op te treden dan bij de tunnels gebouwd volgens de Duitse methode.



Figuur 1: Begin boortunnel Groene Hart

Toch treden ook bij de boortunnel Groene Hart nog steeds schademechanismen en vervormingen op die nog niet verklaard zijn. Hoewel nu veel meer bekend is over de schademechanismen en vervormingen aan de tunnelling van boortunnels, blijven nog veel vragen onbeantwoord.

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het verklaren van de optredende schademechanismen en vervormingen aan de tunnelbuis van de boortunnel Groene Hart. Daarnaast zal worden onderzocht of een relatie bestaat tussen de vervormingen aan de tunnelbuis en de optredende schademechanismen. Indien deze relatie aangetoond kan worden, wordt onderzocht hoe bepaalde schademechanismen en vervormingen met elkaar samenhangen.

De optredende schadegevallen en vervormingen zijn parameters die de kwaliteit van de tunnelconstructie bepalen. Wanneer bekend is waardoor de schademechanismen en vervormingen optreden, kunnen deze misschien voorkomen worden. Dit geldt niet alleen voor de boortunnel Groene Hart, maar ook voor de tunnels die in de toekomst in slappe grond geboord zullen worden. Wanneer de scheuren zo groot zijn dat water en zuurstof tot de wapening van de tunnelsegmenten kunnen doordringen, bestaat het gevaar dat corrosie optreedt. Op korte termijn moeten de scheuren daarom worden gerepareerd. Op lange termijn is monitoring van deze "weak spots" noodzakelijk om tijdig schade te kunnen identificeren en maatregelen te kunnen nemen in de vorm van onderhoudswerkzaamheden. Deze onderhoudswerkzaamheden zijn echter zeer ongewenst, vanwege de eis dat het treinverkeer in de tunnel zo weinig mogelijk mag worden gehinderd.

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 worden de krachten beschreven in de bouwfase op de tunnelling van de, eerder in Nederland geboorde, Botlek spoortunnel en Tweede Heinenoordtunnel. In dit hoofdstuk is ook aangegeven welke spanningen en vervormingen deze krachten tot gevolg hebben. In hoofdstuk 3 is een inventarisatie gemaakt van de opgetreden schademechanismen bij de Botlek spoortunnel en de Tweede Heinenoordtunnel. Hoofdstuk 4 beschrijft de verschillen tussen de boortunnel Groene Hart en de Botlek spoortunnel en Tweede Heinenoordtunnel, waarna beschreven wordt wat deze verschillen tot gevolg hebben voor de in hoofdstuk 2 en 3 beschreven belastingen, spanningen, vervormingen en schademechanismen van en op de tunnelling. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 de conclusies van deze voorstudie gegeven en wordt een plan van aanpak opgesteld voor het tweede en laatste deel van dit afstudeeronderzoek.

2 Belastingen Botlek spoortunnel en Tweede Heinenoordtunnel

2.1 Vijzelbelastingen

De TBM beweegt zich tijdens het boren voort door zich met vijzels af te zetten tegen de eerder gebouwde ring. Daarmee moeten de volgende belastingen op de TBM worden opgeheven:

- grond- en waterdruk aan de voorzijde van het graafwiel
- axiale snijkracht
- wrijving langs het schild. De diameter van het graafwiel van de TBM is groter dan de buitenkant van het schild van de TBM. Daarnaast neemt de diameter van het schild af richting de tunnelling, zodat de wrijving langs het schild van de TBM en de omringende grond tijdens het boren wordt gereduceerd.
- kracht op de staartspleet
- axiale component van de zwaartekracht, indien onder een helling wordt geboord

De vijzelkrachten werken tevens als voorspanning van de tunnel. Dit is nodig voor de samenhang tussen de losse ringen. Hiermee wordt de waterafdichting gegarandeerd, doordat het rubber profiel dat op de segmenten is geplaatst, wordt dichtgedrukt. Ook zorgen de vijzelkrachten voor een afschuifcapaciteit. De ringen brengen de vijzelkrachten over naar de achterliggende ringen via draagvlakken. Indien deze onder voorspanningen staan, kunnen de segmenten onderling via wrijving dwarskrachten overbrengen.

De vijzelkrachten zijn niet gelijkmatig verdeeld over de doorsnede van de tunnel. De oorzaken voor deze niet gelijkmatige verdeling zijn:

- sturen van de TBM
- kantelmoment

Sturen van de TBM

Zoals hierboven reeds is vermeld, beweegt de TBM zich voort, door zich met vijzels af te zetten tegen de laatst gebouwde ring. Door de kracht aan de linkerkant van de tunnel te vergroten t.o.v. de rechterkant van de TBM wordt een bocht naar rechts gemaakt. Wordt ditzelfde gedaan bij de onder- en bovenkant van de TBM, dan kan respectievelijk omhoog en omlaag worden geboord. Ook de grootte van de luchtmaat en de staartspleet zijn van belang bij het sturen van de TBM. De luchtmaat is de afstand tussen de buitenkant van de ring en de binnenkant van het schild van de TBM. De minimale boogstraal van de tunnelling wordt mede bepaald door de luchtmaat. Wanneer deze luchtmaat te klein wordt, treedt schade aan de tunnelling op, door het raken van de buitenkant van de ring en de tunnelling. Daarom is het aan te raden de TBM de richting van de tunnelling te laten volgen.

De staartspleet is de ruimte tussen de buitenkant van de tunnelring en de omringende grond aan het einde van het schild. De staartspleet is opgebouwd uit de luchtmaat, de dikte van het schild en de afstand van de buitenkant van het schild tot de omringende grond. Bij het sturen van de TBM is de afstand van de omringende grond tot de buitenkant van het schild van belang aan de achterkant van het schild. Deze afstand is gelijk aan de staartspleet minus de dikte van het schild en de luchtmaat. Door deze afstand kan de TBM een bepaalde boogstraal van het tracé volgen zonder de omringende grond te verplaatsen.

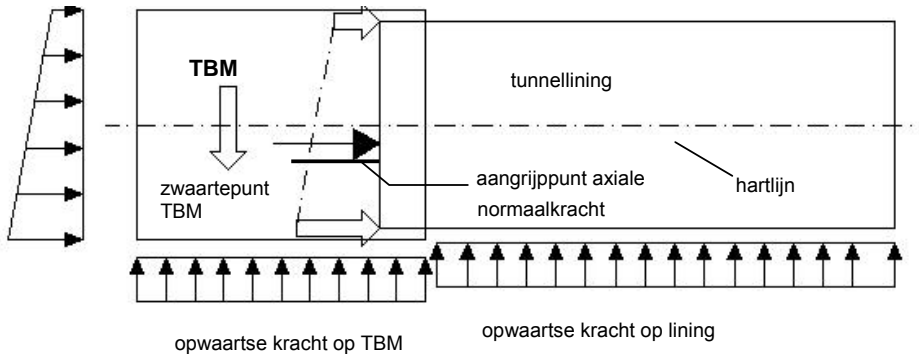
Bij de THT is een duidelijk verband aangetoond tussen het verloop van luchtmaten en het schadebeeld in de tunnel. Zodra de luchtmaten onder de 400 mm kwamen, ontstonden vrijwel direct schades, doordat het schild van de TBM tegen de tunnelling drukt of langs de lining schraapt [lit. 19].

Kantelmoment

De TBM heeft de neiging te duiken door een aanwezig kantelmoment. Dit wordt gecompenseerd door de vijzelkrachten aan de onderkant van de TBM te vergroten en aan de bovenkant te verlagen. De oorzaken van het kantelmoment zijn:

- De voorkant van de TBM is relatief zwaarder dan de achterkant. Hierdoor ligt het zwaartepunt van de zwaartekracht op de TBM voor die van de opwaartse krachten.
- De grond- en waterdrukken nemen toe met de diepte van de tunnel. Hierdoor zijn de grond- en waterdrukken aan de onderkant van het schild groter dan aan de bovenkant.

- De tunnel zal achter de TBM willen opdrijven in het nog vloeibare grout. De ringen richting de voorkant van de TBM willen dit opdrijven verhinderen. Hierdoor ontstaan dwarskrachten die aan de vijzels worden overgebracht. De vijzels zijn te beschouwen als pendelstaven en kunnen in theorie geen dwarskrachten overbrengen. Omdat in de praktijk de vijzels niet geheel recht op de tunnelling staan, kunnen de dwarskrachten toch worden overgebracht. Het kantelmoment is geschematiseerd in onderstaand figuur.



Figuur 2: Kantelmoment

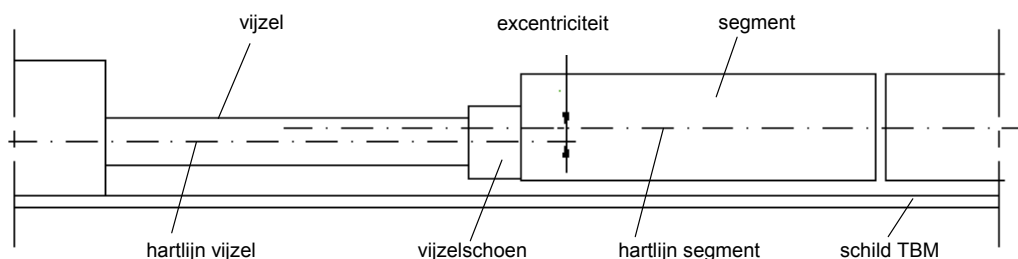
Het geïnstalleerde vermogen van de 28 vijzels bij de THT was 60 MN. Bij normale omstandigheden zou een kracht van 42 MN worden uitgeoefend op de tunnelling. Omdat deze belasting vanwege het kanteffect niet gelijkmatig over de hoogte is verdeeld, zal de vijzelkracht aan de onderkant van de tunnel niet gelijk zijn aan $42\text{MN}/28 = 1,5 \text{ kN}$. Bloemhof gaat in zijn afstudeeronderzoek [lit. 4] uit van een maximale vijzelkracht van $60\text{MN}/28 = 2,1 \text{ MN}$. De vijzels zijn in paren geplaatst en verbonden aan een vijzelschoen. Via deze vijzelschoen wordt de vijzelkracht overgebracht op de segmenten. De maximaal belaste vijzelschoen brengt dus 4,2MN over.

2.1.1 Axiale belasting

De vijzelkrachten worden via de vijzelschoenen op de ringvoeg van een segment overgebracht. Hierdoor ontstaan drukspanningen in het segment. Omdat de vijzelschoenen niet over de hele ringvoeg aangrijpen, zullen de vijzelspanningen uitwaaien over de doorsnede. Loodrecht op deze druktrajectoriën zullen trekspanningen, oftewel slijtspanningen ontstaan. De grootte van deze spanningen is afhankelijk van de grootte van de vijzelkracht en de grootte van de vijzelschoenen.

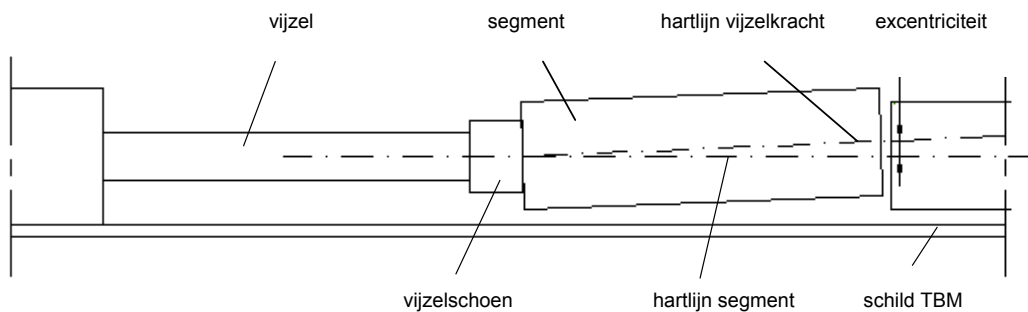
2.1.2 Excentrische vijzelplaatsing

Wanneer de ringbouw afwijkt van de ideale ring, kunnen de vijzels zowel in radiale (figuur 3), als in tangentiële richting een bepaalde excentriciteit hebben. Dit kan eveneens het gevolg zijn van vervormingen van de TBM. Door deze excentriciteit ontstaat een moment op de segmenten, die via buigspanningen in de segmenten wordt opgenomen. Daarnaast ontstaan door de ronde vorm van de segmenten ook torsiespanningen (paragraaf 2.1.5).



