

M 410-01  
VOORSTUDIE AUTOMATISERING IN HET  
ONDERGRONDS BOUWEN

WERKRAPPORT  
CUR/COB-uitvoeringscommissie  
M 400 "Automatisering c.q. robotisering"

### **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 de 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, "©Rapport M 410-01 "Voorstudie automatisering in het ondergronds bouwen", mei 1996, CUR/COB, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

CUR/COB en degenen die aan deze publikatie 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

Binnen de doelstellingen van het COB staat het verkennen van mogelijkheden om het ondergronds bouwen in Nederland op unieke wijze te verbeteren hoog aangeschreven. Nieuwe middelen, zoals het automatiseren en specifiek robotiseren, moeten daarom de aandacht krijgen.

Dit is des te meer relevant omdat in andere landen, zoals Japan, en in andere bedrijfstakken, zoals de industriële produktie, grote successen worden geboekt met verdere automatisering en robotisering. De oogmerken zijn daarbij breed. Betere arbeidsomstandigheden, hogere produktiviteit en betere kwaliteit zijn alle doelstellingen die binnen automatisering en robotisering kunnen worden nagestreefd en behaald.

Voorafgaande aan de mobilisering van een CUR/COB-commissie M 400 "Automatisering en Robotisering", die dit vraagstuk verder zal behandelen, heeft het COB een opdracht gegeven aan "Delta Marine Consultants bv" om in samenwerking met "TNO Bouw, Centrum voor Mechanische Constructies" een voorstudie te verrichten op grond waarvan een concreet werkplan kan worden gemaakt om de gesignaleerde problematiek aan te pakken.

De studie is uitgevoerd onder verantwoordelijkheid van prof.ir. Ch.J. Vos, directeur van Delta Marine Consultants, die tevens fungeerde als voorzitter van het projectteam.

Het projectteam bestond voorts uit ir. R.M.S. van der Marck en ing. H.J. Berkhoff van DMC en ir. R. Kloek en ir. R. Krom van TNO Bouw.

In deze samenstelling heeft het team eerder samengewerkt bij het ontwikkelen en implementeren van een bouwrobot, de "Loopboor".

Voorts heeft een aantal medewerkers van HBW die betrokken zijn bij de bouw van tunnels, uitgevoerd in verschillende technieken, door middel van interviews bijgedragen aan dit vooronderzoek.

Het onderzoeksteam is zeer content met de ervaring opgedaan met dit onderzoek, waarbij literatuurstudie en kennisneming van de mening van collega's uit de bouw kon worden gecombineerd met eigen ervaring binnen de onderhavige materie.

Vooraf daarom is dank verschuldigd aan het COB voor het vertrouwen waarbinnen de opdracht aan dit team is verstrekt.

mei 1996

Het bestuur van CUR  
Het bestuur van COB



## INHOUD

		SAMENVATTING .....	7
		SUMMARY .....	9
Hoofdstuk	1	INLEIDING .....	11
	1.1	Algemeen .....	11
	1.2	Opbouw van het rapport .....	11
Hoofdstuk	2	LITERATUURSTUDIE NAAR "THE STATE OF THE ART" .....	12
	2.1	Gevolgde werkwijze .....	12
	2.2	Resultaten .....	14
	2.3	Marktverkenning van het aanbod van robottechnologie door materieelleveranciers .....	16
	2.3.1	Bouwmanipulators .....	16
	2.3.2	Remote Operated Vehicles .....	16
	2.3.3	Rioolinspectie- en renovatierobots .....	17
	2.4	Marktverkenning van het aanbod van industriële robottechnologie .....	17
	2.4.1	Toepassen van industriële robots bij ondergronds bouwen .....	18
	2.4.2	Transport .....	18
	2.5	Conclusies .....	19
Hoofdstuk	3	INTERVIEWS EN SUGGESTIES .....	20
	3.1	Gevolgde werkwijze .....	20
	3.2	Suggesties vanuit de markt .....	21
	3.3	Terugkoppeling met literatuurstudie .....	23
	3.4	Conclusies .....	24
Hoofdstuk	4	EVALUATIE EN AANBEVELINGEN .....	25
	4.1	Hedendaagse robotisering in het ondergronds bouwen .....	25
	4.2	Verdere mogelijkheden binnen het ondergronds bouwen in Nederland .....	26
	4.3	Enige randvoorwaarden voor automatisering binnen het on- dergronds bouwen in Nederland .....	27
	4.4	Samenvatting van de aanbevelingen .....	28
Bijlage	A	DATASHEETS .....	29
Bijlage	B	SAMENVATTING VAN DE INTERVIEWS .....	64

Bijlage	C	MANIPULATOREN .....	74
		LITERATUUR .....	77

## SAMENVATTING

### *Doel*

De studie beoogt een beeld te geven van de huidige stand van de automatisering bij het ondergronds bouwen en de daaraan gevoelde behoefte, met het doel daaruit zwaartepunten af leiden voor onderzoek en ontwikkeling in de Nederlandse context van het COB.

### *Methodiek*

Aan de hand van een brede definitie van het begrip automatisering, in dit geval opgevat als minder en meer geavanceerde robottechnologie, heeft onderzoek plaatsgehad in de literatuur en bij producenten van robots naar de huidige stand van de techniek in het ondergronds bouwen. Aan de functionaliteit en de drijfveer achter de gevonden ontwikkelingen is speciale aandacht besteed. Met deze kennis als achtergrond zijn betrokkenen bij diverse in Nederland in uitvoering zijnde typen van ondergronds bouwen, zoals de (voorbereiding van de) uitvoering van boortunnels, boortunnels met kleine diameter (pipe-jacking), luchtdrukcaissons en conventionele open bouwputmethoden (cut and cover), geïnterviewd om hun mening naar noodzaak en wenselijkheid van robotisering bij het ondergronds bouwen te horen.

Met de resultaten van deze objectieve en subjectieve analyses en op grond van eigen ervaring met het ontwikkelen en implementeren van robottechnologie, heeft het projectteam een evaluatie gemaakt van de wenselijkheid van en de randvoorwaarden voor toepassing van robottechnologie in het ondergronds bouwen in Nederland.

### *Bevindingen*

Er is een bijna continue stroom van automatiseringsstappen aan de gang bij het verder ontwikkelen van standaardaanneemersmaterieel. Graafwerktuigen en tunnelmachines zijn duidelijke voorbeelden van deze door de betreffende leveranciers, met medewerking van de gebruikers, gerealiseerde mechatronische verbeteringen.

De zodanig geïmplementeerde verbeteringen hebben niet slechts tot doel de veiligheid en werkomstandigheden van de betreffende werktuigen te verbeteren, maar komen de integrale kwaliteit van produkt en proces ten goede. Betere afstemming van afzonderlijke processtappen op de omgeving en op elkaar zijn daarbij met name de verworvenheden van sensortechnologie en impulsbesturing. Uiteindelijk komt dat de economie ten goede.

Tevens is echter de indruk ontstaan dat robotisering voor de bouw in een te hoge mate beslag legt op financiële middelen, tijd en ontwikkelingspotentieel om in succesrijke toepassingen te resulteren. Vandaar dat bij de materieelproducenten de meeste resultaten worden aangetroffen bij grotere series en niet bij de op projectmatige eenmalige ontwikkelingen gerichte sectoren.

In de praktijk van het bouwen wordt veel scepsis ten aanzien van robottechnologie aangetroffen. Er worden voor typisch in Nederland toegepaste deeltechnieken wel vragen naar verbetering onderkend, zoals bij het ontgraven onder druklucht, het detecteren en behandelen van slib en het transport van materialen onder moeilijke omstandigheden. Er worden echter geen stappen ondernomen om te zoeken naar integrale oplossingen voor zulke problemen. De koppeling van multisensorische waarneming aan een veelheid van actie, waardoor robottechnologie immers pas goed tot zijn recht komt, leeft niet als gedachte voor verbetering.

### *Aanbeveling*

Op grond van de bevindingen is het evident dat robottechnologie een plaats moet krijgen binnen de COB-activiteiten.

De hoge kosten en inspanningen om tot succesvolle en overtuigende toepassingen te komen, vragen een strategisch goed overwogen selectieve aanpak.

Een ontwikkelingsbeleid zou gericht kunnen zijn op:

- Het toepassen van robottechnologie in een proefproject waarbinnen een hoge mate van demonstratie van de voordelen zichtbaar wordt.
- Het selecteren van een dergelijk proefproject, gericht op specifieke Nederlandse bodemcondities, snelle realiseerbaarheid en niet te ambitieuze technologie waarvan de deelsystemen bekend zijn.
- Het toetsen van zo'n proefproject op verbetering van arbeidsomstandigheden, milieu-invloeden, kwaliteit en impliciet produktiviteit.
- Naast een relatief eenvoudig proefproject als voornoemd, is het leren van robotiseringsprojecten van derden, zoals die in materieel worden toegeleverd, van groot belang. Toepassingen op door het COB beschouwde projecten behoren expliciet te worden gevolgd en geëvalueerd.
- Een echte Nederlandse doorbraak van robottechnologie in het ondergronds bouwen kan slechts tot stand komen door robottechnologie voor een tot dusver weinig geautomatiseerde vorm van tunnelbouw toe te passen.
- Tunnelbouw in de open bouwputmethode, met een integrale aanpak van het logistieke proces en de diverse bouwfuncties, zoals het ontgraven, het verzorgen van horizontale, verticale en frontstabiliteit en het maken van de horizontale en verticale grondkering, zou daartoe als object kunnen worden bestudeerd.
- Als randvoorwaarde voor succes betekent dit dat een continu bouwproces voor een relatief grote opdracht wordt gegarandeerd.



## SUMMARY

### PRELIMINARY STUDY AUTOMATION IN UNDERGROUND CONSTRUCTION

#### *Objective*

This study intends to present the state of the art with automation in underground construction and the need for it as observed in practice. Action points for a program are being evaluated from this for further research and development in the Netherlands within COB, the Centre for Underground Construction.

#### *Methodology*

Having adopted a wide definition for automation, including less and very advanced robotics, investigations took place in literature and at robotmanufacturers to define the state of the art. Special attention was given to the functionality and the objective of a specific development. Having this background in mind, staff of different tunnel projects under construction in the Netherlands has been interviewed about their opinion for the need and benefits of using robotics in underground construction. This included projects for shield tunnelling, pipejacking, air-pressure caissons and cut and cover methods.

The results of this objective and subjective investigations have been evaluated by the project team, adding their own experience with robotics.

#### *Conclusions*

There happens to be a continuous stream of steps automating regular contractors equipment. Earthwork equipment and tunnel boring machines, TBM's, are clear examples of this development being driven by their manufacturers with the aid of the contractors using them.

The objective of such improvements is not only to serve safety and labour conditions working with the equipment. It is as well to improve the integrated quality of product and process. Better tuning of partial steps in the process in relation to the environment and towards each other are benefits from sensortechnology used. All together this serves the economy of construction.

From the point of view of developments within the construction industry itself however, it has been observed that robotic developments require budgets, developmenttime and efforts being unprecedented within the project orientated construction branch. For that reason it is a logic observation that robotic developments take place at the equipmentside within large series of more or less identical products instead of in the domain of projecttype unique developments initiated by consultants, contractors and their clients.

Construction practice encounters robotic developments quite sceptic. Specific Dutch problems were recognized to improve certain processes, like excavation under air-pressure, detection and treatment of siltation problems and transport of materials under many restraints. The step however, to try to find integrated solutions for such problems is not made. This means that the idea of multisensor observation steering a multitude of construction activities, being the core of successful application of robottechnology, is thought of in practice.

#### *Recommendations*

The observations made clear that automation needs attention within the COB activities. Relative high budgets and efforts to obtain successful and convincing applications require a strategic, well-considered and selective approach.

A strategy for development could very well consist out of:

- The application of robotics in a test project demonstrating benefits very clear.
- The selection of such a test project being focussed on specific Dutch soil conditions, fast realisation and relative low ambitious technology, consisting out of proven subsystems.
- The consideration that the test project should emphasize on the improvement of labour conditions, environmental impact, quality and implicitly on productivity.
- Apart from a test project as described before, learning from robotic excersizes from third parties, like from equipment used, is quite important. This should be implemented explicitly on projects being monitoured by COB.
- A real national breakthrough from robotics in underground construction can only be realized when it is focussed on a type of tunnel construction having a low degree of automation so far.
- Cut and cover tunneling, looking for an integrated approach of all its construction functions, like logistics of material supply, excavation, the supply of side, vertical and front-end stability and the construction of the final horizontal and vertical earth retaining structures, could be studied as an interesting object.
- A most important boundary condition for the successfulness of such an idea is the intention and guarantee of a client for a large continuous project to be executed in this way.

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Algemeen

Het doel van deze "Voorstudie automatisering in het ondergronds bouwen" is om de mogelijkheid en het belang van automatisering in het ondergronds bouwen te exploreren. Hierbij wordt voornamelijk gekeken naar de ruwbouw. In de afbouw komen veel produkten, processen en gereedschappen voor die ook in het bovengronds bouwen worden toegepast. Deze worden alleen meegenomen wanneer ze als specifiek gelden voor ondergrondse bouwwerken.

#### 1.2 Opbouw van het rapport

De studie bestaat uit drie delen:

- Inventarisatie van de huidige stand van zaken door middel van literatuurstudie en gesprekken met leveranciers. Hierbij wordt gekeken naar processen om bepaalde produkten te maken en de daarbij behorende gereedschappen. Deze gegevens worden vastgelegd op datasheets.
- Interviews met en suggesties van uitvoeringsmensen op het gebied van tunnels. Samenvattingen van deze interviews worden opgenomen in dit rapport.
- Evaluatie en aanbevelingen.

## HOOFDSTUK 2

### LITERATUURSTUDIE NAAR "THE STATE OF THE ART"

Voor de beeldvorming van de state of the art in de robotisering in ondergrondse bouwactiviteiten is er een literatuurstudie verricht in tijdschriften, vakbladen en de verslagen van congressen en symposia. Dit hoofdstuk geeft de bevindingen van deze studie. Naast de literatuurstudie heeft er ook een marktverkenning plaatsgehad van het aanbod van robottechnologie. Er is produktinformatie aangevraagd en er zijn gesprekken geweest met leveranciers.

#### 2.1 Gevolgde werkwijze

Van alle publikaties over ontwikkelingen van prototyporobots of commerciële producten, die een raakvlak hebben met ondergrondse bouwactiviteiten, is een datasheet gemaakt. Het doel van het gebruik van de datasheets is de ontwikkelingen uniform te beschrijven. Het formaat van de datasheet is voorafgaande aan de literatuurstudie vastgesteld. Elke datasheet omvat drie delen, waarin enkele basisvragen over de ontwikkeling worden beantwoord. Deze basisvragen zijn:

- Wat voor ontwikkeling is het?
- Wat kan ermee worden gedaan?
- Wat zijn technische kenmerken van de ontwikkeling?

Een voorbeeld van een datasheet is hieronder opgenomen. Het voorbeeld betreft hier een robot die eerder in Nederland is ontwikkeld.

#### Datasheet Bouwrobots (voorbeeld)

##### PRODUKT

Naam	Loopboor
Functionele omschrijving	robot voor het boren van gaten in betonvloeren voor de aanleg van spoorrails
Ontwikkelaar	Stichting Robouw, TNO Bouw (NL)
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker, R & D organisatie
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	1992 - 1994

##### TOEPASSING

Toepassingsgebied	boren van gaten in betonvloeren
Toepassingsvoorbeelden	boren van gaten voor railankers boren van gaten voor stekeinden
Robot functionaliteit	automatische maatvoering boren van gaten detecteren van wapeningsstaven

Voordelen:

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| - economisch voordeel              | versnellen van het productieproces   |
| - arbeidsomstandigheden            | mensonvriendelijk werk is geautomatiseerd, minder stof en lawaai in tunnel |
| - kwaliteit                        | vermindering van de kans op fouten   |
| Mogelijke inzet ondergronds bouwen | aanleg van spoor in spoortunnels, stekeinden voor later te storten wanden  |
| Ideeën voor uitbreiding            | boren van gaten in wanden en plafonds                                      |

#### UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 2,4 x 0,9 x 1,4 m
Massa	circa 1 ton
Kostenindicatie	circa f 500.000,--
Mobiliteit	wielen
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch (380 V)
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

#### Opmerkingen

-

#### Bron

Bron	ISARC X, XI
Notulist	R. Krom

De in het literatuuronderzoek geraadpleegde bronnen zijn opgesomd in de literatuurlijst in dit rapport. De belangrijkste bron van informatie voor het literatuuronderzoek waren de verslagen van het "International Symposium of Automation and Robotics in Construction (ISARC)". Dit symposium wordt jaarlijks georganiseerd sinds 1983. Een tweede belangrijke bron van informatie wordt gevormd door de catalogus met alle in Japan ontwikkelde robots in de "non-manufacturing fields", uitgegeven door de Japan Industrial Robot Association (JIRA).

Naast de verkenning van bovengenoemde literatuurbronnen is ook een aantal literatuurdata-bestanden geraadpleegd. Uit een eerste onderzoek van 14 databestanden bleken de volgende bestanden de hoogste scoringskans te geven met de trefwoorden robot en/of tunnel:

- de Amerikaanse databanken Compendex (Engineering Info Inc.) en Energy Scitec (US Department of Energy);
- de Duitse databanken RSWB en ICONDA (Institut für Raum und Bau).

De referaten zijn geselecteerd aan de hand van de volgende trefwoorden: robot, tunnel, underground, automation, artificial, civil engineering, construction equipment and methods. Gezien het zeer grote aanbod aan mogelijk relevante literatuur is gezocht naar een zodanige trefwoordencombinatie dat er een behandelbare file van referaten ontstaat (minder dan 100 titels). Op deze wijze is een vijftal files aangemaakt. Na bestudering van de files met referaten is een aantal mogelijke interessante artikelen opgevraagd uit de volgende periodieken:

- Bauingenieur (D);
- Tunnel (D);

- Baumachine + Bautechnik (D);
- Cement (NL);
- BMB-techniek BouwMaterieel Benelux (NL);
- Tunnels and Tunnelling (GB);
- Construction Engineering & Management (J);
- Pit & Quarry (US);
- Microcomputers in Civil Engineering (US);
- Automation in Construction (NL).

