

Beheer van geboorde tunnels

Onderzoek naar een technisch-economisch optimale strategie

Januari 1999

Afstudeerverslag van Joost van Baardwijk

Afstudeercommissie:

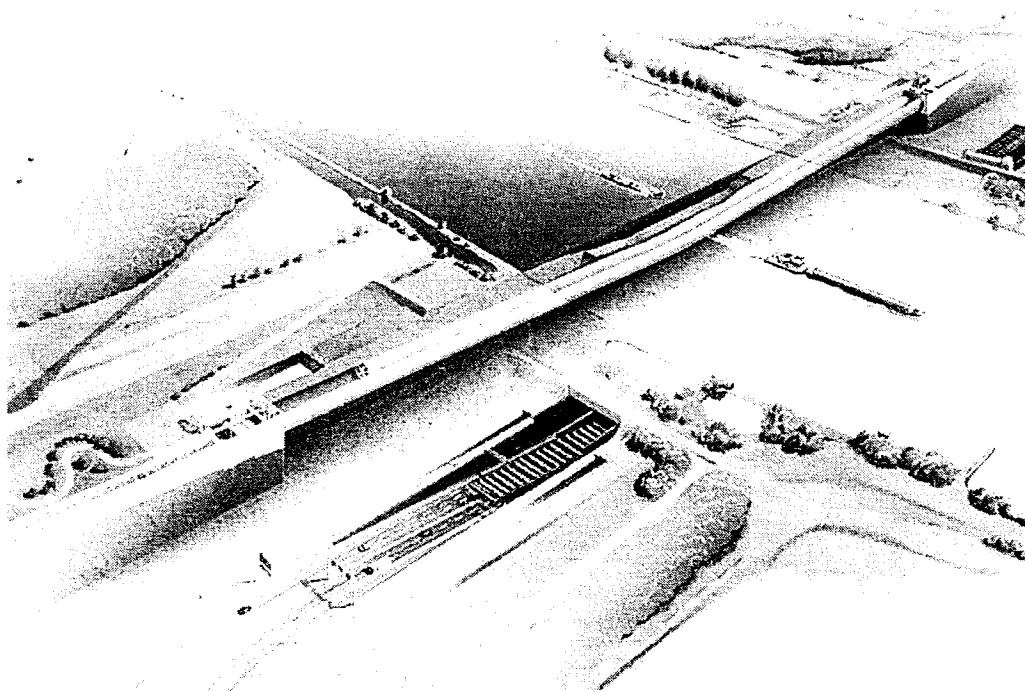
Prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling (voorzitter)
Prof.dr.ir. R.A.F. Smook
Ir. K.J. Bakker

AI-AFS

4127

Baardwijk

1999



TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek

Voorwoord

Dit rapport is het eindverslag van mijn afstudeerproject getiteld: Beheer van geboorde tunnels. Met dit afsluitende onderzoek van mijn studie Civiele Techniek heb ik mij bezig gehouden vanaf april 1998 tot nu.

Het onderzoek is een inventarisatie van beheer. De beheertheorie, de componenten van de tunnelwand en de degradatieprocessen zijn uitgewerkt. Met behulp van het programma Optimon is geprobeerd het beheer te optimaliseren. Uiteindelijk is een begroting van kosten van beheer opgesteld voor de componenten van de tunnelwand. De begroting is opgesteld voor 100 jaar, dat overeenkomt met de gestelde technische levensduur van de geboorde tunnel. Uitwerking van verschillende scenario's hebben de beheerkosten geminimaliseerd.

Het programma Optimon is zes jaar geleden ontwikkeld door TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium voor Rijkswaterstaat. Na ontwikkeling is het programma in de kast gezet en niet meer gebruikt. Ik dank de ontwikkelaar van Optimon Ir. J.A.M. Hontelez voor de tijd die hij beschikbaar heeft willen stellen voor uitleg.

Ik wil mijn afstudeercommissie bedanken voor de dagelijkse begeleiding en in het bijzonder Prof.dr.ir. R.A.F. Smook voor de huisvesting binnen de sectie Civiele Bedrijfskunde. De afleiding met mijn Japanse kamergenoot Eiichiro Goto en de versnaperingen bij mevrouw van Paassen waren zeer aangenaam tijdens het afstuderen.

Ik wil mijn vader bedanken voor het analytisch en tekstueel verbeteren van dit dikke boekwerk.

Tot slot wil ik de heeren studenten aan de Oranje Plantage 45 en 46 een rijkelijk studentenleven toewensen. Afstuderen doe je op OP.

Joost van Baardwijk
Delft, 16 december 1998

Samenvatting

INTRODUCTIE

Boortunnels en het ondergronds bouwen in het algemeen, mogen zich in Nederland de laatste jaren verheugen in een grote belangstelling. In ons land, waarin naast groeiende personen- en goederenstromen een verschuiving in de leefbaarheidnorm zichtbaar is, wordt bij het oplossen van knelpunten steeds vaker overwogen om infrastructuur ondergronds aan te leggen. Boortunnels vormen hiervoor een interessante mogelijkheid, omdat boren een omgevingsvriendelijke constructiemethode is, die minimale bouwoverlast veroorzaakt en relatief geringe invloed heeft op het milieu en op de aanwezige bebouwing.

De geboorde tunnelmethode, voor tunnels met een diameter groter dan vijf meter, is niet eerder in Nederland toegepast. De Tweede Heinenoord-tunnel te Barendrecht is de eerste geboorde tunnel. Studies hieromtrent zijn met name gericht op de besturing en uitvoering van het aanlegproces. Het beheer van geboorde tunnels en andere civiel-technische constructies in de gebruiksfase is onderbelicht. Hogere eisen aan de beschikbaarheid en het toegenomen verkeersaanbod door de economische groei van de laatste decennia vergroten het belang van goed beheer. De grootste beheerder van infrastructuur in Nederland is Rijkswaterstaat.

DOEL EN OPZET VAN HET ONDERZOEK

Een strategie is opgesteld met als doel de kosten van beheer te minimaliseren tijdens de totale levensduur van de geboorde tunnel. Daartoe is een inventarisatie gemaakt van de beheertheorie en zijn de verouderingsprocessen beschreven die gelden voor civiel-technische constructies. Met het vaststellen van het ruimtelijk, functioneel en constructief ontwerp zijn de aanlegkosten opgesteld. Er is vervolgens een systematisch onderzoek opgezet naar de componenten van de tunnelwand van de tweede Heinenoordtunnel, de bedreigingen, het schadeproces en de beheerwerkzaamheden. Een begroting is opgezet van de beheerkosten gedurende de technische levensduur van de tunnel. Tot slot is de beheerorganisatie belicht.

BEHEERTHEORIE

Beheer waarborgt de betrouwbaarheid, de bruikbaarheid, de duurzaamheid en presenteerbaarheid van de constructie. De technische levensduur, vastgesteld in de ontwerpfase, wordt gehaald of verlengd. Beheer bestaat uit inspectie-, onderhoud-, exploitatie- en renovatiewerkzaamheden. Het huidige beheer in de praktijk is niet gebaseerd op een expliciet geformuleerde theorie. In de toekomst dient gedurende de ontwerp-, aanleg-, uitvoerings- en gebruiksfase van de constructie gebruik te worden gemaakt van een op theorie geformuleerde beheermethodiek. De kosten van beheer van constructie, component en onderdeel worden teruggerekend naar het aanlegjaar met de netto contante waarde-methode, zodat verschillende beheerscenario's met elkaar vergeleken kunnen worden.

Er zijn drie verschillende onderhoudstrategieën vastgesteld:

1. Bij storingsafhankelijk onderhoud wordt na falen direct of met enige vertraging de component vervangen.
2. Bij gebruikafhankelijk inspectie en onderhoud wordt inspectie en onderhoud gedaan na een van te voren vastgestelde gebruikstijd of -belasting. Met een optimale onderhoudsperiode kan de component direct vervangen worden en zijn de inspectiekosten bespaard.
3. Bij toestandsafhankelijke inspectie en onderhoud bepaalt de huidige toestand en de degradatiesnelheid de periode tot de volgende inspectie of het onderhoud.

