

M 430-01

ONTWIKKELING VAN EEN BEPLATINGSROBOT

Evaluatierapport

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van CUR/COB.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken, mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt. © CUR/COB-rapport M 430-01 'Ontwikkeling van een beplatingsrobot. Evaluatierapport.' Stichting CUR, Gouda, juni 1999.

Aansprakelijkheid

CUR/COB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker, en CUR/COB sluit - mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt - iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens CUR/COB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

VOORWOORD

Het onderzoek en ontwikkelingswerk van CUR/COB wordt verricht in het kader van een omvattend uitvoeringsprogramma.

Dit uitvoeringsprogramma kent in eerste instantie zes thema's, te weten: 'Boren in zachte grond', 'Verkennen, voorspellen en monitoren', 'Economische tunnelbouw', 'Construeren, beheren en onderhouden', 'Ondergrondse ruimten' en 'Diverse projecten'.

De thema's worden ingevuld met uit te voeren onderzoeks- en ontwikkelingsprojecten.

In het kader van economische tunnelbouw wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van automatisering en robotisering in de tunnelbouw. Het onderzoek van CUR/COB uitvoeringscommissie M 430 'Ontwikkeling van een afbouwrobot' is gericht op het opstellen van specificaties voor en de technische ontwikkeling van een afbouwrobot voor het aanbrengen van (brandwerende) beplating in geboorde tunnels.

Voorliggend rapport is onder verantwoordelijkheid van deze commissie tot stand gekomen en moet gezien worden als een evaluatie van en de samenhang tussen de gepresenteerde deelrapporten.

De samenstelling van de commissie, ten tijde van de afronding van dit rapport, was als volgt:

ing. A.A. Proper, voorzitter	Heijmans N.V./Heijmans Beton- en Waterbouw B.V.
ing. J.J. Uwland, secretaris	Kennis en Wetenschappelijke Instituten/TNO Bouw Centrum voor Mechanische Constructies TBI/Croon Elektrotechniek B.V.
A. Andeweg	ITM cv/Fokker Space B.V.
dr.ir. C.J.M. Heemskerk	TNO Bouw, Centrum voor Mechanische Constructies, is tot maart 1998 als secretaris aan de commissie verbonden geweest.
dr.ir. R.P. Krom	Staalbouwkundig Genootschap/TU Delft, faculteit Civiele Techniek
ir. H.K.T. Kuijper	CUR/COB
ir. L.C. Kwak, coördinator	

INHOUD

SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	6
2. HISTORISCH OVERZICHT WERKZAAMHEDEN M 430	8
2.1 Algemeen.....	8
2.2 Activiteiten en resultaten	8
3. UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN ONDERZOEK.....	11
3.1 Uitgangspunten voor het onderzoek	11
3.1.1 Definitie van fase 1	11
3.1.2 Verdiepingsslag	11
3.2 Resultaten van fase 1	12
3.2.1 Probleemdefinitie voor het aanbrengen van de platen.....	13
3.2.2 Methode van aanbrengen van de platen.....	15
3.2.3 Modules van de machine	17
3.2.4 Risicomatrix fase 1	18
3.3 Probleemdefinities voor fase 2a	19
3.3.1 Risico's op systeemniveau	19
3.3.2 Risico's op moduleniveau	19
3.4 Resultaten van fase 2a	20
3.4.1 Systeemintegratie	20
3.4.2 Taakverdeling tussen mens en machine.....	21
3.4.3 Scanmodule	21
3.4.4 Bevestigingsmiddel	21
3.4.5 Technische haalbaarheid van het systeem	21
3.4.6 Mogelijke partners voor het vervolg	22
4. TOEKOMST VOOR EEN BEPLATINGSROBOT	24
4.1 Ontwikkeling brandwerende bekleding	24
4.2 Uitbouw van het systeem voor aanvullende werkzaamheden.....	25
5. CONCLUSIES	27
LITERATUUR.....	28

SAMENVATTING

In het kader van het thema 'Economische tunnelbouw' is een inventarisatie uitgevoerd van de mogelijkheden van automatisering bij ondergronds bouwen. Een nadere studie heeft geleid tot de keuze van afbouwwerkzaamheden en het aanbrengen van (brandwerende) beplating in geboorde tunnels.

Het onderzoek van de uitvoeringscommissie M 430 betreft de specificatie en technische uitwerking van een afbouwrobot voor het plaatsen van (brandwerende) bekleding in boortunnels.

In het rapport wordt een overzicht gegeven van de fasering van de werkzaamheden van de commissie en de samenhang tussen de onderliggende deelrapporten. Dit betreft:

1. functionele specificatie, plan van aanpak;
2. systeemintegratie en scanmodule;
3. haalbaarheid van het bevestigingsmiddel;
4. taakverdeling tussen mens en machine.

Met de voortgang van de uitvoering van de Westerscheldetunnel en de daartoe benodigde beproevingen van brandwerende bekledingen is naar voren gekomen dat de eisen die aan deze bekleding worden gesteld aanmerkelijk afwijken van de uitgangspunten zoals die de commissie naar aanleiding van interviews met betrokkenen bij boortunnels, bij de aanvang van de werkzaamheden, heeft gedefinieerd.

Dit heeft erin geresulteerd dat de methode van aanbrengen van beplating dermate wijzigt dat verdere ontwikkeling van een robot niet zinvol wordt geacht.

Aan de hand van het onderzoek blijkt dat een robot voor het aanbrengen van brandwerende beplating en bevestigingsmiddelen voor installatiedelen technisch mogelijk is.

1. INLEIDING

In het kader van één van de thema's van het COB-programma, economische tunnelbouw, is de uitvoeringscommissie M 400 'Automatisering cq robotisering' in het leven geroepen met als doel het analyseren en inventariseren van de mogelijkheden van automatisering en robotisering in de tunnelbouw.

Ter voorbereiding van het opstellen van een basisplan met onderzoeksrichtingen is een inventarisatie opgesteld en gepubliceerd als CUR/COB-rapport M 410-01 'Voorstudie automatisering in het ondergronds bouwen'.

Als vervolg op dit rapport is in 1997 is door TNO Bouw, DMC en HBW een inventarisatie en evaluatie gemaakt van mogelijke robotisering van de afbouw van boortunnels.

Het resultaat hiervan is neergelegd in [1]:

Het rapport is tot stand gekomen aan de hand van gesprekken met een aantal deskundigen van de bouwcombinaties en bedrijven die werken aan de Tweede Heinenoordtunnel en de Westerscheldetunnel.

De conclusies in bovenstaande rapportage zijn:

Het proces dat gerobotiseerd kan worden is het aanbrengen van een brandwerende beplating aan de tunnelbuis. Hiervoor worden de volgende redenen genoemd:

1. Er is op dit moment geen goede methode voor het aanbrengen van de beplating in boortunnels. Alleen in Nederland worden wegverkeerstunnels brandwerend bekleed.
2. Het bekledingsproces is relatief goed geschikt voor robotisering. Het is zwaar, repeterend en tijdskritisch en de uitvoeringshandelingen zijn van beperkte complexiteit.
3. Aan een automatisch beplatingproces kunnen ook andere bevestigingstaken (bijvoorbeeld voor tunnelinstallaties) worden toegevoegd.

Het lijkt zowel technisch als economisch haalbaar om het proces te robotiseren. De benodigde technologie is beschikbaar. De conventionele methode voor het monteren (handmatig) is kostbaar en tijdrovend. Hierdoor is robotiseren des te aantrekkelijker.

Er wordt aanbevolen om naast gebruikers (aannemers) en robotontwikkelaars, ook de fabrikant van de brandwerende beplating te vragen om deel te nemen aan de ontwikkeling.

