



LOGISTIEK BIJ BOORTUNNEL GROENE HART

Een onderzoek naar de invloed van de logistieke processen in de tunnel
op de veiligheid tijdens de bouw en de voortgang van de TBM

Eindrapport

Februari 2001



COLOFON

LOGISTIEK BIJ BOORTUNNEL GROENE HART

Een onderzoek naar de invloed van de logistieke processen in de tunnel op de veiligheid tijdens de bouw en de voortgang van de TBM

Eindrapport

Uitgave:
Alex van Schie
Studienummer 9737019

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde
Stevinweg 1, Delft

Opdrachtgever:
Projectorganisatie HSL-Zuid
Projectbureau Noordelijk-Holland
Griffioenlaan 2, Utrecht

Afstudeercommissie:
Prof. drs. ir. J.K. Vrijling
Dr. Ir. K.J. Bakker
Ir. G. Arends
Ir. J. Ruitenbergh
Ir. F. Boerma

TU Delft, sectie Waterbouwkunde
TU Delft, sectie Waterbouwkunde
TU Delft, sectie Ondergronds bouwen
HSL-Zuid, projectbureau Noordelijk-Holland
HSL-Zuid, projectbureau Noordelijk-Holland

Februari 2001



VOORWOORD

Dit rapport en met name de conclusies en aanbevelingen zijn in de eerste plaats geschreven voor de Projectorganisatie HSL-Zuid (Projectbureau Noordelijk-Holland), in opdracht waarvan deze studie is uitgevoerd. Tevens is het rapport mijn afstudeerscriptie voor de studie Civiele Techniek en Geowetenschappen aan de Technische Universiteit Delft, vakgroep Waterbouwkunde.

In dit onderzoek heb ik het logistieke systeem in de tunnel, dat ontworpen is voor de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart geanalyseerd. Voor een goed begrip van het probleemgebied en de methoden die zijn toegepast om het logistieke systeem te analyseren is enige kennis van de processen die spelen bij de uitvoering van een boortunnel project en probabilistisch ontwerpen een vereiste.

Op deze plaats wil ik een aantal mensen bedanken voor de steun en hulp, die ik de afgelopen maanden heb ontvangen. Ten eerste de collega's van het Projectbureau Noordelijk-Holland (in het bijzonder alle collega afstudeerders). Daarnaast natuurlijk de leden van de afstudeercommissie: de heren Vrijling, Bakker, Arends, Ruitenberg en Boerma. Extra dank ben ik verschuldigd aan Haci en David, die mij erg geholpen hebben door het ontwerpen en uitvoeren van een simulatie van het boorproces. Tenslotte vergeet ik zeker niet de hulp van mijn ouders, broer, zus, vrienden, bekenden en overige 'contactpersonen', die ieder op hun eigen wijze hebben bijgedragen aan dit resultaat.

Hierbij wens ik de lezer van dit rapport veel leesplezier.

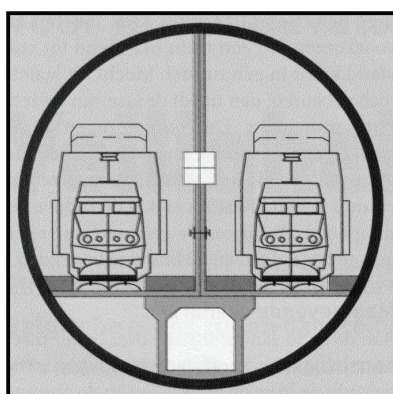
Alex van Schie

Februari 2001, Utrecht.

SAMENVATTING

De Boortunnel Groene Hart maakt deel uit van de Hogesnelheidslijn-Zuid (HSL-Zuid), dit is de hoogwaardige spoorverbinding tussen Amsterdam en de Belgische grens, die aansluit op een Europees netwerk van hogesnelheidslijnen en die in 2005 in gebruik genomen wordt. De ruim zeven kilometer lange boortunnel wordt aangelegd door het Groene Hart, tussen de plaatsen Leiderdorp en Hazerswoude-Dorp.

In 1999 is het contract voor de bouw van de tunnel getekend door de opdrachtgever (de Projectorganisatie HSL-Zuid) en de aannemer (het Frans-Nederlandse consortium Bouygues/Koop). De tunnel wordt aangelegd als een zogenaamde monotube, dat wil zeggen één grote diameter (14,5 meter) tunnel met twee rijrichtingen (zie figuur 1).



Figuur 1: Tunnel in gebruiksfase (1).

Bij de bouw van de tunnel onderscheidt men de ruwbouw en de afbouw. De ruwbouw bestaat uit de bouw van de tunnelling, de technische galerij en de zand/cement aanvulling. De afbouw houdt in het aanleggen van de betonnen vloer, de anti-ontsporingranden en de scheidingswand. Tijdens de bouw worden de ruwbouw en de afbouw tegelijk op verschillende plaatsen in de tunnel uitgevoerd. De ruwbouw vindt plaats op, of vlak achter de tunnelboormachine (TBM) en de afbouw volgt op ongeveer zeshonderd meter achter de TBM.

Het ontwerp wordt naast de geïntegreerde ruwbouw en afbouw gekenmerkt door drie vluchtschachten, die tijdens het boorproces gekruist worden. Deze schachten dienen in de gebruiksfase als ontsnaproute bij een calamiteit. Tevens worden tijdens de booractiviteiten nog twee luchtschachten aangelegd, die de functie hebben de drukgolf, die ontstaat bij het passeren van een trein, af te voeren.

Tijdens de bouw dient het logistieke systeem in de tunnel zo georganiseerd te zijn, dat de voortgang van de TBM niet beïnvloed wordt door een interactie van de verschillende bouwprocessen in de tunnel met de aanvoer van materiaal, of het op andere wijze falen van de aanvoer van materiaal naar de boormachine. Het is onbekend in hoeverre dit het geval is. Daarnaast is het niet zeker, dat de uitvoeringsmethoden, die worden toegepast bij de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart veilig zijn.

In deze studie is onderzocht wat de invloed van de logistieke processen in de tunnel is op de voortgang van de TBM en de veiligheid tijdens de bouw.

Om de invloed van de logistiek in de tunnel op de voortgang van de TBM vast te stellen is een risico analyse uitgevoerd. Zodoende kan bepaald worden welke logistieke problemen zich voor kunnen doen tijdens de bouw van de tunnel. De analyse heeft geresulteerd in een overzicht van storingen en bijzondere gebeurtenissen binnen het logistieke systeem.

De storingen ontstaan door de interactie van verschillende werkzaamheden, of door het falen van componenten van het logistieke systeem. Alle storingen hebben de eigenschap dat ze tijdelijk zijn, of eenvoudig kunnen worden verholpen door vervanging of reparatie van het element dat de storing veroorzaakt. De gevolgen van een storing worden uitgedrukt in de mogelijke vertraging van de TBM die ontstaat door de storing.

Na het kwantificeren van de storingen op basis van gegevens die bekend zijn over boortunnel projecten in Nederland is de grootte van de invloed van de storingen op het boorproces bepaald. Het blijkt dat de vertraging door logistieke storingen een significant deel van de bouwtijd uit kan maken (ongeveer 7%).

Het is van belang om tijdens de uitvoering te voorkomen dat de invloed van (de logistieke) storingen zo groot wordt, dat het halen van de geplande opleverdatum in gevaar komt.

Naast storingen zijn er zogenaamde bijzondere gebeurtenissen, met een kleine kans en grote gevolgen voor de voortgang van het project. Door deze bijzondere gebeurtenissen kunnen vertragingen optreden, die het halen van de geplande opleverdatum in gevaar brengen.

Uit de risico analyse volgt dat het maatgevende risico voor langdurige stilstand of vertraging van het boorproces een explosie of brand is.

De risico analyse geeft echter nog geen antwoord op alle vragen over de invloed van de logistieke processen op de voortgang van de tunnelboormachine. Om ook de overige vragen te beantwoorden zijn nog een aantal onderzoeken uitgevoerd.

Zonder in te gaan op de toegepaste berekeningsmethoden, is de belangrijkste conclusie van deze onderzoeken dat de voortgang van het boorproces slechts significant beïnvloed wordt door eerdergenoemde storingen van het logistieke systeem. De gevolgen van kleine afwijkingen van de geplande procestijden (door inefficiënties) en de gevolgen van alternatieve signaleringssystemen voor de geleiding van verkeer in de tunnel zijn klein.

Om de invloed van het logistieke systeem op de veiligheid in de tunnel te bepalen is een veiligheidsanalyse uitgevoerd. Daarin is gekeken naar veiligheids- en gezondheidsrisico's, die voortkomen uit het logistieke systeem.

Het is moeilijk aan te geven hoe groot de veiligheidsrisico's zijn in getallen. Wel kan worden aangegeven wat de belangrijkste aandachtspunten zijn bij de beoordeling van een veiligheidsplan.

Het grootste risico tijdens de uitvoering is brand in de tunnel. Naast brand zijn slechte klimaatomstandigheden en mechanische ongevallen de belangrijkste V & G risico-items. De ervaring leert dat mechanische ongevallen in de schacht het meest voorkomen bij een dergelijk project.

De belangrijkste aanbeveling voor de voortgang van het boorproces is dat het rendabel is om een trailer stand-by te hebben op de bouwplaats. Zodoende kan bij het (onherstelbaar) falen van een trailer de vertragingen van de TBM geminimaliseerd worden.



Een aanbeveling, die gedaan wordt om de veiligheidsrisico's te minimaliseren, is het werken aan de bewustwording van de V & G risico's tijdens de uitvoering. Dit kan concreet gedaan worden door het geven van instructies en het toezien op de naleving van de veiligheidsmaatregelen.

Tenslotte wordt aanbevolen om in een vervolg onderzoek de systeemgrenzen van dit onderzoek te verleggen en ook de mogelijke storingen van bijvoorbeeld de TBM en de scheidingsinstallatie in kaart te brengen. Zodoende krijgt men een beter beeld van de totale vertraging van het bouwproces door storingen. Deze kan vervolgens gebruikt worden om een uitspraak te doen over de betrouwbaarheid van de planning.

INHOUDSOPGAVE

| | |
|--|----------------|
| Colofon | blz. ii |
| Voorwoord | blz. iii |
| Samenvatting | blz. iv |
| 1 Inleiding | blz. 1 |
| 1.1 Hogesnelheidslijn-Zuid en Boortunnel Groene Hart | blz. 1 |
| 1.2 Probleemanalyse | blz. 4 |
| 1.3 Belang van het onderzoek | blz. 8 |
| 1.4 Beperkingen van het logistieke systeem | blz. 9 |
| 1.4.1 Randvoorwaarden van het logistieke systeem | blz. 9 |
| 1.4.2 Uitgangspunten bij het onderzoek | blz. 12 |
| 1.4.3 Aannamen bij het onderzoek | blz. 12 |
| 1.5 Structuurbeschrijving | blz. 12 |
| 2 Steeemanalyse | blz. 14 |
| 2.1 Inleiding systeemanalyse | blz. 14 |
| 2.2 Logistieke processen voor de ondersteuning van de ruwbouw | blz. 16 |
| 2.3 Logistieke processen voor de ondersteuning van de afbouw | blz. 22 |
| 2.4 Discontinuïteiten in het logistieke systeem | blz. 26 |
| 2.5 Conclusies systeemanalyse | blz. 29 |
| 3 Risico analyse Bouygues/Koop | blz. 30 |
| 3.1 Risk management plan B/K | blz. 30 |
| 3.1.1 Risico analyse | blz. 30 |
| 3.1.2 Risico controle | blz. 33 |
| 3.1.3 Risico rapportage | blz. 33 |
| 3.2 Overzicht van de grootste logistieke risico's geïdentificeerd door B/K | blz. 33 |
| 3.3 Resterende vragen over het logistieke systeem | blz. 35 |
| 4 Risico analyse HSL-Zuid | blz. 36 |
| 4.1 Overzicht van de risico's | blz. 36 |
| 4.1.1 Storingen binnen het logistieke systeem | blz. 37 |
| 4.1.2 Bijzondere gebeurtenissen binnen het logistieke systeem | blz. 38 |
| 4.2 Inleiding op 'toelichting en kwantificering risico's' | blz. 38 |
| 4.3 Toelichting op en kwantificering van de storingen | blz. 39 |
| 4.3.1 Storingen door interactie met niet aan het boorproces gekoppelde werkzaamheden | blz. 39 |
| 4.3.2 Storingen door problemen met personeel en de ploegwissel | blz. 43 |
| 4.3.3 Storingen door het falen van een component van het logistieke systeem | blz. 44 |
| 4.3.4 Storingen door problemen met veiligheid en gezondheid | blz. 51 |
| 4.3.5 Storingen door problemen met communicatie | blz. 51 |
| 4.3.6 Kwantificering van de storingen | blz. 52 |

| | |
|---|-----------------|
| 4.4 Toelichting op en kwantificering van de bijzondere gebeurtenissen | blz. 56 |
| 4.4.1 Toelichting op de bijzondere gebeurtenissen | blz. 56 |
| 4.4.2 Kwantificering van de bijzondere gebeurtenissen | blz. 61 |
| 4.5 Conclusies risico analyse | blz. 62 |
| 5 Nader onderzoek van het logistieke systeem | blz. 64 |
| 5.1 Betrouwbaarheidsanalyse; Monte Carlo simulatie met @Risk™ | blz. 64 |
| 5.1.1 Verifiëren aannamen bij berekening cyclustijden | blz. 66 |
| 5.1.2 Betrouwbaarheid van de cyclustijden bij deterministische invoer | blz. 68 |
| 5.1.2 Betrouwbaarheid van de cyclustijden bij stochastische invoer | blz. 70 |
| 5.2 Betrouwbaarheidsanalyse; simulatie met Arena 4.0 | blz. 77 |
| 5.2.1 Ontwerp van een model van de logistiek bij de Boortunnel Groene Hart | blz. 79 |
| 5.2.2 Resultaten simulatie | blz. 87 |
| 5.3 Conclusies nader onderzoek | blz. 87 |
| 6 Veiligheidsanalyse | blz. 88 |
| 6.1 Inleiding veiligheidsanalyse | blz. 88 |
| 6.2 Hoofdrisico's voor veiligheid en gezondheid | blz. 90 |
| 6.2.1 Hoofdrisico's in de startschacht | blz. 90 |
| 6.2.2 Hoofdrisico's in de tunnel | blz. 91 |
| 6.2.3 Hoofdrisico's bij de TBM | blz. 93 |
| 6.2.4 Conclusie van de V & G analyse | blz. 93 |
| 6.3 Maatregelen | blz. 93 |
| 6.3.1 Preventieve V & G maatregelen tijdens de uitvoering | blz. 94 |
| 6.3.2 Reactieve V & G maatregelen tijdens de uitvoering | blz. 94 |
| 6.3.3 Preventieve V & G maatregelen tijdens het ontwerp | blz. 95 |
| 6.4 Conclusies veiligheidsanalyse | blz. 100 |
| 7 Conclusies en aanbevelingen | blz. 101 |
| 7.1 Conclusies | blz. 101 |
| 7.2 Aanbevelingen | blz. 102 |
| Bronnen¹ | blz. 104 |
| Figuren en tabellen² | blz. 107 |

¹ Elke bronvermelding is aangeduid als een getal tussen rechte haken.

² Elke verwijzing naar de lijst met figuren en tabellen is aangeduid als een getal tussen kromme haken.

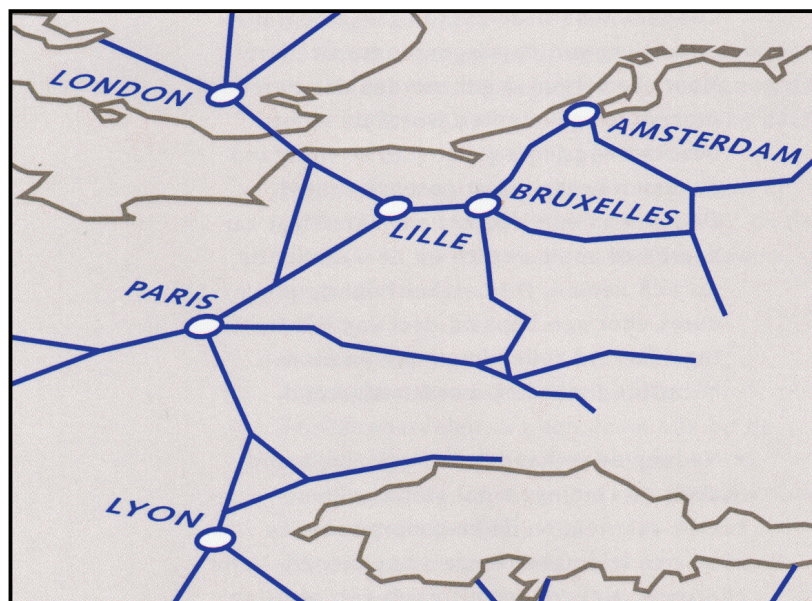
1. INLEIDING

In de vijf paragrafen waaruit deze inleiding bestaat, is aangegeven wat het doel is van dit onderzoek en wat het kader is waarbinnen het geplaatst dient te worden.

Allereerst wordt in paragraaf één enige achtergrondinformatie gegeven over het project Hogesnelheidslijn-Zuid in het algemeen en de Boortunnel Groene Hart in het bijzonder. Daarna is een analyse gemaakt van het probleem dat in deze studie wordt onderzocht, die analyse resulteert in een probleemstelling en een doelstelling. Vervolgens is aangegeven wat het belang van dit onderzoek is binnen het risicomanagement van de Projectorganisatie HSL-Zuid en ten vierde zijn de beperkingen, waarbinnen het logistieke systeem in de tunnel opereert opgesomd. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een beschrijving van de structuur van dit rapport.

§ 1.1 HOGESNELHEIDSLIJN-ZUID EN BOORTUNNEL GROENE HART

De laatste twintig jaar is de vraag naar personenvervoer in Europa explosief toegenomen, met als gevolg lange files in en rond alle grote Europese steden. Met het opheffen van de grenzen in Europa en de ontsluiting van Oost-Europa zal de vraag naar weg- en vliegverkeer sterk toe blijven nemen. Deze groei opvangen met de bestaande infrastructuur is onmogelijk en voor nog meer autowegen of uitbreiding van de luchthavens is rond de grote steden nauwelijks grond beschikbaar [23]. De oplossing voor het opvangen van de groei in mobiliteit is het aanleggen van een netwerk van hogesnelheidslijnen. Een studie naar de milieueffecten van de aanleg van een nieuw netwerk van hogesnelheidslijnen in Europa, die in 1993 is gepubliceerd, laat zien dat een dergelijk netwerk een verschuiving tussen de verschillende transportmogelijkheden zal veroorzaken.



Figuur 1.1: Een deel van het Europese netwerk van hogesnelheidslijnen (2).

Sommige studies voorspellen dat het aandeel van het treinverkeer binnen de markt van het personenvervoer toe zal nemen van 15 naar 25 procent, deze stijging zal ten koste gaan van het auto- en het vliegverkeer [25]. Het gevolg hiervan is dat de luchtvervuiling en het energiegebruik af zullen nemen en tevens het potentiële aantal verkeersslachtoffers terug zal lopen.

Ook Nederland wil aansluiting op dit Europese netwerk (zie figuur 1.1) en profiteren van de eerder genoemde voordelen en daarom is in 1997 de Planologische Kernbeslissing van de Hogesnelheidslijn-Zuid door de Eerste Kamer goedgekeurd. Een jaar later, in april 1998 is in het Tracébesluit vastgelegd langs welk traject het Nederlandse deel van de HSL Brussel-Amsterdam zal gaan lopen. In bijlage 1 is dit deel van het tracé te zien. Voor de hogesnelheidstreinen zullen stations worden aangelegd in Amsterdam, Schiphol en Rotterdam.

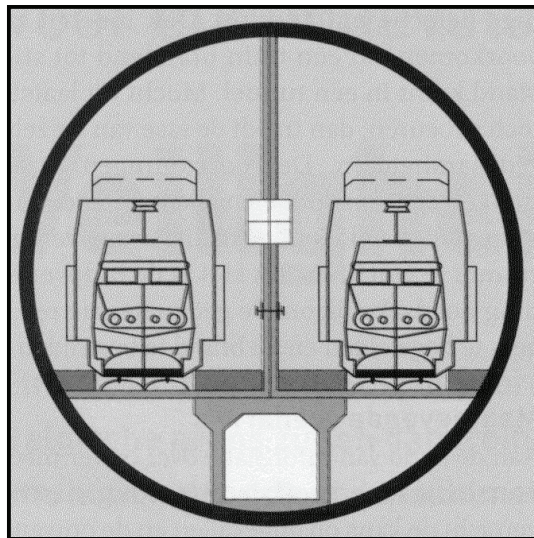
Voor de verbinding van de steden Rotterdam en Amsterdam is gekozen om het tracé aan te leggen in een zo recht mogelijke lijn, door het Groene Hart en gebundeld met rijksweg A4. Om te voorkomen dat de landschappelijke waarde van het Groene Hart wordt aangetast en hier verdergaande verstedelijking zal gaan volgen na de aanleg van de spoorlijn, is besloten om in dit gebied een tunnel aan te leggen. Voor de uitvoering is in het Tracébesluit vastgelegd dat de tunnel wordt geboord, om ook de hinder tijdens de bouw tot een minimum te beperken. De lengte van het deeltracé tussen Leiderdorp en Hazerswoude-Dorp dat geboord wordt, is ruim 7 kilometer en is te zien in figuur 1.2.



Figuur 1.2: Tracé Boortunnel Groene Hart (3).

Tot zover de besluitvorming die vooraf is gegaan aan de keuze voor een boortunnel door het Groene Hart, nu volgt een beschrijving van de totstandkoming van het uiteindelijke ontwerp en een beschrijving van dit ontwerp.

In augustus 1998 is de aanbestedingsprocedure van de Boortunnel Groene Hart gestart op basis van een Design & Construct contract. De opdrachtgever van dit project is de Projectorganisatie HSL-Zuid, Projectbureau Noordelijk-Holland (afdeling Boortunnel Groene Hart), deze bestaat uit medewerkers van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, de Bouwdienst Rijkswaterstaat en regionale directie Zuid-Holland, DHV, Holland Railconsult en NS Railinfrabeheer. De projectorganisatie is verantwoordelijk voor de voorbereiding en begeleiding van het ontwerp en de uitvoering van de boortunnel, die in het tracé van de HSL-Zuid is opgenomen. De ontwerpen, die door de verschillende aannemerscombinaties zijn ingediend na de aanbesteding, zijn gemaakt op basis van het programma van eisen dat door de projectorganisatie is opgesteld. Het contract voor de boortunnel is in december 1999 gegund aan het Frans-Nederlandse consortium Bouygues SA/Beheer Koop Tjuchem BV. Het ontwerp van deze aannemerscombinatie is in tegenstelling tot het referentieontwerp een enkele buis met grote diameter (een monotube), zie figuur 1.3.



Figuur 1.3: Doorsnede van de Boortunnel Groene Hart in de gebruiksfase (4).

Om een beeld te geven van enkele specifieke kenmerken van het ontwerp zijn in de bijlagen 2 en 3 een tekening van het lengteprofiel en een artist impression van de tunnel opgenomen.

Uit het lengteprofiel blijkt dat de tunnel wordt aangelegd op grote diepte, van maximaal NAP -36 meter (de hoogte van het maaiveld is op sommige plaatsen minder dan NAP -4 meter). Dit is een gevolg van het feit dat tijdens het boren een minimale dekking vereist is. Maatgevend voor de berekening van die dekking is een situatie waarbij het boorfront onder luchtdruk wordt gezet. De dikte van het grondpakket dat nodig is om evenwicht te maken met de luchtdruk in het boorfront is afhankelijk van de diameter van de tunnel en het gewicht van de grond boven de tunnel. Bij de Boortunnel Groene Hart is de uitwendige diameter van de ringen 14,5 meter en bestaat de grond

voor een deel uit slappe veenlagen, met een laag gewicht en is de dekking dus relatief groot (soms zelfs meer dan éénmaal de diameter van de boormachine).

Aan het alignment valt tevens op dat er op de benodigde diepte vrijwel horizontaal geboord wordt. De minimale hellingen die in het ontwerp zijn toegepast zijn nodig voor de afwatering en lopen met een helling van 0,129 % omhoog, dan wel omlaag.

Figuur 1.3 laat zien hoe de tunnel er in de gebruiksfase uit ziet. Aan beide zijden van het spoor worden vlucht- en inspectiepaden aangebracht en in de scheidingswand zijn om de 150 meter deuren geplaatst. Als er in één helft van de tunnel een calamiteit voordoet, kunnen mensen door deze deuren vluchten naar de andere helft.

Op drie plaatsen zijn vluchtschachten opgenomen, om het vluchten naar het maaiveld in geval van een calamiteit mogelijk te maken. In het lengteprofiel (bijlage 2) is te zien waar deze vluchtschachten worden aangelegd, dat is op een h.o.h. afstand van ongeveer twee kilometer.

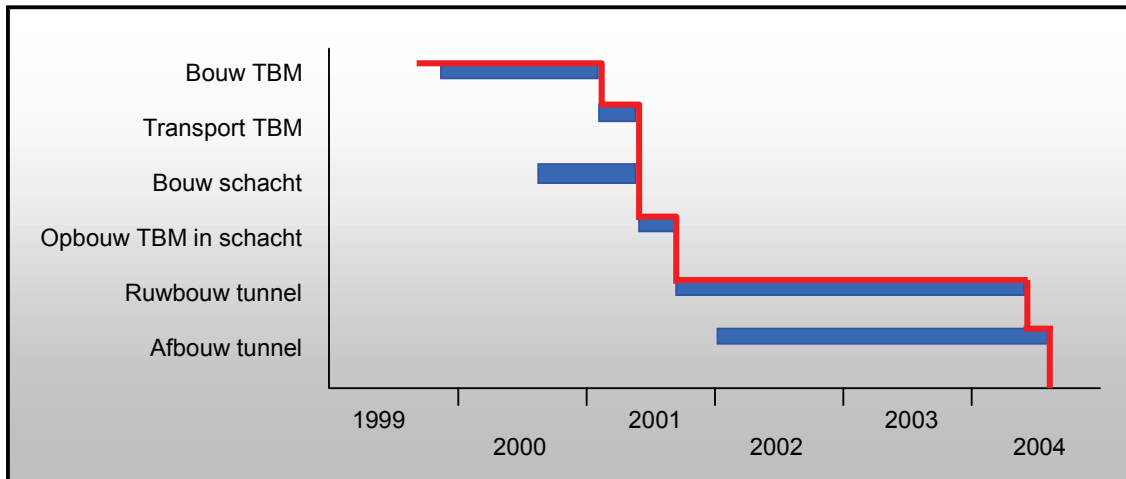
In de loop van het rapport komen andere aspecten van het ontwerp, zoals de terreininrichting, de startschacht, de tunnelboormachine en de luchtschachten aan de orde. Delen van het ontwerp die totaal geen invloed hebben op het logistieke systeem in de tunnel tijdens de uitvoering worden echter buiten beschouwing gelaten.

§ 1.2 PROBLEEMANALYSE

Het 8620 meter lange tracé (tunnel inclusief toerritten) van de Boortunnel Groene Hart maakt deel uit van de Hogesnelheidslijn-Zuid, die bij de Nederlands-Belgische grens wordt aangesloten op een spoorlijn richting Antwerpen. Door deze aansluiting wordt de HSL gekoppeld aan een Europees netwerk, dat directe verbindingen met o.a. Parijs, Londen en Zuid-Frankrijk mogelijk maakt. De spoorlijn wordt eind 2005 in gebruik genomen.

Binnen het HSL project behoort de boortunnel tot de grootste kunstwerken die aangelegd worden. De uitvoering van dit project zal veel tijd in beslag nemen en is om die reden kritisch voor het op tijd op gereed komen van de HSL-Zuid.

De start van de uitvoering van het project Boortunnel Groene Hart is eigenlijk al begonnen voor de ondertekening van het contract met Bouygues/Koop (B/K). In de planning van dit consortium is één van de kritieke onderdelen van de uitvoering de bouw van de tunnelboormachine (TBM). Daar is om die reden in november 1999 al een start mee gemaakt, terwijl het contract pas eind december 1999 is ondertekend. In de planning van de aannemerscombinatie wordt het kritieke pad, naast de bouw van de TBM, gevormd door de aanleg van de startschacht en vervolgens de aanleg van de boortunnel (zie figuur 1.4).



Figuur 1.4: Kritieke pad bij de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart.

De duur van het boorproces is bepaald op basis van een gemiddelde boorsnelheid van 8,8 meter per dag. Als deze niet gehaald wordt, zullen er vertragingen zijn bij de oplevering van de ruwbouw, die december 2004 gepland is. Het gevolg hiervan is dat het totale HSL project niet op tijd opgeleverd kan worden. Dit leidt tot een boete voor de Nederlandse overheid, die in een overeenkomst met België is vastgesteld. De hoogte van deze boete is afhankelijk van de duur van de vertraging.

Bij de berekende gemiddelde boorsnelheid van 8,8 meter per dag [15] is rekening gehouden met vertragingen ten opzichte van de maximale voortgang van 17,0 meter per dag. De gedetailleerde berekening van de boorsnelheden is terug te vinden in bijlage 4. Hier volgen in het kort de belangrijkste resultaten van die berekening:

De maximale voortgangssnelheid van de boormachine is 17,0 meter per dag.

De normale voortgangssnelheid van de boormachine is 11,0 meter per dag.

Bij de berekening van de normale voortgangssnelheid is rekening gehouden met vertragingen als gevolg van:

- zwaar onderhoud,
- mechanische storingen,
- de grondgesteldheid,
- 75 % efficiency.

De gemiddelde voortgangssnelheid van de boormachine is 8,8 meter per dag.

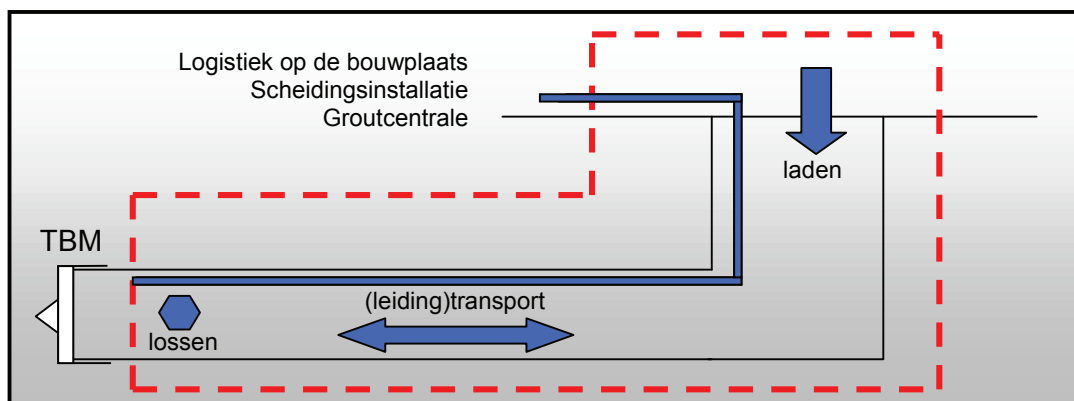
Bij de berekening van de gemiddelde voortgangssnelheid is rekening gehouden met vertragingen als gevolg van:

- de leercurve,
- kruisingen van de vluchtschachten,
- de grondgesteldheid,
- zware storing.

De grootte van deze vertragingen is voornamelijk bepaald op basis van ervaringen bij soortgelijke projecten. In het geval van Bouygues is dat de uitvoering van de Sydney Airport Link en de Caïro Metro.

Het is interessant om vooraf te bekijken of de voorspelde/berekende voortgang, die bepaald is op basis van deze ervaringen haalbaar is.

In deze scriptie worden niet alle mechanismen die kunnen leiden tot vertraging onderzocht, maar wordt speciaal gekeken naar de vertragingen die het gevolg zijn van het falen van **de logistiek in de tunnel tijdens de uitvoering**. De vertragingen, die het gevolg zijn van problemen met installaties (zoals de betoncentrale en de scheidingsinstallatie), werkzaamheden op de bouwplaats en het falen van de tunnelboormachine vallen hier buiten (zie figuur 1.5).



Figuur 1.5: Systeemgrens van dit onderzoek; de logistiek in de tunnel tijdens het boorproces.

Onder 'de logistiek' vallen alle stromen van materieel, materiaal en mensen, die nodig zijn voor de ondersteuning van het bouwproces. Het belang van een goede organisatie van de logistieke processen bij de aanleg van een boortunnel blijkt wel uit de informatie van NFM technologies [20] (het Franse bedrijf dat als onderaannemer van Bouygues de bouw van de TBM uitvoert). Zij noemen vier categorieën van gebeurtenissen die gevolgen hebben voor de betrouwbaarheid en de veiligheid van het boorproces, logistieke problemen is hier één van.

De overige drie zijn:

- Moeilijke booromstandigheden (zoals instabiliteiten aan het boorfront,...),
- Het falen van onderdelen van de TBM,
- Speciale omstandigheden (zoals brand,...).

Bij de berekening van de boorsnelheid zijn vertragingen als gevolg van het falen van het logistieke systeem als het goed is al opgenomen. Dit is echter gebeurd op basis van ervaringen bij andere projecten en niet na een specifieke studie op dit gebied.

De logistieke processen in de tunnel tijdens de aanleg van de Boortunnel Groene Hart verdienen extra aandacht, omdat de ruwbouw en de afbouw tegelijk plaatsvinden en de totale lengte van de tunnel met ruim zeven kilometer aanzienlijk is. Bij veel boortunnel projecten wordt eerst over de gehele lengte de lining aangebracht en wordt daarna gestart met de afbouw. Bij de geboorde tunnel onder het Groene Hart wordt op verschillende plaatsen in de tunnel gewerkt aan de afbouw. De aan- en afvoer van materiaal en mensen voor de afbouw heeft ongetwijfeld invloed op het verloop van de logistieke processen voor de ruwbouw. Het is echter onzeker of deze interactie negatieve gevolgen heeft op het verloop van het boorproces.

In bijlage 5 is in fasen te zien welke delen van de tunnel worden gebouwd.

Door de complexiteit van het logistieke systeem bij de Boortunnel Groene Hart is het goed mogelijk dat er ook een grotere kans is op vertragingen bij de uitvoering als gevolg van de logistiek, dan bij andere boortunnel projecten. Of dit daadwerkelijk het geval is, is vooraf moeilijk te bepalen. Mocht het zo zijn dat op basis van dit onderzoek blijkt dat de kans op vertragingen als gevolg van het falen van de logistiek groot is, dan kunnen mogelijke aanpassingen van het ontwerp worden onderzocht.

Naast het verstoren van de voortgang van de TBM kunnen door een gebrekkig logistiek systeem gevaarlijke situaties ontstaan bij de bouw van de tunnel. Dit kan invloed hebben op de veiligheid van mensen die bij de aanleg van de tunnel betrokken zijn, of kan leiden tot beschadigingen aan de tunnel of de tunnelboormachine.

Probleemstelling

De probleemstelling bestaat uit twee delen:

1. De kennis omtrent de invloed van de logistiek in de tunnel op de voortgang van de TBM bij de Boortunnel Groene Hart is te beperkt om te kunnen bepalen of de risico's voor vertragingen a.g.v. de logistiek geaccepteerd kunnen worden.
2. Het is onbekend of de door Bouygues/Koop voorgestelde uitvoeringsmethoden voor de bouw van de tunnel veilig zijn voor mensen in de tunnel.

Doelstelling

De doelstelling van deze studie is onderzoeken of de door B/K voorgestelde uitvoeringsmethoden voor de Boortunnel Groene Hart veilig zijn en of de te verwachten vertragingen als gevolg van (falen van) het logistieke systeem acceptabel zijn.

Mocht dit niet zo zijn, dan worden aanbevelingen gedaan om enerzijds de veiligheid tijdens het boren te verbeteren en anderzijds de kans op vertragingen als gevolg van het falen van logistieke processen te verkleinen.

Nevendoelstellingen:

- Inzicht verschaffen in de logistieke processen in de tunnel, die invloed hebben op het boorproces bij de Boortunnel Groene Hart.
- Het maken van een simulatie, die inzicht geeft in het verloop van de transporten tijdens de bouw van de tunnel.

Nota Bene:

Dit onderzoek zou deel uit kunnen maken van een studie naar alle componenten van het project, die direct invloed hebben op de voortgang van de boormachine. Na een dergelijke studie kan een uitspraak gedaan worden over de 'haalbaarheid' van de planning.

Omschrijving van het onderzoek

Het onderzoek is verdeeld in vier verschillende fasen, deze zijn:

1. De systeemanalyse
 - Het beschrijven van de door de aannemerscombinatie voorgestelde logistieke uitvoeringsmethoden bij de bouw van de Boortunnel Groene Hart.
2. De risicoanalyse
 - Het identificeren van de logistieke problemen, die de voortgang van het project negatief kunnen beïnvloeden.
 - Het kwantificeren van de vertragingen, die (kunnen) optreden als gevolg van het falen van het logistieke systeem.
 - Het analyseren van de betrouwbaarheid van het door B/K gemaakte ontwerp.
 - Het maken van een computersimulatie van de transportprocessen tijdens de uitvoering.
3. De veiligheidsanalyse
 - Het analyseren van de onveilige situaties, die kunnen ontstaan bij de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart.
 - Onderzoeken wat de belangrijkste veiligheidsmaatregelen zijn, die tijdens de ontwerp- en uitvoeringsfase genomen kunnen worden.
4. De conclusies en aanbevelingen
 - De belangrijkste resultaten van de risico analyse en de veiligheidsanalyse aangegeven.

§ 1.3 BELANG VAN HET ONDERZOEK

Vanaf het moment dat het Design & Construct contract door de aannemer (Bouygues/Koop) en de opdrachtgever (Projectorganisatie HSL-Zuid) is getekend, is de aannemer verantwoordelijk voor het ontwerp en de uitvoering. Het is niet zo dat de opdrachtgever zich vanaf dat moment niet meer met het ontwerp bemoeit, maar het is ook niet zo dat elk detail van het ontwerp getoetst wordt. De filosofie binnen de projectorganisatie HSL-Zuid is dat er getoetst wordt op hoofdrisico's en op het kwaliteitsborgingproces van de aannemer. De reden dat de HSL-Zuid bij het ontwerp betrokken blijft, is dat de opdrachtgever verantwoordelijk is voor het op tijd opleveren van de tunnel en voor de kwaliteit van het eindproduct. De boortunnel maakt deel uit van een groter geheel (de HSL-Zuid) en mag de oplevering van dit totale project niet vertragen. De beheerder van in dit geval de boortunnel wil daarnaast zekerheid dat de kwaliteit en de duurzaamheid van het eindproduct goed zijn, om grote onderhoudskosten en andere problemen tijdens de exploitatie te voorkomen.

Het toetsen van de kwaliteitsborging tijdens het ontwerp bij de aannemer vindt plaats door interviews (zogenaamde audits) te houden met de betrokken werknemers van Bouygues. Uit deze audits moet blijken of de aannemer de procedures volgt die in zijn kwaliteitshandboek zijn beschreven. Het volgen van de juiste procedures leidt uiteindelijk tot een kwalitatief goed ontwerp.

Het Projectbureau Noordelijk-Holland (afdeling Boortunnel Groene Hart) toetst de hoofdrisico's tijdens de uitvoering door zelf gedetailleerde analyses te maken van bepaalde deelontwerpen en deze te vergelijken met de risicoanalyses van de aannemer. In het geval dat de conclusies van beide analyses niet overeenkomen wordt de analyse van de opdrachtgever gebruikt om het ontwerp te optimaliseren.

Eén van de hoofdrisico's voor een te late oplevering van de boortunnel is het niet halen van de geplande gemiddelde boorsnelheid. In hoeverre dit het gevolg kan zijn van problemen bij de logistiek wordt in deze studie onderzocht.

§ 1.4 BEPERKINGEN VAN HET LOGISTIEKE SYSTEEM

De beperkingen zijn onder te verdelen in randvoorwaarden, uitgangspunten en aannamen [12], deze geven de grenzen aan waarbinnen het onderzoek wordt uitgevoerd.

§ 1.4.1 Randvoorwaarden van het logistieke systeem

Randvoorwaarden zijn beperkingen van de oplossingsruimte, die door vastgelegde externe factoren worden opgelegd [12]. De aard van de randvoorwaarden is verschillend en ze worden daarom ook in verschillende categorieën ingedeeld, de belangrijkste zijn: juridische, uitvoeringstechnische, technisch-constructieve, natuurlijke en financiële randvoorwaarden.

Hier volgen de belangrijkste randvoorwaarden voor het ontwerp van het logistieke systeem bij de Boortunnel Groene Hart, ingedeeld in deze categorieën.