De constructie kent een grote verscheidenheid aan componenten met bijbehorende degradatievormen en -snelheden. Geadviseerd wordt om de beheeruitvoering aan verschillende componenten samen te nemen. De belangrijkste degradatieprocessen zijn:

- vermoeiing door wisselende belasting,
- krimp en uitzetting door schommeling van temperatuur,
- kruip en zetting door tijdsafhankelijke vervorming,
- corrosie door chemische reactie van chloride, vocht en zuurstof met staal,
- carbonatatie door diffusie van aanwezig CO₂ in beton,
- degradatie door veroudering van het materiaal zelf.

Het degradatieproces is onder te verdelen in een initiatiefase en een propagatiefase.

GEBORDE TUNNEL

De functie van de geboorde tunnel is bepalend voor het ruimtelijk ontwerp. De functie bepaalt de mate van aandacht voor vluchtwegen, ventilatie, brandveiligheid, sociale en operationele veiligheid. De beheerder stelt de normen en kengetallen hiervoor vast.

Na het functioneel ontwerp is er het constructief ontwerp. In Nederland is de grond niet draagkrachtig en stort ze in als deze niet ondersteund wordt. De tunnelboormachine graaft de grond (zand, klei en veen) en plaatst betonnen segmenten. Het constructief ontwerp bepaalt de duurzaamheid in de gebruiksfase in grote mate. Mede door het feit dat hier naar veel nieuwe technieken wordt gezocht, is er geen algemeen geldende beheermethodiek beschikbaar.

Een inventarisatie van de aanlegkosten geeft inzicht in de diverse kostensoorten en het aandeel van kostensoort in de totale aanlegkosten. De lining, ofwel de uit betonnen segmenten opgebouwde tunnelwand is de grootste kostenpost.

DE COMPONENTEN IN DE GEBRUIKSFASE

In dit onderzoek is ingegaan op de componenten van de tunnelwand, de elektromechanische voorzieningen en de voorzieningen voor veiligheid. De componenten die qua duurzaamheid van belang zijn voor de tunnelwand zijn betonnen segmenten, grout, triplexplaatjes en bodembescherming.

In de ontwerp- en aanlegfase wordt per component het doel, de werkwijze en de technische beschrijving vastgesteld. In de gebruiksfase degradeert de component door het maatgevend verouderingsproces. Er is een faalkans met bijbehorende faalkosten en er zijn de werkzaamheden van beheer. De kans op falen van de tunnel is 1×10^{-6} in de gebruiksfase. Door een goed inspectie- en onderhoudsplan kan de faalkans constant worden gehouden gedurende de technische levensduur. Tijdens periodieke inspectie- en onderhoudswerkzaamheden is het mogelijk dat de tunnel buiten gebruik wordt gesteld. Door toename van degradatie van de componenten nemen werkzaamheden, risico's en periode van buiten-gebruikstelling toe. Daarnaast zijn er de dagelijkse exploitatiewerkzaamheden. Gedurende renovatiewerkzaamheden wordt een tunnelbuis voor langere tijd buiten gebruik gesteld, geïnspecteerd en onderhouden. Na deze werkzaamheden is de toestand van de gehele constructie en alle componenten weer zo-goed-als-nieuw. Uit dit onderzoek blijken de kosten van beheer minimaal als het renovatie-interval 20 jaar is.

De beheerkosten worden bepaald door de segmenten, de elektromechanische voorzieningen en de algemene kosten van exploitatie. Het maatgevende degradatieproces voor de segmenten is corrosie van wapening door chloride-indringing en veroudering van het rubberprofiel door relaxatie. Afhankelijk van de toestand wijzigt het inspectie- en onderhoudsplan. De elektromechanische voorzieningen verouderen en zijn door goede kennis van de materialen onderworpen aan een strak omlijnd inspectie- en onderhoudsplan, om zodoende de veiligheid te handhaven.

Indien de waarde van vervulling van de functie gelijk is aan het niveau van de bijkomende kosten, exclusief vaste kosten voor afschrijving en interest, zal het niet zinvol zijn de tunnel in gebruik te houden. In dit geval heeft het gebruik geen waarde meer en is daarmee de economische levensduur verstreken. Onderzoek moet dan uitwijzen of het rendabel is de tunnel in gebruik te houden. Met een aangenomen schadeontwikkeling is een begroting van de beheerkosten opgesteld. Volgt de geboorde tunnel deze ontwikkeling in de gebruiksfase, dan komt de economische levensduur overeen met de technische levensduur.

ORGANISATIE VAN BEHEER

Het constructiegegevensopslag-systeem dient centraal te staan in de beheerorganisatie. De gebruiksfunctie van de infrastructuur is het uitgangspunt. In de verschillende afdelingen van tunnelbeheerder .. tot hoofddirectie moet ieder op eigen wijze toegang hebben tot het systeem. In dit systeem zijn op éénduidige, duidelijk interpreteerbare en geautomatiseerde wijze alle beheergegevens betreffende ontwerp, aanleg, uitvoering en beheer van de constructie aanwezig. Ter ondersteuning van de regioafdeling is er een stafafdeling beheer geboorde tunnels opgezet binnen de beheerorganisatie. Onderlinge gegevensuitwisseling tussen beheerders van overeenkomende constructies kan de kosten van beheer verder doen dalen en de veiligheid en duurzaamheid vergroten. Een vervolgonderzoek bepaalt de haalbaarheid van deze reorganisatie.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	I
SAMENVATTING	III
INHOUDSOPGAVE	VII
1 INLEIDING	1
1.1 INLEIDING	1
1.2 BEHEER	1
1.3 GEBOORDE TUNNELS	2
1.4 BEHEER VAN GEBOORDE TUNNELS	4
1.5 INDELING VAN HET RAPPORT	5
2 PROJECTOMSCHRIJVING	7
2.1 INLEIDING	7
2.2 PROBLEEMSTELLING	7
2.3 DOELSTELLING	8
2.4 RANDVOORWAARDEN	8
2.5 UITGANGSPUNTEN	8
2.6 OPZET VAN HET ONDERZOEK	8
2.7 WERKWIJZE	9
3 INVENTARISATIE VAN KUNSTWERKBEHEER	11
3.1 INLEIDING	11
3.2 HET BEHEER IN VERLEDEN EN HEDEN BIJ RIJKSWATERSTAAT	11
3.3 HET BEHEER IN DE TOEKOMST	14
3.3.1 Netto contante waarde -methode	15
3.4 INVENTARISATIE THEORIE VAN BEHEER	16
3.4.1 Inleiding	16
3.4.2 Inventarisatie componenten	16
3.4.3 Aanpak van beheer	17
3.4.4 Inspectie- en onderhoudstrategie	18
4 OPTIMALISATIE BEHEER VAN EEN COMPONENT MET OPTIMON	23
4.1 INLEIDING	23
4.2 MODELERING VAN BEHEER	23
4.2.1 Inleiding	23
4.2.2 Het algemene model	24
4.2.3 Toestandsafhankelijk onderhoud (tao)	27
4.2.4 Gebruiksafhankelijk onderhoud (gao)	28
4.2.5 Storingsafhankelijk onderhoud (sao)	29
4.2.6 Degradatieproces	29
4.3 COMPUTERPROGRAMMA OPTIMON	31
4.3.1 Functionele beschrijving	31
4.3.2 Gebruik van Optimon	31
4.3.3 Voorbeeld "De roestende staaf"	33