Bij het opstarten van een robotiseringproject dient onderkend te worden dat het meest waardevolle resultaat van een robotiseringproefproject de opbouw van knowhow is en de demonstratiewaarde van de mogelijkheden en beperkingen van robotisering. De realisatie van de robot-hardware voor het aanbrengen van de beplating is de concrete 'case' voor het project.

Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd.

- In hoofdstuk 2 wordt een historisch overzicht van de werkzaamheden van de commissie aangegeven. Hierbij komt een nadere uitwerking en verdiepingsslag aan de orde (aangegeven als fase 2a) die nodig was alvorens verder te kunnen gaan met de

werkzaamheden van de oorspronkelijk gedefinieerde fase 2. Tevens zijn de resultaten van de PAR (programma-adviesraad)-audit vermeld.

- In hoofdstuk 3 worden de uitgangspunten, probleemdefinities en de resultaten van het onderzoek behandeld.
- Hoofdstuk 4 bevat de huidige ontwikkelingen op het gebied van (het aanbrengen van) brandwerende bekleding, met name de Westerscheldetunnel, en de weerslag die deze hebben op de toekomst van de afbouwrobot.
- Tot slot worden in hoofdstuk 5 de conclusies getrokken.

2. HISTORISCH OVERZICHT WERKZAAMHEDEN M 430

2.1 Algemeen

1997 In het werkrapport M 410-01 'Voorstudie automatisering in het ondergronds bouwen' is een aantal suggesties aan de hand gedaan voor processen die mogelijk in aanmerking komen om te automatiseren. In het vervolg op dit rapport is het Deelplan CUR/COB met als titel: M 430 'Ontwikkeling van een afbouwrobot voor het aanbrengen van (brandwerende) beplating in tunnels', versie 2, dd 11 juni 1997, opgesteld. Dit plan heeft als basis gediend voor de werkzaamheden van de commissie. Eind 1997 is de uitvoeringscommissie M 430 benoemd.

2.2 Activiteiten en resultaten

Hierna is een overzicht gegeven van de activiteiten van de uitvoeringscommissie met de resultaten daarvan. Tevens wordt het verband tussen de rapporten aangegeven.

1998 Fase 1.2 t/m 1.4

De commissie heeft een functionele specificatie en een plan van aanpak opgesteld. Hiervan zijn de resultaten neergelegd in [2]:

Gebleken is dat:

1. De haalbaarheid van de systeemintegratie, de scanmodule en de vormgeving van het bevestigingsmiddel voor de beplating, gezien de risicoanalyse, in hoge mate bepalend zijn voor de verdere uitwerking van een voor- en detailontwerp (fase 2).
2. De ter beschikking staande gegevens onvoldoende zijn om participanten te benaderen.
3. Een nadere uitwerking en verdieping van de inzichten nodig is voordat de volgende fase (fase 2: voorontwerp en detailontwerp) kan worden ingegaan.

Fase 2a:

Deze fase betreft:

1. De verdere uitwerking van de systeemintegratie en de scanmodule;
2. Onderzoek naar de vormgeving van het bevestigingsmiddel voor de beplating;
3. Aan de hand van de resultaten van 1 en 2 benaderen van mogelijke participanten;
4. Onderzoek naar de taakverdeling tussen mens en machine.

Voordat fase 2 (volgens het basisplan) begint worden de resultaten van de commissie getoetst door de PAR.

1998 Fase 2a

Rapportage systeemintegratie en scanmodule.

Aangezien in de voorgaande rapportage de systeemintegratie en de scan(meet)module als nieuw en moeilijk werden gekwantificeerd heeft Fokker Space B.V. de genoemde onderdelen verder uitgewerkt en de haalbaarheid hiervan onderzocht.

De resultaten van dit onderzoek zijn weergegeven in [3].

Rapportage bevestigingsmiddel.

Het onderzoek naar:

Het bevestigingsmiddel dat aan één zijde van de beplating aangebracht kan worden en dat tevens de beplating in de gebruikstoestand op de juiste afstand tot de onderliggende betonwand houdt;
is door TNO Bouw uitgevoerd, waarvan de resultaten zijn vermeld in [4].

Rapportage taakverdeling tussen mens en machine.

Het onderzoek naar:

De verschillende aspecten zoals productiviteit, ergonomie, betrouwbaarheid bij de verdeling van taken tussen de mens en machine;
is door TNO Bouw, in samenwerking met TNO Arbeid, uitgevoerd, waarvan de resultaten zijn vermeld in [5].

11-98 PAR-audit

COB heeft de programma-adviesraad (PAR) gevraagd een audit uit te voeren over het tot nu toe bereikte resultaat van de uitvoeringscommissie M 430.

De auditcommissie had de volgende samenstelling:

Prof.ir. Ch.J. Vos, voorzitter	(TU Delft, faculteit Civiele Techniek)
Ir. F. van Gassel	(TU Eindhoven)
Ir. P. Kuiper	(TNO FEL)
Prof.ir. W.J. Vlasblom	(TU Delft)

Het resultaat van de audit is aangegeven in [6]. De audit is uitgevoerd op basis van de concept-rapporten.

Uit het PAR-rapport en uit overleg van de commissie met de PAR is naar voren gekomen dat in de beoordeelde rapporten de volgende zaken niet in voldoende mate naar voren zijn gekomen:

- de invloed van de randvoorwaarden op de afbouwrobot en omgekeerd de invloed van de afbouwrobot op de randvoorwaarden;
- de overwegingen die hebben geleid tot de gemaakte keuzen;
- de samenhang tussen de rapporten.

In het overleg is gebleken dat de desbetreffende informatie wel aanwezig is binnen de commissie.

De PAR heeft de suggestie gedaan om in de rapportage tevens aandacht te schenken aan:

- de bedreigingen ten aanzien van de ontwikkeling van een afbouwrobot, zoals de recente ontwikkeling van alternatieven voor de brandwerende beplating;
- maatregelen die de ontwikkeling kunnen stimuleren, bijvoorbeeld het ter beschikking hebben van een 'proeftuin'.

Aan de hand van het rapport en de door de PAR aangereikte suggesties zullen de vervolgvraagstukken van de commissie de volgende zijn:

1. Het aanpassen van de rapportages;
2. Het opstellen van een evaluatierapport, dat als een opleg rapport gezien kan worden waarin is opgenomen:
 - de samenhang tussen de verschenen rapportages;
 - een samenvatting van de verschillende onderzoeken;

- de mogelijke verdere activiteiten met betrekking tot de ontwikkeling van de afbouwrobot;
- recente ontwikkelingen van alternatieve brandwerende bekledingen.

De doelstelling is om een afgerond geheel ter beschikking te hebben dat als uitgangspunt kan dienen voor verdere werkzaamheden in COB-2 programma.

03-99 Afsluitend voor de werkzaamheden van de uitvoeringscommissie in het kader van COB-1 programma is het voorliggende evaluatierapport opgesteld.

3. UITGANGSPUNTEN EN RESULTATEN ONDERZOEK

3.1 Uitgangspunten voor het onderzoek

3.1.1 Definitie van fase 1

Inventarisatie en evaluatie

Via evaluatie van de afbouwwerkzaamheden voor het plaatsen van (brandwerende) beplating in de tunnelbouw worden één of meerdere specificaties opgesteld van binnen het project mogelijk te ontwikkelen robots.

Inventarisatie partijen

Mede aan de hand van deze specificaties worden partijen geïnventariseerd die de robot zouden kunnen ontwikkelen en bouwen. Evenzo worden opdrachtgevers van tunnels geïdentificeerd die binnen concrete projecten aan de ontwikkeling en de implementatie van de robot willen bijdragen.

