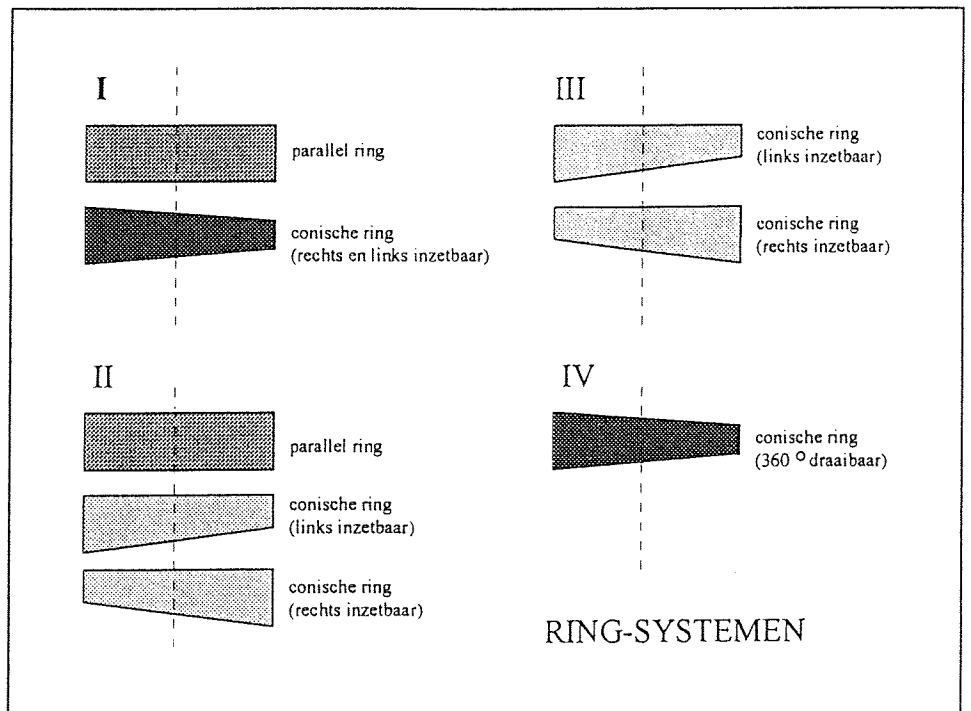


# De Logistiek van de Bouw van een Boortunnel

Optimalisatie van de geometrische vorm van een ring en het aantal ringen in een ringsysteem

juli 1997

Martijn Kwant

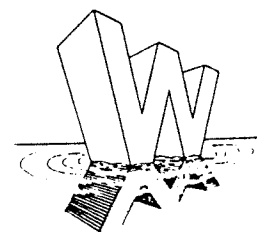


VERMEER GROND EN WEGEN BV

**TU Delft**

Technische Universiteit Delft

**Faculteit der Civiele Techniek**  
Vakgroep Waterbouwkunde  
Sectie Waterbouwkunde





# De Logistiek van de Bouw van een Boortunnel

## Optimalisatie van de geometrische vorm van een ring en het aantal ringen in een ringsysteem

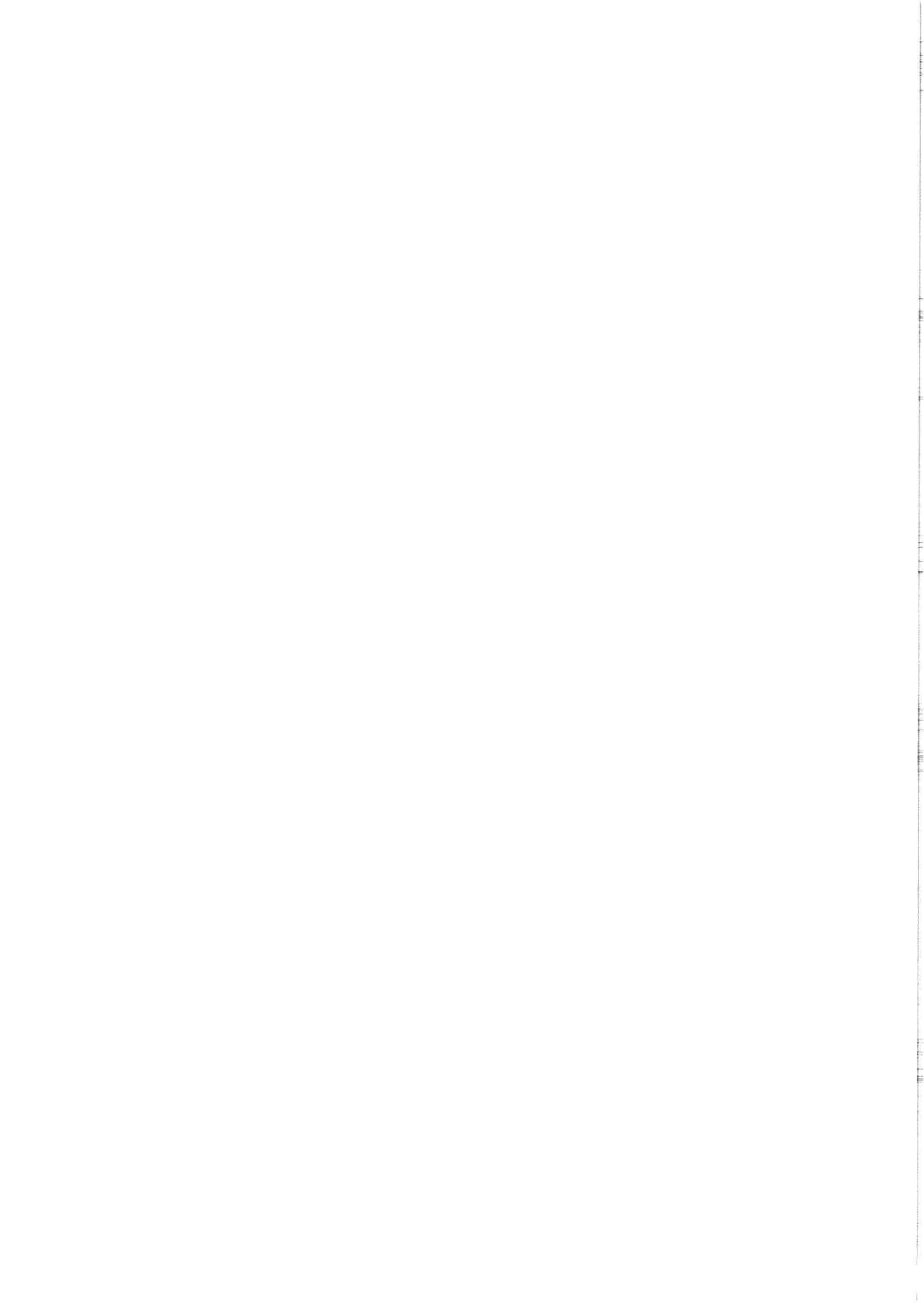
Eindrapport van het afstudeeronderzoek  
Definitieve versie, revisie 4  
Delft / Hoofddorp, 15 juli 1997  
Technische Universiteit Delft  
Faculteit der Civiele Techniek  
Vakgroep Waterbouwkunde