Een probleem was dat een aantal artikelen met veelbelovende titels niet opvraagbaar was. Het betrof vooral Japanse artikelen. Bij een enkel artikel stond ook aangegeven dat gedeelten niet vrij voor publikatie waren. Artikelen die alleen in de Japanse taal zijn verschenen, zijn ook niet opgevraagd.

Van alle robotontwikkelingen op het gebied van ondergronds bouwen is een datasheet ingevuld.

## 2.2 Resultaten

Een overzicht van de ingevulde datasheets is hieronder in tabel 1 weergegeven. Alle ingevulde datasheets zijn in bijlage A van dit rapport opgenomen. Voor de overzichtelijkheid zijn robotontwikkelingen met een vergelijkbare functionaliteit samengevoegd. Aangegeven is uit welk land de ontwikkeling afkomstig is (kolom "lnd") en hoeveel parallelontwikkelingen er voor dezelfde bouwtaak zijn (kolom #).

Tabel 1. Overzicht van de ingevulde datasheets.

nr.	functionele omschrijving van de geautomatiseerde bouwtaak	lnd	#
1	plaatsing en onderling verbinden van liningelementen bij TBM	J	4
2	plaatsing van liningelementen bij TBM	J	2
3	automatisch aanbrengen van bouten liningelementen	J	1
4	automatisch besturingssysteem voor TBM	J	1
5	automatisch transport van liningelementen voor TBM	J	1
6	automatische verlenging van slurripijpen voor TBM	J	2
7	meetsysteem voor meting hoeveelheid afgevoerde grond voor TBM	J	1
8	in-situ aanbrengen van betonlining in (rots) tunnel	J	1
9	tele-operated "bobcat" graafwerktuig	Fin	1
10	automatisch ontgraven met graafmachine	UK	1
11	tele-operated ontgraven en transporteren van grond	J	1
12	tele-operated mini-ontgravingswerktuig	J	1
13	automatisch ontgraven met backhoe	E	1
14	tele-operated baggerwerktuig	J	1
15	sputten van spuitbeton	J/D	5
16	aanbrengen en verankeren spuitbeton wand voor bouwput	J	1
17	automatisch systeem voor horizontaal/verticaal transport bouwmetaal	J	1
18	meetsysteem voor semi-automatisch ontgraven	div.	4
19	automatisch boren van gaten in betonvloeren	NL	1
20	automatisch baggerwerktuig	NL	1

In totaal zijn uit de omvangrijke literatuurbronnen slechts 20 datasheets geëxtraheerd. In verhouding met het aantal beschikbare artikelen in de ISARC-symposiumverslagen (circa 400) lijkt dit een gering aantal, alhoewel dit wellicht in verhouding staat met de omvang van ondergronds bouwen in verhouding tot de bouw en civiele techniek in zijn geheel. Het grootste deel van de datasheets beschrijft ontwikkelingen in Japan. De grote activiteit van de Japanse bouw is ook herkenbaar in het grote percentage van artikelen van Japanse auteurs in de ISARC-symposiumverslagen en het overzicht van bouwrobots in de catalogus van de Japan Industrial Robot Association (JIRA).

Het grootste deel van de Japanse ontwikkelingen op het gebied van robotisering in ondergronds bouwen betreft de automatisering van (deel)taken gerelateerd aan het gebruik van tunnelboormachines (TBM's). Voorbeelden van zulke geautomatiseerde deeltaken zijn: plaatsing van liningelementen, verbinden van liningelementen, besturing van de tunnelboormachine, aanleg van buizen voor aan- en afvoer van slurry.

Een belangrijke doelstelling die wordt genoemd voor de ontwikkeling van deze robots is de vermindering van het aantal bouwvakkers in de ondergrondse werkomgeving. Verschillende Japanse auteurs onderschrijven dat het grote tekort aan arbeidskrachten in de Japanse bouw een belangrijke drijfveer is voor de ontwikkeling van robotisering.

Een ander aspect van het ondergronds bouwen, dat over de hele wereld aandacht krijgt, is de automatisering van graafwerkzaamheden. Er kunnen drie stromingen in de ontwikkelingen worden onderkend:

1. de ombouw van graafmachines tot robots;
2. de ontwikkeling van afstandsbesturing voor graafmachines;
3. de ontwikkelingen van speciale ontgravingswerktuigen voor specifieke omstandigheden (onder water, in kleine ruimten).

De "volwassenheid" van de ontwikkelingen lopen sterk uiteen van proefopstellingen tot commerciële producten.

De bestudering van de literatuur op het gebied van robotisering in de bouw laat zien dat de Japanse bouw op dit gebied heel actief is. Van de evolutie van de robotiseringsactiviteiten van de grote Japanse aannemers kan ook worden geleerd. In de beginjaren van de robotisering (eerste helft tachtiger jaren) werden robots ontwikkeld voor verschillende op zichzelf staande bouwtaken, zoals lassen van staalconstructie-elementen, vlinderen van betonvloeren en spuiten van brandvertragingsmateriaal op staalconstructiedelen. In de loop der tijd is deze aanpak verlaten en is robotisering op een hoger "abstractieniveau" benaderd door het bouwproces te "re-engineeren" omwille van de inzet van bewezen robottechnologie voor automatische assemblage. Daarnaast is ook veel aandacht besteed aan verbetering van de logistiek, just in time levering van bouwmaterialen, en gebruik van geprefabriceerde bouw delen. Deze aanpak is door verschillende Japanse aannemers uitgewerkt. Implementaties van zulke "Automated Building Systems" zijn het SMART-systeem van Shimizu Co. en het ABC-systeem van Ohbayashi Co.

## 2.3 Marktverkenning van het aanbod van robottechnologie door materieelleveranciers

Naast de verkenning van de state of the art in onderzoek en ontwikkeling op het gebied van automatisering en robotisering is ook gekeken naar de automatiseringstechnologie die anno 1996 door leveranciers van bouwmaterieel commercieel wordt aangeboden.

### 2.3.1 *Bouwmanipulatoren*

Het is gebleken dat het aanbod van commerciële bouwrobots zeer beperkt is. Enkele aangeboden systemen zijn:

- spuitbetonrobot (Schwing, Putzmeister, Ingersoll-Rand);
- boorrobot (Ingersoll-Rand, Atlas Copco);
- metselrobot (Anliker, Steinweg, Schoch, Modern Technik).

De Schwing Multi-Shot en de Putzmeister Shotcrete Buffalo zijn geen werkelijke robots. Beide machines zijn op afstand bestuurd betonspuitmachines (bouwmanipulatoren). De Atlas Copco Rocket Boomer is een halfautomatische boorrobot. Een operator bedient drie boorarmen met behulp van een computersysteem. Het boren start automatisch na bevestiging van de operator. Na het boren wordt de boor naar een nieuwe voorgeprogrammeerde locatie gebracht en wacht dan weer op bevestiging door de operator. Dit apparaat wordt dus in beperkte mate geprogrammeerd.

De metselrobots met klinkende namen, zoals "Multistone 8000", "Mauermax", "Steinherr" en "Mauer Elevator Robi" zijn geen robots maar metselplatforms met een manipulatorarm, waarmee het werk van de metselaar aanzienlijk lichter wordt gemaakt (zie ook datasheet 21 in bijlage C).

Bij navraag naar bouwrobots of robots in het algemeen bij Nederlandse vestigingen van bijvoorbeeld Hitachi en Ingersoll-Rand wordt verwezen naar de moedermaatschappij in respectievelijk Japan en de Verenigde Staten. Bij Mitsui is navraag gedaan over het, in een prospectus getoonde, op afstand bestuurd baggerwerktuig (zie ook datasheet 14 in bijlage A). Buiten Japan is dit werktuig echter tot nu toe niet verkocht.

### 2.3.2 *Remote Operated Vehicles*

Bekende robotsystemen, die in de offshore onder water worden gebruikt, zijn de Remote Operated Vehicles (ROV's). Er zijn twee categorieën ROV's:

- de zelfvarende ROV's ten behoeve van inspectie en reparatie;
- de gesleepte of zelfrijdende sleuvengravers.

Ongeveer dertig jaar geleden is er begonnen met de ontwikkeling van ROV's. In eerste instantie uitsluitend ten behoeve van het Noordzeegebied. Nog steeds zijn de fabrikanten merendeels Engelse bedrijven. Na de introductie van de ROV's heeft het enige tijd geduurd alvorens de inzet van ROV's voor inspectie en andere werkzaamheden werd geaccepteerd. Een belangrijke motivatie voor de ontwikkeling van ROV's was om werkzaamheden uit te kunnen voeren die voor duikers onmogelijk zijn.



Van het merendeel van de 175 soorten operationele ROV's zijn maar 1 of 2 exemplaren gebouwd. Een uitzondering zijn de zogenoemde "low cost ROV's", zoals bij voorbeeld de "Observation Hyball", waarvan 107 exemplaren zijn vervaardigd en de "work and support ROV's", waarvan ongeveer 20 exemplaren per soort zijn vervaardigd. Opvallend is dat voor de laatste categorie, veelal toegepast bij boorplatforms, een bedieningsploeg van 3 man nodig is.

Een nieuwe ontwikkeling is de AUV (= Autonomous Underwater Vehicle). Deze kan (semi)-autonoom inspecties van bij voorbeeld de zeebodem en pijpleidingen uitvoeren.

Aangezien het bij ondergronds bouwen in Nederland regelmatig voorkomt dat er handelingen en inspecties moeten worden uitgevoerd in bouwputten die onder water staan, is er ook een toepassingsgebied van ROV's bij het ondergronds bouwen. ROV's zouden hun diensten kunnen bewijzen bij onderwaterschoonmaak- en inspectiewerk in onder water staande bouwputten. Een probleem met de nu verkrijgbare ROV's is dat deze machines zijn ontworpen om gebruikt te worden vanaf een schip en in zee, waardoor ze over het algemeen vrij groot en zwaar zijn. Ook de kosten zijn nog hoog.

### 2.3.3 *Rioolinspectie- en renovatierobots*

Ten behoeve van inspectie, reparatie en renovatie van rioolsystemen zijn verschillende mini-voertuigen ontwikkeld. Ook hier betreft het voornamelijk op afstand bestuurd apparaten. Bij Sika is de riolrobot ontwikkeld ter ondersteuning van de verkoop van riolbekleding. Enkele apparaten zijn in staat om aansluitingen met zijtakken af te werken, nadat een nieuwe bekleding in een oud riool is aangebracht.

De riolrobots zelf zijn te licht en hebben te kleine vermogens om direct te kunnen worden ingezet in ondergrondse bouwactiviteiten. De ervaring met betrekking tot aanpassing aan de moeilijke omgeving en de geavanceerde besturingstechniek zou echter goed van toepassing zijn bij ondergronds bouwen.

## 2.4 **Marktverkenning van het aanbod van industriële robottechnologie**

In de industrie is de robotisering aanzienlijk verder doorgevoerd dan in de bouw. In de Benelux staan ongeveer 4000 robotsystemen opgesteld. Het betreffen industriële robots voor de volgende hoofdactiviteiten:

- lassen (circa 70 % van de robots);
- handling (palletiseren of rangschikken) (circa 15 % van de robots).

De overige activiteiten zijn onder andere snijden, verspanen, gieten, polijsten, wassen, ontbramen en verven.

Het betreffen veelal programmeerbare robotarmen, al dan niet voorzien van een gereedschap of grijper. De krachten op de armen zijn vaak laag. Bij voorbeeld lasrobotarmen zijn belastbaar van 3 tot 150 kg. Een variant op de robotarm is een portaalrobotsysteem.

De industriële robots staan vast opgesteld in een geconditioneerde ruimte. De belangrijkste reden voor robotisering in de industrie is de verhoging van de produktiviteit en een constante kwaliteit (= minimale uitval of afkeur). De industriële robots worden vaak ingezet bij

produktiebedrijven die met een meerploegensysteem werken. Een hoog aantal gebruiksuren per dag rechtvaardigt de investering voor een robot.

In Nederland zijn geen echte robotbouwers. Vroeger hielden mechanisatie bedrijven zich hier wel mee bezig. Nu zijn het met name elektronica- of automatiseringsbedrijven die zich met robotica bezighouden. De mechanische uitvoering is vaak geen probleem. De opbouw van de intelligentie is belangrijk.

De meeste Nederlandse leveranciers van industriële robots leveren van oorsprong lasapparatuur. Zij vertegenwoordigen robotsystemen van grote fabrikanten (b.v. ABB, Panasonic, Cloos). Een andere groep robotleveranciers zijn middelgrote tot kleine bedrijven die hun oorsprong hebben in de bedrijfsautomatisering van bij voorbeeld verpakkingslijnen en intern transport. Daarnaast opereren er kleine bureaus voor onafhankelijke adviezen en het opzetten van turn-key projecten. Allen maken gebruik van min of meer standaard hardware componenten en ontwikkelen zelf of met behulp van derden de software.

#### 2.4.1 *Toepassen van industriële robots bij ondergronds bouwen*

Om een industriële robot geschikt te maken voor inzet in de bouw moeten de volgende aspecten worden aangepast:

- mobiel maken. Om dit te realiseren is op zich al een robot nodig (aandrijving, plaatsbepaling, stabiliteit en voeding). Alternatief: het systeem in een verplaatsbare kooi bouwen en deze met behulp van een tractor of kraan verplaatsen;
- lichter maken (vanwege de vaste opstelling van een industriële robot is het eigen gewicht relatief hoog);
- afhankelijk van de uiteindelijke toepassing, krachtiger maken.

Fabrikanten van industriële robots zijn vooralsnog niet geïnteresseerd in het ontwikkelen van een enkele bouwrobot. Bij voorbeeld ABB is alleen geïnteresseerd in ontwikkeling van een bouwrobot als het om levering van grote series (> 1000) gaat. ABB verwijst voor kleine series of enkel stuks naar Kranendonk in Tiel. ABB heeft hier een samenwerkingsovereenkomst mee. Kranendonk verkoopt 50 à 60 systemen per jaar. Het zijn veel las- en lijmrobotopstellingen. Het enige project dat enigszins met de bouw te maken heeft, is een robotsysteem bij een steenfabriek voor het stapelen van straatstenen op een pallet ten behoeve van het machinaal bestraten. De stenen worden nu nog met de hand gestapeld.

De eigenlijke robotiekennis zit bij de subsysteem-leveranciers. Als er een robotsysteem moet worden ontwikkeld, moet het samenspel van verschillende leveranciers worden geëördineerd.

#### 2.4.2 *Transport*

Voorbeelden van robotsystemen bij distributie en opslag zijn:

- volledig geautomatiseerd magazijn met onbemand intern transportsysteem voorzien van stapelaar;
- containeroverslag ECT: onbemand buiten transport.

In beide gevallen betreft het AGV's, Automatisch Geleide Voertuigen. Deze trend wordt nu doorgezet naar het openbaar vervoer (de zogenoemde "people movers"). Bij voorbeeld vorig

jaar is er een voorstel gedaan voor de bouw van een lijn met automatisch bestuurd voertuigen voor personenvervoer in Capelle aan de IJssel.

Gezien de gewenste mobiliteit zou een AGV kunnen worden toegepast, echter de commercieel verkrijgbare AGV's vereisen een "schone vlakke (fabrieks)vloer" en een markerings-systeem in de omgeving voor zijn positiebepaling, hetgeen op de bouwplaats voor problemen kan zorgen.

## 2.5 Conclusies

De belangrijkste conclusies uit de literatuurstudie zijn:

- In Japan zijn relatief veel ontwikkelingen voor automatisering van (deel)taken in het ondergronds bouwen.
- Het grootste deel van de Japanse robotontwikkelingen is gerelateerd aan de inzet van tunnelboormachines.
- Veel Japanse ontwikkelingen zijn erop gericht om de inzet van mensen voor ondergronds werk te verminderen.
- Wereldwijd zijn er ontwikkelingen voor automatisering van graafwerkzaamheden.
- Er is een schril contrast tussen wat er tot nu toe aan verschillende bouwrobots is ontwikkeld en wat er op de markt verkrijgbaar is.
- Het blijkt dat voor het ontwikkelen van een robotsysteem het beste een samenwerkingsverband kan worden opgezet van leveranciers, aannemers, opdrachtgevers en kenniscentra.
- De inzet van commercieel verkrijgbare industriële robots in de bouw wordt bemoeilijkt doordat deze robots niet zijn ontworpen voor de omstandigheden in de bouw. Industriële robots zijn zwaar, niet gemakkelijk mobiel te maken en beperkt in kracht. Na ingrijpende aanpassingen zijn de industriële robots te gebruiken voor (ondergrondse) bouwactiviteiten.
- Commercieel beschikbare Automated Guided Vehicles kunnen zonder aanpassing niet of moeilijk worden ingezet in de bouw gezien de omstandigheden op de bouwplaats. Gezien de grote transportstromen lijkt de automatisering van materiaaltransport kansrijk.
- Remote Operated underwater Vehicles (ROV's), die in de offshore industrie succesvol worden toegepast, kunnen ook in (onder water staande) bouwputten worden toegepast.
- Nieuwe technieken om de grond te verkennen, zoals Ground Penetrating Radar (GPR), zijn volop in ontwikkeling en hebben een hoog potentieel als sensorsysteem voor verdere automatisering van grondverzet en TBM-besturing.

## HOOFDSTUK 3

### INTERVIEWS EN SUGGESTIES

#### 3.1 Gevolgde werkwijze

Om, met betrekking tot het robotiseren bij ondergronds bouwen, een indicatie te krijgen van wat de vraag uit de markt is, is een aantal interviews gehouden met mensen die op bouwplaatsen hebben gewerkt of nog werken. Dit is aangevuld met een gesprek met iemand van de materieelverhuur. Van elk interview is een samenvatting in bijlage B opgenomen.

De volgende bouwmethoden zijn in beschouwing genomen:

- afzinktunnels;
- boortunnels;
- perstunnels;
- tunnels gebouwd in open bouwput;
- tunnels gebouwd volgens wand- en dakmethode;
- pneumatisch afgezonken caissons.