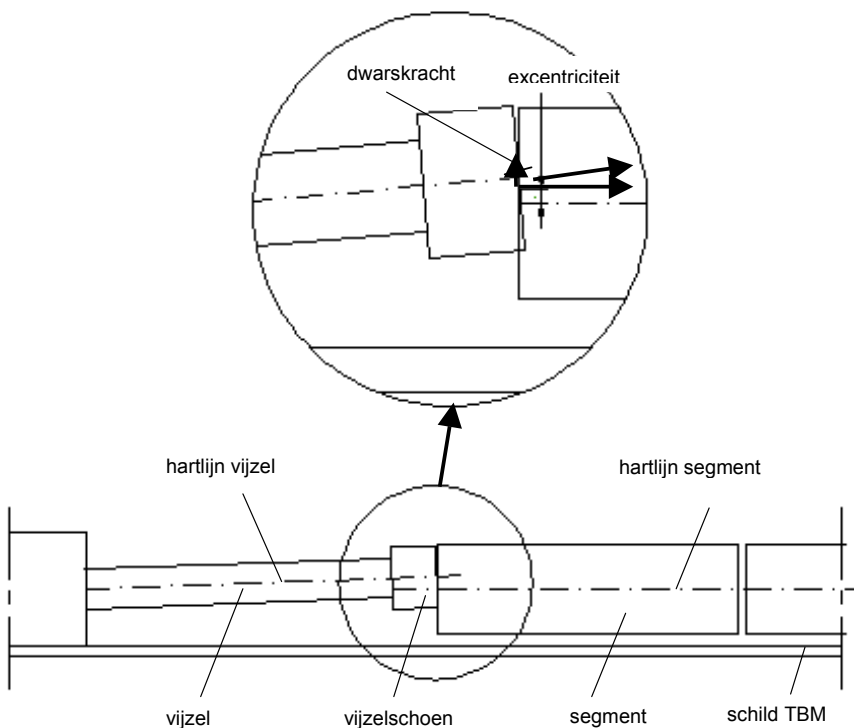
Figuur 3: excentriciteit vijzel

Ook kan er een excentrische vijzelbelasting op het segment plaatsvinden door scheefstand van de segmenten (figuur 4) of vijzels (figuur 5).



Figuur 4: Excentriciteit t.g.v. scheefstand segment

Bij een scheefstand van de vijzels ontstaat naast een moment door de excentriciteit van de vijzelkracht ook een moment, in dezelfde richting, t.g.v. van een geïntroduceerde dwarskracht. Deze dwarskracht ontstaat, doordat de vijzelkracht onder een hoek wordt ingeleid (figuur 5).

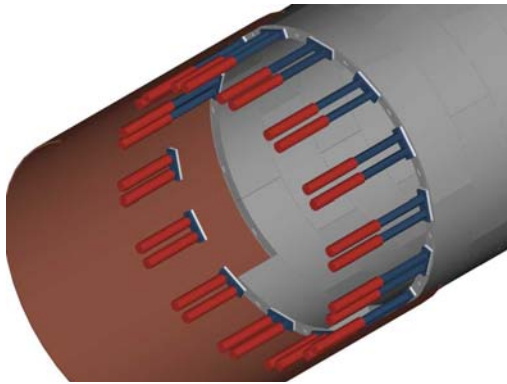


Figuur 5: Excentriciteit t.g.v. excentriciteit vijzel

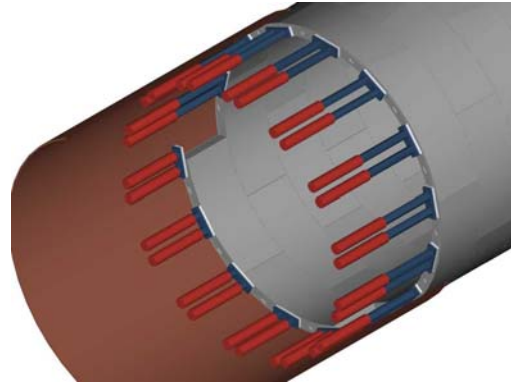
2.1.3 Plaatsen segmenten

Wanneer een segment geplaatst wordt, worden eerst de vijzels waar het segment geplaatst wordt teruggetrokken (figuur 6). Het segment wordt geplaatst, waarna het segment met bouten aan de segmenten in de vorige ring wordt verbonden. Wanneer de vijzelkrachten wegvallen en daarmee ook de voorspanning aan het einde van de tunnelling, zorgen de bouten voor voldoende drukkracht op

het afdichtingrubber in de ringvoeg van de segmenten. Hiermee blijft de waterafdichting in de ringvoegen gehandhaafd. Daarna worden de vijzels weer op het zojuist geplaatste segment aangebracht (figuur 7).



Figuur 6: Terugtrekken vijzelparen

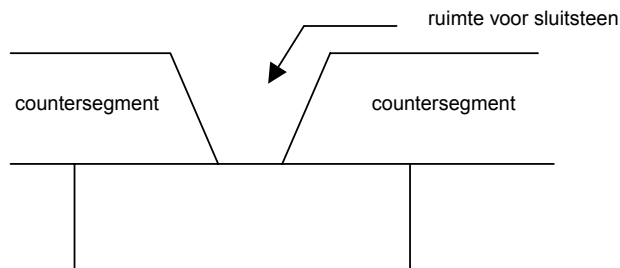


Figuur 7: Vijzelparen op zojuist geplaatst segment

Bij het terugtrekken van de vijzels valt een gedeelte van de voorspanning op de tunnelring weg. De overige vijzels moeten dan een grotere vijzelkracht overbrengen. Ook zal het segment, waarvan de vijzels worden teruggetrokken, iets willen terugveren. De bouten zullen dit beperken, zodat in ieder geval enige druk op de rubberen profielen overblijft om de waterdichtheid te garanderen.

2.1.4 Plaatsen sluitsteen

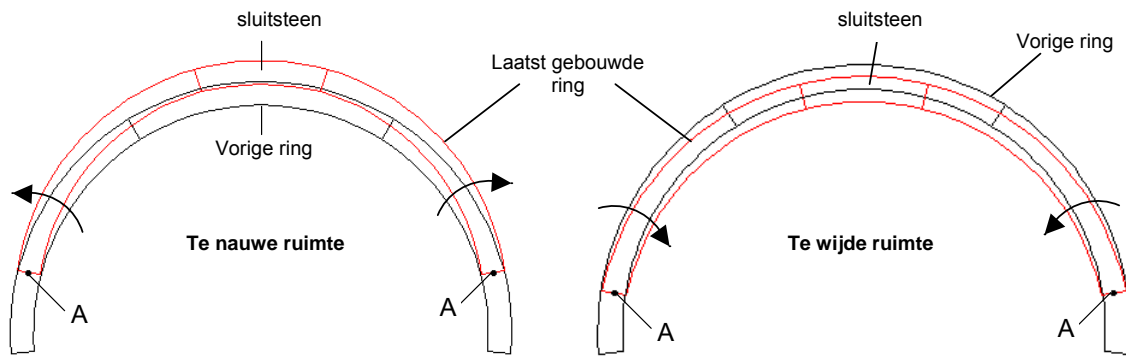
Als laatste segment wordt de sluitsteen geplaatst. De countersegmenten, aan weerszijden van de sluitsteen, zorgen voor een K-vormige opening (figuur 8). Hier wordt de wigvormige sluitsteen in geplaatst.



Figuur 8: K-vormige opening voor de sluitsteen

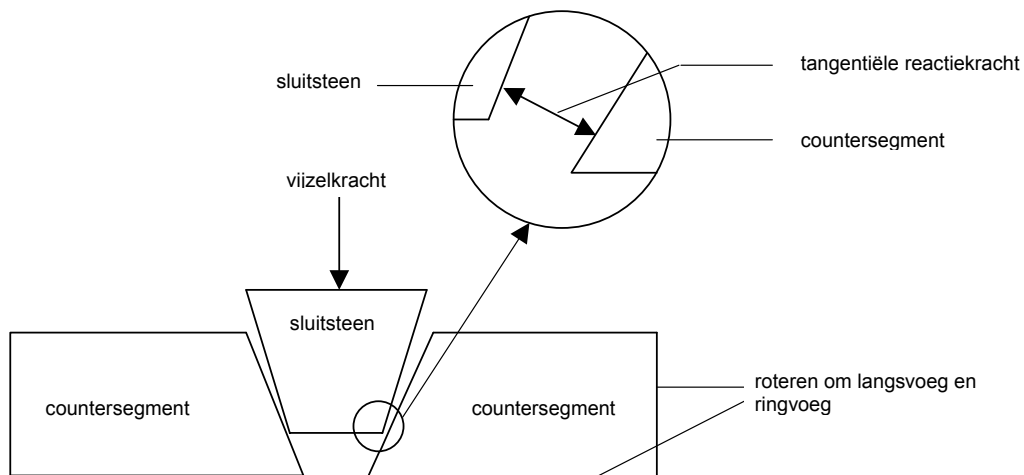
Wanneer de gebouwde ring afwijkt van de ideale ring, zal er te weinig of te veel ruimte zijn voor het plaatsen van de sluitsteen. Dit wordt veroorzaakt door een onnauwkeurige ringbouw of doordat een ring wordt gebouwd tegen een reeds vervormde ring.

Bij de BST en de THT zijn de langsvoegen van de countersegmenten en de sluitsteen uitgevoerd als messing/groef verbinding. Wanneer de ruimte voor de sluitsteen te groot is, zal de sluitsteen binnen het schild nog op zijn plaats worden gehouden door de vijzels. Wanneer de ring buiten het schild van de TBM komt, wordt deze belast door het grout. Hierdoor zal de sluitsteen naar binnen worden gedrukt door het grout en gaan hangen op de messing/groef verbinding. Daarbij roteren de countersegmenten om hun langsvoeg (punt A) en ringvoeg naar binnen, totdat zij in contact komen met de sluitsteen (figuur 9). Door dit lokale contact in de messing-groef verbinding ontstaan lokaal hoge spanningen (hoofdstuk 3, betonschade t.p.v. voeg van de sluitsteen).



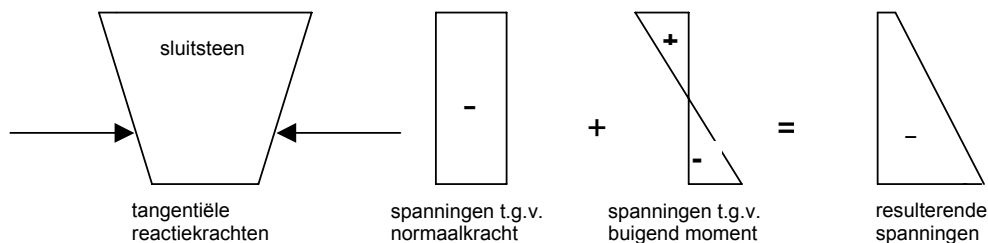
Figuur 9: Rotatie countersegmenten om de langsvoegen t.g.v. te nauwe en een te wijde ruimte voor de sluitsteen

Wanneer te weinig ruimte aanwezig is voor de sluitsteen, wordt deze door de vijzels op zijn uiteindelijke positie geduwd. Door de wigvorm van de sluitsteen zal de axiale vijzelkracht grote tangentiële krachten op de countersegmenten veroorzaken (figuur 10). De countersegmenten leveren een reactiekracht op de sluitsteen. Om ruimte te maken voor de sluitsteen, zullen de countersegmenten kantelen om hun langsvoeg (punt A figuur 9) en hun ringvoeg. Hierdoor zullen de hoeken aan de smalle zijde van de sluitsteen het eerst in contact komen met de countersegmenten.



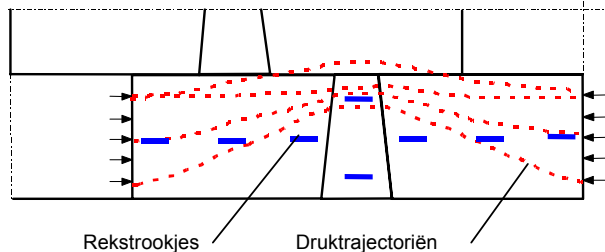
Figuur 10: Tangentiële krachten op de countersegmenten

De tangentiële kracht van de sluitsteen op de countersegmenten is daarom geen gelijkmatig verdeelde belasting over de hele langsvoeg, maar een meer geconcentreerde belasting aan de smalle zijde van de sluitsteen (figuur 10). Doordat deze tangentiële belasting niet in het midden van de sluitsteen aangrijpt, levert deze geconcentreerde belasting ook een buigend moment (figuur 11).



Figuur 11: Tangentiële belasting op de sluitsteen, levert een normaalkracht en een buigend moment

Hierdoor zal aan de smalle zijde van de sluitsteen een verhoging van de drukspanningen ontstaan en aan de brede zijde een verlaging. Wanneer deze verlaging groter is dan de heersende drukspanning t.g.v. de normaalspanningen, ontstaan aan de brede zijde van de sluitsteen trekspanningen. De verhoging van de drukspanning is te zien als een concentratie van druktrajectoriën (figuur 12). Doordat deze concentratie van drukspanningen gespreid wordt over de naastgelegen countersegmenten, lopen de druktrajectoriën hier onder een helling. Dit levert trekspanningen en daardoor kunnen scheuren ontstaan in de countersegmenten.



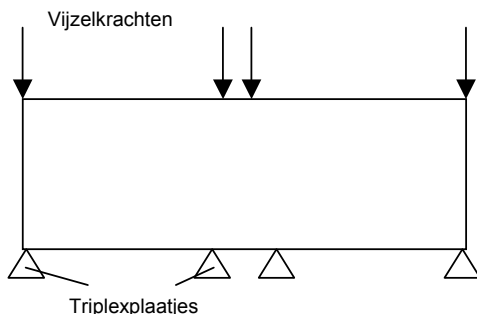
Figuur 12: Spanningsverloop rondom de sluitsteen, zoals gemeten bij de THT

De verplaatsing zou in theorie ook kunnen optreden door een straalvergroting van de ring. Hierbij moet echter een zeer grote wrijvingskracht worden overschreden, omdat alle segmenten een verplaatsing moeten ondergaan. Hierdoor moet de totale wrijvingskracht van alle contactvlakken tussen twee ringen worden overschreden. Bij de rotatie van de countersegmenten hoeft alleen de wrijvingskracht van de contactvlakken van de twee countersegmenten worden overschreden. In werkelijkheid treedt een straalvergroting daarom niet op. Dit wordt bevestigd door de grote tunnelproef in het Stevin II laboratorium van de TU Delft [lit. 5, H10 p15].