Opstellen terms of reference

Dit onderdeel resulteert in een specificatie van de robot voor het aanbrengen van (brandwerende) bekleding, een shortlist van mogelijke betrokkenen bij de ontwikkeling en implementatie en een raming van tijd en kosten voor het gehele project. Eén en ander met het doel gedetailleerde voorstellen uit de markt te genereren en daaruit één voor verdere uitvoering te selecteren.

3.1.2 Verdiepingsslag

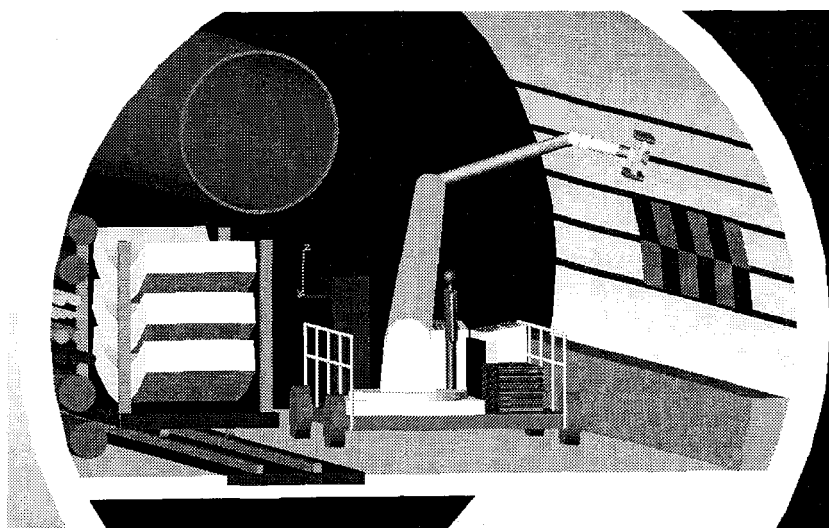
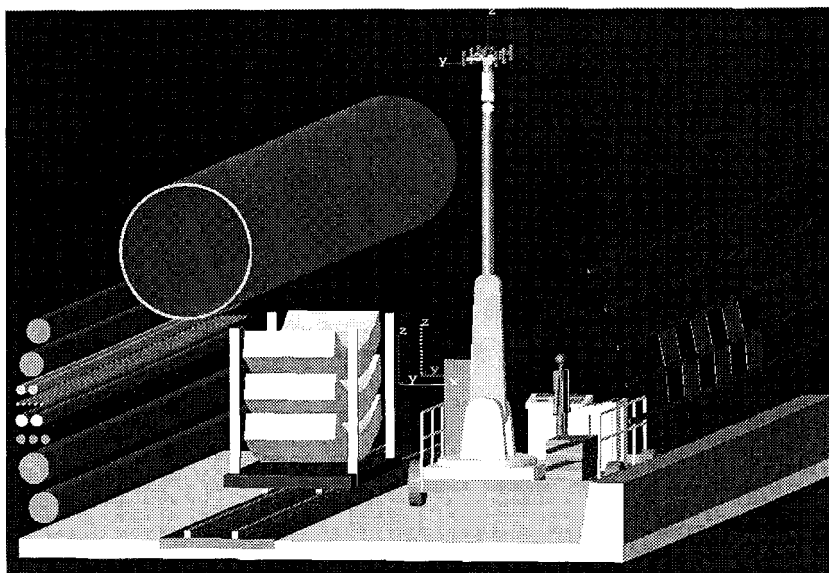
Voordat met fase 2 aangevangen zou kunnen worden bleek het noodzakelijk een verdiepingsslag te maken ten aanzien van de risico's op het niveau van het systeem (systeemintegratie en taakverdeling tussen mens en machine) en op het niveau van modules (de scanmodule en het bevestigingsmiddel).

De opdracht voor de inventarisatie van mogelijke partijen die de robot zouden kunnen ontwikkelen en bouwen is van fase 1 overgegaan naar fase 2a vanwege de verdiepingsslag die nodig was om voldoende inzicht te verschaffen aan partijen.

3.2 Resultaten van fase 1

In fase 1 zijn interviews gehouden met vertegenwoordigers van opdrachtgeverszijde (de Bouwdienst Rijkswaterstaat en NS-Railinfrabeheer), opdrachtnemerszijde (KMW, Combinatie Middelplaat Westerschelde en BTC, BoorTunnelCombinatie) en van de zijde van de leverancier van brandwerende beplating (Promat) .

Ten behoeve van de interviews is op voorhand een inschatting gemaakt en een beeld geschetst van een mogelijk systeem, dat onderstaand is weergegeven.



Uit de interviews zijn randvoorwaarden gekomen die hier zijn verzameld. In 3.2.1 zijn de randvoorwaarden aan de brandwerende laag in boortunnels aangegeven. Aan de hand hiervan is een keuze gemaakt voor het automatisch aanbrengen van brandwerende platen met een afbouwrobot. Vervolgens zijn de randvoorwaarden verzameld waaraan een dergelijke afbouwrobot zou moeten voldoen. Bovendien wordt bij iedere randvoorwaarde in het kort aangegeven wat zijn invloed is op het ontwerp. Tenslotte is om het probleem concreet te maken als case de Westerscheldetunnel in beschouwing genomen. Gezien de veronderstelde capaciteit van de beplatingsmachine en de huidige kosten van een manuur wordt een te ontwikkelen machine economisch haalbaar geacht. De gebruikte informatie van de Westerscheldetunnel staat in 3.2.1 aangegeven. Voor een uitvoeriger versie van deze discussie wordt verwezen naar hoofdstuk 2 van [3].

Rekening houdend met de randvoorwaarden is een aanbrengproces ontwikkeld dat is ontleed in modules die minimaal aanwezig moeten zijn in de afbouwrobot om automatisch brandwerende platen aan te brengen. Optioneel zijn deze nog uit te breiden met extra modules (zie 4.2). De modules met hun functie worden behandeld in 3.2.3. De modules zijn beoordeeld op complexiteit en beschikbaarheid in de risicomatrix in 3.2.4. De onderdelen die beoordeeld zijn als moeilijk en nieuw te ontwikkelen zijn de aanleiding geweest voor de werkzaamheden in fase 2a.

3.2.1 Probleemdefinitie voor het aanbrengen van de platen

Randvoorwaarden aan de brandwerende laag

Onderstaand zijn de randvoorwaarden waaraan een brandwerende laag voor boortunnels zou moeten voldoen, verzameld.

1. *Voegen in brandwerende laag kleiner dan 3 mm.*
De grootste voeg die nog brandveilig zou zijn is naar schatting 3 mm breed. Bij het alternatief om automatisch brandwerende platen aan te brengen worden de voegen gebruikt om het verschil in lengte tussen een binnen- en een buitenbocht op te vangen. Bij een minimale bochtstraal van 1500 m is dit verschil 3 mm over 1000 mm (de lengte van een plaat).
Als de voeg groter zou mogen zijn zouden de platen groter mogen zijn, zodat er minder platen geplaatst hoeven worden, hetgeen minder tijd kost. Hier valt veel te winnen. Er zouden proeven gedaan moeten worden om te meten wat werkelijk de grootste voeg is die nog brandveilig is.
2. *Tübbingens verspringen maximaal 20 mm.*
Brandwerende laag mag niet verspringen.
Maximaal verloop brandwerende laag van 20 mm over 10 m.
Hoeveel de tübbingens in de diepte kunnen verspringen en hoeveel de brandwerende laag per meter mag verlopen en verspringen bepaaldt hoever in de tunnel vooruit gemeten moet kunnen worden. Dit bereik is weer belangrijk voor het meetsysteem. De eis om 20 mm over 10 m weg te werken is een visuele eis. De tunnelwand moet er 'glad' uitzien. Deze eis is niet heel streng maar wel heel zwaar. Als de 20 mm bijvoorbeeld over 2 m (1 tübbing) weggewerkt zou mogen worden wordt het meetsysteem veel eenvoudiger en goedkoper.