4.3.3.1	Inleiding	33
4.3.3.2	Invoergegevens	33
4.3.3.3	Uitvoergegevens	35
4.3.3.4	Conclusie	35
4.3.4	Optimalisatie van beheer van een component bij een 'Geboorde tunnel'	36
4.3.4.1	Inleiding	36
4.3.4.2	Invoerparameters	36
4.3.4.3	Conclusie optimalisatie met Optimon	38
5	GEBORDE TUNNELS	41
5.1	INLEIDING	41
5.2	RUIMTELIJK ONTWERP	41
5.2.1	Inleiding	41
5.2.2	Hoofdrichtingen	41
5.2.3	Functioneel ontwerp	42
5.2.3.1	Het wegvervoer	42
5.2.3.2	Spoorwegvervoer	45
5.2.3.3	(Stads)railvervoer	48
5.2.3.4	Leidingvervoer	50
5.2.4	Veiligheid	51
5.3	CONSTRUCTIEF ONTWERP	51
5.3.1	Inleiding	51
5.3.2	Uitvoeringstechnieken	52
5.3.2.1	Beschrijving boorproces	52
5.3.2.2	Boormethoden	53
5.3.3	Liningtechnieken	54
5.3.3.1	Inleiding	54
5.3.3.2	Dubbelwandige techniek	54
5.3.3.3	Enkelwandige techniek	55
5.3.3.4	Lining materiaal	56
5.3.3.4.1	Inleiding	56
5.3.3.4.2	Belastingen	56
5.3.3.4.3	Gewapend beton segmenten	58
5.3.3.5	Overige materialen	61
5.4	AANLEGKOSTEN GEBORDE TUNNEL	61
5.4.1	Inleiding	61
5.4.2	Uitgangspunten en randvoorwaarden	61
5.4.3	Aanlegkosten	62
5.4.3.1	Inleiding	62
5.4.3.2	De bouwplaats	63
5.4.3.3	Tunnelboormachine	63
5.4.3.4	Afvoer van grond	64
5.4.3.5	Scheidingsinstallatie	64
5.4.3.6	De lining	65
5.4.3.7	Groutinjectie	65
5.4.3.8	Leidingen en kabels	66
5.4.3.9	Bentoniet	66
5.4.3.10	Energie	67

5.4.3.11	Onderhoud en vervanging	67
5.4.3.12	Loonkosten	68
5.4.3.13	Totale kosten	68
5.4.3.14	Vergelijking kosten	69
6	COMPONENTEN IN DE GEBRUIKSFASE	73
6.1	INLEIDING	73
6.2	TWEDE HEINENOORD TUNNEL	73
6.2.1	Inleiding	73
6.2.2	Eerste Heinenoord tunnel	73
6.2.3	Gebrek aan capaciteit	73
6.2.4	Mogelijke oplossingen	74
6.2.5	Tunnel voor langzaam verkeer	74
6.3	DE COMPONENTEN	75
6.4	EXPLOITATIE	76
6.5	BUITEN-GEBRUIKSTELLING TUNNEL	77
6.6	SEGMENTEN	78
6.6.1	Aanlegfase	79
6.6.1.1	Werkwijze	79
6.6.2.2	Technische beschrijving	80
6.6.2	Gebruiksfase	82
6.6.2.1	Vermoeiing	83
6.6.2.2	Degradatie als gevolg van krimp en uitzetting	84
6.6.2.3	Degradatie als gevolg van kruip en zetting	85
6.6.2.4	Degradatie als gevolg van corrosie	85
6.6.2.5	Degradatie als gevolg van carbonatatie	87
6.6.2.6	Veroudering	89
6.6.3	Faalkans en faalkosten	89
6.6.4	Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden	91
6.6.4.1	Inleiding	91
6.6.4.2	Aannames opstellen begroting inspectie- en onderhoudswerkzaamheden	91
6.6.4.3	Scenario 1: Geen renovatie	92
6.6.4.4	Scenario 2: Renovatie om de 10 jaar	95
6.6.4.5	Scenario 3: Renovatie om de 20 jaar	97
6.6.4.6	Scenario 4: Renovatie om de 30 jaar	98
6.6.4.7	Optimalisatie kosten werkzaamheden segmenten	100
6.7	GROUT	101
6.7.1	Aanlegfase	101
6.7.1.1	Werkwijze	101
6.7.1.2	Technische beschrijving	101
6.7.2	De gebruiksfase	102
6.7.3	Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden	102
6.8	TRIPLEX PLAATJES	103
6.8.1	Aanlegfase	103
6.8.1.1	Werkwijze	103
6.8.1.2	Technische beschrijving	103
6.8.2	De gebruiksfase	103
6.8.3	Faalkans en faalkosten	104

6.8.4	Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden	105
6.9	BODEMBESCHERMING	105
6.9.1	Aanlegfase	105
6.9.1.1	Werkwijze	105
6.9.1.2	Technische beschrijving	106
6.9.2	Gebruiksfase	106
6.9.3	Faalkans en faalkosten	107
6.9.3	Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden	107
6.9.4	Scenario	108
6.10	ELEKTROMECHANISCHE VOORZIENINGEN EN VOORZIENINGEN VOOR VEILIGHEID	109
6.10.1	Aanlegfase	109
6.10.2	Gebruiksfase	111
6.10.3	Faalkans en faalkosten:	112
6.10.4	Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden	112
6.11	BEGROTING BEHEER VAN DE GEBOORDE TUNNEL	115
7	ORGANISATIE VAN HET BEHEER	117
7.1	INLEIDING	117
7.2	HET ORGANISATIEPROCES	118
7.3	BEHEERPROCES	119
7.4	INSPECTIEPROCES	122
7.5	ONDERHOUDPROCES	123
7.6	WAARNEMINGENRAPPORT	124
7.7	HET ORGANISATIEMODEL VAN HET BEHEER VAN DE GEBOORDE TUNNEL	127
7.8	BEHEER VAN DE GEBOORDE TUNNEL	128
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	131
8.1	INLEIDING	131
8.2	CONCLUSIES	131
8.3	AANBEVELINGEN	134
	VERKLARENDE WOORDENLIJST	135
	SYMBOLENLIJST	137
	LITERATUURLIJST	139
	BIJLAGEN	
1.	Tunnelboormachine en scheidingsinstallatie	
2.	Deel- en sub-functies van Optimon	
3.	Grafieken verkregen door variatie van invoerparameters van het voorbeeld 'De roestende staaf' in Optimon.	
4.	De kosten en bijbehorende contante waarde van de periodieke beheerwerkzaamheden (inspectie, onderhoud en buiten-gebruik) voor scenario 3. Renovatie vindt om de 20 jaar plaats.	
5.	De kosten en bijbehorende contante waarde van de renovatiewerkzaamheden (inspectie, onderhoud en buiten-gebruik) voor scenario 3. Renovatie vindt om de 20 jaar plaats.	

1 Inleiding

1.1 Inleiding

Sinds 1988 neemt de belangstelling voor geboorde tunnels sterk toe. Met name voor tunnels met een diameter groter dan voor leidingtunnels. Leidingtunnels worden aangelegd met de sleufloze techniek, waar heden goede ervaring in is. Op dit moment worden op diverse plaatsen in ons land plannen gemaakt voor geboorde tunnels voor de "grote" infrastructuur. De toenemende interesse voor het ondergronds bouwen is in het algemeen een gevolg van de toenemende complexiteit en het toenemende aantal infrastructurele en ruimtelijke orderingsproblemen. Daarnaast is er een voortgaand bewustwordingsproces bij het publiek met betrekking tot de kwaliteitsaspecten. Natuur, milieu en leefbaarheid behoren tot de kwaliteitsaspecten. Er moeten oplossingen gevonden worden om de druk op de schaarse ruimte en het milieu in Nederland op te vangen. Tegelijkertijd moet de functionaliteit van de ruimtelijke infrastructuur worden vergroot.