Bij elk interview is gebruik gemaakt van een vooraf opgestelde uniforme leidraad:

#### ALGEMENE AGENDA:

UITLEG ONDERZOEK	door interviewer
UITLEG PROCES	door geïnterviewde
BRAINSTORMING	aan de hand van relevante datasheets (wat bestaat er aan automatisering) en eventuele suggesties om te automatiseren
VRAGEN	met betrekking tot ARBO, ECONOMIE en KWALITEIT

#### PROCES

- voorbereiding;
- opstarten;
- toe- en afvoer van materialen;
- maatvoering;
- besturing;
- registratie;
- stoppen;
- ontmantelen.

#### OVERIGE VOORZIENINGEN

- grondwaterbeheersing;
- vluchtwegen;
- speciale hulpconstructies (startkuip, kerende wand en dergelijke);
- speciale permanente constructies (trappenhuis, station en dergelijke).

## VRAGEN

- met betrekking tot ARBO:
  - wat is vervelend om te doen (smerig, zwaar)?
  - wat is onveilig/gevaarlijk werk?
  - wat is milieutechnisch moeilijk (voorkomen van vervuiling)?
- met betrekking tot ARBO + ECONOMIE:
  - welke handeling komt vaak voor (eentonigheid, hoge herhalingsgraad)?
- met betrekking tot ECONOMIE:
  - waar zou mogelijk (met behulp van een apparaat) op menskracht kunnen worden bespaard?
  - wat zijn de belemmeringen om simultaan te werken?
  - wat zijn de beperkingen om "werk met werk" te maken?
  - wat zijn de wensen om het proces te vereenvoudigen?
- met betrekking tot KWALITEIT:
  - maatvoering: in een keer goed, niet nameten/nastellen, niet afwerken?
  - kans op fouten bij routineklussen?
  - verkleining van de tolerantie: minder aanpassingen (op-/uitvullen, afwerken) op het werk?

### 3.2 Suggesties vanuit de markt

Tijdens de interviews zijn de volgende suggesties voor robotisering gedaan:

#### 1. Transport

Opvallend was dat bij verschillende interviews het transport op de bouwplaats naar voren werd gebracht als onderwerp waar verbetering direct geld en tijdwinst zal opleveren. Er waren echter geen directe suggesties hoe dit met automatisering zou moeten worden verwezenlijkt.

#### 2. Beheersen van betonkwaliteit

Beheersen van de betonkwaliteit vanaf de betonfabriek tot het uitharden in de bekisting. Met betrekking tot het transport gebeurt het weleens dat, nadat een betonmixer op het werk aankomt, de vereiste zetmaat niet wordt gehaald. De mixer wordt dan teruggestuurd. Met betrekking tot het betonstorten gebeurt het weleens dat niet voldoende of teveel wordt verdicht. Dit is pas duidelijk na het maken van kernboringen. Dus meer meetsensoren ter controle van de betonkwaliteit tijdens het transport en het storten. Bij voorbeeld een "slimme trilnaad" geeft signaal bij te lang of te kort trillen (beton is ontmengd/is niet goed verdicht).

#### 3. Industrieel bouwen van tunnelelementen

Door tunnelelementen voor een afzinktunnel industrieel te bouwen kan voor dezelfde kosten sneller worden gebouwd. Om industrieel te kunnen bouwen, moet een aantal traditionele details en principes worden gewijzigd. Het is echter al vaker gebleken dat de opdrachtgever en/of zijn consultant onoverkomelijke problemen heeft met nieuwe uitvoeringsmethoden, ook al is het risico voor de aannemer.

#### *Opmerking:*

Het industrieel bouwen van een tunnel in een open bouwput is mogelijk te industrialiseren als een nieuwe bouwmethode wordt gebruikt.

4. Sloopwerk en betonboorwerk  
Iedereen is het er over eens dat ondergronds sloopwerk en betonboorwerk slecht scoort op het gebied van arbeidsomstandigheden. Zolang er echter nog genoeg onderaannemers (= voldoende concurrentie) zijn die het willen doen, is er geen belangstelling voor verandering.
5. Automatisch bekleden van een tunnel  
De fietstunnel van de nieuwe Heinenoordtunnel moet sociaal-vriendelijk worden bekleed. Dit moet gebeuren met behulp van 1.2 m brede panelen. De tunnel zelf verloopt niet helemaal strak langs het alignement. De bekleding moet dat wel zijn. Daarom moet er een stelbaarheid zijn tussen de panelen en de tunnelwand. In verband met de vele herhalingen van dezelfde handelingen is dit een mogelijkheid voor automatisering.
6. Automatiseren van afbouwwerkzaamheden  
Afbouwwerkzaamheden, zoals het plaatsen van kabelgoottegels ter completering van het voetpad in de (spoor)tunnel of het bevestigen van leuningwerk langs het voetpad aan de tunnelwand. Eventueel door middel van lijmen in plaats van het toepassen van boutverbindingen. In verband met de zeer vele herhalingen (saai werk) en het lineaire patroon ligt hier een goede automatiseringskans.
7. Automatische besturing van onbemande CBC-boorkop  
Voor de kleine buisdiameter is er een automatiseringsmarkt. Nu wordt veelal de "directional drilling-methode" toegepast, omdat met de onbemande TBM voor de kleine pers-tunneldiameter geen grote lengten kunnen worden gemaakt (probleem: smering) en de geringe sturingsmogelijkheden (correctie en/of moeilijke bochten maken). De directional drilling-methode heeft echter ook een aantal nadelen ten opzichte van de perstunnel. Daarom is het lonend om het onbemand boren te verbeteren.
8. Robotisering van het in-situ wapenen  
Het vlechten van wapening is van Arbo-standpunt uit gezien zeer slecht werk.
9. Automatisch ontgraven in een afgesloten ruimte  
Bij het pneumatisch afzinken van caissons en mogelijk bij de wand- en dakmethode wordt ontgraven in een afgesloten ruimte onder verhoogde luchtdruk. Hierbij kan nat worden ontgraven, zoals gebruikelijk bij de caissonmethode (waterkanonnen en wegpompen van grondmengsel), of droog worden ontgraven zoals bij de wand- en dakmethode (elektrische graafmachines, grondafvoer via luchtsluis).  
In beide gevallen werken er mensen in een afgesloten ruimte onder luchtdruk. Afgezien van de luchtdruk is ook het risico van luchtlekkage van belang, waardoor het grondwater omhoog komt. Verder zijn er de risico's van elektrische apparaten en hoge vochtigheid en het risico van ontsnappende gassen uit de grond. Een op afstand bestuurbare (eventueel automatisch) graaf- of baggerrobot zou een oplossing kunnen zijn.
10. Schoonmaken van bouwkuipen  
Om een goede hechting te krijgen van het onderwaterbeton aan de damwand en/of trekpalen, moeten deze goed gereinigd zijn. Nu gebeurt dit met behulp van een spuitlans bevestigd aan een kraan, of een lans bedient door een duiker.

Naast de suggesties werden er in verschillende interviews de volgende adviezen gegeven. Ze liggen weliswaar voor de hand, maar zijn toch zeker van belang om er aandacht aan te geven:

- Relatief eenvoudige automatisering wordt ervaren als een grote organisatorische inspanning en vraagt om automatisering in kleine stapjes.
- Een robot moet worden ontwikkeld in overleg met alle partijen die, in welke fase ook, met dit proces te maken hebben. Dit bevordert de compleetheid en vergemakkelijkt de implementatie.
- Niet geïsoleerd automatiseren, maar integraal in het gehele proces. Het ontwerp en de uitvoering moeten worden aangepast aan de automatisering.
- Het doel moet niet zozeer zijn het besparen op mensen maar het verlichten van het werk, zodat een hogere produktiviteit/efficiency, dus tijdwinst, kan worden bereikt.
- Beschouw ook de indirecte voordelen van automatisering in bij voorbeeld planning en begroting

### **3.3 Terugkoppeling met literatuurstudie**

#### **1. Transport**

In datasheet 17 (zie bijlage A) wordt een automatisch transportsysteem getoond.

#### **2. Beheersen van betonkwaliteit**

Zelfverdichtende beton kan worden toegepast in plaats van een geavanceerde trilnaald te ontwikkelen.

#### **3. Industrieel bouwen van tunnelementen**

Opvallend is dat de Oresundtunnel op industriële wijze gebouwd gaat worden (korte volle doorsnede moten, na koppelen tot afzinkelmentlengte, te water laten). Industrieel bouwen betekent eigenlijk een (geautomatiseerde) prefab betonwarenfabriek.

#### **4. Sloopwerk en betonboorwerk**

Ten behoeve van sloopwerk is een op afstand bestuurbare manipulator ontwikkeld door Holmhed systems uit Zweden: de Brokk 80. Volgens de fabrikant zijn er meer dan 1000 stuks verkocht. De sloopbedrijven blijven echter veelal werken met minigravers voorzien van sloopgereedschap, omdat dit goedkoper is.

#### **5. Automatisch bekleden van een tunnel**

In het verleden zijn hiervoor hulpmiddelen ontwikkeld. Onder andere manipulatoren om gevelelementen en kolombekleding te plaatsen. Voor het plaatsen van sandwichpanelen wordt een stelframe met zuignappen gebruikt, bevestigd op een vorkheftruck. Ideeën en technieken, zoals gebruikt bij metselmanipulatoren, zou verder kunnen worden uitgewerkt ten behoeve van het bekleden van tunnels (zie bijlage C).

#### **6. Automatiseren van afbouwwerkzaamheden**

Bij het plaatsen van New Jersey profielen en betonplaten in de Schipholverkeerstunnel is gebruikt gemaakt van opzetframes op een shovel. Evenals bij 5. wordt voor verdere uitwerking verwezen naar bijlage C.

7. Automatische besturing van onbemande CBC-boorkop  
Er zijn op dit gebied ontwikkelingen gaande. Veelal worden ze uitgevoerd door of in samenwerking met TBM-fabrikanten. Zie ook het artikel "Dresden No Dig event highlights progress" in Tunnels and Tunnelling (november 1995).
8. Robotisering van het in-situ wapenen  
Er bestaan al wapeningautomaten voor korven. Deze staan echter opgesteld in een fabriek. Deze automaten zijn te vinden bij fabrikanten van grote betonbuizen en slingerpalen. Ook bij de fabricage van "weight coated pipes" (N-coat) wordt gebruikt gemaakt van een wapeninglasautomaat. Een verdere ontwikkeling is te vinden bij Altro Steel in België, die 3D-prefab wapening levert.  
De normale wapeningscentrale of het vlechtbedrijf is doorgaans te kleinschalig voor dergelijke projecten.
9. Automatisch ontgraven in een afgesloten ruimte  
Ten behoeve van het onderhoudsbaggeren van een koelwaterinlaatkanaal van de nieuwe Eemscentrale, is in het najaar van 1995 een zogenoemde baggershuttle ontwikkeld. Deze voorkomt, volledig automatisch, het verzanden van het inlaatkanaal. De robot meet elke dag de diepte over het kanaal en zuigt het teveel weg. De baggershuttle is ontworpen en gebouwd door baggerbedrijf Van den Herik uit Sliedrecht. Een dergelijk apparaat zou ook kunnen worden ingezet bij het nat ontgraven in een afgesloten ruimte (zie ook data-sheet 20 in bijlage A).  
Met betrekking tot het droog ontgraven houdt Liebherr zich bezig met graafmachines in beperkte ruimte.
10. Schoonmaken van bouwkuipen  
Behalve de waterjetsystemen en borsteltechniek zijn hier geen kant en klare oplossingen voor.

### 3.4 Conclusies

- Het automatiseren van bouwactiviteiten, zoals deze nu zijn georganiseerd, ligt niet voor de hand. Het werk wordt in stukjes uitgevoerd door verschillende onderaannemers. Om te kunnen automatiseren moet de hoofdaannemer zelf het werk weer gaan doen. De praktische kennis ligt echter vaak bij de onderaannemer. Daarom is een samenwerkingsverband nodig om te kunnen automatiseren.
- Onderzoek naar verdere autotomatisering van TBM's laten verrichten door TBM-fabrikanten in samenspraak met de gebruikers.
- Om een automatisering geaccepteerd te krijgen is een zorgvuldige introductie nodig. Belangrijk is de organisatie, scholing en begeleiding er omheen.
- De suggesties voor robotiseren vanuit de uitvoering hebben als voornaamste drijfveer dat het goedkoper moet dan dat het nu gebeurt. Soms is het zo dat voor een bepaald probleem al wel een oplossing bestaat, maar dat dit toch nog te duur wordt gevonden.
- Om automatisering succesvol te laten zijn, moet het ontwerp en de uitvoering aangepast zijn aan de veranderde werkmethode. Dit leidt in de praktijk tot industriële details.



## HOOFDSTUK 4

### EVALUATIE EN AANBEVELINGEN

#### 4.1 Hedendaagse robotisering in het ondergronds bouwen

Er zijn twee sectoren waar de automatisering in het bouwen, vaak in de vorm van hoogwaardige robotisering, duidelijk zichtbaar is doorgebroken. Dat is in de werktuigen die door machinefabrikanten voor het ondergronds bouwen worden gefabriceerd, zoals tunnelboormachines en graafwerktuigen, en voor grootschalige bouwexperimenten in Japan. Dat laatste betreft onder andere het bouwen van gehele gebouwen met verschillende verdiepingen, waarbij naast eerder gerobotiseerd beproefde bouwactiviteiten, zoals vloerafwerking, brandwerende lagen spuiten en tegels zetten, ook de gehele logistiek van de bouwmaterialopslag, aanvoer en afvoer automatisch werd geregeld.

De met deze robotisering beoogde functionaliteit richtte zich aanvankelijk op de arbeidsomstandigheden, zoals het beperken van werk in stofrijke, vuile, lawaaierige en anderszins onaantrekkelijke omgeving. Met de verworvenheden van de voor de bouw noodzakelijke technische karakteristieken voor robots, zoals robuustheid, mobiliteit, compactheid, multifunctionaliteit en typisch op de bouw gerichte sensortechnologie, werden ook andere doelstellingen haalbaar.

Dat waren niet alleen het vervangen van eentonig en saai werk, maar ook het vervangen van taken van schaars te verkrijgen arbeid. Daarmee en met de uitbreiding van de functionaliteit van de geautomatiseerde systemen werd een toename van de produktiviteit en van de kwaliteit beoogd en in veel gevallen gehaald. Die kwaliteit uit zich niet alleen in het automatisch en nauwkeuriger uitvoeren van bepaalde taken, maar ook in het relevant registreren van de zodanig uitgevoerde processen ter ondersteuning van de expliciete kwaliteitsborging.

Afgezien van de ontwikkelingen in de materieelsfeer en in geautomatiseerde fabrieken is het wel duidelijk dat experimenten als in de kantorenbouw in Japan een overwegend experimenteel en dus leerzaam doel hebben. Dat doel heeft met name betrekking op het verkrijgen van inzicht in de gehele logistiek van het bouwproces en de fysieke en economische grenzen van de automatisering daarin.

Ten aanzien van een aanpak binnen het Nederlandse ondergronds bouwen valt hiervan te leren dat er zeker ruimte is voor een verdere, een soort tweede orde, automatisering van geavanceerde tunnelboormachines en graafwerktuigen in samenwerking met de materieelproducenten. Wel moeten daarbinnen duidelijk de doelstelling van de verdere stappen worden geformuleerd en gekwantificeerd om te voorkomen dat onzinnige projecten worden opgezet. Er valt daarbij te denken aan automatisering die zich speciaal richt op Nederlandse bodemcondities en Nederlandse milieu-aspecten. In zijn algemeenheid moet bovendien belangstelling voor automatische registratie van procesgegevens, waar die als optie bij op de markt aangeboden materieel leverbaar is, worden geëntameerd.

#### 4.2 Verdere mogelijkheden binnen het ondergronds bouwen in Nederland

De bouw is in het algemeen sceptisch ten aanzien van robotisering. Dat is niet verwonderlijk. De experimenten en bejubelde successen komen uit het verre Japan of richten zich op kant en klare machines die kunnen worden gekocht als de prijs-kwaliteitsverhouding de aanschaf zichtbaar lucratief maakt. Men heeft er dus eigenlijk weinig mee te maken.

De doorbraak, waarbij robotisering direct een gunstige invloed kan hebben op kwaliteit en produktiviteit, betekent vaak dat men zich moet losmaken van conventionele deelprocessen en produkten, die maar al te vaak door traditionele segmentatie in de bouw zijn verankerd.

Een voorbeeld van dat laatste is bij voorbeeld de fabriek "Altro-Steel" in het Belgische Houthalen, waar driedimensionale wapeningskorven geheel automatisch worden gefabriceerd. De consequentie van deze produktie is dat de fabriek het grootste deel van het ontwerp van de wapeningskorf overneemt van de constructeur en bovendien tijdens de montage van de wapening planmatig en logistiek ingrijpender dan normaal het proces van de hoofdaannemer beïnvloedt. Zijn onderaanneming wordt als het ware van een hogere orde. Een gunstig effect kan slechts ontstaan na intensieve samenwerking tussen constructeur en hoofdaannemer.

Uit deze beschouwing valt primair af te leiden dat robotiseringsexperimenten in hoge mate de functionaliteit van de toegevoegde waarde moeten demonstreren.

De uit de markt opgevangen vragen naar verdere automatisering hebben zich voornamelijk op smalle deelprocessen gericht, die afzonderlijk behandeld wellicht weinig perspectief bieden voor grootschalig onderzoek en ontwikkeling. In combinatie met andere aanpalende processen echter is er wellicht meer perspectief.

Binnen de categorie beperkte deelprocessen vallen enkele betontechnologische zaken, zoals het aanbrengen van extrusiebeton, het automatisch verdichten van beton en het automatisch spuiten van beton. Met het op zich interessante extrusiebeton vindt elders onderzoek en ontwikkeling plaats, waaruit vooralsnog procesmatig een hoge kwetsbaarheid volgt. Automatisch verdichten van beton is wellicht onnodig tegen de achtergrond van het ook in Nederland in ontwikkeling zijnde zelfverdichtende beton. Automatisch spuiten van beton ten slotte is een in Japan beproefde techniek, die eisen stelt aan materieel, betonsamenstelling en produktspecificatie. Het is zeer wel mogelijk deze technieken te integreren in de produktie van nieuwe vormen van ondergronds bouwen, zoals het afwerken van permanente diepwanden zonder extra afwerking en voor de toepassing van schaalconstructies in het ondergronds bouwen.