3. *De brandwerende laag mag niet loslaten door de zuigkracht van het verkeer.*
4. *Bevestigingen minimaal 45 mm vanaf de wapening, bout- en erectorgaten van de tûbbingen.*

Dit betekent dat niet zomaar overal in de tûbbingen geboord kan worden. Het is onmogelijk om de vier bevestigingspunten van een plaat altijd dezelfde relatieve positie te laten hebben.
5. *Brandwerende laag moet demontabel zijn.*

Als dit een strenge eis is vervallen de mogelijkheden:

 - in de bekisting van de tûbbing opnemen van een brandwerende laag;
 - in de tunnel een brandwerende laag spuitpleister aanbrengen.

Dan zijn brandwerende platen het enige alternatief, wat als uitgangspunt is genomen.

Aan de hand van deze randvoorwaarden is in fase 1 gekozen voor het automatisch aanbrengen van brandwerende platen met een afbouwrobot.

Randvoorwaarden aan de afbouwrobot

6. *Productieafmeting brandwerende platen 3020 x 1270 mm $\pm$ 0,1 mm (dikte 27 mm).*

Het is handig als de gebruikte plaatafmeting een heel aantal maal uit de productieafmeting gaat. De maximale lengte is omgekeerd evenredig met de maximale voeg tussen twee platen. Bij een maximale voeg van 3 mm mag de lengte 1000 mm zijn, een derde van de productielengte. De gebruikte plaatbreedte van 625 mm is de helft van de productiebreedte.
7. *Minimaal 4,5 bevestigingspunt per m² plaat.*

Randvoorwaarde 3 betekent voor brandwerende platen van 625 bij 1000 mm minimaal 2,7 (dus 3) bevestigingspunten per plaat. Vanwege de symmetrie is gekozen voor 4 bevestigingspunten. Dit betekent ook 1 extra bevestigingspunt als marge.
8. *Bevestigingen minimaal 50 mm vanaf de plaatrand.*

Deze randvoorwaarde bepaalt samen met randvoorwaarde 4 en de relatieve positie van een plaat ten opzichte van een tûbbing waar geboord kan worden. Waarschijnlijk is het onmogelijk om de vier bevestigingspunten altijd dezelfde relatieve positie ten opzichte van elkaar te laten hebben.
9. *Ruimte in de tunnelbuis.*

Het is de bedoeling dat de afbouwrobot al aan de slag gaat terwijl de tunnelboormachine nog aan het boren is. De infrastructuur voor de tunnelboormachine zou de helft van de tunnelbuis in beslag nemen. De andere helft zou dan vrij zijn voor de tunnelboormachine. Dit is een belangrijk uitgangspunt dat grote invloed heeft op het ontwerp van de robot. De robot moet het bereik halen dat nodig is om te kunnen meten en plaatsen. Het is daarom erg belangrijk om te weten hoe zeker dit uitgangspunt is.

Informatie van de Westerscheldetunnel

10. *Afbouwrobotsysteem moet geschikt zijn voor Westerscheldetunnel.*

Als uitgangspunt is genomen dat het afbouwrobotsysteem geschikt moet zijn voor de Westerscheldetunnel, maar het principe moet ook geschikt zijn voor boortunnels in het algemeen. Het systeem zou dus met kleine aanpassingen ook geschikt moeten zijn voor bijvoorbeeld de tunnels in de Betuweroute en de HSL.

Westerscheldetunnel

Start boren half juni 1999.

De binnenstraal van de tunnelbuis bedraagt 5050 mm.

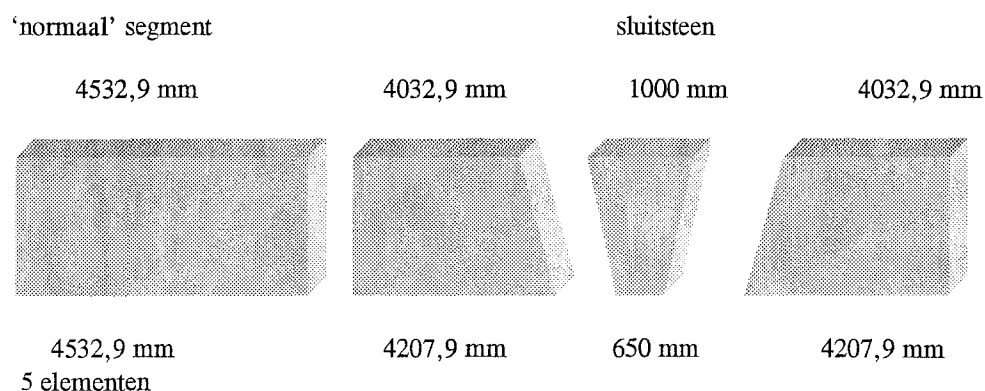
Minimale horizontale boogstraal 1500 m.

Minimale verticale boogstraal 2500 m.

De beplating bij de hulpposten (om de 50 m) wordt handmatig aangebracht.

Totale hoeveelheid beplating: 240.000 m².

Lengte, breedte en aantal (8) tübbingelementen per ring:



De segmentbreedte verloopt van 2020,1 mm naar 2016,2 mm over de lengte van een 'normaal' segment.

De maximale productie bedraagt 1.032 m² per dag.

3.2.2 *Methode van aanbrengen van de platen*

Werkwijze

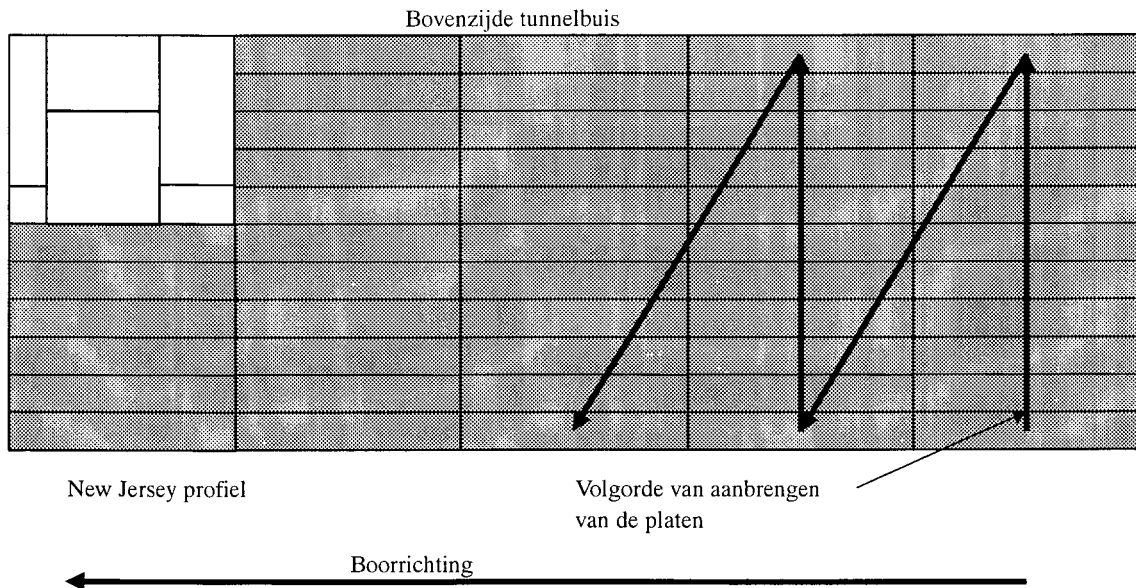
Een bestaand proces voor het aanbrengen van platen in boortunnels was ten tijde van de start van het onderzoek niet voorhanden. Voor het proces is daarom uitgegaan van de gegevens van de Westerscheldetunnel die uit de interviews naar voren zijn gekomen. Waar nog geen uitsluitsel over de randvoorwaarden kon worden gegeven heeft de commissie aannamen gedaan.