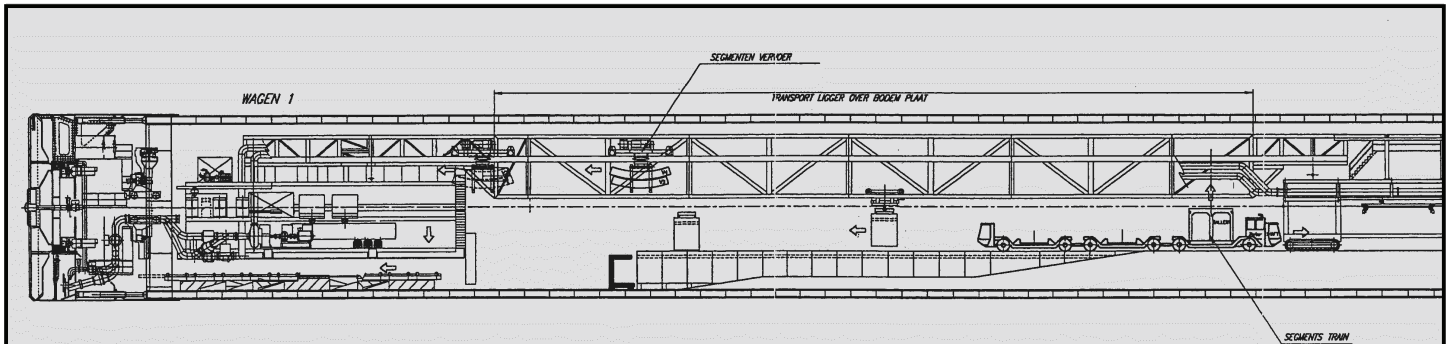
Technisch-constructieve randvoorwaarden

Het logistieke systeem in de tunnel is één van de componenten, die deel uit maken van het boorproces. Het boorproces wordt gekarakteriseerd door een serieschakeling van componenten. De componenten, die een raakvlak hebben met de logistiek in de tunnel zijn: de tunnelboormachine, de scheidingsinstallatie, de aanvoer van materiaal naar de bouwplaats en de energievoorziening.

De TBM en de volgwagens

De belangrijkste randvoorwaarde voor het logistieke systeem is de TBM, deze bepaalt de voortgangssnelheid en daarmee de hoeveelheid materiaal die per tijdseenheid aangevoerd dient te worden. Daarnaast worden op de volgwagens de leidingen verlengd waarmee de bentoniet (vermengd met afgegraven grond) wordt afgevoerd. Tevens bepaalt de loscapaciteit van de TBM voor een belangrijk deel de cyclustijden van het logistieke systeem. Het belang van de cyclustijden komt in hoofdstuk 3 ter sprake.

Aangezien bij de aanleg van de Boortunnel Groene Hart de ruwbouw en de afbouw geïntegreerd zijn, wordt gebruik gemaakt van een speciale, lange hydroschild boormachine. De totale lengte van deze TBM en de twee volgwapens (zie figuur 1.6) is 120 meter.



Figuur 1.6: TBM en volgwapens (5).

De eerste volgwagon rijdt aan de binnenzijde van de tunnelwand en de tweede volgwagon rijdt op de zand/cement stabilisatie. Tussen het rijvlak van de twee volgwapens is een hoogteverschil van ruim drie meter, dat wordt overbrugd door een 60 meter lange ligger. Over deze ligger lopen twee kranen (trolleys), die worden gebruikt voor het lossen van de tunnel segmenten, de kabelkoker elementen en de bakken met grout.

Op de tweede volgwagon bevinden zich flexibele leidingen, die verbonden zijn met vaste leidingen, die aan de tunnelwand zijn bevestigd. Bij het verlengen van leidingen wordt de flexibele leiding losgekoppeld, wordt de vaste leiding verlengd en wordt tenslotte de flexibele leiding weer bevestigd.

Achter de tweede volgwagon is voldoende ruimte voor de tijdelijke opslag van materiaal en het parkeren van materieel of transportvoertuigen.

De scheidingsinstallatie

De installatie, die op maaiveld is geplaatst voor de scheiding van de ontgraven grond en de bentoniet slurry, vormt een andere cruciale component van het seriesysteem, dat bij het boorproces opereert. Als deze installatie uitvalt kan geen afgegraven grond worden gescheiden. Om te voorkomen dat bij iedere storing de afvoer van slurry en dus de voortgang van de TBM stil ligt, kan een buffer worden ingebouwd in de vorm van een slurrybekken.

De scheidingsinstallatie kan dan echter nog niet los van de overige componenten worden gezien, omdat bij langdurige onbeschikbaarheid ook de buffers vol raken.

De aanvoer van materiaal naar de bouwplaats

In deze studie wordt slechts een analyse gemaakt van de logistiek in de tunnel tijdens de uitvoering, om die reden is de aanvoer van materiaal naar de bouwplaats dus ook een belangrijke randvoorwaarde. Door het vormen van voorraden op de bouwplaats, kan een buffer gecreëerd worden, zodat kleine storingen in de aanvoer kunnen worden opgevangen.

Tijdens de uitvoering wordt bijvoorbeeld een voorraad segmenten gevormd, die voldoende is om de voortgang van één week boren op te vangen. De segmenten worden in België geproduceerd en er is dus een risico dat de aanvoer langer dan een

week stil komt te liggen (denk aan recente blokkades als protest tegen de stijging van de dieselprijzen).

De energievoorziening

Om verschillende installaties tijdens de uitvoering aan de gang te houden zijn grote hoeveelheden energie (voornamelijk in de vorm van elektriciteit en diesel) nodig. Voor deze voorziening geldt tevens dat het mogelijk is kleine problemen op te vangen, door het plaatsen van aggregaten en voorraden. Bij langdurige storingen kunnen er echter problemen voor de voortgang van het project ontstaan.

Naast de randvoorwaarden, die voortkomen uit het boorproces zijn er tevens randvoorwaarden die voortkomen uit het gemaakte ontwerp, de belangrijkste zijn: het liningontwerp, het tunnelontwerp en de afmetingen van de startschacht.

Het liningontwerp

Het liningontwerp (de diameter van de tunnel, het type ring en het aantal segmenten per ring) bepaalt mede de beschikbare ruimte in de tunnel, de laad- en lostijden en de volgorde van het laden en lossen van de segmenten.

De ringen van de Boortunnel Groene Hart hebben een inwendige diameter van 13,3 meter en een uitwendige diameter van 14,5 meter. De potentiële beschikbare ruimte in de tunnel is dus groot.

Er wordt één type taps toelopende ring (een uni-ring), bestaande uit 10 segmenten met een breedte van 2 meter, toegepast die onder verschillende hoeken wordt ingebouwd (sluitsteen zowel onder als boven). Het voordeel hiervan is dat elke ring die aangevoerd wordt ook ingebouwd kan worden, wat bij een ontwerp met linkse en rechtse ringen niet het geval is.

Het tunnelontwerp

Uit het tunnelontwerp (zie bijlage 2) komt onder andere de interactie tussen de logistiek in de tunnel en de aanleg van de (v)luchtschachten voort. Daarnaast bepalen de lengte van de tunnel (het geboorde deel is 7160 lang) en het feit dat alleen de startschacht gebruikt wordt voor het laden van materiaal voor een deel de transporttijden.

De afmetingen van de startschacht

De startschacht (zie bijlage 6) bepaalt in de beginfase van het boorproces de beschikbare ruimte voor het laden van trailers. De startschacht is gedimensioneerd met als belangrijkste eis dat de TBM erin opgebouwd dient te worden voor de start van het boorproces. Tijdens de bouwfase dient deze schacht ingericht te worden voor het laden van trailers en de benodigde ondersteunende werkzaamheden.

Uitvoeringstechnische randvoorwaarden

Binnen de technisch-constructieve randvoorwaarden van dit project is een zo effectief en functioneel mogelijke oplossing gezocht voor het organiseren van de uitvoering. Dit heeft geresulteerd in een inrichting van de bouwplaats en de startschacht en een planning van de verschillende werkzaamheden.

De inrichting van de bouwplaats tijdens het boorproces

In het ontwerp van B/K voor de inrichting van de bouwplaats (bijlage 7) is o.a. een betoncentrale, een segmentopslag, een scheidingsinstallatie en een ketenpark voorzien.

De inrichting van de startschacht

Tijdens de uitvoering heeft de indeling van de startschacht veel invloed op de efficiëntie en de veiligheid van de werkzaamheden, die op deze kleine ruimte worden uitgevoerd. Het ontwerp is echter nog onbekend, in hoofdstuk 6 worden twee varianten voor de inrichting vergeleken, waaruit uiteindelijk een keuze is gemaakt.

De planning van de werkzaamheden

In bijlage 8 is de planning van de werkzaamheden voor de aanleg van de Boortunnel Groene Hart opgenomen.

§ 1.4.2 Uitgangspunten bij het onderzoek

Uitgangspunten zijn uitdrukkelijk geformuleerde beperkingen van de oplossingsruimte op grond van beargumenteerde afspraken van de ontwerper [12]. Deze zijn niet in verschillende categorieën onderverdeeld. Het belangrijkste uitgangspunt heeft betrekking op dit onderzoek en niet zo zeer op het ontwerp van het logistieke systeem.

Bij deze analyse van het logistieke systeem in de tunnel bij de aanleg van de Boortunnel Groene Hart is gebruik gemaakt van ontwerpdocumenten, die voor 1 november 2000 door B/K zijn ingediend bij de Projectorganisatie HSL-Zuid (afdeling Boortunnel Groene Hart).

§ 1.4.3 Aannamen bij het onderzoek

Aannamen zijn beperkingen van de oplosruimte, op grond van met randvoorwaarden overeenkomende, externe factoren die als gevolg van gebrek aan informatie of mogelijkheid tot onderzoek, in het onderzoek slechts voorlopig als vaststaand worden aangenomen [12].

Alle aannamen die tijdens het onderzoek zijn gedaan, zijn opgenomen in de tekst, of in bijlagen waar in de tekst naar verwezen is.

§ 1.5 STRUCTUURBESCHRIJVING

In deze structuurbeschrijving is in het kort aangegeven voor welke groepen lezers de verschillende hoofdstukken van dit eindrapport bedoeld zijn.

Het doorlezen van de systeemanalyse (hoofdstuk 2) is een minimale vereiste voor diegene die niet of onvoldoende bekend zijn met de het ontwerp en de uitvoeringsmethoden die zijn gekozen voor de aanleg van de Boortunnel Groene Hart.



Hoofdstuk 3 geeft kort de door Bouygues/Koop uitgevoerde risico analyse en de resultaten daarvan weer.

In de hoofdstukken 4 en 5 zijn de uitgevoerde risico analyse en het nader onderzoek beschreven. Voor een goed begrip van de onderzoeksmethoden, die bij deze analyses zijn toegepast is enige kennis van probabilistisch ontwerpen (zoals de Monte Carlo methode en het begrip stochastische verdeling) een vereiste.

Hoofdstuk 6 is gewijd aan de veiligheidsanalyse, dit deel van het rapport kan voor diegene die bekend zijn met het ontwerp in principe los van de overige hoofdstukken worden gelezen.

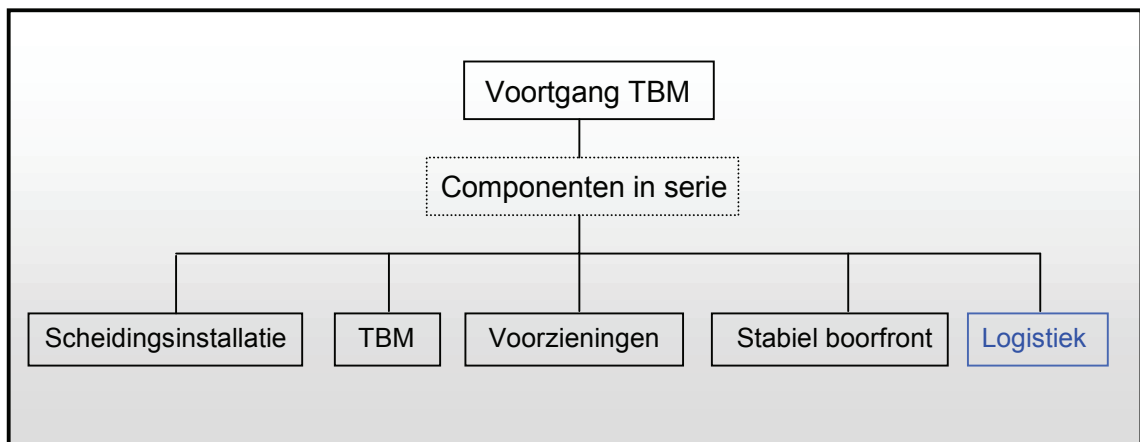
De conclusies en aanbevelingen, die in hoofdstuk 7 zijn beschreven geven antwoord op de probleemstelling en de doelstellingen, die in paragraaf 1.2 zijn geponeerd.

2. SYSTEEMANALYSE

Het eerste deel van deze studie is de systeemanalyse, die bestaat uit vijf delen: een inleiding, een beschrijving van de ruwbouw, een beschrijving van de afbouw, een opsomming van de discontinuïteiten in het logistieke systeem en de conclusies. Dit hoofdstuk is geschreven na bestudering van het document “Preliminary methodes for Logistics in Tunnel” [17] en informatie van twee ingenieurs van Bouygues, te weten: Jean-Philippe Mathieu en Bruno Combe.

§ 2.1 INLEIDING SYSTEEMANALYSE

Bij de aanleg van de Boortunnel Groene Hart wordt gebruik gemaakt van een hydroschild tunnelboormachine (TBM). Om het boorproces met een dergelijke machine goed te laten verlopen zijn er een aantal installaties, voorzieningen en deelsystemen (samen componenten genoemd) nodig ter ondersteuning. Het falen van één of meerdere van deze componenten van het boorproces heeft stilstand van de TBM tot gevolg [3]. Gezien het seriematig karakter van de verschillende componenten (zie figuur 2.1), geeft inzicht in de faalkans van deze componenten een beeld van de faalkans van het totale boorproces.



Figuur 2.1: Processchema voor tunnelbouw.

De genoemde componenten bestaan elk uit verschillende onderdelen, waarvan hier een aantal worden genoemd.

Scheidingsinstallatie: (druk)zeven, cyclonen en pompen.

TBM: schild, graafwiel, erector, vijzels en op de volgwagens: pompen, (flexibele) leidingen en transformatoren.

Voorzieningen: water, elektriciteit en brandstof.

Als gezegd wordt in deze studie slechts van één van deze componenten, de logistiek, een analyse gemaakt. De eerste vraag die dan aan de orde komt is: wat is logistiek? Het antwoord hierop is niet eenduidig, want logistiek is een ruim begrip en kan verschillende zaken omvatten.

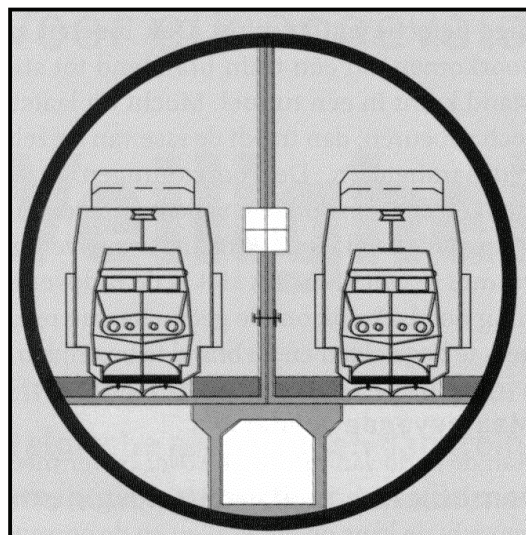
In “Van Dale Groot Woordenboek der Nederlandse Taal” staat:

logistiek (v.; g.mv.) [<Fr. *logistique*, van *logis* (onderdak (d.w.z. van soldaten))],
1.(thans w.g.) wetenschap van de deductie, geformaliseerde of mathematische logica;
2.(mil.) alle voorbereidingen en handelingen die nodig zijn om de troepen op de meest doeltreffende wijze van goederen en voorraden te voorzien en onder de gunstigste omstandigheden te doen strijden; - deze voorziening zelf;
3.beheersingsproces van goederenbewegingen.

De derde omschrijving uit dit woordenboek sluit het best aan bij wat door de betrokken partijen bij de aanleg van de Boortunnel Groene Hart wordt aangeduid als de logistiek. Een andere omschrijving die vaak gebruikt wordt om logistiek te omschrijven (en die ook het best bij dit project van toepassing is) is: het organiseren, controleren en beheersen van de aan- en afvoer van materieel, materiaal en mensen.

Bij een groot project als een grote diameter boortunnel is gedurende vele maanden (of zelfs jaren) sprake van aanvoer van bouwmaterialen en machines en afvoer van restmateriaal. Het is onmogelijk om in dit onderzoek al deze transportstromen gedetailleerd te analyseren en daarom is slechts een deel van het logistieke systeem van dit project bestudeerd.

Op verzoek van de opdrachtgever is een studie gemaakt van de logistiek **in de tunnel tijdens het boorproces**. Dit deelsysteem kan goed los van de overige logistieke deelsystemen (zoals de aanvoer naar de bouwplaats) bekeken worden, omdat het door goede voorraadbeheersing mogelijk is het logistieke systeem in de tunnel door te zetten als de aanvoer van buitenaf tijdelijk stil ligt. De logistiek in de tunnel heeft ook het meest direct invloed op de voortgang van de boormachine.



Figuur 2.2: Doorsnede van de Boortunnel Groene Hart in de gebruiksfase (6).

In het ontwerp van deze tunnel (zie figuur 2.2) is meegenomen dat de aanleg van de tunnelling en de afbouw (de aanleg van de kabelkoker, de stabilisatie en het inwendige betonwerk) tegelijk worden uitgevoerd, zodat de bouwtijd behoorlijk verkort wordt. Met die reden is een speciale TBM ontworpen en is ook het logistieke systeem aangepast, met name het transportproces wijkt af van dat bij vele andere boortunnelprojecten.

Vanaf nu worden alle materiaaltransporten, die direct invloed hebben op de voortgang van de TBM aangeduid als ruwbouw transporten en de materiaaltransporten, die nodig zijn voor de ondersteuning van de uitvoering van het inwendig betonwerk als afbouw transporten. In de twee volgende paragrafen worden achtereenvolgens de ruwbouw en de afbouw beschreven. Vervolgens wordt aangegeven wat de discontinuïteiten van het logistieke systeem zijn.

Het proces van de ruwbouw en de afbouw is vergelijkbaar en daarom is het onvermijdelijk, dat bij de beschrijving van de processen bepaalde zaken meerdere malen ter sprake komen.

§ 2.2 LOGISTIEKE PROCESSEN VOOR DE ONDERSTEUNING VAN DE RUWBOUW

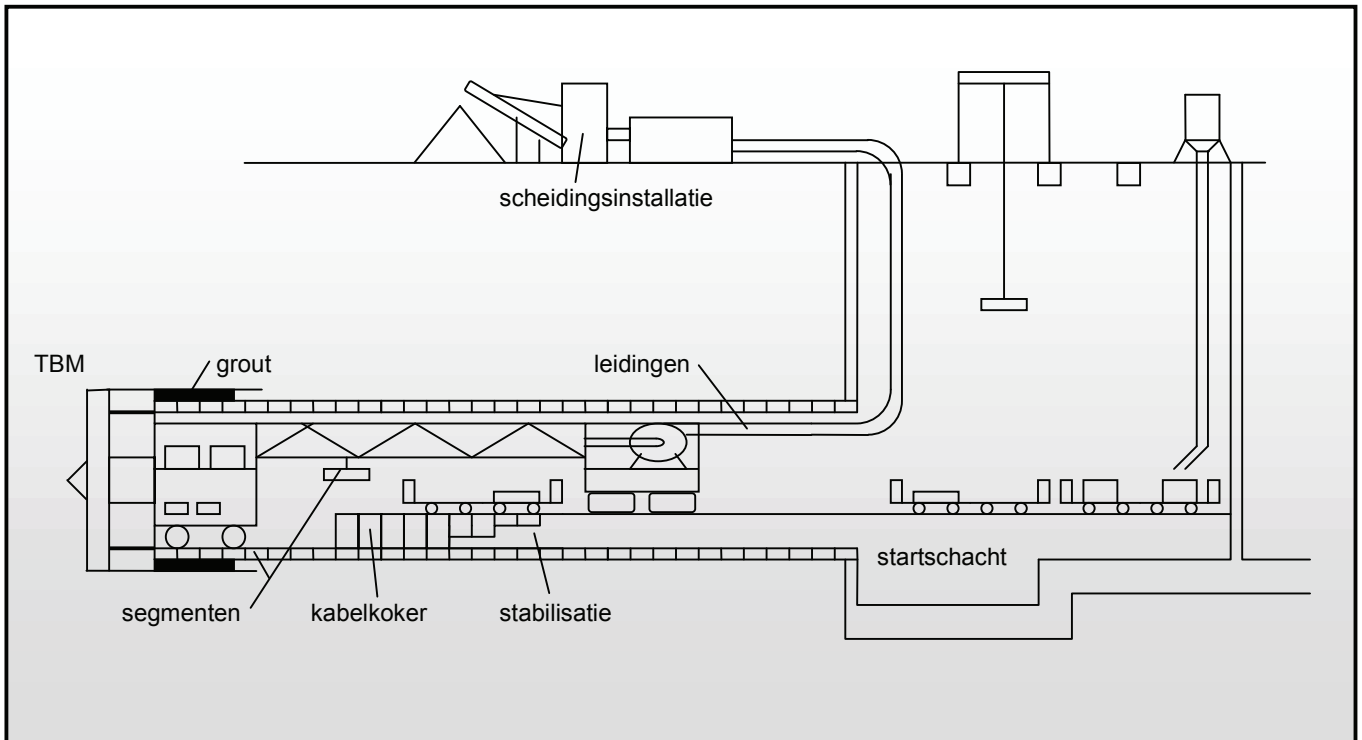
Een deel van de logistieke stromen in de tunnel (de ruwbouw) heeft een directe link met de TBM; de voortgang van de machine bepaald namelijk de frequentie van deze stromen en de juiste aanvoer van materiaal, maakt (onder andere) deze voortgang mogelijk.

Ruwbouwcycli

Daar de transporten voor de aanvoer van (ruwbouw)materiaal naar de TBM met een zekere regelmaat terugkeren worden dit de ruwbouwcycli genoemd. De cycli gaan 6 dagen per week en 52 weken per jaar door. De hoogste frequentie van het terugkeren van ruwbouwcycli treedt op als de voortgang van de TBM maximaal is, voor de machine die toegepast wordt is dit 17,0 meter per dag. Dit is de maximale voortgang die gehaald kan worden als gewerkt wordt met twee ploegen, die 10 uur per dag werken. De berekening van de maximale en de gemiddelde boorsnelheid is opgenomen in bijlage 4. Uit deze berekening volgt dat de voortgang in principe sneller kan, maar voor een langere periode wordt toch een gemiddelde voortgang van 17,0 meter per dag aangehouden voor het ontwerp.

De ruwbouwcycli die aan bod komen, hebben betrekking op:

- Het transport van segmenten,
- Het transport van kabelkoker elementen,
- Het transport van de zand/cement stabilisatie,
- Het transport van grout,
- Het transport van overig materiaal (zoals folie dat wordt aangebracht over de ringvoegen) en verlengstukken voor het leidingtransport.



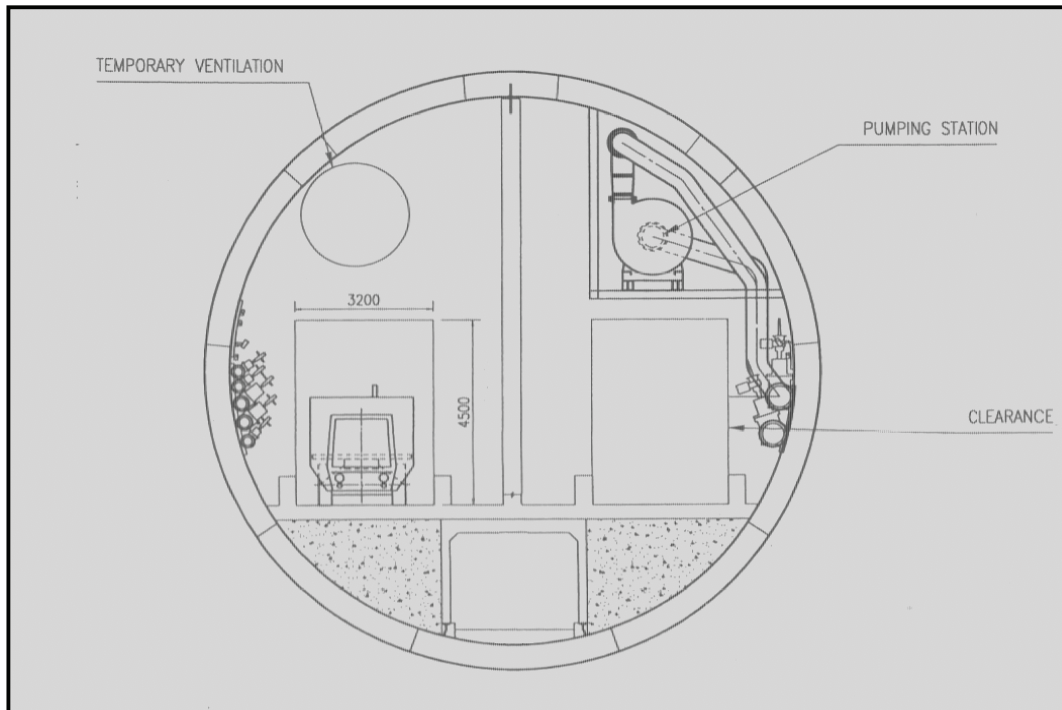
Figuur 2.3: Materiaalstromen voor de ondersteuning van de ruwbouw.

Om welke hoeveelheden en massa's lading het gaat staat vermeld in bijlage 9.

Laden

Zoals duidelijk wordt uit bovenstaande schematisatie, worden de materialen voor de ruwbouw geladen in de startschacht. Gedurende het gehele project blijft dit zo. Het alternatief is om geheel of gedeeltelijk gebruik te maken van de vluchtschachten, om zo de transportafstanden tijdens de uitvoering te minimaliseren. De grootste nadelen hiervan zijn echter de beperkte ruimte die er is om trailers te parkeren onder in de vluchtschachten en de extra kosten voor het inrichten van de bouwplaatsen bij de vluchtschachten met o.a. segmentopslag en groutcentrale.

Het is wel goed mogelijk om de vluchtschachten te gebruiken voor een deel van het leidingtransport. In figuur 2.4 is te zien dat er een groot aantal leidingen en kabels door de tunnel naar de TBM lopen. Het is niet noodzakelijk dat deze allemaal tot de startschacht lopen. Voor een goede ventilatie is het zelfs essentieel dat bij een bepaalde voortgang een ventilator in de vluchtschacht wordt geplaatst, omdat anders het benodigde debiet voor een goede vernieuwing van de lucht in de tunnel niet gehaald kan worden.



Figuur 2.4: Overzicht van de kabels en leidingen in de tunnel (7).

Toelichting op figuur 2.4:

De volgende kabels en leidingen zijn te zien:

- Twee bentonietleidingen (één voor aanvoer en één voor afvoer) met een diameter van 500 millimeter.
- Eén ventilatiebuis met een diameter van 2,5 meter.
- Elektrische kabels voor de hydraulische afvoer en voor de TBM.
- Verlichtingskabels aan beide zijden van de tunnel.
- Twee buizen voor de aanvoer van adem- en werklucht (\varnothing 150 mm).
- Een nooduitlaatpijp met een diameter van 200 millimeter.
- Twee buizen met een diameter van 200 millimeter, één voor de aanvoer van industriewater en één voor de afvoer van koelwater.

Nota Bene:

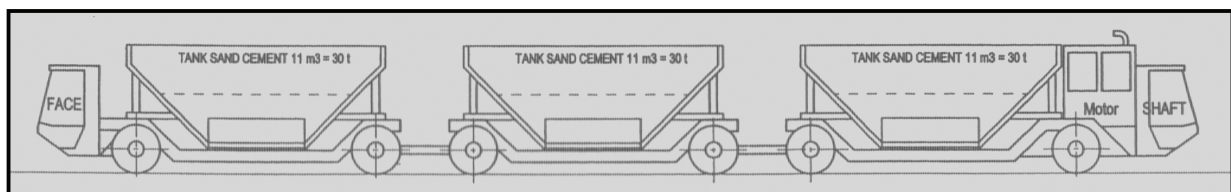
Om de bentoniet te kunnen verpompen over een zeer grote lengte is het noodzakelijk dat er om de 1,5 à 2 kilometer een booster pomp wordt opgenomen in het leidingensysteem.

Transport

Voor de uitvoering van het transport maakt de aannemer gebruik van trailers, die worden aangedreven door diesel locomotieven en die rijden op luchtbanden (en dus niet op rails). De grote diameter en de geïntegreerde ruwbouw en afbouw maken het in principe mogelijk om aan beide zijden van de scheidingwand te rijden (zie ook figuur 2.4).

Bij alle boortunnel projecten, die tot nu toe in Nederland zijn uitgevoerd, is voor het transport gebruik gemaakt van spoortreintjes met diesel locomotieven met meestal enkelspoor. De reden voor het gebruik van trailers op luchtbanden is dat de trailers flexibel dienen te zijn in het gebruik van de weg aan beide zijden van de scheidingswand. Bij de beschrijving van de materiaalstromen voor de ondersteuning van de afbouw wordt hier dieper op ingegaan.

De maximumsnelheid van de treintjes varieert tussen de 10 en de 15 kilometer per uur, afhankelijk van het gewicht van de lading en de helling die de tunnel heeft. Hoe de lading over de vier verschillende trailers is verdeeld, blijkt uit de informatie in bijlage 9. Ter illustratie is in figuur 2.5 de trailer voor het transport van de zand/cement stabilisatie afgebeeld.



Figuur 2.5: Trailer voor het transport van de zand/cement stabilisatie (8).

Daar de transportafstanden gedurende het project toenemen, wordt het bij een bepaalde voortgang van de TBM noodzakelijk om een tweede set van vier trailers te gaan gebruiken voor de aanvoer van het materiaal voor de ruwbouw.

Lossen

Het lossen van het materiaal, dat nodig is voor de ruwbouw, vindt (met uitzondering van de verlengstukken voor de leidingen) plaats op de kabelkoker, tussen de twee volgwagens van de TBM. De trailers worden één voor één gelost en het lossen van materiaal is dus tijdens de uitvoering de bottleneck van het logistieke systeem, dit in tegenstelling tot het laden, omdat er meerdere laadplaatsen zijn in de startschacht.

Dit is in het kort een toelichting op de gang van zaken bij het lossen:

- Normaal gesproken wordt het grout gelost voordat gestart wordt met het boren van de twee meter (dit is logischerwijze gelijk aan de breedte van één ring). De twee lege groutbakken op de eerste volgwagen worden dan vervangen door twee volle.
- Het lossen van de trailers met de segmenten en het kabelkoker element vindt plaats voordat er een nieuwe ring gebouwd wordt. Een consequentie van het feit dat er een uni-ring wordt toegepast, is dat de segmenten voor iedere ring in dezelfde volgorde worden ingebouwd en dus ook in dezelfde volgorde aangevoerd en gelost worden. Problemen met de aanvoer van verkeerde ringen of verkeerd gestapelde ringen worden bij dit ontwerp dan ook niet verwacht.
- Voordat de zand/cement stabilisatie wordt aangebracht aan beide zijden naast de kabelkoker, wordt een geotextiel over de voegen tussen de ringen gelegd, om te voorkomen dat de korrels in de ringvoegen komen. De stabilisatie wordt vervolgens in lagen met (waarschijnlijk) verschillende korrelgrootte aangebracht en vervolgens verdicht. Voor dit verdichten wordt gebruik gemaakt van walsen of trilplaten.

- De verlengstukken voor de leidingen worden achter de tweede volgwagen gelost. Op de tweede volgwagen worden de verlengstukken (met een lengte van 9 meter) na een bepaalde voortgang (8 of 10 meter) tussen een vaste leiding, die aan de tunnelwand is bevestigd en de flexibele leiding op de volgwagen geplaatst.

Cyclustijden

In deze subparagraaf komen een tweetal cycli aan bod, die laten zien hoe de logistieke processen gepland zijn. De eerste is de loscyclus, die bepalend is voor het goed verlopen van het boorproces. De tweede is de transportcyclus, de duur van deze cyclus is afhankelijk van de af te leggen afstand in de tunnel.

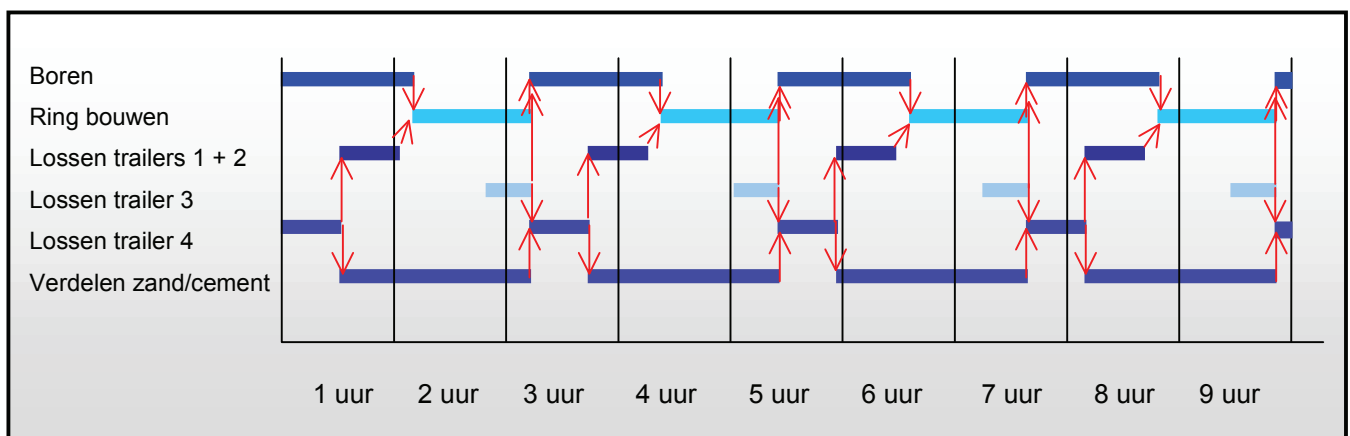
Voordat de beide cyclustijden berekend kunnen worden, dienen de laad- en lostijden bekend te zijn. Dit zijn de door B/K berekende laad- en lostijden:

| Trailercombinatie | Laadtijd | Lostijd |
|--------------------------------------|--------------|---------------|
| Trailer 1 (4 segmenten + kabelkoker) | 30 minuten | 15,75 minuten |
| Trailer 2 (6 segmenten) | 30 minuten | 16,35 minuten |
| Trailer 3 (grout + overig materiaal) | 26,5 minuten | 17 minuten |
| Trailer 4 (zand/cement stabilisatie) | 22,5 minuten | 31,60 minuten |

Tabel 2.1: Laad- en lostijden van de trailercombinaties (9).

Loscyclus

De duur van de loscyclus dient korter te zijn dan de boorcyclus (boren + ring bouwen), zodat het boren met een voortgang van 17,0 meter per dag kan plaatsvinden. In het onderstaande schema is de volgorde te zien waarin de trailers gelost worden ten opzichte van de boorcyclus.



Figuur 2.6: Schema van de volgorde waarin de ladingen gelost worden (de pijlen geven de relaties tussen de processen weer) (10).

Het schema is gemaakt op basis van de lostijden die in tabel 2.1 zijn genoemd. De tijd tussen het lossen van trailers 1 + 2 en trailer 3 wordt onder andere gebruikt voor het plaatsen van het kabelkoker element.

Transportcyclus

Het aantal trailers dat bij de uitvoering wordt ingezet is afhankelijk van de duur van de transportcyclus. In de onderstaande tabellen zijn de maatgevende cyclustijden voor de inzet van het aantal trailers weergegeven.

De eerste situatie geldt tot en met de kruising van de eerste vluchtschacht (na 1700 meter), daarbij wordt van elk type trailer één exemplaar ingezet. De tweede situatie geldt vanaf de eerste vluchtschacht tot het eind van het project (7160 meter) en dan wordt er van elk type trailer twee ingezet. De marges van de duur van de transportcyclus ten opzichte van de duur van de boorcyclus zijn in twee tabellen aangegeven.

De door B/K gebruikte minimale duur van één boorcyclus is 127 minuten, deze is opgebouwd uit 67 minuten boren en 60 minuten voor het plaatsen van de segmenten.

| Onderdeel van de cyclus bij een geboorde afstand van 1700 meter. | Benodigde tijd voor trailers 1,2 en 3 (min) | Benodigde tijd voor trailer 4 (min) |
|--|---|-------------------------------------|
| Laden in de schacht | 30 | 23 |
| Transport naar de TBM | 13 | 13 |
| Wachttijd | 12 | 12 |
| Lossen bij de TBM | 16 | 32 |
| Transport naar de schacht | 13 | 13 |
| Wachttijd | 12 | 12 |
| | ———— + | ———— + |
| Totaal | 96 | 105 |
| | | |
| Marge t.o.v. de boorcyclus (127 minuten) | 24 % | 17 % |

Tabel 2.2: Situatie 1: transportcyclus bij 1700 meter voortgang (11).

De aannamen bij de berekening van de cyclustijden voor een geboorde afstand van 1700 en 7160 meter zijn:

- De laad- en lostijden zijn overgenomen uit tabel 2.1, er is onderscheid gemaakt tussen: enerzijds trailers 1, 2 en 3 en anderzijds trailer 4, omdat de laad- en lostijden van trailer 4 erg afwijken van de laad- en lostijden van de eerste drie trailers.
- De transporttijden zijn berekend met als uitgangspunt de maatgevende afstand van 1700 en 7160 meter en een gemiddelde snelheid van 8 kilometer per uur.
- Bij de wachttijden in tabel 2.2 is gerekend met een vertraging als gevolg van 1500 meter eenrichtingsverkeer en een gemiddelde snelheid van 8 kilometer per uur.
- Bij de wachttijden in tabel 2.3 is gerekend met een vertraging als gevolg van 1500 + 600 + 300 meter eenrichtingsverkeer en een gemiddelde snelheid van 8 kilometer per uur.
- De waarden zijn naar boven afgerond.

| Onderdeel van de cyclus bij een geboorde afstand van 7160 meter. | Benodigde tijd voor trailers 1,2 en 3 (min) | Benodigde tijd voor trailer 4 (min) |
|--|---|-------------------------------------|
| Laden in de schacht | 30 | 23 |
| Transport naar de TBM | 54 | 54 |
| Wachttijd | 18 | 18 |
| Lossen bij de TBM | 16 | 32 |
| Transport naar de schacht | 54 | 54 |
| Wachttijd | 18 | 18 |
| | ————— + | ————— + |
| Totaal | 190 | 199 |
| Marge t.o.v. de boorcyclus (2 keer 127 minuten) | 25 % | 22 % |

Tabel 2.3: Situatie 2: transportcyclus bij 7160 meter voortgang (12).

Uit bovenstaande tabellen blijkt dat de marges van de transportcyclus ten opzichte van de boorcyclus redelijk groot zijn, of de marges in de praktijk ook voldoende zijn, moet blijken uit een nadere analyse. Deze nadere analyse is in hoofdstuk 5 beschreven.

Nota Bene:

De marges, die gevonden zijn bij de geboorde afstand van 1700 meter zijn kleiner. Er wordt echter gewacht met het inzetten van een tweede set trailers tot de eerste vluchtschacht (na 1700 meter) gepasseerd is en het startframe in de startschacht is afgebroken. Dan is er meer ruimte in de schacht voor de inzet van in totaal 8 ruwbouwtrailers.

§ 2.3 LOGISTIEKE PROCESSEN VOOR DE ONDERSTEUNING VAN DE AFBOUW

De logistieke stromen, die geen directe relatie hebben met de voortgang van de TBM hebben voornamelijk te maken met het betonwerk in de tunnel (de afbouw). Het betonwerk houdt in het storten van de vloeren, de anti-ontsporingranden en de scheidingswand.