2.1.5 Spanningen door ringvoegonvlakheid

De vijzelkrachten worden via vijzelschoenen op een segment overgedragen. Via triplexplaatjes (BST, THT, Sophia spoortunnel en Westerschelde tunnel) worden de vijzelkrachten vervolgens overgedragen aan de achterliggende segmenten.

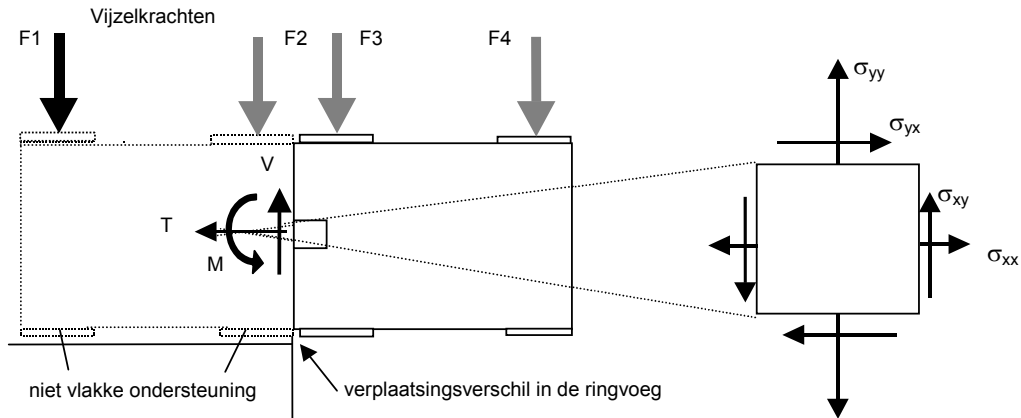
Door verschillende oorzaken kan het voorkomen dat de ringvoeg van de laatst gebouwde ring niet vlak is. Hierdoor werken niet alle vijzelplaatjes mee bij de overdracht van de vijzelkrachten naar de achterliggende segmenten.



Figuur 13: Segmenten statisch onbepaald opgelegd

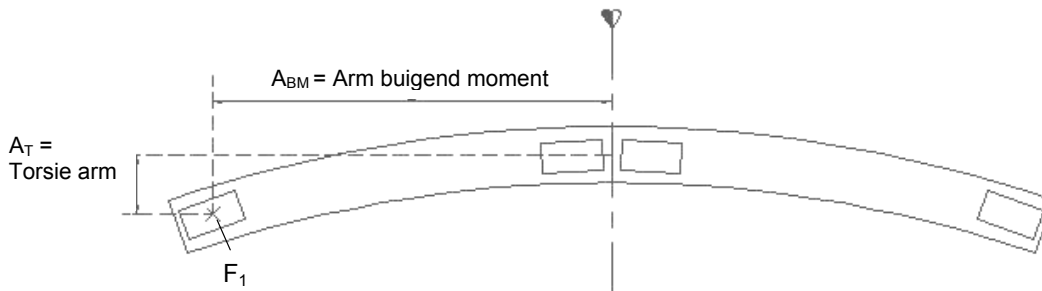
Bij de THT en de BST zijn respectievelijk vijf en vier triplex plaatjes toegepast per segment, waardoor deze segmenten statisch onbepaald opgelegd zijn (figuur 13).

Bij onvlakheden in de ringvoeg zullen één of twee triplexplaatjes niet meedoen in de krachtoverdracht van de vijzelkrachten. Hierdoor worden de vijzelkrachten niet in één lijn doorgegeven aan de segmenten aan de tunnelzijde. Dit heeft tot gevolg dat een extra torsiemoment, buigend moment en dwarskracht moet worden opgenomen door het segment (figuur 14). Deze krachten veroorzaken weer extra schuif-, buig- en torsiespanningen in het segment.



Figuur 14: Extra spanningen t.g.v. niet vlakke ondersteuning [lit. 5]

Als één van de ondersteuning niet actief is zal de vijzelkracht ter hoogte van deze ondersteuning moeten worden overgedragen naar de andere ondersteuning. Hierbij treden naast schuifspanningen de volgende spanningen op. Omdat de kracht F_1 op een afstand A_{BM} (figuur 15) aangrijpt t.o.v. de ondersteuning, ontstaat ook een buigend moment. Dit buigend moment levert buigspanningen in de doorsnede ter plaatse van de ondersteuning. Tenslotte grijpt de kracht aan op een afstand A_T waardoor het segment getordeerd wordt en torsiespanningen optreden (figuur 15). Met behulp van de cirkel van Mohr kan de maximale trekspanning worden bepaald en gekeken worden of de treksterkte van het beton overschreden wordt en daarmee scheurvorming optreedt.

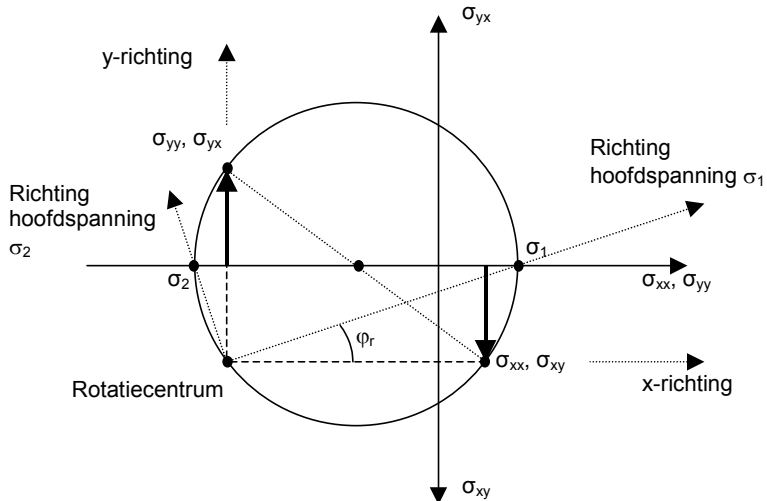


Figuur 15: Torsie en buiging bij niet vlakke ondersteuning [lit 5]

Cirkel van Mohr

Met behulp van de cirkel van Mohr kan de waarde en de richting van de hoofdspansingen worden bepaald, die worden veroorzaakt door spanningen t.g.v. normaalkrachten, buiging, afschuiving en torsie. Aan de hand van de richting van de hoofdspansingen, kan de richting van eventuele scheuren worden voorspeld. Deze scheuren treden op loodrecht op de richting van de hoofdtrekspanning. De cirkel van Mohr is een grafische methode. Het voordeel daarvan is dat inzicht wordt verkregen in het krachtenspel en de richtingen van de optredende scheuren.

De cirkel van Mohr kan getekend worden door de spanningen $(\sigma_{xx}; \sigma_{xy})$ en $(\sigma_{yy}; \sigma_{yx})$ uit te zetten in een assenstelsel (zie figuur 16). Daarbij worden de spanningen σ_{xx} en σ_{yy} langs de horizontale as uitgezet en de spanningen σ_{xy} en σ_{yx} langs de verticale as. De spanningen σ_{yx} worden daarbij in de positieve y -richting uitgezet en σ_{xy} in de negatieve y -richting. Beide punten liggen op de cirkel. De spanningen σ_{xy} en σ_{yx} hebben dezelfde waarde, gelijk aan τ_s . Daarom zal het middelpunt van de cirkel liggen op de horizontale as met de waarde $\frac{1}{2} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$. Vervolgens kan de cirkel van Mohr getekend worden (figuur 14). De snijpunten van de cirkel met de horizontale as geven de hoofdspansingen aan, hier geldt: $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 0$.



Figuur 16: Cirkel van Mohr

Hierbij is σ_1 de laagste drukspanning (of de hoogste trekspanning als deze waarde positief is) en σ_2 is de grootste drukspanning (of laagste trekspanning als deze waarde positief is). De hoofdrichtingen kunnen worden gevonden door eerst het snijpunt (rotatiecentrum) van de hoofdrichtingen te bepalen. Deze is te vinden door vanuit het punt $(\sigma_{xx}; \sigma_{xy})$ een lijn evenwijdig aan de x-as te trekken en vanuit het punt $(\sigma_{yy}; \sigma_{yx})$ een lijn evenwijdig aan de y-as. Het rotatiecentrum ligt hierbij op het snijpunt van beide lijnen. Vervolgens kunnen de hoofdrichtingen worden bepaald. Hoofdrichting 1 is de richting van de hoofd trekspanning en wordt gevonden door een lijn te trekken vanuit het rotatiecentrum door σ_1 . Hoofdrichting 2 staat loodrecht op hoofdrichting 1 en wordt gevonden door een lijn te trekken vanuit het rotatiecentrum door σ_2 . Scheuren ontstaan loodrecht op de richting van de hoofdtrekspanning, dus in de richting van de hoofddrukspanning.

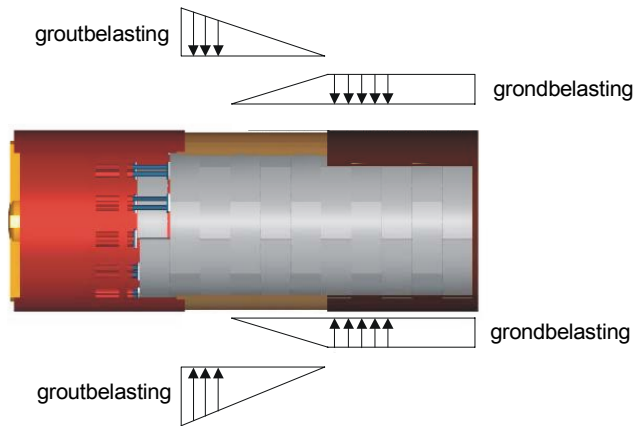
De richting van de hoofdtrekspanning (φ) en de waarden van de hoofdspansingen (σ_1 en σ_2) zijn ook te berekenen met de volgende formules:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \pm \sqrt{\frac{1}{4}[\sigma_{xx} - \sigma_{yy}]^2 + \tau_s^2}$$

$$\tan \varphi_r = \tau_s / (\sigma_1 - \sigma_{yy})$$

2.2 Grout- en grondbelasting

Omdat de diameter van de boor groter is dan de diameter van de buitenkant van de gebouwde ring, is een ruimte aanwezig tussen de buitenkant van de ring en de omringende grond. Deze ruimte ontstaat wanneer de ring het beschermende schild verlaat van de TBM. Om grote zettingen te voorkomen en opdrijven van de tunnel te beperken, wordt deze ruimte gevuld met grout. Direct na het injecteren, werkt alleen de groutbelasting op de ring. Langzamerhand zal het grout verhard en wordt de grondbelasting werkzaam. Hierdoor neemt de groutbelasting af van de initiële groutdruk tot nul en de grondbelasting loopt op van nul tot de grondbelasting volgens Duddeck (figuur 17).



Figuur 17: Ontwikkeling grout- en grondbelasting

2.2.1 Groutbelasting

De injectiedrukken van het grout moeten in ieder geval groter zijn dan de heersende waterdrukken, omdat het grout anders niet uit de persleidingen kan stromen. T.p.v. de kruin van de tunnelling, wordt daarom altijd een injectiedruk van het grout ingesteld die groter is dan de heersende waterdruk. In de literatuur is nog geen overeenstemming bereikt over hoe de injectiedrukken van het grout precies verlopen over de diepte. Volgens Bloemhof [lit. 3], Haring [lit. 12] en Slenders [lit. 25] is de gradiënt van de groudruk gelijk aan de soortelijke massa van het grout, omdat ze ervan uit gaan dat het grout zich volledig vloeibaar gedraagt. In werkelijkheid gedraagt het grout zich als een Binghamse vloeistof. Hierbij moet eerst een inwendige wrijving in het grout worden overschreden, voordat het grout vloeit. Het grout is daarbij nog het beste te vergelijken met een pasta. Het gedraagt zich noch als een vloeistof, noch als een vaste stof.

Groutbelasting volgens Bloemhof, Haring en Slenders. Hierbij wordt uitgegaan van een groudruk t.p.v. de kruin van de tunnelling van:

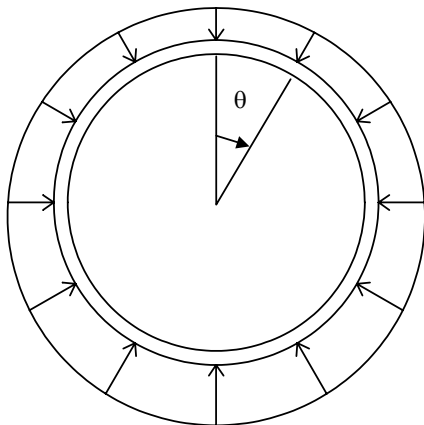
$$\sigma_{\text{grout,kruin}} = 1,1 * \sigma_{\text{w,kruin}}$$

De verdeling van de groudrukken over de doorsnede van de tunnel:

$$\sigma_{\text{grout}} = \sigma_{\text{grout,kruin}} + \gamma_{\text{grout}} * 0,5 * D_{\text{uitw}} * (1 - \cos\theta)$$

(hoek $\theta = 0$, t.p.v. de kruin)

De resultante groutbelasting is gegeven in figuur 18.