Gezien de beschikbare afbouwtijd wordt de beplating in twee stromen aangebracht:

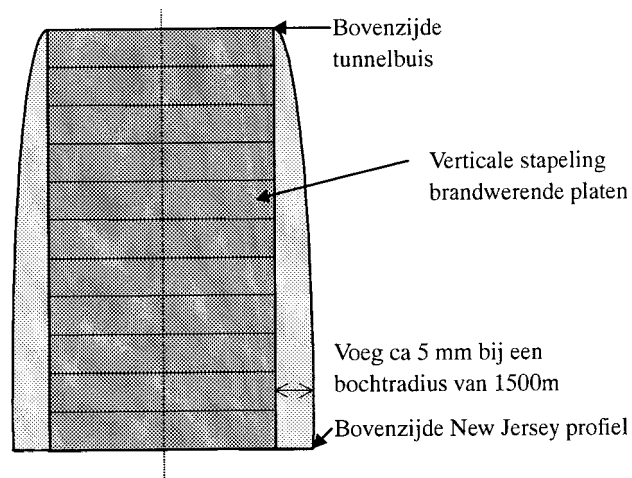
- Tijdens de periode dat de tunnelboormachine (TBM) nog in bedrijf is wordt beplating aangebracht van de bovenzijde van het New Jersey profiel tot aan de kruin van de tunnelbuis aan die zijde van de tunnelbuis die vrij is van de aan- en afvoerleidingen van de TBM;
- Nadat de TBM gereed is met boren en de aan- en afvoerleidingen zijn verwijderd wordt de andere zijde van de tunnelbuis van beplating voorzien.

In de langsrichting van de tunnelbuis bevinden zich om de 50 m hulpposten. Als uitgangspunt is gekozen dat de aansluiting van de beplating aan de hulpposten handmatig wordt gereali-

seerd. Derhalve worden trajecten van 50 m door de robot van beplating voorzien. De opzet van het aanbrengen van de platen is een stapeling in verticale zin waarna de volgende verticale stapeling van platen wordt aangebracht, zoals blijkt uit onderstaande figuur. Het aanbrengen van de platen in halfsteens verband is niet mogelijk daar het aanbrengen van platen tussen reeds geplaatste platen op onoverkomelijke bezwaren stuit. Het aanbrengen van de platen volgens het principe van de metselaar (aanbrengen in lagen in langsrichting van de tunnelbuis) veroorzaakt een veelheid van verplaatsingen en opnieuw instellen van de robot en daarmee een aanmerkelijke verlaging van de productiviteit.



platen (productieafmetingen: 3020 x 1270 mm, dikte 27 mm) en een breedte van 625 mm. De breedte van de aan te brengen platen is ingegeven door de beschikbare ruimte voor de brandwerende bekleding tussen de betonnen lining van de tunnelbuis en het profiel van vrije ruimte. De lengte van de platen is teruggebracht van ca. 3000 mm naar 1000 mm. De overweging hierbij is geweest dat bij de verticale en horizontale boogstralen, zoals deze voorkomen in het alignement van de tunnel, de voeg tussen de platen onderling (ca. 5 mm) groter zou worden dan de uit brandtechnisch oogpunt toegestane voeg van 3 mm. Bij een gereduceerde lengte van de platen kan de voegbreedte als gevolg van de boogstralen verdeeld worden over meerdere voegen.



Eisen aan het bevestigingsmiddel

Ten aanzien van het bevestigingsmiddel tussen het plaatmateriaal en de tunnelwand zijn de volgende eisen en wensen geformuleerd:

Eisen:

- het bevestigingsmiddel moet in één arbeidsgang te monteren zijn;
- de afstand tussen de brandwerende plaat en de tunnelwand moet traploos instelbaar zijn van 0 tot 20 mm;
- het bevestigingsmiddel moet vanaf één zijde te monteren zijn.

Wensen:

- de afstand tussen de plaat en het beton moet eenvoudig in stand worden gehouden door het bevestigingsmiddel;
- de platen worden nominaal zo dicht mogelijk tegen de wand gemonteerd;
- aan de zichtzijde van de plaat dient een ring of een grote kop voor extra veiligheid te worden aangebracht.

3.2.3 Modules van de machine

Voor een uitvoeriger verhandeling over de opdeling in modules zie hoofdstuk 3 van [2].

1. *Scanmodule.*

De functie van deze module is het scannen van de tunnelwand, minimaal over de breedte van een segment vooruit. Gemeten moeten worden de plaats van de tûbbingen in de diepte en de langsrichting, de linkerrand van de vorige kolom platen en de bovenrand van de vorige plaat of van de barrier. De module is opgebouwd uit:

De tûbbinglocatiesensor;

Sensor detectie laatst geplaatste strook;

Sensor detectie bovenrand New Jersey-profiel

2. *Rekenmodule plaatplaatsing.*

De functie van deze module is het berekenen van de optimale plaats van de volgende kolom platen uitgaande van de metingen aan de tunnelwand, en optimalisatieregels voor het uitvlakken van onregelmatigheden.

3. *Rekenmodule boorlocaties.*

De functie van deze module is om voor iedere plaat de optimale boorlocaties te bepalen, rekening houdend met de plaatsen waar niet geboord mag worden. Er mag niet geboord worden aan de randen van de tûbbingen, op plaatsen van bout- en erectorgaten en ter plaatse van de wapening.

4. *Module plaatplaatsing.*

De functie van deze module is een plaat oppakken, positioneren (in twee stappen eerst grof dan fijn) en vervolgens vasthouden tijdens het boren.

De module is opgebouwd uit:

4.1 Grijper (zuignappen);

4.2 Verplaatsen.

5. *Module boren.*

De functie van deze module is om door de plaat en in de tûbbing de gaten voor de bevestigingsmiddelen te boren.

6. *Module boutplaatsen.*

Functie van deze module is om de bouten aan te voeren, in de gaten te plaatsen en aan te schroeven.

De module is opgebouwd uit:

6.1 Boutaanvoer;

6.2 Bout in gat plaatsen en aandraaien.

7. *Module afbouwrobot verplaatsen.*

De functie van deze module is om het afbouwrobotsysteem telkens een strook vooruit te rijden. De module is tevens bedoeld om de robot in en uit de tunnel te rijden.

8. *Module plaataanvoer.*

De functie van deze module is een stapel platen ontvangen en dubbel bufferen.

9. *Module plaat markeren (optioneel).*

De functie van deze module is het markeren van de positie van de onderliggende tûbbingelementen ten behoeve van eventueel later aan te brengen bevestigingen.

Omdat het werkgebied van de scanmodule (module 1), de plaatplaatsingsmodule (module 4), de boormodule (module 5) en de boutplaatsmodule (module 6) overeen komen, zouden ze kunnen worden gecombineerd in één geïntegreerde module.

3.2.4 Risicomatrix fase 1

Aan de hand van de resultaten van het onderzoek in fase 1 is de volgende risicomatrix opgesteld ten aanzien van de technische complexiteit van de modules.