Op het moment van schrijven van dit rapport is de Tunnel-Combinatie-Heinenoord (TCH) bezig met de aanleg van de tweede tunnelbuis onder de Maas. Dit zal de eerste geboorde tunnel in Nederland zijn, toegankelijk voor het langzame verkeer, fietsers en voetgangers. Er zijn plannen om in de toekomst tunnels te boren voor het snelverkeer, het railpersonenverkeer en het goederenvervoer. Voorbeelden van toekomstige boortunnels in Nederland zijn de Botlek-spoortunnel in de Betuweroute, de Westerschelde-snelverkeertunnel, de Noord-Zuid-metrolijn in Amsterdam en de tunnel voor de hogesnelheidslijn (HSL) onder het groene hart van de Randstad.

Voor geboorde tunnels bestaat op dit moment nog geen beheerplan, ook niet voor de nu al in aanbouw zijnde geboorde Heinenoord-tunnel. In deze studie wordt onderzoek gedaan naar de optimale strategie voor het onderhouden van geboorde tunnels voor de "grote infrastructuur".

1.2 Beheer

Beheer wordt steeds belangrijker in de Civiele Techniek. Belangrijke redenen van deze ontwikkeling zijn veroudering van constructies en toegenomen behoefte om inspectie-, onderhoud- of renovatiewerkzaamheden te verrichten. Enerzijds is die behoefte toegenomen door economische vooruitgang (schaalvergroting). Anderzijds zijn eisen ten aanzien van beschikbaarheid van de ruimtelijke infrastructuur strenger geworden.

De definitie van

- beheer = het bestuur en toezicht op constructie, component of onderdeel zodat het zijn functie kan blijven vervullen voor een gestelde tijdsperiode en betrouwbaarheid. Tot deze activiteit behoren alle werkzaamheden van inspectie en onderhoud.
- inspectie = alle activiteiten om een constructie, een component of een onderdeel nauwgezet in ogenschouw te nemen met het doel het te beoordelen en te keuren.

- onderhoud = alle activiteiten, die ten doel hebben een constructie, een component of een onderdeel in goede technische staat te houden.
- renovatie = alle activiteiten van inspecteren en onderhouden, waarna een zo-goed-als-nieuw situatie optreedt voor de gehele constructie.

De beheerder is de persoon die er zorg voor draagt, dat een constructie onderhouden wordt. In Nederland is Rijkswaterstaat de grootste beheerder van infrastructurele werken. Daarnaast zijn er ook enige particuliere instellingen, zoals Rail-infrabeheer. Als het over organisatie en planning van onderhoud gaat, spreekt men van beheer. Het doel van de beheerder is: de totale kosten aan infrastructuur in aanlegfase en gebruiksfase te minimaliseren gedurende de economische levensduur. Indien de waarde van vervulling van de functie gelijk is aan het niveau van de bijkomende kosten, exclusief vaste kosten voor afschrijving en interest, zal het niet zinvol zijn de tunnel in gebruik te houden. In dit geval heeft het gebruik geen waarde meer en is daarmee de economische levensduur verstreken. De bijkomende kosten kunnen inspectie-, onderhouds- en exploitatiekosten zijn. De technische levensduur is bereikt als door degradatie van constructie en componenten vastgestelde technische normen niet worden gehaald, waardoor de constructie haar functie niet meer (veilig) kan vervullen.

Het huidige onderhoud aan civiele constructies is een combinatie van inspectietechnieken en onderhoudsstrategieën. Ze zijn ontwikkeld in de praktijk en zijn onderbouwd met eenvoudige theorie. De informatie wordt meestal verkregen middels visuele inspecties. Het beheer van kunstwerken staat of valt met de beschikbaarheid van goede informatie over de ontwikkeling van de toestand van het kunstwerk.

1.3 Geboorde tunnels

Er zijn grote ontwikkelingen gaande op het gebied van de tunnelboortechneik. Accenten liggen op het economischer, sneller en beter boren, waardoor boortunnels qua prijs steeds concurrerder worden met afgezonken tunnels. Op dit moment is de methode van boren nog erg duur. Een praktijkproject "De tweede Heinoord" wordt gesubsidieerd door de Rijksoverheid. Met dit praktijkproject wordt kennis van de boortechneik in Nederland opgebouwd. Deelname aan het praktijkproject moet leiden tot meer ervaring in het boren en betere technieken, waardoor uiteindelijk een goedkopere tunnel te bouwen is.

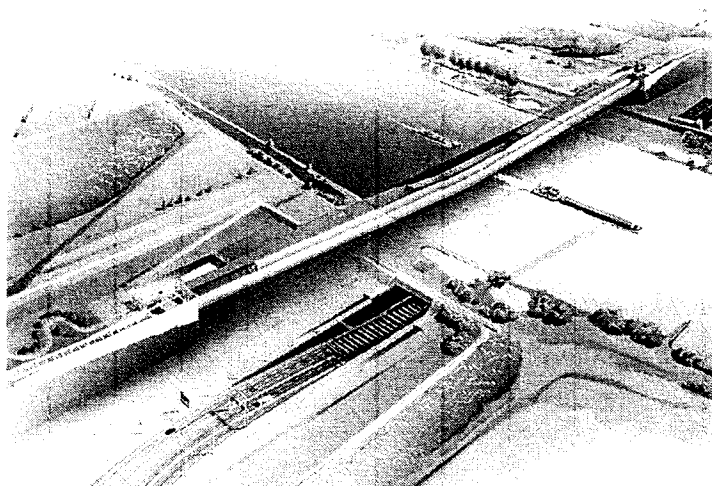
Er zijn verschillende methoden en technieken om tunnels te boren. De mogelijkheden worden beperkt door de bodemgesteldheid. De eigenschap van de bodem bepaald of met een gesteund of ongesteund boorfront gewerkt wordt. Welke graafmethode toegepast moet worden en wat het technisch mogelijke ontwerp wordt van de tunnel.

In Nederland hebben we te maken met zachte grond bestaande uit zand, klei en veen. Deze grond is niet draagkrachtig en stort in als het niet ondersteund wordt. In verband met de instabiliteit van de grond aan het boorfront moet een gesteund boorfront gebruikt worden.

Afhankelijk van de grondeigenschappen zijn er verschillende graafmethoden die de grond verzetten. Naast de grond is het toestromende grondwater een bepalende factor voor de toegepaste techniek. Grofweg kan grond ingedeeld worden in twee klassen, namelijk de cohesieve grondsoort zoals klei en veen en de niet-cohesieve grondsoort zoals zand en stenen. Een vloeistofschild wordt gebruikt bij het weggraven van niet cohesief grondmateriaal. In dit geval wordt steundruk van het boorfront geleverd door een vloeistof, bentoniet. Een gronddrukbalansschild wordt gebruikt bij het graven van cohesievere grond. Er wordt met luchtdruk bewerkstelligd dat het boorfront niet instort. Het weggraven of snijden van een vertikaal boorfront kost de minste energie en zorgt voor een gelijkmatig verloop van het boorproces.

In Nederland komt men cohesieve en minder of niet cohesieve gronden tegen in de bodem. Beide methoden zijn mogelijk. Er moet per lokatie bekeken worden welk schild het best te gebruiken is met betrekking tot kosten, risico's en voortgangssnelheid. Het is mogelijk een tunnelboormachine (TBM) met een mixschild te gebruiken. Een mixschild kan in een werkdag omgebouwd worden van een gronddrukbalansschild naar een vloeistofschild of andersom.

De bodemgesteldheid is een belangrijke eigenschap ter bepaling van het ontwerp van de tunnel. Voor een stabiele ligging moet een minimale bovendeckering gerealiseerd worden. Daarnaast heeft Nederland te maken met een hoge grondwaterspiegel. Het is noodzakelijk dat het boorfront en de werkkamer achter het boorfront wordt ondersteund. Achter het boorfront bevindt zich daarom een stalen cilindervormige schildmantel.