### Afstudeercomissie

Prof.drs.ir. J.K. Vrijling	:	Vakgroep Waterbouwkunde
ir. K.J. Bakker	:	Vakgroep Waterbouwkunde
ir. T.H.W. Horstmeier	:	Vakgroep Bouwtechniek en Bouwproces
dhr. J. Spaargaren	:	Spaargaren Advies- en Management Bureau B.V.

### Auteur

Martijn Kwant  
Van Almondestraat 46-1  
2614 EZ delft  
015-2137466



## VOORWOORD

Met een aantal grote boortunnelprojecten in het vooruitzicht neemt het onderzoek naar boortechologie in Nederland een hoge vlucht. In het buitenland, met name in Duitsland en Japan, zijn reeds veel boortunnels gerealiseerd omdat de grondomstandigheden in deze landen over het algemeen gunstiger zijn dan in Nederland. Door voortdurende technologische ontwikkeling is het aanleggen van boortunnels in de Nederlandse ondergrond nu binnen bereik gekomen.

Een groot deel van het Nederlandse onderzoek richt zich logischerwijs op het gedrag van de TBM en de lining in de slappe bodem. Maar door een gebrek aan ervaring met boren zijn er veel meer gebieden waar de bekendheid van Nederlanders met de boortechologie tekort schiet. Tijdens mijn afstudeeronderzoek heb ik mij bezig gehouden met een onderwerp dat over de grens reeds bekend is maar daar wordt beschouwd als het geheim van de smid. Ik hoop met dit afstudeeronderzoek een bijdrage te hebben geleverd aan het vergroten van de kennis op het gebied van het boren van tunnels in Nederland.

Het afstudeeronderzoek heb ik uitgevoerd bij Vermeer Grond en Wegen B.V. Ik had de wens niet alleen heel gedetailleerd en technisch bezig te willen zijn tijdens mijn afstuderen. Daarom heb ik de zomermaanden gebruikt om een haalbaarheidsstudie te doen naar een infrastructuurproject dat Vermeer wil uitvoeren. Vervolgens heb ik in overleg met Vermeer, en de afstudeercommissie besloten me verder te verdiepen in de logistiek van de bouw van een boortunnel, dit sloot namelijk goed aan bij het onderzochte infrastructuurproject.

Middels een literatuurstudie is het onderwerp komen vast te staan waarmee ik de nodige diepgang in mijn onderzoek heb willen brengen. Uit de literatuur kon ik namelijk niet afleiden hoe het aantal typen ringen in een ringsysteem kan worden bepaald. Ik heb onderzocht welke factoren bij deze keuze een rol spelen en hoe dit aantal kan worden bepaald.

Ik wil op deze plaats een aantal mensen bedanken die een bedrage hebben geleverd aan de totstandkoming van dit rapport. Allereerst wil ik mijn begeleider dhr. J Spaargaren van Spaargaren Advies- en Management bureau B.V. bedanken voor zijn sturing, zijn adviezen en voor de interessante discussies die ik met hem heb gevoerd. Verder dank ik de overige leden van mijn afstudeercommissie dhr. J.K. Vrijling, dhr. K.J. Bakker en dhr. T.H.W. Horstmeier. Zij hebben vaak tussentijds mijn werk beoordeeld en mij tevens voorzien van belangrijke informatie en adviezen. Ook wil ik Klaas Jan Bos bedanken voor de tijd heeft genomen om mijn verslag te lezen en te voorzien van commentaar.

Tenslotte wil ik Anélie en mijn ouders bedanken voor al hun ondersteuning!

Hoofddorp, 17 april 1997

Martijn Kwant



## SAMENVATTING

### INLEIDING

Uit literatuuronderzoek is gebleken dat bij boortunnelprojecten gebruik wordt gemaakt van verschillende ringsystemen. In het ene project worden veel verschillende ringtypes gebruikt terwijl bij andere projecten wordt volstaan met één á twee typen ringen. Het verschil tussen de typen ringen zit in de geometrie, de ringen hebben een verschillende tapsheid. Vanuit logistiek oogpunt is het gebruik van zo min mogelijk ringen aan te bevelen. Het literatuuronderzoek heeft geen argumenten opgeleverd die de vraag beantwoorden waarom gekozen wordt voor een bepaald ringsysteem. Daarom is besloten te onderzoeken welke argumenten ten grondslag kunnen liggen aan deze keuze.