	Technische complexiteit van de modules		
	Moeilijk	Gemiddeld	Eenvoudig
Nieuw te ontwikkelen	1.1 Tûbbing locatie –sensor systeem-integratie	1.2 sensor detectie laatst geplaatste strook 1.3 sensor detectie bovenrand New Jersey profiel 2. Rekenmodule Plaatplaatsing 3 Rekenmodule Boorlokaties Bevestigingsmiddel	
Variant op een bestaand concept		4.2 Verplaatsen. Functies: tillen, ver plaatsen, positioneren 6.2 Bout in het gat plaatsen en aandraaien	4.1 Grijper (zuignappen). 5. Module Boren 7 Module Afbouwrobot verplaatsen 8 Module Plaataanvoer 9 Module Plaat markeren (optioneel)
Te koop		6.1 Boutaanvoer	

3.3 Probleemdefinities voor fase 2a

3.3.1 *Risico's op systeemniveau*

Systeemintegratie

Het automatisch aanbrengen van brandwerende platen zoals naar voren gekomen uit fase 1, is een nieuw en ingewikkeld proces bestaande uit verschillende modules die allemaal samen moeten werken. De modules (meten, positioneren, boren, schroeven) vragen om verschillende nauwkeurigheden die op elkaar aan moeten sluiten. Daarom is de systeemintegratie in de risicomatrix uit fase 1 beoordeeld als moeilijk en nieuw te ontwikkelen. In 'Ontwikkeling van een beplatingsrobot -systeemintegratie en scanmodule' wordt afgeleid wat voor elke deeltaak gemeten moet worden, en met welke nauwkeurigheid en welk bereik. Probleemdefinitie is om systematisch uit te zoeken met wat voor een manipulators met wat voor een gereedschappen en sensoren die gehaald kunnen worden.

Taakverdeling tussen mens en machine

Het is van belang om vast te stellen hoeveel mensen minimaal nodig zijn bij de machine. Dit om vast te stellen welke investering voor de machine rendabel is. Tevens is het van belang om te onderkennen welke werkzaamheden door de mens en welke door de machine moeten worden uitgevoerd om een hoge productiviteit en een niet te hoge belasting op de mens te krijgen.

3.3.2 *Risico's op moduleniveau*

Scanmodule

Uit bovengenoemde analyse is naar voren gekomen wat voor het gekozen beplatingproces gemeten moet worden en met welk bereik en welke nauwkeurigheid. Dat zijn het type en de plaats van de tubbingen in de diepte en de langsrichting, en de linkerrand van de vorige kolom platen en de bovenrand van de vorige plaat in de langsrichting. Daarvoor blijkt in de langsrichting een nauwkeurigheid van 1 cm met een bereik van in de lengterichting 3 m nodig te zijn; in de hoogte van de bovenrand van de vangrail tot het middenboven van de tunnel. In de diepte moet gemeten worden met een nauwkeurigheid van 0,5 mm in een laag van 10 cm om de tunnelwand. Dit zijn zeer strenge eisen waarvoor niet zomaar een standaard oplossing te koop is. De scanmodule is daarom in de risicomatrix van fase 1 naar voren gekomen als moeilijk en nieuw te ontwikkelen. Probleemdefinitie is om een keuzeboom met verschillende mogelijke oplossingen voor de scanmodule te maken en die te beoordelen.

Bevestigingsmiddel

Bij de tot nu toe gebruikelijke bevestigingsmethodiek worden bevestigingsmiddelen toegepast die niet voldoen aan de randvoorwaarden zoals gesteld in 3.2.1. Bij de huidige methode wordt de brandwerende beplating direct tegen de tunnelwand bevestigd, hierbij worden de platen tussen een ring en de betonwand ingeklemd. Aan de hand van de te stellen eisen aan het bevestigingsmiddel wordt uitgegaan van een bout voorzien van een schroefdraad ter plaatse van de te bevestigen plaat en een klem of schroefbevestiging in het onderliggende beton.

Bij de voorgestelde bevestiging aan de tunnelwand met de afbouwrobot wordt de plaat op zijn plaats (op afstand van de wand) gehouden door de schroefdraad ter plaatse van de brandwerende plaat. Het is dan ook van belang dat het draagvermogen van deze schroefdraadverbinding in de plaat wordt beproefd op de eisen ten aanzien de verkeersbelasting.

3.4 Resultaten van fase 2a

3.4.1 Systeemintegratie

Er is voor de verschillende deeltaken (meten, positioneren, boren en schroeven) nagegaan welke manipulators met welke gereedschappen nodig zijn. Het meten wordt verder behandeld in 3.4.3. Er is daar gekozen om te meten met een laser vanaf een manipulator.

Het positioneren van een plaat moet heel nauwkeurig gebeuren (nauwkeurigheid ongeveer 0,1 mm ten opzichte van de linkerrand van de vorige kolom platen en bovenrand van de vorige plaat). Omdat die nauwkeurigheid bij het meten en door een manipulator niet in één keer gehaald wordt, is dit probleem omzeild door te positioneren in twee stappen. In de eerste stap wordt de plaat grof gepositioneerd. In de tweede stap wordt de plaat fijn gepositioneerd door hem langzaam tegen zijn burens te schuiven. De precieze plaats van een plaat wordt ingesteld met behulp van een soort pasvingers, die de ruimte afpassen tussen een plaat en zijn burens.

Een plaat wordt door vier gaten te boren en vier bouten daarin te schroeven aan de tunnelwand bevestigd. Omdat niet overal in de tunnelwand geboord mag worden is de relatieve plaats van de bouten ten opzichte van elkaar variabel. Als gekozen zou worden om de vier gaten/bouten tegelijk te boren/schroeven zou dat vragen om een erg ingewikkeld gereedschap. Omwille van de eenvoud en de kosten is er daarom voor gekozen om de vier gaten/bouten na elkaar te boren/schroeven. Als laatste is een afweging gemaakt voor de manipulators en de verdeling van het gereedschap daarover. Gekeken is naar het type (hydraulisch, elektrisch of een combinatie van beide) en het aantal (een of twee). De verschillende oplossingen zijn weer beoordeeld op bereik en nauwkeurigheid, prijs en snelheid. Uiteindelijk is gekozen voor twee elektrische manipulators (zo ongeveer de grootste die te koop zijn) die samenwerken. De keuze is gebaseerd op in de markt aanwezige en voor het doel geschikte manipulators, in plaats van de kostbare ontwikkeling hiervan. De ene robot scant met de laser de tunnelwand terwijl de andere laser de plaat positioneert. Terwijl de laatste de plaat vasthoudt boort deze na elkaar vier gaten en schroeft daar vier bouten in.



Dit proces is meer uitvoerig beschreven in hoofdstuk 4 van [3].

Belangrijkste conclusie is dat er geen onoverkomelijke technische problemen geïdentificeerd zijn. Dit alles is inzichtelijk gemaakt in een animatie die op een CD wordt geleverd bij [3].

3.4.2 Taakverdeling tussen mens en machine

Vanuit productiviteitsoogpunt moeten de deelprocessen die de hoofdcyclus vormen (scannen, berekenen van de posities, plaatsen van de platen, boren en bevestiging aanbrengen) zo autonoom mogelijk gemaakt worden.

De deelprocessen: plaatsen van de platen, boren, bevestiging aanbrengen en vullen van de buffer met platen hebben een hoge fysieke belasting tot gevolg door de handelingfrequentie, te tillen gewichten en of ongunstige houding. Vanuit ergonomisch oogpunt wordt aanbevolen om deze deelprocessen door de machine te laten uitvoeren of door gebruik te maken van tilgereedschap. Wanneer de mens het scannen uitvoert moeten hoge eisen gesteld worden aan de werkruimte, met name aan de verlichting.

De beoogde beplatingsmachine zal door één persoon bediend kunnen worden die zich hoofdzakelijk bezig houdt met controle op de werking van de machine, de positionering van de machine in de tunnel en het aanvullen van de voorraden van platen en bevestigingsmiddelen.