Figuur 18: Resultante groutbelasting

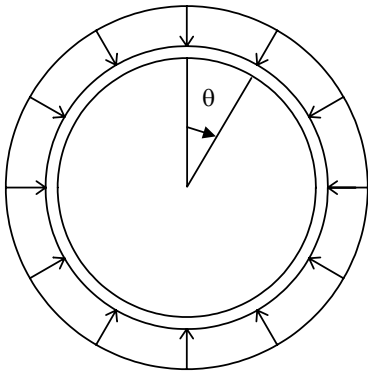
De resultante groutbelasting is op te delen in een constante radiale belasting (figuur 19) en een over de hoogte van de tunnelbuis verlopende radiale belasting die de gradiënt van de groutbelasting in rekening brengt (figuur 20). De constante radiale groutbelasting wordt gelijk genomen aan de waarde van groutbelasting op halve hoogte van de tunnelbuis.

Constance radiale belasting:

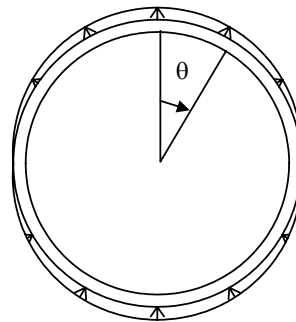
$$\sigma_{\text{grout}} = \sigma_{\text{grout,kruin}} + \gamma_{\text{grout}} * 0,5 * D_{\text{uitw}}$$

Gradiënt belasting:

$$\sigma_{\text{grout}} = - \gamma_{\text{grout}} * 0,5 * D_{\text{uitw}} * (1 - \cos\theta)$$



Figuur 19: Constance radiale groutbelasting



Figuur 20: Gradiënt groutbelasting

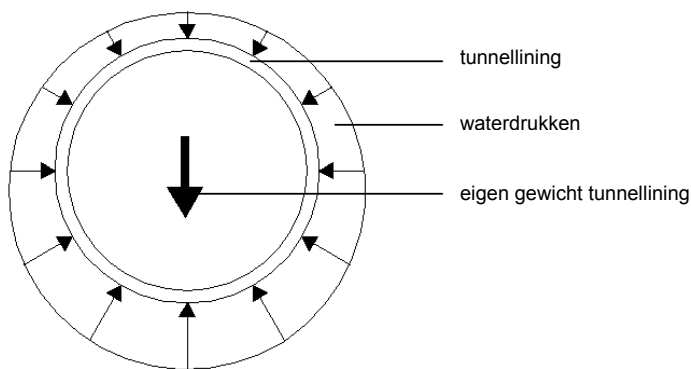
Deze waarden komen overeen met de gemeten waarden bij de BST. De metingen bij de THT geven echter andere waarden (tabel 1). Het is dus twijfelachtig om op basis van die metingen aan te nemen dat de groutdrukverdeling loopt, zoals aangegeven in bovenstaande formules. Ook is het aan te raden de gemeten waarden kritisch te beschouwen.

	$\sigma_{\text{grout,kruin}}$	Gradiënt
Tweede Heinenoordtunnel	$1,4 * \sigma_{\text{w,kruin}}$	8 kPa/m
Botlek Spoortunnel	$1,1 * \sigma_{\text{w,kruin}}$	20 kPa/m

Tabel 1 Gemeten groutdrukken THT en BST

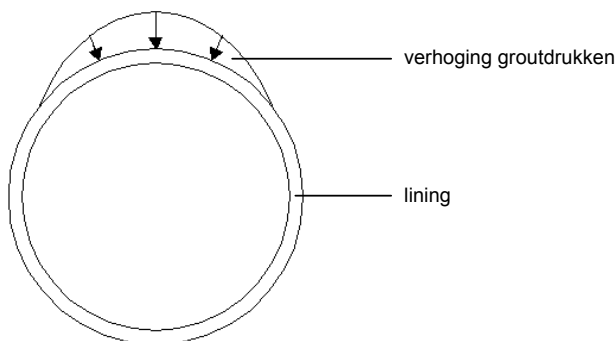
Ook voldoen bovenstaande formules niet aan het verticale evenwicht van de tunnelbuis. Het onderstaande groutdrukmodel voldoet daar wel aan [lit. 5].

Wanneer de ring het schild van de TBM verlaat, bestaat de belasting op de ring uit de waterdruk en de interactie tussen het grout en de tunnelling. Daarbij zijn de tunnelling, het grout en de grond altijd in contact met het grondwater. Wanneer er nog geen contact is van het grout met de tunnelling en de grond, is de tunnelling alleen belast door het de waterdruk. Daarnaast werkt nog het eigen gewicht van de tunnel als neerwaartse belasting (figuur 21).



Figuur 21: Belasting ring direct na verlaten schild

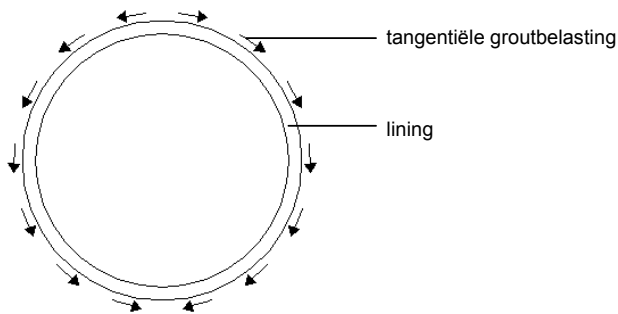
Omdat de neerwaartse gerichte belasting uit het eigen gewicht kleiner is dan de omhoog gerichte gradiënt, zal de tunnelbuis willen opdrijven. Hierdoor zal de bovenkant van de tunnelling een druk uitoefenen op het grout, waardoor de groudrukken toenemen (figuur 22). Hierbij is wel belangrijk dat er een minimale dekking boven de tunnel aanwezig is, die weerstand kan bieden tegen de optredende groudrukken. Omdat de zwichtspanning van het grout nog niet is overschreden zal het grout nog niet gaan stromen. Door het opdrijven van de tunnelling, zal aan de onderkant van de lining nog geen contact zijn tussen de lining en het grout bij onvolledig grouten. Hier is de druk daarom nog steeds gelijk aan de waterdruk.



Figuur 22: Verhoging groudrukken aan bovenkant lining

Wanneer volledig gegroot wordt, zal door het opdrijven van de tunnelling een reductie van de groudrukken aan de onderzijde van de lining optreden. De druk op de lining kan echter nooit kleiner worden dan de waterdruk, omdat de lining omringd is door water.

Wanneer nog geen evenwicht is bereikt tussen het eigen gewicht van de tunnel, de gradiënt van de waterdrukken en de toename van de groudrukken aan de bovenkant van de lining, zal de tunnel verder opdrijven. Hierdoor zullen de groudrukken aan de top van de tunnelling verder verhoogd worden, totdat de zwichtspanning in het grout is bereikt. Wanneer dit het geval is zal het grout langs de omtrek van de lining naar beneden stromen, totdat de zwichtspanning van het grout niet meer wordt overschreden. Het stromen van het grout, veroorzaakt neerwaarts gerichte tangentiële krachten van het grout op de tunnelling met een maximale grootte die gelijk is aan de zwichtspanning (figuur 23). Het gedeelte waar de zwichtspanning in het grout is overschreden, dus waar tangentiële spanningen aanwezig zijn t.g.v. de interactie tussen de tunnelling en het grout, hangt af van de mate waarin de tunnelling opdrijft. Omdat de zwichtspanning van het grout zeer laag is, orde grootte kPa, zal het aandeel van de tangentiële spanningen in het verticale evenwicht klein zijn.



Figuur 23: Tangentiële groutbelasting op de tunnelling

Het verticale evenwicht wordt dus bepaald door de volgende belastingcomponenten:

- Eigen gewicht van de tunnel (omlaag gericht)
- Gradiënt grondwaterdrukken (omhoog gericht)
- Tangentiële spanningen (omlaag gericht)
- Interactie grout en lining (omlaag gericht)

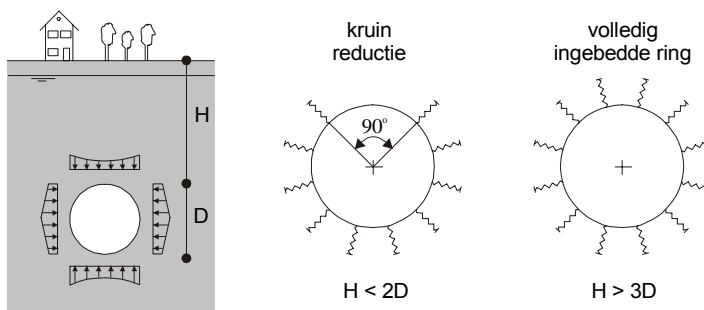
De verhoging van de groutdrukken aan de bovenkant van de tunnelling bij onvolledig grouten, is per definitie gelijk aan de gradiënt van de waterdruk minus het eigen gewicht en de tangentiële wrijvingskrachten, zodat er verticaal krachteenwicht ontstaat. De resulterende belasting op de tunnelling door het grout verloopt dus met een gradiënt die kleiner dan de gradiënt van de waterdruk.

2.2.2 Grondbelasting

Wanneer het grout gaat verharden komt geleidelijk de grondbelasting op de tunnelling te staan. Voor het beschrijven van de interactie tussen de tunnelling en de grond wordt het model van Duddeck wereldwijd het meest toegepast, vanwege zijn praktische diagrammen. Wel dient gekeken te worden of het geotechnisch profiel binnen het toepassingsgebied van dit model valt.

De grond zorgt voor een ondersteuning die in dit model met beddingveren worden weergegeven. Zowel een radiale ondersteuning van de tunneldoorsnede met of zonder tangentiële ondersteuning kan worden meegenomen. Bij een te geringe dekking kan in de grond geen boogwerking optreden. Daarnaast bestaat bij ondiep gelegen tunnels het gevaar voor opbarsten van de grond door de verhoogde groutdrukken t.p.v. de kruin van de tunnelling. Daarom wordt bij ondiepe tunnels een kruinreductie toegepast over 90° (figuur 24).

Hierbij volgen de maximale snedenkrachten in de tunneldoorsnede uit de diagrammen m.b.v. de verhouding tussen de stijfheid van de tunnelring en de omringende grond in te vullen. De montagespanningen zijn met het Duddeck model niet te bepalen.



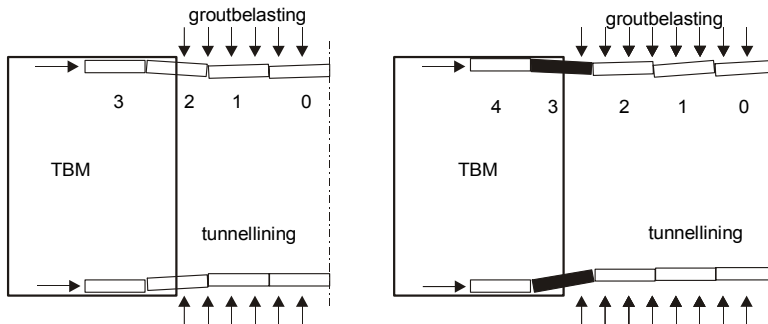
Figuur 24: Ringmodel volgens het principe Schulze & Duddeck [lit. 24]

Ook de vervormingen hangen af van de gronddekking boven de tunnelling. Wanneer de gronddekking kleiner wordt, wordt de stijfheid van de tunnelling in verticale richting kleiner. Hierdoor

zal de tunnelring in vervormde toestand een grotere verticale dan horizontale diameter hebben. Wanneer de dekking groter wordt zal een tegengestelde vervorming optreden. De horizontale diameter is dan groter dan de verticale diameter.

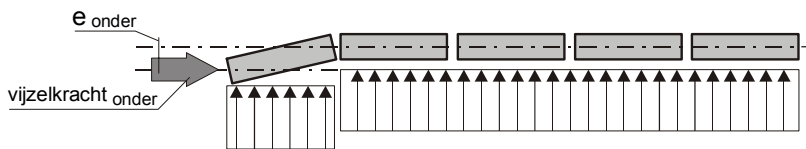
2.2.3 Trompeteffect

Wanneer de tunnelringen tijdens het boren buiten het schild van de TBM komen, worden ze geleidelijk belast door grout- en gronddrukken. Hierdoor zal de diameter van de ring iets afnemen (figuur 25).



Figuur 25: Trompeteffect

Dit is in tegenstelling tot de ring in het schild van de TBM. Door dit verschil in diameter van de ringen binnen en buiten het schild van de TBM, zullen de segmenten een bepaalde scheefstand hebben, waardoor de vijzels excentrisch op de tunnellinging aangrijpen. Dit veroorzaakt extra buigspanningen in de segmenten (figuur 26).