Afbouwcycli

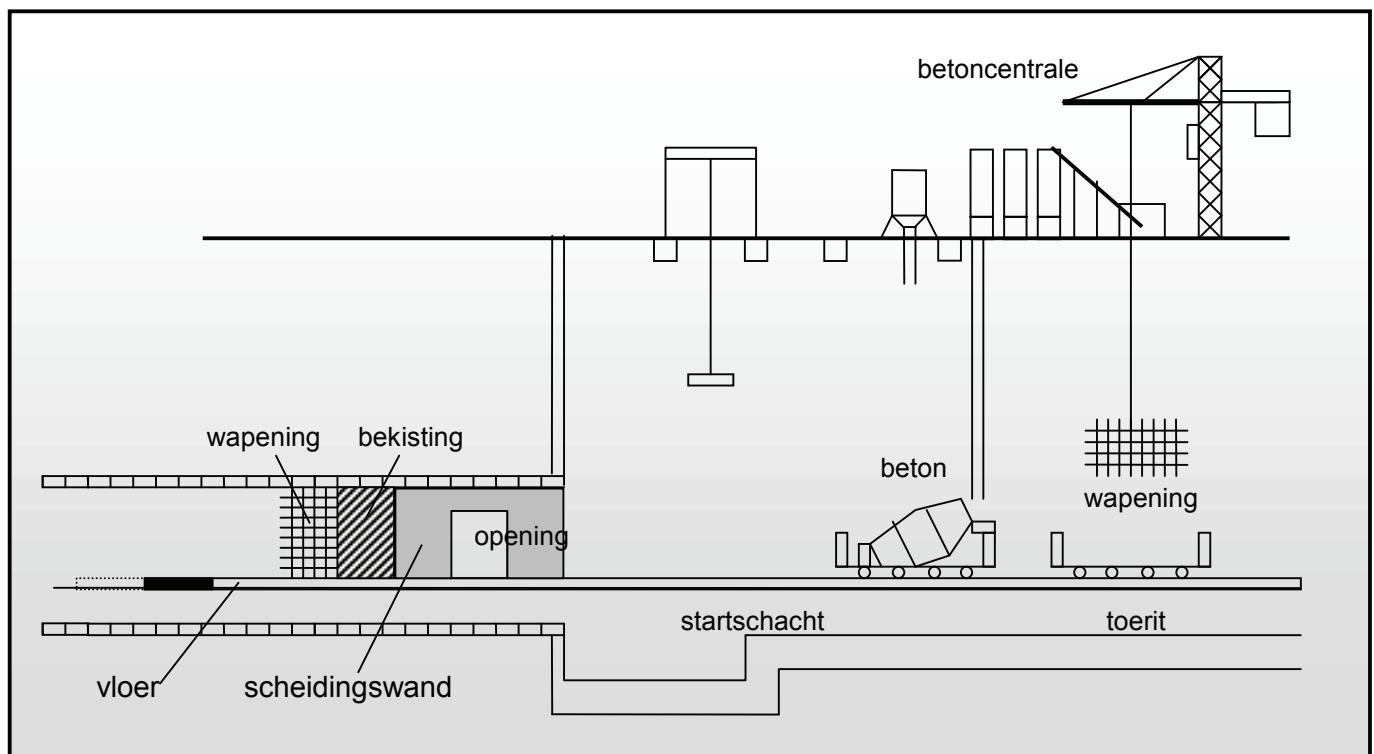
Ook de transporten voor de aanvoer van materiaal voor het betonwerk keren met een bepaalde regelmaat terug en worden daarom afbouwcycli genoemd. De uitvoering van het betonwerk vindt plaats op een bepaalde afstand (ongeveer 600 meter) achter het boorfront. De voortgangssnelheid van het betonwerk is bij voorkeur gelijk aan de voortgang van de TBM, zodat de afstand tot het front niet te groot of te klein wordt. Als de TBM langere tijd geen of onvoldoende voortgang maakt wordt de afbouw tijdelijk gestopt.

De betonnen vloer en de scheidingswand worden gestort in gelijke delen, de lengte van deze delen en de duur van het opbouwen van de wapening en bekisting, het storten en verharden zijn bepalend voor de voortgangssnelheid. De vloer wordt in twee fasen aangelegd met een gelijke dagelijkse delen van 24 meter, eerst in de ene helft van de tunnel en vervolgens in de andere helft. Gemiddeld is dat dus een voortgang

van 12 meter per dag. Dit is ook de lengte van de delen waarin de scheidingswand wordt gebouwd.

De afbouwcycli die aan bod komen, hebben betrekking op:

- Het transport van wapening,
- Het transport van beton,
- Het transport van overig materieel en materiaal, dat nodig is bij de bouw van de betonnen vloer en de scheidingswand.



Figuur 2.7: Materiaalstromen voor de ondersteuning van de afbouw.

De hoeveelheden die dagelijks worden getransporteerd zijn vermeld in bijlage 9.

Laden

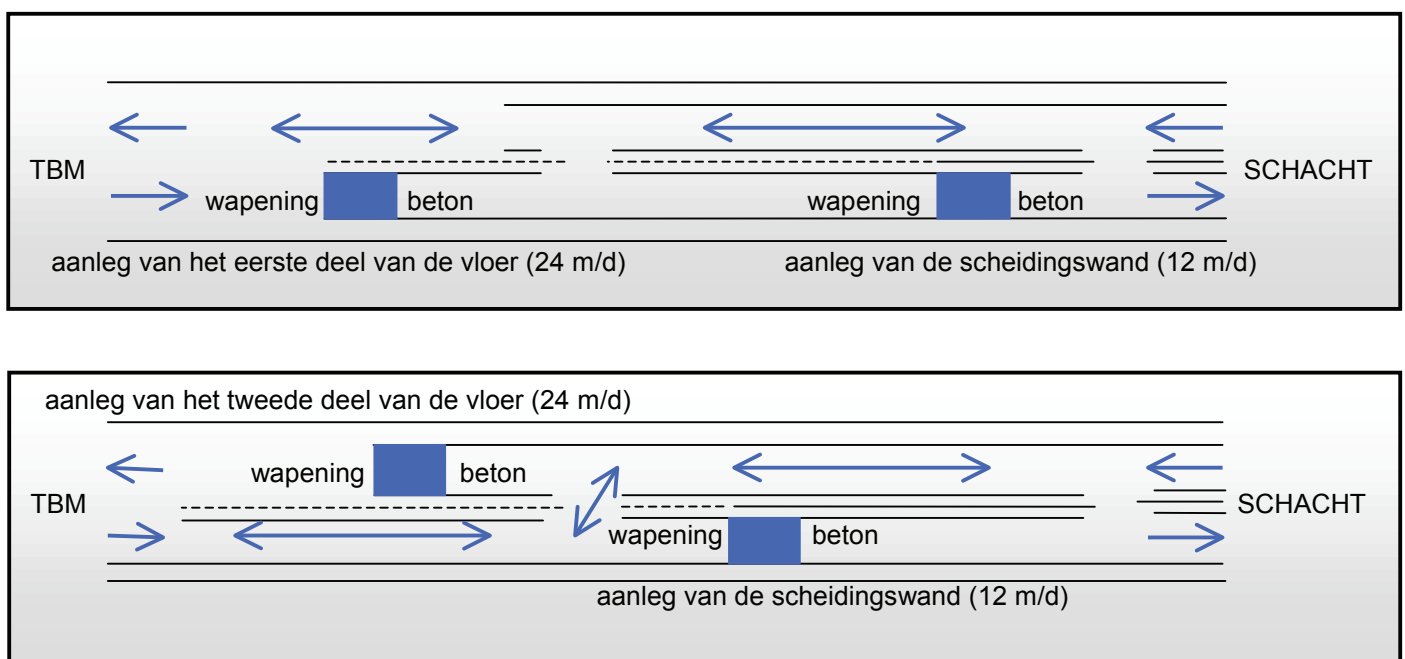
Daar de ruimte in de startschacht voor het laden van trailers beperkt is, worden de trailers voor de afbouw geladen in de toerit (het cut and cover gedeelte van de tunnel).

Transport

Zoals reeds bij de ruwbouw aan de orde is geweest, worden voor het transport dieseltrailers op luchtbanden ingezet. De reden hiervoor is dat de trailers dan eenvoudig van tunnelhelft kunnen wisselen en ook in kunnen halen als daar de ruimte voor is (bijvoorbeeld achter de tweede volgwagen). Het wisselen van tunnelhelft is noodzakelijk ter plaatse van het betonwerk in de tunnel.

De oplossing voor de problemen als gevolg van de afsluiting van één tunnelhelft is het aanbrengen van openingen in de wand. De openingen worden aangebracht om de 576

meter, dit is de afstand die bij de aanleg van de wand en de vloeren in 48 dagen (8 weken) wordt afgelegd. Deze waarde is zo gekozen dat er een minimaal aantal openingen worden aangelegd, maar dat het nog steeds zeer goed haalbaar is om de aanvoer van materiaal met twee sets (van totaal 8) trailers uit te voeren. Door de openingen kan het verkeer in de tunnel van helft wisselen, zodat de aan- en afvoer door blijft gaan. De afstand tussen de openingen in de scheidingswand bepaalt de vertraging die opgelopen wordt bij het transport. De situatie die ontstaat als er een deel van de tunnel is afgesloten voor de aanleg van de scheidingswand en de vloer, is in figuur 2.8 schematisch aangegeven. De aanleg van de wand wordt vanuit dezelfde tunnelhelft uitgevoerd, de tunnelhelft waar van uit de vloer wordt aangelegd wisselt.



Figuur 2.8: Schematisatie van de rijrichtingen bij werkzaamheden aan de grondplaat, anti-ontsporingranden en de scheidingswand.

Toelichting op figuur 2.8:

De maximale afstand waarover éénrichtingverkeer plaats vindt, is ongeveer 1500 meter. Deze waarde is berekend door tweemaal de afstand tussen de openingen in de wand te nemen met een extra veiligheid, omdat de trailers enige afstand voor en na de openingen in de wand worden gestopt.

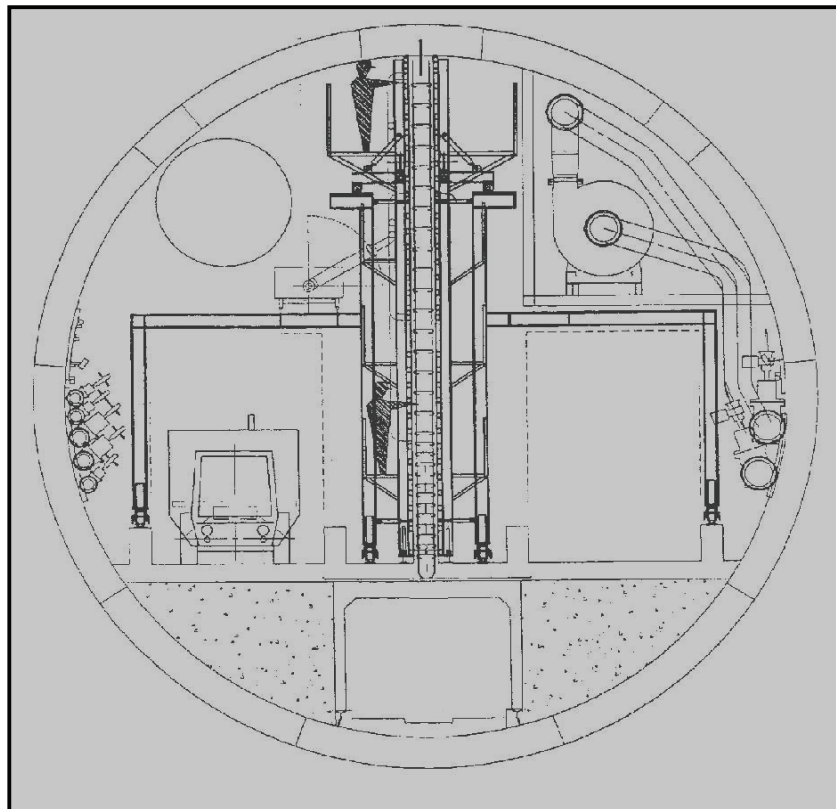
Om het betonwerk uit te voeren wordt aan één zijde van de bekistingsframes (de blauwe vierkantjes) wapening gelost en aan de andere zijde beton. Om te voorkomen dat er in één tunnelhelft twee wagens tegenover elkaar komen te staan, wordt er aan het begin en aan het eind van de tweerichtingsstrook een signalering aangebracht.

Voor de signalering zijn verschillende alternatieven. Er wordt waarschijnlijk gebruik gemaakt van stoplichten, hoe dit systeem er precies uit gaat zien is nog onbekend. Het is mogelijk een systeem aan te leggen dat reageert, als een trailer aan komt rijden, maar het is ook een optie te kiezen voor een systeem dat vaste tijden op rood en groen

staat. Om een keuze te maken uit de verschillende signaleringssystemen, worden criteria als betrouwbaarheid, kosten en duur van de wachttijden gebruikt. In paragraaf 5.2 wordt teruggekomen op verschillende varianten voor de signalering.

Lossen

Het lossen van de wapening en het beton vindt als gezegd plaats in twee delen van de tunnel, die zijn afgesloten voor doorgaand verkeer. Aan de TBM zijde van de bekistingsframes wordt de wapening gelost en aan de schachtzijde van deze frames staat de betonpomp en wordt het beton gelost. De bekistingsframes zijn te zien in figuur 2.9.



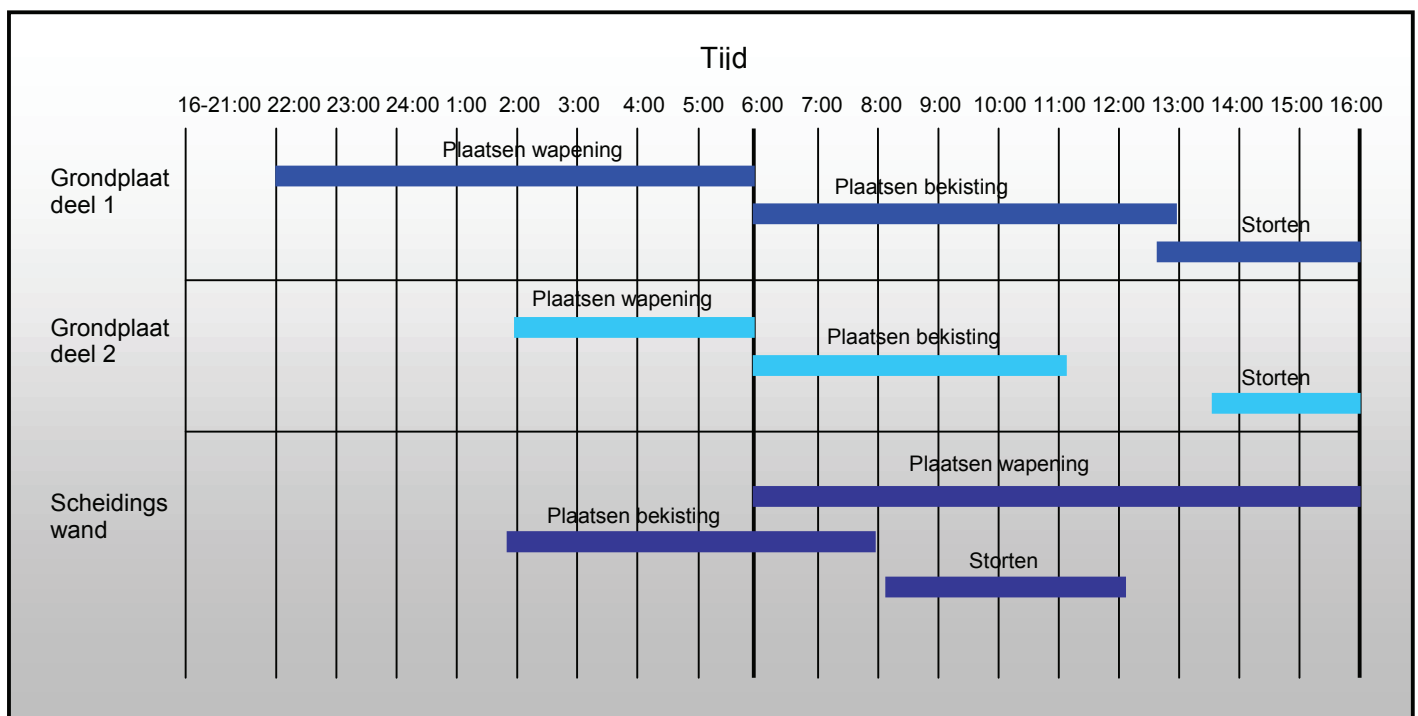
Figuur 2.9: Frames voor ondersteuning van de bekisting (13).

Stortcyclus van de grondplaat en de scheidingswand

De stortcyclus is een cyclus van 24 uur waarin een deel van de grondplaat (deel 1 of deel 2) en een deel van de wand wordt gestort.

In het onderstaande schema staan de drie balken voor achtereenvolgens: het aanbrengen van de wapening, het aanbrengen van de bekisting en het storten van het beton.

Dit schema laat zien dat het een dagelijkse cyclus is, waarin is uitgegaan van 14 uur tijd voor het verharden van het beton in de bekisting (dat is de tijd tussen het storten en het verplaatsen van de wapening). Tevens blijkt uit dit schema dat er dagelijks tweemaal wapening en tweemaal beton wordt aangevoerd.



Figuur 2.10: Schema van de uitvoering van de betonwerkzaamheden aan de wand en de grondplaat (14).

§ 2.4 DISCONTINUÏTEITEN IN HET LOGISTIEKE SYSTEEM

Tijdens de uitvoering van de boortunnel zijn er een aantal geplande werkzaamheden die het tot nu toe beschreven logistieke systeem verstoren. Het gaat hierbij niet om storingen, maar om werkzaamheden die een interactie (kunnen) hebben met het logistieke systeem, dit worden de discontinuïteiten genoemd.

De discontinuïteiten zijn:

- Het afbreken van het startframe en een gedeelte van de blindringen,
- Het passeren van de vluchtschachten,
- De aanleg van de luchtschachten,
- Het installeren van boosterpompen,
- Het afbouwen van de startschacht,
- Het afsluiten van een deel van de tunnel voor het afwerken van de tunnel.

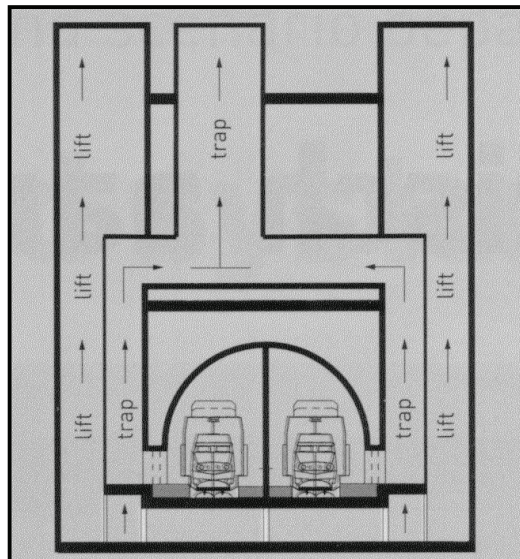
Het afbreken van het startframe en een gedeelte van de blindringen

Als de TBM zo ver gevorderd is dat de vijzelkrachten kunnen worden opgenomen door de wrijving tussen de lining, het grout en de grond zonder steun van het startframe, kunnen het startframe en de blindringen gedemonteerd worden. Als gevolg van het afbreken van het startframe en de blindringen kan het logistieke proces voor een bepaalde periode verstoord worden.

Het boorproces kan tijdens het afbreken van de blindringen stilgelegd worden, maar er kan ook gezocht worden naar een oplossing, waarbij het boorproces door blijft gaan. Bij de aanleg van de Westerscheldetunnel is een tijdelijk frame aangebracht tijdens het slopen van de blindringen en kon het transport en dus het boren doorgaan. Een alternatief is het demonteren van het startframe tijdens de periode dat de TBM is gestopt voor groot onderhoud bij de passage van de eerste vluchtschacht.

Het passeren van de vluchtschachten

Tijdens het passeren van de vluchtschachten (zie figuur 2.11) wordt het bouwproces voor een periode van 2 weken onderbroken. In deze periode wordt onder atmosferische druk onderhoud aan het front van de TBM verricht. Als de boormachine de vluchtschacht is gepasseerd, worden verschillende werkzaamheden uitgevoerd om de tunnel met de vluchtschacht te verbinden. In bijlage 10 is de bouwfasering opgenomen.



Figuur 2.11: Vluchtschacht (15).

Deze werkzaamheden worden achtereenvolgens in beide tunnelhelften uitgevoerd, zodat het transport door kan gaan. Hierdoor ontstaat een situatie met éénrichtingverkeer, die gelijk is aan de situatie bij de aanleg van de betonnen vloer en de scheidingswand. Aan beide zijden van elke vluchtschacht worden openingen in de wand gelaten, zodat de afstand voor éénrichtingverkeer (en dus de vertraging) klein blijft.

De aanleg van de luchtschachten

Er zijn in het ontwerp van de tunnel twee luchtschachten opgenomen, die er voor zorgen dat de luchtdruk golf, die wordt veroorzaakt bij het passeren van een trein, wordt afgevoerd. Het voordeel van de toepassing van deze luchtschachten is dat het benodigde oppervlak van de tunneldoorsnede kleiner wordt.

Op de plaatsen van de luchtschachten wordt de scheidingswand niet aangebracht. Tijdens de aanleg van de luchtschachten wordt een deel van de tunnelling gesloopt. Om vervormingen aan de tunnelling te minimaliseren wordt in de tunnel een frame gebouwd, dat dient om de segmenten te ondersteunen (zie de bouwfasering in bijlage 11). De aanleg van de luchtschachten neemt enkele maanden in beslag en tijdens deze periode dient de hinder voor het transport door de tunnel minimaal te zijn.

Het installeren van boosterpompen

Voor het pompen van de bentoniet van de TBM naar de scheidingsinstallatie worden naast de pomp op de TBM ook boosterpompen geïnstalleerd. De boosterpompen worden met een speciale constructie aan de lining gehangen. Tijdens het aanbrengen van de boosterpompen voor het transport van de bentoniet kan het boorproces niet worden voortgezet. De aanleg van een boosterpompen duurt bij de Westerscheldetunnel ongeveer vijf dagen. Om tijdverlies te voorkomen kan dit het best worden uitgevoerd tijdens een periode van onderhoud, zoals tijdens de passage van een vluchtschacht.

Vervolgens is er door de plaats die de boosterpomp inneemt een beperking voor het gebruik van portaalkranen en frames bij de aanleg van de wapening en bekisting voor de scheidingswand (zie figuur 2.9).

Het afbouwen van de startschacht

Tijdens het boorproces wordt in de startschacht gewerkt om een begin te maken met het bouwen van de technische ruimtes en het bedieningsgebouw. Het gaat daarbij om het storten van wanden en vloeren in een deel van de startschacht, dat niet wordt gebruikt voor het laden van trailers en waar ook geen trailers doorheen rijden.

Tevens wordt op een bepaald moment een verbinding gemaakt met het cut and cover gedeelte van de tunnel (de toerit).

Deze werkzaamheden mogen het laden en lossen in de startschacht niet negatief beïnvloeden.

Het afsluiten van een deel van de tunnel voor het afwerken van de tunnel

Tegen het eind van het project wordt vanuit de startschacht begonnen met het afwerken van de tunnel. Dit afwerken houdt in het herstellen van kleine schades aan de lining en het betonwerk en het opruimen en schoonmaken van de tunnel. Voor het meest zuidelijke deel van de tunnel (van schacht Bent tot de ontvangtschacht) worden deze werkzaamheden gestart van uit de ontvangtschacht.

§ 2.5 CONCLUSIES SYSTEEMANALYSE

Het logistieke systeem bij de Boortunnel Groene Hart is door de mogelijke interactie van verschillende werkzaamheden die tegelijkertijd plaatsvinden zeer complex. Ten opzichte van het door de HSL-Zuid gemaakte referentie ontwerp (twee tunnels met dwarsverbindingen) heeft het ontwerp van Bouygues/Koop (een grote diameter tunnel) echter een aantal logistieke voordelen.

Dit zijn de belangrijkste:

- Alle ringen zijn identiek (er wordt niet gewerkt met linkse en rechtse ringen). Vertragingen die ontstaan door de aanvoer van de verkeerde ring zijn hier dus uitgesloten.
- Er wordt maar één tunnel geboord.
Het voordeel hiervan is dat problemen, die ontstaan door verkeerde coördinatie van werkzaamheden (in de schacht en in de tunnel) bij de gelijktijdige bouw van twee tunnels vanuit dezelfde schacht hier niet voorkomen. Tevens kan er geen hinder van het transport optreden door de aanleg van dwarsverbindingen.
- Door de toepassing van trailers op luchtbanden ontstaat in principe een dubbel spoor (met op enkele plaatsen éénrichtingverkeer) voor de aan- en afvoer in de tunnel.
Ten opzichte van de inzet van treintjes op een enkelspoor zijn de wachttijden bij dit ontwerp dus vele malen kleiner.

De grote marge (van 17 tot 25%) tussen de cyclustijden voor het laden, het lossen en het transport enerzijds en de minimale duur van de boorcyclus (127 minuten) anderzijds is geen garantie dat de logistiek geen bepalende factor is voor de voortgangssnelheid van de TBM. In de praktijk zijn de waarden voor de cyclustijden namelijk niet constant en het is mogelijk dat de marges bij afwijking van de berekende waarden te klein worden. Of dit zo is wordt in hoofdstuk 5 onderzocht.

3. RISICO ANALYSE BOUYGUES/KOOP

Bouygues/Koop (B/K) heeft voor het project Boortunnel Groene Hart een risico management plan gemaakt, om de hoofdrisico's voor het project te kunnen identificeren en vervolgens te verminderen. In onderstaande paragrafen worden het plan van B/K beschreven en worden de logistieke hoofdrisico's, die door B/K zijn gevonden opgesomd.

Het doel hiervan is om aan te geven in hoeverre het logistieke systeem is onderzocht en wat dat heeft opgeleverd. In dit hoofdstuk wordt tevens de methode, die B/K gebruikt om de risico's te kwantificeren, beschreven. Met deze methode worden vanaf nu alle risico's, die geïdentificeerd worden, gekwantificeerd.

§ 3.1 RISK MANAGEMENT PLAN VAN B/K

De risico analyse van de logistiek tijdens de bouw van de tunnel is een onderdeel van het totale Risico Management Plan [16] van de aannemerscombinatie Bouygues/Koop, dat geldt voor de Boortunnel Groene Hart. Dit Risico Management Plan is opgesteld om de kwaliteit van het ontwerp te borgen. Wat dit plan inhoudt en wat de resultaten (in de vorm van de grootste risico's) zijn, wordt hier toegelicht.

Een risico wordt gedefinieerd als een gebeurtenis of situatie die een nadelig effect heeft op de technische prestatie, planning, kosten of opbrengsten van het project. Elk risico wordt gekarakteriseerd door de kans op optreden en zijn potentiële impact op het project.

De sleutel activiteiten van het risico management zijn in drie componenten in te delen, deze zijn:

- Risico analyse,
- Risico controle,
- Risico rapportage.

§ 3.1.1 Risico analyse

De risico analyse bestaat uit de risico-identificatie en de risico-evaluatie.

Risico-identificatie

Risico's worden geïdentificeerd door te refereren aan andere projecten en door het opdoen van ervaring en kennis van diegene, die nauw bij het project betrokken zijn; inclusief HSL, het projectteam en de onderaannemers.

De evaluatie van de individuele risico's is gebaseerd op een gedetailleerde omschrijving van onzekerheden, de oorzaken en invloeden en mogelijke verminderingsmaatregelen. Deze informatie wordt geregistreerd in het risico dossier met behulp van een database.

Het standaard scoresysteem van het aanbiedingsontwerp (tabellen 3.1 en 3.2) wordt gebruikt om het gewicht van ieder item te evalueren in termen van hun kansen en invloed in tijd, geld en kwaliteit. De score laat de relatieve belangrijkheid zien van elk risico, voordat er risicoverlagende maatregelen zijn genomen.

| Beoordeling | Kans | Effect in tijd | Effect in geld (NLG) |
|-------------|--|----------------|----------------------|
| 1 | Komt zelden voor (<0,1%) | < 1 maand | Max. 1 miljoen |
| 2 | Onwaarschijnlijk (1%) | 1-3 maanden | 1 tot 5 miljoen |
| 3 | Kans bestaat, maar niet erg groot (10%) | 3-6 maanden | 5 tot 10 miljoen |
| 4 | Er is een reële kans (25%) | ½-1 jaar | 10 tot 20 miljoen |
| 5 | Vrijwel zeker, bijna opgenomen in planning (50%) | > 1 jaar | > 20 miljoen |

Tabel 3.1: Standaard scoresysteem voor beoordeling risico's met betrekking tot tijd en geld (16).

Om de risico's te rangschikken in belangrijkheid, wordt een waarde gegeven (kans maal effect), hetgeen zich laat zien in de volgende matrix:

| | | Kans | | | | | |
|--------|---|--------|---|----|----|----|----|
| | | Waarde | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Effect | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 2 | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| | 3 | 3 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |
| | 4 | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| | 5 | 5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |

Figuur 3.1: Risico score systeem voor risico's m.b.t. tijd en geld (17).

Na de indeling van elk risico volgens de waarden uit tabel 3.1 wordt een indeling gemaakt om de classificatie van elk risico te definiëren (zie figuur 3.1).

Een score van 1 tot 8 is een verwaarloosbaar risico (klasse 1)

Een score van 9 tot 15 is een groot risico (klasse 2)

Een score van 16 tot 25 is een kritiek risico (klasse 3)

Voor de risico's met betrekking tot tijd en geld met een score hoger of gelijk aan 6 staan beheersmaatregelen, status en oorsprong in het risico dossier.

Een soortgelijk scoresysteem bestaat voor risico's met betrekking tot kwaliteit.

| Beoordeling | Kans | Effect op kwaliteit |
|-------------|--|--|
| 1 | Komt zelden voor (<0,1%) | Afwijking valt binnen de tolerantie |
| 2 | Onwaarschijnlijk (1%) | Afwijking valt op de grens |
| 3 | Kans bestaat, maar niet erg groot (10%) | Afwijking is hinderlijk, herstel is mogelijk |
| 4 | Er is een reële kans (25%) | Functie verlies, herstel is noodzakelijk |
| 5 | Vrijwel zeker, bijna opgenomen in planning (50%) | Afwijking is onacceptabel |

Tabel 3.2: Standaard scoresysteem voor beoordeling risico's met betrekking tot kwaliteit (18).

Om de risico's m.b.t. kwaliteit te rangschikken in belangrijkheid, wordt een waarde gegeven (kans maal effect), die in onderstaande matrix is opgenomen:

| | | Kans | | | | | |
|--------|---|--------|---|----|----|----|----|
| | | Waarde | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Effect | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 2 | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| | 3 | 3 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |
| | 4 | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| | 5 | 5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |

Figuur 3.2: Risico score systeem voor risico's m.b.t. kwaliteit (19).

Na de indeling van elk risico volgens de waarden uit tabel 3.2 wordt een indeling gemaakt om de classificatie van elk risico te definiëren (zie figuur 3.2).

Een score van 7 tot 9 is ongewenst/onwaarschijnlijk risico (klasse A)

Een score van 10 tot 19 is riskant risico (klasse B)

Een score van 16 tot 25 is kritiek risico (klasse C)

Een score van 25 is een calamiteiten risico (klasse D)

Nota Bene:

Een score van 5 (als gevolg van een onacceptabele afwijking) is ook gedefinieerd als calamiteiten risico en derhalve een onacceptabel risico, hetgeen een specifieke risico verlagende maatregel vraagt om het te beheersen.

Naast deze risico's met betrekking tot tijd, geld en kwaliteit, worden ook overige risico's (met betrekking tot gezondheid, welzijn, veiligheid en milieu) geïdentificeerd, deze worden hier echter buiten beschouwing gelaten, omdat B/K hier in deze fase van het ontwerp nog geen rapportage over naar buiten brengt.

Risico-evaluatie

De risico's, die in de analyse zijn vastgesteld worden gekwantificeerd door gebruik te maken van risico simulatie modellen. Deze worden gebruikt om de totale invloed van alle risico's te beoordelen en de onzekerheden in te schatten. Hiervoor wordt speciale software gebruikt, zoals Monte Carlo™ en @Risk™. Het eindresultaat geeft de kansverdeling van de specifieke output (bijvoorbeeld de projectkosten of duur van bepaalde werkzaamheden) en het kanspercentage voor het behalen van het uiteindelijke doel.

§ 3.1.2 Risico controle

De risico controle is te verdelen in risico vermindering en risico monitoring.

Risico vermindering

Door het volgen van de risicobeoordeling wordt het duidelijk dat veel risico's te vermijden zijn, of dat vele verlaagd kunnen worden door de uitvoering van specifieke risico verlagende maatregelen. Die maatregelen kunnen technisch, organisatorisch of contractueel van aard zijn; om het risico te verwijderen, te verminderen, over te dragen of het risico te dekken. Het doel is om alle significante risico's te verlagen naar een punt dat ze niet langer een bedreiging zijn voor de projectdoelstellingen.

De effectiviteit van de risico verlagende maatregelen wordt getest d.m.v. een simulatie in de eerder genoemde risico modellen.

Risico monitoring

Tijdens de uitvoering worden de risico's en de maatregelen beoordeeld.

§ 3.1.3 Risico rapportage

Alle risico's worden in een database geregistreerd (Access of Riskman™ software). Van de risico's wordt een Risico Dossier en een Risico Beoordelingsrapport bijgehouden.

Dit is in het kort de werkwijze waarop de aannemer invulling geeft aan het risico management. Deze methode heeft geleid tot de identificatie van vijf grote risico's, die in de volgende paragraaf zijn opgesomd.

§ 3.2 OVERZICHT VAN DE GROOTSTE LOGISTIEKE RISICO'S GEÏDENTIFICEERD DOOR B/K

Dit zijn de vijf grootste risico's, die geïdentificeerd zijn door Bouygues/Koop [17].

1. Parkeerterrein voor trailers.

Toelichting: Het land waar de parkeerplaats voor de trailers is gepland (achter in de startschacht), dient op tijd beschikbaar te zijn. Een significante vertraging leidt tot opstoppingen als gevolg van het ontbreken van parkeerplaatsen en dus tot vertragingen bij het boorproces.

Consequentie: Vertraging van het bouwproces.

Score: 15 (Kans 5, Gevolg in geld 3)

2. Beïnvloeding van werkzaamheden die tegelijkertijd plaatsvinden.

Toelichting: Het is mogelijk dat de logistiek in de tunnel beïnvloed zal worden door onderstaande werkzaamheden:

- 1 De bouw van de ruimtes voor de technische voorzieningen
- 2 De afbouw van de startschacht
- 3 De aanleg van de betonnen grondplaat
- 4 De aanleg van de scheidingswand

-
- 5 De bouw van de luchtschachten
 - 6 De bouw van de vluchtschachten
 - 7 De plaatsing van de kabelkoker elementen (zie risico 4)
- Consequentie: Vertraging van de logistiek en dus van het boorproces.
Score: 6 (Kans 3, Gevolg in tijd 2)

3. Transportmiddelen.

Toelichting: Mogelijk falen van de transportmiddelen.
Consequentie: Reparaties en vertragingen.
Score: 3 (Kans 3, Gevolg in tijd 1)

4. Het op tijd realiseren van de kabelkoker.

Toelichting: De aanleg van de kabelkoker is noodzakelijk voor de voortgang van de TBM. De aanleg van de galerij zal dus binnen de geplande tijd plaats moeten vinden.
Consequentie: Vertraging van de logistiek en dus van het boorproces.
Score: 3 (Kans 3, Gevolg in tijd 1)

5. Het falen van het tijdelijke signaleringssysteem.

Toelichting: Het falen van de signalering kan leiden tot vertraging van de trailers of ongelukken, met name in het deel met éénrichtingverkeer.
Consequentie: Vertraging van de logistiek en dus van het boorproces en gevaar voor de veiligheid.
Score: 3 (Kans 3, Gevolg in tijd 1)

Het grootste risico, dat door B/K is geïdentificeerd, dient als vertraging in de planning opgenomen te worden. Dit heeft de volgende reden:

De oorzaak van het niet op tijd gereed komen van (een deel van) de startschacht is een probleem bij de grondverwerving. Het meest noordelijk gelegen deel van de schacht is gepland in een gebied, dat later beschikbaar is gekomen dan de rest van het terrein.

Mogelijkheden om toch te starten met het boorproces als de schacht nog niet helemaal af is, zijn er niet, er is hier dus geen sprake van een risico, maar van een vertraging die in de planning opgenomen dient te worden. De start van het boorproces dient verplaatst te worden naar september 2001 i.p.v. mei 2001. Daar de start van de afbouw afhankelijk is van de vordering van de ruwbouw (en het beschikbaar zijn van de toerit) wordt de start van de afbouw in de planning verplaatst van september 2001 naar januari 2002.

In de (vernieuwde) planning in bijlage 8 zijn deze vertragingen al meegenomen, deze wijziging heeft geen invloed op de opleverdatum. Vanaf nu wordt aan dit risico-item geen aandacht meer besteed, omdat het buiten de systeemgrens van dit onderzoek valt.

3.3 RESTERENDE VRAGEN OVER HET LOGISTIEKE SYSTEEM

De risico analyse van Bouygues/Koop geeft een goed beeld van de grootste logistieke risico's die er zijn tijdens de bouw van de tunnel. Voor de Projectorganisatie HSL-Zuid zijn met de door B/K uitgevoerde risico analyse nog niet alle vragen over de logistieke risico's beantwoord.

Zo is nog onduidelijk welke gebeurtenissen naast de in paragraaf 3.2 genoemde kunnen leiden tot een stilstand, of vertraging van de TBM. Dit is onderzocht in hoofdstuk 4

Ook is onduidelijk of de logistiek in de tunnel een beperking oplegt aan de maximale voortgangssnelheid van de tunnelboormachine. In hoofdstuk 5 is dit onderzocht.

Tenslotte vraagt men zich af of er een kans bestaat dat het logistieke systeem vastloopt als tijdens het transportproces of tijdens het lossen vertragingen optreden. Deze vraag wordt beantwoord in hoofdstuk 5.

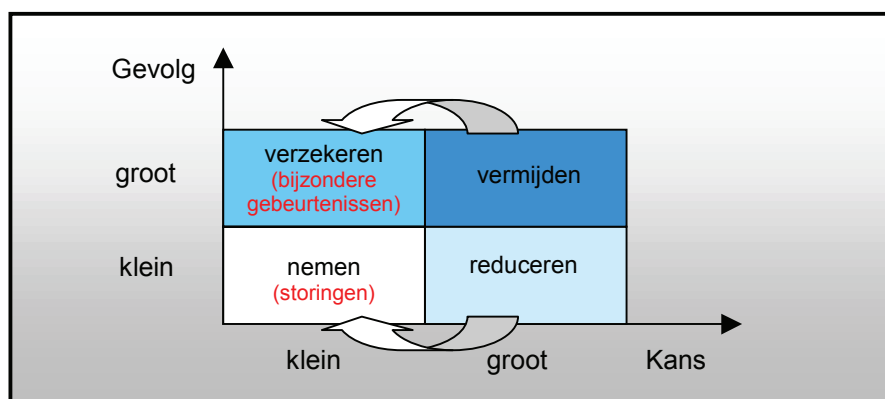
4. RISICO ANALYSE HSL-ZUID

Na bezoeken aan boortunnelprojecten in Nederland en na analyse van de gegevens, die bekend zijn over de Boortunnel Groene Hart is een overzicht gemaakt van de risico's voor vertraging van het boorproces als gevolg van het falen van het logistieke systeem. In dit hoofdstuk zijn eerst alle risico's puntsgewijs aangegeven in paragraaf 4.1. Vervolgens zijn de risico's toegelicht en gekwantificeerd (in 4.3 en 4.4), met als doel ze te vergelijken met de analyse van Bouygues/Koop. Tot slot zijn de resultaten in paragraaf 4.5 vergeleken met gegevens die bekend zijn over andere boortunnelprojecten.

§ 4.1 OVERZICHT VAN DE RISICO'S

Om uit te zoeken welke logistieke risico's er zijn bij de uitvoering van het project, zijn bezoeken afgelegd naar vergelijkbare projecten, in dit geval: de Botlekspoortunnel, de Sophiaspoortunnel en de Westerscheldetunnel. Tevens is informatie verzameld over de uitvoering van de Tweede Heine Noordtunnel. Aangevuld met de risico's, die door B/K zijn geïdentificeerd en na een kritische analyse van de dan nog overgebleven componenten van het logistieke systeem is een overzicht ontstaan van alle risico's die binnen de systeemgrens van dit onderzoek vallen.

Risico's, die men tegenkomt bij het ontwerp van een civiel project, zijn in het algemeen in te delen in vier categorieën (zie figuur 4.1). Indien het ontwerpproces goed doorlopen wordt, blijven uiteindelijk twee van deze categorieën over. Ten eerste risico's met een kleine kans en grote gevolgen (bijzondere gebeurtenissen) en ten tweede risico's met een kleine kans en kleine gevolgen (storingen). De risico's van het logistieke systeem in de tunnel zijn ook in die twee categorieën ingedeeld.