Een ander complex aan handelingen, dat veelvuldig het ondergronds bouwen in Nederland beheerst, vormt het detecteren, verwijderen, afvoeren en verwerken van slib. Bij werkzaamheden onder water, zoals het storten van onderwaterbeton en het met zand onderspoelen of onderstromen van afzinktunnelfunderingen, komt het verwerken van slib veelvuldig als onbevredigd opgelost probleem voor. De ontwikkeling van automatische slibdetectie, verwijdering en verdere verwerking zou kwalitatieve en economische besparingen in een ruim gebied van het traditionele natte ondergronds bouwen in Nederland kunnen opleveren, die wellicht met automatisering kunnen worden bereikt.

De problemen die zich voordoen bij het afzinken van luchtdrukcaissons werden bij de interviews expliciet genoemd. Een integrale benadering is daarbij echter op zijn plaats. De ongewenstheid van het werken onder luchtdruk in verband met de gezondheidsrisico's en de gevaren, de lage produktiviteit van het werken onder luchtdruk en de hoge kosten van de luchtdrukinstallatie met de erbij behorende back-up voorzieningen beperken het toepassingsgebied van de methode. Bovendien valt de beheersing van het afzinkproces in de praktijk tegen, waardoor het caisson zelf op sterkte-overwegingen wordt overgedimensioneerd. Een geautomatiseerd systeem van ontgraven, drukregeling met sturing van de verticale beweging, zou het luchtdrukcaisson een veel ruimere plaats in het ondergronds bouwen kunnen geven.

Naast deze specifieke gebieden, waarin automatisering bepaalde vormen van ondergronds bouwen zou kunnen verbeteren, vormen naar analogie van andere bedrijfstakken transport en beheersing van werktuigen interessante automatiseringsopties.

Beperkte ruimte voor buffervoorraden in stedelijke gebieden alsmede het voorkomen van verkeershinder biedt interessante automatiseringsobjecten met duidelijk projectgebonden oplossingen. Experimenten kunnen dan ook op projectniveau worden aangebonden. Evaluatie binnen een centraal op te stellen methodiek lijkt overigens wel zinvol.

Evenzo zou automatische centrale registratie van prestaties, status en locatie van materieel ten behoeve van voortgangscontrole en onderhoud een zinvol projectgebonden object voor automatisering kunnen vormen. Afstemming tussen aannemer, opdrachtgever en materieelproducent is een noodzakelijke voorwaarde voor de effectiviteit van een dergelijk systeem.

#### **4.3 Enige randvoorwaarden voor automatisering binnen het ondergronds bouwen in Nederland**

Gezien de veelheid aan mogelijkheden en de grote onbekendheid met het domein, zowel bij management als uitvoerenden, is het van groot belang dat de vraag naar het "kans maken" van opties en de wijze waarop die moeten worden getoetst, afdoende wordt beantwoord.

Kanshebbende robotiseringsprojecten moeten tegen realistische kosten een snel realiseerbaar antwoord kunnen geven op rentabiliteits- en nuttigheidsvragen ten aanzien van verbetering van arbeidsomstandigheden, aantoonbare en aannemelijke efficiency, effectiviteitsverbetering en kwaliteitsverbetering.

Specifiek Nederlandse ontwikkelingen kunnen voor specifiek Nederlandse bodemomstandigheden gelden.

Bij grotere projecten, waarbij robotisering de integratie inhoudt van verschillende deelprodukten, deelprocessen en dientengevolge van het werk van verschillende participanten bij de bouw, neemt de verwachting ten aanzien van de effectiviteit van het automatiseringsproject toe. De kosten en de inspanningen om een dergelijk project tot een bevredigend resultaat te brengen zijn groot. Omzetgarantie ten aanzien van de continuïteit bij het gebruik van een dergelijke investering is daarom een randvoorwaarde. Daarnaast moet worden bewaakt dat de ontwikkeling van de deelsystemen geen onbekende technologie inhoudt. Ook moet vanaf het begin rekening worden gehouden met implementatie-aspecten, zoals organisatie van inbreng van stuurgegevens, afstemming op aansluitende deelprocessen, scholing en motivatie

van betrokkenen en begeleiding van het gehele project. In Nederland zou een bepaald tracé in de open bouwputmethode voor de HSL of de Betuwelijn voor een dergelijk experiment in aanmerking kunnen komen.

#### 4.4 Samenvatting van de aanbevelingen

Er is in het Nederlandse ondergronds bouwen ruimte voor een verdere, een soort tweede orde, automatisering van geavanceerde tunnelboormachines en graafwerktuigen in samenwerking met de materieelproducenten. Wel moeten daarbinnen duidelijk de doelstelling van de verdere stappen worden geformuleerd en gekwantificeerd om te voorkomen dat onzinnige projecten worden opgezet.

Automatisering die zich speciaal richt op Nederlandse bodemcondities en Nederlandse milieu-aspecten is daarbij interessant.

Belangstelling voor automatische registratie van procesgegevens, waar die als optie op de markt wordt aangeboden, vormt een interessant aandachtspunt.

Robotiseringsexperimenten moeten in eerste instantie in hoge mate de functionaliteit van de toegevoegde waarde demonstreren.

Automatisch spuiten van beton in samenhang met de ontwikkeling van materieel, betonsamenstelling en produktspecificatie is zeer wel een mogelijk te integreren techniek in de productie van nieuwe vormen van ondergronds bouwen, zoals het afwerken van permanente diepwanden zonder extra afwerking en voor de toepassing van schaalconstructies in het ondergronds bouwen.

De ontwikkeling van automatische slijddetectie, verwijdering en verdere verwerking zou kwalitatieve en economische besparingen in een ruim gebied van het traditionele natte ondergronds bouwen in Nederland kunnen opleveren.

Een geautomatiseerd systeem van ontgraven, drukregeling met sturing van de verticale beweging, zou het luchtdrukcaisson een veel ruimere plaats in het ondergronds bouwen kunnen geven.

Beheersing van buffervoorraden in stedelijke gebieden alsmede het voorkomen van verkeershinder biedt interessante automatiseringsobjecten met duidelijk projectgebonden oplossingen. Experimenten op projectniveau met evaluatie binnen een centraal op te stellen methodiek lijkt zinvol.

Automatische centrale registratie van prestaties, status en locatie van materieel ten behoeve van voortgangscontrole en onderhoud lijkt een zinvol projectgebonden object voor automatisering.

Voor een integraal robotiseringsexperiment zou een substantieel tunnelproject in de wand- en dakmethode in aanmerking kunnen komen, mits daarbij continuïteit, integrale aanpak, bekende technologieën voor deelsystemen en implementatie-overwegingen vanaf het begin in de voorbereiding worden meegenomen.

**BIJLAGE A**  
**DATASHEETS**

**PRODUKT**

Naam	O-SERO
Functionele omschrijving	segment assembly robot
Ontwikkelaar	Obahyashi Co., Mitsubishi Heavy Ind.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker + leverancier
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	1991 - 1992

**TOEPASSING**

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	pick & place van liningelementen, plaatsen en aandraaien van bout/moerverbinding

**Voordelen:**

- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in tunnel- omgeving, beperken van gevaarlijke omstandig- heden
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	bij TMB's
Ideeën voor uitbreiding	-

**UITVOERING**

Afmetingen (l x b x h)	circa 10 x 6 x 7 m
Massa	circa 70 ton
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	bevestigd aan TBM
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	JIRA, blz. 154, ISARC X, blz. 535
Notulist	R. Krom

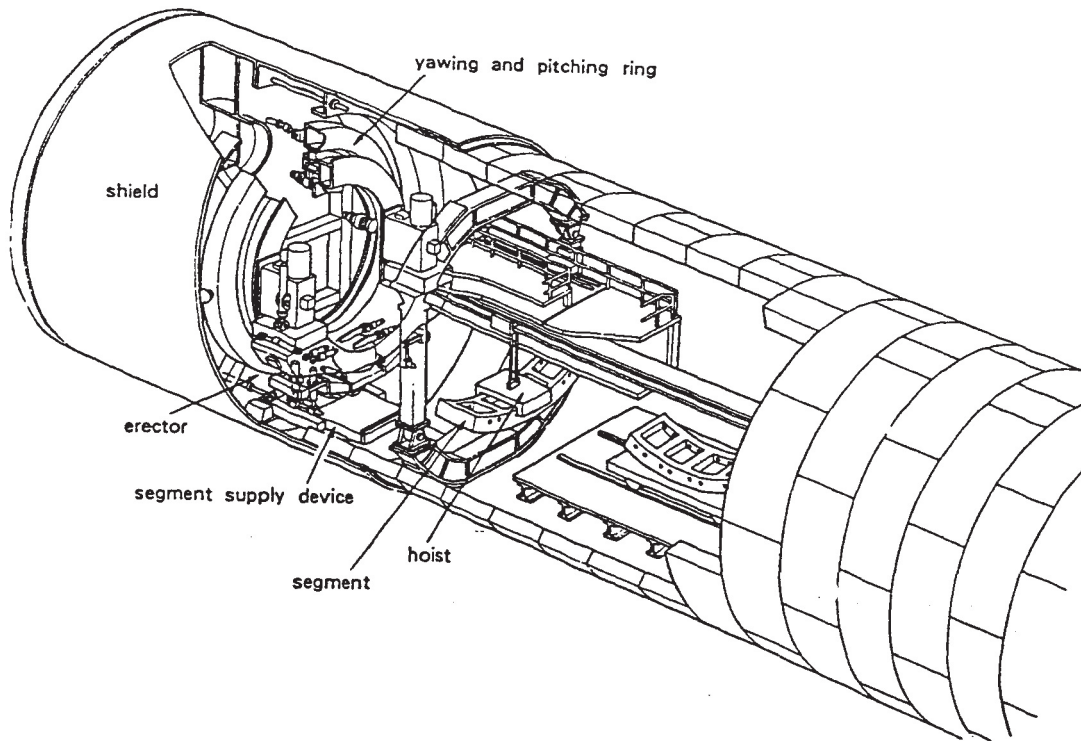


Fig. A1. Plaatsen en onderling verbinden van liningelementen bij TBM.

PRODUKT

Naam	Segment erector
Functionele omschrijving	segment assembly robot
Ontwikkelaar	IHI (Japan)
Classificatie ontwikkelaar	leverancier, R & D organisatie
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	1988

TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	pick & place van liningelementen, plaatsen en aandraaien van bout/moerverbinding

Voordelen:

- economisch voordeel	besparing op arbeidskracht
- arbeidsomstandigheden	-
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	alleen bij TBM's
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	ten behoeve van 7,75 (m) diameter tunnel
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	op slee
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	220 V
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

er zijn later verschillende ontwikkeld

**Bron**

Bron	Tunnels and Tunnelling, July 1990, p. 54-55
Notulist	H.J. Berkhoff



## Datasheet Bouwrobots

1c

### PRODUKT

Naam	Automated Intelligent System for Segment Erection
Functionele omschrijving	segment assembly robot
Ontwikkelaar	Hazama Co., Hitachi Construction Machinery
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker + leverancier
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	-

### TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	pick & place van tunnellingelementen, plaatsen en aandraaien van bout/moerverbinding

### Voordelen:

- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in tunnelomgeving, beperken van gevaarlijke omstandigheden
- kwaliteit	nauwkeuriger cirkelvorm van tunnel
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	-
Ideeën voor uitbreiding	-

### UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	circa 40 ton
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	gemonteerd aan TBM
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	-
Toekomstperspectief	-

### Opmerkingen

#### Bron

Bron	JIRA, blz. 146
Notulist	R. Krom

PRODUKT

Naam	Segment erector (II)
Functionele omschrijving	plaatst tunnelsegmenten en monteert ze
Ontwikkelaar	Hitachi (Japan)
Classificatie ontwikkelaar	leverancier
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	1995

TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	pick & place van liningelementen, bouten plaatsen en vastdraaien

Voordelen:

- economisch voordeel	bespaart menskracht, werkt sneller
- arbeidsomstandigheden	veiligheid
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	in TMB's
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	gemonteerd aan TBM
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	220 V
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

hydraulische cilinders  
7 vrijheidsgraden, gap sensor (ultrasonisch)  
visual sensor, grafische display voor montage monitoring

**Bron**

Bron	Microcomputers in civil engineering, 1995, Vol. 10, p. 325-337
Notulist	H.J. Berkhoff

PRODUKT

Naam	Automatic Segment Assembly Robot
Functionele omschrijving	segment assembly robot
Ontwikkelaar	Kumagai Gumi Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	pick & place van liningelementen
Voordelen:	
- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in tunnel-omgeving, beperken van gevaarlijke omstandigheden in verband met manipulatie van segmenten
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	bij TMB's
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	circa 55 ton
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	gemonteerd aan TBM
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	JIRA, blz. 148
Notulist	R. Krom
Volgnummer	2

**PRODUKT**

Naam	OMNI HAND-500
Functionele omschrijving	bolt tightning robot for shield tunnel segment assembly
Ontwikkelaar	Obahyashi Co. (J), Hitachi Zosen Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker + leverancier
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	-

**TOEPASSING**

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	automatisch aanbrengen van bout/moerverbindingen tussen liningelementen

**Voordelen:**

- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in "onvriendelijke" omstandigheden (in tunnel, op stelling in tunnel)
- kwaliteit	alle bouten zijn op het juiste moment aangedraaid bij TMB's
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	
Ideeën voor uitbreiding	-

**UITVOERING**

Afmetingen (l x b x h)	circa 5 x 9 x 8 m
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	bevestigd aan TBM
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	-

**Opmerkingen**

	-
--	---

**Bron**

Bron	JIRA 1994, blz. 156
Notulist	R. Krom

**PRODUKT**

Naam	KTB 200S
Functionele omschrijving	automatic control system for TBM's
Ontwikkelaar	Obahyashi Co., Kawasaki Heavy Industries
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker, leverancier
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	-

**TOEPASSING**

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	automatische besturing van TBM
Voordelen:	
- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten voor besturing
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in tunnel-omgeving
- kwaliteit	geoptimaliseerde besturing van de machine, "zuiverder" tunnel
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	besturing van TBM's
Ideeën voor uitbreiding	-

**UITVOERING**

Afmetingen (l x b x h)	niet van toepassing
Massa	niet van toepassing
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	niet van toepassing
Besturing	sensorisch besturingssysteem voor de sturing van de voortstuwing en richting van TBM (maakt gebruik van neurale netwerk en fuzzy logic)
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	JIRA, blz. 142
Notulist	R. Krom

PRODUKT

Naam	TMB-2.5-RC-610
Functionele omschrijving	automatisch transportvoertuig voor tunnelseg- menten
Ontwikkelaar	Obahyashi Co., Tomoe Electrical Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker, leverancier
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels, andere ondergrondse bouwme- thoden
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	automatisch transport van liningelementen
Voordelen:	
- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in tunnel- omgeving
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	transport van segmenten naar TBM
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 8 x 2 x 1 m
Massa	circa 2000 kg
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	wielen
Besturing	geprogrammeerd of op afstand bestuurd (manipu- lator)
Energievoorziening	elektrisch, 24 V accu's
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	JIRA, blz. 152
Notulist	R. Krom

PRODUKT

Naam	Slurry Pipe Laying Robot
Functionele omschrijving	automatische verlenging van pijpleidingen voor aan- en afvoer van slurry
Ontwikkelaar	Shimizu Co., Kumagai Gumi co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	loskoppelen van pijpen, installeren van verlengstuk van de buis, koppelen van buizen

Voordelen:

- economisch voordeel	verkorting van de boortijd door snellere verlenging van aan- en afvoerbuizen.
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in "onvriendelijke" omstandigheden (in tunnel)
- kwaliteit	niet van toepassing
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	bij TMB's
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 7 x 2 x 2 m
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	rails
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	nog in ontwikkeling; de plannen zijn: verdere tests

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	ISARC IX, blz. 693, 701; JIRA, blz. 180
Notulist	R. Krom

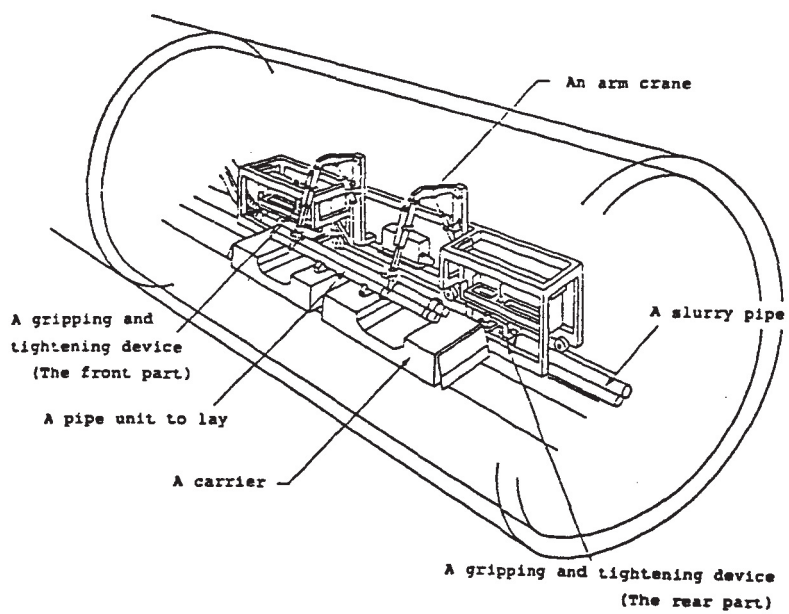


Fig. A2. Automatische verlenging van slurripijpen voor TBM.



PRODUKT

Naam	Discharged Soil Measuring Device
Functionele omschrijving	sensor systeem voor metiging van hoeveelheden afgevoerde grond
Ontwikkelaar	Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
Classificatie ontwikkelaar	R & D organisatie, leverancier
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	geboorde tunnels
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	sensorsysteem voor meting van hoeveelheid afgevoerde grond voor "earth pressure balancing"
Voordelen:	
- economisch voordeel	-
- arbeidsomstandigheden	-
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	regeling van boorfrontstabiliteit bij earth pressure balancing TBM
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	-
Besturing	-
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	-

Opmerkingen

**Bron**

Bron	ISARC IX, blz. 717
Notulist	R. Krom

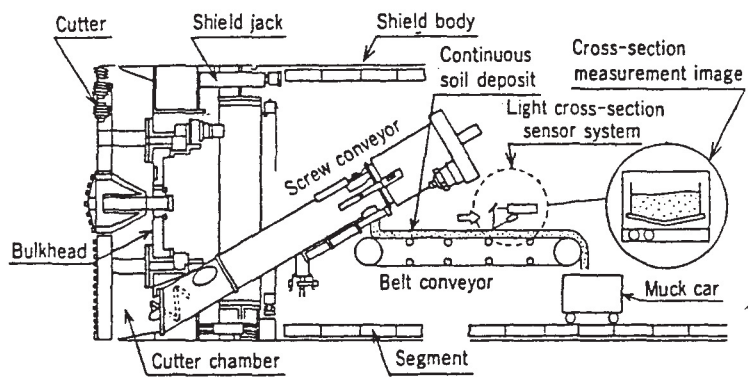


Fig. A3. Meetsysteem voor meting van hoeveelheid afgevoerd grond voor TBM.