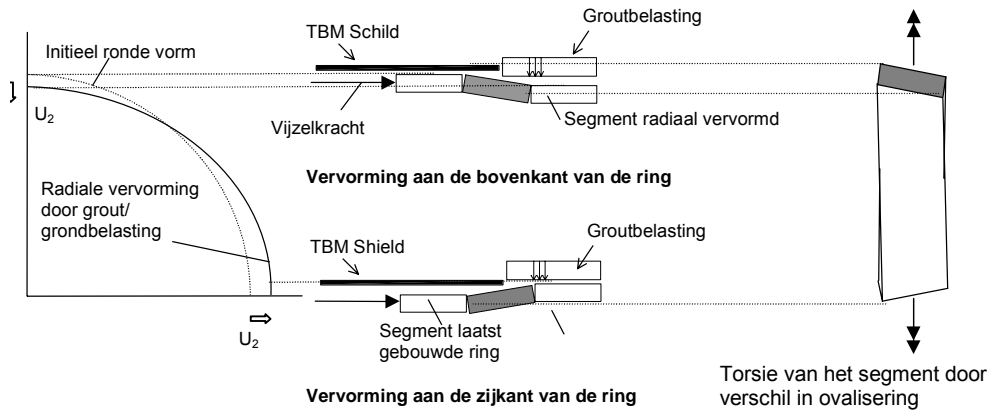


Figuur 26: Excentriciteit vijzelkracht t.g.v. trompeteffect

2.2.4 Ovaliseren

Doordat de grout- en grondbelasting en de bedding niet over de hele doorsnede van de tunnel even groot, zal de tunnelbuis gaan ovaliseren. Dit ovaliseren treedt op in twee fasen.

Tijdens de eerste fase bevindt de net gebouwde ring zich binnen het schild. De vorige ring wordt op dat moment belast door grout en zal gaan ovaliseren. Door de vijzelkrachten kunnen in de ringvoegen tussen twee naast elkaar gelegen ringen schuifspanningen ontstaan. Deze schuifspanningen zullen proberen de verplaatsingsverschillen tegen te gaan. De schuifspanningen hebben dwarskrachten tussen twee ringen tot gevolg. Daarnaast kan een dwarskracht ontstaan, doordat de ringen met bouten in de ringvoegen aan elkaar verbonden zijn. Door deze koppeling tussen de ringen, zal de laatst gebouwde ring evenals de vorige ring, ook willen ovaliseren. Omdat de koppeling alleen aanwezig is in de ringvoeg aan de tunnelzijde, zal de ovalisering van de laatst gebouwde ring aan de tunnelzijde groter zijn dan aan de TBM zijde. Door dit verschil in ovalisering zullen de segmenten torderen. De stijve segmenten zullen dit torderen willen verhinderen en hierdoor ontstaan torsiespanningen in de segmenten (figuur 27).

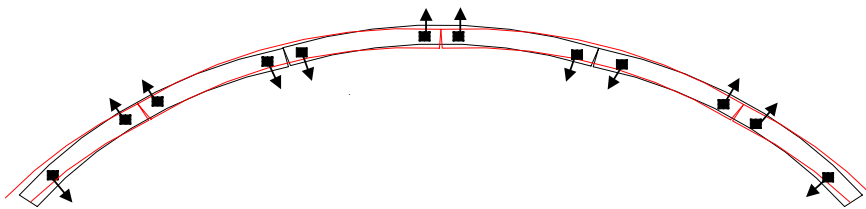


Figuur 27: Torsie van segmenten t.g.v. ovalisatie verschil [lit. 5]

In de tweede fase komt de beschouwde ring geleidelijk buiten het schild en wordt dan belast door de grout- en grondrukken. Hierdoor zullen de ovalisering en het trompeteffect toenemen. Samen zorgen ze voor een groter verschil in ovalisering van de segmenten aan de TBM zijde en de tunnelzijde van de segmenten. Hierdoor zullen de segmenten ook steeds meer gaan torderen en de torsiespanningen verder toenemen. Het verschil in ovalisering (en daarmee de torsiespanningen) is maximaal vlak voordat een nieuwe ring geplaatst wordt. De beschouwde ring bevindt zich dan voor de helft buiten het schild [lit. 4].

De ovalisatie zal door de hoge buigstijfheid van de segmenten voornamelijk plaatsvinden door rotaties van de segmenten om de langsvogen [lit. 4]. Het verplaatsingsverschil is daarom het grootst t.p.v. de langsvogen. Bij een verschil in ovalisatie tussen twee ringen, zullen de contactvlakken dit verplaatsingsverschil willen verhinderen, via wrijvingskrachten in de ringvoegen. Hierdoor ontstaan koppelkrachten in de ringvoegen ter plaatse van de contactvlakken. Via deze koppelkrachten vindt een herverdeling van de momenten tussen de ringen plaats. De momenten zullen daardoor op de ene plaats in de ring toenemen en op een andere plaats in de ring afnemen. De grootste herverdeling van momenten tussen twee ringen, vindt plaats waar de grootste verplaatsingsverschillen tussen twee ringen optreden.

Bij de THT en de BST zitten de contactvlakken tussen twee ringen in het midden en aan de uiteinden van de segmenten, nabij de langsvogen. Doordat de verplaatsingsverschillen tussen twee ringen aan het einde van de segmenten plaatsvindt, zijn hier ook de koppelkrachten het grootst. Hiermee is ook de herverdeling van momenten het grootst en zullen de maximale momenten het grootst zijn.



Figuur 28: Koppelkrachten t.g.v. vervormingsverschillen ringen

Naast verplaatsingsverschillen zullen ook rotatieverschillen tussen twee ringen optreden. De contactvlakken tussen twee ringen zullen dit rotatieverschil willen tegengaan, waardoor momenten in de contactvlakken optreden. Ook hierdoor vindt herverdeling van momenten plaats.

Wanneer de maximale wrijvingskrachten worden overschreden, treden verschuivingen van de segmenten op en kunnen de nokken gaan aanliggen. De maximale wrijvingskracht hangt af van de optredende vijzelkrachten en wrijvingscoëfficiënt tussen de betonnen segmenten en het ringvoegmateriaal. Bij de THT is in het begin kaubit en later triplex ringvoegmateriaal toegepast.

Kaubit heeft een relatief lage wrijvingscoëfficiënt met beton (0,1 t.o.v. triplex 0,4). Hierdoor werden de wrijvingskrachten in de ringvoegen overschreden en door de geringe spelings in de nok-holte verbinding (4 mm [lit. 23, p.34]), gingen de nokken al snel aanliggen. De hoeken t.p.v. de holtes waren hier niet op gedimensioneerd en daarom trad veel schade op t.p.v. deze hoeken (paragraaf 3.1). Bij de THT zijn daarom de kaubit plaatjes vervangen door triplex plaatjes en is de speling tussen de nok en holte vergroot door het slijpen van de nokken op het werk. Hierdoor kwam nokschade weinig meer voor, net als bij de BST, waar in het ontwerp van de segmenten al triplex plaatjes en een grotere tolerantie van de nok-holte verbinding werden toegepast.

3 Schademechanismen Botlek spoortunnel en Tweede Heinenoordtunnel

Wanneer schadegevallen optreden en zuurstof en vocht via deze schadegevallen bij de wapening van de segmenten kan komen, bestaat het gevaar voor corrosie van deze wapening. Op korte termijn moeten de opgetreden schadegevallen daarom worden gerepareerd. Op lange termijn is monitoring van deze “weak spots” noodzakelijk om verslechtering van deze “weak spots” tijdig waar te nemen en te repareren. Deze onderhoudswerkzaamheden zijn echter zeer ongewenst, omdat het treinverkeer zo min mogelijk mag worden gehinderd.

De schades die aan de binnenkant van de tunnelbuis optreden zijn direct waar te nemen. De schades aan de buitenkant zijn alleen indirect waar te nemen, wanneer de scheuren doorlopen over de dikte van de segmenten en de scheurwijdte groot genoeg is. In dit geval kan water naar de binnenkant van de tunnelling lekken.

Bij de BST en de THT zijn diverse schademechanismen geconstateerd. In dit hoofdstuk zullen verklaringen worden gegeven voor de opgetreden schademechanismen bij deze boortunnels.

3.1 Betonschade

Betonschade aan de segmenten treedt op wanneer een gedeelte van het beton van de segmenten wordt afgedrukt. Hierbij kan een deel van de wapening van de segmenten bloot komen te liggen, met als gevolg het gevaar voor corrosie van de wapening. Wanneer corrosie optreedt kan het beton worden afgedrukt door de corroderende wapening, zodat de doorsnede van de segmenten reduceert. Dit heeft tot gevolg dat de segmenten minder grote krachten op kan nemen.

Voeg van de sluitsteen

Bij de THT is de aansluiting van de sluitsteen op de countersegmenten uitgevoerd als messing en groef. Deze aansluiting is om te voorkomen dat de sluitsteen er tijdens het groutproces wordt uitgedrukt en werkt tevens als geleiding voor de plaatsing van de sluitsteen. Bij een te nauwe opening voor de sluitsteen, kan de sluitsteen echter niet spanningsloos worden ingebouwd. Deze te nauwe opening ontstaat meestal door een onnauwkeurige ringbouw. De sluitsteen wordt dan met een vijzelpaar met grote kracht op zijn plaats geduwd. Hierdoor werkt de geleiding van de messing en groef verbinding niet goed en bestaat het gevaar dat de segmentrand af wordt gedrukt. De meeste schade treedt op, wanneer het segment uit het schild komt en wordt belast door grout. Bij de aansluiting tussen messing en groef, waar dan al spanningsconcentratie aanwezig is, wordt de spanning verder verhoogd. Dit kan leiden tot het afspringen van de segmentrand. Dit kan zowel aan de binnenkant (zichtbaar, figuur 29) van de tunnelbuis optreden als aan de buitenkant (niet zichtbaar).



Figuur 29: Betonschade t.p.v. voeg sluitsteen

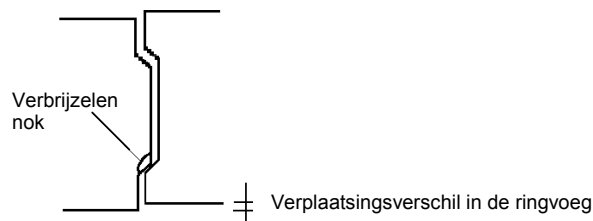
Deze schade kan ook lokaal optreden, wanneer de sluitsteen aanligt op de hoek van de countersegmenten. In dit geval wordt een gedeelte van de langsvoeg van de countersegment afgedrukt.

Dit schademechanisme hangt af van de nauwkeurigheid waarmee een ring gebouwd wordt. De nauwkeurigheid van de maatvoering van de segmenten is enkele tienden van millimeters en daarmee niet maatgevend. Omdat dit schademechanisme afhangt van een menselijke factor, zal deze na verloop van tijd afnemen door het leereffect van de ringbouwers.

Nokschade

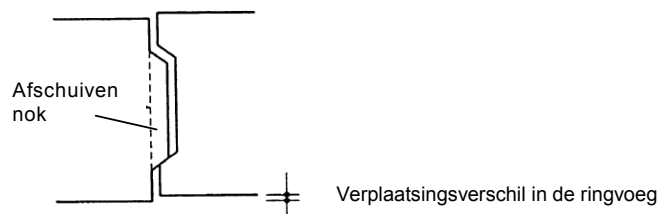
Dit schademechanisme trad op, indien het ringrandverschil groter werd dan de beschikbare speling in de nok-holte verbinding. Bij de THT traden ringrandverschillen op tot 30 mm, terwijl de tolerantie in het begin van het boorproces slechts vier mm bedroeg [lit. 23]. Hierdoor ontstonden contactpunten tussen de nokken en holtes, waardoor hoge piekspanningen optraden. Hierbij konden de volgende schademechanismen optreden:

- Lokaal verbrijzelen beton



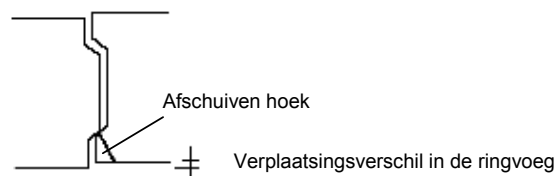
Figuur 30: Verbrijzelen nok

- Afschuiven nok



Figuur 31: Afschuiven nok

- Afschuiven hoek.



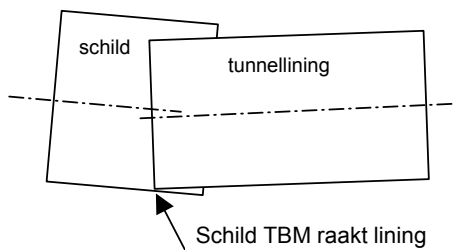
Figuur 32: Afschuiven hoek

Het verbrijzelen van de nok (figuur 30), treedt op binnen het segment en is daarom niet waar te nemen. Omdat de nok sterker gedimensioneerd is dan de hoek, zal afschuiven van de nok (figuur 31) niet optreden. Het afschuiven van de hoeken van het segment (figuur 32), kan aan zowel de binnens als de buitenkant van het segment optreden. Indien dit mechanisme aan de buitenzijde van de segmenten optreedt, zal dit worden gekenmerkt door lekkage. Het water zal, door het afschuiven van de hoek, onder het afdichtingrubber via de ringvoeg naar de binnenkant van het segment lopen. Om deze schades zoveel mogelijk te voorkomen, is de tolerantie van de nok-holte verbinding bij de THT vergroot, door de nokken van de segmenten op het werk te slijpen. Ook zijn in plaats van triplex plaatjes, kaubit plaatjes toegepast (paragraaf 2.2.4). Triplex heeft een grotere wrijvingscoëfficiënt dan kaubit (0,4 i.p.v. 0,1) en daardoor traden minder grote vervormingsverschillen op en gingen de nokken minder snel aanliggen. Na deze ingrepen kwam dit schademechanisme weinig meer voor. Bij het

ontwerp van de segmenten van de BST is hier rekening mee gehouden in het ontwerp door een grotere tolerantie bij de nok-holte verbinding toe te passen en de nokken te versterken. Daarnaast zijn bij de BST vanaf het begin van het boorproces triplexplaatjes toegepast. Ook bij de BST kwam dit schademechanisme weinig meer voor.