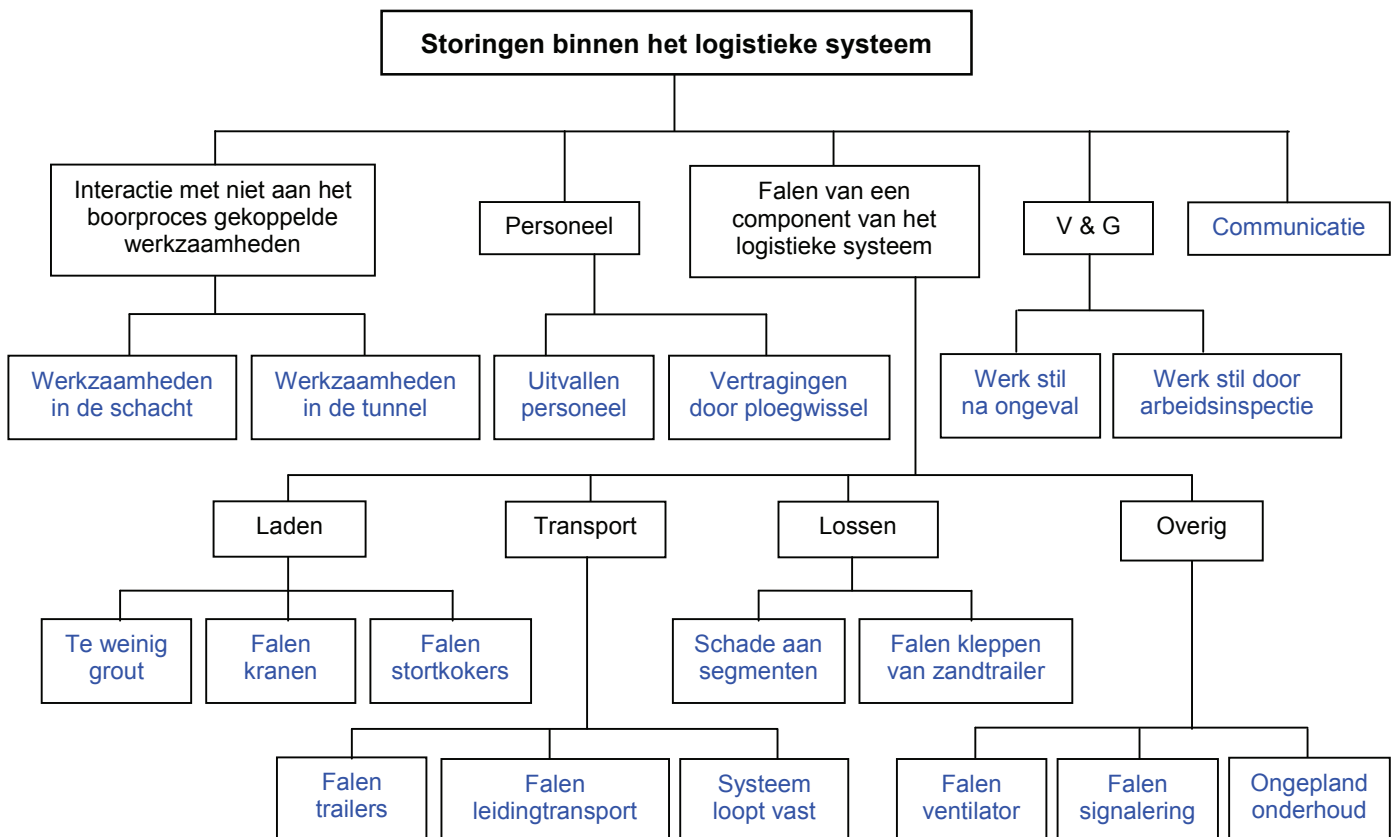
Figuur 4.1: Omgaan met risico's (20).

De storingen zijn weergegeven in paragraaf 4.1.1 en de bijzondere gebeurtenissen in 4.1.2.

§ 4.1.1 Storingen binnen het logistieke systeem

In de onderstaande foutenboom (figuur 4.2), waarin alle OF-poorten zijn weggelaten zijn alle storingen van het logistieke systeem in de tunnel, die kunnen leiden tot vertraging van het boorproces opgenomen.

Voor alle duidelijkheid: risico's voor vertragingen als gevolg van het falen van: de TBM, de aanvoer naar bouwplaats, de scheidingsinstallatie en de voorzieningen vallen buiten de systeemgrens en zijn dus niet meegenomen.



Figuur 4.2: Foutenboom: storingen van het logistieke systeem in de tunnel.

Toelichting op figuur 4.2:

De items in de foutenboom worden gezien als storingen, met als gevolg een vertraging van de voortgang van de TBM. Al deze storingen zijn tijdelijk, of kunnen 'eenvoudig' worden verholpen door vervanging of reparatie van het element dat de storing veroorzaakt. De gevolgen van de storingen worden uitgedrukt in de mogelijke vertraging van de TBM die ontstaat door de storing.

In paragraaf 4.3 worden de blauw gemarkeerde items toegelicht en gekwantificeerd.

§ 4.1.2 Bijzondere gebeurtenissen binnen het logistieke systeem

Naast de storingen, die betrekkelijk kleine gevolgen hebben voor de voortgang van de TBM, zijn er zogenaamde 'bijzondere gebeurtenissen', die grote gevolgen hebben voor de voortgang van het project. Door deze bijzondere gebeurtenissen kunnen vertragingen optreden, die het halen van de geplande opleverdatum in gevaar brengen.

Dit zijn de bijzondere gebeurtenissen, die het logistieke systeem in de tunnel tijdens de bouw van de Boortunnel Groene Hart kunnen ontregelen:

- Het instorten van een bekistingsframe,
- Het bezwijken van de bekisting voor de scheidingswand,
- Het bezwijken van het frame, dat de lining steunt tijdens de aanleg van de luchtschachten,
- Het falen van een trailer,
- Het langdurig falen van beide kranen bij de startschacht,
- Slijtage aan leidingen en pompen voor het mengseltransport,
- Protestacties,
- Problemen met de personele bezetting,
- Een ongeval met dodelijke afloop,
- Explosie of brand.

De toelichting op de bijzondere gebeurtenissen volgt in paragraaf 4.4.

§ 4.2 INLEIDING OP 'TOELICHTING EN KWANTIFICERING RISICO'S'

De risico's (bestaande uit storingen en bijzondere gebeurtenissen) worden op basis van gegevens van min of meer vergelijkbare projecten gekwantificeerd. Deze gegevens zijn door middel van interviews en literatuurstudie verkregen.

Dit is de methode die gebruikt is om de totale vertraging als gevolg van storingen te bepalen:

In een spreadsheet worden voor elke storing de volgende drie invoerparameters ingevoerd en vermenigvuldigd:

- Frequentie van de storing (1 keer per # dagen);
- Duur van de stilstand van de TBM als gevolg van de storing (uren);
- Duur van de periode waarin de storingen voor kunnen komen (dagen).

Per storing(i) is de vertraging als volgt berekend.

$$\text{Vertraging (i)} = \text{Frequentie(i)} * \text{Duur stilstand(i)} * \text{Duur periode(i)} \quad (4.1)$$

De totale duur van de vertraging, door de storingen uit figuur 4.2 volgt uit het optellen van de vertragingen van alle storingen.

$$\text{Totale vertraging a.g.v. storingen} = \sum_i \text{vertraging (i)} \quad [\text{dagen}] \quad (4.2)$$

Het optellen van de verschillende vertragingen geeft een waarde, die beschouwd kan worden als een bovengrens van de vertraging van de TBM. Dit is een bovengrens, omdat storingen ook op kunnen treden als de TBM om een andere reden stilstaat en dan is de oorzaak van een storing dus geen logistieke storing.

De ingevoerde waarden zijn te zien in tabel 4.1 op bladzijde 52. De toelichting op deze waarden is te lezen in de tekst van paragraaf 4.3.

De grootte van de kansen en de gevolgen, die horen bij de bijzondere gebeurtenissen worden in tabel 4.2 op bladzijde 61 weergegeven.

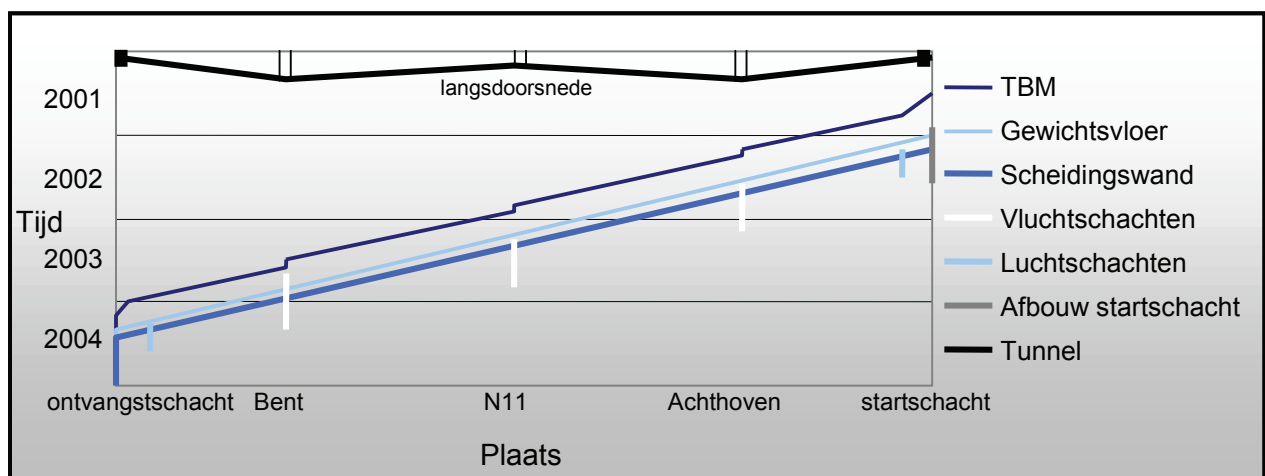
§ 4.3 TOELICHTING OP EN KWANTIFICERING VAN DE STORINGEN

De geïdentificeerde storingen, die in figuur 4.2 blauw zijn gemarkeerd, verdienen nog enige toelichting. Deze paragraaf bevat die toelichting, naar de indeling die ook in figuur 4.2 is gebruikt. Daarnaast zijn de storingen gekwantificeerd.

§ 4.3.1 Storingen door interactie met niet aan het boorproces gekoppelde werkzaamheden

De storingen van de logistiek, die kunnen ontstaan door interactie met niet aan het boorproces gekoppelde werkzaamheden, zijn ingedeeld in werkzaamheden in de schacht en werkzaamheden in de tunnel.

Om een goed beeld te krijgen van de duur dat bepaalde werkzaamheden in de schacht en tunnel worden uitgevoerd, is allereerst een vereenvoudigde weergave van de planning (bijlage 8) afgebeeld. Hierop staan alleen de langsdoorsnede van de tunnel en de werkzaamheden die invloed kunnen hebben op de logistiek in de tunnel.

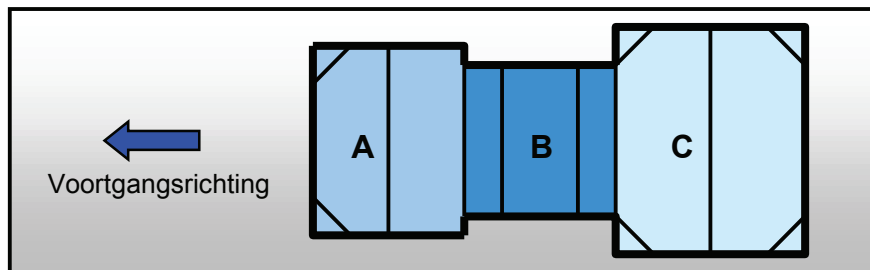


Figuur 4.3: Planning (tijd-weg diagram) van de werkzaamheden in de tunnel en de startschacht.

De onderdelen, die invloed (kunnen) hebben op de logistiek in de tunnel zijn:

De bouw van de ruimtes voor de technische voorzieningen en de afbouw van de startschacht

Om een duidelijk overzicht te geven van de werkzaamheden in de schacht is deze ingedeeld in drie delen (A, B en C), zie figuur 4.4. De werkzaamheden voor de afbouw van de schacht zijn tevens verdeeld in vier fasen (1 t/m 4) [18]. Hier volgt een beschrijving van de belangrijkste werkzaamheden, die in die fasen worden uitgevoerd en tevens de invloed die de uitvoering van deze werkzaamheden kan hebben op de voortgang van het boorproces.



Figuur 4.4: Indeling van de startschacht in gebieden A, B en C.

Fase 1 is de periode voor de start van de booractiviteiten, dan worden het startframe, de boormachine en de volgwagens in de schacht opgebouwd (zie figuur 4.5). Fase 4 is na afloop van de booractiviteiten, als in de schacht een scheidingswand wordt aangelegd en het dienstgebouw wordt voltooid. Voor de planning van het project zijn deze fasen wel van belang, maar voor deze studie zijn ze niet interessant, omdat er geen interactie is met de logistiek in de tunnel. Er wordt voor deze risico analyse slechts gekeken naar de fasen 2 en 3.

In fase 2 (de belangrijkste werkzaamheden gedurende de eerste drie maanden na aanvang van de booractiviteiten) zijn dit de belangrijkste werkzaamheden in de verschillende zones van de startschacht [18].

Zone A:

Aanbrengen van tijdelijke ringen, technische galerij en vullen met zand/cement (gebeurt achter de TBM).

Ruimtes opvullen met schraal beton tot onderkant rijvloer.

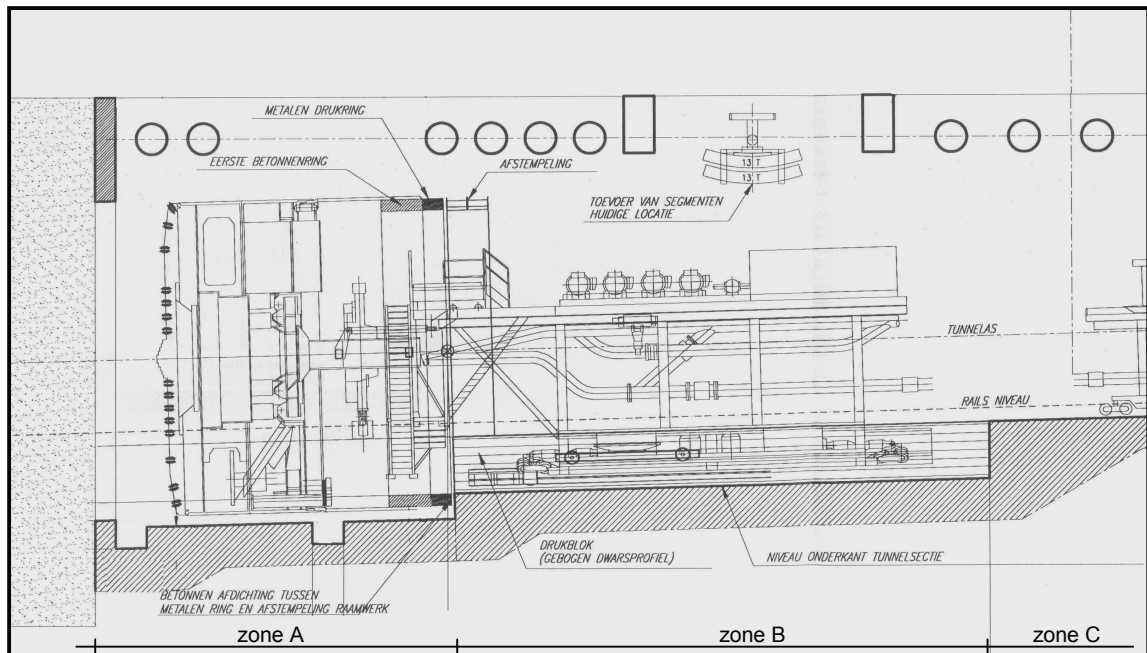
Zone B:

Aanbrengen technische galerij en vullen met zand en cement (gebeurt achter de TBM).

Zone C:

Storten van binnenwanden en bijbehorende tussenplaat.

De invloed van de werkzaamheden in zones A en B op de logistiek in de tunnel is nihil.



Figuur 4.5: Tunnelboormachine in de startschacht (21).

De werkzaamheden in zone C nemen echter een deel van de ruimte in de schacht in beslag, wat tot gevolg heeft dat de trailers een kleiner oppervlak ter beschikking hebben om te manoeuvreren. Tijdens de eerste fase van het boorproces kan de invloed van de logistiek op de voortgang van de TBM geminimaliseerd worden door een functionele indeling en goede organisatie van de werkzaamheden in de schacht. In hoofdstuk 6 is een voorstel gedaan voor de functionele indeling van de startschacht.

In fase 3 (belangrijkste werkzaamheden tijdens de TBM booractiviteiten) zijn dit de belangrijkste werkzaamheden in de verschillende zones van de startschacht [18].

Zone A:

Demontage van het bovenste deel van de tijdelijke ringen, van het afzetframe en de startafdichting.

Resterende storten van de binnenwanden tot aan het niveau van de onderkant van de dakplaat.

Afwerking van de kopwand van de schacht.

Zone B:

Geen werkzaamheden.

Zone C:

Voltooiing van de betonwerkzaamheden tot het bovenste niveau van de betreffende tussenplaten, inclusief centrale wand.

Verwijderen van de tijdelijke wand, zodat een verbinding met de toerit ontstaat.

De werkzaamheden in zone A, die de meeste invloed hebben op de transportstromen en dus ook op de voortgang van de boormachine zijn het demonteren van de tijdelijke ringen, het startframe en de startafdichting. Deze werkzaamheden worden daarom

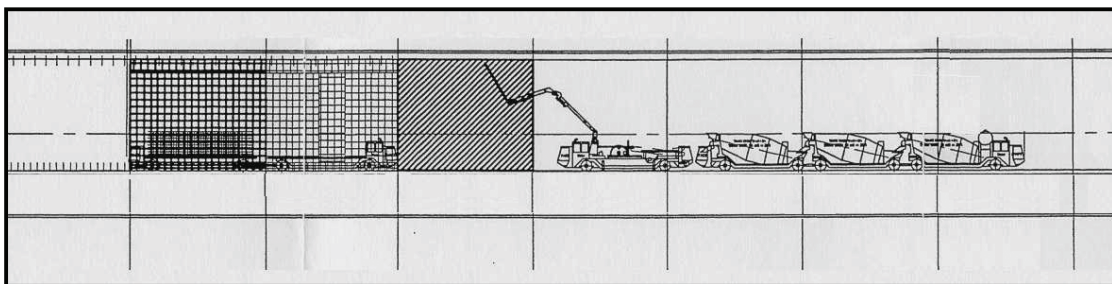
uitgevoerd als de TBM tijdelijk voor zwaar onderhoud gestopt is (naar alle waarschijnlijkheid in de vluchtschacht Achthoven). Tijdens de fase van zwaar onderhoud is er zeker sprake van aan- en afvoer van materiaal van en naar de TBM, wat dus tegelijk plaatsvindt met het demonteren van de startconstructie. Deze werkzaamheden beïnvloeden dus niet zo zeer de voortgang van de boormachine, maar kunnen wel invloed hebben op de duur van de stilstand en dus de gemiddelde voortgangssnelheid. Door een goede coördinatie van de verschillende werkzaamheden (bijvoorbeeld bepaalde tijdstippen of dagdelen dat er wel of geen transport mogelijk is) kunnen vertragingen voorkomen worden.

Vertragingen (van de TBM) kunnen nog wel veroorzaakt worden door problemen tijdens de afbouw van zone C. Bijvoorbeeld doordat trailers niet geladen kunnen worden tijdens het plaatsen of demonteren van de bekisting of tijdens het verwijderen van de tussenwand naar de toerit. Bij het kwantificeren van de vertraging als gevolg van storingen zijn voor deze storing de volgende invoerwaarden gebruikt.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|---------------------|-----------------|-------------------|-----------|
| Afbouw startschacht | 1 keer per week | Kort ¹ | 3 maanden |

De aanleg van de betonnen grondplaat en de scheidingswand

De afbouw in de tunnel (zie figuur 4.6) wordt uitgevoerd vanuit een deel van de tunnel, dat niet gebruikt wordt voor transport van materiaal naar de TBM. Dit garandeert niet dat er geen interactie is met de aanvoer naar de boormachine. De ruwbouwtrailers zouden eventueel gehinderd kunnen worden door trailers met beton of wapening, die in de schacht en in de tunnel moeten manoeuvreren om op de goede plek te komen. Door het plaatsen van een goede signalering ter plaatse van de doorgangen in de scheidingswand en een functionele indeling van de schacht en toerit (zie hoofdstuk 6) kunnen problemen (en dus vertragingen) voorkomen worden.



Figuur 4.6: Aanleg van de betonnen scheidingswand (22).

De portaalframes die gebruikt worden voor de ondersteuning van de wapening en bekisting voor de scheidingswand zorgen voor een beperking van de ruimte in de tunnel, maar zullen normaal gesproken geen belemmering vormen voor trailers. In de berekening van de vertragingen, die veroorzaakt worden door logistieke storingen, zijn de storingen door de afbouw nul gesteld.

¹ Bij de berekening van de vertraging is onderscheid gemaakt tussen korte en middellange storingen, in paragraaf 4.3.6 wordt hier op teruggekomen.

De bouw van de vluchtschachten (zie bijlage 10)

In het ontwerp van de tunnel zijn drie vluchtschachten opgenomen. De constructie van de openingen in de tunnelling, die aangelegd worden om de tunnel met de vluchtschacht te verbinden worden gefaseerd uitgevoerd. Hierbij wordt eerst aan één zijde van de scheidingswand en vervolgens aan de andere zijde gewerkt.

De aanvoer van het benodigde materiaal voor de bouw van de vluchtschachten gaat voornamelijk vanuit de vluchtschacht zelf en voor een klein deel door aanvoer met trailers vanuit de startschacht. De interactie van deze werkzaamheden met de logistiek in de tunnel is minimaal.

De bouw van de luchtschachten (zie bijlage 11)

Voor de ondersteuning van de betonnen tunnelling tijdens de aanleg van de twee luchtschachten in de tunnel wordt een frame aangebracht. Het aanbrengen van dit frame en de werkzaamheden, die uitgevoerd worden tijdens de bouw van de luchtschachten kunnen het transport door de tunnel beïnvloeden.

- De aanvoer en opslag van materiaal voor het frame en het opbouwen van het frame zelf heeft invloed op de logistiek in de tunnel. Waarschijnlijk wordt op geplande tijden (als het transport tijdelijk stil ligt) gewerkt aan het opbouwen van het frame.
- Tijdens het slopen van een deel van de tunnelling, om de luchtschacht met de tunnel te verbinden, gaat het boorproces en ook de aanvoer naar de TBM door. Er bestaat echter een kans dat deze aanvoer tijdelijk gestopt dient te worden (bijvoorbeeld uit veiligheidsoogpunt).
- Tijdens de bouw van de scheidingswand in de luchtschacht wordt wapening en beton aangevoerd en wordt tevens een bekisting opgebouwd. Er bestaat wederom een kans dat het logistieke proces tijdens deze werkzaamheden vertraagd of gestopt wordt.

In de spreadsheet in paragraaf 4.3.6 zijn voor deze storing de volgende invoerwaarden meegenomen.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Bouw luchtschachten | 2 keer per week | Kort | 2 keer 2 maanden |

§ 4.3.2 Storingen door problemen met personeel en de ploegwissel

Het werken in ploegdiensten heeft bij alle projecten, die bezocht zijn invloed op de voortgang van de TBM. Vlak voor en na een ploegwissel ligt het boorproces meestal tijdelijk stil, wat als inefficiëntie van het logistieke systeem mag worden beschouwd. Bij de kwantificering van de risico's worden vertragingen als gevolg van een ploegwissel zeker meegenomen.

Bij de Boortunnel Groene Hart wordt gewerkt met drie ploegen, waarvan dagelijks twee ploegen 10 uur werkzaam zijn. Dit houdt in dat er dagelijks éénmaal een ploegwissel is die de voortgang van de TBM kan beïnvloeden.

Naast vertragingen door de ploegwissel zijn er ook vertragingen door het uitvallen van personeel, door ziekte of kleine ongevallen. Als één medewerker van de boorploeg uitvalt heeft dat nog niet gelijk veel invloed op de voortgang van het bouwproces.

Bij de berekening van de vertragingen worden de volgende waarden meegenomen.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|-------------|----------------|-----------------|----------------|
| Ploegwissel | 1 keer per dag | ½ uur | Gehele project |

§ 4.3.3 Storingen door het falen van een component van het logistieke systeem

De componenten van het logistieke systeem, die voor storingen van het boorproces kunnen zorgen, zijn ingedeeld in vier categorieën (zie figuur 4.2), namelijk:

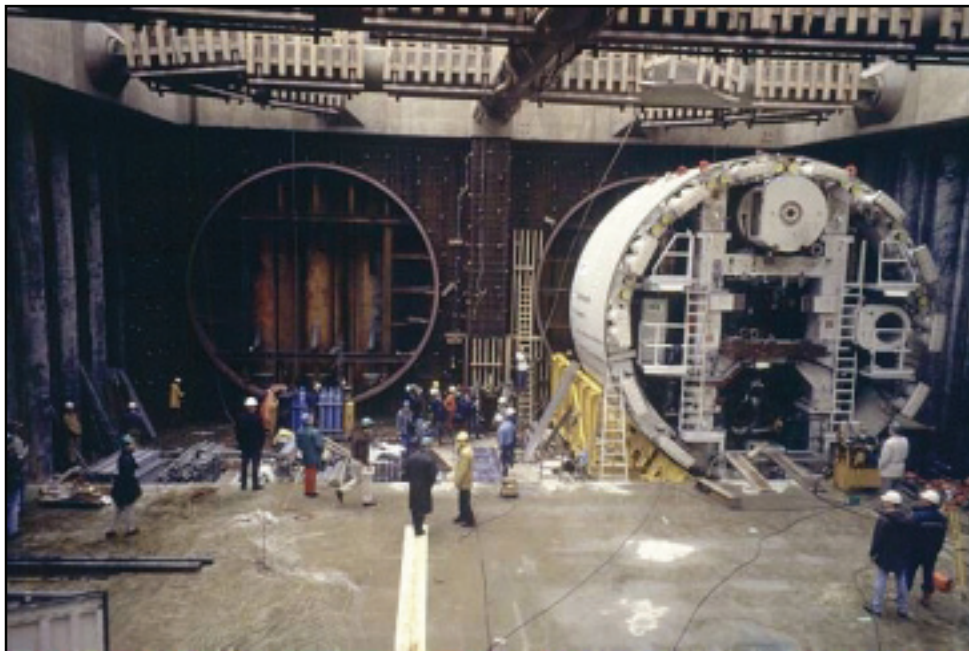
- Laden,
- Transport,
- Lossen,
- Overige componenten.

Storingen bij het laden van trailers

De storingen, die kunnen ontstaan bij het laden van de trailers worden veroorzaakt door het falen van kranen en stortkokers en het laden van te weinig grout.

Storingen door het falen van kranen

De kranen, die gebruikt worden voor het laden van de segmenten en de kabelkoker elementen kunnen door verschillende oorzaken falen. Kort durende storingen kunnen bijvoorbeeld veroorzaakt worden door kortsluiting. Er worden bij het laden twee kranen ingezet en de kans dat die beide niet werken is zeer klein, bij de uitvoering van de Westerscheldetunnel (waar ook twee kranen worden gebruikt) is dat in meer dan één jaar slechts één keer voorgekomen.



Figuur 4.7: Blik in de startschacht van de Tweede Heinoordtunnel (23).

Bij de kwantificering van de vertragingen wordt aangenomen dat bij zeer extreme weersomstandigheden (zoals ijzel of onweer) geen gebruik gemaakt kan worden van de kranen.

Storingen door het falen van stortkokers

Het laden van grout en zand/cement in de trailers wordt uitgevoerd met stortkokers, de kans op het falen van dit laadsysteem en van de aanvoer naar de stortkokers is afhankelijk van de bedrijfszekerheid van deze installaties. Bij de Westerscheldetunnel is gebleken dat de bedrijfszekerheid heel slecht kan zijn (bij de start van het project was er soms een vertraging van 2 dagen per week), maar ook dat deze met enkele aanpassingen goed verbeterd kan worden.

De duur van de vertraging als gevolg van het falen is afhankelijk van de reparatietijd (en dus o.a. van de aanwezigheid van reserve onderdelen), deze is niet zeer groot.

Bij de berekening van de vertraging door het falen van de stortkokers is een gemiddelde waarde ingevoerd, waarin is meegenomen dat de frequentie van de storingen per periode verschillend is (leercurve).

Storingen door het laden van onvoldoende grout

Een andere oorzaak van vertragingen bij boortunnelprojecten, die tot de logistiek gerekend mag worden is de aanvoer van grout. De hoeveelheid grout die per geboorde ring wordt toegepast, is niet constant. Deze is afhankelijk van de hoeveelheid ontgraven grond, van de druk waaronder het grout wordt aangebracht en de eigenschappen van de grond rond de tunnel. Het is mogelijk dat per geboorde ring meer grout wordt gebruikt, dan er wordt aangevoerd, met als gevolg extra grouwtransport. Als de transportafstanden toenemen, neemt ook de duur van de vertraging van de boormachine als gevolg van het extra transport toe.

De marge tussen het volume van de grond dat theoretische wordt ontgraven en het volume van het grout dat wordt aangevoerd is:

$$\text{Ontgraven: } \frac{1}{4} \pi l (D_u^2 - D_i^2) = \frac{1}{4} \pi 2,0 (14,85^2 - 14,50^2) = 16,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Aangevoerd: } \pm 22 \text{ m}^3$$

Marge:

$$\frac{22}{16,1} * 100\% = 37 \%$$

Een vuistregel zegt dat normaal gesproken 30-40 % meer grout wordt toegepast dan het berekende volume. Het is dus mogelijk dat het tijdens de uitvoering voorkomt dat er te weinig grout wordt aangevoerd. De vertraging door de aanvoer van extra grout is afhankelijk van de af te leggen afstand in de tunnel, die bij deze tunnel meer dan 7 kilometer kan bedragen. Door goede communicatie tussen de boorploeg en de medewerkers in de schacht (op tijd waarschuwen als grout gebruik toeneemt) kan dit probleem geminimaliseerd worden. Het blijkt echter in de praktijk niet helemaal uit te sluiten te zijn.

Daarnaast is er het probleem dat grout maar een bepaalde tijd houdbaar is, omdat het in stilstaande situatie verhardt. Na langere stilstand van de boormachine dient het grout dus vervangen te worden. In de praktijk blijkt echter dat dit zelden tot extra vertraging van de boormachine leidt, omdat er tijdens de stilstand van de machine genoeg tijd is om opnieuw een voorraad grout aan te voeren. Het verharderen van grout in de leidingen van de TBM is wel een probleem, maar dat valt buiten de scope van dit onderzoek.

Dit zijn de waarden, die worden meegenomen voor de storingen tijdens het laden.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|-------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Falen kranen | 1 keer per 3 maanden | Middellang | Gehele project |
| Falen stortkokers | 1 keer per maand | Kort | Gehele project |
| Onvoldoende grout | 1 keer per maand | Kort | Gehele project |

Storingen bij het transport

De storingen die kunnen ontstaan bij het transport worden veroorzaakt door het falen van trailers, het falen van het leidingtransport en het vastlopen van het transportsysteem.

Falen van trailers

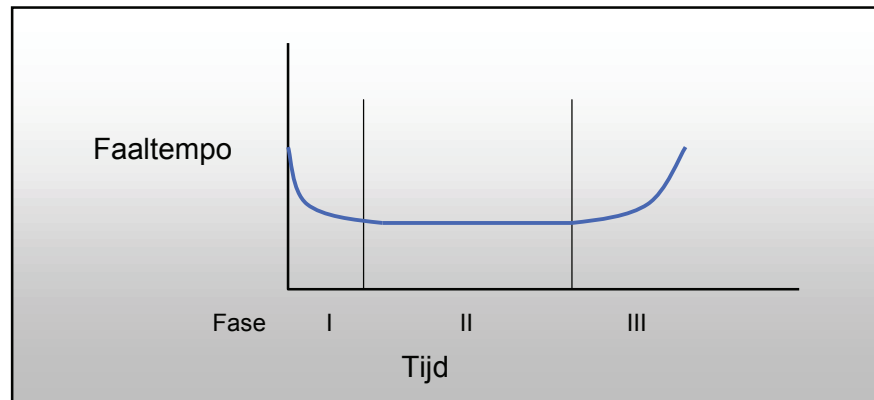
Als een trailer in de tunnel tot stilstand komt (bijvoorbeeld door een motorisch probleem, een lekke band of een stuurfout) leidt dit tot een blokkade waardoor de aanvoer van materiaal onderbroken wordt, met uiteindelijk een stilstand van de boormachine tot gevolg. Tot de kapotte trailer gerepareerd is, kan een alternatief transportmiddel (vrachtwagen) of een reserve trailer worden ingezet, om de gevolgen voor de voortgang van de TBM te minimaliseren.

De duur van de vertraging van de TBM hangt in eerste instantie af van de mogelijkheid de trailer ter plaatse te repareren, of de aanwezigheid van een voertuig dat de trailer naar de schacht kan slepen. De maatgevende massa, die door het voertuig weggesleept dient te worden is een geladen trailer met zand/cement of beton van rond de 100 ton.

Als er geen alternatief transportmiddel is om de plek van een kapotte trailer in te nemen is de vertraging van de TBM in tweede instantie afhankelijk van duur van de reparatie van deze trailer. De duur van die reparatie is weer voor een deel afhankelijk van de aanwezigheid van onderdelen op de site, het is dus aan te raden om een voorraad onderdelen stand-by te houden als er geen alternatieve transportmiddelen zijn.

Bij de kwantificering van de gevolgen van het falen van een trailer is aangenomen dat er een sleepvoertuig en een alternatief transportmiddel op de bouwplaats aanwezig zijn.

De kans dat één van de trailers (ruwbouw en afbouw) faalt tijdens het boorproces wordt geraamd aan de hand van de zogenaamde badkuipkromme [2].



Figuur 4.8: Badkuipkromme (24).

Deze functie beschrijft het verloop van het faalt tempo in de tijd en kan worden ingedeeld in drie fasen:

- De beginfase, waarbij falen optreedt als gevolg van bouw- en ontwerpfouten.
- De middenfase, waarin calamiteiten en extreme omstandigheden een rol spelen.
- De eindfase met verhoogd faalt tempo ten gevolge van veroudering of slijtage.

De slijtage van de trailers is afhankelijk van de weg die afgelegd wordt (en neemt dus toe in de tijd). Met een eenvoudige berekening kan aangetoond worden dat de weg die de trailers totaal afleggen minder dan 15.000 km is. Een verhoogd faalt tempo ten gevolge van veroudering doet zich dan nog niet voor, ondanks dat de trailers intensief worden gebruikt. De trailers worden nieuw aangeschaft, wat een voordeel is t.o.v. de tweedehands treintjes die bij vergelijkbare tunnelbouw projecten in Nederland zijn gebruikt.

Door stuurfouten kan het gebeuren dat een trailer tegen de scheidingswand aan, of van de kabelkoker af rijdt. Om de kans hierop te minimaliseren worden de trailers uitgerust met een guidance system. Dit systeem neemt de besturing van de trailer over ter plaatse van een smalle doorgang. Alleen als dit systeem faalt dient de chauffeur zelf te sturen.

Falen van het leidingtransport

Er zijn bij boortunnel projecten veel problemen rond het leidingtransport, dit zijn de belangrijkste:

- Bentoniet lekkages, die bijvoorbeeld kunnen optreden tijdens het verlengen of door het springen van flexibele leidingen. Ook het opruimen van de slurry die hierdoor gemorst wordt, zorgt voor vertragingen.
- Het losschieten van verbindingen als gevolg van een drukgolf, die ontstaan na het (te snel) sluiten van een klep in het leidingstelsel.
- Het verlengen van de elektriciteitskabel naar de TBM (elke 250 meter) duurt vaak langer dan gepland.
- Het verstopt raken van leidingen, bijvoorbeeld door het verklevan van klei tot grote bonken in de leidingen.

- Onjuiste afstelling of interactie tussen de verschillende pompen kan tot problemen bij het leidingtransport leiden [13].

Gegevens over storingen, die bij die projecten zijn opgetreden, kunnen niet één op één worden overgenomen. Bij de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart wordt namelijk niet 24 uur per dag geboord, maar slechts 20 uur en de overgebleven 4 uur worden gebruikt voor onderhoud. Tijdens deze 4 uur van onderhoud kunnen de leidingen verlengd worden, met als gevolg dat het risico voor vertraging van de TBM kleiner wordt.

Bij de Westerscheldetunnel worden de bentonietleidingen elke 12 meter verlengd (twee buisdelen van 6 meter worden tegelijk geplaatst) en bij de Groene Harttunnel elke 9 meter, wat de kans op storingen weer groter maakt.

Bentoniet lekkages bij het verlengen van de leidingen op de TBM bij de Boortunnel Groene Hart worden tegengegaan, omdat opvangbakken op de TBM zijn geplaatst. Bij de Westerscheldetunnel wordt de elektriciteitsleiding elke 300 meter verlengd, bij de Boortunnel Groene Hart elke 250 meter. Bij de Groene Harttunnel wordt dit voornamelijk gedaan tijdens één van de dagelijkse onderhoudsperioden.

Bij de kwantificeren van deze storing zijn de bovenstaande feiten meegenomen.

Vastlopen van het transportsysteem

Bij de aanleg van de Westerscheldetunnel en de Sophiaspoortunnel is het logistieke systeem na een bepaalde voortgang maatgevend voor de voortgang van de TBM. Kleine afwijkingen in de geplande cyclustijden hebben dan direct invloed op de voortgang van het project.

Bij de Projectorganisatie HSL-Zuid is onbekend in hoeverre kleine afwijkingen van de geplande cyclustijden kunnen leiden tot het vertragen van het boorproces bij de Boortunnel Groene Hart.

Voorlopig is aangenomen dat de invloed nihil is, omdat transport aan beide zijden van de scheidingswand mogelijk is. In hoofdstuk 5 wordt onderzocht of deze aanname terecht is.

Dit zijn de waarden, die worden meegenomen voor de storingen tijdens het transport.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|-------------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Falen trailers | 1 keer per maand | Middellang | Gehele project |
| Falen leidingtransport | 1 keer per week | Kort | Gehele project |
| Verlengen elektriciteit | 1 keer per 250 meter | Kort | 7160 meter |

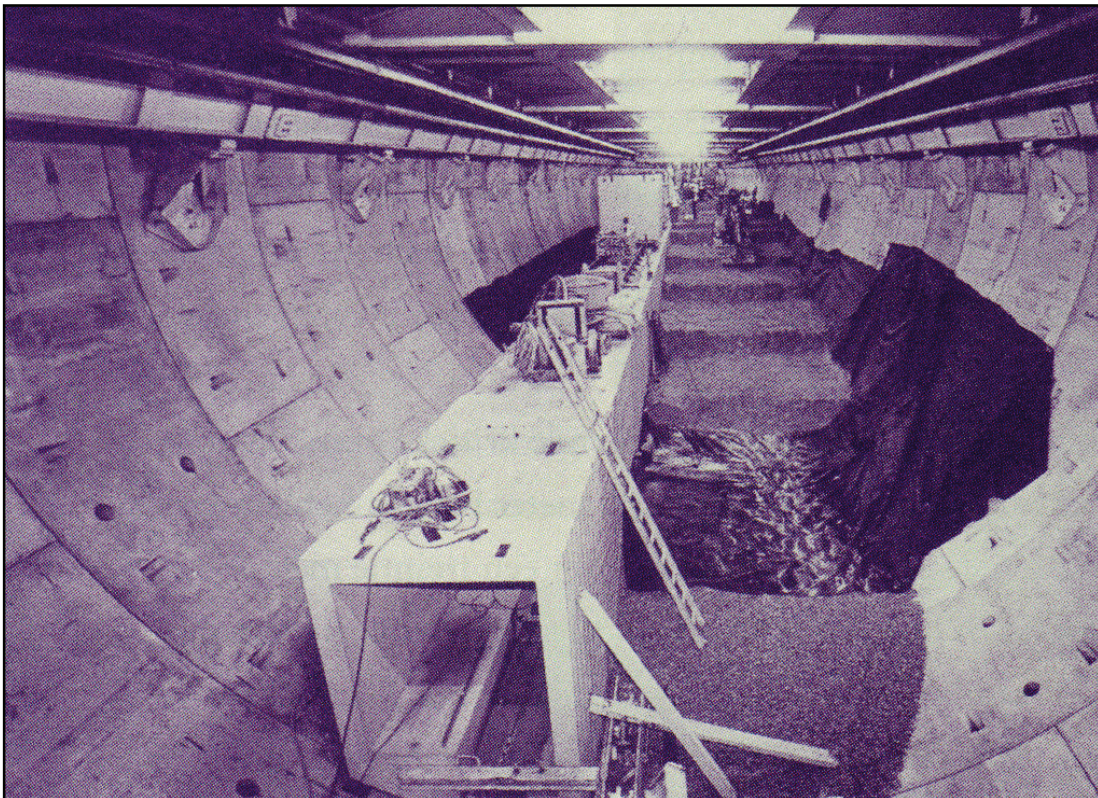
Storingen bij het lossen van trailers

De storingen die kunnen ontstaan bij het lossen van de trailers worden veroorzaakt door problemen bij het lossen van de zand/cement stabilisatie en het beschadigen van segmenten en kabelkoker elementen.