Figuur 1 Twee tunnelbuizen van de geboorde Heinenoordtunnel

Vanuit een vanaf het maaiveld gerealiseerde schacht wordt een speciaal voor die tunnel gebouwde TBM neergelaten. Een TBM bestaat uit het snijdeel (boorkop en mengkamer) en uit een volgtrein met een middendeel waarin zich de aandrijfmechanismen bevinden en een staartdeel. In het staartdeel bevindt zich de erector. Dit is een machine die de segmenten in de ring plaatst. In bijlage 1 is TBM van de Tweede Heinenoordtunnel weergegeven.

De TBM zal zich een weg boren richting de andere schacht. Het boorschild bestaat uit een cilinder met aan de voorzijde de boor en aan de achterzijde de gereedgekomen tunnel. Het schild dekt het geboorde gedeelte af, om te voorkomen dat grond en water de tunnel instromen. Binnen het schild kunnen dan de tunnelringen worden opgebouwd. De tunnelwand wordt opgebouwd uit ringen van elk een aantal betonnen segmenten, bijvoorbeeld zeven segmenten en een sluitsteen.

De segmenten verschillen in vorm, maar door toch elke keer de brede en de smalle kant tegen elkaar te plaatsen wordt een rechte buis verkregen. Door op beide tegenover elkaar liggende zijden de brede kanten te gebruiken wordt een bocht verkregen. Het schild wordt voortbewogen met behulp van hydraulische vizels, die zich tegen het reeds gereedgekomen tunneldeel afzetten. De ruimte buiten de tunnelmantel wordt gelijktijdig met het vooruitschuiven van het schild gevuld met een gROUTMENGSEL. De ruimte is ontstaan door het ontgraven van een iets grotere doorsnede dan het schild. De aanvoer van de tunnelsegmenten en de afvoer van de grond, die is ontgraven, geschiedt door de schacht en het gerealiseerde tunneldeel.

De beschreven segmentale tunnelmantel wordt vaak toegepast en zal daarom in deze studie centraal staan.

1.4 Beheer van geboorde tunnels

In 1999 zal de eerste geboorde tunnel in Nederland gereed komen. De groep aannemers verantwoordelijk voor de aanleg dragen de tunnel in dat jaar over aan de regionale directie RhooN, een onderafdeling van Rijkswaterstaat. Na de overdracht is deze regionale directie verantwoordelijk voor het beheer. Jaarlijks is een budget beschikbaar voor dit beheer. Met de planning van het budget komen de kosten aan de orde. Inzicht is nodig in de kosten van de geboorde tunnel, met betrekking tot de levensduur van de tunnel. De technische ontwerplevensduur van 100 jaar voor constructies en componenten is in grote mate afhankelijk van het beheerplan dat is gemaakt.

Voor nieuw te bouwen constructies dient het beheer een integraal onderdeel te zijn in de ontwerp- en aanlegfase. Er moet een concrete op de constructie toegesneden beheerstrategie ontwikkeld worden, die zijn neerslag vindt in een inspectie- en onderhoudsplan.

Er zijn twee verschillende inspectiestrategieën mogelijk:

- gebruiksafhankelijke inspectie
- conditieafhankelijke inspectie

Er zijn drie verschillende onderhoudstrategieën mogelijk:

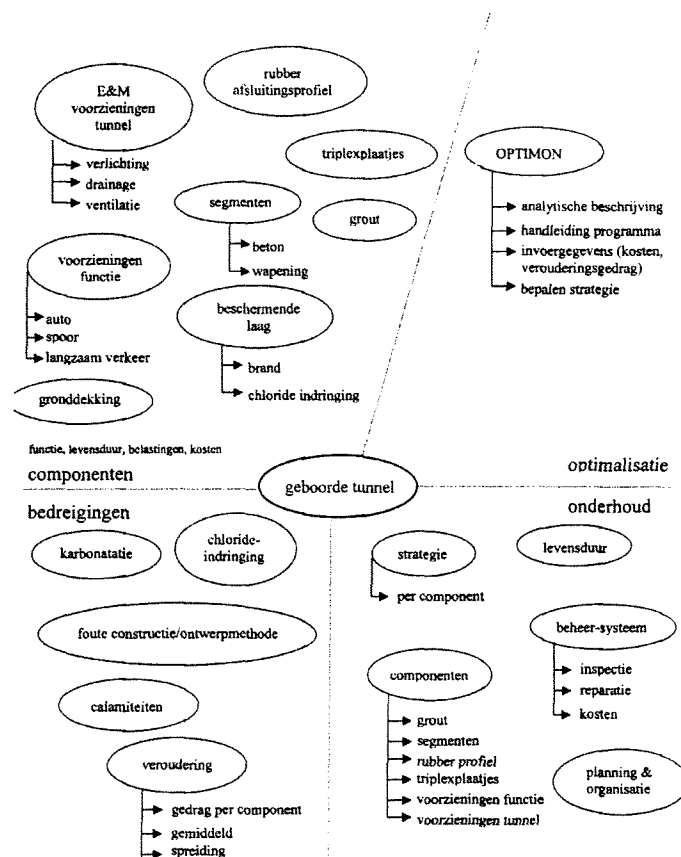
- storingsafhankelijk onderhoud (sao)
- gebruiksafhankelijk onderhoud (gao)
- toestandafhankelijk onderhoud (tao)

1.5 Indeling van het rapport

Na deze inleiding geeft hoofdstuk 2 een omschrijving en een afbakening van het project. De studie bestaat uit 3 delen.

- I. Het eerste deel kijkt naar het onderhoud van civiele werken in het algemeen en van geboorde tunnels in het bijzonder. Er volgt een inventarisatie van theorieën van beheer in heden, verleden en toekomst. We gaan met een computerprogramma de onderhoudstrategieën vergelijken voor een gemakkelijk voorbeeld met een roestende staaf en voor een geboorde tunnel. Het computerprogramma Optimon (optimaliseren van onderhoud) is speciaal ontwikkeld voor Rijkswaterstaat voor de optimalisatie van *onderhoud aan civiel-technische constructies*.
- II. Het tweede deel gaat vervolgens in op ruimtelijk en constructief ontwerp van de geboorde tunnel, de componenten en de bedreigingen van deze componenten. Er wordt op component-basis gekeken naar mogelijk degradatieproces en ontstane schade. Per component is de functie, de technische werking, de levensduur, de belastingen, de faalkans en de kosten geïnventariseerd. Tot slot gaan we een begroting opstellen van alle inspectie- en onderhoudswerkzaamheden en bijbehorende kosten. Met het doorrekenen van verschillende scenario's wordt het *beheer van de geboorde tunnel geoptimaliseerd voor de technische levensduur*.
- III. Het laatste deel gaat in op de organisatie en planning van onderhoud en wordt het onderzoek afgerond.

Het onderzoeksschema van deze studie ziet er als volgt uit:



2 Projectomschrijving

2.1 Inleiding

Een tunnel is aangelegd om dienst te doen gedurende een aantal decennia. Gedurende de levensjaren moet de tunnel zijn functie blijven uitoefenen. De verbinding zal daarom technisch en economisch rendabel moeten zijn. De vaste kosten van aanleg en de variabele kosten die gemaakt worden in de gebruiksfase dienen voor de gehele levensduur van de constructie gebudgetteerd te zijn.

De tunnel is bloot gesteld aan allerlei bedreigingen veroorzaakt door het gebruik, de belastingen op de tunnel, de achteruitgang van de materialen of een combinatie van in- en externe bedreigingen. De beheerder dient er zorg voor te dragen, dat de veiligheid en de technische staat niet onder een ontoelaatbaar niveau terecht zal komen. Er dient direct onderhoud gedaan te worden.