3.4.3 Scanmodule

Er zijn verschillende manieren om te meten, vanaf verschillende plaatsen (vanaf de robot of vanaf de wagen waarop de robot staat) en met verschillende sensoren (met lasers, camera's of voelvingers). Deze manieren zijn op een rij gezet, en beoordeeld op hun bereik en nauwkeurigheid, maar ook op prijs en snelheid. Uit die afweging is een laser op een manipulator als winnaar naar voren gekomen. De manipulator volgt langs een contour op een afstandje de tunnelwand en meet met een laser de precieze afstand tot de tunnelwand. Zo worden de nauwkeurigheid van een laser gecombineerd met het bereik in de langsrichting van de manipulator. Zie verder hoofdstuk 3 van [3].

3.4.4 Bevestigingsmiddel

Het doel van het onderzoek van het bevestigingsmiddel is zekerheid te krijgen over de mogelijkheid om een doelmatig bevestigingsmiddel te ontwikkelen dat aan de eisen voldoet. Hiervoor is een aantal proeven gedaan met statische en dynamische belastingen voor verschillende schroefdraden in de brandwerende beplating. Voor de dynamische proeven is uitgegaan van een droge Promatect H platen met een dikte van 27 mm en afmetingen van 1000 mm bij 600 mm. Deze platen zijn met 4 schroeven bevestigd. Uit de proeven bij kamertemperatuur blijkt dat de plaat bij dynamische belasting eerder bezwijkt dan de verbinding. Hieruit volgt dat de schroefverbinding niet maatgevend is voor de belastbaarheid van de plaat. Het is dan ook mogelijk om een schroefverbinding te maken die van een zijde in de plaat en het beton kan worden aangebracht.

3.4.5 Technische haalbaarheid van het systeem

Aan de hand van de uitgevoerde onderzoeken kan geconcludeerd worden dat een systeem voor het automatisch aanbrengen van platen in een tunnelbuis haalbaar is. De risicofactoren die zijn weergegeven in onderstaande tabel worden gezien als oplosbaar en zullen de technische realisatie niet in de weg staan.

Beschikbaarheid	Technische complexiteit		
	Moeilijk	Gemiddeld	Eenvoudig
Nieuw te ontwikkelen	6.1 Nauwkeurig plaatsen van plaat 7.7 Gereedschaps integratie voor de tweede robot	4.2 <i>scanprofiel</i> 4.3 foutdetectie metingen 5.2 software voor meetgegevens verwerking 6.2 integratie van eerste robot gereedschap. 8.2 <i>man / machine interface ontwerp</i> 9 <i>systeem integratie</i>	8.1 <i>man / machine interface layout</i>
Variant op een bestaand concept		7.2 standtijd boorgereedschap/onderhoud 7.3 vuilafvoer 7.4 aanvoer van bout 7.5 plaatsen van bout 7.6 aandraaien van bout	1 robot basis locatie 6.1 oppakken van plaat 7.1 boorgereedschap <i>Bevestigingsmiddel</i>
Te koop		2.1 robot 2.2 aansturingsssoftware 4.1 plaatssensor	3 plaataanvoer 5.1 hardware voor verwerken meetgegevens

Vergelijken we de resultaten van fase 1 (risicomatrix, hoofdstuk 3.2.4) met die van fase 2a (bovenstaande matrix) dan kan geconcludeerd worden dat als gevolg van het onderzoek in fase 2a de technische complexiteit en de beschikbaarheid van de volgende onderdelen een verschuiving te zien geven in de risicomatrix:

- De túbblinglocatiesensor, als onderdeel van de scanmodule, van nieuw te ontwikkelen/moeilijk naar nieuw te ontwikkelen/gemiddeld (4.2);
- De systeemintegratie van nieuw te ontwikkelen/moeilijk naar nieuw te ontwikkelen/gemiddeld (8.2 en 9) cq eenvoudig (8.1);
- Het bevestigingsmiddel van nieuw te ontwikkelen/gemiddeld naar bestaand concept/eenvoudig.

3.4.6 Mogelijke partners voor het vervolg

Voor de verdere ontwikkeling van de beplatingrobot zijn extra partners nodig. Deze zullen een inbreng moeten hebben in zowel de verdere ontwikkeling, de fabricage, als de exploitatie van de beplatingsrobot. In dit kader zijn drie bedrijven bezocht om de belangstelling te polsen

voor mogelijke participatie in het vervolgtraject. Het betreft twee bedrijven die in aanmerking zouden kunnen komen voor de verdere ontwikkeling en de (deel-)productie van het systeem en een potentiële eindgebruiker.

Het resultaat van de gevoerde interviews, het overleg binnen de commissie en de recente ontwikkelingen in het kader van de eisen die gesteld worden aan de brandbestendigheid van boortunnels is als volgt samen te vatten:

- Wil de industrie bereid zijn (mee) te investeren in een beplatingsrobot dan dient er voldoende zicht te zijn op potentiële tunnelbouwprojecten waar toepassing kan plaatsvinden. Anders vindt de verdere ontwikkeling en bouw commercieel geen draagvlak.
- In dit verband is het ook van belang na te gaan hoeveel draagvlak er bestaat bij de Combinatie Middelplaat Westerschelde (secundair belanghebbende).
- Betrokkenheid van een eindgebruiker is zeer wenselijk (onderaannemer brandwerende beplating).
- In dit verband is het van belang te weten aan wie het aanbrengen van de brandwerende beplating wordt uitbesteed (primair belanghebbende).
- De huidige betrokken partijen blijven geïnteresseerd in voortzetting van het project (TNO Bouw, Heijmans Beton- en Waterbouw B.V. en Fokker Space B.V.).
- Daarnaast is ook Croon, vertegenwoordigd in de commissie, geïnteresseerd in deelname bij vervolgactiviteiten.
- Vervolgacties zijn pas zinvol indien duidelijkheid bestaat over de eisen die door de overheid gesteld worden aan de brandwerendheid van geboorde tunnels in het algemeen en die van de Westerscheldetunnel in het bijzonder.

4. TOEKOMST VOOR EEN BEPLATINGSROBOT

4.1 Ontwikkeling brandwerende bekleding

Sinds de aanvang van de werkzaamheden van de uitvoeringscommissie hebben de ontwikkelingen op het gebied van hittewerende bekleding in boortunnels niet stil gestaan. Met name de recente ontwikkelingen bij de Westerscheldetunnel hebben een impact op de verdere ontwikkeling van de afbouwrobot.

Brandwerende bekleding Westerscheldetunnel

Begin 1997 zijn, conform de aanbevelingen van de commissie Horvath, aanvullende maatregelen gedefinieerd op het gebied van de veiligheid in de tunnel. Hierbij werd gesteld dat de 'constructieve integriteit' van de tunnel onder de belasting van de RWS-brandcurve in stand moet blijven. Dit betekent dat de betonsegmenten van de lining hun primaire functie moeten kunnen blijven uitoefenen. Uitgegaan werd van een brandwerende beplating met een dikte van 27 mm (bovengrens). De dikte zou nader vastgesteld worden met behulp van berekeningen en/of brandproeven.

Optimalisatie van de brandwerendheid van de betonsegmenten leidde tot onderzoek naar de toevoeging van polypropyleen vezels aan het beton van de segmenten met het oogmerk het achterwege laten van de bekleding. Een aantal brandproeven in Braunschweig wees uit dat uitsluitend de toepassing van polypropyleen vezels onvoldoende was om de constructieve integriteit van de betonsegmenten te waarborgen onder belasting van de RWS-curve. Een bekleding met 16 mm Promatect-H als aanvulling op polypropyleen vezels bleek noodzakelijk.

In het voorjaar van 1998 leidde de discussie over de levensduur van de betonsegmenten tot het afzien van de toevoeging van polypropyleen vezels aan het beton, omdat het gevaar bestond dat de vezels in het sterk alkalische betonmilieu zouden gaan oplossen en poreus beton zou ontstaan. Een en ander stond haaks op de levensduurbeschouwing.