Problemen bij het lossen van zand/cement

Er zijn twee mogelijke oorzaken voor problemen bij het lossen van zand/cement stabilisatie. Ten eerste het falen van de kleppen op de zand/cement trailer en ten tweede het verkleven van de stabilisatie in de bakken op de trailer.

Als gevolg hiervan raakt de aanleg van stabilisatie achter op de voortgang van het boorproces. In het ergste geval kan een situatie ontstaan, waarin de trailers een heel lang stuk over de technische galerij moeten rijden om bij de TBM te komen. Er is een kans dat deze problemen zich voor gaan doen, maar de invloed op de voortgang van de TBM is klein. Mocht de zand/cement aanvoer achtterraken, kunnen altijd nog (tijdelijk) vrachtwagens worden ingezet.



Figuur 4.9: Afbouw van de Westerscheldetunnel, gezien vanaf de TBM (25).

Schade aan de segmenten en elementen

De segmenten worden normaal gesproken gecontroleerd voordat ze geladen worden en tijdens transport en lossen treden schades vrijwel niet op. Alleen bij zeer ernstige beschadiging van een segment, tijdens het plaatsen, wordt een ring uitgebouwd. Soms blijven zelfs de zwaar beschadigde ringen zitten, omdat het onveilig is de ring te transporteren. Als een ring wordt uitgebouwd en afgevoerd (wat zeer zeldzaam is) heeft die een korte vertraging van de TBM tot gevolg.

Dit zijn de waarden, die worden meegenomen voor de stringen tijdens het lossen.

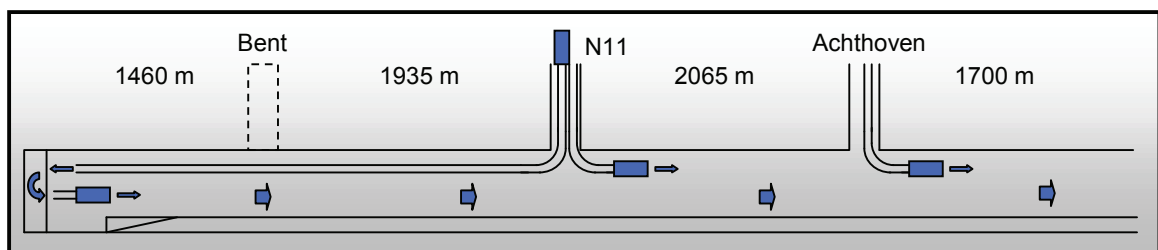
| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|----------------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| Schade aan segmenten | 1 keer per 100 ringen | Kort | 3580 ringen |

Storingen van overige componenten

De storingen, die kunnen ontstaan bij de overige componenten van het logistieke systeem worden veroorzaakt door het falen van ventilatoren, het falen van de signalering en ongepland onderhoud.

Falen van ventilatoren

Voor de aanvoer van verse lucht in de tunnel wordt in eerste instantie slechts één ventilator geplaatst in de startschacht. Als de lengte van het geboorde deel van de tunnel toeneemt, worden ventilatoren in de vluchtschachten geplaatst (zie figuur 4.10).



Figuur 4.10: Ventilatorconfiguratie in de tunnel.

Er bestaat een kans dat één van de ventilatoren faalt. Voor het klimaat in de tunnel betekent dit o.a. een toename van de temperatuur en de CO₂ concentratie in de tunnel, met als gevolg een ongezonde/onwerkbaar situatie en een tijdelijke onderbreking van het boorproces.

De frequentie van het uitvallen van een ventilator tijdens de uitvoering is bij de bezochte projecten niet zeer groot. Bij de kwantificering van de vertraging is er van uit gegaan dat er reserve onderdelen of reserve ventilatoren aanwezig zijn op de bouwplaats, zodat de vertraging niet zo groot is.

Falen van de signalering

De kans op vertragingen van de boormachine door het falen van het signaleringssysteem zijn moeilijk aan te geven en hangen sterk af van het gekozen systeem. Een systeem met veel elektrische componenten (zoals lussen op de weg of optische waarneming) faalt sneller dan een simpel stoplicht met een vast ingestelde tijd voor rood en groen. Daarnaast speelt ook de voeding en de eventuele back-up hiervan een rol bij de kans op falen. De signalering dient zo aangebracht te worden dat de trailers deze niet kunnen beschadigen bij het normale transportproces. De faalkans, die hier ingevoerd wordt bij de berekening van de gevolgen van een storingen, is niet afhankelijk van het systeem dat gekozen wordt.

De gevolgen van het uitvallen van de signalering hangen af van de mogelijkheid om zonder het systeem de aanvoer naar de TBM te organiseren. De aanname bij de kwantificering van deze storing is dat er wel transport is als de signalering faalt, maar dat vertragingen niet te vermijden zijn.

Naast de vertragingen, die het gevolg kunnen zijn van het falen van de signalering kunnen er ook gevaarlijke situaties ontstaan voor personeel dat werkzaam is in de tunnel. Dit is echter een veiligheidsrisico en die zijn in hoofdstuk 6 beschreven.

Ongepland onderhoud

Het uitvoeren van ongepland onderhoud aan het materieel dat ingezet wordt, is bij vergelijkbare projecten regelmatig een oorzaak van vertragingen. Het is aannemelijk om te veronderstellen dat er meer onderhoud is bij de inzet van meer materieel, zoals bij de Boortunnel Groene Hart. Een groot deel van dit onderhoud vindt echter plaats tijdens de dagelijkse onderhoudsperiode. Het onderhoud vindt voornamelijk plaats aan de trailers. Bij de kwantificering van de vertraging door het falen van trailers is ongepland onderhoud als oorzaak nog niet meegenomen (zo wordt dubbeltelling voorkomen).

Dit zijn de waarden, die worden meegenomen voor de stringen van de overige componenten.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|---------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Falen ventilator | 1 keer per 3 maanden | Kort | Gehele project |
| Falen signalering | 1 keer per 2 maanden | Kort | Gehele project |
| Ongepland onderhoud | 1 keer per 2 maanden | Middellang | Gehele project |

§ 4.3.4 Stringen door problemen met veiligheid en gezondheid

Bij de uitvoering van een groot project als de Boortunnel Groene Hart zijn zeer veel mensen betrokken en er worden allerlei werkzaamheden uitgevoerd met uiteenlopende werkmethoden. De kans op ongevallen tijdens de uitvoering wordt hierdoor sterk beïnvloed. De aannemer en de opdrachtgever streven ernaar om het aantal (ernstige) ongevallen te minimaliseren, maar in de praktijk blijkt dat bijna onmogelijk (zie hoofdstuk 6). De oorzaak van de ongevallen dient vaak gezocht te worden in onveilige interacties van het logistieke systeem.

Als er een ernstig ongeval plaatsvindt tijdens de bouw, wordt het werk vrijwel altijd stilgelegd, wat weer invloed heeft op de voortgang van het project. Ook de arbeidsinspectie kan onveilige werkomstandigheden constateren en eisen dat het werk wordt gestopt, totdat de benodigde veiligheidsmaatregelen zijn genomen.

Bij de berekening van de vertragingen door ongevallen en V & G problemen worden de volgende waarden meegenomen.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| V & G problemen | 1 keer per 6 maanden | Middellang | Gehele project |

§ 4.3.5 Stringen door problemen met communicatie

Om fouten (en herhaling van fouten) te voorkomen is een juiste informatieoverdracht, met name tussen de verschillende ploegen zeer belangrijk. Bij de Westerscheldetunnel, waar gewerkt wordt met mensen van veel verschillende nationaliteiten zijn er vertragingen als gevolg van problemen met de communicatie [31]. Bij de Boortunnel Groene Hart wordt ook gewerkt met mensen van verschillende nationaliteiten, maar de problemen met de communicatie tussen de ploeg op de TBM

en de mensen op de bouwplaats gaat vooral over de aanvoer van een bepaald type ring, waar bij deze tunnel geen sprake van is.

Het ontbreken of falen van communicatiemiddelen is een verwaarloosbaar risico, omdat verschillende systemen (radio, computer, telefoon) kunnen worden toegepast, die zeer betrouwbaar zijn. Het probleem is het doorgeven van de juiste informatie aan de juiste personen, als dit niet goed gebeurt kunnen bij een groot project veel problemen ontstaan.

Het kwantificeren van vertragingen als gevolg van deze gebrekkige communicatie is echter zeer moeilijk, omdat slechte communicatie de oorzaak is van veel eerder genoemde problemen. Om dubbeltelling bij de kwantificering van de storingen zo goed mogelijk te voorkomen wordt communicatie daar buiten beschouwing gelaten.

Communicatie blijft echter een item om rekening mee te houden. Na een periode van stilstand (of vlak voor het hervatten van het boorproces) dient ook het logistieke proces op gang gebracht te worden, zodat vertragingen beperkt blijven.

§ 4.3.6 Kwantificering van de storingen

De vertraging van het boorproces door storingen van het logistieke systeem is éénmaal berekend met deterministische invoer en éénmaal met stochastische invoer.

Kwantificering van de storingen met deterministische invoer

Uit de voorgaande paragrafen is de onderstaande tabel met storingen voortgekomen.

| Storing | Frequentie | Duur vertraging | Periode |
|-------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|
| Afbouw startschacht | 1 keer per week | Kort | 3 maanden |
| Bouw luchtschachten | 2 keer per week | Kort | 2 keer 2 maanden |
| Ploegwissel | 1 keer per dag | ½ uur | Gehele project |
| Falen kranen | 1 keer per 3 maanden | Middellang | Gehele project |
| Falen stortkokers | 1 keer per maand | Kort | Gehele project |
| Onvoldoende grout | 1 keer per maand | Kort | Gehele project |
| Falen trailers | 1 keer per maand | Middellang | Gehele project |
| Falen leidingtransport | 1 keer per week | Kort | Gehele project |
| Verlengen elektriciteit | 1 keer per 250 meter | Kort | 7160 meter |
| Schade aan segmenten | 1 keer per 100 ringen | Kort | 3580 ringen |
| Falen ventilator | 1 keer per 3 maanden | Kort | Gehele project |
| Falen signalering | 1 keer per 2 maanden | Kort | Gehele project |
| Ongepland onderhoud | 1 keer per 2 maanden | Middellang | Gehele project |
| V & G problemen | 1 keer per 6 maanden | Middellang | Gehele project |

Tabel 4.1: Kwantitatieve gegevens over de storingen.

De vertraging van de TBM, die het gevolg is van een logistieke storing, is nu eenvoudig uit te rekenen m.b.v. formule 4.1.

In een Excel 97 spreadsheet zijn de volgende invoergegevens vermenigvuldigd:

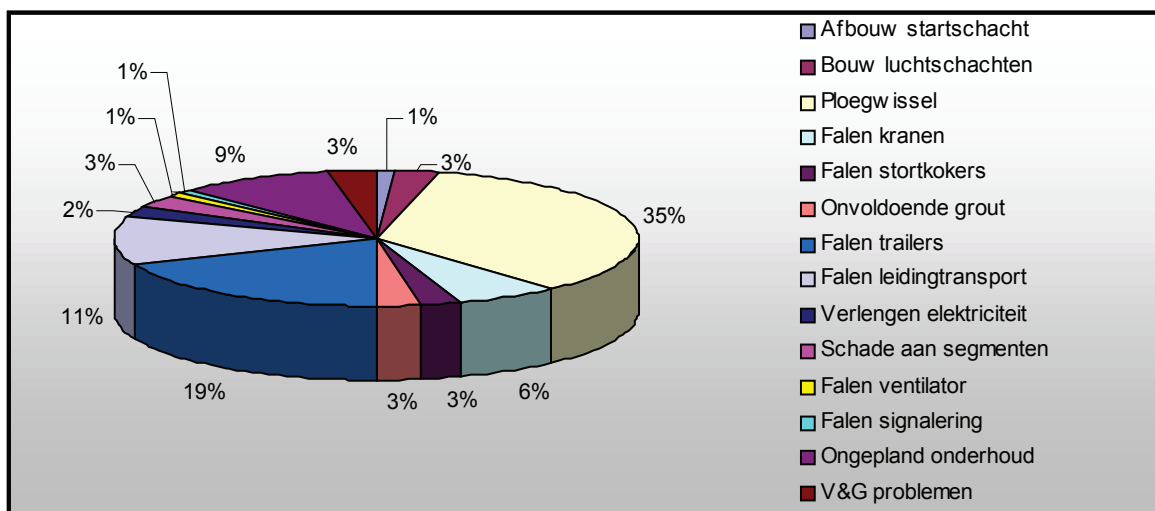
- de frequenties (uit tabel 4.1),
- de duur van de vertragingen (kort = 1 uur en middellang = 7 uur),
- de periode waarin de storing voor kan komen (uit bijlage 8 blijkt dat de duur van het gehele project 819 dagen is).

Na het optellen van alle storingen blijkt dat de (bovengrens van de) duur van de vertraging van de TBM als gevolg van het falen van de logistiek in de tunnel 59 dagen is (zie bijlage 14).

$$\sum_i \text{vertraging (i)} = 59 \text{ dagen}$$

Dit is een bovengrens, omdat logistieke storingen met elkaar, of met andere storingen van het boorproces samen kunnen vallen. Om dit te verdisconteren dient men de vertraging te vermenigvuldigen met een factor, die de kans aangeeft dat logistieke storingen **niet** samenvallen met andere storingen van het boorproces. Voor deze factor kan een waarde van ongeveer 0,6 à 0,7 genomen worden, omdat er andere componenten van het boorproces (zoals bijvoorbeeld de TBM) zijn, die veel gevoeliger zijn voor storingen.

De bijdrage van de verschillende storing aan de totale vertraging van 59 dagen, is weergegeven in figuur 4.11.



Figuur 4.11 Bijdrage van de verschillende storingen aan de totale vertraging a.g.v. het falen van het logistieke systeem in de tunnel.

Vertaald naar de risico kwantificering van B/K (zie hoofdstuk 3) is de grootte van het risico voor logistieke storingen gelijk aan:

Kans (vrijwel zeker, bijna opgenomen in planning (50%)) = 5

Effect in tijd (1-3 maanden) = 2

Risico = Kans * Effect = 5 * 2 = 10

Nota Bene:

Bij de berekening van de gemiddelde boorsnelheid door B/K (bijlage 4) is al rekening gehouden met vertragingen door storingen. Om te kunnen bepalen of er voldoende rekening is gehouden met storingen, dienen ook alle overige storingen (van de TBM, de scheidingsinstallatie, enz) gekwantificeerd te worden. Die kunnen dan vergeleken worden met de gegevens van B/K.

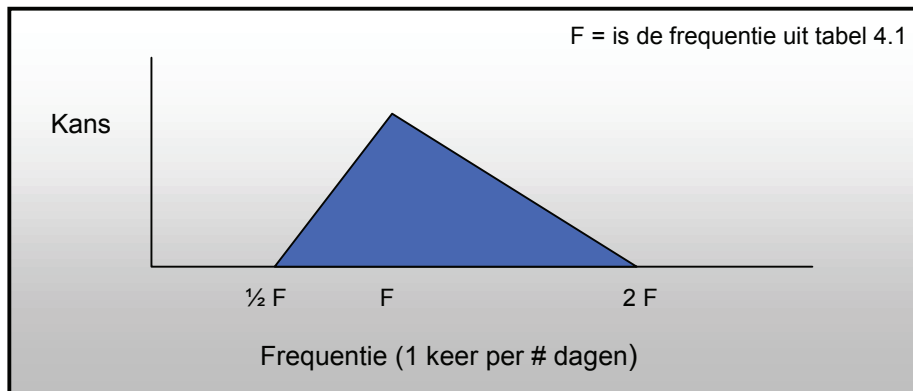
Dit onderzoek naar een deel van de logistieke storingen kan dus deel uit maken van een onderzoek naar de betrouwbaarheid van de gehele planning.

Kwantificering van de storingen met stochastische invoer

Om enig inzicht te krijgen in een mogelijke kansverdeling van de vertraging als gevolg van storingen in het logistieke systeem, zijn voor de frequentie van de storingen en de duur van de vertraging stochastische parameters ingevoerd. De deterministische waarden voor de periode waarin een storing voor kan komen zijn gelijk gebleven.

Voor de stochastische verdeling van de frequentie van een storing is een driehoeksverdeling gekozen, met de volgende waarden (zie figuur 4.12):

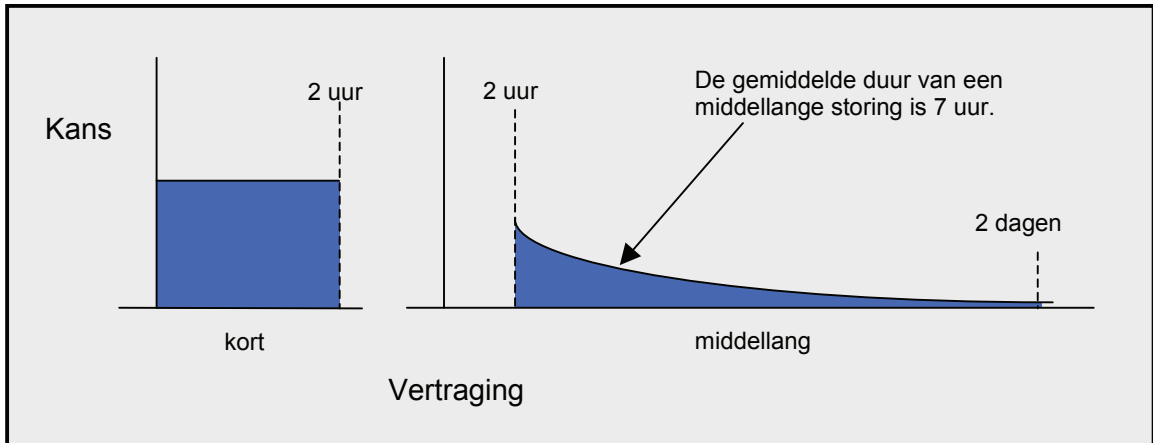
- Minimale frequentie: de helft van de waarde uit tabel 4.1
- Meest waarschijnlijke frequentie: de waarde uit tabel 4.1
- Maximale frequentie: tweemaal de waarde uit tabel 4.1



Figuur 4.12: Stochastische verdeling van de frequentie van een bepaalde storing.

Voor de stochastische verdeling van de duur van de vertraging, die door een bepaalde storing wordt veroorzaakt, zijn twee verschillende verdelingen gekozen (zie figuur 4.13).

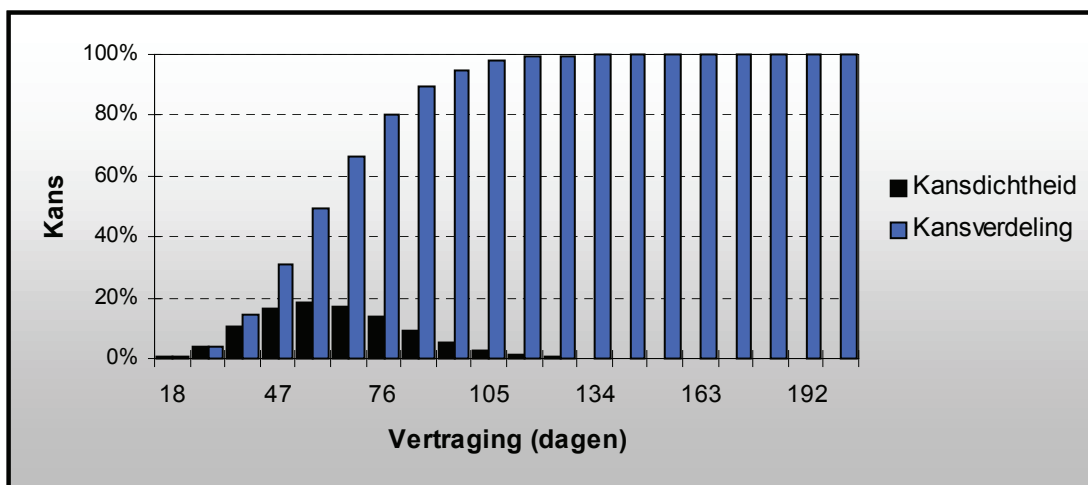
- Voor een korte storing wordt een uniforme verdeling met een vertraging tot 2 uur ingevoerd, omdat de verwachting is dat de vertragingen door korte storingen evenredig verdeeld zijn binnen de periode van 2 uur.
- Voor een middellange storing wordt een dalende Gamma verdeling ingevoerd, die verloopt van 2 uur tot (ongeveer) 2 dagen. Er is voor deze verdeling gekozen, omdat storingen van minder dan één dag significant vaker voorkomen dan storingen van meer dan één dag.



Figuur 4.13: Stochastische verdeling van duur van de vertraging, die door een storing wordt veroorzaakt.

De invoer voor de duur van de periode waarin de storing voor kan komen is (als gezegd) gelijk gehouden.

Deze gegevens zijn ingevoerd in een @Risk™ spreadsheet en hebben de volgende verdeling van de vertraging a.g.v. logistieke storingen opgeleverd (zie figuur 4.14).



Figuur 4.14: Kansverdeling en kansdichtheid van de vertraging a.g.v. storingen.

Bij deze figuur horen de volgende karakteristieke waarden (in de laatste drie kolommen zijn de waarden uitgedrukt in waarden die B/K gebruikt in de risico analyse van hoofdstuk 3):

| Kans | Gevolg (dagen) | Kans | Gevolg | Risico |
|---------|----------------|------|--------|--------|
| < 0,1 % | 200 | 1 | 4 | 4 |
| 1 % | 115 | 2 | 3 | 6 |
| 10 % | 96 | 3 | 3 | 9 |
| 25 % | 82 | 4 | 3 | 12 |
| 50 % | 67 | 5 | 2 | 10 |

Tabel 4.2: Karakteristieke waarden van figuur 4.14

Vertaald naar de risico kwantificering van B/K (zie hoofdstuk 3) is de grootte van het risico voor logistieke storingen gelijk aan:

Kans (er is een reële kans (25%)) = 4

Effect in tijd (3-6 maanden) = 3

Risico = Kans * Effect = 4 * 3 = 12

Ook voor deze waarde geldt dat het een bovengrens is, omdat niet is meegenomen dat storingen kunnen samenvallen met andere oorzaken voor stilstand van de TBM. Ondanks dat geldt voor een risico met een score van 12, dat monitoring tijdens de uitvoering noodzakelijk is en dat risico verlagende maatregelen genomen dienen te worden als de vertraging door storingen te groot wordt.

§ 4.4 TOELICHTING OP EN KWANTIFICERING VAN DE BIJZONDERE GEBEURTENISSEN

De bijzondere gebeurtenissen, die in paragraaf 4.1.2 zijn opgesomd, worden hier toegelicht en gekwantificeerd.

§ 4.4.1 Toelichting op de bijzondere gebeurtenissen

De volgende bijzondere gebeurtenissen, binnen het logistieke systeem bij de Boortunnel Groene Hart, kunnen de voortgang van het boorproces negatief beïnvloeden.

Het instorten van een bekistingsframe

Er bestaat een kleine kans dat de frames die in de tunnel op de anti-ontsporingranden rijden hier vanaf raken en instorten. Het verwijderen van het ingestorte frame, het herstellen van eventuele schade en het installeren van een vervangend frame kan enkele weken duren.

Maatregelen die te nemen zijn om dit te voorkomen, zijn het testen van de stabiliteit van de frames bij extreme belastingen en het reduceren van de snelheid van de trailers bij het passeren van de frames.

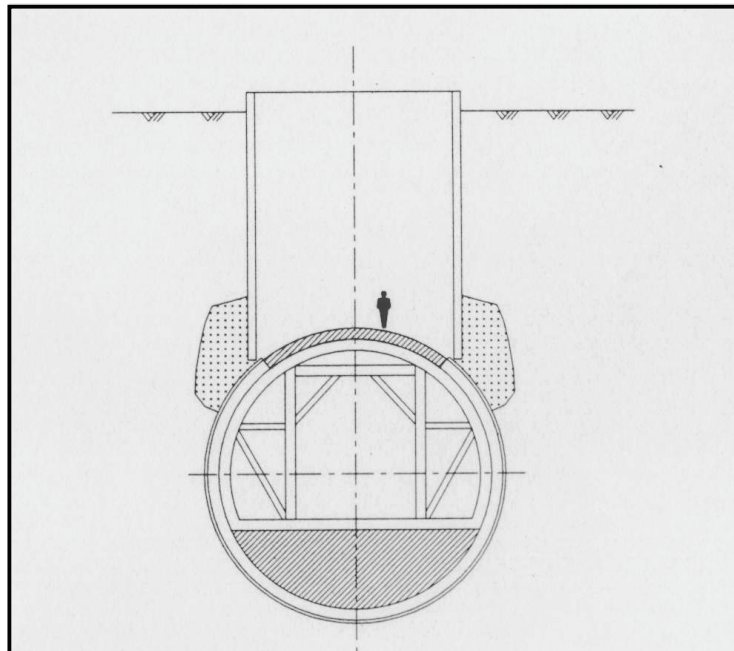
Het bezwijken van de bekisting

Als de bekisting van de scheidingswand niet op de juiste wijze wordt aangebracht kan deze (bijvoorbeeld tijdens het verdichten van het beton) bezwijken. Het gevolg is dat een maximale hoeveelheid van 52 m³ beton de tunnel in stroomt. Het opruimen van deze hoeveelheid beton en het (eventueel) vervangen van de bekisting kan maximaal enkele weken duren.

Het zekeren van de bekisting voordat het beton gestort wordt, is een mogelijkheid om dit risico te minimaliseren. Daarnaast is ook goed onderhoud zeer belangrijk.

Het bezwijken van het frame, dat de lining steunt tijdens de aanleg van de luchtschachten

Het frame, dat in de tunnel wordt opgebouwd voor de ondersteuning van de tunnelling tijdens de aanleg van de luchtschachten, kan tijdens de bouw geheel of gedeeltelijk instorten. Dit kan het gevolg zijn van een aanrijding, of doordat de constructie onvoldoende gesteund wordt tijdens de bouw (zie figuur 4.14).



Figuur 4.14: Frame voor de ondersteuning van de lining tijdens de aanleg van een luchtschacht (26).

In het ergste geval kan dit probleem meerdere keren voorkomen. De gevolgen zijn dan dat het transport naar de TBM gestopt dient te worden tot de weg weer vrij is voor trailers.

Het falen van een trailer

Trailers kunnen tijdens de bouw van de tunnel falen, bijvoorbeeld door motorische/mechanische problemen, of door een stuurfout.

Uit het ongeval dat heeft plaats gevonden bij de Westerscheldetunnel [30] blijkt dat de TBM ernstig beschadigd kan worden a.g.v. het falen van een trailer. Het falen van het remsysteem van een trailer bij de Boortunnel Groene Hart, kan tot gevolg hebben, dat een trailer door een te hoge snelheid de opening in de scheidingswand niet kan passeren, of niet kan stoppen bij de boormachine. De mogelijke gevolgen hiervan zijn schade aan de scheidingswand, aan de TBM en aan één of meerdere trailers, maar ook lichamelijk letsel.

Mocht één van de vier ruwbouwtrailers om één of andere reden onherstelbaar beschadigd raken, dan heeft dat direct gevolgen voor het boorproces, omdat de voortgang van de TBM afhankelijk is van de aanvoer van alle vier de trailers. In principe zijn er op de bouwplaats geen reserve trailers aanwezig. Het falen van één

trailer kan dus grote gevolgen hebben voor de voortgang van de booractiviteiten. De vertraging van de TBM kan beperkt worden door alternatieve transportmiddelen (zoals vrachtwagens) in te zetten.

Een andere en betere maatregel, die genomen kan worden om vertragingen te verkleinen is het produceren van extra trailers, die vanaf het begin van het boorproces stand-by op de bouwplaats aanwezig zijn. Om te bepalen of dit rendabel is, volstaat een vergelijking van de extra kosten van een stand-by trailer ten opzichte van het risico van de stilstand van de boormachine. Bij de vergelijking van de kosten is aangenomen dat een stand-by trailer omgebouwd kan worden, zodat elke lading getransporteerd kan worden.

Het produceren van een stand-by trailer is rendabel als:

Kosten stand-by trailer \leq Risico vertraging

De kosten voor de productie van een extra trailer liggen rond de 1 miljoen gulden, deze kostprijs is bepaald op basis van gegevens over de kosten van een truckchassis uit de VGBouw [9].

Kosten stand-by trailer = 1.000.000,-

Het risico van een vertraging is gelijk aan de kosten, die het gevolg zijn van het onherstelbaar falen van een trailer vermenigvuldigd met de kans daarop. De kosten van het stilstaan van de boormachine komen voort uit het niet benutten van de productiecapaciteit op de bouwplaats, deze kosten hebben een orde van 200.000,- per dag. Dit bedrag is bepaald op basis van de kosten (5,1 miljoen gulden) die zijn gemaakt tijdens de 4 weken stilstand van de TBM bij de Tweede Heineoordtunnel a.g.v. een blow-out. De vertraging die de TBM oploopt in de periode dat alternatieve transportmiddelen worden ingezet wordt geschat op 6 dagen. Daarnaast wordt na het onherstelbaar falen van een trailer hoe dan ook een nieuwe geproduceerd, die de plaats van de kapotte trailer dient te vervangen. De kans dat één trailer onherstelbaar faalt bij de uitvoering van het project is onbekend, maar wordt geschat op 50%.

Het risico voor kosten a.g.v. het onherstelbaar falen van een trailer is:

Risico vertraging = (Kosten vertraging + kosten extra trailer) * Kans =

$(200.000 * 6 + 1.000.000) 0,5 = 1.100.000,-$

Hieruit kan nog niet direct geconcludeerd worden dat het rendabel is om een stand-by trailer te produceren. De kans op het onherstelbaar falen van een trailer kan door goed onderhoud ook gereduceerd worden, wat tot gevolg heeft dat het risico kleiner wordt. Als de kosten van de stilstand van de TBM echter veel hoger zijn, dan 200.000,- per dag, dan is het ook sneller rendabel om een stand-by trailer te produceren.

Het produceren van een stand-by trailer heeft daarnaast als bijkomend voordeel dat deze ook bij storingen (zoals ongepland onderhoud) ingezet kan worden.

De maatgevende vertraging als gevolg van het falen van een trailer is de duur van het herstel van de schade aan trailers en vooral aan de TBM na het falen van het remsysteem van een trailer. Deze kan oplopen tot enkele weken en deze vertraging is dan ook in tabel 4.3 ingevoerd voor deze bijzondere gebeurtenis.

Het langdurig falen van beide kranen bij de startschacht

Langdurige onbeschikbaarheid van de kranen kan veroorzaakt worden door het te zwaar beladen van de kranen of het verzakken van de kraanbaan in de slappe veengrond. De kans dat beide kranen langdurig buiten werking zijn, is zeer klein.

Mocht het voorkomen dat beide kranen tegelijk vervangen dienen te worden, dan kan voor het laden van segmenten tijdelijk een andere kraan worden ingezet, zodat de vertragingen van de TBM niet groot zijn.

Indien de fundering van de kraanbaan onderheid moet worden, dan heeft dit tot gevolg dat (een deel van) de opslag voor de segmenten niet gebruikt kan worden. Het aanleggen van een tijdelijke opslag elders op het terrein en het werken met andere kranen kan vertraging van de TBM tot gevolg hebben, die enkele weken duren.

De kans op het falen van de kranen en de fundering van de kraanbaan kan geminimaliseerd worden als in de ontwerpfase voldoende veiligheid wordt ingebouwd bij het dimensioneren van beide onderdelen.

Slijtage aan leidingen of pompen voor het mengseltransport

Door de duur van dit project kan slijtage van leidingen en zeker van bepaalde zwakke plekken (bijvoorbeeld bij versmallingen of bochten) een rol gaan spelen. Daarnaast kunnen ook de (booster)pompen falen als gevolg van slijtage, met als gevolg dat ze vervangen dienen te worden.

De leidingen voor het transport van bentoniet, die aan het begin van het project worden geplaatst, worden gedurende de totale duur van het project gebruikt. Als gevolg van het transport van met name het grond/bentoniet mengsel treedt slijtage aan de leidingen en pompen op. Er bestaat een kans dat, als gevolg van slijtage, lekkages in het leidingstelsel ontstaan. Indien dit op grote schaal gebeurt, zijn er grote vertragingen als gevolg van het vervangen van de leidingen of een pomp.

De kans op lekkages door slijtage aan de leidingen kan verkleind worden door de leidingen na een bepaalde voortgang (bijvoorbeeld na 2/3 van de te boren lengte) een halve slag te draaien. Het draaien van de leidingen zorgt echter ook voor vertraging van de booractiviteiten.

Het is beter om bij het dimensioneren van de leidingen en de keuze voor de pompen extra veiligheid in te calculeren.

Protestacties

De aanleg van de Sophiaspoortunnel heeft als gevolg van protestacties reeds enkele malen vertraging opgelopen. Deze acties keren zich tegen de omstreden Betuwelijn, waar deze tunnel deel van uit maakt. Mochten er acties tegen HSL-Zuid worden gevoerd, dan kan het zijn dat de boortunnel dient als doelwit om veel publiciteit te krijgen. Deze bijzondere gebeurtenis valt binnen de systeemgrens van dit onderzoek,

zodra bijvoorbeeld het laden van trailers onmogelijk gemaakt wordt. De kans op protestacties bij de Boortunnel Groene Hart is kleiner dan bij de Sophiatunnel, omdat de HSL-Zuid veel minder omstreden is. De Westerscheldetunnel, die net als de Groene Harttunnel voor personenvervoer wordt aangelegd heeft ook geen last van acties. Naast protesten van buitenstaanders kunnen ook stakingen van het personeel op de bouwplaats leiden tot vertragingen. Voor de maatgevende vertraging, die optreedt als het lang duurt voordat de eisen van de stakers ingewilligd worden, wordt een periode van drie weken aangenomen.

Problemen met de personele bezetting

Het krijgen en houden van voldoende goede mensen is bij de Westerscheldetunnel een groot probleem geweest [31]. Het ontbreken van voldoende geschikte mensen kan tijdelijke onderbreking of vertraging van bepaalde werkzaamheden tot gevolg hebben. Er is op dit moment in Nederland nog steeds sprake van krapte op arbeidsmarkt, vooral voor CAO personeel, maar ook voor leidinggevende mensen en dat kan dus ook voor B/K problemen gaan geven.

Een ongeval met dodelijke afloop

In de bouw zijn ongevallen op de bouwplaats moeilijk te voorkomen. Ook tijdens de uitvoering van een project als de Boortunnel Groene Hart kan het gebeuren dat er ongelukken gebeuren en zelfs dat een slachtoffer van een ongeval komt te overlijden. Ondanks een groot aantal veiligheidsmaatregelen, dat van kracht is bij de uitvoering van een project, blijkt de kans op een dodelijk slachtoffer aanzienlijk. De kans dat een dodelijk ongeval plaats vindt binnen de systeemgrenzen van dit onderzoek is iets kleiner.

De gevolgen voor de voortgang van het project kunnen groot zijn als door de arbeidsinspectie wordt vastgesteld dat bepaalde werkmethoden onveilig zijn en aangepast dienen te worden. Dit wordt in tabel 4.3 als maatgevende waarde ingevoerd.

Explosie of brand

Een brand, die direct het gevolg is van het falen van de logistiek in de tunnel kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door het falen van een trailer. De trailers hebben brandstof aan boord en vormen dus een gevaar.

Een explosie kan veroorzaakt worden door het ontploffen van een brandstoftank op een trailer, of door een bom, die in het leidingstelsel terechtkomt. Het is zeer arbitrair om te zeggen of dit wel of niet binnen de systeem grens van dit onderzoek valt.

Als in de tunnel een explosie of een brand plaatsvindt, is er een kans dat de tunnel of de TBM zo zwaar beschadigd raakt, dat het project gestopt dient te worden. Mocht de schade meevallen, dan kan een explosie of brand nog steeds een vertraging van het project van vele maanden tot gevolg hebben, zoals het geval was bij de Storebælttunnel.

§ 4.4.2 Kwantificering van de bijzondere gebeurtenissen

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de kwantitatieve gegevens van de bijzondere gebeurtenissen weer, met de waarde die daarbij hoort in de risico analyse methode van B/K.

| Risico item | Kans | Gevolg | Kans | Gevolg | Risico |
|--------------------------------------|-----------|---------|------|--------|--------|
| Instorten bekistingsframe | 10^{-3} | 2 weken | 1 | 1 | 1 |
| Bezwijken bekisting | 10^{-3} | 2 weken | 1 | 1 | 1 |
| Bezwijken liningframe | 10^{-2} | 2 weken | 2 | 1 | 2 |
| Het falen van een trailer | 10^{-2} | 3 weken | 2 | 1 | 2 |
| Het langdurig falen van beide kranen | 10^{-4} | 4 weken | 1 | 1 | 1 |
| Slijtage aan leidingen/pompen | 10^{-3} | 3 weken | 1 | 1 | 1 |
| Protestacties | 10^{-2} | 3 weken | 2 | 1 | 2 |
| Personele problemen | 10^{-2} | 2 weken | 2 | 1 | 2 |
| Ongeval met dodelijke afloop | 10^{-1} | 2 weken | 3 | 1 | 3 |
| Explosie of brand | 10^{-5} | 1 jaar | 1 | 5 | 5 |

Tabel 4.3: Kwantitatieve gegevens over de bijzondere gebeurtenissen.

Toelichting op tabel 4.3:

- De waarden die zijn ingevuld voor de mogelijke gevolgen, zijn de maatgevende waarden.
- De kansen zijn vastgesteld op basis van gegevens uit het rapport “Risico-analyse bouwfase boortunnels” [3] en kunnen worden uitgelegd als de kans dat de bijzondere gebeurtenis bij dit project optreedt.
- De waarden dienen geïnterpreteerd te worden als schattingen van de orde van grootte van de risico's en niet als exact bekende waarden. Het is belangrijker dat onderkend wordt dat een bepaalde bijzondere gebeurtenis voor kan komen en dat maatregelen worden genomen om de kans en de gevolgen te minimaliseren.

Voorbeeld: Het maatgevende gevolg van het falen van een trailer is schade aan de TBM, die een vertraging van drie weken tot gevolg heeft. De kans dat dit tijdens de bouw van de Boortunnel Groene Hart gebeurt, is ongeveer 1%.

In de onderstaande tabel staat een toelichting op de grootte van de verschillende kansen, deze is ook overgenomen uit “Risico-analyse bouwfase boortunnels” [3].

| | |
|-----------------|-----------|
| Very likely | 1 |
| Not very likely | 10^{-1} |
| Possibly | 10^{-2} |
| Unlikely | 10^{-3} |
| Very unlikely | 10^{-4} |
| Negligible | 10^{-5} |

Tabel 4.4: Toelichting op de kansen uit tabel 4.3.

Nota Bene:

In de berekening van de gemiddelde boorsnelheid (bijlage 4) is een langdurige stilstand van 6 weken als gevolg van zware storingen meegenomen. Uit alle mogelijke

zware storingen die voor kunnen komen (waaronder ook logistieke storingen) is er dus één meegenomen in de berekening van de gemiddelde voortgang per dag.

§ 4.5 CONCLUSIES RISICO ANALYSE

Om de risico's voor vertragingen van het boorproces door het falen van de logistiek te kunnen identificeren is een analyse gemaakt van het ontwerp van B/K en zijn bezoeken afgelegd naar vergelijkbare projecten. Deze risico inventarisatie heeft een groot aantal mogelijke gebeurtenissen opgeleverd, die vertraging van de TBM tot gevolg kunnen hebben.

De logistieke risico's voor vertraging van de tunnelboormachine, die zijn geïdentificeerd kunnen in twee groepen worden ingedeeld: storingen en bijzondere gebeurtenissen.

Storingen hebben een kort durende vertraging van de TBM tot gevolg. Die vertraging is tijdelijk, of kan verholpen worden door vervanging of reparatie van het element dat de storing veroorzaakt.

In dit hoofdstuk is vastgesteld hoe groot de (bovengrens van de) totale vertraging als gevolg van storingen ongeveer is. Uit een berekening, die is beschreven in paragraaf 4.3.6 volgt dat die vertraging rond de 59 dagen ligt. Ten opzichte van de totale duur van het boorproces (819 dagen) betekent dat een aandeel van 7%. Uit gegevens, die bekend zijn over het aandeel van logistieke storingen in de totale bouwtijd bij vergelijkbare projecten (bijlage 16) blijkt dit aandeel 'normaal' en dus niet veel groter of kleiner dan bij andere projecten.