In de aanlegfase van een constructie kan men een ontwerpstrategie hanteren, waarbij "de investeringskosten van de infrastructuur tijdens de aanlegfase geminimaliseerd zijn". Het gevaar is dat de jaarlijkse variabele kosten voor beheer daardoor veel hoger kunnen zijn. De inspectie- en onderhoudskosten per jaar zijn te vergelijken met de aanlegkosten van ontwerp en uitvoering van de constructie ontstaan in de aanlegfase. Door het tijdsverschil in de uitgave zal een terugrekening plaatsvinden naar het aanlegjaar met de netto contante waarde-methode. Voor waardedaling van de munteenheid wordt een rentepercentage van 5% berekend. De beheerder zit voor de komende tientallen jaren met de kosten voor inspectie, onderhoud en exploitatie en risico van buiten gebruikstelling. In de aanlegfase van de tunnel moet al duidelijk zijn wat de gevaren kunnen zijn van de bedreiging door aantasting en welke bedragen gereserveerd moeten worden voor beheer.

Dit onderzoek beschrijft wat op korte en lange termijn specifiek voor een geboorde tunnel de bedreigingen zijn, die ervoor zorgen dat inspectie en onderhoud verricht moet worden. Allereerst volgt een inventarisatie van het algemeen kunstwerkbeheer in Nederland in verleden, heden en in de toekomst. Het computerprogramma Optimon en bijbehorende naslagwerken diept de beheertheorie verder uit. Aan de hand van twee voorbeelden vindt toetsing plaats op bruikbaarheid van het optimaliseringsprogramma voor onderhoud. Vervolgens wordt de aanlegfase van de geboorde tunnel beschouwd. We gaan in op het ruimtelijk ontwerp en het constructief ontwerp. Daarna volgt een inventarisatie van de belangrijkste bedreigingen, de problemen die zich voordoen en de oplossingen om ze te verhelpen gedurende de gebruiksfase van de tunnel. Welke inbreuk heeft het onderhoud bijvoorbeeld op het vervullen van de functie van de tunnel?

2.2 Probleemstelling

Wat zijn de bedreigingen van een geboorde tunnel? Welk onderhoud is te doen aan een geboorde tunnel om de tunnel zodoende technisch en economisch rendabel te houden?

2.3 Doelstelling

Het doel van dit afstudeeronderzoek is om:

1. Een strategie opzetten voor het beheren van geboorde tunnels, zodat totale kosten geminimaliseerd zijn voor de totale levensduur (aanleg-, inspectie-, onderhoud-, buiten gebruikstelling- en exploitatiekosten).
2. Inzicht te krijgen in de organisatie van het beheer van infrastructuur.
3. Richtlijnen opstellen die bijdragen aan een onderbouwd beheerconcept voor een nieuwe kunstwerken.

2.4 Randvoorwaarden

De belangrijkste randvoorwaarden die gehanteerd zijn in deze studie naar het beheer van geboorde tunnels:

1. Het onderzoek is opgesteld voor de geboorde tunnels in Nederland.
2. De geboorde tunnel heeft een lining bestaande uit betonnen segmenten.
3. De geologische omstandigheden in Nederland zijn bepalend voor dit onderzoek naar het beheer van geboorde tunnels.
4. De geboorde tunnel dient de vervoersinfrastructuur.

2.5 Uitgangspunten

1. De geboorde tunneldoorsnede is cirkelvormig en kan een diameter tussen de 3 en 12 meter hebben. De ondergrens van 3 meter is gebaseerd op de kleinste diameter waarbij een tunnelmantel nog uit betonnen segmenten bestaat. De bovengrens van 12 meter geeft de grootste tunnel weer, waarvan verwacht mag worden dat die voor het jaar 2015 in Nederlandse omstandigheden geboord gaat worden.
2. Er is uitsluitend ingegaan op de geboorde tunnelwand en de ingebruikstelling van de tunnel met betrekking tot het beheer.
3. Na renovatiewerkzaamheden wordt de zo-goed-als-nieuw-situatie bereikt voor de gehele constructie.

2.6 Opzet van het onderzoek

- Inventarisatie van algemene beheertheorieën.
- Studie naar de wijze van aanleg van een geboorde tunnel.
- Studie naar de benodigde materialen voor de aanleg van de tunnelwand.
- Onderzoek naar het gedrag van de materialen op korte en lange termijn onder invloed van aantasting en veroudering.
- Studie naar de invloed van het gedrag van de materialen en de invloed op de technische staat van de tunnel.
- Onderzoek naar de wijze van verhelpen van de bedreiging door onderhoud.
- Opmaken van een begroting van totale kosten van beheer met een optimalisatie door keuze van verschillende scenario's.
- Studie naar de planning en organisatie van onderhoud (inspectie en reparatie).

2.7 Werkwijze

De werkwijze tijdens dit onderzoek kenmerkt zich door het uitvoeren van een aantal activiteiten opgedeeld in fasen, deels in de aangegeven volgorde en deels door elkaar heen:

1. Oriëntatiefase:

De oriëntatiefase is afgesloten met het uitkomen van een werkplan en een bespreking met de afstudeercommissie.

2. Eerste en tweede tussenfase:

- Literatuurstudie voor het inwinnen van informatie over geboorde tunnels, strategieën van onderhoud en principes van beheer.
- Het afnemen van interviews met personen betrokken bij de aanleg van geboorde tunnels en het beheer van infrastructuur. Over het algemeen zijn de betrokkenen werkzaam bij TU-Delft of Rijkswaterstaat.
- Met het computerprogramma Optimon een beheerstrategie per component van de geboorde tunnel bepalen, aan de hand van voorbeelden.
- Telefonisch inwinnen van informatie over geboorde tunnels en beheer van infrastructuur in binnen- en buitenland.
- Verwerken van de informatie, de gegevens, eigen mening en het maken van keuzes.
- Schrijven van het eerste en tweede tussenrapport en de bespreking daarvan met de voltallige afstudeercommissie.

3. Eindfase:

- Opstellen van een lijst van componenten van de geboorde tunnel van belang voor het beheer. Inventarisatie van de technische werking van de componenten, het verouderingsproces en de degradatie.
- Opstellen van een verwacht schadepatroon en bijbehorende inspectie- en onderhoudswerkzaamheden.
- De optimalisatie van de beheerstrategie door het genereren van scenario's van beheer. Het scenario wordt bepaald door de het aantal grote renovatiewerkzaamheden.
- Onderzoek naar de organisatie van het beheer van geboorde tunnels.
- Schrijven van het eindverslag, bespreking met de afstudeercommissie en uiteindelijk voordracht beëindigd deze fase.

3 Inventarisatie van kunstwerkbeheer

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een inventarisatie van het beheer van civiel-technische constructies in verleden, heden en de toekomst. Rijkswaterstaat is de grootste beheerder van infrastructuur in Nederland. Onder kunstwerken worden de speciale civiel-technische constructies verstaan, zoals tunnels, bruggen, viaducten. Informatie over het beheer in verleden en het huidige beheer is afkomstig van de bouwdienst Rijkswaterstaat.

Er is gekeken naar het beheer van constructies en specifiek naar de geboorde tunnel. Door middel van literatuurstudie en interviews met deskundigen is onderzoek gedaan naar het beheer. Het beheer van kunstwerken is niet eenduidig gedefinieerd. Termen als beheer, onderhoud en inspectie worden meer dan eens naast of in plaats van elkaar gebruikt. Op voorhand moet duidelijk zijn dat onderhoud en inspectie een onderdeel zijn van beheer. Dit hoofdstuk kijkt verder naar de achtergronden van beheer en enige verouderingsmodellen.

3.2 Het beheer in verleden en heden bij Rijkswaterstaat

Het beheer van civiel technische constructies wordt steeds belangrijker. De reden van deze ontwikkeling is enerzijds de veroudering van een groot aantal constructies, die na de tweede wereldoorlog zijn gebouwd en anderzijds de toegenomen behoefte om kunstwerken te repareren en te renoveren. De toegenomen behoefte hiervoor is ontstaan door het toegenomen milieu en economisch bewustzijn van de samenleving.