Schade door raken schild

Wanneer de luchtmaat te klein is kan, bij krappe boogstralen en/of ovaliseren van de ring, de buitenkant van de tunnelbuis het schild raken. De luchtmaat is de afstand van de buitenkant van de segmenten tot de binnenkant van het schild (figuur 33). Hierdoor kan betonschade ontstaan aan de segmenten door lokale hoge spanningen (figuur 34). Deze schade treedt meestal op aan de buitenkant van de ring en is daarom na het plaatsen van de volgende ring niet meer zichtbaar.



Figuur 33: Aanliggen lining tegen schild TBM



Figuur 34: Betonschade door raken schild

3.2 Scheurvorming

Bij het ontwerpen van betonconstructies neemt het beton de drukkrachten op en het staal de trekkrachten. Het staal komt pas onder spanning wanneer het beton gescheurd is. "Scheuren" hoeven daarom niet per definitie problematisch te zijn, tenzij de scheurwijdte zo groot is dat corrosie van de wapening kan optreden. De scheurwijdte waarbij het gevaar voor corrosie aanwezig is, hangt af van de agressiviteit van het milieu, waarin de constructie zich bevindt. De BGH valt in milieuklasse 4, met milieu zeewater, vanwege de aanwezigheid van brak grondwater. De bijbehorende grenswaarde voor de scheurwijdte is 0,2 millimeter.

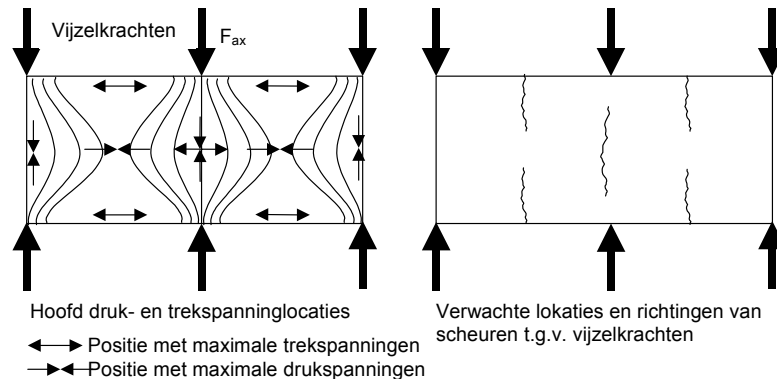
Door verschillende belastingen kunnen diverse soorten scheuren optreden op verschillende plaatsen in het segment. Hierdoor kan door de plaats en de soort scheur een indruk worden verkregen van de belasting. De volgende scheuren zijn te onderscheiden:

- Afschuifscheur: Deze scheur treedt op wanneer de schuifspanningen de maximale treksterkte van het beton overschrijden. Wanneer er alleen schuifspanningen optreden zullen de scheuren een helling hebben van 45° , respectievelijk 135° , ten opzichte van de axiale richting (figuur 35).
- Torsiescheur: Deze scheur kan optreden als gevolg van het trompeteffect samen met het geleidelijk ovaliseren van de ring of door een niet vlakke ringvoeg [lit. 4]. Deze scheuren treden eveneens op onder een hoek van 45° of 135° t.o.v. de axiale richting (figuur 35). Scheuren die het gevolg zijn van zuivere torsiespanningen hebben dus dezelfde richting als afschuifscheuren.



Figuur 35: Scheur door torsiemechanisme (of afschuiving)

- Buigscheur: Deze scheur ontstaat doordat de trekspanningen, door optredende buigende momenten, de maximale buigtreksterkte van het beton overschrijden. Deze scheuren lopen in axiale richting.
- Splijtscheur: Deze scheur ontstaat door een geconcentreerde lastinleiding en door dwarscontractie. Wanneer een drukkracht geconcentreerd wordt ingeleid, zullen de drukspanningen zich spreiden over de doorsnede. De druktrajectoriën lopen daarom niet in een rechte lijn evenwijdig aan de belasting. Hierdoor ontstaan naast drukspanningen ook trekspanningen loodrecht op de richting van de belasting (figuur 36). De trekspanningen hebben scheuren tot gevolg, die evenwijdig aan de richting van de belasting lopen. Dit mechanisme is beschreven in onderstaand figuur.



Figuur 36: Ontstaan splijtscheuren [lit. 5]

Wanneer een combinatie van bovengenoemde spanningen optreedt, kunnen met behulp van de cirkel van Mohr, de hoofdspinningen en de hoofdrichting berekend worden. Loodrecht op de hoofdrichting van de grootste trekspanning zal scheurvorming optreden.

In de segmenten zitten conusgaten voor de plaatsing van de segmenten met de erector. Voor de koppeling van de segmenten met de segmenten van de vorige ring met bouten, zitten boutgaten in de segmenten. Ter plaatse van de conus- en boutgaten is de doorsnede echter verzwakt, waardoor hier relatief veel scheuren optreden (figuur 37).



Figuur 37: Scheurvorming t.p.v. de conusgaten en boutpockets

3.3 Voeglekkages

Naast de lekkages die de schademechanismen in bovenstaande paragrafen tot gevolg kunnen hebben, is het mogelijk dat er lekkages optreden zonder dat het beton van de segmenten wordt beschadigd. Deze lekkages kunnen optreden door de voegen tussen segmenten en zullen daarom voeglekkages genoemd worden. Indien lekwater de tunnel binnenstroomt, kan wapening, dat aan de oppervlakte ligt bij beschadigde elementen, gaan corroderen. Daarnaast zijn lekkages om esthetische redenen ongewenst. Water in een tunnel geeft de gebruikers van de tunnel een onveilig gevoel.

Voeglekkages kunnen de volgende oorzaken hebben:

- Onvoldoende afdichting door onvoldoende drukkracht op de afdichtingrubbers. Dit kwam bij de BST en de THT voornamelijk voor aan de smalle zijde van de sluitsteen (figuur 38). Bij de plaatsing van de sluitsteen in een te nauwe ruimte, kan het gebeuren dat de wigvormige sluitsteen niet volledig tegen de ringvoeg van de naastgelegen ring wordt gedrukt. Hierdoor treedt lekkage op ter plaatse van de langsvoeg aan de smalle zijde van sluitsteen.



Figuur 38: Voeglekkage t.p.v. de sluitsteen

- Wanneer voor het plaatsen van de sluitsteen te weinig ruimte aanwezig is, ontstaan tijdens het indrukken van de sluitsteen door de vijzels grote wrijvingskrachten tussen de langsvoegen van de sluitsteen en de countersegmenten. Hierdoor ontstaat het gevaar dat de rubberen afdichtingprofielen in de langsvoegen afschuiven. Ook hierdoor kunnen lekkages optreden (figuur 38).

4 Vergelijking met boortunnel Groene Hart

In de vorige hoofdstukken zijn de belastingen, vervormingen en spanningen geïnventariseerd, die bij de bouw van de boortunnels BST en THT zijn opgetreden. Deze tunnels zijn geboord door Duitse aannemers. De BGH is echter geboord door een Franse aannemer (Bouygues), welke een andere vijzelconfiguratie en segmentontwerp toepast. De belastingen op de tunnelling zullen niet veranderen, in tegenstelling tot de spanningen in en op de tunnelling.

In dit hoofdstuk wordt eerst een vergelijking gemaakt tussen de vijzelconfiguratie en het segmentontwerp van de Duitse en Franse aannemers. Daarna volgt een vergelijking van de spanningen, vervormingen en schademechanismen tussen de Duitse en Franse methode.

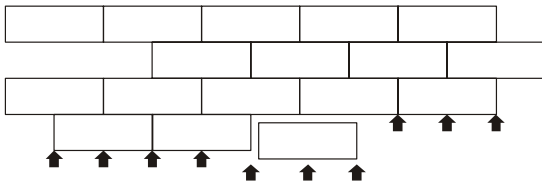
4.1 Ontwerp

4.1.1 Vijzelconfiguratie

Bij zowel de Duitse als de Franse configuratie grijpen de vijzels in paren via vijzelschoenen aan op de segmenten. Wel zijn de plaatsen waar de vijzels op de segmenten aangrijpen verschillend.

Duitse vijzelconfiguratie

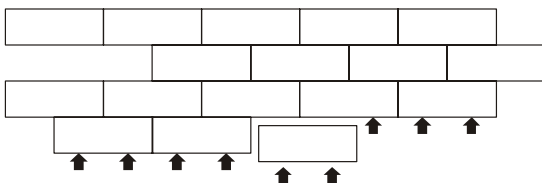
Bij deze configuratie grijpen de vijzelparen aan op de randen en het midden van het segment. Hierbij grijpen de vijzels, die op de randen van de segmenten zitten, aan op twee segmenten (figuur 39).



Figuur 39: Duitse vijzelconfiguratie

Franse vijzelconfiguratie

Bij de Franse configuratie staan per segment twee vijzelparen geplaatst op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van de lengte van het segment (figuur 40).



Figuur 40: Franse vijzelconfiguratie

4.1.2 Ontwerp segmenten

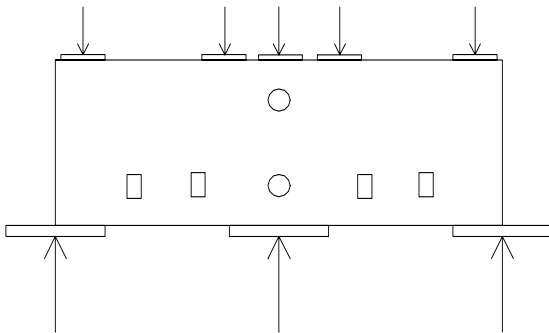
BST en THT

Bij de boortunnels BST en THT zijn in de ringvoegen van ieder segment vier triplexplaatjes toegepast voor de overdracht van de vijzelkrachten naar de achterliggende segmenten. Daarnaast leveren de vijzelplaatjes in principe de oplegging voor het segment. De triplex plaatjes liggen in één lijn met de vijzelkrachten, waardoor de vijzelkrachten zoveel mogelijk in één lijn aan de achterliggende

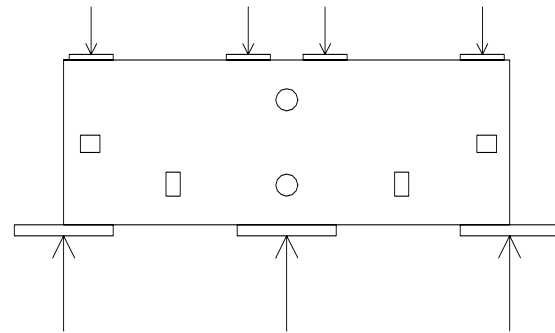
segmenten doorgegeven. Wanneer een kracht op de triplexplaatjes wordt gezet, neemt de dikte af van ongeveer 4 mm tot 1 mm.

Bij de BST heeft ieder segment vier boutgaten voor een tijdelijke koppeling van de segmenten aan de segmenten van de vorige ring. De THT heeft twee boutgaten voor de koppeling met de segmenten van de vorige ring en aan weerszijden van het segment één boutgat voor de koppeling met de segmenten binnen dezelfde ring. Om het hele segment is een rubberen afdichtingsprofiel geplaatst om de waterdichtheid te garanderen. De boutverbindingen zorgen ervoor dat de rubbers voldoende aangedrukt blijven, als de voorspanning door de vijzelkrachten weg zou vallen, zodat de waterdichtheid gegarandeerd blijft. Daarnaast zorgen de bouten ervoor dat segmenten die boven in de tunnel worden geplaatst niet naar beneden kunnen vallen.

In de segmenten zijn twee conusgaten in het midden van het segment zichtbaar. Deze conusgaten zijn voor het plaatsen van de segmenten en bevinden zich in één lijn met de vijzelkrachten (figuur 41 en 42).



Figuur 41: Geconcentreerde belasting op segment BST



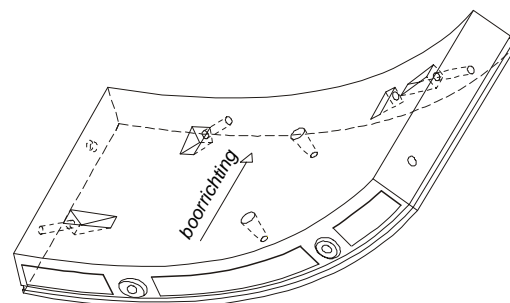
Figuur 42: Geconcentreerde belasting op segment THT

Om grote vervormingen van de ringen t.o.v. elkaar te voorkomen wordt een nok/holte verbinding toegepast in de ringvoeg van de segmenten. Wanneer de maximale wrijvingscapaciteit van de ringvoeg wordt overschreden, zullen de nokken zorgen voor de dwarskrachtoverdracht tussen de ringen. Omdat de dwarskrachtoverdracht geconcentreerd plaatsvindt en op een relatieve zwakke lokatie in het segment (paragraaf 3.1), is de kans op nokschade groot. De nokken werken tevens als geleider voor het plaatsen van de segmenten (figuur 43 en 44). Bij de BST is de speling tussen de nokken en holten zo groot dat de nokken pas werken indien de maximale wrijvingskracht in de ringvoeg zou worden overschreden. Deze wrijvingskracht is afhankelijk van de vijzelkracht en het voegmateriaal. Achteraf is gebleken dat deze wrijvingskracht in de praktijk niet wordt overschreden en de nokken alleen de functie van geleider hebben tijdens het plaatsen.