### DOEL VAN HET ONDERZOEK

Gebleken is dat bochten en afwijkingen aanleiding kunnen zijn voor het toepassen van tapse ringen omdat met rechte ringen richtingsveranderingen niet mogelijk zijn. Tapse ringen doen de lining van een boortunnel van richting veranderen zodat de TBM goed kan worden gevolgd. Hierdoor is het mogelijk binnen de gestelde toleranties te blijven. Het doel van dit onderzoek is:

Onderzoeken of een afwijking of een combinatie van afwijkingen leidt tot overschrijding van de tolerantie voor verschillende ringsystemen met als doel het vinden van het minst ingewikkelde ringsysteem dat nog voldoet.

Feitelijk heeft het onderzoek een ontwerpmethodiek opgeleverd waarmee het optimale ringsysteem voor een tunnelboorproject kan worden bepaald. Optimaal in dit kader wil zeggen: Het ringsysteem waarbij een optimalisatie is gemaakt tussen de kans op overschrijden van de toleranties maal de kosten van de overschrijding en de extra kosten die gemoeid zijn met het verkleinen van de kans op overschrijden van de toleranties. Binnen de risico-analyse van een boortunnelproject kan deze afweging een plaats krijgen.

### GEBRUIKTE GEGEVENS

Het was noodzakelijk gegevens te verzamelen voordat met het feitelijke onderzoek kon worden begonnen. De volgende gegevens zijn verzameld:

#### *Mogelijkheden van een ringsysteem:*

Vastgesteld is dat een ring correctiemogelijkheden heeft. Deze mogelijkheden ontstaan doordat een ring taps is waardoor de lining van richting kan worden veranderd. Doordat een ring verschillende inbouwposities heeft kan de mate van correctie naar behoefte worden gevarieerd.

#### *Afwijkingen:*

Tijdens de uitvoering kunnen door verschillende oorzaken afwijkingen ontstaan tussen de gewenste positie van de lining en de TBM en de werkelijke positie. De volgende afwijkingen worden behandeld:

1. Richtingsverandering van de TBM door wrijvingsverschillen langs het schild.
2. Verschil in positie tussen het draaipunt van de TBM en de staart.
3. Plaatsfout door onnauwkeurigheid van de erector.
4. Toename van alle afwijkingen door vooruitrekenen wat noodzakelijk is in verband met de aanvoertijd van segmenten naar de TBM.
5. Ovaliseren van lining en schild.

#### *Toleranties*

Twee toleranties zijn van belang tijdens de uitvoering:

1. De maximale afwijking van de lining van de theoretische as.
2. De omvang van de luchtmaten, dat is de speling tussen de buitenkant van de lining en de binnen kant van het schild.

## **ONTWERP TAPSE RING**

Om de positie van de TBM en de lining te kunnen beschrijven zijn geometriemodellen opgesteld. Middels deze modellen en de afwijkingen, die zijn meegenomen in het onderzoek, is het verwachte positieverschil en de spreiding van het positieverschil tussen de TBM en de lining bepaald. Gebleken is dat de benodigde tapsheid van een ring kon worden gerelateerd aan dit positieverschil. De optimale waarde voor de tapsheid werd gevonden bij twee maal de spreiding van het positieverschil omdat bij deze waarde de kans op overschrijden van de luchtmaat het kleinst is.

## **INVLOED VAN OMSTANDIGHEDEN**

Er zijn verschillende omstandigheden aan te wijzen die van invloed zijn op het ontwerp van het ringsysteem:

### *Invloed van het vooruitrekenen*

Doordat er sprake is van een levertijd van segmenten aan de TBM zal een ring over het algemeen vooruit worden besteld. Hiervoor is het noodzakelijk dat een prognose wordt gemaakt van de ring die over de transporttijd gerekend nodig is. Het gevolg van dit vooruitrekenen is dat afwijkingen die optreden tussen het moment van bestellen en het moment van leveren niet kunnen worden gecorrigeerd door de bestelde ring. Het vooruitrekenen doet het positieverschil tussen de TBM en de lining dus toenemen en daarmee de kans op overschrijden van de luchtmaat.

### *Invloed van bochten en correctiecurves*

Voor het maken van bochten en correctiecurves is een deel van de tapsheid van de ring nodig. Het gevolg is dat dit deel van de tapsheid niet meer gebruikt kan worden om de lining de TBM te laten volgen. De kans op overschrijden van de luchtmaat wordt hierdoor groter. Gebleken is dat bij flauwe bochten de toename van de overschrijdingskans niet zo groot is. Bij krappe bochten neemt deze kans echter snel toe. Is de kans op overschrijden niet meer acceptabel dan moet een extra type ring worden gemaakt speciaal voor het maken van de bocht.

### *Invloed 2D modellering*

De invloed van de keuze die is gemaakt tweedimensionaal te modelleren is niet zo groot. De bepaling van de tapsheid van de ring verloopt in een 3D model precies hetzelfde. Wel moet nu rekening worden gehouden met ovalisatie van de TBM en de lining. Ovalisatie heeft namelijk een ongunstig effect op de omvang van de luchtmaten en daarmee op de kans op overschrijden.

### *Koers van de TBM*

De TBM ondervindt tijdens het verplaatsen een ongewenste richtingsverandering door wrijvingsverschillen langs het schild. Hierdoor wordt van de theoretische as afgeweken. Correctiecurves maken het mogelijk de afwijking van de TBM van de theoretische as te beperken zodat binnen een vooraf vastgestelde tolerantie kan worden gewerkt. De straal die zo'n curve mag hebben is afhankelijk van het ontwerp van de tapse ring. Er is een strategie ontwikkeld waarbij pas bij een bepaalde afwijking van de theoretische as een correctiecurve wordt uitgevoerd zodat niet altijd hoeft te worden gecorrigeerd.