De snelle economische groei heeft geleid tot grote toename van kunstwerken, waarbij een snelle bouwtijd, hoge kosten en esthetische eisen leiden tot de inzet van nieuwe en nog onvoldoende beproefde materialen. Er is met betrekking tot ontwerp en uitvoering, onvoldoende geanticipeerd op hogere gebruiksaslasten, bij bijvoorbeeld het toegenomen verkeersaanbod. In de zeventiger jaren is het noodzakelijk onderhoud als gevolg van de economische achteruitgang achterwege gebleven. Bovendien stelt de samenleving op dit moment hogere eisen aan de beschikbaarheid van de infrastructuur. Het gevolg is dat de kosten van onderhoud vandaag de dag uitstijgen boven de beschikbare budgetten.

Het beheer van kunstwerken bestaat momenteel vaak slechts uit eenvoudige inspectietechnieken in combinatie met onderhoudstrategieën. Dit is ontwikkeld in de praktijk en niet gebaseerd op theorie. Paragraaf 4, op bladzijde 16, gaat in op theoretische onderhoudsmodellen. Het onderhoud omvat globaal elementen [2]:

- Reinigen van zichtbare onderdelen en onderdelen gevoelig voor beschadiging.
- Vluchtige inspecties met een frequentie van enkele malen per jaar van het kunstwerk, in combinatie met klein preventief onderhoud.
- Technische inspectie die eens in het jaar of na een aantal jaar noodzakelijk is, om de technische conditie van een kunstwerk te achterhalen en eventueel reparaties te doen.
- Gealarmeerd onderhoud ontstaan door plotselinge overbelasting, menselijke fout (botsing) of achterstallig onderhoud.

- Grote renovatiewerkzaamheden waarbij de constructie en alle componenten worden geïnspecteerd en onderhouden.

Een civiel-technische constructie heeft een zeer lange levensduur. De Romeinse constructies staan er na enige restauraties (= onderhoud) nu ongeveer 2000 jaar. De geboorde tunnels worden ontworpen voor een technische levensduur van 100 jaar. Groot onderhoud aan de constructie geschiedt over het algemeen tijdens een renovatie. Renovatiewerkzaamheden worden uitgevoerd als de infrastructuur in het geheel of voor een gedeelte niet meer zijn functie kan vervullen. Dit kan de volgende redenen hebben:

- Door het toegenomen verkeersaanbod raakt de infrastructuur verstopt in de spijtstijden van de dag.
- Door verschuiving van gebruik van vervoersmiddel is het efficiënter en economischer de tunnel om te bouwen.
- Door voortdurende degradatie.
- Door calamiteiten, veranderende eisen en door invloed van de samenleving.

Een renovatie wordt eens in 25 á 50 jaar gedaan als er een noodzaak is de werkzaamheden te verrichten en er budgetten beschikbaar zijn.

Duurzaamheid en onderhoudsaspecten worden in het ontwerpstadium nauwelijks expliciet meegenomen. De ontwerper claimt slechts een duurzame constructie te hebben ontworpen, onderhoudsvrij gedurende de ontwerplevensduur. Prognoses over levensduur, kosten van inspectie en onderhoud zijn niet gemaakt. Beheerinstrucies aan de beheerder zijn uitermate schaars. De beheertaak ligt zodoende momenteel geheel bij een regionale beheerder. Bij Rijkswaterstaat zijn de kunstwerken toegewezen aan regionale dienstkringen. Een dienstkring is een regionale beheerder van alle infrastructuur in die regio. De regionale beheerder voert traditioneel, al dan niet uitbesteed, periodieke inspecties uit van een groot aantal, zo niet alle, onderdelen. In deze aanpak zijn slechts de tijdsintervallen van inspectie en onderhoud de te beheren variabelen.

Het huidige beheer wordt gekenmerkt door herstel van schade. De onderhoudstrategie is storingsafhankelijk en de inspectiekosten zijn geminimaliseerd, omdat tot storing geen inspectiewerkzaamheden worden verricht. Door gebrek aan kennis omtrent het minimaal noodzakelijke kwaliteitsniveau wordt de nieuwe of de oorspronkelijke situatie als uitgangspunt genomen. Dit leidt in de praktijk tot definities als:

- Onderhoud is zaken in goede conditie houden, waardoor veiligheid minimaal geriskeerd wordt, of
- Onderhoud is zaken in goede conditie houden, opdat de constructie zijn functie kan vervullen.

Een aanzienlijk deel van het beschikbare beheerbudget wordt aan het exploitatie besteed. Dit zijn de uitgaven aan het reinigen en de vluchtige inspecties.

Het interview met de dienstkring Rhooen geeft weer hoe het onderhoud aan een grote civiel-technische constructie is geregeld bij een dienstkring van Rijkswaterstaat.

INTERVIEW DIENSTKRING RHOON

De dienstkring Rhooon beheert momenteel twee verkeerstunnels, de Beneluxtunnel in rijksweg 4 en de Heinenoordtunnel in rijksweg 29. Met betrekking tot het onderhoud van beide tunnels wordt gesproken over instandhoudingsplannen. In 1999 wordt de geboorde "Tweede Heinenoordtunnel" toegevoegd aan deze dienstkring.

Het grootste deel van het onderhoud zit in de elektromechanische (E&M) installaties van de tunnels, zoals:

- bedieningslessenaars
- monitoren
- vuilwaterpompen
- ventilatie
- verlichting
- signalering

Voor E&M-voorzieningen zijn meerjarige onderhoudscontracten afgesloten, waarin periodieke vaste inspectieronden zijn opgenomen. De periode van inspectie, is afhankelijk van het soort component:

- uitvalrisico
- schade laatste inspectieronde
- ontwikkeling schade

Voor het meerjarige onderhoudscontract vindt openbaar een aanbesteding plaats. De aannemer met de laagste prijs wordt het project gegund. Aan de hand van de inspecties komen de eventuele gebreken in de installaties aan het licht. Deze gebreken worden dan, na aanvraag van een stelpost offerte, door de onderhoudsaannemer hersteld. Een stelpost offerte is een overzicht van te herstellen onderdelen en de bijbehorende kosten. Kleine aanpassingen en verbeteringen worden op deze manier door de onderhoudsaannemer uitgevoerd, uiteraard wederom na een prijsaanbieding te hebben gedaan.

Het onderhoudscontract bestaat uit een vast gedeelte voor de inspectie en een stelpost-gedeelte voor het herstellen van de gebreken. Het stelpost-gedeelte is een variabele onderhoudspot, die al naar gelang dit noodzakelijk is wordt gebruikt.

Voor grotere aanpassingen en verbeteringsklussen worden aparte overeenkomsten opgesteld. Deze overeenkomsten worden apart aanbesteed en uitgevoerd.

Voor civiel-technisch onderhoud is een aantal werkzaamheden opgenomen in een onderhoudsovereenkomst voor kunstwerken. In de overeenkomst wordt beschreven welke handelingen de opdrachtnemer dient uit te voeren voor de opdrachtgever. In een contract staat de vergoeding die de opdrachtgever aan de opdrachtnemer voor die werkzaamheden verschuldigd is. Het gaat om correctieve klussen waarbij tot in detail is beschreven wat de uit te voeren handelingen zijn en om welke onderdelen het gaat (type, kleur). Voor onvoorziene civiel-technische aanpassingen is in de jaarbegroting per tunnel een vast bedrag á f 75.000,- gebudgetteerd. Dit wil niet zeggen dat er per jaar ook voor een bedrag van f 75.000,- wordt hersteld.

De beheerder kan zelf kiezen aan welk onderhoud aandacht wordt besteed. Zo komt het voor dat de regionale beheerder van de Coentunnel de wanden 4 keer per jaar reinigt en dat de regionale beheerder van de Beneluxtunnel 1 keer voldoende vindt. Het reinigen van een tunnel wordt uit veiligheidsredenen gedaan. De vaste obstakels, signalering en verlichting blijven zichtbaar en losse obstakels worden opgeruimd bij periodieke reiniging.