PRODUKT

Naam	SPL Robot
Functionele omschrijving	in situ cast concrete tunnel lining robot
Ontwikkelaar	Fujita Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker
Volwassenheid	prototype, eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	afwerking van tunnels door stabiele rots(grond)
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	bekisting positioneren en aandrukken beton in bekisting pompen

Voordelen:

- economisch voordeel	mechanisering van handwerk
- arbeidsomstandigheden	verminderen van handarbeid in ondergrondse omgeving
- kwaliteit	beter hechtig van beton aan tunnel/minder afval
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	waarschijnlijk niet inzetbaar in Nederlandse bodem

Ideeën voor uitbreiding

-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 8 x 3 x 3 m
Massa	circa 17 ton
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	rupsen
Besturing	handmatig (bouwmanipulator) of geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

Opmerkingen

-

Bron

Bron	JIRA, blz. 160
Notulist	R. Krom

PRODUKT

Naam	Datacat
Functionele omschrijving	tele-operationsysteem voor minigravers
Ontwikkelaar	VTT (Finland)
Classificatie ontwikkelaar	R & D organisatie
Volwassenheid	labopstelling
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	ontgraven
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	op afstand besturen van minigraver
Voordelen:	-
- economisch voordeel	-
- arbeidsomstandigheden	vermindering van aantal werknemers in ondergrondse bouwput/caissons
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	ontgraven in arbeidsonvriendelijke omstandigheden, ontgraven in caissons
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 2 x 1 x 1 m
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	wielen
Besturing	op afstand bestuurd (manipulator, bouwmanipulator)
Energievoorziening	diesel/benzine
Toekomstperspectief	nog in ontwikkeling

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	Internet: <a href="http://www.pub1.vtt.fi/Expertise/MobileRobots.htm">http://www.pub1.vtt.fi/Expertise/MobileRobots.htm</a>
Notulist	R. Krom



Fig. A4. Op afstand bestuurd schrankladder.

PRODUKT

Naam	LUCIE (Lancaster University Computerised Intelligent Excavator)
Functionele omschrijving	autonome graafmachine
Ontwikkelaar	Lancaster University
Classificatie ontwikkelaar	R & D organisatie
Volwassenheid	labopstelling, prototype
Jaar van ontwikkeling	1989 - heden

TOEPASSING

Toepassingsgebied	automatisch ontgraven
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	-
Voordelen:	
- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten
- arbeidsomstandigheden	-
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	ontgraven in caissons
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 5 x 9 x 8 m
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	rails
Besturing	sensorische besturing
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	wordt nog verder ontwikkeld

Opmerkingen

-

Bron

Bron	ISARC IX, blz. 743
Notulist	R. Krom

**PRODUKT**

Naam	Tele-earthwork System
Functionele omschrijving	tele-operated graven en transporteren
Ontwikkelaar	Fujita Co. Research Instituut
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker, R & D organisatie
Volwassenheid	labopstelling, prototype
Jaar van ontwikkeling	circa 1993

**TOEPASSING**

Toepassingsgebied	grondverzet in mensonvriendelijke of gevaarlijke omstandigheden
Toepassingsvoorbeelden	-
Robot functionaliteit	graven en transport op afstand bestuurd
Voordelen:	
- economisch voordeel	nadeel: produktiviteit is 40 % lager dan direct bestuurd machine
- arbeidsomstandigheden	veiligheid: mensen hoeven niet meer in een on-veilige bouwput een graafmachine te bedienen
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	in caissons (mits aanpassing energievoorziening)
Ideeën voor uitbreiding	-

**UITVOERING**

Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	rupsen
Besturing	op afstand bestuurd, met behulp van camera's
Energievoorziening	diesel
Toekomstperspectief	nog in ontwikkeling

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	ISARC XI, blz. 269, brochure Fujita
Notulist	R. Krom

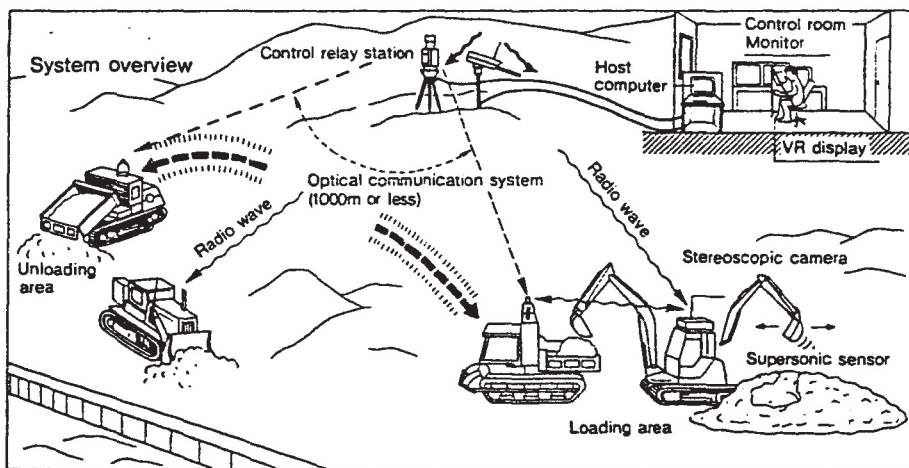


Fig. A5. Systeemoverzicht van op afstand bestuurd ontgraven en transporteren van grond.



PRODUKT

Naam	Mini Digging Robot
Functionele omschrijving	op afstand bestuurd (manipulator) graafmachine
Ontwikkelaar	Tokyo Constr. Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	-

TOEPASSING

Toepassingsgebied	ontgraven
Toepassingsvoorbeelden	in kleine bouwputten
Robot functionaliteit	loswroeten van grond, graven van grond via afstandsbesturing

Voordelen:

- economisch voordeel	mechanisering van handwerk
- arbeidsomstandigheden	geen mensen meer in kleine diepe bouwputten, geen gevaar door kans op instorten/onderlopen van bouwput
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	in caissons
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 2,2 x 1,2 x 2,0 m
Massa	2100 kg
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	rupsen
Besturing	op afstand bestuurd (manipulator)
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	nog in ontwikkeling

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	JIRA, blz. 240
Notulist	R. Krom

PRODUKT

Naam  
 Functionele omschrijving  
 Ontwikkelaar  
 Classificatie ontwikkelaar  
 Volwassenheid  
 Jaar van ontwikkeling

RETINA  
 intelligente, geautomatiseerde retro-excavator  
 Universiteit van Madrid (E)  
 R & D organisatie  
 labopstelling  
 1994 - 1997

TOEPASSING

Toepassingsgebied  
 Toepassingsvoorbeelden  
 Robot functionaliteit  
 Voordelen:  
 - economisch voordeel  
 - arbeidsomstandigheden  
  
 - kwaliteit  
 Mogelijke inzet ondergronds bouwen  
 Ideeën voor uitbreiding

ontgraven  
 -  
 automatisch ontgraven  
  
 besparing op arbeidskrachten  
 vermindering van aantal werknemers in "onvriendelijke" omstandigheden (tunnels, mijnbouw en nucleaire industrie)  
 -  
 ontgraven in caissonbouwmethode  
 -

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)  
 Massa  
 Kostenindicatie  
 Mobiliteit  
 Besturing  
 Energievoorziening  
 Toekomstperspectief

standaard graafmachine  
 -  
 -  
 -  
 op afstand bestuurd (manipulator)  
 -  
 nog in ontwikkeling; de plannen zijn: force control, tele-operationsysteem, ontwikkeling expertsysteem voor automatische besturing

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron

Activity Report 1-'92 - 12-'94, University of Madrid, blz. 36

Notulist

R. Krom



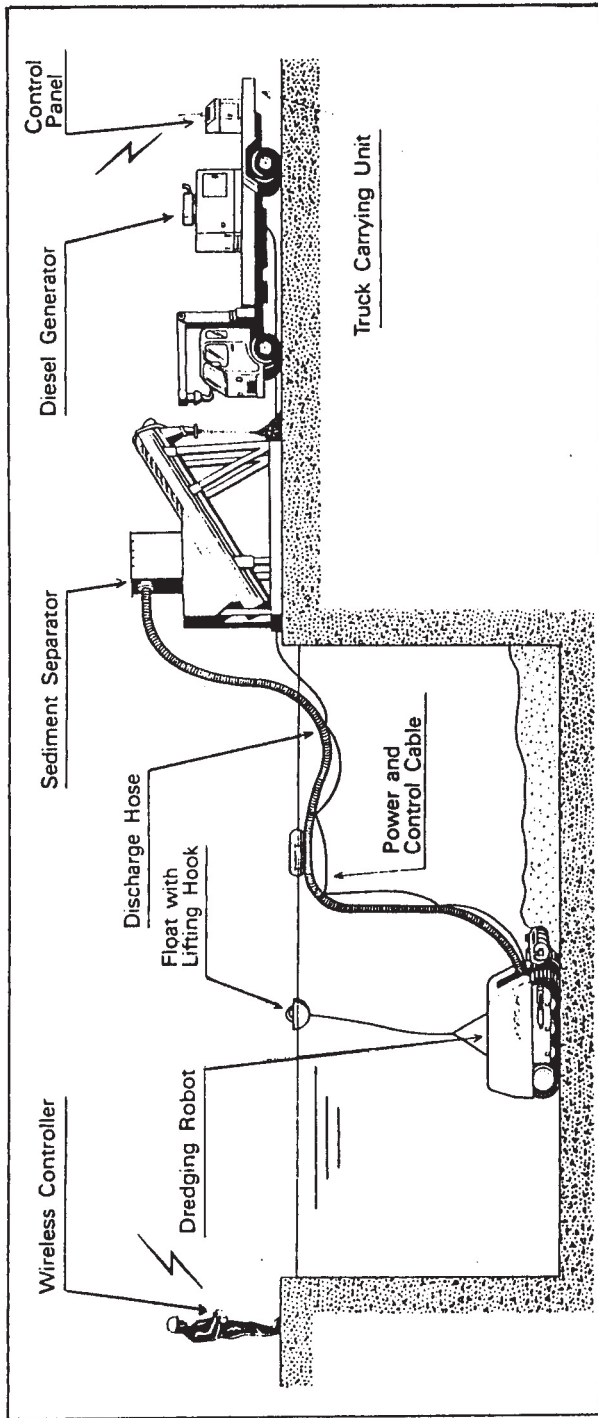


Fig. A6. Systemoverzicht van op afstand besturde baggerrobot.

**PRODUKT**

Naam	Shotcreting Robot
Functionele omschrijving	robot voor aanbrengen van shotcrete
Ontwikkelaar	Kajima Co./Mitsui Constr. Co./Obahyashi Co./Tokyo Constr. Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	-

**TOEPASSING**

Toepassingsgebied	aanbrengen van spuitbeton in tunnels
Toepassingsvoorbeelden	afwerking tunnelwand van tunnels door rots
Robot functionaliteit	automatisch spuiten van spuitbeton
Voordelen:	
- economisch voordeel	besparing op arbeidskrachten, lager betonverbruik, minder afval
- arbeidsomstandigheden	beter klimaat voor operator, geen zware spuitmonden hanteren
- kwaliteit	betere beheersing van laagdikte
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	-
Ideeën voor uitbreiding	-

**UITVOERING**

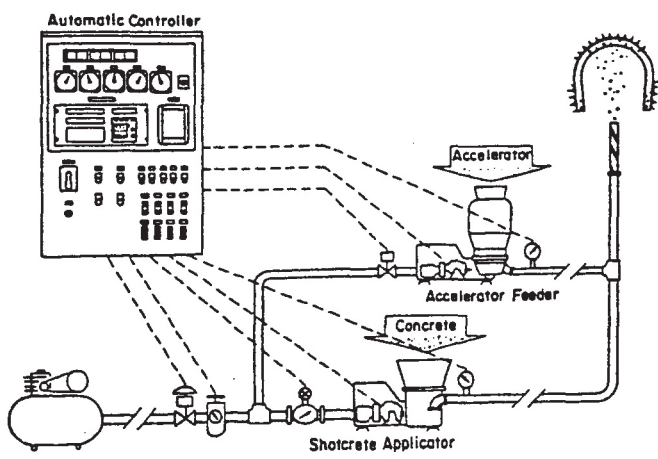
Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	circa 5 tot 12 ton
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	rupsen (alle)
Besturing	naar keuze handmatig (bouwmanipulator) of geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	ontwikkelingen afgerond

**Opmerkingen**

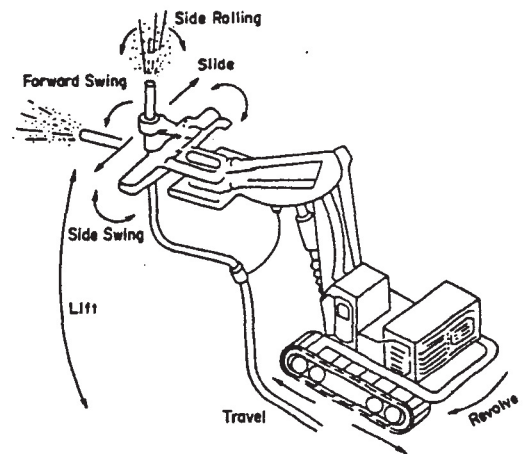
-

**Bron**

Bron	JIRA, blz. 162, 164, 166, 168, 170
Notulist	R. Krom



**Robotinstallatie voor het  
aanbrengen van spuitbeton**



**Bewegbaarheid van de  
spuitbetonrobot**

Fig. A7. Spuitbetonrobot.

PRODUKT

Naam	Automated landslide protection wall construction system
Functionele omschrijving	machine voor bouwput wandconstructie
Ontwikkelaar	Shimizu Co.
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker
Volwassenheid	prototype, eenmalige ontwikkeling, ten behoeve van project
Jaar van ontwikkeling	< 1992

TOEPASSING

Toepassingsgebied	automatisch aanbrengen van betonwand met groutankers in bouwput
Toepassingsvoorbeelden	bouw LNG-opslagtank in Negishi
Robot functionaliteit	boren van gaten voor groutankers, injecteren van mortel in groutankergaten, aanbrengen van ankers, plaatsen van wapening, aanbrengen van shotcrete

Voordelen:

- economisch voordeel	vervanging van circa 75 % arbeidsuren door machines ten opzichte van traditionele methode
- arbeidsomstandigheden	geen gevaar voor mensen in bouwput
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	-
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	verschillende systemen
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	via kabels opgehangen aan rand van bouwput
Besturing	op afstand bestuurd (manipulator) of geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	-

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	ISARC IX, blz. 907
Notulist	R. Krom

Aanbrengen en verankeren van spuitbetonwand voor bouwput

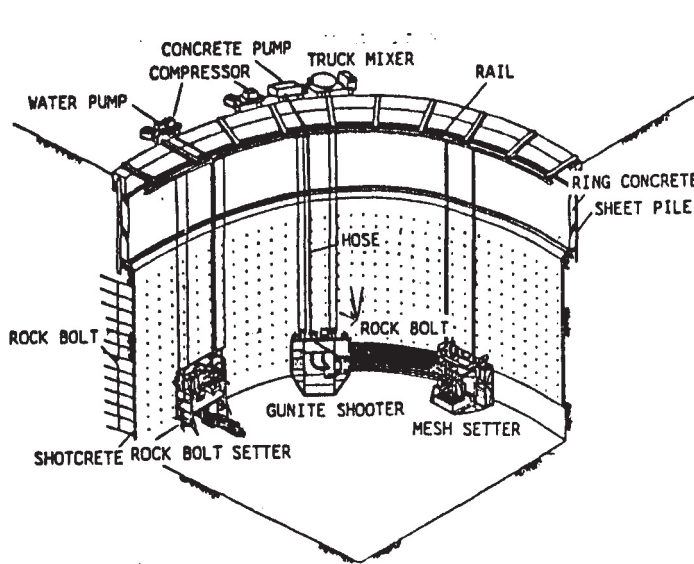


Fig. A8. Systemoverzicht.

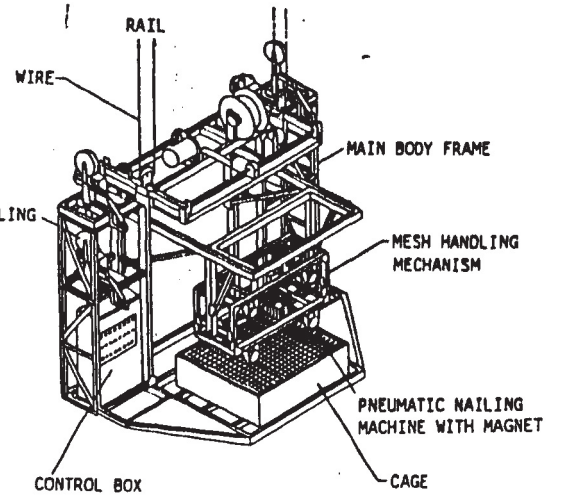


Fig. A9. Wapeningsnet plaatsen.