## **CONCLUSIE**

Met de ontwikkelde ontwerpmethode uit dit rapport kan binnen de risico-analyse van een specifiek boorproject worden bepaald wat het optimale ringsysteem is voor de uitvoering. Dit ringsysteem bestaat in ieder geval uit één tapse ring met een tapsheid die is gerelateerd aan de te verwachten afwijkingen. Indien economisch verantwoord telt het ringsysteem extra ringen voor het maken van bochten en correctiecurves.



## SYMBOLENLIJST

- $\Delta x$  = Verplaatsing in de x-richting, dit is de voortgang van de boormachine.  
 $\Delta y$  = Verplaatsing in de y-richting, dit is de afwijking van het theoretisch alignement in horizontale richting  
 $\phi$  = Rotatie om de fictieve z-as, dit is de richting van de TBM in het x-y vlak.
- $t_{ring}$  = Tapsheid van een ring  
 $t_{bocht}$  = Tapsheid benodigd om een bocht te maken  
 $B_{ring}$  = Breedte van een ring  
 $D_{ring}$  = Diameter van een ring  
 $R_{boog}$  = Boogstraal van een bocht of correctiecurve  
 $CL_{max}$  = Maximale correctielengte die mogelijk is met een tapse ring  
 $\Delta CL$  = Het correctielengte verschil tussen twee opeenvolgende posities.  
 $c$  = Het verschil tussen de maximale correctielengte op het rechte deel van het alignement en de maximale correctielengte op het deel met een bocht.  
 $a$  = Factor  $d/\Delta L$   
 $\Delta L$  = Lengte van een cyclus (breedte van een ring)  
 $\Delta Y$  = Verschil tussen de positie van het draaipunt van de TBM en de staart  
 $d$  = Afstand tussen het draaipunt van de TBM en de staart  
 $n$  = Aantal ringen dat vooruit gerekend wordt  
 $Lu$  = Grootte van de luchtmaat  
 $O$  = Wijziging van de omvang door ovaliseren  
 $Z$  = Waarde die in de normale verdelingstabel moet worden opgezocht
- $Y_i$  = Positie TBM of lining na verplaatsen  
 $R_{i-1}$  = Richting TBM voor verplaatsen  
 $R_{V_i}$  = Richtingsverandering tijdens verplaatsen  
 $CL_{ringi}$  = Correctielengte van een volgende ring  
 $SP_i$  = Afwijking door slordig plaatsen van de nieuwe ring  
 $Rb_i$  = De opgelegde richtingsverandering van de TBM voor het maken van een correctiecurve
- $\mu_{tbm}$  = Verwachtingswaarde van de positie van de TBM  
 $\sigma_{tbm}$  = Spreiding van de positie van de TBM  
 $\mu_{lining}$  = Verwachtingswaarde van de positie van de lining  
 $\sigma_{lining}$  = Spreiding van de positie van de lining  
 $\mu_{passing}$  = Verwachtingswaarde van de pasfout  
 $\sigma_{passing}$  = Spreiding van de pasfout  
 $\mu_{pos.vers.}$  = Verwachtingswaarde van het positieverschil  
 $\sigma_{pos.vers.}$  = Spreiding van het positieverschil



# INHOUDSOPGAVE

<b>VOORWOORD.....</b>	<b>III</b>
<b>SAMENVATTING.....</b>	<b>V</b>
<b>SYMBOLENLIJST.....</b>	<b>VII</b>
<b>INHOUDSOPGAVE.....</b>	<b>IX</b>
<b>1. INLEIDING.....</b>	<b>1</b>
1.1 INLEIDING.....	1
1.2 HET STUDIEGEBIED: DE SEGMENTENSTROOM.....	1
1.3 PROBLEEM- EN DOELSTELLING.....	2
1.4 UITGANGSPUNTEN.....	3
1.5 OPZET VAN DE STUDIE.....	4
1.6 INDELING VAN HET RAPPORT.....	5
<b>2. DE PRACTIJK: WERKWIJZE MAATVOERING TIJDENS BOREN.....</b>	<b>7</b>
2.1 INLEIDING.....	7
2.2 VOORBEREIDINGEN START.....	7
2.3 HET BOORPROCES.....	8
2.4 DE KOERS VAN DE TBM.....	9
2.5 CONCLUSIE.....	12
<b>3. BESCHRIJVING VAN RINGSYSTEMEN.....</b>	<b>13</b>
3.1 INLEIDING.....	13
3.2 VORM VAN EEN RING.....	13
3.3 VORM VAN DE SEGMENTEN.....	15
3.4 INBOUWPOSITIES.....	16
3.5 CORRECTIE MOGELIJKHEDEN.....	16
3.6 OVERZICHT VAN RINGSYSTEMEN.....	17
3.7 BEPERKING.....	19
<b>4. VRIJHEIDSGRADEN VAN TBM EN LINING.....</b>	<b>21</b>
4.1 INLEIDING.....	21
4.2 ASSSENSTELSEL.....	21
4.3 VRIJHEIDSGRADEN VAN DE TBM EN LINING.....	21
4.4 THEORETISCH ALIGNEMENT.....	22
4.5 KEUZE VAN HET RINGTYPE.....	23