De sluitsteen is wigvormig, zodat deze makkelijker geplaatst kan worden. De beide countersegmenten hebben ook een afwijkende vorm, zodat ze zorgen voor een K-vormige opening voor de sluitsteen. De langsvoeugen van de sluitsteen en de countersegmenten zijn uitgevoerd met een messing groefverbinding. Deze werkt aan de ene kant als geleider voor het plaatsen van de segmenten en aan de andere kant om te voorkomen dat de sluitsteen naar beneden valt als de ruimte voor de sluitsteen te groot is.



Figuur 43: Foto segmenten BST



Figuur 44: Tekening segment THT

BGH

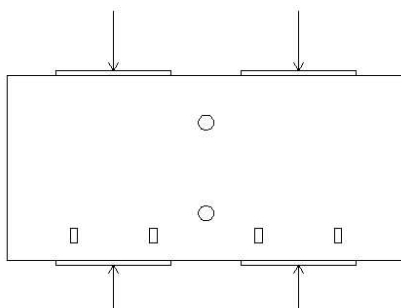
Bij de BGH brengen de segmenten met twee betonnen draagvlakken de vjzelkrachten over naar de achterliggende segmenten (figuur 46). De segmenten zijn hier dus statisch bepaald opgelegd, in tegenstelling tot de segmenten bij de BST en de THT. Ook de plaats van de betonnen draagvlakken is verschillend t.o.v. de triplex plaatjes bij de BST en de THT.

Eveneens als bij de BST zijn vier boutgaten geplaatst voor de koppeling van de segmenten aan de segmenten van de vorige ring (figuur 46). In de langsvoeegen zijn geen boutgaten aanwezig, behalve bij de langsvoeegen van de sluitsteen.



Figuur 45: Foto segmenten BGH

Bij de BGH zijn geen nokken toegepast voor de opname van de dwarskrachten tussen de ringen. Deze worden opgenomen door wrijving in de ringvoegen. De maximale wrijvingskracht is te berekenen door de vjzelkracht te vermenigvuldigen met de wrijvingscoëfficiënt van beton op beton. Als hulpmiddel voor het plaatsen van de segmenten worden twee kunststof profielen gebruikt die in een gleuf van de langsvoeg van het naastgelegen segment wordt geplaatst (figuur 45). Om het hele segment is net als bij de BST en de THT een rubberen afdichtingsprofiel geplaatst voor de waterdichtheid. Daarnaast loopt een hydrofiele pakking rondom het segment (figuur 45). Wanneer deze pakking in contact komt met water, zet het uit. Hierdoor wordt de waterafdichting gegarandeerd. Evenals bij de BST en de THT heeft de sluitsteen een wigvorm. De langsvoeegen van de sluitsteen en



Figuur 46: Geconcentreerde belasting op segment BGH

de countersegmenten zijn bij de BGH niet als messing/groef uitgevoerd, zoals bij de BST en de THT wel het geval is. Om te zorgen dat de sluitsteen toch blijft hangen bij een te ruim ingebouwde ring, zit in beide langsvoeegen één boutgat en twee boutgaten in de ringvoeg [lit. 34].

4.2. Vijzelbelastingen

4.2.1 Axiale belasting

Door de grotere diameter van de TBM, zullen de vijzelkrachten groter zijn. Verder is het geotechnisch profiel van invloed op de maximaal te leveren voortstuwingskracht. Voor de vijzelspanningen zijn de vijzelkrachten en de afmetingen van de vijzelschoenen van belang. Door de relatief grote vijzelschoenen bij de BGH worden de spanningen gereduceerd. Bij de BGH treden dus aan de ene kant hogere vijzelspanningen op door grotere vijzelkrachten en aan de andere kant lagere vijzelspanningen op door de grotere vijzelschoenen dan bij de BST en THT. Het netto resultaat is daarom niet kwalitatief te bepalen maar zal moeten worden berekend.

Belangrijker dan de grootte van de drukspanningen, zijn de optredende slijtspanningen. Deze ontstaan door dwarscontractie en doordat de drukspanningen niet rechtdoor lopen, maar uitwaaien over de doorsnede van het segment. Loodrecht op deze druktrajectoriën treden trekspanningen op. Belangrijk daarbij is de ligging van de verzwakkingen van de doorsnede t.o.v. de krachtsinleiding van de vijzelkrachten. De conusgaten bij de BGH liggen niet in één lijn met de vijzelkrachten. Hierdoor zitten de conusgaten niet op een plek waar hoge trekspanningen optreden (figuur 36). Bij de BGH kunnen daarom ook minder schades worden verwacht ter plaatse van de conusgaten.

4.2.2 Plaatsen sluitsteen

De langsvoeg van de sluitsteen bij de BST en de THT is in tegenstelling tot de langsvoeg van de sluitsteen bij de BGH uitgevoerd als messing/groef verbinding. Hierdoor kan bij de BGH minder schade t.p.v. de langsvoeg van de sluitsteen en de countersegmenten worden verwacht. Het afdrukken van de segmenthoek van de countersegmenten door de sluitsteen kan nog wel steeds voorkomen bij BGH. Het optreden van dit mechanisme is vooral afhankelijk van de bekwaamheid van de ringbouwers. Vanwege het leereffect is deze schade daarom vooral aan het begin van de boortunnel te verwachten.

Voeglekkages kunnen bij de BGH ook worden verwacht. Net als bij de andere boortunnels in Nederland zal dit naar verwachting vooral optreden t.p.v. de sluitsteen.

4.2.3 Spanningen door ringvoegonvlakheid

Bij de BGH worden de vijzelkrachten tussen de segmenten van twee opeenvolgende ringen overgebracht door twee betonnen draagvlakken. Deze draagvlakken hebben afmetingen van 1250 x 400 mm² en een dikte van 4 mm. Bij het toepassen van twee betonnen draagvlakken zijn de segmenten statisch bepaald opgelegd. Hierdoor kan, in geval van een verplaatsingsverschil in de ringvoeg van enkele millimeters, het segment in contact komen met beide draagvlakken en niet gaan aanliggen op de hoeken. Voordat het segment op de hoeken van het segment aan gaat liggen, zullen de vijzelkrachten in een rechte lijn van segment op segment worden overgebracht [lit. 34]. Hierdoor wordt schade aan de hoeken en scheuren in de segmenten gereduceerd. Het maximale verplaatsingsverschil in de ringvoeg bij de BGH is 6 mm. Is het verplaatsingsverschil groter, dan worden rubberen packers gebruikt om de ringvoegonvlakheid te corrigeren.

Bij de BST en de THT zijn de segmenten op vier vijzelplaatsjes opgelegd, waardoor de segmenten statisch onbepaald zijn opgelegd. Wanneer het verplaatsingsverschil in de ringvoeg te groot wordt, zullen niet alle vijzelplaatjes belast worden. Daardoor zullen de vijzelkrachten naast axiale drukspanningen ook schuif-, buig- en torsiespanningen leveren bij de BST en THT (figuur 14).

Doordat de segmenten bij de BGH statisch bepaald zijn opgelegd, zijn minder afschuif-, buig- en torsiescheuren te verwachten (paragraaf 3.2, Scheurvorming).

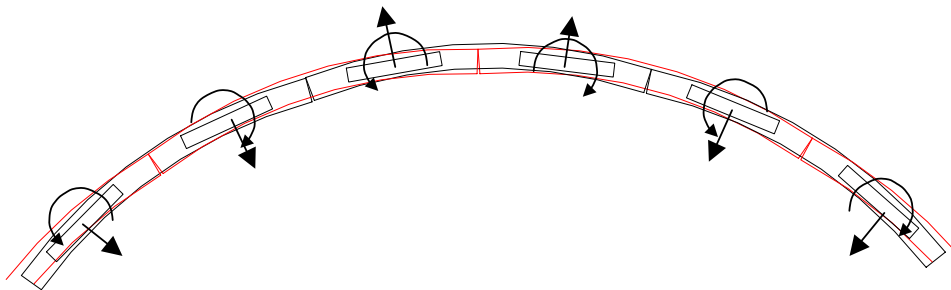
4.3 Grout- en grondbelasting

De grout- en gronddrukken zullen door de veranderde vijzelconfiguratie en segmentontwerp zelf niet veranderen. Door het veranderde ontwerp van de segmenten zullen wel de spanningen in de segmenten veranderen. Vooral de momentenverdeling tussen de ringen, door verschil in vervorming van de ringen, is sterk afhankelijk van het segmentontwerp.

4.3.1 Invloed gesegmenteerde lining

Wanneer een ring buiten het schild van de TBM komt, zal deze gaan ovaliseren, omdat de horizontale belasting niet gelijk is aan de verticale belasting. Dit ovaliseren vindt plaats door buiging van de segmenten en rotatie om de langsvogen. Vanwege de grote stijfheid van de segmenten, wordt aangenomen dat de ovalisatie voornamelijk optreedt door rotatie van de segmenten om hun langsvogen [lit. 4].

Door rotatie van de segmenten om de ringvoegen of een verschuiving van twee segmenten in de ringvoeg kunnen twee naastgelegen ringen verschillend ovaliseren. Om de waterdichtheid van de lining te verzekeren, is het belangrijk dat het verplaatsingsverschil tussen twee ringen beperkt blijft. De onderlinge verplaatsingsverschillen tussen twee ringen zijn onder te verdelen in een rotatieverschil en een translatieverschil. Door een rotatieverschil tussen twee ringen zullen wrijvingskrachten buigende momenten in de ringvoegen veroorzaken. Translatieverschillen, in radiale richting, tussen twee ringen zullen koppelkrachten in de ringvoeg veroorzaken (figuur 47). De interactiekrachten zullen het verplaatsingsverschil ongedaan willen maken. Hieruit volgt de richting van deze krachten.



Figuur 47: Interactiekrachten door verplaatsingsverschillen tussen twee ringen [lit. 4]

Door bovengenoemde interactiekrachten zal een herverdeling van momenten tussen de ringen plaatsvinden. Hierbij zal op de ene plaats in een ring het moment toenemen en op een andere plaats afnemen. Hierdoor zullen de maximum momenten toenemen.

Voor de grote van de herverdeling is de plaatsing van de betonnen draagvlakken van belang. Bij de BGH zitten de betonnen draagvlakken op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van de lengte van het segment. Hier treedt een kleiner verplaatsingsverschil tussen twee ringen op, dan ter hoogte van de langsvogen. Hierdoor treedt relatief een kleiner verplaatsingsverschil en daarmee kleinere wrijvingskrachten op dan bij de THT en BST. Dit heeft een kleinere procentuele stijging van de momenten in de ring [lit. 11] tot gevolg dan bij de BST en THT.

De koppelkrachten worden voor de eenvoud vaak als tangentiële veren geschematiseerd. In werkelijkheid treden al koppelkrachten op, voordat een verplaatsingsverschil tussen de ringen optreedt. Dit komt omdat bij beton op beton contact Coulombse wrijving optreedt. Dit houdt in dat eerst een bepaalde wrijvingskracht moet worden overschreden, voordat een verplaatsing optreedt.

5 Conclusies en plan van aanpak

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies gegeven, die zijn opgedaan tijdens deze voorstudie. Tenslotte wordt het plan van aanpak voor de tweede en laatste fase van dit afstudeeronderzoek gegeven.

5.1 Conclusies voorstudie

Tijdens de bouw van de eerdere boortunnels in Nederland is gebleken dat de bouwfase van boortunnels maatgevend kan zijn, terwijl deze boortunnels zijn gedimensioneerd op de gebruiksfase. De belangrijkste belastingen op segmenten van de tunnelbuis bestaan in deze fase uit:

- Vijzelkrachten
- Grout- en gronddrukken

Daarnaast treden door vervormingen van de tunnelbuis extra spanningen op, omdat de vijzelkrachten excentrisch op de segmenten komen te staan. Dit kan leiden tot aanzienlijke verhoging van de spanningen, doordat naast normaalspanningen, ook buig-, schuif- en torsiespanningen kunnen optreden. Ook verhinderde vervormingen zullen grote extra spanningen opleveren. Deze spanningen kunnen leiden tot schade aan de segmenten van de tunnelbuis.

Op de boortunnel Groene Hart en de tunnel onder het Pannerdensch kanaal na, zijn tot nu toe, alle geboorde tunnels in Nederland uitgevoerd door Duitse aannemers. De Duitse aannemers passen een ander segmentontwerp en vijzelconfiguratie toe dan de Franse aannemers bij de BGH. De segmenten worden op andere plaatsen door de vijzels belast en de vijzelkrachten worden op andere plaatsen doorgegeven aan de achterliggende segmenten.