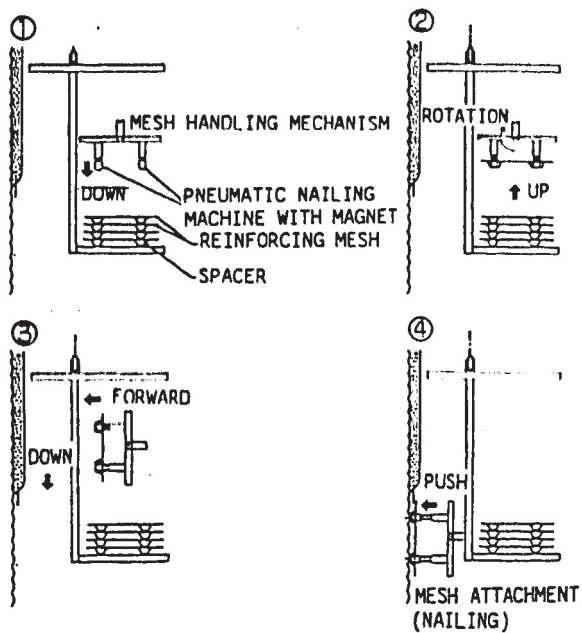


Fig. A10. Volgorde van wapeningsnet plaatsen.



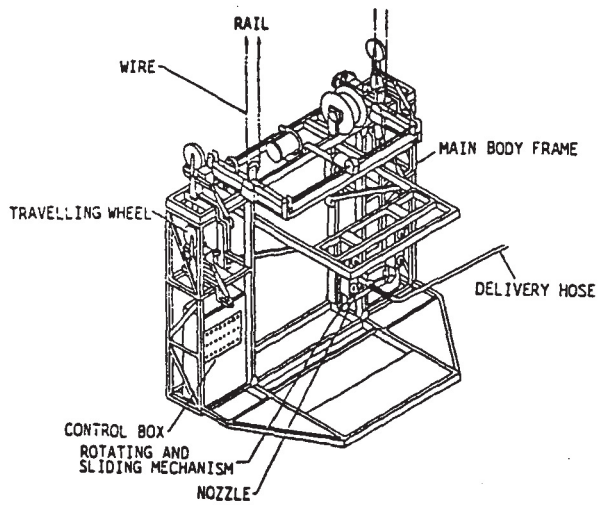


Fig. A11. Spuitbetonrobot.

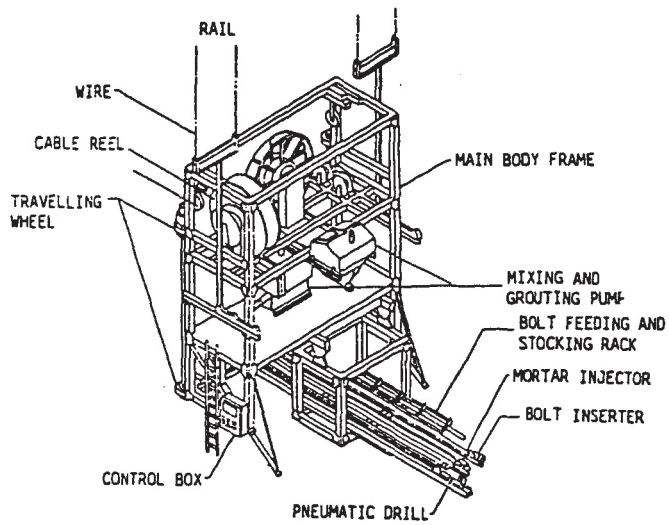


Fig. A12. Aanbrengen van groutankers.

**PRODUKT**

Naam -  
 Functionele omschrijving automatisch transportsysteem voor verticaal/horizontaal transport in/door tunnels  
 Ontwikkelaar Fujita (J)  
 Classificatie ontwikkelaar gebruiker  
 Volwassenheid prototype  
 Jaar van ontwikkeling 1993

**TOEPASSING**

Toepassingsgebied transport van bouw materiaal bij ondergrondse bouw  
 Toepassingsvoorbeelden transporteren van wapening, bekisting en steiger materiaal (max. 2 ton)  
 Robot functionaliteit hijsen, verplaatsen  
 Voordelen:  
 - economisch voordeel verkorting van transporttijd door horizontaal en verticaal transport zonder overpakken, minder toegangsschachten nodig  
 - arbeidsomstandigheden geen mensen nabij hijsoperaties  
 - kwaliteit -  
 Mogelijke inzet ondergronds bouwen -  
 Ideeën voor uitbreiding -

**UITVOERING**

Afmetingen (l x b x h) zie schets  
 Massa -  
 Kostenindicatie -  
 Mobiliteit met behulp van rails bevestigd aan tunnelplafond  
 Besturing op afstand bestuurd (manipulator)  
 Energievoorziening 380 V  
 Toekomstperspectief ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron Fujita brochure: "Robots for construction"  
 Notulist H.J. Berkhoff

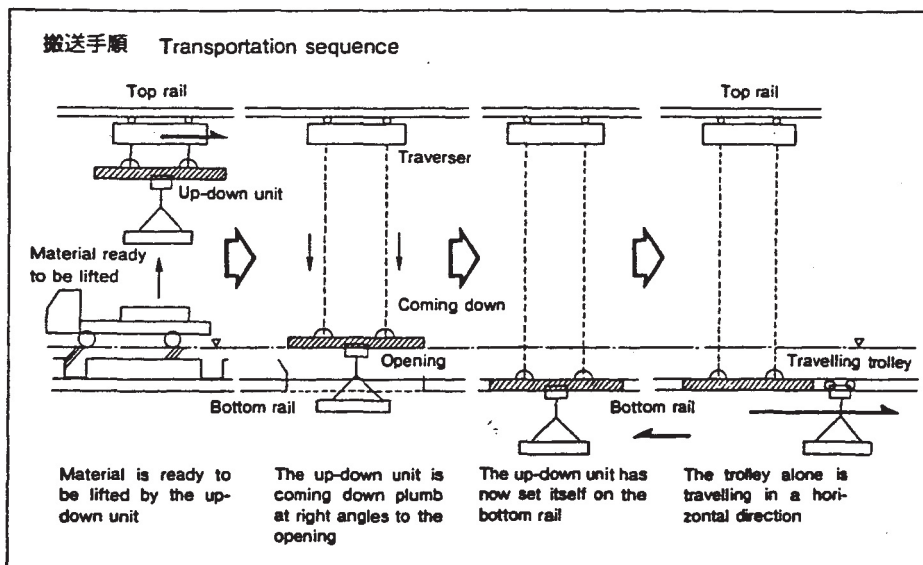


Fig. A13. Transportvolgorde van automatisch systeem voor horizontaal/verticaal transport van bouw materiaal.

	<b>SUBSYSTEEM</b>
<b>PRODUKT</b>	
Naam	XPM, Excavator touch series 5, Depthmaster, BPM
Functionele omschrijving	positie monitoring dieplepelbak
Ontwikkelaar	IHC (NL), TopCon (J/USA), Laser Alignment (USA), Spectra Physics (USA) en Prolec (UK)
Classificatie ontwikkelaar	leverancier(s)
Volwassenheid	commercieel produkt
Jaar van ontwikkeling	1994, 1995
<b>TOEPASSING</b>	
Toepassingsgebied	graafmachines
Toepassingsvoorbeelden	uitdiepen van rivieren, met name vervuild slib, onder water sleuven/taluds graven, onder andere ten behoeve van afzinktunnel
Robot functionaliteit	positionering
Voordelen:	
- economisch voordeel	niet teveel baggeren, met name bij vervuilde grond, hogere produktiviteit
- arbeidsomstandigheden	-
- kwaliteit	hogere nauwkeurigheid
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	maken van een vlak grindbed, onder water beton storten
Ideeën voor uitbreiding	op afstand bestuurd in afgesloten ruimte (caisson) laten graven
<b>UITVOERING</b>	
Afmetingen (l x b x h)	-
Massa	-
Kostenindicatie	tussen f 20.000,-- en f 100.000,--
Mobiliteit	niet van toepassing
Besturing	automatisch regelsysteem
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	nog in ontwikkeling
<b>Opmerkingen</b>	-
<b>Bron</b>	
Bron	Brochures IHC, TopCon, Laser Alignment, Prolec en Spectra Physics
Notulist	H.J. Berkhoff en R. Krom

PRODUKT

Naam	Loopboor
Functionele omschrijving	robot voor het boren van gaten in betonvloeren voor de aanleg van spoorrails
Ontwikkelaar	Stichting Robouw, TNO Bouw
Classificatie ontwikkelaar	gebruiker, R & D organisatie
Volwassenheid	prototype
Jaar van ontwikkeling	1992 - 1994

TOEPASSING

Toepassingsgebied	boren van gaten in betonvloeren
Toepassingsvoorbeelden	boren van gaten voor railankers, boren van gaten voor stekeinden
Robot functionaliteit	automatische maatvoering, boren van gaten, detecteren van wapeningsstaven
Voordelen:	
- economisch voordeel	versnellen van het productieproces
- arbeidsomstandigheden	mensonvriendelijk werk is geautomatiseerd, minder stof en lawaai in tunnel
- kwaliteit	vermindering van kans op fouten
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	aanleg van rails in spoortunnels, stekeinden voor later te storten wanden
Ideeën voor uitbreiding	boren van gaten in wanden en plafonds

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	circa 2,4 x 0,9 x 1,4 m
Massa	circa 1 ton
Kostenindicatie	circa f 500.000,--
Mobiliteit	wielen
Besturing	geprogrammeerd
Energievoorziening	elektrisch (380 V)
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

Opmerkingen

-

Bron

Bron	ISARC X, XI
Notulist	R. Krom

PRODUKT

Naam	Baggershuttle
Functionele omschrijving	volledig autonoom werkend baggerwerktuig
Ontwikkelaar	Van den Herik
Classificatie ontwikkelaar	leverancier
Volwassenheid	eenmalige ontwikkeling
Jaar van ontwikkeling	1995

TOEPASSING

Toepassingsgebied	het op diepte houden van een inlaatkanaal
Toepassingsvoorbeelden	koelwaterinlaatkanaal van Eemscentrale, Delfzijl
Robot functionaliteit	peilt kanaaldiepte, woelt sediment los en zuigt het op, meet slibconcentratie

Voordelen:

- economisch voordeel	voor eigenaar:
	- optimale werking koelwaterinlaat
	- inlaatkanaalreiniging in eigen beheer
- arbeidsomstandigheden	-
- kwaliteit	sedimentatie wordt eerder gesignaleerd en verwijderd

Mogelijke inzet ondergronds bouwen baggeren in afgesloten ruimte

Ideeën voor uitbreiding -

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	6 x 2,4 x 2,4 m
Massa	-
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	hangend aan dubbele rail
Besturing	geprogrammeerd, deels sensorisch
Energievoorziening	elektrisch (totaal geïnstalleerd vermogen 360 kW)
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	OTAR/Land en Water/Van den Herik
Notulist	H.J. Berkhoff

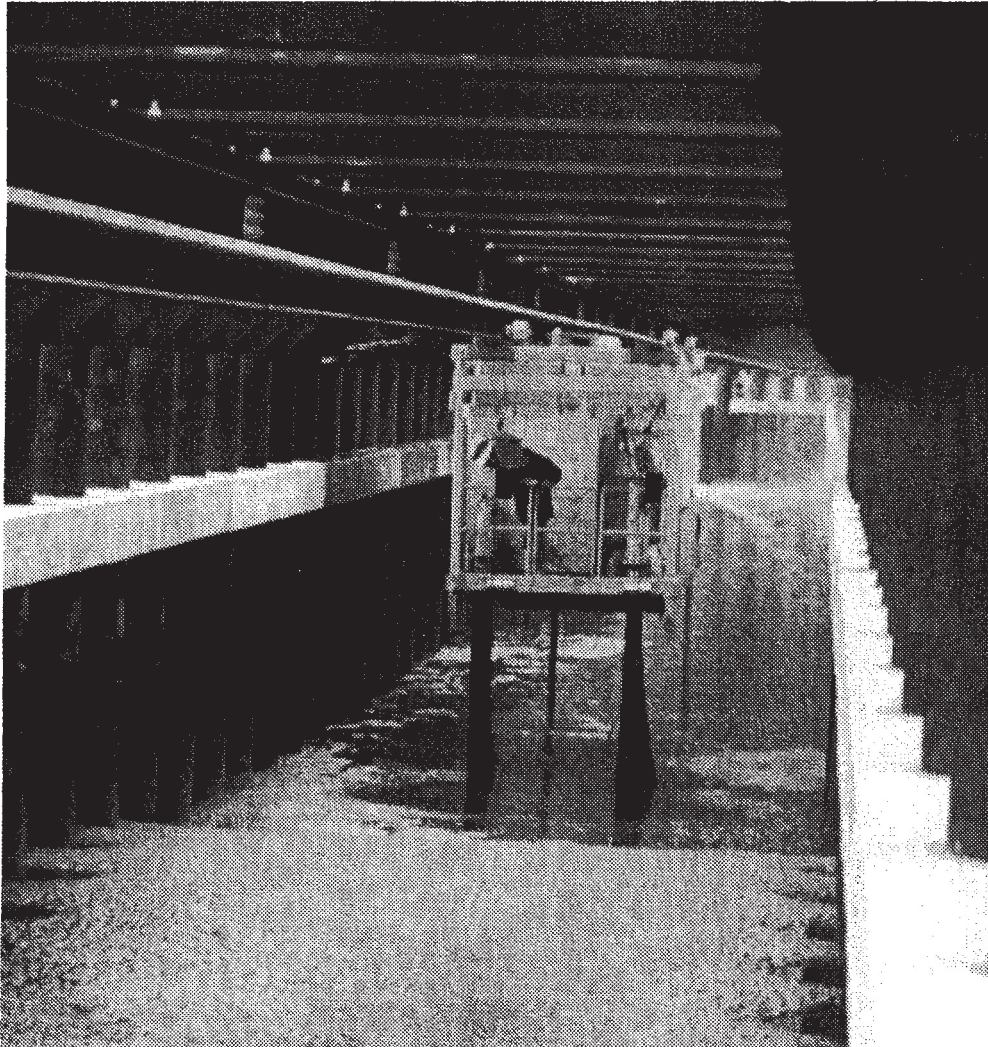


Fig. A14. De baggershuttle in vol bedrijf. Het pompenframe is neergelaten.

BIJLAGE B  
SAMENVATTING VAN DE INTERVIEWS

De interviews zijn gehouden door ir. R. Krom (TNO) en ing. H.J. Berkhoff (DMC).

### Interview 1

Introductie geïnterviewde:

Ir. Ch. Hakkaart      Projecteamleider waterbouwkundig ontwerp bureau (HBW).  
Specialisme          Onder andere afzinktunnels. Ervaring op bouwplaatsen in Engeland en  
Amerika.

#### *Bouwproces afzinktunnel*

Het maken van tunnelementen in een bouwdok. De uiteinden worden tijdelijk afgedicht en de elementen worden voorzien van ballasttanks. Na het onderwater zetten worden de elementen na elkaar in een sleuf afgezonken.

Algemene opmerkingen met betrekking tot automatisering in de bouw:

- Bouwvakkers moet je niet met te complexe apparaten laten werken (het zijn geen piloten).
- Een op afstand bestuurbaar apparaat kan toch heel nuttig zijn in de bouw (volgens de Europese definitie is een op afstand bestuurd manipulator geen robot, volgens de Japanse definitie wel).
- Bij de ontwikkeling van een robot ten behoeve van een bouwproduct moet ten alle tijden het bouwproduct bovenaan staan en niet het apparaat op zich.

Kansen voor automatisering:

- Betontechnologie met betrekking tot het beheersen van de betonkwaliteit vanaf de betonfabriek tot het uitharden in de bekisting. Met betrekking tot het transport gebeurt het weleens dat, nadat een betonmixer op het werk aankomt, de vereiste zetmaat niet wordt gehaald. De mixer wordt dan teruggestuurd. Met betrekking tot het betonstorten gebeurt het weleens dat niet voldoende of teveel wordt verdicht. Dit is pas duidelijk na het maken van kernboringen. Dus meer meetsensoren ter controle van de betonkwaliteit tijdens het transport en het storten. Bij voorbeeld een slimme trilnaad; geeft signaal of iets dergelijks bij te lang of te kort trillen (beton ontmengd/niet goed verdicht).

#### *Opmerking:*

Het gehele stortproces van beton is niet te automatiseren: het storten gebeurt in badges, begrensd door maximale mootlengte (anders scheuren). Er is veel discontinuïteit. Combinatie van betonstorten met andere processen is niet aan te bevelen. Bij een storing moet het beton zo snel mogelijk uit de toevoerapparatuur worden verwijderd anders hardt het uit.

- Grondafvoer in de stad met vrachtwagens. Moeilijk in verband met beperkte ruimte en drukke stadsverkeer. Afvoer van vervuilde grond geeft extra complicaties. (*Noot:* automatische wasinstallaties bij de uitgang van het bouwterrein bestaan al). Meer in het



algemeen: het bouwtransport zodanig opzetten dat het verkeer in de stad zo min mogelijk wordt verstoord. Korte toegang tot de ondergrond, bij voorbeeld een lift in plaats van een talud.

- Ontgraven van vervuilde grond en/of op grote diepte. Dit betekent een op afstand bestuurde graafmachine met camera. Nadeel: slecht zicht met camera.
- Industriële productie van tunnelementen voor verschillende afzinktunnels wordt bemoeilijkt omdat geen tunnel hetzelfde is.
- Het maken van sparingen in tunnelwanden en/of vloeren verstoort het proces. Daarom achteraf sparingen op juiste maat maken met bij voorbeeld een waterjetsysteem.
- Diepwand in één keer vlak maken in plaats van een voorzetwand.
- Duikers vervangen door ROV's. Nadeel: beperkt zicht in rivierwater.

## Interview 2

Introductie geïnterviewde:

Ing. G. Jonkheim      Projectleider productie waterbouw (HBW).  
Specialisme            Onder meer afzinktunnels. Ervaring: vele tunnelprojecten in Duitsland, Nederland en Engeland. Werkt op dit moment aan verbreding van het ondergrondse station Beursplein.

### *Bouwproces afzinktunnel*

Zie interview 1.