<b>5. AFWIJINGEN EN TOLERANTIES</b> .....	<b>25</b>
5.1 INLEIDING.....	25
5.2 INDELING VAN DE AFWIJINGEN.....	25
5.3 VETERGANG VAN DE BOORMACHINE.....	26
5.4 VERPLAATSEN VAN DE BOORMACHINE LOODRECHT OP DE TUNNELAS.....	29
5.5 MEETFOUT IN DE PLAATSBEPALING VAN DE TBM.....	30
5.6 VERSCHIL POSITIE DRAAIPUNT TBM EN STAART.....	31
5.7 FOUT DOOR OVALISEREN.....	32
5.8 PLAATSFOUT SEGMENTEN DOOR ONNAUWKEURIGHEID ERECTOR.....	33
5.9 FOUT IN DE AFMETINGEN VAN DE SEGMENTEN.....	34
5.10 FOUT DOOR VERKEERD INBOUWEN VAN EEN RING.....	38
5.11 FOUT DOOR VOORUITREKENEN.....	38
5.12 TOLERANTIES.....	39
5.13 AFBAKENING VAN HET AANTAL AFWIJINGEN.....	39
<b>6. HET POSITIEVERSCHIL TUSSEN DE TBM EN DE LINING</b> .....	<b>41</b>
6.1 INLEIDING.....	41
6.2 GEOMETRIEMODELLEN VOOR DE TBM.....	41
6.3 VERWACHTING EN SPREIDING VAN DE POSITIE VAN DE TBM.....	43
6.4 GEOMETRIEMODEL VOOR DE LINING.....	46
6.5 VERWACHTING EN SPREIDING VAN DE POSITIE VAN DE LINING.....	47
6.6 POSITIEVERSCHIL TUSSEN DE TBM EN DE LINING.....	47
6.7 CONTROLE VAN HET COMUTERMODEL.....	49
<b>7. ONTWERP VAN DE TAPSE RING</b> .....	<b>55</b>
7.1 INLEIDING.....	55
7.2 EFFECT VAN EEN CORRECTIE MET EEN TAPSE RING.....	55
7.3 PASFOUT.....	56
7.4 PASFOUT IN HET MODEL.....	60
7.5 KEUZE VAN DE TAPSHEID VAN EEN RING.....	61
7.6 GEBRUIK VAN INBOUWPOSITIES.....	65
7.7 HET GEBRUIK VAN MEER DAN ÉÉN RING.....	66
7.8 CONCLUSIES EN OVERZICHT.....	70
<b>8. INVLOED VAN VOORUITREKENEN OP TAPSHEID VAN RING</b> .....	<b>71</b>
8.1 INLEIDING.....	71
8.2 PROGNOSE VAN DE POSITIE VAN DE TBM.....	71
8.3 PROGNOSE VAN DE POSITIE VAN DE STAART VAN DE TBM.....	72
8.4 PROGNOSE VAN DE POSITIE VAN DE LINING.....	77
8.5 VOORUITREKENEN TOTAAL.....	78
<b>9. INVLOED BOCHTEN EN CORRECTIECURVES OP TAPSHEID VAN RING</b> .....	<b>81</b>
9.1 INLEIDING.....	81
9.2 INVLOED VAN EEN BOCHT.....	81
9.3 STRATEGIEËN VOOR HET BOREN VAN EEN BOCHT.....	85
9.4 INVLOED VAN EEN CORRECTIECURVE.....	87
9.5 COMBINATIE BOCHT EN CORRECTIECURVE.....	90
<b>10. INVLOED TAPSHEID RING OP KOERS VAN DE TBM</b> .....	<b>93</b>
10.1 INLEIDING.....	93
10.2 EFFECTEN VAN EEN CORRECTIECURVE OP DE KOERS.....	93
10.3 WERKWIJZE CORRIGEREN.....	95
10.4 SAMENVATTING.....	99
<b>11. 3D ONTWERP TAPSE RING</b> .....	<b>101</b>
11.1 INLEIDING.....	101
11.2 3D BEREKENINGEN.....	101
11.3 EXTRA AFWIJINGEN 3D.....	103

---

<b>12. OVERZICHT ONTWERP METHODE .....</b>	<b>107</b>
12.1 INLEIDING .....	107
12.2 STROOM-SCHEMA .....	107
12.3 EINDRESULTAAT .....	109
12.4 BEPERKINGEN .....	110
<b>13. CONCLUSIES.....</b>	<b>111</b>
13.1 INLEIDING .....	111
13.2 AFWIJINGEN EN TOLERANTIES .....	111
13.3 TAPSHEID VAN DE RING EN PASFOOT .....	111
13.4 BOCHTEN EN CORRECTIECURVES.....	112
13.5 VAN 2D NAAR 3D .....	112
13.6 KEUZE RINGSYSTEEM.....	113
<b>14. AANBEVELINGEN.....</b>	<b>115</b>
14.1 INLEIDING .....	115
14.2 ONAFHANKELIJKE AFWIJINGEN .....	115
14.3 GROOTTE VAN DE AFWIJINGEN .....	115
14.4 DE KOERS VAN DE TBM.....	115
<b>LITERATUUR.....</b>	<b>117</b>

**BIJLAGEN: FORMULEBLAD (overzicht van gebruikte formules)**

**Logistiek van de Bouw van een Boortunnel, Literatuur Studie**

**De Verbinding van de A6 en de A9, rapport januari 1997**



## 13. CONCLUSIES

### 13.1 INLEIDING

De doelstelling van dit onderzoek was: onderzoeken of een afwijking of een combinatie van afwijkingen leidt tot overschrijding van de toleranties voor verschillende ringsystemen met als doel het vinden van het minst ingewikkelde ringsysteem. In dit hoofdstuk zullen de bevindingen van deze studie kort worden weergegeven.