De risico-items met het grootste aandeel in deze vertraging zijn:

1. Vertragingen a.g.v. een ploegwissel.
2. Het falen van trailers.
3. Het falen van het leidingtransport.
4. Ongepland onderhoud.

Tijdens de uitvoering is het belangrijk de frequentie van de storingen te registreren en te kijken of de invloed van de logistieke storingen op de bouwtijd niet te groot wordt. Als het aandeel van de storingen in de bouwtijd zo groot wordt dat het halen van de geplande opleverdatum in gevaar komt, dienen maatregelen genomen te worden.

De meest voor de hand liggende maatregelen om de vier bovenstaande storingen te minimaliseren zijn, respectievelijk:

1. Het overlappen van de werktijden van de ploegen, zodat het overnemen van de werkzaamheden vloeiender gaat. Met de geplande bezetting van de ploegen is dit echter niet mogelijk. Bij deze maatregel is het dus van belang te kijken of de kosten van het uitbreiden van het aantal ploegen opwegen tegen de kostenvermindering, die het gevolg is van de verminderde vertraging.
2. Regelmatig onderhoud is een goede maatregel om het falen van trailers tegen te gaan. In de planning is onderhoud reeds meegenomen. Een alternatieve maatregel om de gevolgen van het falen van een trailer te minimaliseren, is het stand-by houden van een voertuig dat een kapotte trailer uit de tunnel naar de schacht kan

slepen en een reserve trailer, die de plaats van een kapotte trailer in kan nemen.

3. Om vertragingen als gevolg van het falen van het leidingtransport te minimaliseren is het aan te raden de leidingen te verlengen gedurende de dagelijkse onderhoudsuren.
4. De gevolgen van ongepland onderhoud worden kleiner, als op de bouwplaats voldoende reserve onderdelen aanwezig zijn, zodat reparaties snel uitgevoerd kunnen worden.

Ook voor de drie laatste maatregelen geldt dat een kosten overweging gemaakt dient te worden voordat ze worden ingevoerd.

Bijzondere gebeurtenissen hebben een kleine kans, maar grote gevolgen voor de voortgang van het project (zie tabel 4.3). De maatgevende bijzondere gebeurtenis is brand of een explosie in de tunnel als gevolg van het falen van de logistiek.

De maatregelen om dit risico te minimaliseren zijn beschreven in de veiligheidsanalyse (hoofdstuk 6).

Een andere bijzonder gebeurtenis is het onherstelbaar falen van één van de trailers. De gevolgen van deze bijzondere gebeurtenis kunnen beperkt worden door tijdens de uitvoering een trailer stand-by te hebben, die de plaats van een kapotte trailer direct in kan nemen. Na een eenvoudige berekening (in paragraaf 4.4.1) is vastgesteld dat deze maatregel waarschijnlijk rendabel is.

5. NADER ONDERZOEK VAN HET LOGISTIEKE SYSTEEM

Uit de voorgaande hoofdstukken zijn een aantal zaken naar voren gekomen, die nog nader onderzocht dienen te worden. Het gaat daarbij voornamelijk om mogelijke negatieve gevolgen van de interactie tussen het logistieke systeem en de tunnelboormachine. De onderzoeken die gedaan zijn om deze zaken te verhelderen, zijn in dit hoofdstuk beschreven.

Uit de conclusie van de systeemanalyse (paragraaf 2.5) is naar voren gekomen dat de marges van de boorcyclus ten opzichte van de transportcyclus en de loscyclus onvoldoende kunnen zijn, als de cyclustijden afwijken van de berekende waarden. Het onderzoek naar de kans dat de marges te klein zijn, is beschreven in paragraaf 5.1.

In de risico analyse van hoofdstuk 4 is aangenomen dat het ongestoorde logistieke systeem bij de Boortunnel Groene Hart geen beperking vormt voor de (maximaal door de TBM haalbare) voortgang van het boorproces. Dit in tegenstelling tot het logistieke systeem bij vergelijkbare projecten. Het onderzoek dat is uitgevoerd, om te bewijzen dat deze aanname terecht is, is ook in paragraaf 5.1 beschreven.

Tot slot van de risico analyse van B/K is in paragraaf 3.3 aangegeven dat onbekend is of het vergaande gevolgen heeft als de TBM éénmaal heeft moeten wachten op de aanvoer van lading. Of dit wel of niet zo is, blijkt uit het onderzoek, dat in paragraaf 5.2 is beschreven.

In de systeemanalyse is aangegeven dat er verschillende signaleringssystemen kunnen worden toegepast in de tunnel. In paragraaf 5.2 zijn drie verschillende systemen toegelicht en is de invloed van deze systemen op het transportproces bepaald.

§ 5.1 BETROUWBAARHEIDSANALYSE; MONTE CARLO SIMULATIE MET @RISK™

Het onderzoek naar de kans dat de TBM vertraging oploopt als de cyclustijden van het ongestoorde logistieke proces iets afwijken van de geplande duur, wordt de betrouwbaarheidsanalyse genoemd.

Onder de betrouwbaarheid van het logistieke systeem wordt dus verstaan:

De kans dat het materiaal, dat nodig is voor de voortgang van de TBM, op tijd wordt aangevoerd als de cyclustijden iets afwijken van de geplande duur.

‘Op tijd’ houdt in dat het boorproces ongestoord door kan gaan. Met ‘de cyclustijden’ worden de duur van de transportcyclus en de duur van de loscyclus bedoeld.

Indien het benodigde materiaal niet op tijd wordt aangevoerd naar de TBM heeft dit een ongewenste stilstand van de machine tot gevolg.

Een goede betrouwbaarheid van het logistieke systeem is van groot belang, omdat de capaciteit (de maximale snelheid waarmee lading kan worden aangevoerd naar de TBM) vrijwel volledig vast ligt. Deze capaciteit wordt namelijk bepaald door de kranen (trolleys) op de TBM, die worden gebruikt voor het verplaatsen van de lading van de trailers naar de boormachine. In het logistieke proces is dit de bottleneck (of in het Nederlands het knelpunt).

De definitie van het begrip bottleneck is [6]:

De bottleneck is de handeling, van de mens of van de machine, binnen een proces die, gegeven de orders over een bepaalde periode, gemiddeld de hoogste bezetting heeft. Anders gezegd: dit is de zwakste schakel van het proces, welke de productie van het proces bepaalt.

Naast de capaciteit van de loskranen is ook de capaciteit voor het laden vrijwel volledig vastgelegd. In de startschacht zijn vier laadplaatsen en daarmee is de overgebleven vrije ruimte in de schacht minimaal, uitbreiden is dus niet mogelijk. Aangezien er vier laadplaatsen zijn, vormt het laden een minder kritisch onderdeel van het logistieke systeem.

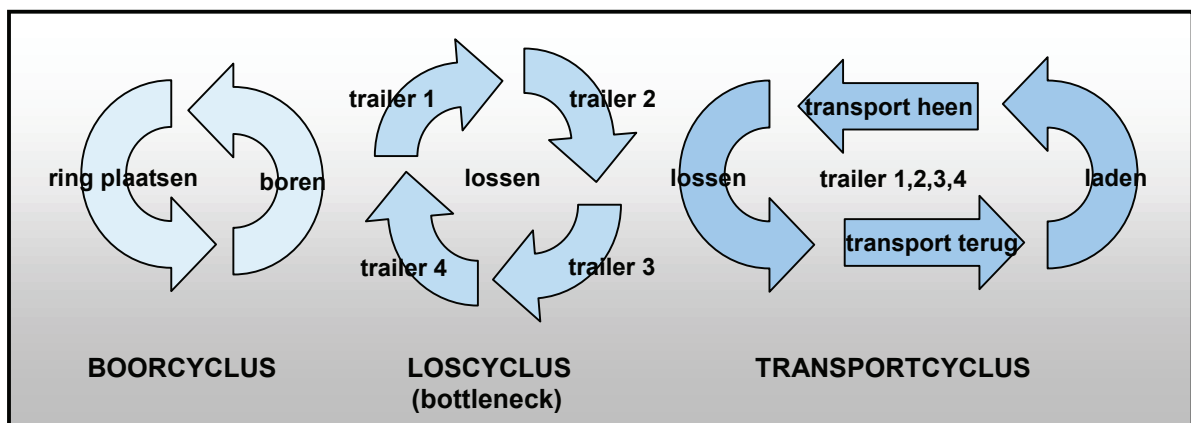
Het uitbreiden van de transportcapaciteit is daarentegen wel mogelijk, omdat er in de tunnel en in de toerit voldoende ruimte is om trailers te parkeren tijdens het wachten. Het onnodig uitbreiden van het aantal trailers brengt echter extra kosten en overbodig beslag van de schaarse ruimte met zich mee en is daarom ongewenst.

Het komt er op neer dat de betrouwbaarheid van het logistieke systeem bij de geplande capaciteit voldoende dient te zijn, aangezien uitbreiding onmogelijk of ongewenst is.

Het onderzoek naar de betrouwbaarheid van het systeem bestaat uit drie delen:

1. Verifiëren van de aannamen die zijn gedaan bij de berekening van de cyclustijden.
2. Berekening van de betrouwbaarheid van de cyclustijden met deterministische invoer.
3. Berekening van de betrouwbaarheid van de cyclustijden met stochastische invoer.

De betrouwbaarheid van het logistieke systeem wordt in deze paragraaf bepaald door twee deelprocessen, namelijk de loscyclus en de transportcyclus **onafhankelijk van elkaar** te analyseren. Bij deze analyses worden de marges ten opzichte van de boorcyclus bepaald (zie figuur 5.1).



Figuur 5.1: Schematische weergave van de verschillende cycli binnen het boorproces.

In paragraaf 5.2 worden de logistieke deelprocessen gekoppeld en kan de betrouwbaarheid van het logistieke systeem dus op een andere wijze bepaald worden.

§ 5.1.1 Verifiëren aannamen bij berekening cyclustijden

Om te kunnen bepalen of de berekende cyclustijden uit de tabellen 2.2 en 2.3 technisch haalbaar zijn, is gezocht naar de aannamen, die zijn gebruikt bij de berekening hiervan. Het blijkt dat B/K gebruikt maakt van aannamen voor de snelheden van de kranen op de TBM en de kranen bij de schacht. Daarnaast blijkt dat er aannamen zijn gedaan voor de afstanden waarover de ladingen verplaatst worden en zo heeft men een instrument om de laad- en lostijden te berekenen.

Bij de berekening van de lostijden is B/K uitgegaan van de volgende verplaatsingsafstanden en snelheden van de kranen op de TBM [17].

| Aanname B/K | Segment kraan (30 ton) | | Element kraan (18,5 ton) | |
|---------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|-----------|
| | Afstand | Snelheid | Afstand | Snelheid |
| Tillen | 7 m | 12,5 m/min | 6 m | 5 m/min |
| Verplaatsen longitudinaal | 74 m | 50 m/min | 74 m | 20 m/min |
| Verplaatsen transversaal | ± 0,5 m | 1,35 m/min | ± 0,8 m | 6,3 m/min |

Tabel 5.1: Aannamen B/K over de snelheid van de kranen op de TBM (27).

Uit de gegevens van NFM (de bouwer van de TBM) volgt dat de afstanden en snelheden de volgende grootte hebben [19 en 21].

| Gegevens NFM | Segment kraan (30 ton) | | Element kraan (18,5 ton) | |
|---------------------------|------------------------|----------------|--------------------------|-----------|
| | Afstand | Snelheid | Afstand | Snelheid |
| Tillen | 7 m | 9 m/min | 6 m | 5 m/min |
| Verplaatsen longitudinaal | 74 m | 50 m/min | 51 m | 20 m/min |
| Verplaatsen transversaal | ± 0,5 m | 1,35 m/min | ± 0,8 m | 6,3 m/min |

Tabel 5.2: Gegevens NFM over de snelheid van de kranen op de TBM (28).

De gegevens wijken op twee plaatsen af, bij de berekening van de lostijden heeft dit zeker enige invloed. De bij de berekening gebruikte snelheden van de kranen zijn in de praktijk goed te realiseren. In het vervolg van dit hoofdstuk worden de waarden van NFM (uit tabel 5.2) aangehouden.

De laadtijden zijn berekend met de volgende aannamen over de snelheden van de portaalkranen bij de startschacht (zie tabel 5.3).

| Aanname B/K | Portaalkraan bij de startschacht | |
|---------------------------|----------------------------------|-----------|
| | Afstand | Snelheid |
| Tillen | 20 m | 10 m/min |
| Verplaatsen longitudinaal | 120 m | 100 m/min |

Tabel 5.3: Aannamen B/K over de snelheid van de kranen op de bouwplaats (29).

De gegevens van de kranen die daadwerkelijk toegepast gaan worden, zijn niet bekend, maar bovenstaande waarden lijken heel plausibel en worden daarom verder niet ter discussie gesteld.

De waarden die vervolgens door B/K zijn berekend blijken een bepaalde veiligheid (gemiddeld $\pm 40\%$) te hebben ten opzichte van de minimumwaarden, die op dezelfde wijze bepaald zijn (zie tabel 5.4).

| Trailercombinatie | Laadtijd (min) | | Lostijd (min) | |
|--------------------------------------|----------------|---------|---------------|---------|
| | B/K | Minimum | B/K | Minimum |
| Trailer 1 (4 segmenten + kabelkoker) | 30 | 17,25 | 15,75 | 11 |
| Trailer 2 (6 segmenten) | 30 | 17,25 | 16,35 | 11 |
| Trailer 3 (grout + overig materiaal) | 26,5 | 16,25 | 17 | 12 |
| Trailer 4 (zand/cement stabilisatie) | 22,5 | 11,5 | 31,6 | 22 |

Tabel 5.4: Laad- en lostijden voor de vier trailercombinaties (30).

B/K gaat er van uit dat de handelingen altijd binnen de berekende tijd worden uitgevoerd. De marge van $\pm 40\%$ tussen de minimale laad- en lostijden en de door B/K gebruikte bovengrens zal in de praktijk echter niet altijd voldoende zijn. Dit blijkt bij de uitvoering van vergelijkbare boortunnelprojecten. Of een overschrijding van die tijden gevolgen heeft voor de voortgang van het boorproces moet blijken uit de analyse, die beschreven is in de paragrafen 5.1.2 en 5.1.3.

Tot zover de controle van de aannamen over de laad- en lostijden, die blijken te kloppen. Er zijn ook aannamen gedaan over de duur van de boorcyclus, die hier ook geverifieerd worden.

B/K gaat bij het ontwerp van het logistieke systeem uit van een boorcyclus van 127 minuten. Als deze snelheid wordt gehaald, en er wordt 20 uur per dag gewerkt, dan is de maximale dagelijkse snelheid 17,0 meter per dag (zie bijlage 4).

De aannamen die gebruikt zijn bij de berekening van deze cyclustijd zijn:

- De boorsnelheid van de TBM is 3,0 cm per minuut (boortijd = 67 minuten),
- De plaatsingstijd voor 1 segment is 6 minuten (bouwstijd = 60 minuten).

Het kan in de praktijk echter voorkomen dat er nog sneller geboord dient te worden, om de geëiste gemiddelde snelheid te halen (zie tabel 5.5).

| Project | Diameter | Lengte segmenten | Maximale voortgang | Gemiddelde voortgang |
|-----------------------|----------|------------------|--------------------|----------------------|
| Tramway de Strasbourg | 8,30 m | 1,40 m | 22,4 m/dag | 6 m/dag |
| Caïro Metro | 9,41 m | 1,50 m | 34,5 m/dag | 14,3 m/dag |
| Sydney Airport Link | 10,72 m | 1,80 m | 21,6 m/dag | 8,8 m/dag |
| BPNL Nord | 11,02 m | 2,00 m | 28,0 m/dag | 5,2 m/dag |
| BPNL Sud | 11,02 m | 2,00 m | 30,0 m/dag | 11,3 m/dag |
| Tweede Heinenoord | 8,30 m | 1,50 m | 24,0 m/dag | 6,3 m/dag |
| Botlekspoortunnel | 9,75 m | 1,50 m | 28,5 m/dag | 9,5 m/dag |
| Elbetunnel | 14,20 m | 2,00 m | 14,0 m/dag | 6,0 m/dag |
| Groene Harttunnel | 14,50 m | 2,00 m | 17,0 m/dag | 8,8 m/dag |

Tabel 5.5: Voortgangssnelheden bij vergelijkbare projecten.

Toelichting op tabel 5.5:

Wat opvalt is dat de (gemiddelde) verhouding tussen de maximum snelheid en de gemiddelde snelheid, die gehaald is bij de projecten (meer dan 1:3), groter is dan de snelheidsverhouding, die voor de Boortunnel Groene Hart aangehouden wordt (minder dan 1:2). Dit kan veroorzaakt zijn door het feit dat de Boortunnel Groene Hart verschilt van de genoemde projecten op het gebied van: de te boren diameter, de grondgesteldheid, de te gebruiken TBM (type en snelheid), het aantal segmenten, het aantal werkuren per dag en de geïntegreerde afbouw. Het is echter ook mogelijk dat de maximum snelheid van de TBM te laag is ingeschat. Het is namelijk goed mogelijk, om tijdens de bouw met hogere maximumsnelheid te boren.

De duur van de boorcyclus, die hoort bij de hoogst haalbare snelheid van de TBM is 90 minuten. Deze is als volgt berekend:

- De maximale boorsnelheid van de TBM is 4,0 cm per minuut (boortijd = 50 minuten),
- De kortste plaatsingstijd voor 1 segment is 4 minuten (bouwtijd = 40 minuten).

Het is echter niet goed voor de boormachine om lang met deze maximale snelheid te boren, omdat dan extra slijtage optreedt en de kans op storingen toeneemt. Om deze reden wordt bij de betrouwbaarheidsanalyse de cyclustijd van 127 minuten gebruikt en wordt daarnaast kort aangegeven of ook de cyclustijd van 90 minuten haalbaar is.

§ 5.1.2 Betrouwbaarheid van de cyclustijden bij deterministische invoer

Aan de hand van de deterministische waarden die in de vorige paragraaf zijn bepaald, kan nu de duur van de transportcyclus en de loscyclus worden bepaald. Als deze bekend zijn, is het eenvoudig om vast te stellen wat de marges zijn van deze cycli ten opzichte van de maatgevende boorcyclus. De betrouwbaarheid wordt uitgedrukt in een veiligheidsfactor (in de kansrekening wordt dit een niveau I berekening genoemd).

Betrouwbaarheid van de loscyclus

De duur van de loscyclus is gelijk aan de som van de lostijden (zie tabel 5.4) van de vier trailercombinaties. Ten opzichte van de boorcyclus heeft deze de onderstaande veiligheid (zie tabel 5.6).

| Cyclus | Duur (minuten) | Veiligheidsfactor |
|---------------------|----------------|-------------------|
| Boorcyclus | 127 | 1,0 |
| Loscyclus (minimum) | 56 | 2,3 |
| Loscyclus (B/K) | 80,7 | 1,6 |

Tabel 5.6: Veiligheidsfactor van de loscyclus t.o.v. de boorcyclus.

De betrouwbaarheid lijkt met een minimale veiligheidsfactor van 1,6 zeer groot. Zelfs de boorcyclus van 90 minuten is op basis van deze analyse haalbaar. Hiermee is aangetoond dat de maximale voortgangssnelheid wordt bepaald door de TBM. Deze berekening van de betrouwbaarheid van de loscyclus is evenwel slechts toegestaan voor de situatie dat de trailers op tijd aankomen aan het boorfront en direct

achter elkaar gelost kunnen worden. De kans dat de trailers op tijd komen is afhankelijk van de betrouwbaarheid van de transportcyclus.

Betrouwbaarheid van de transportcyclus

De duur van de transportcyclus is gelijk aan de som van de laadtijd, de transporttijden, de wachttijden en de lostijd. De duur van de transportcyclus is voor elke trailercombinatie verschillend en neemt toe als de transportafstanden langer worden. Deze cyclus wordt dus pas tegen het eind van het project, als de te boren afstand bijna bereikt is, maatgevend.

Er is al enkele malen aangegeven dat bij de start van het project één set trailers wordt gebruikt en dat daar, na 1700 meter voortgang een tweede set aan wordt toegevoegd. Tijdens de uitvoering treedt dus eerst een maatgevende situatie op bij de inzet van één set trailers en vervolgens nogmaals bij de inzet van twee sets.

De marge van de transportcyclus ten opzichte van de boorcyclus (in procenten), die berekend is door B/K is te zien in de tabellen 2.2 en 2.3. Bij het bepalen van die marge is onderscheid gemaakt tussen trailers 1, 2 en 3 enerzijds en trailer 4 anderzijds. Bij de bepaling van de betrouwbaarheid is dit overgenomen.

| Cyclus | Duur (minuten) | | Veiligheidsfactor | |
|---------------------------------------|----------------|-----|-------------------|-----|
| | 1, 2 en 3 | 4 | 1, 2 en 3 | 4 |
| <i>Enkel (tot 1700 meter)</i> | | | | |
| Boorcyclus | 127 | 127 | 1,0 | 1,0 |
| Transportcyclus (minimum) | 54 | 60 | 2,4 | 2,1 |
| Transportcyclus (B/K) | 96 | 105 | 1,3 | 1,2 |
| <i>Dubbel (van 1700 - 7160 meter)</i> | | | | |
| Boorcyclus | 254 | 254 | 1,0 | 1,0 |
| Transportcyclus (minimum) | 136 | 142 | 1,9 | 1,8 |
| Transportcyclus (B/K) | 190 | 199 | 1,3 | 1,3 |

Tabel 5.7: Veiligheidsfactoren van de transportcyclus van de trailers t.o.v. de boorcyclus.

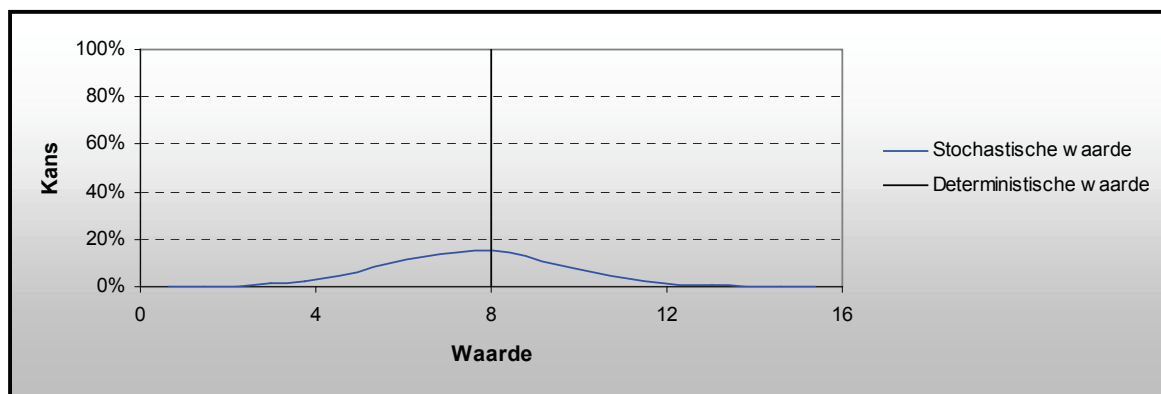
De betrouwbaarheid van de transportcyclus lijkt ruim voldoende, want de veiligheidsfactor is minimaal 1,2 en daarbij moet benadrukt worden dat dit in de maatgevende situatie is, die zich pas tegen het eind van het project voordoet. De boorcyclus van 90 minuten is met de door B/K vastgestelde tijden niet haalbaar. Gedurende de uitvoering van het project kunnen door een toename van de efficiëntie de cyclustijden afnemen, zodat het logistiek gezien mogelijk blijft de boorcyclus van 90 minuten te halen.

Op basis van deze analyse met deterministische waarden blijkt dat het logistieke systeem "op papier" voldoet aan de gestelde eisen. Dit is geen verrassing, omdat de aannemer het systeem enigszins heeft overgedimensioneerd door vroeg over te gaan op de inzet van een tweede set trailers en door de afstand tussen de openingen in de wand niet te groot te maken.

De snelheid van de kranen op de TBM (de bottleneck) is voldoende om de lading binnen de gevraagde tijd te lossen.

§ 5.1.3 Betrouwbaarheid van de cyclustijden bij stochastische invoer

De betrouwbaarheid van het logistieke systeem uitgedrukt in een veiligheidsfactor is groot. Het is echter de vraag hoe groot de betrouwbaarheid van de cycli is als deze wordt uitgerekend aan de hand van stochastische parameters, die beter overeenkomen met de situatie in de praktijk. Stochastische verdelingen geven namelijk de mogelijkheid om een waarde te laten variëren rond een berekende duur (zie figuur 5.2).



Figuur 5.2: Deterministische en stochastische waarde.

Het kan zijn dat de marges te klein blijken als stochastische waarden worden ingevoerd.

In deze subparagraaf worden achtereenvolgens: de theorie achter de betrouwbaarheidsanalyse met stochastische invoer, de gebruikte methode (Monte Carlo), de invoergegevens en de resultaten besproken.

Theorie achter de betrouwbaarheidsanalyse met stochastische invoer

Het doel van deze analyse is te bekijken of de marges tussen de los- en transportcyclus enerzijds en de boorcyclus anderzijds voldoende zijn. Daartoe worden de deterministische waarden (uit paragraaf 5.1.2) van de laad-, transport-, wacht- en lostijden vervangen door stochasten met een bepaalde verdeling. De verdelingen dienen aan een aantal eisen te voldoen, om de werkelijkheid goed te kunnen simuleren.

De betrouwbaarheid wordt bepaald door de kans dat de processen binnen de duur van de boorcyclus worden uitgevoerd. De cyclustijden (voor het lossen en het transport) worden berekend door de tijden van de verschillende deelprocessen op te tellen. Voor de duur van de boorcyclus wordt de minimumtijd (van 127 minuten) genomen, die ook gebruikt wordt voor de berekening van de voortgang (zie figuur 5.3).

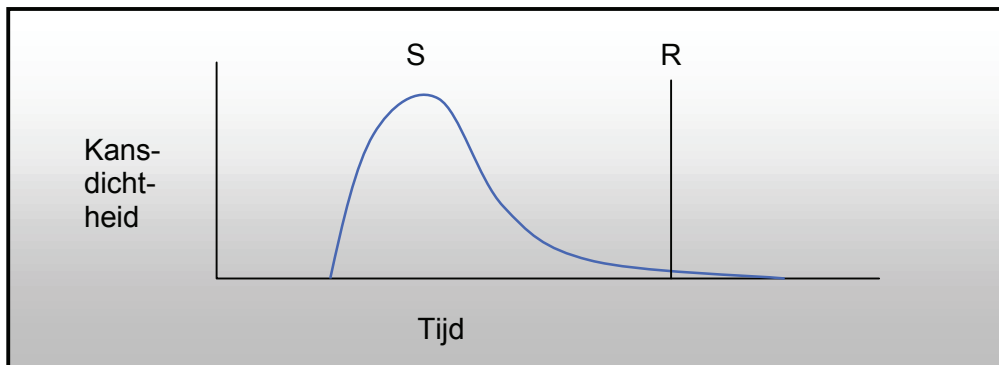
Theorie:

Betrouwbaarheidsfunctie: $Z = R - S$

Waarin : R is de minimale duur van de boorcyclus;
S is de duur van de loscyclus of één van de transportcycli.

Faalkans: $P(Z < 0)$

Betrouwbaarheid: $P(Z > 0)$



Figuur 5.3: Kansdichtheid van cyclustijden S en R.

Monte Carlo simulatie

De betrouwbaarheid van de gegevens die B/K gebruikt, kan worden uitgedrukt in een kans dat een bepaalde grenstoestand wordt overschreden. Deze grenstoestanden zijn in dit geval de situatie dat de lostijd groter is dan de duur van de boorcyclus of de situatie dat de duur van de transportcyclus groter is dan de duur van de boorcyclus. Dit betekent namelijk dat de boormachine moet stoppen om te wachten tot het materiaal aangevoerd is.

Er zijn verschillende berekeningsmethoden om de marge tussen de aanvoer en de boorcyclus te berekenen. De methode die hier is toegepast, staat bekend als de Monte Carlo methode. Deze methode behoort tot de niveau III methoden, die bij de berekening van de faalkans de kansdichtheidsfuncties van alle variabelen in aanmerking nemen [2].

De betrouwbaarheid van een element wordt bij deze methode direct gekoppeld aan de faalkans. De Monte Carlo methode gebruikt het random trekken van getallen uit een uniforme verdeling tussen nul en één. Door de getrokken waarden in te vullen in de kansverdelingfunctie van één van de variabelen kan zo een random waarde worden gegenereerd. Dit wordt gedaan voor alle variabelen binnen de betrouwbaarheidsfunctie. Door deze procedure een groot aantal malen te herhalen kan de faalkans worden geschat met:

$$P_f \approx \frac{n_f}{n}$$

Waarin: n is het totale aantal simulaties;
 n_f is het aantal simulaties, waarbij $Z < 0$.

Voor het uitvoeren van deze random trekking wordt gebruik gemaakt van het softwarepakket @Risk™.

Op deze wijze is de betrouwbaarheid van de loscyclus, de transportcyclus voor de trailers 1, 2 en 3 en de transportcyclus van trailer 4 bepaald.

Invoergegevens

Om de Monte Carlo simulatie uit te kunnen voeren zijn de volgende 9 invoerparameters nodig:

- De laadtijd van de trailers 1, 2 en 3 (1 waarde),
- De laadtijd van trailer 4 (1 waarde),
- De lostijden van alle vier de trailers (4 waarden),
- De snelheid van de trailers (om de transporttijd vast te kunnen stellen) (1 waarde),
- De wachttijden (1 waarde),
- De duur van de boorcyclus (1 waarde).

Deze gegevens zijn echter niet bekend en kunnen alleen in de praktijk worden bepaald. Dit is niet mogelijk, omdat de uitvoering nog niet gestart is. Om ondanks dat toch een uitspraak te kunnen doen over de betrouwbaarheid worden voor de invoerparameters waarden ingevoerd, die vrijwel zeker gehaald kunnen worden tijdens de uitvoering. Voor alle duidelijk het betreft hier aannamen, die geverifieerd kunnen worden door metingen uit te voeren tijdens de uitvoering.

Dit zijn de aangenomen verdelingen die ingevoerd zijn, voor de:

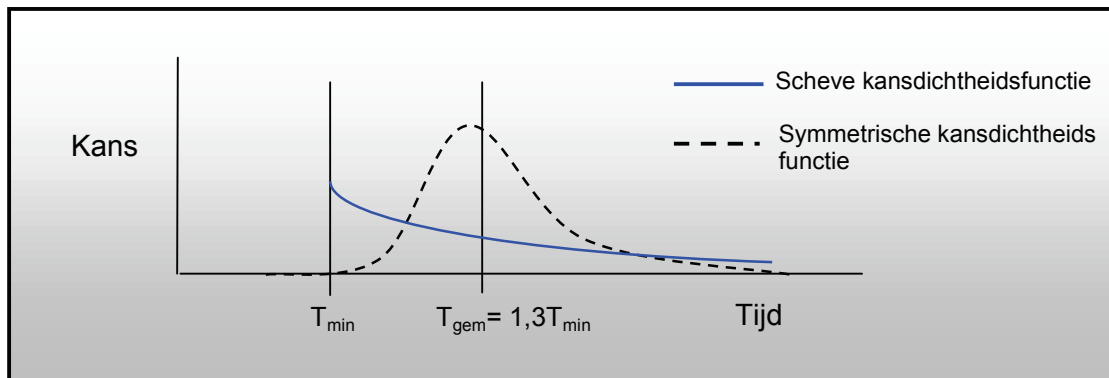
Laad- en lostijden

Voor de verdeling van de laad- en lostijden is gezocht naar twee afwijkende verdelingen (met hetzelfde gemiddelde), omdat niet alleen de waarden, maar ook de verdelingen van de waarden onbekend zijn.

Beide verdelingen dienen te voldoen aan een drietal eisen, deze zijn:

- De verdeling is begrensd door de minimum waarde uit tabel 5.4.
- De gemiddelde waarde van de verdeling is een factor 1,3 groter dan de minimum waarde. Het is in de praktijk namelijk niet mogelijk om alle processen in de minimale tijd uit te voeren, het grootste deel van de handelingen wordt echter wel uitgevoerd binnen een marge van 40%. Door het toepassen van een factor 1,3 wordt dit op de juiste wijze gesimuleerd.
- Er is geen vastgestelde maximum waarde.

De vorm (kansdichtheid) van de twee verschillende verdelingen is te zien in figuur 5.4.



Figuur 5.4: Stochastische verdelingen (kansdichtheid) van de laad- en lostijden.

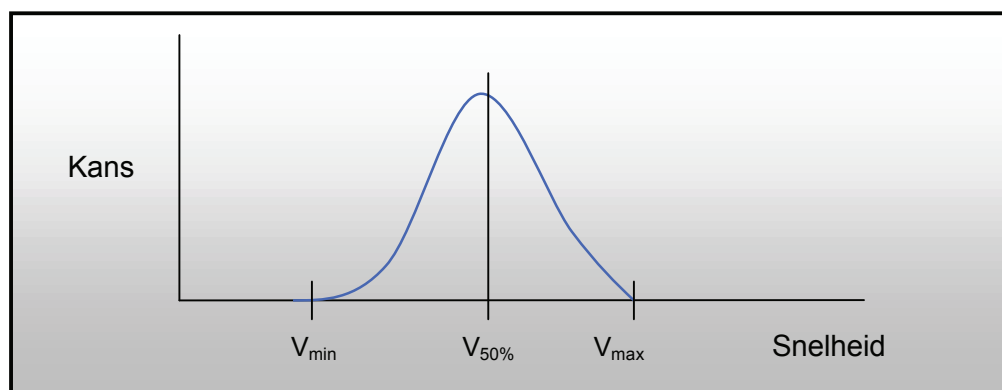
In @Risk™ sluit de Gamma verdeling het best aan bij deze eigenschappen. De karakteristieken van de Gamma verdeling zijn beschreven in bijlage 13.

Transporttijden

De transporttijden, die van belang zijn bij de bepaling van de betrouwbaarheid van de transportcyclus, worden berekend bij een voortgang van 1700 meter en bij een voortgang van 7160 meter.

De verdeling van de transporttijden hangt niet zo zeer af van de af te leggen afstand, want daarvoor wordt de maatgevende waarde genomen, als wel van de snelheid van de trailers. De verdeling van de gemiddelde snelheid van de trailers (niet noodzakelijk een klokvorm) dient aan de volgende eisen te voldoen:

- De gemiddelde snelheid van de geladen trailers is lager dan die van de ongeladen trailers.
- De maximum gemiddelde snelheden zijn: geladen 10 km/uur en ongeladen 15 km/uur.
- De verwachte gemiddelde snelheden zijn: geladen 7,5 km/uur en ongeladen 10 km/uur.
- De minimum gemiddelde snelheden zijn: geladen 3 km/uur en ongeladen 4 km/uur.



Figuur 5.5: Stochastische verdeling (kansdichtheid) van de gemiddelde snelheid van de trailers.

Er bestaan verschillende verdelingen, die aan deze voorwaarden kunnen voldoen. Uiteindelijk is gekozen voor een normale verdeling, omdat deze het best overeenkomt met de gewenste verdeling. De normale verdeling heeft als nadeel, dat er geen maximum en minimum waarde opgegeven kunnen worden, dit is te benaderen door een kleine standaard afwijking te kiezen, zodat de grenswaarden slecht zelden worden overschreden.

Wachttijden

Op de plaatsen in de tunnel waar tweerichtingsverkeer in één helft van de tunnel plaatsvindt wordt een signalering met stoplichten aangebracht. Het is goed mogelijk dat de trailers voor een stoplicht dienen te wachten tot het tweerichtingsdeel leeg is. Als invoerwaarde voor de wachttijden wordt de maximale tijd meegenomen, die komt overeen met de situatie dat er bij elk verkeerslicht gewacht dient te worden en dat er steeds de maximale tijd gewacht wordt.

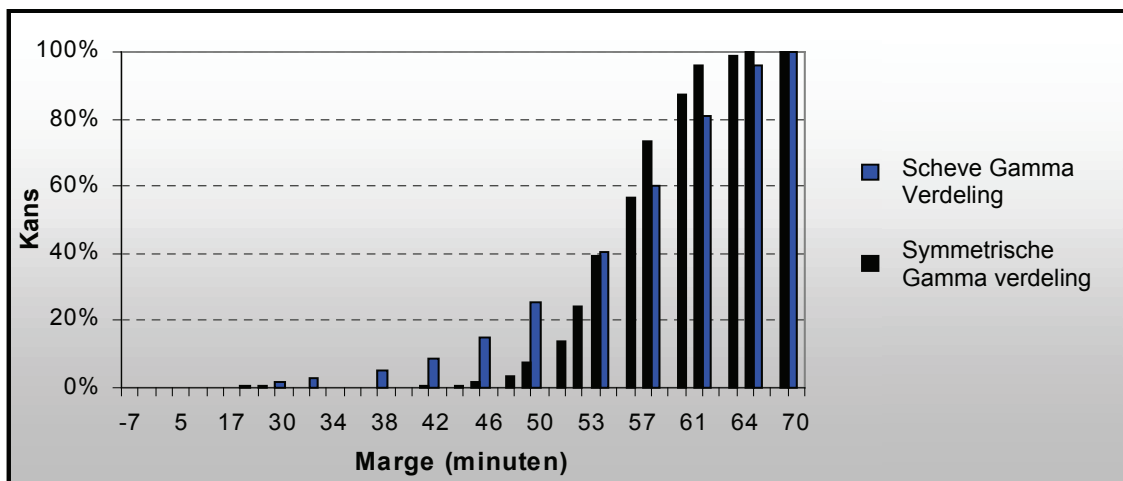
Duur van de boorcyclus

Bij de berekening van de voortgangssnelheid van de TBM, die gebruikt wordt bij de aanleg van de Groene Hart tunnel, is uitgegaan van een cyclustijd (tijd nodig voor het boren en bouwen van één ring) van 127 minuten. Deze waarde wordt gebruikt om de betrouwbaarheid van het logistieke ontwerp te toetsen. Als blijkt dat de aanvoer van materiaal (bij de gekozen invoerparameters) uitgevoerd kan worden binnen deze tijd, dan voldoet het gemaakte ontwerp.

Resultaten @Risk™

De betrouwbaarheid van een cyclus, die is berekend met stochastisch verdeelde invoergegevens, wordt niet uitgedrukt in een veiligheidsfactor, maar door de kansverdeling (en de kansdichtheid) van de marge t.o.v. de boorcyclus.

De kansverdeling van de marge van de loscyclus t.o.v. de boorcyclus voor de twee verdelingen is afgebeeld in figuur 5.6. De bijbehorende kansdichtheden zijn terug te vinden in bijlage 17.



Figuur 5.6: Kansverdeling van de marge tussen de loscyclus en de boorcyclus bij verschillende invoer.

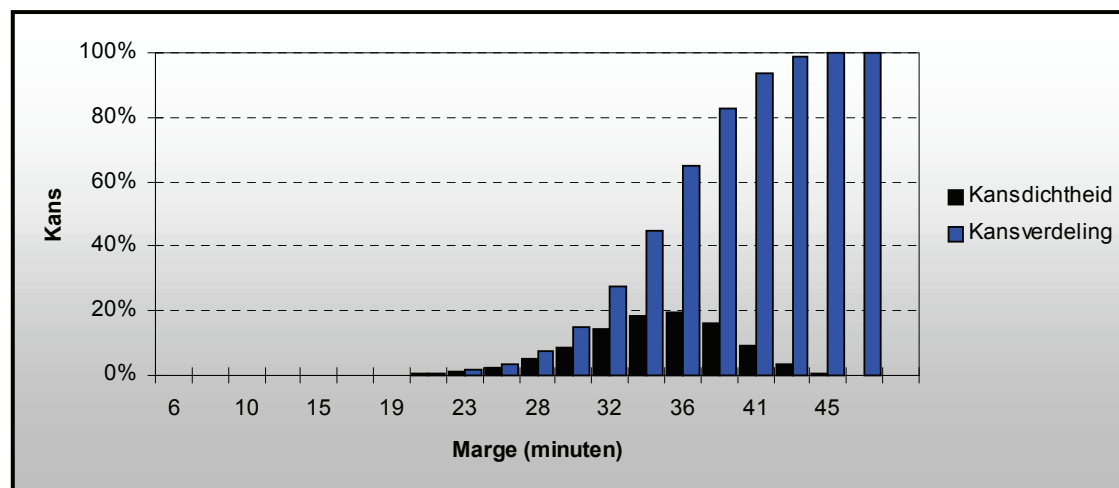
De resultaten dienen als volgt geïnterpreteerd te worden:

Er zijn 100.000 iteraties uitgevoerd en figuur 5.6 laat zien dat de kans, dat de marge tussen de boorcyclus en de loscyclus onvoldoende blijkt, zeer klein is. Bij de Boortunnel Groene Hart worden 3580 ringen geplaatst en de kans dat er daarbij vertragingen (door het lossen) ontstaan is dus minimaal. Uit het feit dat de marges bijna altijd voldoende zijn, kan worden afgeleid dat de betrouwbaarheid groot is.