Algemene opmerkingen met betrekking tot automatisering in de bouw:

- Robotisering is niet mogelijk bij verbouw of renovatie. Alleen toepasbaar bij nieuwbouw als je ook zelf het ontwerp verzorgt.
- Het is bekend dat de bouwers conservatief zijn, maar de opdrachtgevers zijn dat zeer zeker ook. Dus niet alleen de bouwwereld overtuigen (Projectleider: waarom zou ik als eerste iets nieuws op mijn werk uitproberen?), maar ook de opdrachtgevers (Waarom zou ik als eerste mijn constructie anders laten uitvoeren dan gebruikelijk?). De klant, al dan niet met consultant, hebben bepaalde eisen die een mogelijke automatisering belemmeren.
- Ongeveer 90 % van de handelingen op de bouw is transporteren. Het is van belang om de logistiek op de bouwplaats in de hand te hebben. De juiste mensen, materieel en materiaal op de juiste plaats op de juiste tijd. Het kan theoretisch optimaal zijn om de ene week 4 man op het werk te hebben, daarna een week 80 man, dan weer 4 man en vervolgens weer 80 man, enzovoorts. Dit is niet praktisch. Naast planning is onderlinge communicatie ook van groot belang. Een projectleider probeert mensen optimaal in te zetten en in principe allerlei activiteiten zoveel mogelijk simultaan te laten verlopen.

(On)Mogelijke automatiseringsonderwerpen:

- Prefab wapeningsnetten. Consequentie: er wordt extra wapening gebruikt. Immers de prefab wapeningspanelen moeten weer met de hand in het werk aan elkaar worden gevlochten. Verder wordt de grootte van de prefab panelen beperkt door de beschikbare kraan capaciteit en de beschikbare ruimte; onder andere bij het hijsen tussen bouwkuip stempeling.

- Robotiseren van het wapenen. Consequentie: er wordt meer kg/m<sup>3</sup> wapening gebruikt. Immers er wordt met een beperkt aantal "standaard"staven volgens standaardpatronen gewerkt. Met de hand is meer variatie, dus lokale optimalisatie mogelijk.
- Lassen van wapening is duurder dan vlechten.
- De bouwkosten worden bepaald door de details. Dit is juist weer slecht te robotiseren. Daarom levert het robotiseren van de bulk van het werk lang niet zoveel voordeel op als de details worden overgeslagen. Door het ontwerp van de details in overleg met de uitvoering te standaardiseren bestaan er mogelijkheden.
- Bouwput: er is meer te verdienen op de kosten voor het plaatsen van de stempeling dan op de kosten van het ontgraven. Kostenbepalend voor het grondwerk is de plaats waar de grond naar toe moet.
- Sneller bouwen betekent een industrieel bouwproces, met andere woorden: elke dag hetzelfde met weinig mensen; korte moten; eenvoudige wapening; standaard of eenvoudig aan te passen tunneldoorsnede, enzovoorts. Probleem is: niemand durft zijn nek uit te steken.
- Als je duikers kunt uitsparen dan doe je dat, maar je ontkomt er niet aan om ze in te zetten. ROV's kun je alleen op de Noordzee gebruiken.
- ROV in riooltechniek: mol met camera. Eventueel in te zetten bij verstopte leidingen of voorspankanalen. Doordat de vermogens van de ROV echter laag zijn, kunnen zij het beton in de leiding niet of zeer moeilijk verwijderen.
- Het probleem in de bouw is dat verschillende aannemers elk een deel van het werk doet. De een is niet bereid iets te doen wat de ander het werk gemakkelijker maakt zonder dat daar iets tegenover staat. Tenzij de (onder)aannemers gezamenlijk het werk aannemen.
- Bij de bouw van tunnelelementen is veel kraantijd nodig. Bij voorbeeld: zijn er 2 tunnel-elementen tegelijk in productie dan zijn er 4 torenkranen nodig.
- Slechte arbeidsomstandigheden bij sloopwerk, boren, boven je macht werken en onder druk werken (caisson).

### Interview 3

Introductie geïnterviewde:

W. Kranenburg	Hoofd HBM materieelservice Zwolle.
Specialisme	Jarenlange ervaring met materieel op de bouwplaatsen en veel contact met zowel de uitvoering als met materieelleveranciers.

De HBM materieelservice verhuurt in hoofdzaak bouw materieel ten behoeve van de utiliteitsbouw. Daarnaast ontwikkelt zij nieuwe hulpvoorzieningen op verzoek van de uitvoering. Ondanks dat zij niet direct bij ondergronds bouwen betrokken zijn, leven er bij de HBM materieelservice een paar ideeën die ook van toepassing kunnen zijn op ondergronds bouwen.

In de afgelopen 10 jaar zijn er innovatieve wijzigingen doorgevoerd bij het klein gereedschap. Het grote materieel echter heeft slechts kleine verbeteringen te zien gegeven. De bouw materieel producenten reageren hierop als volgt: "De bouw wil niet betalen voor innovatie". Verder is het zo dat het groot materieelkapitaal intensief is en niemand proefkonijn wil zijn voor iets nieuws.

Zo gauw er op een werk een kraan weg kan, gebeurt dat. Er moet niet alleen op de kosten van de kraan worden gelet, maar ook op wat ervoor komt en wat erna komt. Het hele bouwproces. Een klassieke oplossing is het plaatsen van prefab gevelelementen. De kraan hijst het element op; een frame op de juiste verdiepingsvloer neemt het element over en stelt het in positie; intussen kan de kraan het volgende element ophalen. Ook al heeft dit succesvol gewerkt op een werk, dan nog wordt het niet vanzelfsprekend op een volgend werk weer toegepast. In de bouw blijft men conservatief denken.

Een voorbeeld van bouwprocesverbetering (de afzonderlijke ideeën zijn niet nieuw maar te zamen leveren ze wel een verbetering op):

In Nederland wordt circa 80 % van het betonstortwerk uitgevoerd met een kubel (vanwege de veelal kleine stort). De bestaande situatie wordt getoond in de figuren B1 en B2. De verbeterde situatie wordt getoond in de figuren B3 en B4. De volgende verbeteringen zijn aangebracht:

- Kraan met PC gestuurd positioneringssysteem. De machinist zet de kraan in beweging en heeft al een keer aangegeven waar de last naar toe moet (programmeren volgens het teach-in principe). Het systeem stelt de optimale bewegingssnelheden in en is eventueel voorzien van een slingercompensatie. Voordeel: de machinist wordt ontlast waardoor een hogere produktiviteit wordt gehaald (dit wordt al toegepast bij ECT: automatische positionering van containers bij het beladen van een schip).
- In plaats van een portofoon een "hands-free" radio (koptelefoon met microfoon die inschakelt op spraak).
- Servokubel: een servocilinder in plaats van een hefboom, waardoor het doseren zo licht gaat dat de betonstorter de kubel makkelijk op zijn plaats kan houden. Een cilinder met veerretour compenseert het "opveren" van de giek tijdens het legen van de kubel, zodat ook verticale bewegingen minimaal zijn.
- Kubelvanger: een vangframe met automatisch kantelmechanisme die de opening onder de goot van de truckmixer brengt. Bij ontvangst van een lege kubel staat er al een volle klaar.
- Afspraak met betoncentrale en truckmixerchauffeur(s) om tijdelijk mee te werken aan het stortproces.

Algemene opmerkingen met betrekking tot automatisering in de bouw:

- Je moet wel de mensen mee krijgen. Dit wordt met het volgende voorbeeld geïllustreerd. Ervaren timmerlieden klemden kunststofprofielen op binnendeurkozijnen. Zorgvuldig werd het profiel vast geklopt, daar anders het reeds aangebrachte stucwerk zou scheuren. Na introductie van een zelfgebouwde pneumatische klem konden de profielen snel en zonder schade worden aangebracht. Enthousiast geworden door dit succes ontwikkelde de materieelservice nog een paar handige hulpvoorzieningen. Met als resultaat dat het werk niet meer door een ervaren timmerman hoefde te worden gedaan. De timmerlieden voelden zich bedreigd in hun positie en de hulpstukken verdwenen van het werk.
- Procesverbetering moet per saldo goedkoper zijn, ook bij gelijkblijvend resultaat. Anders zegt een uitvoerder: "Ik doe het liever toch op mijn manier want dan ben ik de baas, anders ben ik afhankelijk van jou en je uitvinding". Dus altijd rekening houden met de gedachtengang van de uitvoerders en hun er zoveel mogelijk bij betrekken.

Conclusies:

- Niet robotiseren op zich, maar delen van het bouwproces integraal optimaliseren.
- Met het verbeteren van het transport op de bouwplaats is het meeste rendement te halen.
- Ook al wordt er voldaan aan de criteria van voordeel op gebied van Arbo, economie, kwaliteit en dergelijke, dan nog staat of valt een automatiseringsproject met de medewerking van de mensen die er mee moeten werken en/of de mensen waarvan je hun positie overbodig hebt gemaakt. Uiteraard is dit aspect niet nieuw. Dit is van belang bij elke verandering in elke bedrijfstak.

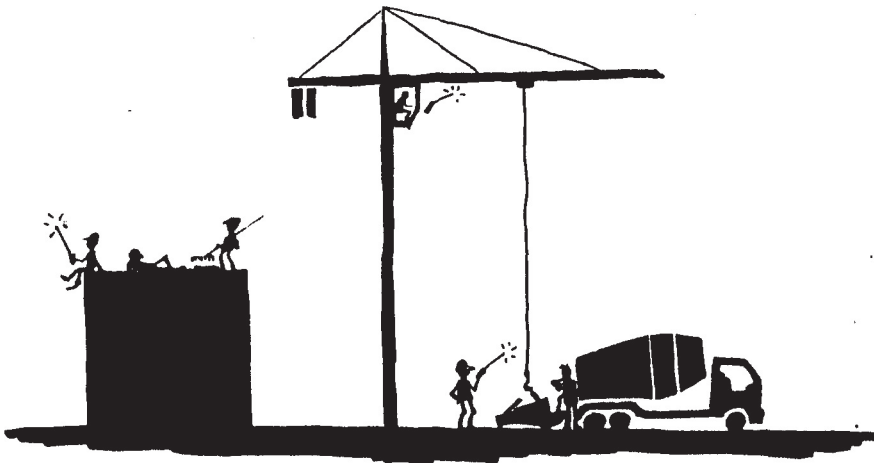


Fig. B1. Bestaande situatie.

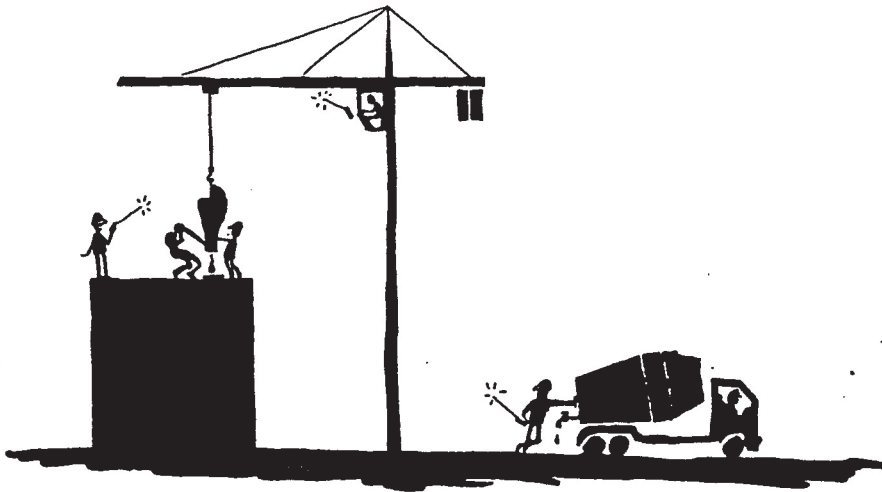


Fig. B2. Bestaande situatie.

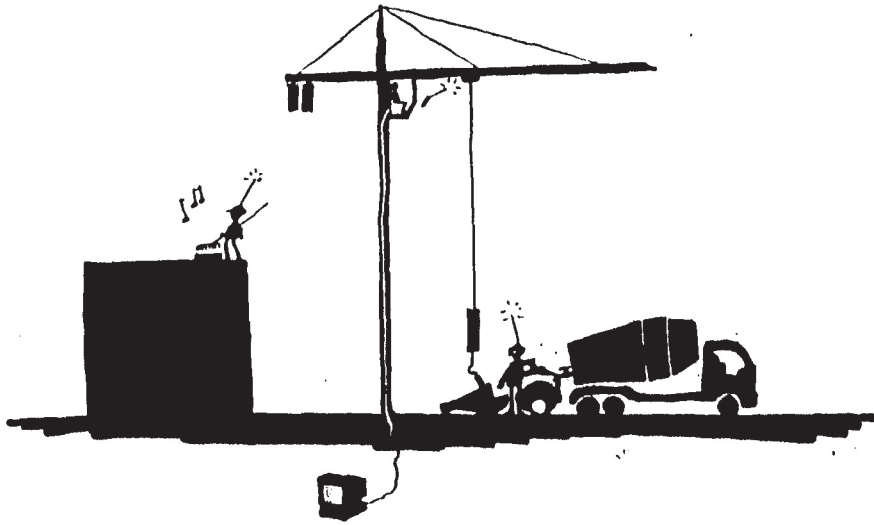


Fig. B3. Verbeterde situatie

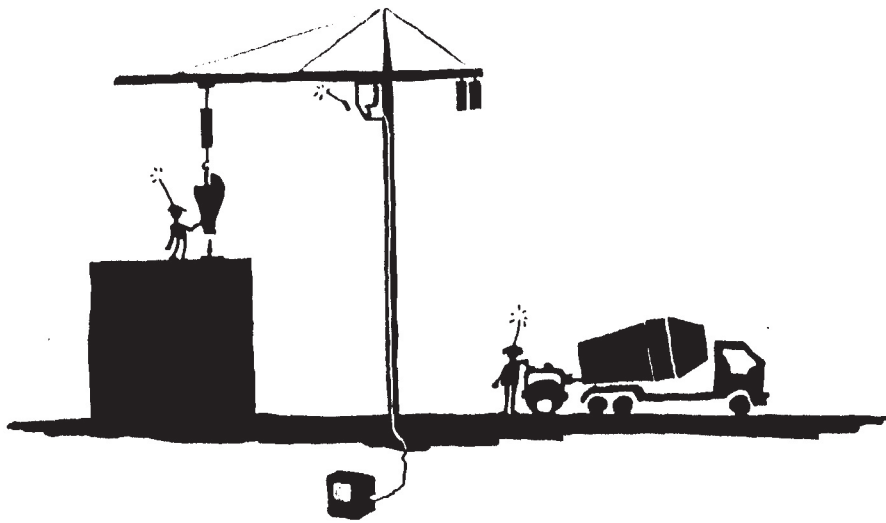


Fig. B4. Verbeterde situatie.

## Interview 4

Introductie geïnterviewden:

- Ir. M. Langhout      Hoofd ontwerp bij Tunnel Combinatie Heinoord (TCH), die de eerste geboorde verkeerstunnel bouwt in Nederland.
- Ir. M. v.d.Griendt    Project ingenieur TCH, betrokken bij onder andere de modificaties van de tunnelboormachine (TBM).

De Tunnel Combinatie Heinoord bestaat uit de bedrijven Ballast Nedam, Hollandsche Beton- en Waterbouw, Van Hattem & Blankevoort en Wayss & Freytag. De TBM wordt speciaal voor dit project gebouwd door Herrenknecht, die al een jarenlange samenwerking heeft met Wayss & Freytag.

### *Het boortunnelproces*

De TBM werkt met het zogenoemde "slurryschild", dit betekend dat het boorfront wordt gesteund door bentoniet. Een kamer met verhoogde luchtdruk (luchtkussen) houdt de bentoniet onder druk. Na het boorschild volgt de erector die de segmenten oppakt en plaatst. Daarna volgen nog 3 wagens: een wagen met segmenten (bufferopslag), een injectiewagen en een kabel- en pijpenwagen. Een kleine locomotief voert de segmenten aan naar de segmentenwagen. Op de injectiewagen bevindt zich een groutmenginstallatie ten behoeve van het injecteren aan de buitenzijde van de tunnel. De boorspoelingsaanvoer (bentoniet) en -afvoer (slurry) gaan via pijpleidingen, opgebouwd uit 6 m stukken. De TBM werkt serieel. Dus bij een storing van één van de activiteiten kunnen de overige activiteiten beperkt of helemaal niet meer plaatsvinden. Daarom wordt er veel preventief onderhoud gepleegd. De boorspoeling, circa 1000 (m<sup>3</sup>/h) wordt naar een scheidingsinstallatie gevoerd. Na de zeven en cyclonen moeten de kleinste deeltjes (< 0,02 mm) er nog uit. Dit kan met een centrifuge (duur in aanschaf en gebruik) of een zeefbandpers (werkt discontinu). De boorproductie wordt bepaald door stilstand en capaciteit van de scheidingsinstallatie.

Kansen voor automatisering:

1. De fietstunnel moet sociaal-vriendelijk worden bekleed. Dit moet met behulp van 1,2 m brede panelen gebeuren. De tunnel zelf verloopt niet helemaal strak langs het alignement. De bekleding moet dat wel zijn. Daarom moet er een stelbaarheid zijn tussen de panelen en de tunnelwand. In verband met de vele herhalingen van dezelfde handelingen is dit een mogelijkheid voor automatisering.
2. De scheidingsinstallatie is van invloed op het hele proces. Met de scheidingsinstallatie is een hoop geld gemoeid. Een goedkoper alternatief is zeer welkom. Dit heeft echter minder met automatisering te maken.
3. In de literatuur zijn verschillende automatische erectors gepresenteerd. Op de vraag of dit mogelijk ook hier interessant is, wordt met scepsis gereageerd. De ervaring is dat een automatische erector zeker niet de boorproductie verhoogt. Het levert alleen maar een besparing van 1 operator op versus investering. Daarbij komt nog dat er een schakel met kans op storing in het seriële proces wordt toegevoegd, zodat de kans op stilstand alleen maar toeneemt.
4. Gevaarlijk werk: inspectie van de boortanden. Hiertoe wordt de slurryspiegel bij het boorfront tijdelijk verlaagd, zodat iemand via een luchtsluis in de drukkamer kan komen om de tanden te inspecteren en eventueel te vervangen. Bij deze situatie bestaat het risico

van een "blow out". De risico's zouden kunnen worden beperkt door een tijdelijke afscherming ter voorkoming van een "blow out" en inspectie door middel van lampen en camera's.

Een andere oplossing kan zijn het automatisch wisselen van de boortanden volgens een vaste wisselcyclus zonder eerst de tanden te inspecteren.

## Interview 5

Introductie geïnterviewden:

Ing. F. Pigmans      Bedrijfsleider (HWZ leidingen, NL).

Ing. B. Vanhout      Booringenieur (Smet-boring, B).