### 13.2 AFWIJINGEN EN TOLERANTIES

Verschillende mechanismen kunnen er voor zorgen dat een boortunnel project ten aanzien van de maatvoering niet zo verloopt als gepland. In het rapport zijn als belangrijkste veroorzakers van deze afwijkingen genoemd:

1. De vetergang van de boormachine. (Richtingsafwijking van de boormachine)
2. Verschil tussen de positie van de TBM en de Staart.
3. Plaatsfout door onnauwkeurigheid van de erector
4. Fout door ovaliseren van schild en/of lining
5. Fout door vooruitrekenen. (i.v.m. transporttijd)

De afwijkingen kunnen leiden tot overschrijding van toleranties indien ze niet worden gecorrigeerd. Er is sprake van een tweetal toleranties:

1. De maximale afwijking van de lining ten opzichte van de theoretische as.
2. De omvang van de luchtmaat.

De twee toleranties hebben een verschillende achtergrond. De eerste eis waarborgt de kwaliteit van het eindproduct en is een eis die over het algemeen door de opdrachtgever wordt opgelegd. De tweede eis is een uitvoeringseis en heeft te maken met de manier waarop een aannemer te werk gaat en het risico dat hij wil nemen.

Uit het onderzoek is gebleken dat feitelijk alleen de richtingsafwijking van de TBM van belang is voor de eerste tolerantiegrens. Indien er geen richtingsafwijking zou zijn dan zou de TBM precies het theoretisch alignement volgen.

Alle afwijkingen samen zijn van toepassing op de tweede tolerantiegrens, de grootte van de luchtmaat.

### 13.3 TAPSHEID VAN DE RING EN PASFOUT

Uit het onderzoek is gebleken dat op een recht alignement in een 2D model volstaan kan worden met het gebruik van één type ring. Het ringsysteem bestaat dan uit één tapse ring met een aantal inbouwposities.

De tapsheid van deze ring is een functie van de gecombineerde afwijkingen die optreden: het positie verschil genoemd. De optimale waarde voor de tapsheid wordt gevonden met de volgende relatie:

$$t_{ring} = \frac{2 \cdot \sigma_{pos.vers.} \cdot D_{ring}}{B_{ring}} \quad [ 10.4 ]$$

waarin:

$t_{ring}$  = Tapsheid van de ring

$\sigma_{pos.vers.}$  = Spreiding van het positie verschil zoals dat berekend wordt via formule [ 10.1 ]

$D_{ring}$  = Diameter van de ring

$B_{ring}$  = Breedte van de ring

De optimale waarde van de tapsheid houdt in dat bij deze waarde het positieverschil het kleinst is en dus de overschrijdingskans van de luchtmaat is geminimaliseerd

De gecombineerde afwijkingen vormen samen het positieverschil tussen de TBM en de lining. In het positieverschil zijn verwerkt de verwachting en spreiding van de TBM en de lining. Tevens wordt in de relatie een pasfout meegenomen.

De pasfout is dat deel van een afwijking dat niet kan worden gecorrigeerd omdat de correctielengte van een tapse ring niet precies overeenkomt met de grootte van de afwijking.

### 13.4 BOCHTEN EN CORRECTIECURVES

Indien een bocht is opgenomen in het alignement dan heeft deze bocht een negatieve invloed op de overschrijdingskans van de luchtmaat indien een ringsysteem met één ring wordt gebruikt. Of de bocht een dusdanig grote invloed heeft op de overschrijdingskans dat deze onacceptabel wordt kan worden berekend door te bepalen welke deel van de tapsheid van de ring gebruikt moet worden om de bocht te maken. Hoe krappere de bocht hoe groter het deel van de tapsheid dat voor de bocht nodig is. Hierdoor wordt het negatieve effect sterker.

In het rapport zijn vier strategieën behandeld waarmee een bocht kan worden aangepakt:

1. De groter overschrijdingskans in de bocht wordt geaccepteerd.
2. De bocht wordt als maatgevend beschouwd. De grotere overschrijdingskans op het rechte stuk wordt geaccepteerd.
3. Er wordt een compromis gezocht waarbij de overschrijdingskans in de bocht gelijk is aan de overschrijdingskans op het rechte gedeelte.
4. Voor een bocht wordt apart een ring gefabriceerd zodat de overschrijdingskans over het hele traject minimaal is.

Welke strategie wordt gekozen hangt af van de grootte van de afwijkingen, de grootte van de luchtmaat en de straal van de bocht.

Een correctiecurve is eigenlijk niets anders dan een bocht. Het verschil is dat een correctiecurve vaak korter is dan een bocht en dat van te voren niet te zeggen is waar de curves zullen optreden. In het rapport is een grens aanbevolen voor de straal van een correctiecurve. De grens is afhankelijk van de breedte van de toegepaste ring, het positieverschil en of er een bocht in het alignement voorkomt:

$$R_{boog} = \frac{B_{ring}^2}{(0,5 - c)\sigma_{pos.vers.}} \quad [ 12.7 ]$$

waarin:

c = Het verschil tussen de maximale correctielengte op het rechte deel van het alignement en de maximale correctielengte op het deel met een bocht.

In het rapport is opgemerkt dat de grens niet hard is. Mocht de overschrijdingskans van de luchtmaat erg klein zijn zelfs als een correctiecurve en een bocht voorkomen dan mag de boogstraal kleiner worden gekozen dan is vermeld.

### 13.5 VAN 2D NAAR 3D

Indien van een 2D model naar een 3D model wordt overgegaan moet rekening gehouden worden met een reductie van het aantal correctielengtes van een ring omdat een correctie in het horizontale vlak ook een correctie in houdt in het verticale vlak. Per ring is nog maar één correctielengte beschikbaar. Het gevolg is dat bij gebruik van één type tapse ring een aparte benadering van het positieverschil moet worden gemaakt omdat de methode uit het 2D model niet meer gebruikt kan worden door de grotere invloed van de pasfout.