De conusgaten zorgen voor een reductie van de doorsnede van de segmenten. Daarnaast treden ter plaatse van de conusgaten piekspanningen op. Bij de BGH worden grotere vijzelschoenen toegepast en liggen de conusgaten niet in één lijn met de vijzelkrachten zoals bij de BST en de THT. Hierdoor zitten deze conusgaten bij de BGH niet op plaatsen in het segment, waar grote trekspanningen kunnen optreden. Hierdoor zal waarschijnlijk minder scheurvorming t.p.v. de conusgaten ontstaan.

Bij de BGH worden grotere vijzelschoenen toegepast dan bij de THT en de BST, wat een verlaging van de vijzelspanningen tot gevolg heeft. Vijzelspanningen kunnen slijtspanningen veroorzaken, waardoor scheurvorming kan ontstaan. Echter de grotere vijzelkrachten bij de BGH, zullen de gunstige reductie van de vijzelspanningen wellicht te niet doen.

Bij de BGH wordt geen messing/groef verbinding toegepast in de langsvoeg van de sluitsteen en de countersegmenten. Hierdoor zal er aanzienlijk minder schade optreden aan de randen van de segmenten t.p.v. de sluitsteen.

Betonschade aan de segmenthoeken en afschuiven van het afdichtingrubber kan nog wel optreden t.p.v. de sluitsteen. Ter plaatse van de smalle ringvoeg van de sluitsteen kunnen nog steeds lekkages optreden, door het onvoldoende aandrukken van het afdichtingrubber in de ringvoeg.

Doordat de segmenten bij de BGH zijn opgelegd op twee draagvlakken, kunnen de segmenten een klein verplaatsingsverschil in de ringvoeg compenseren. De vijzelkrachten kunnen bij de BGH bij een klein verplaatsingsverschil in de ringvoeg nog steeds in een rechte lijn worden doorgegeven, waardoor geen extra schuif-, buig- en torsiespanningen ontstaan. Hierdoor treedt waarschijnlijk minder scheurvorming op.

Doordat de contactvlakken op de segmenten tussen de ringen op andere plaatsen zitten, zal een andere herverdeling van krachten tussen de ringen optreden. Ook is het aantal, de grote en de materiaaleigenschappen van de contactvlakken veranderd. Hierdoor zullen andere spanningen in de ringen ontstaan.

5.2 Plan van aanpak voor het eindrapport

- Inventariseer de optredende schademechanismen en vervormingen. Bepaal voor de boortunnel Groene Hart, op welke positie in de ring de meeste schadegevallen optreden. Onderzoek welke schademechanismen optreden op welke locatie in de ring. Daarnaast is het belangrijk om de richting van de scheuren te inventariseren, omdat dit een indicatie geeft over het optredende schademechanisme.
- Daarna volgt een analytisch gedeelte. Hierbij wordt bepaald wat de mogelijke oorzaken van de schadegevallen zijn. Onderzocht zal worden wat de invloed van de optredende vijzelspanningen, ovalisatie en ringvoegonvlakheid is op de optredende schadegevallen bij de segmenten. Daarbij dient ook de invloed van de schadegevallen op de duurzaamheid te worden aangegeven. Aan de hand hiervan kan worden aangegeven welke schadegevallen voorkomen dienen te worden.
- Ook wordt een vergelijking gemaakt tussen de kwaliteit van de tunnelling van de BST en de THT en de BGH. Daarbij wordt de invloed van de veranderde vijzelconfiguratie en ontwerp van de segmenten bepaald.
- Tenslotte zal worden aangegeven welke meetgegevens verder gewenst zijn om een beter inzicht te krijgen in de optredende schademechanismen en vervormingen van de tunnelbuis bij de BGH.

Literatuur

1. Bakker, ir. K.J., *Geboorde en afgezonken tunnels*, Kopieën uitgereikt bij college "Geboorde en gezonken tunnels CT5305, Delft, januari 2002.
2. Bakker, ir. K.J., ir. W.L. Leendertse, *Boortunnels – Onderzoek en ontwikkelingen in Nederland*, Cement nr. 10, 1996, p.42-47.
3. Bloemhof, K.C., *Schade aan tunnelling van gesegmenteerde boortunnels, Voorstudie*, Afstudeerverslag TU Delft, Utrecht, mei 2001.
4. Bloemhof, K.C., *Schade aan tunnelling van gesegmenteerde boortunnels - Geometrisch tunnelmodel*, Afstudeerverslag TU Delft, Utrecht, mei 2001.
5. Blom, ir. C.B.M., Preliminary thesis "Design philosophy of concrete linings of shield driven tunnels in soft soils", Delft, 2002.
6. Blom, ir. C.B.M., ir. H.C.W. Duurland, ir. P.S. Jovanovic, dr. ir. G.P.C. van Oosterhout, *Montagefase maatgevend door dimensionering tunnelling – COB-praktijkmetingen en driedimensionaal EEM-liningmodel*, Cement nr. 9, 1998, p.25-31.
7. Blom, ir. C.B.M., e.a., *Schade aan de lining – Met het oog op de uitvoering van de tunnel*, Verslag workshop, HSL-Zuid, 12 oktober 2001.
8. Debrauwer, R., *Groutbelasting op een tunnelling, concept eindrapport*, Afstudeerverslag TU Delft, maart 2002.
9. Elling, E., e.a., *Rapportageteknik*, Wolters-Noordhoff, Delft, april 1994.
10. Halderen, ir. W.A.M. van, *Segmentenproductie Tweede Heinenoordtunnel*, Cement nr. 10, 1997, p.47-51.
11. Haring, F.P., *Spanningen in de bouwfase en de gebruiksfase van boortunnels – Eindverslag*, Afstudeerverslag TU Delft, juni 2002.
12. Haring, F.P., *Spanningen in de bouwfase en de gebruiksfase van boortunnels – Voorstudie*, Afstudeerverslag TU Delft, juni 2001.
13. Hartsuijker, ir. C. en ir. C.F. Vrijman, *Mechanica van constructies 2a – elasticiteitsleer*, TU Delft, augustus 1998.
14. Horst, ir. E.J. van der, *Montagespanningen bij de bouw van geboorde tunnels – Literatuurstudie, versie 3.0*, CUR/COB K300 deelcommissie K340: Montagespanningen en dwarsverbindingen, Utrecht, 17 november 1999.
15. Horst, ir. E.J. van der, *Invloed van voegmaterialen op de krachtwerving in gesegmenteerde betonnen boortunnels*, Afstudeerverslag TU Delft, mei 1998.
16. Horvat, Prof. ir. E. Horvat, ir. W.L. Leendertse, *Ondergronds bouwen in Nederland – een perspectief*, Cement nr. 10, 1996, p.8-13.
17. Kooiman, dr. ir. A.G., dr. ir. C. van der Veen, ir. C.B.M. Blom, *Geboorde tunnels met betonnen segmenten*, TU Delft, april 2002.
18. Oosteren, ir. K. van, *Boortunnels van geëxtrudeerd staalvezelbeton*, Cement nr. 2, 1997.
19. Oostveen, P. van, en E.H. Negen, *Relatie procesgegevens – schadebeeld Tweede Heinenoordtunnel, Onderzoek ring 100 t/m 150, concept, versie 2*, 20 oktober 1997.
20. Postma, ir. D, ir. R.G.A. de Waal, dr. ir. C. van der Veen, *Analytische rekenmodellen voor geboorde tunnels*, Cement nr. 10, 1997.
21. Put, A. van der, e.a., *Evaluatierapport Boorproces – dataproces en TBM-ontwerp Tweede Heinenoordtunnel*, Bouwdienst Rijkswaterstaat en Tunnelcombinatie Heinenoord, 27 juli 1999.
22. Put, ir. J.L. van der, ir. M.S. Langhout, dr. ir. A.F. Puijssers, *Ontwerp lining geboorde tunnels*, Cement nr. 10, 1996, p.48-53.
23. Ruitenbergh, J., W.L. Leendertse, *Schade aan de segmenten van de west-buis van de Tweede Heinenoordtunnel*, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2 juli 1998.
24. Duddeck, Prof. dr. ir. H., *Empfehlungen zur berechnung von tunneln im Lockergestein*, Die Bautechnik nr. 10, 1980, p.349-356.
25. Slenders, B.M.A., *Modellering van lining voortunnel Groene Hart – Modellering montagefase, Voorstudie*, Afstudeerverslag TU Delft, Utrecht, juni 2001.
26. Vahle, ing. F., *Botlekspoortunnel, Calibratie montagespanningen segmenten - Analytische berekeningen, versie 3*, CUR/COB K300 deelcommissie F340/ Holland Railconsult, 27 april 2001
27. Vervuurt, dr. ir. A.H.J.M., ir. F.B.J. Gijsbers, *Eerste orde evaluatie tunnelconstructie – predictiemodellen, postdictieberekeningen en vergelijking met meetresultaten*, Werkrapport CUR/COB Uitvoeringscommissie, K100 Praktijkonderzoek boortunnels, november 1999.

28. Vliet, ing. S. van, ing. F.J. Wermer, *Tweede Heinenoordtunnel – De eerste geboorde tunnel in Nederland*, Cement nr. 10, 1996, p.33-38.
29. Vrijling, Prof. drs. ir. J.K. Vrijling, ir. K.J. Bakker, e.a., *Geboorde en gezonken tunnels*, collegendiktaat CTwa5305, TU Delft, januari 2002.
30. Walraven, Prof. dr. ir. J.C. Walraven, *Gewapend beton*, collegendiktaat CTco3050, TU Delft, september 1999.
31. *Bouygues Lining Design philosophy, Boortunnel Groene Hart*, Bouygues Travaux Travels, 25 augustus 2001.
32. *Analytische rekenmodellen voor geboorde tunnels*, Cement nr.10, 1997.
33. *Development of shield driven tunnel in Holland and Japan*, HSL-Zuid, november 1999.
34. *General concept of the standard rings, Boortunnel Groene Hart*, Bouygues Travaux Travels, 25 augustus 2001.
35. *Maatvoering boortunnel*, Cement nr. 2, 1999.
36. *Mortar supply, delivery and injection, Workplan*, Bouygues Travaux Travels, 1 oktober 2001.
37. *Tunnel precast lining – supply and erection, Workplan*, Bouygues Travaux Travels, 18 september 2001.

Figuren

Figuur 1: Begin boortunnel Groene Hart	2
Figuur 2: Kantelmoment	4
Figuur 3: Excentriciteit vijzel	5
Figuur 4: Excentriciteit t.g.v. scheefstand segment	5
Figuur 5: Excentriciteit t.g.v. scheefstand vijzel	6
Figuur 6: Terugtrekken vijzelparen	6
Figuur 7: Vijzelparen op zojuist geplaatste segment	6
Figuur 8: K-vormige opening sluitsteen	7
Figuur 9: Rotatie countersegmenten om de langsvoeugen t.g.v. te nauwe en te wijde ruimte voor de sluitsteen	7
Figuur 10: Tangentiële krachten op countersegmenten	8
Figuur 11: Tangentiële belasting op de sluitsteen , levert een normaalkracht en een buigend moment	8
Figuur 12: Spanningsverloop rondom de sluitsteen, zoals gemeten bij de THT	8
Figuur 13: Segmenten statisch onbepaald opgelegd	9
Figuur 14: Extra spanningen t.g.v. niet vlakke ondersteuning (Blom, 2002)	9
Figuur 15: Torsie en buiging bij niet vlakke ondersteuning (Blom, 2002)	10
Figuur 16: Cirkel van Mohr	10
Figuur 17: Ontwikkeling grout- en grondbelasting	11
Figuur 18: Resultante groutbelasting	12
Figuur 19: Constante radiale belasting	12
Figuur 20: Gradiënt groutbelasting	12
Figuur 21: Belasting ring direct na verlaten schild	13
Figuur 22: Verhoging groutdrukken aan bovenkant lining	13
Figuur 23: Tangentiële groutbelasting op de tunnelling	14
Figuur 24: Ringmodel volgens het principe Schulze & Duddeck (Schulze & Duddeck, 1964)	15
Figuur 25: Trompeteffect	15
Figuur 26: Excentriciteit vijzelkracht t.g.v. trompeteffect	15
Figuur 27: Torsie van segmenten t.g.v. ovalisatie verschil (Blom, 2002)	16
Figuur 28: Koppelkrachten t.g.v. vervormingsverschillen ringen	16
Figuur 29: Betonschade t.p.v. voeg sluitsteen	18
Figuur 30: Verbrijzelen nok	19
Figuur 31: Afschuiven nok	19
Figuur 32: Afschuiven hoek	19
Figuur 33: Raken van de ring door het schild	20
Figuur 34: Betonschade door raken schild	20
Figuur 35: Scheuren door torsiemechanisme of afschuiving	21
Figuur 36: Ontstaan splitscheuren	21
Figuur 37: Scheurvorming t.p.v. de conusgaten en boutpockets	22
Figuur 38: Voeglekkage t.p.v. de sluitsteen	22
Figuur 39: Duitse vijzelconfiguratie	23
Figuur 40: Franse vijzelconfiguratie	23
Figuur 41: Geconcentreerde belasting op segment BST	24
Figuur 42: Geconcentreerde belasting op segment THT	24
Figuur 43: Foto segmenten BST	24
Figuur 44: Tekening segment THT	24
Figuur 45: Foto segmenten BGH	25
Figuur 46: Geconcentreerde belasting op segment BGH	25
Figuur 47: Interactiekrachten door verplaatsingsverschillen tussen twee ringen	27
Tabel 1: Gemeten groutdrukken THT en BST	13