Het is niet reëel om uit deze analyse een exacte kans af te leiden, daarvoor zijn te veel aannamen gedaan. Voor de volledigheid volgen hier wel de gemiddelde waarde en de standaardafwijking van beide krommen (zie ook bijlage 17):

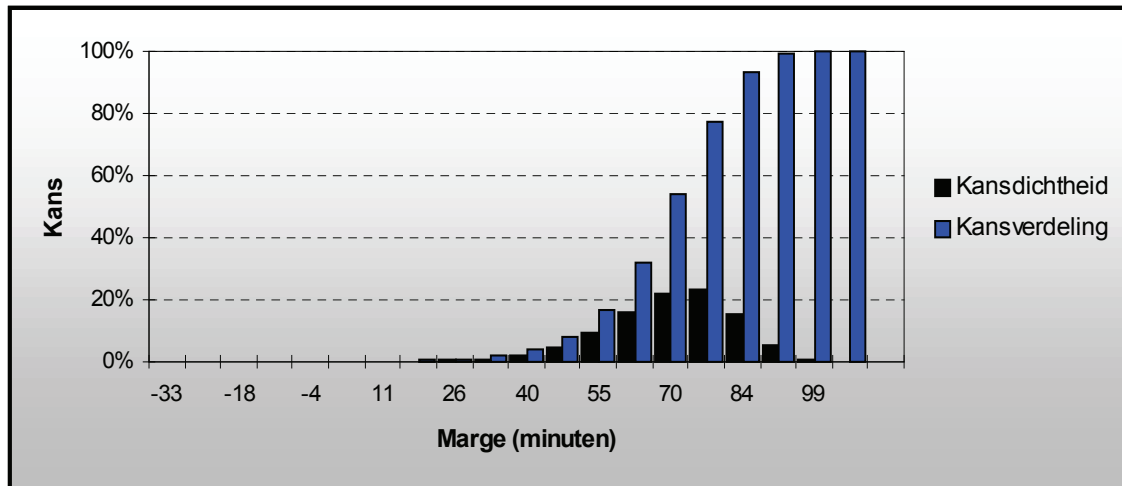
| | Gemiddelde (μ) | Standaard afwijking (σ) |
|------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Scheve Gamma verdeling | 54.2 | 8.8 |
| Symmetrische Gamma verdeling | 54.2 | 4.1 |

De duur van de transportcyclus van trailer 4 is groter dan die van de overige trailers en dus is deze maatgevend. Voor de invoer van de laad- en lostijden is de kromme Gamma verdeling gebruikt. De kansverdeling en de kansdichtheid van de marge van de transportcyclus van trailer 4 bij 1700 meter voortgang t.o.v. de boorcyclus is afgebeeld in figuur 5.7. In bijlage 17 zijn de kansverdeling en de kansdichtheid van de marge van de overige trailers te zien.



Figuur 5.7: Kansverdeling en kansdichtheid van de marge tussen de transportcyclus van trailer 4 en de boorcyclus bij 1700 meter voortgang.

De kansverdeling en de kansdichtheid van de marge van de transportcyclus van trailer 4 bij 7160 meter voortgang t.o.v. de boorcyclus is afgebeeld in figuur 5.8. In bijlage 17 zijn de kansverdeling en de kansdichtheid van de marge van de overige trailers te zien.



Figuur 5.8: Kansverdeling en kansdichtheid van de marge tussen de transportcyclus van trailer 4 en de boorcyclus bij 7160 meter voortgang.

Ook voor de betrouwbaarheid van de transportcyclus geldt dat deze niet exact wordt berekend, maar dat op basis van de kansverdelingen geconcludeerd kan worden dat de betrouwbaarheid groot genoeg is.

De enige negatieve kanttekening die geplaatst dient te worden bij deze conclusies, is dat er nog werkzaamheden uitgevoerd worden, die de marges verkleinen.

- Trailer 3 vervoert naast grout ook leidingen of overig materiaal, de tijd die nodig is om dit materiaal te lossen is in de berekening van de transportcyclus niet meegenomen.
- Het plaatsen van het technische galerij element wordt tijdens de loscyclus uitgevoerd met de kleine trolley, die langs de ligger van de boormachine beweegt. Tijdens het plaatsen van een element kan deze trolley dus niet worden gebruikt om te lossen.
- Daarnaast is niet meegenomen dat de geladen trailers tijdens de uitvoering waarschijnlijk op afroep naar het boorfront rijden. Zo kan voorkomen worden dat er een te lange wachtrij achter de tweede volgwagen in de tunnel ontstaat. Als de trailers echter te laat worden afgeroepen kunnen vertragingen van het boorproces ontstaan.

Tegenover de drie boven genoemde punten staat dat de invoergegevens voor, met name de transportcyclus enigszins conservatief zijn. In de berekende waarden is als gevolg hiervan nog een extra veiligheid meegenomen. Daarnaast kan het geen kwaad nogmaals te vermelden dat de transportcyclus pas tegen het eind van het project maatgevend wordt.

Op basis van deze betrouwbaarheidsanalyse (waarin de cycli niet gekoppeld zijn) en met in acht neming van bovenstaande punten is vastgesteld dat het ongestoorde logistieke systeem geen belemmering vormt voor de voortgang van de TBM. Deze constatering is gunstig, aangezien het vrijwel onmogelijk is de capaciteit van het logistieke systeem uit te breiden.

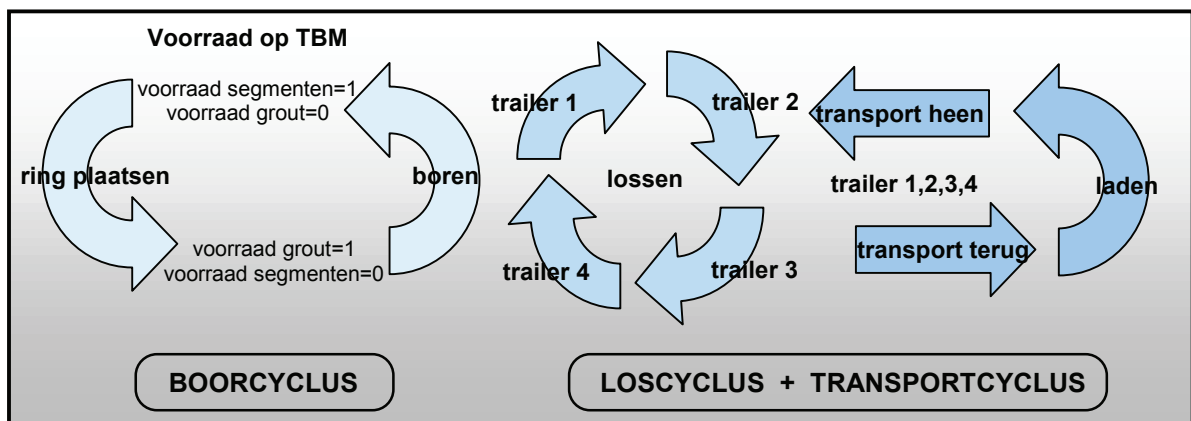
§ 5.2 BETROUWBAARHEIDSANALYSE; SIMULATIE MET ARENA 4.0

In paragraaf 5.1 is de betrouwbaarheid van het logistieke systeem bepaald door de twee maatgevende processen onafhankelijk van elkaar te analyseren. Uit die analyse kan geconcludeerd worden dat het systeem zeer betrouwbaar is.

De interactie tussen de processen in de tunnel is tot nu toe weggelaten. Toch blijkt dat dit een bron kan zijn van vertragingen, zie onderstaand citaat uit het document “Logistical system design for tunnel boring using dynamic simulation” [28].

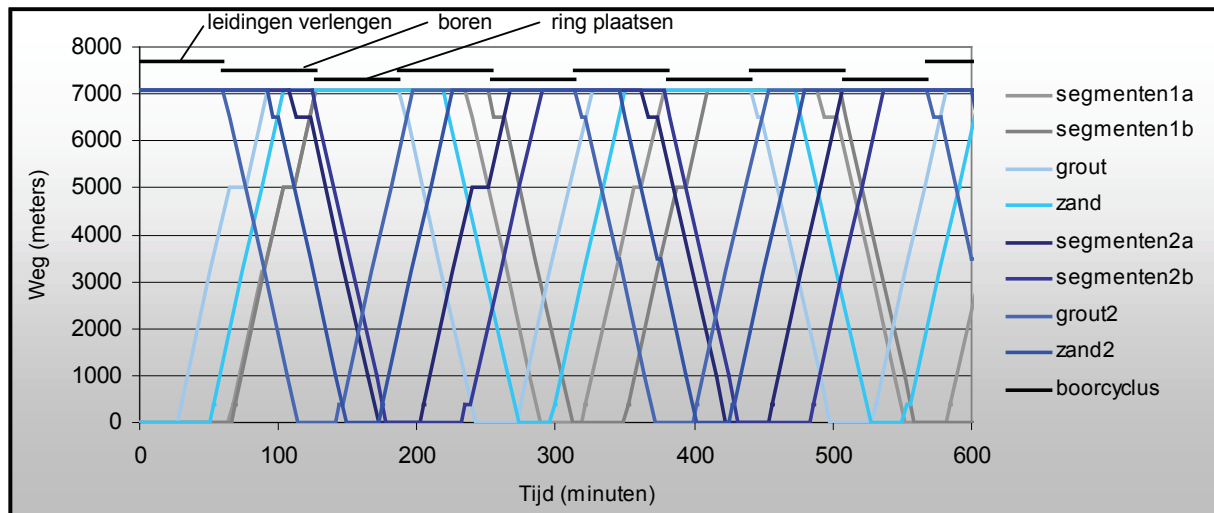
Uit ervaring, die is opgedaan bij de uitvoering van boortunnel projecten blijkt dat de logistiek een bron kan zijn van ongeplande stops en beperkingen stelt aan de voortgangssnelheid. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de aanvoerstanden groot zijn, de beschikbare ruimte beperkt is en de interactie tussen de logistieke processen complex is en tot onverwachte situaties kan leiden.

De interactie van de logistieke processen bij de Boortunnel Groene Hart kan als volgt worden weergegeven (zie figuur 5.9).



Figuur 5.9: Schematische weergave van de relaties tussen de verschillende cycli binnen het boorproces.

Als vervolgens deterministische waarden worden ingevoerd voor de procestijden en de relaties worden ingevoerd kan dat als resultaat een tijd-weg diagram opleveren. Uit dit tijd-weg diagram blijkt dat de volgorde waarin de logistieke processen worden uitgevoerd, bepaald wordt door de TBM.



Figuur 5.10: Tijd-weg diagram dat de relaties aangeeft tussen de boorcyclus, de loscyclus en de transportcyclus.

De uitgangspunten en aannames, die zijn gebruikt bij het opstellen van dit tijd-weg diagram zijn opgenomen in bijlage 12.

Uit één tijd-weg diagram blijkt echter nog niet wat de gevolgen voor de voortgang zijn als de cyclustijden afwijken van de geplande duur. Om de betrouwbaarheid vast te stellen is het noodzakelijk om een model te hebben, waarin de relaties tussen de logistieke stromen en het boorproces vastliggen en de procestijden variabel kunnen worden ingevoerd.

De enige manier om het systeem te analyseren is het maken van een computer simulatie. Het analyseren van het logistieke systeem met wiskundige technieken (zoals de wachttijd theorie) is namelijk niet mogelijk, omdat er sprake is van verschillende wachtrijsystemen die elkaar beïnvloeden [14].

Het maken van een simulatie van de logistiek in de tunnel tijdens de uitvoering en het uitvoeren van tests daarmee, kan eventuele onvoorziene problemen aan het licht brengen.

De toepassing van computer simulatie in een betrouwbaarheidsanalyse past goed binnen de filosofie voor het risico management tijdens de ontwerpfase, die wordt toegepast voor de Boortunnel Groene Hart, waarin het gebruik van nieuwe ontwerpmethoden wordt aangemoedigd.

Door de projectorganisatie HSL-Zuid is in de "Measures for risk control Green Heart tunnel" [24] de filosofie voor het risico management tijdens de ontwerpfase vastgelegd. Daarin zijn de belangrijkste onderwerpen: het verminderen van grote risico's door het optimaliseren van bepaalde oplossingen, kosten vermindering bereiken door **het gebruiken van nieuwe ontwerp methoden** (die in de praktijk en in laboratoria worden getoetst), het voorspellen van uitvoeringsrisico's op basis van ervaringen met lopende projecten, veiligheidsmaatregelen en kwaliteitsmanagement.

In de onderstaande paragrafen zijn het ontwerp van het model en de resultaten van de simulatie beschreven. Het rapport dat gemaakt is door de ontwerpers van het model is opgenomen in bijlage 15.

§ 5.2.1 Ontwerp van een model van de logistiek bij de Boortunnel Groene Hart

Om te komen tot een goed werkend model zijn er een aantal stappen die doorlopen moeten worden, dit zijn [14]:

- Conceptualisatie,
- Specificatie,
- Verificatie,
- Validatie,
- Oplossingen zoeken,
- Experimenteren,
- Analyseren resultaten.

Bij het maken van het model zijn al deze stappen doorlopen. In deze paragraaf zijn met name de conceptualisatie, de specificatie en de experimenten beschreven. In paragraaf 5.2.2 zijn de resultaten besproken.

Conceptualisatie

De eerste stap in het proces van probleemoplossen is die van conceptualisatie. Deze stap moet resulteren in een model van de probleemsituatie, waarin de grootheden zijn aangegeven waarmee de probleemsituatie kan worden beschreven.

Voordat begonnen kan worden met de conceptualisatie dient de probleemstelling vast te staan. Voor dit model kan deze het best worden geformuleerd als een vraag, namelijk:

Wat is de invloed van het logistieke systeem op de voortgang van de TBM?

Afbakening

Om te beginnen, dient bepaald te worden welke onderdelen van het logistieke systeem wel en welke niet beschreven worden. Dit wordt het kiezen van een systeemgrens genoemd.

In deze simulatie worden alleen de processen voor de ondersteuning van de ruwbouw meegenomen. Het gaat daarbij om de volgende processen: laden, transport, lossen en de boorcyclus.

Invoervariabelen

De invoervariabelen van het model bestaan uit:

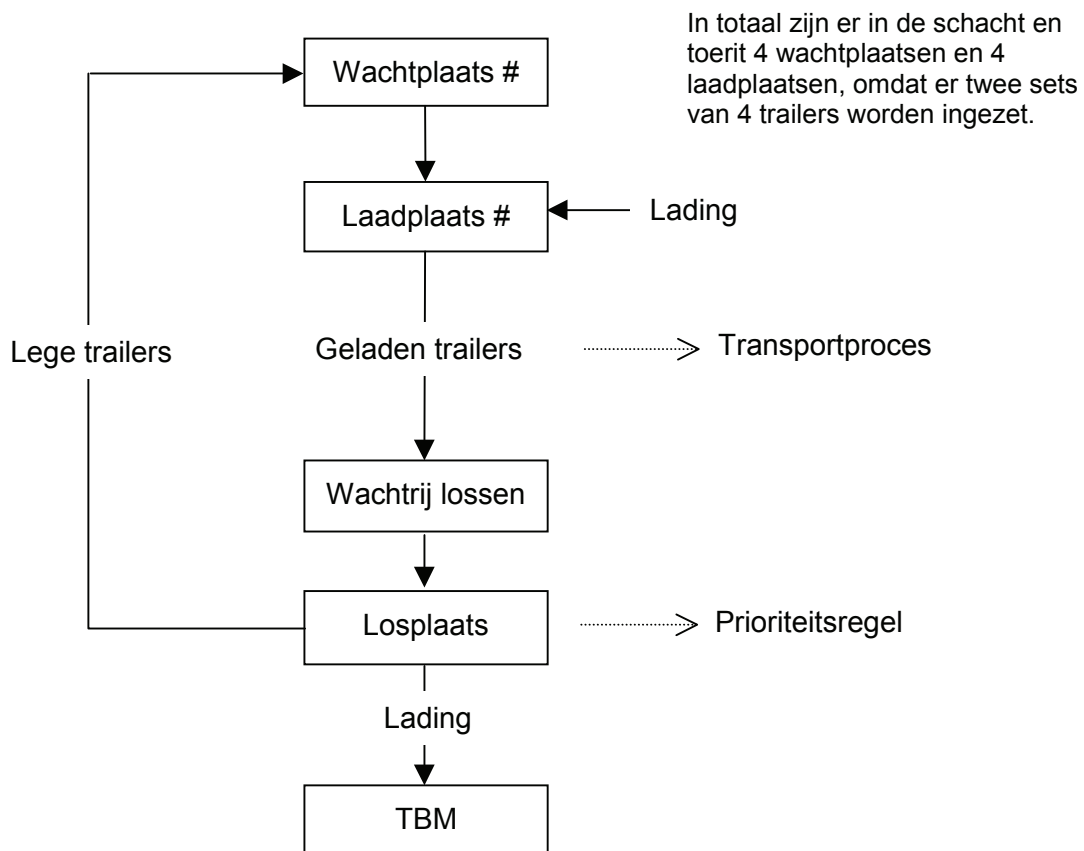
- De laadtijden,
- De lostijden,
- De transportsnelheden,
- De boorsnelheid,
- De duur van de ringbouw,
- De duur van het verlengen van de leidingen.

Prestatie-indicatoren

De prestatie indicatoren zijn de kwantitatieve gegevens, die uiteindelijk worden gebruikt om te beoordelen of het systeem goed functioneert. Voor dit model zijn die indicatoren de voortgangssnelheid van de TBM en het aantal stops, dat veroorzaakt wordt door het te laat aanvoeren van materiaal.

Weergegeven logistieke processen

Dit is een schematisatie van het logistieke systeem bij de Boortunnel Groene Hart, zoals dat in het model is geprogrammeerd.

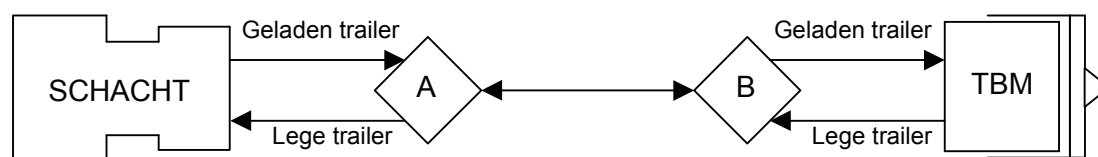


Figuur 5.11: Logistieke proces bij Boortunnel Groene Hart.

Toelichting op figuur 5.11:

- Het transportproces dat is getekend in de schematisatie op de vorige pagina, wijkt af van het geplande transportproces. Onder het kopje transportproces is hier op in gegaan.
- Als de laadplaats leeg is verlaat een trailer de wachtplaats, om door te rijden naar de laadplaats.
- Voor het doorrijden van de 'wachtrij lossen' naar 'losplaats' geldt een bepaalde prioriteitsregel, die verderop in deze pagina is toegelicht.
- De TBM gebruikt één lading grout om 2 meter te kunnen boren en één lading segmenten om 1 ring te kunnen bouwen. Na het bouwen van 4 ringen worden de leidingen verlengd.
- De TBM wordt per dag 20 uur ingezet, om vervolgens 4 uur te stoppen.

Transportproces



Figuur 5.12: Transport in de tunnel

Op de plaatsen A en B zijn verkeerslichten geplaatst, zodat er nooit twee trailers in tegengestelde richting rijden tussen A en B, twee trailer in dezelfde richting is wel mogelijk. Het is mogelijk dat er in de tunnel op meerdere plaatsen éénrichtingverkeer noodzakelijk is.

Prioriteitsregel

Deze prioriteitsregel is vastgesteld na analyse van het boorproces.

- Een trailer met grout mag gaan lossen als de losplaats niet bezet is en de voorraad grout op de TBM leeg is.
- Er zijn twee trailers met segmenten, trailer 1 dient altijd voor trailer 2 gelost te worden.
- Een trailer met segmenten mag gaan lossen als de losplaats niet bezet is en de voorraad segmenten leeg is.
- Als de losplaats niet bezet is en zowel de voorraad grout als de voorraad segmenten is leeg en de geboorde afstand is 0, dan dient eerst grout gelost te worden.
- Een trailer met zand/cement kan gaan lossen als de voorraad grout en de voorraad segmenten vol zijn en de losplaats leeg is.

Specificatie

De tweede stap in de probleemoploscyclus is die van specificatie. Deze stap moet resulteren in een werkend simulatiemodel. De objecten en processen die tijdens de vorige stap geïdentificeerd zijn, kunnen nu gespecificeerd worden.

Reduceren

Daar de werkelijkheid vele malen groter en complexer is dan in het model ondergebracht kan worden, is het noodzakelijk een aantal vereenvoudigingen te doen voordat het model geprogrammeerd kan worden. Dit zijn de belangrijkste vereenvoudigingen, die in dit model zijn ingevoerd.

1. Een tunnelboormachine begint normaal gesproken in de startschacht en boort tot de ontvangtschacht, die in dit geval 7160 meter verder weg ligt. In deze simulatie is alleen de voortgang vanaf 7000 meter meegenomen, omdat dat voor het logistieke proces maatgevend is.
2. In werkelijkheid wordt op een bepaalde afstand achter de TBM gewerkt aan de aanleg van de scheidingswand en de betonnen vloer en dus verplaatst de zone met de verkeerslichten tijdens de voortgang van de tunnel. In de simulatie blijft dit gebied echter op dezelfde plaats.
3. Trailers hebben in de praktijk enige tijd nodig om op snelheid te komen en om te vertragen en rijden dus niet met een constante snelheid. In de waarde, die in de simulatie wordt ingevoerd voor de snelheid van de trailers is de versnelling en vertraging reeds verdisconteerd.
4. Tijdens de uitvoering rijden de trailers waarschijnlijk op afroep van de schacht naar de boormachine. De wachtrij in de tunnel achter de tweede volgwagen blijft dan klein, in dit model, rijden de trailers echter na het laden direct naar de TBM.

Implementeren

Voordat het model geïmplementeerd kan worden, dient eerst een keuze gemaakt te worden voor een bepaalde simulatietaal. In dit geval is gekozen voor Arena 4.0, een flow georiënteerde simulatietaal, waar verder niet op ingegaan wordt.

Verificatie en validatie

De derde stap uit de probleemoploscyclus staat in het teken van de verificatie en validatie. De centrale vraag die tijdens deze stap wordt gesteld is of het model wel overeenkomt met de gemaakte vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Bij de verificatie wordt nagegaan of het model wel juist is gecodeerd. Met andere woorden: zijn invoerparameters (zoals de laadtijden) wel juist en loopt het proces inderdaad zo als is weergegeven.

Bij de validatie wordt meer naar de uitkomsten en gedragingen van het model gekeken. Komen de waarden uit het simulatiemodel overeen met de werkelijkheid? Staan er

bijvoorbeeld inderdaad altijd trailers in 'wachtrij lossen'? Daarnaast wordt bepaald of het model zich zo gedraagt als verwacht wordt.

Na het uitvoeren van een aantal tests is gebleken dat het model juist is gecodeerd en dat het zich gedraagt, zoals verwacht werd.

Dat blijkt uit de volgende feiten:

- Er is in het model nooit meer dan 1 trailer aan het lossen.
- De voorraad grout en segmenten wordt nooit groter dan 1.
- Als 1 set van 4 trailers wordt ingezet is de voortgangssnelheid van de TBM lager.
- Als de voortgangssnelheid van de TBM wordt veranderd kan met een handberekening de voortgang bepaald worden, deze blijkt overeen te komen met de uitkomsten van het model.

Zoeken naar oplossingen en experimenteren

We beschikken nu over een model dat overeenkomt met de gemaakte vereenvoudiging van de werkelijkheid. Door experimenten met het model uit te voeren, kunnen bepaalde zaken getest worden. De drie tests, die uitgevoerd zijn worden hier beschreven.

1. Wat zijn de gevolgen voor de voortgang als de TBM (een keer) dient te wachten op de aanvoer van materiaal?

Om dit te kunnen testen zijn de laad- en lostijden vermenigvuldigd met een factor 1,3 en is de duur van de boorcyclus gedeeld door 1,3. Op deze wijze worden een aantal stops geforceerd en kan gekeken worden hoe het boorproces daarop reageert. Het blijkt dat de gemiddelde duur van de boorcyclus bij dit experiment, ondanks de stops lager is (zie bijlage 15).

2. Wat is de gemiddelde voortgangssnelheid als de laad- en lostijden variëren rond de berekende waarden?

Uit een test die is uitgevoerd met stochastische invoerwaarden voor de laad- en lostijden (zie bijlage 15) blijkt dat ook dan de geplande voortgangssnelheid gehaald wordt.

3. Wat zijn de alternatieven voor een signaleringssysteem en wat is de invloed van de verschillende systemen op de voortgang van het boorproces?

Er zijn drie verschillende signaleringssystemen ontworpen en vervolgens vergeleken, dit zijn:

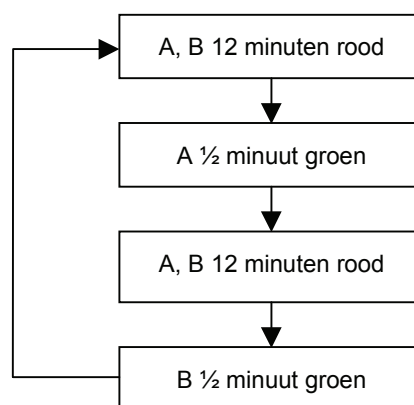
- Het vaste wachttijd systeem,
- Het doorstroomsysteem,
- Het first in first out (FIFO) systeem.

De werking van de verschillende systemen wordt op de volgende pagina's schematisch weergegeven.

Een systeem dat de maatgevende voortgang van de TBM negatief beïnvloedt, komt niet in aanmerking om toegepast te worden tijdens de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart. Als blijkt dat de voortgang van de TBM niet afhankelijk is van het gekozen systeem, dan kan de keuze gemaakt worden op basis van criteria als kosten en betrouwbaarheid.

Vaste wachttijd systeem

Het vaste wachttijd systeem reageert niet op de aankomst van trailers. De vaste wachttijd wordt berekend door de afstand tussen de verkeerslichten (A en B, zie figuur 5.12) te delen door de (minimale) gemiddelde snelheid van de trailers. In dit geval 1500 meter en 8 km per uur.

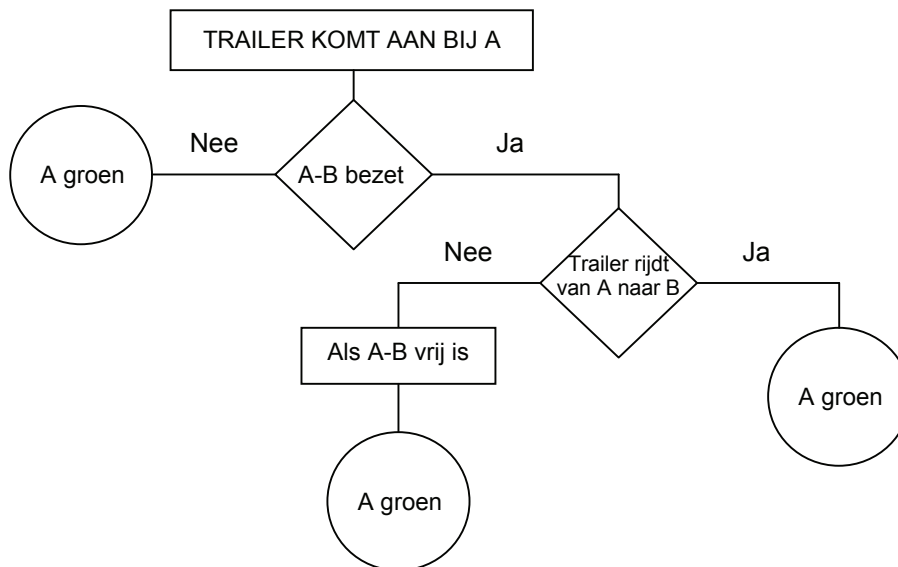


Figuur 5.13: Vaste wachttijd systeem.

Doorstroomsysteem

Het doorstroomsysteem reageert op de aankomst van een trailer bij één van de verkeerslichten (A of B). Dan wordt geregistreerd of er op dat moment een trailer rijdt in het tunneldeel A-B. Als dat niet het geval is gaat het licht kort op groen. Als dat wel het geval is, wordt licht alleen op groen gezet als de trailer die in A-B rijdt dezelfde richting op gaat als de trailer, die bij het verkeerslicht staat. In de uitgangssituatie staan beide lichten op rood.

Het doorstroomsysteem is hier weergegeven voor verkeerslicht A.

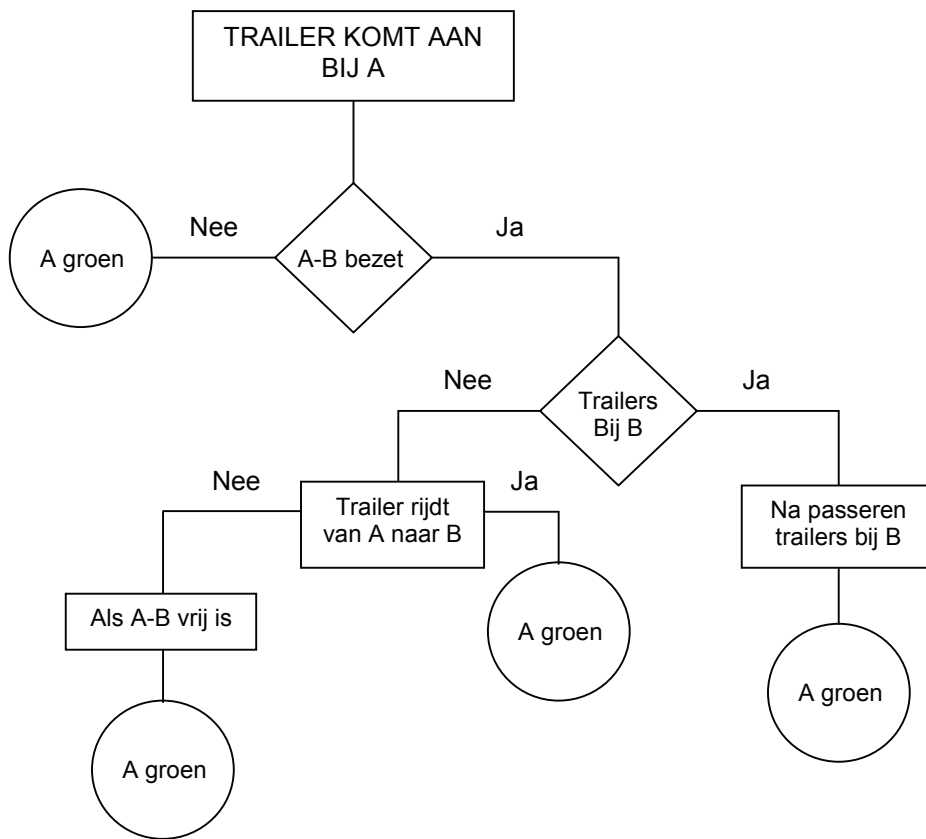


Figuur 5.14: Doorstroomsysteem.

FIFO systeem

Het FIFO systeem lijkt op het doorstroomsysteem, met het verschil dat bij dit systeem heel consequent wordt gekeken welke trailer het eerst aankomt bij A of B. Als een trailer aankomt bij A en er rijden trailers van B naar A, dan wordt hier op gewacht. Als er trailers van A naar B rijden en er staan trailers bij B te wachten, dan wordt er toch gewacht tot de bij B wachtende trailers gepasseerd zijn.

Lange wachttijden zijn bij toepassing van dit systeem uitgesloten.



Figuur 5.15: FIFO systeem.

In het model zijn het vaste wachttijd systeem en het doorstroomsysteem geprogrammeerd. Beide systemen blijken te voldoen aan de gestelde eis, dat het systeem de maatgevende voortgangssnelheid (van 127 minuten per boorcyclus) niet mag beïnvloeden. Als de voortgangssnelheid wordt verhoogd, blijkt het doorstroom systeem beter te voldoen (zie bijlage 15).

§ 5.2.2 Resultaten simulatie

Na het analyseren van de resultaten die verkregen zijn door het uitvoeren van de simulatie (zie bijlage 15) kan geconcludeerd worden dat de boorsnelheid in de maatgevende situatie bepaald wordt door de tunnelboormachine en niet door de logistiek.

Daarnaast is vastgesteld dat het boorproces niet vastloopt als er éénmaal een stop is geweest, die veroorzaakt wordt door een te late aanvoer van materiaal.

Naast de goede betrouwbaarheid van het systeem blijkt uit de simulatie ook dat alle drie de verschillende signaleringssystemen voldoen. In de voorgaande paragraaf is reeds aangegeven dat mocht dit geval zijn, de keuze van een systeem dus gemaakt kan worden op basis van kosten en betrouwbaarheid.

De marges bij toepassing van een geavanceerd systeem zijn echter wel groter en ook het aantal stops is kleiner. Chauffeurs geven waarschijnlijk de voorkeur aan een systeem met minder stops en kortere transporttijden, wat een doorslaggevend argument kan zijn om toch een FIFO systeem te gebruiken.

§ 5.3 CONCLUSIES NADER ONDERZOEK

De conclusies van het nader onderzoek worden verdeeld in conclusies van de deterministische analyse, van de Monte Carlo simulatie en conclusies van de Arena 4.0 simulatie.

Uit de deterministische analyse van de cyclustijden blijkt dat de duur van de loscyclus (de bottleneck van het logistieke systeem) minder is dan de duur van de minst haalbare duur van de boorcyclus. De maximumsnelheid van het ongestoorde boorproces wordt dus bepaald door de tunnelboormachine.

Uit de Monte Carlo simulatie (paragraaf 5.1) blijkt dat de marge tussen de boorcyclus enerzijds en de loscyclus en transportcyclus anderzijds groot genoeg zijn om te spreken van een zeer betrouwbaar logistiek systeem. Met nadruk dient daarbij vermeld te worden dat het in die analyse gaat om een analyse van het ongestoorde logistieke systeem. De afwijkingen van de procestijden worden veroorzaakt door inefficiënties. Tevens zijn de transport- en de loscyclus niet gekoppeld, wat in de praktijk wel zo is.

Uit de Arena simulatie, waarin de logistieke processen wel gekoppeld zijn, blijkt dat de voortgang van het boorproces niet ontregeld wordt als de TBM een keer dient te wachten op de aanvoer van materiaal. Ook blijken verschillende signaleringssystemen te voldoen aan de eis dat deze geen invloed mogen hebben op de voortgangssnelheid van de TBM. Voor de toepassing tijdens de uitvoering wordt aanbevolen om toch het systeem met het minste aantal stops en de kortste wachttijden te kiezen. Dat is in dit geval het FIFO systeem. Het is voor chauffeurs prettiger om tijdens het transport door te kunnen rijden en daarnaast kunnen eventuele extra transporten sneller worden uitgevoerd.

6. VEILIGHEIDSANALYSE

Dit hoofdstuk bestaat uit vier paragrafen, in de eerste wordt de motivatie voor en het doel van deze veiligheidsanalyse aangegeven. Vervolgens wordt de veiligheidssituatie in respectievelijk de schacht, de tunnel en de TBM geanalyseerd en daarna volgen de maatregelen om de risico's te minimaliseren, die in de ontwerp- en uitvoeringsfase genomen kunnen worden. Tot slot zijn de conclusies weergegeven.

§ 6.1 INLEIDING VEILIGHEIDSANALYSE

Naast de reeds gekwantificeerde risico's voor vertragingen tijdens de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart zijn er ook risico's m.b.t. de veiligheid en gezondheid (V & G) van mensen, die direct of indirect zijn betrokken bij de bouw van de tunnel. Een deel van deze risico's wordt veroorzaakt door de logistiek tijdens de bouwfase, dat zijn ook de risico's die in dit hoofdstuk aan bod komen.

Er zijn voor de opdrachtgever verschillende redenen om zich bezig te houden met V & G tijdens het ontwerp en de uitvoering van een project, dit zijn de belangrijkste:

1. Wettelijke plicht.

De opdrachtgever werkt samen met de aannemer, die contractueel aansprakelijk is voor de veiligheid van zijn werknemers, daarnaast is de projectorganisatie als werkgever verantwoordelijk voor de veiligheid en gezondheid van zijn eigen personeel en als overheid voor omwonenden en voor overige betrokkenen.

Vrij naar Burgerlijk Wetboek art. 7:658 [8]:

De werkgever dient die veiligheidsmaatregelen te nemen die redelijkerwijze van hem mogen worden verwacht en wel zodanig dat zij bij normaal gebruik de werknemer in voldoende mate beschermen.

2. Voorkomen van vertragingen en slechte publiciteit als gevolg van ongevallen.

Naast de wettelijke plicht te zorgen voor veiligheid bij de uitvoering van een project, heeft een opdrachtgever zelf voordeel bij een minimaal aantal ongelukken. Het tegengaan van persoonlijk leed staat uiteraard voorop, maar daarnaast heeft de opdrachtgever er belang bij dat zijn project niet negatief in de publiciteit komt en dat er geen vertragingen optreden door stilstand als gevolg van onderzoeken door de arbeidsinspectie.

Ondanks alle inspanningen door aannemer en opdrachtgever blijkt dat ongelukken in de bouw in het algemeen en bij de uitvoering van grote projecten in het bijzonder moeilijk te voorkomen zijn. Jaarlijks zijn er bij de arbeidsinspectie een kleine 1000 meldingen van een ernstig ongeval en tevens blijkt dat er een stijging is van het aantal zeer ernstige en dodelijke ongelukken [8]. Statistisch gezien zijn er bij een project met een aanbestedingsprijs van orde 1 miljard gulden (zoals bij dit project) 1 tot 3 dodelijke slachtoffers te verwachten.

De oorzaken van de ergste ongevallen zijn zeer uiteenlopend, zoals blijkt uit de nu volgende beschrijving van ernstige/dodelijke ongevallen bij grote tunnelbouw projecten.

Brand in de Storebælt Treintunnel [7]

De oorzaak van dit incident was lekkende olie van het hydraulische systeem van de TBM. Mogelijk is door de hoge oliedruk de olie gaan sproeien en ontbranden, met als gevolg een “explosie als een gaswolk”. Opvallend bij dit ongeluk waren de volgende drie zaken.

- Het transport van gewonden op stretchers was moeilijk, door te weinig ruimte als gevolg van neergezette gereedschapskisten en allerlei andere goederen.
- Er was een noodplan, alleen was bij het maken van dit plan geen rekening gehouden met branden en ongevallen.
- De radioverbinding tussen de brandweer en de alarmcentrale werkte op het moment van het ongeluk niet.



Figuur 6.1: Kanaaltunnel (31).

In totaal 10 doden tijdens de uitvoering van de Kanaaltunnel [1]

Bij de bouw van de Kanaaltunnel zijn als gevolg van verschillende ongevallen tien dodelijke slachtoffers (acht Britse en twee Franse) gevallen. De oorzaken waren divers, zowel elektrische problemen (zoals kortsluiting) als mechanische (bijvoorbeeld aanrijdingen met treintjes en storingen van de segmentkraan).

De dodelijke slachtoffers en andere voorvallen en ongelukken leidden tot veel media aandacht, die samen ging met politieke en publieke bezorgdheid [5].

Blijvend letsel door val in schacht bij Botlekspoortunnel

Tijdens de afbouw van de schacht voor de Botlekspoortunnel is een medewerker die aan de rand van de bouwput stond geraakt door een deel van een bekistingsplaat, dat uit een kraan viel. Hierdoor viel hij tien meter naar beneden en raakte als gevolg van de val tijdelijk in coma, met blijvend geestelijk en lichamelijk letsel tot gevolg.

Dodelijk slachtoffer en op hol geslagen treintje bij de Westerscheldetunnel

Reeds op de eerste dag van de start van de booractiviteiten bij deze boortunnel werd een medewerker van de betonfabriek doodgedrukt bij het parkeren van geprefabriceerde tunnelsegmenten op het tasveld [30].

Een andere gebeurtenis die uitgebreid in de media is geweest is het losraken van de wagons met segmenten. Vier wagons met een totale lading van 100 ton raakten los van de twee locomotieven en reden als gevolg van hun eigen gewicht de toerit met een helling van 4,5 % af. Beneden aangekomen boorden ze zich door het stootblok, om uiteindelijk op de tunnelvloer te storten en zich onder de achterkant van de TBM te boren. Dit kon gebeuren door het falen van zowel de koppeling als de veiligheidskettingen rond de koppeling tussen de locomotief en de wagons en het niet functioneren van de zelfreminrichting [29].

Uit deze opsomming blijkt dat de oorzaak van een ernstig ongeval niet zelden een logistiek probleem is.

Het doel van de veiligheidsanalyse is het identificeren van de grootste veiligheidsrisico's bij de bouw van de Boortunnel Groene Hart en vervolgens het doen van aanbevelingen om deze risico's te minimaliseren.