### *Ondergrondse bouwactiviteiten HWZ leidingen/Smet-boring*

HWZ Leidingen/Smet-boring beschikt over twee typen ondergrondse bouwmethoden voor sleufloze aanleg van ondergrondse leidingen. Deze zijn: "CBC-systeem" en "directional drilling".

Het CBC-boorsysteem maakt gebruik van een TBM die voorop de aan te leggen buis is aangebracht. De buis met TBM wordt vanuit een bouwput met behulp van vijzels door de grond gedrukt, terwijl de TBM de grond weggraaft en met water afvoert. De TBM is een zogenaamde "earth pressure balance machine" (EPB). Het CBC-systeem is geschikt voor stalen of betonnen buizen met een diameter tussen 0,60 en 3,20 m. Grotere diameter van de perstunnel is wel mogelijk (b.v. Europipe aanlanding 3,80 m). De begrenzing ligt bij een diameter van 4 à 5 m. De buiselementen worden dan te groot en te zwaar. In dat geval wordt de boortunnel op een andere wijze gebouwd: ringen bestaande uit segmenten. Afhankelijk van de diameter kunnen met het CBC-systeem lengten tot circa 1 km worden geboord. Met name bij de grotere diameters kunnen lengten boven de 1 km worden gehaald door het toepassen van perstussenstations en voldoende smering over de gehele tunnallengte.

De directional drilling-methode is een methode die is afgeleid van de technieken voor olie- en gaswinning. Bij directional drilling wordt met behulp van een met boorstangen aangedreven boorkop een gat geboord, waardoor na het boren een leiding wordt getrokken. Voor de afvoer van grond wordt bentoniet gebruikt. Het directional drilling-systeem is bruikbaar voor de aanleg van leidingen met een diameter tussen 0,10 en 1,00 m.

Losse opmerkingen:

- Er zijn in de afgelopen decennia geen significante ongelukken gebeurd met de besproken methoden. De methoden zijn relatief veilig.
- Het produkt dat met de CBC-methode wordt geproduceerd is van een hogere kwaliteit dan de directional drilling-methode.
- De sturing van de directional drilling-boorkop gebeurt op afstand aan de hand van aflezing van een inclinometer en een kompas.
- De "maatvoering" van het CBC-boorproces wordt automatisch gemeten met behulp van één of meer "tracking total-stations".
- Kleinere diameters (< 1,60 m) van CBC-geboorde tunnels kunnen minder lang worden door problemen met de bentonietsmering van de buis door het geboorde gat. Ook kunnen

er geen moeilijke bochten worden gemaakt. Immers de TBM is bij deze kleine diameter onbemand.

#### Kansen voor automatisering:

1. Op afstand en/of automatische besturing van de bentonietsmering van de buis in de CBC-methode is wenselijk.

Potentiële voordelen: Arbo: in kleinere buisdiameters is het handmatig bedienen van bentonietafsluiters een onaangenaam klusje door gebrek aan stahoogte. Economisch: (1) door betere bentonietsmering in ontoegankelijke buisdiameters zouden langere boorlengten mogelijk worden, (2) besparing op arbeid bij het boren van langere buizen.

#### *Opmerking:*

Bij de bouw van de aanlanding van de Europipe gasleiding bij Emden is een eerste aanzet gegeven voor het automatisch bentonietsmeersysteem. Elke 3 buiselement was voorzien van een injectiestuurventiel. Dit heeft goed gewerkt maar was wel erg duur.

2. Via het verder beveiligen van schakelvolgorde en grondsoortafhankelijke begrenzingen van de besturing zou langzamerhand in de toekomst (over 10 à 20 jaar) kunnen worden doorgegroeid naar een expertsysteem. Met behulp van een auto-pilotsysteem kan de besturing van het boorsysteem van een centraal punt boven de grond plaatsvinden. Dus geen operator bij de boorkop meer nodig (Arbo: lawaai, warmte, geen daglicht, geen toilet, enz.). Tot op heden zijn er echter genoeg mensen te vinden die geen problemen hebben om voorin bij de boorkop te zitten. (*Noot:* belangrijk is dat automatisering in kleine stapjes gebeurt, anders krijg je niet de medewerking van de mensen).

Voor de kleine buisdiameter is er een automatiseringsmarkt. Nu wordt veelal de directional drilling-methode toegepast omdat met de onbemande TBM voor de kleine perstunneeldiameter geen grote lengten kunnen worden gemaakt (probleem: smering) en de geringe sturingsmogelijkheden (correctie en/of moeilijke bochten maken). De directional drilling-methode heeft echter ook een aantal nadelen ten opzichte van de perstunnel. Daarom is het lonend om het onbemand boren te verbeteren.

3. Versnellen van het los/vastkoppelen van toe- en afvoerleidingen ten behoeve van het telkens tussenvoegen van een volgend buislement in de perskuip (economisch).

#### *Opmerking:*

Putzmeister heeft hiervoor een systeem ontwikkeld.

## Interview 6

### Introductie geïnterviewde:

Ir. S. van Rooyen      Projectleider (HBW) bij KSS.

Specialisme            Betrokken bij de bouw van de nieuwe Schiphol Spoortunnel.

De Combinatie Schiphol Spoortunnel (KSS) bestaat uit Hollandsche Beton- en Waterbouw en Strukton Betonbouw. Samen werken zij aan de verdubbeling van de Schiphol Spoortunnel. Deze tweede tunnel wordt grotendeels in open bouwput gebouwd.



### *De tunnelbouw in open bouwput*

De tunnelbouw omvat globaal de volgende stappen: (1) heien van damwanden, (2) heien van tunnelfundering, (3) ongraven en stempelen van bouwput, (4) storten van onderwaterbeton, (5) storten van tunnelvloer, (6) storten van tunnelwanden en dak, (7) afdekken van tunnel, (8) afbouw van tunnel en trekken van de damwanden.

#### Losse opmerkingen:

- Het process kan worden geoptimaliseerd door de stappen (2) en (3) om te draaien. Voordelen zijn dat er niet meer hoeft te worden ontgraven om de funderingspaalkoppen en de maatvoering van het funderen is veel gemakkelijker. Dit kan alleen als de heistelling op een traverse wordt bevestigd. De installatie van een traverse is kostbaar, zodat het alleen rendabel is wanneer het om grotere stukken tunnel gaat.
- Op KSS worden verschillende naast elkaar gelegen delen van de tunnel op totaal verschillende momenten gebouwd (er lijkt geen logische bouwvolgorde) door de interactie met de (bouw)activiteiten op schiphol.
- De logistiek van het project is nog te optimaliseren, maar door de "onlogische" bouwfaserings moeilijk.
- De snelheid van het betonstortwerk is niet bepaald door de inzet van materieel maar door de sterkte van de bekisting (maximale stijghoogte in verband met de betondruk op de bekisting)

#### Kansen voor automatisering:

- Schoonmaken van damwanden en paalkoppen onder water ter voorbereiding van het storten van onderwaterbeton. Dit wordt nu gedaan in onderaanneming te zamen met het grondwerk.  
Voordelen: besparing op de hoge kosten, onder water (duikers), risicovol: grote gevolgschade als de betonvloer lekt.
- Vlechten van wapening.  
Voordelen: Arbo: het vlechten van de wapening is zeer onaangenaam werk.
- Boren van stekken.  
Voordelen: onaangenaam werk dat veel voorkomt.
- Sloopwerk bij aansluitingen op bestaand werk.  
Kansen: onaangenaam werk, relatief gevaarlijk.
- Afbouwwerkzaamheden (aanleg voetpad: deksels in kabelgoot; bevestiging van leuning langs voetpad aan tunnelwand).  
Kansen: zeer veel herhaling; linear patroon van klussen; saaie klussen.  
Handige hulpmiddelen kunnen al een uitkomst bieden. Dit is echter aan de onderaannemer om het te ontwikkelen.

#### *Opmerking:*

De vorm van de tunnel is constant over een lengte van circa 4 km. Hierdoor zou een geïndustrialiseerde methode van "prefab" tunnelringen misschien mogelijk zijn. Met name de variatie in sparingen in deze tunnel is gering, wat een voordeel is.

BIJLAGE C  
MANIPULATOREN

**Datasheet Bouwrobots**

21

PRODUKT

Naam	Metselmanipulator
Functionele omschrijving	rijdend hefplatform met manipulatorarm
Ontwikkelaar	Moderntechnik/Steinherr (Duitsland)
Classificatie ontwikkelaar	leverancier
Volwassenheid	commercieel produkt
Jaar van ontwikkeling	1993

TOEPASSING

Toepassingsgebied	stenen metselen, stoepranden plaatsen
Toepassingsvoorbeelden	huizenbouw
Robot functionaliteit	stenen plaatsen, stenen op cement kloppen (trillen)

Voordelen:

- economisch voordeel	hogere produktiviteit (20 % - 40 % beter)
- arbeidsomstandigheden	lagere lichamelijke belasting (rug en knieën)
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	plaatsen van panelen en metselcementtoevoer met behulp van een pomp
Ideeën voor uitbreiding	verder automatiseren: zie "ROCCO" datasheet 19

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	2,5 x 1,66 x 2,66 m
Massa	1.3 ton
Kostenindicatie	f 60.000,--
Mobiliteit	wielen
Besturing	handmatig (bouwmanipulator)
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	ontwikkeling afgerond (zie "ROCCO")

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	Folder Moderntechnik/BMT, augustus 1993 (V.d. Bor)
Notulist	H.J. Berkhoff

PRODUKT

Naam	Metselrobot
Functionele omschrijving	automatische robotarm voor bouwen van muren met (kalkzandsteen) blokken
Ontwikkelaar	Esprit project ROCCO, ISW Stuttgart
Classificatie ontwikkelaar	samenwerkingsverband van: leveranciers, gebruikers, R & D organisaties
Volwassenheid	labopstelling met prototype
Jaar van ontwikkeling	1993 - 1997

TOEPASSING

Toepassingsgebied	bouwen van wanden met steenblokken
Toepassingsvoorbeelden	woningbouw, utiliteitsbouw
Robot functionaliteit	pick & place van stenen, aanbrengen van lijm-mortel
Voordelen:	
- economisch voordeel	besparing op arbeidskracht
- arbeidsomstandigheden	geen handmatig hanteren van zware stenen
- kwaliteit	-
Mogelijke inzet ondergronds bouwen	plaatsen van diverse componenten
Ideeën voor uitbreiding	-

UITVOERING

Afmetingen (l x b x h)	2,5 x 1,66 x 2,66 m
Massa	1,3 ton
Kostenindicatie	-
Mobiliteit	wielen
Besturing	automatisch aan de hand van CAD-tekeningen
Energievoorziening	elektrisch
Toekomstperspectief	-

**Opmerkingen**

-

**Bron**

Bron	BMT 3 en 4, 1993
Notulist	H.J. Berkhoff

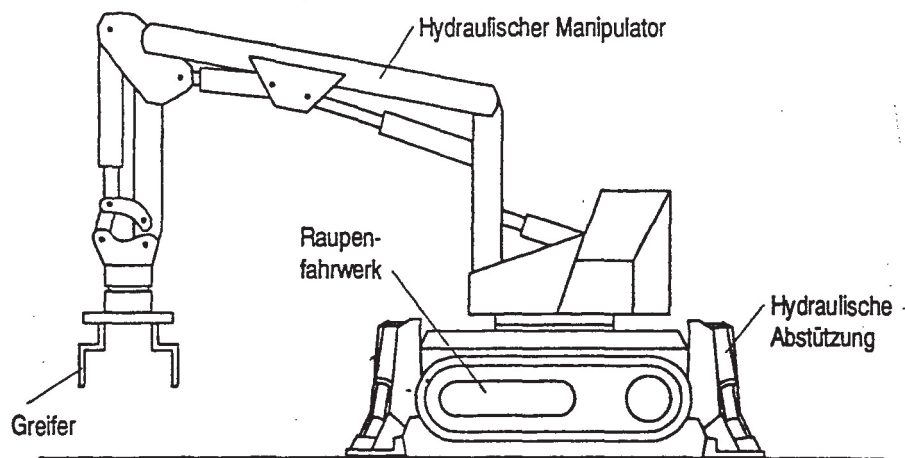


Fig. C1. Voorbeeld van een mobiele metselrobot.

## LITERATUUR

### *Bibliografie met betrekking tot de datasheets:*

- JIRA, The Specifications and Applications of Industrial Robots in Japan - Non Manufacturing Fields. Japan Industrial Robot Association, 1992.
- JIRA, The Specifications and Applications of Industrial Robots in Japan - Non Manufacturing Fields. Japan Industrial Robot Association, 1994.
- Wanner, M.C. and W. Poppy, eds., Proceedings of the 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Stuttgart, Germany: IPA FhG, 1991.
- Yoshino, T., ed., Proceedings of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Tokyo, Japan: Japan Industrial Robot Association, 1992.
- Chamberlain, D.A., ed., Automation and Robotics in Construction XI. Brighton, U.K.: Elsevier Science Publishers, 1994.
- Watson, G.H., R.L. Tucker and J.K. Walters, eds., Automation and Robotics in Construction X. Houston: Elsevier Science Publishers, 1993.
- Budny, E., A. McCrea and K. Szymanski, eds., Automation and Robotics in Construction XII. Warszawa, Poland: IMBiGS, 1995.
- Knasel, T.M. ed., Automation in Construction. Elsevier, Vol 1 (1993), 2 (1994), 3 (1995), 4 (1995).

### *Opgevraagde tijdschriftartikelen aan de hand van databankreferaten:*

- Theiner, I., Roboter mit automatischem Duesenführungssystem. Tunnel (1991), v. 9, no. 2.
- Maidl, B., K. Guthoff, T. Rolf und C. Gipperich, Verbesserung der Qualität von Spritzbeton durch den Einsatz von Spritzrobotern. Bauingenieur (1991), v. 66, no. 11.
- Maidl, B. und C. Gipperich, Spritzbetonroboter im Tunnelbau. BMT, Baumaschine und Bautechnik (1993), Jg. 40, no. 6.
- Momoshima, S., Robotisering in de Japanse betonbouw. Cement (1988), v. 40, no. 1.
- Verschuren, C., Makro-manipulators in de bouw. BMB-techniek Bouwmaterieel Benelux, no. 27, april 1994.
- Neuer Bohrroboter fuer schnellen, praezisen Tunnelvortrieb. Tunnel (1991), v. 10, no. 6.
- From manual to automatic control. Tunnels and Tunnelling, v. 27, no. 6, June 1995.
- Martin, D., Japanese robot can erect tunnel segments. Tunnels and Tunnelling, v. 22, no. 7, July 1990.
- Kakoto, Takao, Skibniewski and Miroslaw, Engineering decision support of automated shield tunnelling. Journal of Construction Engineering and Management, v. 117. no. 4, December 1991.
- Hellings, J., Contributing to a sound industry. Tunnels and Tunnelling, v. 25, no. 7, July 1993.
- Nozawa, T., F. Sato and N. Nishino, Development of Gyro Runner, a totally unmanned shield guiding system. Automation in Construction, v. 3, no. 1, May 1994.
- Tuunanen, A., Automation of hard rock drilling machines. Pit & Quarry, v. 86, no 7, January 1994.

- Barthes, H., A. Bordas, D. Bouillot, M. Buzon, Ph. Dumont, J. Fermin, J.C. Landry, J.P. Larive, L. Leblond, J.J. Morlot, L. Szytura, Ph. Vandebrouck and B. Viellard, Tunnels - driving. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Civil Engineering, v. 102, no. Suppl pt 1, 1994.
- Dewsnap, H., Automatic welding machine helps maintain bridge construction lead. Welding and Metal Fabrication, 62, 9 October 1994.
- Hellings, J., Monster machine to relieve Tokyo floods. Tunnels and Tunnelling, v. 26, no. 1, January 1994.
- Remmer, F., North Sea gas pipe jack pushes technology to the limit. Tunnels and Tunnelling, v. 27, no. 6, June 1995.
- Remmer, F., Anlandungstunnel der Gas-Pipeline Europipe. BMT Baumachine und Bautechnik (1995), Jg. 42, no. 6.
- Page, M., Difficult ground halts TBM. Tunnels and Tunnelling, v. 27, no. 6, June 1995.
- Tanaka, Y., Automatic segment assembly robot for shield tunnelling machine. Microcomputers in Civil Engineering, v. 10, no. 5, September 1995.
- Wollenick, K. und S. Cottbus, Automatisierung und Robotereinsatz im Bauwesen - eine Studie. Baumachine und Bautechnik, BMT 2, april 1995.
- Drees, G., G. Pritschow, M. Dalacker, J. Kurz und R. Töpfer, Steuerungssystem für einen mobilen Roboter für Mauerwerk, Baumachine und Bautechnik. BMT 3, juni 1993.
- Bock, T., F. Gebhart und W. Steck, Mauerwerksroboter auf der Baustelle. Baumachine und Bautechnik, BMT 4, augustus 1993.
- Hastak, Makarand, Skibniewski and J. Miroslaw, Automation potential of pipe laying operations. Automation in Construction, v. 2, no. 1, June 1993.
- Bradley, D., D. Seward, J. Mann and M. Goodwin, Artificial intelligence in the control and operation of construction plant-the autonomous robot excavator. Automation in Construction, v. 2, no. 3, December 1993.
- Skiniewski, J. Miroslaw, Kunigahalli, Raghavan, Russell and S. Jeffrey, Managing multiple construction robots with a computer. Automation in Construction, v. 2, no. 3, December 1993.
- Poppy, W., Driving forces and status of automation and robotics in construction in Europe. Automation in Construction, v. 2, no. 4, April 1994.
- Nakamaru, E., T. Kondo T. and A. Teramoto, The design and operation of a dredging robotsystem. WODA, Proceedings of the XIIIth World Dredging Congress WODCON, 7-10 April 1992, Bombay, India.
- Remotely Operated Vehicles of the World. Oilfield Publications Ltd., England, edition 1994-1995.

*Overige literatuurreferenties:*

- Glerum, A., A. van Dam, H. van Dijk, L. v.d. Heydt, H. Smeek, Ch.J. Vos, en W. Niemeyer, Kostenaspecten tunnelbouw. Koninklijk Instituut van Ingenieurs, sectie voor tunneltechniek, 1973.
- Vermeulen, I., Robots in the Benelux, Statistical Report. Stesa, Bilthoven, 1995.