Voor ringsystemen met meer dan één type ring kan wel weer de 2D methodiek worden gebruikt omdat de invloed van de pasfout bij twee ringen gereduceerd is tot 11% zodat de gemaakte fout relatief klein is. Voor deze ringsystemen geldt dat grootte van de afwijkingen gelijk blijven en daarmee ook de tapsheid van de ring die nodig is.



Ook is er sprake van extra afwijkingen die kunnen optreden. In de 3D situatie moet rekening gehouden worden met :

1. Sterke afwijkingen van de TBM bij grondlaagovergangen en in extreem slappe grond.
2. Ovaliseren

In het rapport wordt voorgesteld de eerste afwijking te behandelen als ware het een zeer krappe bocht die de TBM maakt. De strategieën die genoemd zijn voor een bocht kunnen ook op deze afwijking worden toegepast. Vervolgonderzoek naar dit verschijnsel is noodzakelijk.

Het ovaliseren heeft een effect op de omvang van de luchtmaten. Rondom de TBM zullen de maten niet meer even groot zijn. In de kansberekening moet hier rekening mee worden gehouden. De overschreidingskans in het horizontale en verticale vlak moeten apart worden berekend.

### 13.6 KEUZE RINGSYSTEEM

Met de ontwikkelde ontwerpmethodede is het mogelijk voor een willekeurig boorproject het optimale ringsysteem te bepalen. Hiermee is de doelstelling uit hoofdstuk 1 bereikt.

Onder een optimaal ringsysteem in de bovenstaande formulering wordt verstaan: Het ringsysteem waarbij een optimalisatie is gemaakt tussen de kans op overschrijden van de luchtmaat maal de kosten van de overschrijding in en de extra kosten die gemoeid zijn met het verkleinen van de kans op overschrijden van de luchtmaat. Binnen de risico-analyse van een boortunnelproject kan deze afweging een plaats krijgen.

Het optimale ringsysteem zal per boorproject verschillen zoals blijkt uit de bovenstaande formulering. In het algemeen geldt voor een optimaal ringsysteem:

1. Op een recht alignement is het optimaal één ring te gebruiken. De tapsheid is hierbij afhankelijk van de verwachte afwijkingen.
2. Op een recht alignement met een bocht met  $R \gg$  afwijkingen is waarschijnlijk nog steeds één ring optimaal. De tapsheid is ook hier afhankelijk van de verwachte afwijkingen.
3. Op een recht alignement met bocht met  $R \leq$  afwijkingen is naar verwachting twee ringen optimaal. Eén ring voor het rechte deel waarbij de tapsheid afhankelijk is van de verwachte afwijkingen. De andere ring voor de bocht waarbij de tapsheid afhankelijk is van de bocht en de verwachte afwijkingen.



## 14. AANBEVELINGEN

### 14.1 INLEIDING

De in dit onderzoek ontwikkelde ontwerpmethode biedt de mogelijkheid binnen de risico-analyse van een boorproject te komen tot een optimaal ontwerp van een ringsysteem. Er zijn echter wel enkele aannames gedaan waardoor voorzichtigheid is geboden bij het toepassen van deze methode. In dit hoofdstuk worden enkel aanbevelingen gedaan die kunnen leiden tot verbetering van de ontwikkelde methode.

### 14.2 ONAFHANKELIJKE AFWIJKINGEN

In het onderzoek is er van uitgegaan dat alle afwijkingen die optreden onafhankelijk zijn van. Hierdoor was op betrekkelijk eenvoudige wijze het positieverschil af te leiden omdat gesteld kon worden dat alle afwijkingen die optreden normaalverdeeld zijn. Als eerste aanzet tot het bepalen van het positieverschil en als opstap om onderlinge relaties in beeld te brengen is dit een goede methode.

Het is echter mogelijk dat de afzonderlijke afwijkingen wel gedeeltelijk gecorreleerd zijn. Dit heeft dan effect op de grootte van het positieverschil. Er mag niet zomaar meer worden aangenomen dat de afwijkingen allemaal normaalverdeeld zijn. Een voorbeeld in dit kader is de richtingsverandering die de TBM ondergaat door wrijvingsverschillen langs de wand.

Stel dat de boormachine in cyclus één in een bepaalde richting afwijkt. Het klinkt dan helemaal niet onlogisch dat de afwijking in de tweede cyclus ongeveer even groot is en dezelfde richting heeft als in de vorige cyclus omdat de grondomstandigheden langs het schild door de kleine verplaatsing nagenoeg hetzelfde zijn gebleven. De TBM heeft nu wel een voorkeur voor een bepaalde richtingsverandering. In dat geval mag niet zonder meer worden aangenomen dat de richtingsverandering door wrijving langs het schild een normaleverdeling heeft.

De eerste aanbeveling is dat onderzocht moet worden in hoeverre afwijkingen aan elkaar gecorreleerd zijn. Is dit het geval dan moet de ontwerpmethodiek op dit punt worden aangepast.

### 14.3 GROOTTE VAN DE AFWIJKINGEN

In het onderzoek zijn aannames gedaan omtrent de grootte van de afwijkingen die in het onderzoek zijn meegenomen. De aannames zijn gebaseerd op enkele artikelen en rapporten. Gebleken is dat er nog veel onduidelijkheid bestaat omtrent de grootte van deze afwijkingen. Daarom is het raadzaam een vervolgstudie te doen naar de afwijkingen die optreden tijdens het boren voordat met deze methode een ontwerp wordt gemaakt van een ringsysteem. Het onderzoek zal zich in het algemeen moeten richten op de volgende onderwerpen:

1. Grootte van de richtingsverandering door wrijving langs het schild
2. De invloed van grondovergangen, bijvoorbeeld tussen klei en zand
3. De grootte en de gevolgen van ovaliseren van de lining en/of de TBM

Voor een specifiek project kan gedacht worden aan:

1. De nauwkeurigheid van de erector die gebruikt gaat worden bij het uit te voeren project
2. De invloed van de lengte van de transportlijn van segmenten

### 14.4 DE KOERS VAN DE TBM

Wat in dit onderzoek maar deels is onderzocht is de koers van de TBM. Er is vanuit gegaan dat, net als bij de 2e Heinenoordtunnel, de TBM niet meer dan de tolerantie van de theoretische as mag afwijken. In het rapport is een strategie gepresenteerd waarmee dit mogelijk is.