Gezien het voorgaande waren opnieuw brandproeven noodzakelijk om de juiste dikte van de brandwerende bekleding vast te stellen, dus zonder toepassing van polypropyleen vezels.

In december 1998 zijn bij TNO Bouw (Centrum voor Brandveiligheid) de proeven uitgevoerd. Bij de proeven bleek dat 27 mm Promatect-H reeds na ca. 55 minuten bezweek (eis: 2 uur brandveiligheid met RWS-curve).

Uit de resultaten van de proeven en berekeningen is gebleken dat 50 mm Promatect-H benodigd is om gedurende 2 uur weerstand te bieden aan de RWS-curve.

Besloten is om in zeer korte tijd (1,5 maand) te bepalen wat de meest in aanmerking komende bekleding voor de Westerscheldetunnel zou zijn. Hierbij zijn twee varianten in beschouwing genomen: plaatmateriaal en spuitpleister.

Uit de beschouwing van de varianten is gebleken dat zowel het plaatmateriaal als de spuitpleister, beide met een dikte van ca. 50 mm, kunnen voldoen aan de te stellen eisen.

Gewijzigde uitgangspunten beplating

Door het toepassen van een plaatdikte van 50 mm, in plaats van 27 mm, zijn de uitgangspunten voor het aanbrengen van de beplating aanmerkelijk gewijzigd.

- het doorgaand aanbrengen van beplating is niet meer noodzakelijk;
- de visuele eisen komen te vervallen;
- de tûbbingen verspringen maximaal 13 mm;
- de beplating wordt per betonsegment steunend tegen het beton aangebracht;
- de bevestigingsmiddelen mogen in de dekking van de betonelementen worden aangebracht onafhankelijk van het wapeningspatroon;
- de bevestigingsmiddelen ten behoeve van de installatiedelen worden vooraf aangebracht.

De beplating wordt nu per betonsegment aangebracht, waarbij de voegen van de beplating stroken met de voegen van de betonsegmenten. Dat wil zeggen dat de beplating vooraf (buiten de tunnel op de bouwplaats) op maat gemaakt kan worden en de boorgaten in de beplating op de bouwplaats aangebracht kunnen worden. Aangezien de beplating steunend tegen het beton kan worden aangebracht is het op afstand houden van de beplating door middel van de bevestigingsmiddelen niet meer relevant.

Hiermee vervallen de voornaamste eisen voor de beplatingsrobot:

- Het scannen van de wand in de tunnel ten behoeve van het bepalen van de locatie van de platen en de toegestane plaats van de bevestigingsmiddelen;
- Het boren in materialen met een verschillende dichtheid.

Een en ander heeft tot gevolg dat het aanbrengen van beplating met bestaand materieel met door de onderaannemer te realiseren aanvullende voorzieningen aangebracht kan worden.

Alternatieve brandwerende bekleding

Als alternatieve brandwerende bekleding voor boortunnels kan spuitpleister worden toegepast. Het aanbrengen van spuitpleister kan met bestaand materieel gerealiseerd worden. Eventuele automatisering van het proces zou slechts op ondergeschikte onderdelen relevant zijn.

Een tweede mogelijkheid is het aanbrengen van coating. De geschiktheid van dit materiaal is echter nog niet bewezen.

4.2 Uitbouw van het systeem voor aanvullende werkzaamheden

Behalve voor het aanbrengen van brandwerende beplating zou het robotsysteem geschikt gemaakt kunnen worden voor het aanbrengen van bevestigingsmiddelen voor de installatiedelen in de tunnelbuis. Met name de boormodule kan hiervoor worden uitgerust en gebruik maken van de in het systeem opgeslagen meetgegevens.

Ten aanzien van de praktische waarde is het volgende op te merken:

- het aanbrengen van de brandwerende bekleding wordt over het algemeen opgedragen aan een onderaannemer van bekledingsmateriaal;

- de installatiedelen met bevestigingen worden opgedragen aan een elektromechanische onderaannemer;
- het onderbrengen van taken, met betrekking tot de bevestigingen, van de EM-onderaannemer bij de opdrachtnemer van het bekledingsmateriaal en hoe dit zich verhoudt tot de verantwoordelijkheden ten aanzien van de juiste uitvoering van de werkzaamheden is een zaak waar een hoofdaannemer niet licht toe zal overgaan, hetgeen blijkt uit het feit dat bij de Westerscheldetunnel besloten is om de bevestigingen voor de installatiedelen vooraf aan te laten brengen door de EM-onderaannemer.

5. CONCLUSIES

Ten aanzien van de beplatingsrobot

Het realiseren van een robot voor het aanbrengen van brandwerende beplating in boortunnels wordt technisch mogelijk geacht.

Binnen de oorspronkelijk gestelde economische randvoorwaarden (schatting van de prijs per m² voor handmatig aanbrengen) is, bij verder ongewijzigde uitgangspunten, een beplating-robot ook economisch haalbaar.

Vanwege de gewijzigde uitgangspunten cq huidige ontwikkelingen met betrekking tot de brandwerende bekleding is de behoefte voor de ontwikkeling van een totaalsysteem afgenomen.

Evenwel kunnen onderdelen van het onderzoek zoals de toepassing van bevestigingsmiddelen uit één stuk met meerdere functies (bevestigen en afstandhouder) onafhankelijk van automatiseren een toepassing vinden.

Bij de afbouw van nieuwe en aanpassingen in bestaande utilitaire tunnels zou uit het oogpunt van arbeidsomstandigheden de inzet van een robot overwogen kunnen worden vanwege de beperkte beschikbare werkruimte in dergelijke tunnels.

Uit het onderzoek naar partijen voor de realisatie van een beplatingsrobot is gebleken dat er belangstelling is voor de techniek, maar dat er geen concrete belangstelling bestaat voor de daadwerkelijke ontwikkeling van de robot en participatie in het project.

Ten aanzien van het onderzoek

Het faseren van het onderzoek voorkomt dat op basis van verouderde uitgangspunten een prototype wordt ontwikkeld en onnodige kosten worden gemaakt. Wel is het belangrijk om bij de presentatie van tussenresultaten steeds weer een totaalbeeld te schetsen.

De aanpak van system engineering is een goede benadering. Door het opstellen van risicomatrices en het systematisch elimineren van de risico's kan men tot een technisch haalbaar product komen.

LITERATUUR

Door uitvoeringscommissie M 430 opgestelde werkrapporten:

- [1] Krom, R.P., TNO-rapport 97-CMC-R0272 'Robotisering van de afbouw van boortunnels', *een inventarisatie en evaluatie*. 05 juni 1997
- [2] Heemskerk, C.J.M., R.P. Krom, A.A. Proper en J.J. Uwland, TNO-rapport 98-CMC-R0316 'Ontwikkeling van een beplatingsrobot voor brandwerende bekleding van boortunnels', *functionele specificatie, plan van aanpak*. april 1998.
- [3] Visser, M., J. Peters, R.AFB2.10000, 'Ontwikkeling van een beplatingsrobot voor brandwerende bekleding van boortunnels', *systeemintegratie en scanmodule*'.19 februari 1999
- [4] Uwland, J.J., P.E. Hovinga, TNO-rapport 1999-CMC-R/008, 'Ontwikkeling van een beplatingsrobot voor brandwerende bekleding van boortunnels', *haalbaarheid van het bevestigingsmiddel*. februari 1999
- [5] Miedema, M.C., P. van Lingen, J. Uwland, TNO-rapport 1999-CMC-R/007, 'Ontwikkeling van een beplatingsrobot voor brandwerende bekleding van boortunnels', *taakverdeling tussen mens en machine*. februari 1999
- [6] Auditrapport M 430 'Afbouwrobot', 98.0128, 17 november 1998.