Om de risico's (in de schacht, in de tunnel en aan het boorfront) te kunnen identificeren wordt gekeken naar een aantal vaak voorkomende risico-items, die worden beïnvloed door de logistiek.

Voor alle duidelijkheid: risico's, die het gevolg zijn van het uitvoeren van werkzaamheden op of aan de TBM blijven buiten beschouwing.

§ 6.2 HOOFDRISICO'S VOOR VEILIGHEID EN GEZONDHEID

Op verschillende plaatsen in de tunnel zijn de omstandigheden en werkzaamheden verschillend en zijn er dus ook andere maatgevende veiligheidsrisico's. In deze paragraaf worden de hoofdrisico's in respectievelijk: de startschacht, de tunnel en aan het boorfront aangegeven. Een hoofdrisico is de naam die gegeven is aan een verzameling van kleine risico's.

§ 6.2.1 Hoofdrisico's in de startschacht

In de startschacht zijn er een aantal risico's, met name voor zogenaamde mechanische ongevallen (zoals vallen en bekneld raken). De meeste risico's gelden voor het uitvoerend personeel, maar ook het leidinggevende en toezichhoudende personeel kan gevaar lopen.

Verplaatsen van ladingen

In de schacht en op de opslagplaats van de segmenten is er tijdens het verplaatsen van ladingen een risico dat opgestapelde elementen omvallen, of dat de grijper van de kraan de lading loslaat.



Figuur 6.2: Segmentopslag bij de Westerscheldetunnel (32).

Transport

De snelheid waarmee de trailers in de schacht rijden is zeer laag, maar het risico is juist dat een trailer gaat rijden als er iemand op, onder of naast aan het werk is. Dit risico is extra groot als de trailerchauffeur weinig zicht heeft.

Looppaden, trappen en de rand van de schacht

Indien deze onvoldoende voorzien zijn van leuning, is er een risico om van grote hoogte in de schacht te vallen.

§ 6.2.2 Hoofdrisico's in de tunnel

In de tunnel zijn de risico's van een andere aard en hier zullen mechanische ongevallen waarschijnlijk minder vaak optreden.

Klimaat

In de tunnel (vergelijkbaar met een afgesloten ruimte) vormt een slecht klimaat een risico voor de gezondheid van alle personen die in de tunnel komen. Het klimaat omvat een aantal verschillende zaken: vochtigheid, stof, temperatuur, samenstelling van de lucht en tocht. Een minder goed ventilatie systeem kan tot gevolg hebben dat het klimaat in de tunnel te slecht wordt om in te werken.

Transport (snelheid en geluid)

In tegenstelling tot het transport in de schacht, rijden de trailers in de tunnel wel redelijk hard door (maximaal 15 km per uur). Het gevolg hiervan is dat er een risico ontstaat voor aanrijdingen, zeker op plaatsen waar de trailers door de smalle openingen in de scheidingswand rijden (tenzij dit volledig wordt voorkomen door het guidance system). Als het signaleringssysteem faalt, laat men het transport waarschijnlijk doorgaan met een alternatief signaleringssysteem. Het is de vraag of dit net zo veilig is.

Het falen van de reminstallatie op één van de trailers kan tot gevolg hebben dat deze trailer ongecontroleerd en op hoge snelheid door de tunnel rijdt, met alle mogelijke gevolgen van dien.

Ook één of meerdere busjes voor transport van personen rijden door de tunnel, ook deze zullen als er met hoge snelheden wordt gereden een potentieel gevaar vormen. Naast een kans op aanrijdingen veroorzaakt het transport met trailers ook een hoeveelheid geluid, opwaaiend stof en uitlaatgassen. De twee laatste zijn bij het risico-item 'klimaat' al aan de orde geweest, maar geluid valt daar niet onder en wordt daarom apart genoemd. Een te hoge geluidsproductie van de trailers vormt een gezondheidsrisico voor mensen in de tunnel.



Figuur 6.3: Uitgebrande wrakken in de Mont Blanc Tunnel (33).

Brand

Het grootste veiligheidsrisico tijdens de uitvoering van de Boortunnel Groene Hart is brand. De potentiële gevolgen van een brand in een tunnel zijn zeer groot, omdat de brand zich anders gedraagt dan bovengronds. De verspreiding van de brand (langs de bovenzijde van de tunnel) kan een factor vijf tot tien keer groter zijn dan bovengronds. Daarnaast blijven de rook en gassen in de tunnel hangen als er onvoldoende ventilatie is, wat leidt tot enorme temperatuur verhogingen [5]. De meeste slachtoffers vallen echter door de rook in de tunnel. Zonder goede ventilatie, gasmaskers en evacuatie mogelijkheden kan het aantal slachtoffers van een brand zeer groot zijn.

Frames in de tunnel

Voor de medewerkers die betrokken zijn bij de aanleg van de betonnen scheidingswand is het werken op de speciaal ontworpen frames voor de ondersteuning van bekisting en wapening risicovol. De werkzaamheden worden op enkele meters hoogte uitgevoerd op een constructie, waar de beschikbare ruimte om te bewegen minimaal is. De kans op mechanische ongevallen is hier dus groot.

§ 6.2.3 Hoofdrisico's bij de TBM

Bij de TBM speelt een combinatie van eerder genoemde risico's een rol.

Verplaatsen ladingen

Als de ladingen tijdens het lossen niet goed worden bevestigd, of om een andere reden loslaten kan dit een gevaar vormen voor mensen, die onder de kraan aan het werk zijn.

Smalle kabelkoker

De kabelkoker waar de trailers overheen rijden om onder de loskraan te kunnen komen, is relatief smal en er is dus een risico dat mensen hier vanaf vallen, of dat een trailer met één (of meerdere) wielen naast de kabelkoker komt te staan of zelfs omvalt.

Klimaat

Het risico dat het klimaat bij de TBM niet geschikt is om te werken, is vergelijkbaar met het eerder genoemde risico dat het klimaat in de tunnel niet voldoet. Met als bijkomend nadeel, dat zonder verse luchttoevoer de temperatuur in de omgeving van de TBM oploopt tot circa 30°.

Brand

De kans op brand bij de TBM en de gevolgen zijn door de aanwezigheid van meer brandbaar materiaal groter dan elders in de tunnel, maar de gevolgen zullen hetzelfde zijn. Brand veroorzaakt door problemen op de TBM zijn echter geen logistiek probleem.

§ 6.2.4 Conclusie van de V & G analyse

V & G risico's zijn moeilijk uit te drukken in getallen, daarom wordt slechts aangegeven welke items de aandacht dienen te krijgen bij een beoordeling van een veiligheidsplan. Het grootste risico tijdens de uitvoering is brand in de tunnel. In de risico analyse kwam brand reeds naar voren als het maatgevende grote risico. Naast brand zijn slechte klimaat omstandigheden en mechanische ongevallen de belangrijkste V & G risico-items. De ervaring leert dat mechanische ongevallen in de schacht het meest voorkomen bij een dergelijk project.

Om elk van deze risico's te minimaliseren dienen maatregelen genomen te worden, waarvan enkele in de volgende paragraaf zijn beschreven.

§ 6.3 MAATREGELEN

De maatregelen, die genomen kunnen worden om de veiligheidsrisico's te minimaliseren zijn in drie categorieën in te delen:

- Rekening houden met veiligheid tijdens het ontwerp (preventief);
- Rekening houden met veiligheid tijdens de uitvoering (preventief);
- Mogelijkheden bieden om de ernst van gevolgen te beperken (reactief).

De twee laatste punten zijn hier slechts kort behandeld en vervolgens wordt iets uitgebreider stilgestaan bij de maatregelen, die genomen kunnen worden tijdens de ontwerpfase. Voor een uitgebreid overzicht van veiligheidsmaatregelen wordt verwezen naar andere literatuur op dit gebied (bijvoorbeeld [1] en [7]).

§ 6.3.1 Preventieve V & G maatregelen tijdens de uitvoering

Dit zijn enkele van de belangrijkste preventieve veiligheidsmaatregelen, die tijdens de uitvoering van dit project genomen kunnen worden:

1. Binnen de organisatie van aannemer en opdrachtgever prioriteit geven aan V & G zaken.

Het gaat daarbij om een aantal zaken, zoals:

- Het aanstellen van een veiligheidscoördinator door beide partijen (dit is verplicht gesteld in het Arbobesluit [21]).
- De verantwoordelijke managers op de hoogte stellen van de V & G reglementen en aangeven hoe ze daar toezicht op kunnen houden (bijvoorbeeld door onaangekondigde controles of auditsessies).
- Het afsluiten van het bouwterrein voor onbevoegden en het aanbrengen van een beperkte doorgang naar de schachten (bijvoorbeeld door een poort die te openen is met een pasje of iets gelijkwaardigs).
- Het organiseren van trainingen voor het personeel op de bouwplaats en ook voor hulpverleners.
- Het uitvoeren van controles op de arbeidstijden.

2. Brandpreventie [5].

- Een minimum aan brandbare spullen en gassen toelaten in de tunnel en alleen op basis van vergunning laswerkzaamheden in de tunnel uitvoeren.
- Het instellen van een rookverbod en bij het kiezen van elektrische apparatuur letten op explosieveiligheid.
- Het plaatsen van blusapparatuur op plaatsen waar de kans op brand groot is en wel zodanig, dat de apparatuur direct voorhanden is bij het uitbreken van een brand (en deze apparatuur ook regelmatig testen).
- Het aanbrengen van rook + warmtemelders in de tunnel en op de trailers.

3. Vluchtprocedures [5].

- Het opstellen en oefenen van vluchtprocedures.
- Zorgen dat er een transportmiddel beschikbaar is.
- Zorgen voor minstens één alternatief communicatiesysteem.

4. Persoonlijke veiligheidsmiddelen.

Het verplichten van en zorgen voor persoonlijke veiligheidsmiddelen, daar onder vallen: veiligheidsschoenen, helmen, deugdelijke werkkleding en reflecterende jassen/hesjes, maar ook gehoorbescherming, goede verlichting in de tunnel, toiletten, leuning, hekwerken en EHBO-spullen.

§ 6.3.2 Reactieve V & G maatregelen tijdens de uitvoering

Dit zijn enkele van de belangrijkste reactieve veiligheidsmaatregelen, die bij dit project genomen kunnen worden:

1. Zorgen voor de aanwezigheid van EHBO-spullen en zorgen dat de medewerkers deze eerste hulp kunnen verlenen. Tevens zorgen voor de beschikbaarheid van een getrainde bedrijfshulpverleningsploeg.

2. Er op toezien dat hulpverleners in geval van een calamiteit toegang hebben tot de bouwplaats en bekend zijn met de situatie ter plaatse.
3. Afspraken maken met ziekenhuizen en brandwondencentra over het opvangen van slachtoffers in geval van een calamiteit.

§ 6.3.3 Preventieve V & G maatregelen tijdens het ontwerp

Tot zover de preventieve en reactieve maatregelen tijdens de uitvoering, in deze studie wordt voornamelijk aandacht besteed aan veiligheidsmaatregelen, die tijdens het ontwerp genomen kunnen worden. De items die invloed hebben op de V & G risico's en hier aan de orde komen, zijn de eisen aan de trailers en de indeling van de startschacht.

V & G eisen aan de trailers

Het ligt voor de hand dat bij het ontwerp van de trailers geëist wordt dat de maatgevende lading met de geplande gemiddelde snelheid door de tunnel getransporteerd kan worden (en andere functionele eisen). Daarnaast zijn er een aantal extra eisen aan de trailers, om te voorkomen dat er als gevolg van het gebruik van een bepaald type trailer risicovolle situaties kunnen ontstaan. Hier worden deze eisen vermeld zonder verder in te gaan op het kwantificeren van de eisen naar de wettelijke norm.

De opsomming van de eisen geeft de HSL-Zuid de mogelijkheid om B/K aan te geven waar rekening mee gehouden dient te worden bij het ontwerp van de trailers.

Eisen aan trailers om V & G risico's te minimaliseren:

1. Zicht

Het is belangrijk dat de chauffeur van een trailer goed zicht heeft op de situatie in de schacht en in de tunnel, goede verlichting en spiegels zijn dus een vereiste. Daarnaast is het van belang dat de trailers zijn uitgerust met duidelijk zichtbare remlichten, om te voorkomen dat twee achter elkaar rijdende trailers botsen als de voorste een noodstop maakt.

2. Mechanisch/motorisch

Om calamiteiten als gevolg van hoge snelheden van de trailers in de tunnel te voorkomen, dienen ze uitgerust te zijn met een snelheidsbegrenzer en tevens een betrouwbaar remsysteem (of meerdere remsystemen). Daarnaast is het van belang een noodstop in te bouwen die in werking treedt als de chauffeur de controle over het stuur verliest, bijvoorbeeld omdat hij onwel wordt.

Als extra aandacht wordt besteed aan de kwaliteit van de trailers, wordt de kans op het uitvallen van trailers of het opblazen van de motor (met alle mogelijke gevolgen van dien) geminimaliseerd. Onderdelen van de motor die snel kunnen falen zijn o.a. de koeling en oliereservoirs, naast deze onderdelen van de motor verdienen ook de stuurbevestiging en de schokdempers extra aandacht. Om problemen te voorkomen dienen de trailers onder een streng onderhoudsregime geplaatst te worden.

3. Lucht

Om een onwerkbaar slechte samenstelling van de lucht te voorkomen, dienen de trailers uitgerust te worden met katalysatoren, een afgasreinigingssysteem en eventueel ook met stoffilters. Stoffilters kunnen het opwaaien van stof bij het rijden over de zand/cement stabilisatie minimaliseren.

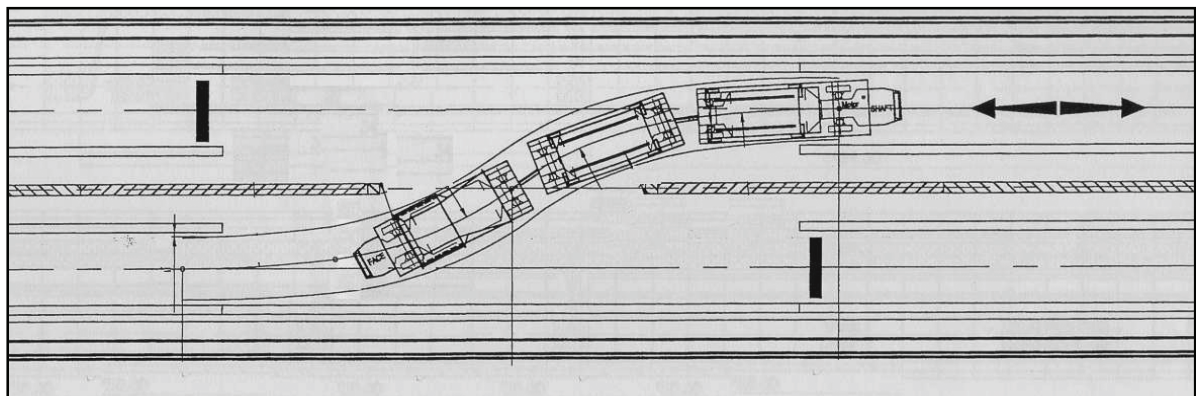
4. Brandmelder en handblusser

Als de trailers worden uitgerust met een brandmelder en een handblusser, kan de chauffeur direct optreden, als een trailer in brand staat. De trailers zijn namelijk een potentieel brandgevaar in de tunnel en dit gevaar kan zo geminimaliseerd worden. De brandmelder kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd als een signaal (akoestisch) en een alarmlicht.

5. Guidance system

Op een veertiental plaatsen in de tunnel zijn openingen in de scheidingswand gelaten, zodat het voor trailers mogelijk is om van tunnelhelft te wisselen. Deze openingen zijn slechts 12 meter breed en dus is er een kans dat een trailer bij een stuurfout tegen de wand rijdt. Om de kans hierop te minimaliseren kunnen de trailers worden uitgerust met een guidance system, zodat de trailers (automatisch) gecontroleerd en op lage snelheid door de openingen in de wand rijden.

Daarnaast is het voor de veiligheid belangrijk de trailers uit te rusten met een signaal, dat klinkt zodra de trailers achteruit rijden. Personen die zich (onzichtbaar voor de chauffeur) achter de trailer bevinden worden zo gewaarschuwd.



Figuur 6.4: Opening in scheidingswand (34).

Indeling van de startschacht

De indeling van de startschacht, is al meerdere malen ter sprake gekomen als een item, dat tijdens de bouw van de tunnel invloed zal hebben op zowel de voortgang van de TBM als de veiligheid van het logistieke systeem. In deze paragraaf zijn twee varianten voor de indeling van de schacht uitgewerkt en bij de keuze uit deze twee varianten komen zowel uitvoeringsaspecten als veiligheidsaspecten aan de orde. Het ontwerp concentreert zich rond de indeling van de startschacht en dus het laden voor de ruwbouw. Het laden voor de afbouw (bestaande uit de vloer, de anti-ontsporingranden en de scheidingswand), dat in de toerit plaats vindt, wordt buiten beschouwing gelaten.

Om te beginnen wordt de totstandkoming van de beide varianten toegelicht.

1. Randvoorwaarden en uitgangspunten

Tijdens het ontwerp is rekening gehouden met een aantal randvoorwaarden en uitgangspunten, deze zijn terug te lezen in bijlage 18.

2. Onderdelen

De schacht dient plaats te bieden aan een aantal onderdelen. De 14 onderdelen, die ingepast dienen te worden in en om de startschacht, zijn in de onderstaande opsomming in vier clusters ingedeeld. Het vormen van clusters is een hulpmiddel bij het ontwerpen van verschillende varianten [10]. De clusters zijn gevormd op basis van de onderlinge relaties tussen de onderdelen.

Bij het ontwerpen van de varianten wordt rekening gehouden met een aantal aandachtspunten, die in de opsomming bij de onderdelen zijn aangegeven.

Cluster 1: Personen verkeer

1. Trappen

Bij het plaatsen van één of meerdere trappen in de startschacht, dient rekening gehouden te worden met de plaats ten opzichte van het ketenpark en de segmentopslag. Daarnaast komen de trappen bij voorkeur uit op een plaats waar weinig transport langskomt, een soort dode hoek in de schacht.

2. Lift

Voor de plaats van de lift in de schacht gelden dezelfde aandachtspunten als voor de trappen. Een logisch gevolg is dat de lift bij een trap geplaatst wordt.

3. Parkeerplaats busje(s) voor personen vervoer.

Het middel voor personenvervoer in de tunnel is een busje, het spreekt dus voor zich dat dit busje geparkeerd wordt bij een trap of de lift.

Cluster 2: Kabels en leidingen

4. Bentonietpomp

De bentonietpomp is niet ingedeeld in het zelfde cluster als de trappen en lift, maar wordt wel net als deze onderdelen bij voorkeur geplaatst in een zogenaamde dode hoek. Het is namelijk een groot object, dat bij voorkeur gedurende het gehele project geen hinder mag vormen voor andere werkzaamheden of transporten.

5. Ventilator

De ventilator wordt bij voorkeur opgehangen aan het stempelraam, op een wijze dat er geen hinder is bij het laden van de trailers. Het is mogelijk de ventilator te verplaatsen vanaf het moment dat de blindringen zijn afgebroken.

6. Overige kabels en leidingen

De overige kabels en leidingen, die in de tunnel aan de wand zijn bevestigd en die in de schacht naar het maaiveld worden geleid, worden na het afbreken van het

startframe verlegd. Het ligt voor de hand om de leidingen zo aan te brengen dat de lengte in de schacht minimaal is en er weinig bochten in de leidingen zitten.

Cluster 3: Laden

7. Opslag segmenten en kabelkoker elementen

De segmenten worden bij voorkeur opgeslagen naast de schacht (aan één of twee zijden), zodat ze eenvoudig met een portaalkraan in de schacht gelaten kunnen worden.

8. Stortkoker voor grout

De stortkoker voor het grout wordt zo dicht mogelijk bij de grout centrale geplaatst en tevens dicht bij een plaats waar de trailers kunnen parkeren om geladen te worden.

9. Stortkoker voor zand/cement

De plek waar de zand/cement stabilisatie wordt gelost, dient bij voorkeur dicht bij de zandopslag gepland worden. Ook hier geldt dat er op die plek een gelegenheid dient te zijn om trailers te parkeren en te laden.

10. Laadplaatsen en parkeerplaatsen

In de schacht dienen voor het laden van minimaal twee trailers laadplaatsen beschikbaar te zijn, zodat het mogelijk is twee trailers tegelijk te laden. Voor de overige twee trailers dienen parkeerplaatsen aangelegd te worden. De laad- en parkeerplaatsen dienen goed bereikbaar te zijn (zonder moeilijke manoeuvres) en het doorgaande transport niet te hinderen.

11. Kranen

Voor het laden van segmenten en overig materiaal dient voldoende kraancapaciteit aanwezig te zijn. Het bereik van de kranen moet toereikend zijn om de lading te allen tijde op de gewenste plaats in de schacht te kunnen krijgen. Voor het laden van de segmenten wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van een portaalkraan.

Cluster 4: Onderhoud en reparatie

12. Onderhoud en reparaties aan trailers

Onderhoud en reparaties aan trailers kan in of buiten de schacht worden uitgevoerd. Om het onderhoud en de reparaties goed uit te kunnen voeren wordt een werkplaats ingericht, dicht bij de plaats waar de reserve onderdelen zijn opgeslagen.

13. Tanken

Het bijtanken van de trailers wordt in of buiten de schacht uitgevoerd in de dagelijkse periode voor onderhoud. Als er buiten de schacht getankt wordt, ligt het voor de hand om te tanken op de plaats waar ook onderhoud plaatsvindt.

14. Opslag overig materiaal voor ringbouw en reserve onderdelen

Het materiaal voor de ringbouw en de reserve onderdelen liggen op een opslagterrein, dat bij voorkeur dicht tegen de schacht aan ligt.

Keuze voor de indeling van de startschacht

Er zijn twee varianten gemaakt voor de indeling van de startschacht, bij variant 1 ligt de nadruk op veiligheid en bij variant 2 ligt de nadruk op functionaliteit. Beide varianten voor de indeling van de startschacht zijn te zien in bijlage 19.

Opvallende is dat er een groot aantal overeenkomsten is tussen de twee varianten, dit is min of meer het gevolg van de clusters die gevormd zijn en het feit dat de terreininrichting en de afmetingen van de startschacht al vast liggen.

De criteria die worden gebruikt om uit deze twee varianten een keuze te maken zijn functionaliteit en veiligheid. Het blijkt dat deze twee criteria tegenstrijdig zijn bij het maken van een keuze en dat dan aan één van de twee criteria de voorkeur gegeven wordt. Om de negatieve eigenschappen van het gekozen ontwerp te compenseren, worden maatregelen genomen.

De grootste verschillen tussen de twee varianten zijn:

A. Variant 1 heeft één opslagplaats voor segmenten t.o.v. twee voor variant 2.

Het gevolg hiervan is dat er meer ruimte en zicht is op de situatie aan de kant waar de schacht betreden kan worden, dit is veiliger.

Het houdt ook in dat de segmenten gelost worden aan één kant van de opslagplaats, terwijl aan de andere kant segmenten worden opgepakt om te kunnen laden in de schacht. Als één van de twee kranen faalt staat of het laden of het lossen stil.

B. Variant 1 heeft één laadplaats voor segmenten en variant 2 heeft er twee.

Het gevolg hiervan is dat er in de schacht bij variant 1 een zone ontstaat, waar geen lading naar beneden komt. Voor mensen in de schacht is dit veiliger.

Het nadeel is dat het niet mogelijk is om tegelijk twee trailers met segmenten te laden en tevens ligt het laden stil als de ene kraan faalt.

De voordelen voor de functionaliteit van variant 2 geven in dit geval de doorslag, om de mindere veiligheid te compenseren worden aanvullende maatregelen genomen. Zo zijn er om veiligheidsredenen al twee uitgangen uit de schacht gecreëerd.

Aanvullende maatregelen zijn:

- Het fysiek scheiden van de zones waar transport plaats vindt van de zones, waarin mensen aan het werk zijn.
- Waarschuwen door middel van een signaal zodra lading in de schacht geladen wordt.

6.4 CONCLUSIES VEILIGHEIDSANALYSE

De invloed van de logistieke processen in de tunnel op de veiligheid voor mensen mag niet onderschat worden.

Een slecht klimaat in de tunnel kan gezondheidsproblemen veroorzaken. Bij vergelijkbare projecten zijn ongevallen gerapporteerd, die het gevolg zijn van (het falen van) de logistiek in de tunnel. Daarnaast hebben de logistieke processen invloed op de effectiviteit van de veiligheidsmaatregelen (zijn er belemmeringen voor transport naar de plaats van het ongeval).

Om de veiligheids- en gezondheidsrisico's te verminderen zijn een tweetal maatregelen voorgesteld. Ten eerste zijn een aantal aanvullende eisen voorgesteld, die bij het ontwerp van de trailers meegenomen kunnen worden. Ten tweede is een voorstel gedaan voor de indeling van de startschacht, waarin de nadruk ligt op functionaliteit en veiligheid. Een goede indeling van de startschacht kan namelijk bijdragen aan het vergroten van de veiligheid.

Bij het maken van het ontwerp voor de indeling van de startschacht blijkt dat de ruimte in de schacht beperkt is en dat het goed is om zones, die gebruikt worden voor het logistieke systeem (fysiek) te scheiden van zone waar overige werkzaamheden plaatsvinden.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit afsluitende hoofdstuk zijn de belangrijkste conclusies uit de voorgaande hoofdstukken verzameld en weergegeven in paragraaf 7.1. Aan de conclusies zijn een aantal aanbevelingen gekoppeld, die in paragraaf 7.2 zijn beschreven.

§ 7.1 CONCLUSIES

Het onderscheid, dat ook in de probleemstelling is gemaakt tussen de invloed van de logistieke processen op de voortgang van de TBM enerzijds en de invloed op de veiligheid anderzijds komt ook in de conclusies terug.

Invloed van de logistiek in de tunnel op de voortgang van de TBM

De invloed van het logistieke systeem op de voortgang van de TBM bestaat voornamelijk uit vertragingen, die het gevolg zijn van storingen. De storingen, die bij de Boortunnel Groene Hart plaats kunnen vinden, zijn aangegeven in figuur 4.2. Deze storingen zijn tijdelijk, of kunnen 'eenvoudig' worden verholpen door vervanging of reparatie van het element dat de storing veroorzaakt.

Hoe groot de invloed van het logistieke systeem is, kan worden uitgedrukt in de mogelijke vertraging. Deze is berekend door de vertraging als gevolg van de verschillende storingen te kwantificeren. De informatie over de frequentie en de gevolgen van storingen is afkomstig van boortunnelprojecten in Nederland. De som van de vertragingen als gevolg van storingen (bovengrens) is vastgesteld op 59 dagen. Ten opzichte van de geplande duur van het project is de vertraging ongeveer 7%. Het aandeel van logistieke storingen bij vergelijkbare projecten is ook van deze grootte orde en dus kan geconcludeerd worden dat een dergelijke vertraging 'normaal' is.

Naast de storingen zijn er nog zogenaamde bijzondere gebeurtenissen, die de voortgang van het boorproces negatief kunnen beïnvloeden. De maatgevende bijzondere gebeurtenis is een brand of explosie in de tunnel. De gevolgen van een brand of explosie kunnen zeer ernstig zijn (ook voor de veiligheid van mensen in de tunnel), daarom loont het om veel maatregelen te nemen, die de kans op deze bijzondere gebeurtenis kunnen minimaliseren.

Om nog meer te weten te komen over de invloed van de logistiek in de tunnel op de voortgang van de TBM, zijn een aantal aanvullende onderzoeken uitgevoerd. Uit deze onderzoeken kunnen nog een aantal zaken geconcludeerd worden.

De voornaamste conclusie, die getrokken kan worden uit de analyse van de verschillende bouwcycli (transportcyclus, loscyclus en boorcyclus), is dat de kans dat de TBM vertraagd wordt door te late aanvoer bij een ongestoord logistiek systeem zeer klein is.

Tevens is vastgesteld, dat het logistieke systeem geen belemmering vormt voor de maximale voortgangssnelheid van de TBM.

Tenslotte is vastgesteld dat ook de invloed van verschillende signaleringssystemen op de maatgevende voortgang van het boorproces (17,0 meter per dag) nihil is. Als de voortgangssnelheid toeneemt, blijkt dat een eenvoudig signaleringssysteem een groter aantal onnodige stops van de TBM kan veroorzaken.

Invloed van de logistiek op de veiligheid

Uit de veiligheidsanalyse blijkt dat het voorkomen van ongevallen op de bouwplaats bij een groot project als de Boortunnel Groene Hart, zeer moeilijk is. Als er puur naar statistieken wordt gekeken is de kans zeer groot dat er zelfs een dodelijk slachtoffer valt. Niet zelden is de oorzaak van een ongeval een logistiek probleem, zoals een falende kraan of trailer, of een onveilige werkmethode.

De invloed van de logistiek op de veiligheid is moeilijk in een getal uit te drukken. Het is wel mogelijk aan te geven wat de belangrijkste V & G risico's zijn.

Bij dit project is brand in de tunnel het grootste logistieke veiligheidsrisico. De eigenschappen van een brand in de tunnel en de rookontwikkeling zijn een groot gevaar. De kans dat door het falen van het logistieke systeem een brand in de tunnel ontstaat is klein als voldoende maatregelen worden genomen. Belangrijke maatregelen zijn o.a. het stellen van strenge veiligheidseisen aan de trailers.

De kans op een mechanisch ongeval (vallen, bekneld raken,...) is vele malen groter dan de kans op brand. Vooral in de startschacht en op de frames, die in de tunnel worden gebruikt voor de ondersteuning van de wapening en bekisting van de scheidingswand.

Tenslotte vormt ook het klimaat in de tunnel een V & G risico-item, omdat er een grote kans is op gezondheidsproblemen als de vochtigheid, temperatuur en samenstelling van de lucht in de tunnel erg afwijken van het klimaat buiten de tunnel.

§ 7.2 AANBEVELINGEN

Ter afsluiting van deze studie zijn een aantal aanbevelingen gedaan, die door de Projectorganisatie HSL-Zuid gebruikt kunnen worden. De aanbevelingen zijn verdeeld in drie categorieën: aanbevelingen voor de ontwerpfase, aanbevelingen voor de uitvoeringsfase en aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

Aanbevelingen voor de ontwerpfase

Bij de beoordeling van het ontwerp van de indeling van de startschacht van B/K kan het ontwerp dat in hoofdstuk 6 (en bijlage 19) is gekozen, gebruikt worden. Uit dit ontwerp blijkt dat de (schaarse) ruimte in de startschacht efficiënt ingedeeld dient te worden. Tevens is het aan te raden de zones, die gebruikt worden voor transport en het laden van trailers, (fysiek) te scheiden van de overige zones.

Bij de keuze voor een signaleringssysteem speelt de invloed op de voortgang van de TBM geen doorslag gevende rol. Een systeem met lage wachttijden werkt echter wel prettiger, omdat het frustrerend is als men vaak onnodig dient te wachten bij een verkeerslicht. Een systeem met minimale wachttijden (denk aan het FIFO systeem uit paragraaf 5.2.1) verdient de voorkeur, mits de kosten en betrouwbaarheid van dit systeem niet veel verschillen van die van andere systemen (wat niet verwacht wordt).

Aanbevelingen voor de uitvoeringsfase

Als tijdens de bouw van de tunnel een reserve trailer stand-by wordt gehouden op de bouwplaats kunnen vertraging als gevolg van het (onherstelbaar) falen van een trailer beperkt worden. Deze trailer dient te bestaan uit een eenvoudig onderstel, zodat deze voor verschillende functies kan worden omgebouwd. Uit een eenvoudige kosten analyse is gebleken dat het produceren van een stand-by trailer waarschijnlijk rendabel is.

Indien tijdens de bouw de frequenties van verschillende logistieke storingen geregistreerd worden, kan men deze vergelijken met de waarden uit tabel 4.1. Als blijkt dat één van de storingen veel frequenter voorkomt, kan het gevolg daarvan op de totale vertraging bepaald worden. Als deze gevolgen onacceptabel zijn, kunnen maatregelen worden onderzocht.

In de uitvoeringsfase is vooral het goed organiseren van werkzaamheden een methode om veiligheidsrisico's te minimaliseren. Ongevallen worden namelijk vaak gewijd aan een ongelukkige samenloop van omstandigheden, of aan gedragsaspecten als gemakzucht of onvoorzichtigheid. Uit onderzoek [8] blijkt echter dat veel geconstateerde tekortkomingen onvoldoende instructie, toezicht en overleg zijn. Bewustwording van V & G risico's in de gehele organisatie is de beste manier om de kans op ongevallen te verkleinen. Concreet kan dat bereikt worden door:

- Risico's te inventariseren,
- Instructies te geven over veiligheidsmaatregelen,
- V & G mee te nemen in het uitvoeringsoverleg,
- Oderaannemers duidelijk te maken dat ze aan dezelfde eisen dienen te voldoen als de medewerkers van B/K,
- Toe te zien op de naleving van de veiligheidsmaatregelen.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In de risico analyse, die in dit onderzoek is uitgevoerd, zijn een aantal storingen geïdentificeerd met betrekkelijk kleine gevolgen voor de voortgang van het boorproces. De som van deze logistieke storingen blijkt toch een significant deel van de bouwtijd uit te maken. Er zijn echter nog meer storingen, die direct de voortgang van het boorproces beïnvloeden.

Als de systeemgrenzen van dit onderzoek worden verlegd en ook de mogelijke storingen van bijvoorbeeld de TBM en de scheidingsinstallatie worden in kaart gebracht, krijgt men een beter beeld van de totale vertraging door storingen. Deze kan vervolgens gebruikt worden om een uitspraak te doen over de betrouwbaarheid van de planning.

Als tijdens de uitvoering van het project meer informatie bekend is over de cyclustijden van het logistieke systeem, kan het Arena model (dat beschreven is in paragraaf 5.2) worden uitgebreid en aangepast. Dan is het mogelijk om betere voorspellingen te doen over het verloop van het boorproces bij de maatgevende transportafstanden.

BRONNEN

Boeken

- [1] Arbouw
Stichting Arbouw, Arbeidsomstandigheden boorproces; Oriënterend literatuuronderzoek. Amsterdam: Stichting Arbouw, 1999.
- [2] CUR
Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, *190 Kansen in de civiele techniek; Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie*. Gouda: Stichting CUR, 1997.
- [3] CUR
Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, *N 510-01 Risico-analyse bouwfase boortunnels*. Gouda: Stichting CUR / COB, 1997.
- [4] Elling
Elling, R., Andeweg, B., De Jong, J. en Swankhuisen, C., *Rapportagetechniek; Schrijven voor lezers met weinig tijd*. Groningen: Wolters-Noordhoff, 1994.
- [5] HSE
Health & Safety Executive, *The Channel Tunnel; Aspects of health and safety during construction*. Sudbury: HSE Books, 1996.
- [6] Huijssoon
Huijssoon, W.P., *Problemen binnen het bakkentransportproces in de natte waterbouw*. Afstudeerwerk TU Delft, 1998.
- [7] Ministerie van Binnenlandse zaken en Koninkrijksrelaties
Ministerie van Binnenlandse zaken en Koninkrijksrelaties + COB, *Literatuuronderzoek veiligheid in ondergrondse bouwwerken*, Gouda: COB, 1997.
- [8] SBR
Stichting bouwresearch, *Een ernstig ongeval op de bouw*. Rotterdam: SBR, 1999.
- [9] VGBouw
VGBouw, *Kostennormen voor aannemersmaterieel*, Alphen aan den Rijn: Samsom Bedrijfsinformatie, 1995.
- ### Dictaten
- [10] CTow212
Inleiding methodisch ontwerpen een handboek t.b.v. systematisch-, methodisch-, en functioneel ontwerpen in de civiele techniek. TU Delft, 1996.

[11] CTow5980
Samenwerkingsvormen in de civiele techniek. TU Delft, 1999.

[12] CTpo4040
Handleiding 4^e jaarsprojecten; Cursus '98-'99. TU Delft, 1999.

[13] CTwa5300
Baggertechniek. TU Delft, 1999.

[14] TB232
Deel II: Simulatie. TU Delft, 2000.

Ontwerp documenten van B/K en NFM

[15] B/K
Bouygues/Koop; *Detailed assumptions for boring speed and justification of boring speed of the TBM; NoREF/PLP/Mdu/124/9971.03/CO.*

[16] B/K
Bouygues/Koop; *General; Risk Management Plan; QSHE 80081012.*

[17] B/K
Bouygues/Koop; *Preliminary methodes; Logistics in tunnel; TPMP 541541-01/02/03.*

[18] B/K
Bouygues/Koop; *TBM Shaft; General conception and Internal structure arrangement; TPBE 32132030.*

[19] NFM
NFM Technologies; Framatome. *Precast element handling trolley assembly; NFM 42440499.*

[20] NFM
NFM Technologies; Framatome. *Risk analysis GCO; NFM 40340083.*

[21] NFM
NFM Technologies; Framatome. *Segment handling trolley assembly; NFM 42440167.*

Overigen

[22] Arbobesluit
Arbobesluit, afdeling bouwplaatsen § 2 en § 3 Artikel 2.33

[23] Kiel
Kiel, B. en Petit, F., 'Hogesnelheidstrein; Europees vervoermiddel met toekomst'. *Cement; Vakblad voor ontwerp & constructie*, 51^e jaargang nr. 6 (september 1999), p. 4-5.



-
- [24] Leendertse
Leendertse, W., Jovanovic, P. en Bakker K.J., *Measures for risk control "Green Heart" tunnel.*
- [25] Projectorganisatie HSL-Zuid
Projectorganisatie HSL-Zuid, *High-Speed Line, Engelstalig promotie boekje*; 1998.
- [26] Richards
Richards, D.P., Ramond, P. en Herrenknecht, M., *Slurry shield tunnels on the Cairo metro.*
- [27] Roepius
Roepius, M., *Veel voorkomende storingen/logistieke problemen in het boorproces van de Westerschelde.*
- [28] Vries, De
Vries, D. de en Verbraeck, A., *Logistical system design for tunnel boring using dynamic simulation.*
- [29] Wallis
Wallis, S., 'Mixshield contribution to Sydney's Olympic deadline'. *TUNNEL*, nr. 6, p. 17-25.

Kranten

- [30] Cobouw nr. 25 (5/7-2-2000); *Remsysteem van tunneltrein faalt.*
- [31] Cobouw nr. 36 (22-2-2000); *Bouwplaats Westerschelde lijkt op 'Tunnel van Babel'.*

Gebruikte software

Microsoft® Word 97
Microsoft® Excel 97
Arena® 4.0
@Risk™ for Windows ver 3.5.1 for Excel

Allen onder Microsoft® Windows NT

FIGUREN EN TABELLEN

Samenvatting

(1) Land + Water vakblad voor civiel- en milieutechnici, augustus 2000.

Hoofdstuk 1

(2) Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid, *Voortgangsrapport 4*.

(3) Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid, *High-Speed Line*. [25]

(4) Land + Water vakblad voor civiel- en milieutechnici, augustus 2000.

(5) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

Hoofdstuk 2

(6) Land + Water vakblad voor civiel- en milieutechnici, augustus 2000.

(7) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(8) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(9) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(10) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(11) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(12) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(13) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(14) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

(15) Land + Water vakblad voor civiel- en milieutechnici, augustus 2000.

Hoofdstuk 3

(16) Bouygues/Koop; *General; Risk Management Plan*. [16]

(17) Bouygues/Koop; *General; Risk Management Plan*. [16]

(18) Bouygues/Koop; *General; Risk Management Plan*. [16]

(19) Bouygues/Koop; *General; Risk Management Plan*. [16]

Hoofdstuk 4

(20) Samenwerkingsvormen in de civiele techniek. TU Delft, 1999 [11].

(21) Bouygues/Koop, *Installation of TBM at entry shaft*, TL_PackA_Part I_4_9_2.

(22) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

-
- (23) Internetsite Tweede Heinenoordtunnel (URL onbekend).
(24) CUR, *190 Kansen in de civiele techniek; Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie*. [2]
(25) Ministerie van Verkeer en Waterstaat, *Profiel*, 20 april 2000-12-18.
(26) Bouygues/Koop, *Airshaft construction staging*, TPMP_PackA_Part I_4_9_9.

Hoofdstuk 5

- (27) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]
(28) NFM Technologies; Framatome, *Precast element handling trolley assembly en Segment handling trolley assembly*. [19] en [21]
(29) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]
(30) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]

Hoofdstuk 6

- (31) HSE, *The Channel Tunnel; Aspects of health and safety during construction*. [5]
(32) Ministerie van Verkeer en Waterstaat, *Perspectief*, 14 juli 2000.
(33) Internet Associated press (URL onbekend).
(34) Bouygues/Koop, *Preliminary methodes Logistics in tunnel*. [17]