Op zich zouden ook andere strategieën voor de koers van de TBM kunnen voldoen. Als de enige eis die wordt gesteld is dat de TBM uit moet komen in de ontvangtschacht dan zijn er veel meer strategieën

denkbaar. Een mogelijkheid zou zijn de TBM gewoon te laten lopen vanuit de startschacht. Na verloop van afstand wordt een punt bereikt waar moet worden gecorrigeerd om de TBM in de ontvangtschacht te krijgen. Op dit punt wordt dan een nieuwe theoretische koers uitgezet welke de TBM naar de ontvangtschacht leidt. Het aantal correcties dat met deze strategie moet worden uitgevoerd is kleiner dan bij de strategie die in dit onderzoek is aangehouden.

Aanbevolen wordt te onderzoeken wat de meest economische strategie is waarmee de TBM van start naar ontvangtschacht kan worden geleid. Dit onderzoek moet in samenhang met de ontwikkelde ontwerpmethodode worden gedaan. Er wordt dan een optimum gevonden tussen de te volgen strategie voor de koers van de TBM en het toe te passen ringsysteem.

## LITERATUUR

- [1] Babendererde, S.: Tunneling machines in soft ground. Tunnel and underground works, today and future, ITA 1990, Chengdu; Beijing: International Academic Publishers, 1990
- [2] Bedford, Dr. T: College a106; Statistiek en operationele analyse; Delft, mei 1993
- [3] Boeve, D.: Japanse ontwerpwijze voor betonnen tunnelsegmenten, Eindrapport afstudeerproject; Delft, Augustus 1996
- [4] Brink, ing. F. e.a.: Tunnelbouw met de schildmethode, mogelijkheden in West-Nederland. Polytechnisch tijdschrift, bouwkunde, wegen- en waterbouw; nr 10, 1979
- [5] Broere, W. en Polen, B.: Risico's en Storingen bij geboorde tunnels. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Sectie Geotechniek; Delft, Juni 1996
- [6] Gallagher, R.: Mangfall gallery, World Tunneling; Juni 1994
- [7] Hick, S.: Progrès réalisés durant ces dix dernières années dans le guidage des tunneliers de grand diamètre; Tunnels et ouvrages souterrains no 128, maart/april 1995
- [8] Ipek, M.: Ankara Rapid Transit, World Tunneling; Maart 1995
- [9] KIVI: Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen. Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Afdeling voor Tunneltechniek en Ondergrondse Werken; Den Haag, 1993
- [10] Kwak, L.: Standaardisatie van boortunnels, Een technisch-economisch haalbaarheidsonderzoek; Delft, Augustus 1996
- [11] Maidl, B.: Herrenknecht, M.; Anheuser, L.: Mechanised Shield Tunneling. Ernst & Sohn; Berlijn, 1996
- [12] Myers A. and Sindle A.: Abbey sewer; World Tunneling; Februari 1994
- [13] N.N.: Guidance-system SLS-T, Gesellschaft für Vermesungstechnik VMT GmbH; Ubstadt-Weiher
- [14] N.N.: Op weg naar versterking van de logistiek in de bouw. Een uitgave van de stichting Bouwresearch, Rotterdam; 1990
- [15] N.N.: Oosterscheldekering derde nota toleranties en deformatie eisen; deel 1; werkgroep UMTOLE, februari 1984
- [16] N.N.: Oosterscheldekering derde nota toleranties en deformatie eisen; deel 2 / keuringsmethodiek; werkgroep UMTOLE, februari 1984
- [17] N.N.: Service and logistics, Tunnelvortriebstechnik, Herrenknecht; Schwanau-Allmannsweiher
- [18] N.N.: Rapport L 501-01 "Inventarisatie ontwerpmethoden boortunnels voor weg- en reilverbindingen", CUR/COB, Gouda, december 1996.
- [19] N.N.: Ruhrtunnel Meiderich, Arbeitsgemeinschaft Ruhrtunnel Meidrich; Augustus 1996
- [20] Parker, S.: Barking Reach, World Tunneling; Augustus 1993

- [21] Polak, prof. B.M.: College bb25, Functioneel ontwerpen, formulering en oplossing van ontwerpproblemen; Delft februari 1993
- [22] Put, A. van der.: Samenvatting berekeningen boortunnel 2e-Heinenoord, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; augustus 1996
- [23] Schiele, dipl.-ing. Wolf: Erfahrungen mit dem Schildvortrieb im Baulos 1 West-5 der U-Bahn Munchen; Tunnel 6/96
- [24] Smith, s.: Clear water at Cleethorpes, World Tunneling; Mei 1994
- [25] Vrijling, Prof.drs.ir J.K. en Bezuyen, Ir K.G.: College f9c, Waterbouwkundige kunstwerken B.O.; Delft, Mei 1996
- [26] Vrijling, Prof.drs.ir J.K.: Toleranties bij prefabricage en het nut van “sorteren” en “maatwerk”; Notitie voor de deltadienst van Rijkswaterstaat; mei 1981.
- [27] Vrouwenvelder, Ir. A.C.W.M. / Vrijling, Prof.drs.ir J.K.: College B3, Probablistisch ontwerpen; Delft.
- [28] West, graham: Innovation and the rise of the tunneling industry; Cambrige University Press; Cambridge, 1988.