Ook al wordt een tunnel beheerd door één regionale beheerder, er kan geen jaarlijkse begroting van beheer voor de verschillende werkzaamheden in één tunnel gegeven worden. De kosten van beheer worden door de desbetreffende regionale dienstkring gemaakt. Verschillende afdelingen binnen de dienstkring zijn verantwoordelijk voor het beheer en laten door verschillende aannemers inspectie en onderhoud verrichten. Het hoofd van de regionale directie heeft hierdoor geen inzicht in de totale beheerkosten die gemaakt zijn aan de tunnel.

3.3 Het beheer in de toekomst

Financiële beperkingen leiden tot de stelling dat de huidige aanpak niet langer wenselijk is en dat een meer geavanceerde beheer-methodiek noodzakelijk is. Om hieraan te kunnen voldoen moet meer inzicht in de beheersing van het onderhoud van constructies verkregen worden. De sleutelwoorden hierbij zijn:

- onderhoudstrategie
- onderhoudsconcept
- verouderingsmechanisme
- consequenties bij falen
- ontbinding van de materialen
- het doel van onderhoud

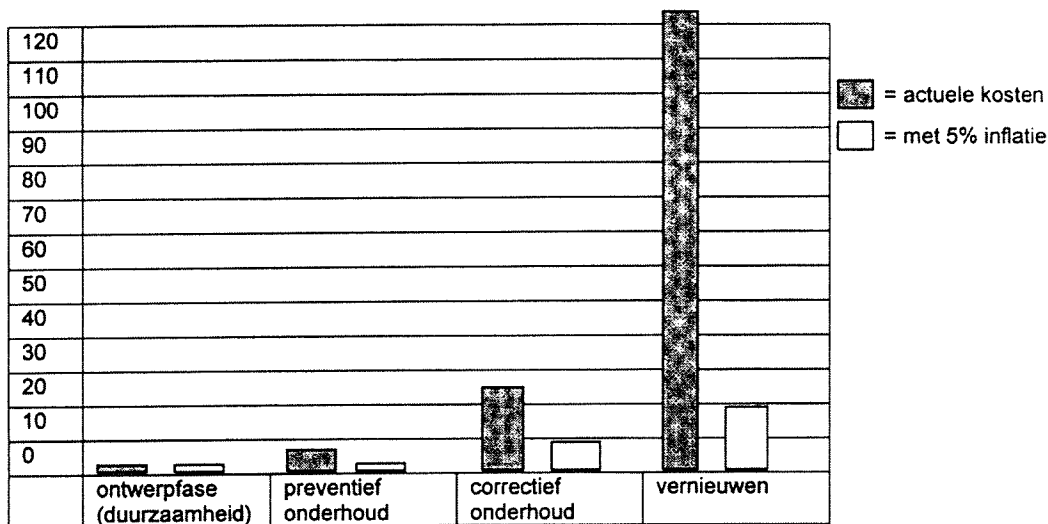
Voor constructies kan op theoretische basis een inspectie- en onderhoudstrategie worden bepaald [3]. Het beheer moet een geïntegreerd aspect vormen samen met ontwerp, uitvoering en gebruik van de constructie.

De Sitter [1] beschrijft een zogenaamde "Law of Five" waarin elke gulden besteed aan duurzaamheid tijdens de ontwerpfase equivalent is aan vijf gulden besteed aan preventief onderhoud later. En die op hun beurt weer gelijk staat met vijf gulden besteed aan preventief onderhoud en aan vijftwintig gulden voor grootschalige renovaties in een volgend stadium. Daarboven op komt het feit dat onderhoudskosten des te hoger zijn naarmate de acties langer worden uitgesteld door verder ontwikkelde schade.

Door uitstel van onderhoud zullen kosten ook uitgesteld worden. De waardedaling is verrekend met de methode van de netto contante waarde. De volgende paragraaf behandelt deze methode.

Waardedaling van geld heeft een positief effect op het uitstel van uitgaven aan onderhoud. Hierdoor geeft de "Law of Five" een te negatief beeld. In onderstaande figuur is schematisch de "Law of Five" weergegeven. Over het algemeen wordt per jaar een inflatiepercentage van 5% gerekend. Op de verticale as zijn de kosten aan duurzaamheid, inspectie en onderhoud uitgezet en op de horizontale as de verschillende acties die kunnen worden ondernomen afhankelijk van de staat van de constructie (figuur 2).

De theorie van de Sitter leert ons dat een investering in duurzaamheid, een minimalisering van de beheerskosten kan betekenen. En dat met preventief onderhoud torenhoge onderhoudskosten worden bespaard als falen niet optreedt. Aan de andere kant is het economisch voordelig de inspectie- en onderhoudskosten zolang mogelijk uit te stellen, in verband met het rentepercentage van waardedaling. Grote uitgaven in de verre toekomst hebben nu een veel kleinere boekwaarde.



Figuur 2 "Law of five"

3.3.1 Netto contante waarde -methode

Materiaal, materieel, personeel en risico kunnen worden uitgedrukt in kosten met een nationale geldeenheid. Op deze manier kunnen kostenposten, alternatieven en risico's gemakkelijk vergeleken worden met elkaar. Het is wrang om te stellen, maar zelfs overledenen door ongeval kunnen verrekend worden in kosten.

Het is voor deze studie van belang, dat de kosten van ontwerp, inspectie, onderhoud en exploitatie geïnventariseerd worden van één bepaalde constructie. De verschillende kosten worden gedurende de gehele levensduur van de constructie gemaakt. De technische levensduur van een geboorde tunnel is op 100 jaar gesteld. Gedurende de levensduur is de waardedaling 5%. Het is economisch voordelig als de uitgaven later worden gedaan. Een uitgave van fl 1.000.000,- over 100 jaar heeft nu een boekwaarde van fl 7.604,49 als er een rentepercentage van 5 % wordt gehanteerd.

De kosten van dezelfde werkzaamheden in verschillende levensjaren zijn niet even groot. Om toch tot een goede vergelijking te komen, gaan we alle kosten die een rol spelen bij aanlegfase en gebruiksfase van een civiel-technische constructie omrekenen naar het aanlegjaar. De waardedaling die in deze studie verdisconteerd wordt is 5%. Alle kosten worden teruggerekend en gesommeerd naar het basisjaar. De huidige dagwaarde van de constructie wordt zo berekend. Tevens is het mogelijk een afweging te maken tussen verschillende scenario's van beheerplannen. De huidige dagwaarde wordt de netto contante waarde genoemd.

De volgende vergelijking kan opgesteld worden om de netto contante waarde (NCW) te berekenen:

$$K_c = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{K_t}{(1+i)^t} \text{ met:}$$

- K_c = huidige dagwaarde
- t = periode (maand, jaar)
- K_t = de kosten gemaakt in die bepaalde periode t
- i = rentepercentage (het werkelijk rentepercentage, is het actuele rentepercentage minus inflatiecorrectie) De component die waardedaling kwantificeert.

In woorden, de huidige dagwaarde is de som van alle kosten die jaarlijks gemaakt worden, teruggerekend naar het basisjaar met een rentepercentage (i).

3.4 Inventarisatie theorie van beheer

3.4.1 Inleiding

Onderhouden is: de constructie of de componenten in een goede technische staat houden, zodat de constructie zijn functie kan blijven vervullen. Deze korte definitie van onderhoud uit het woordenboek, is jarenlang de eenvoudige maar uiterst vage doelstelling geweest voor beheerders. Veel vragen blijven onbeantwoord: Welke componenten? Hoe goed onderhouden? Welke functies? Hoe betrouwbaar?

In deze paragraaf gaan we beginnen met een inventarisatie van componenten van de constructie en we gaan een aanpak van beheer uiteen zetten in 5 opeenvolgende stappen.

3.4.2 Inventarisatie componenten

We beginnen bij een inventarisatie van alle componenten die van belang zijn voor de constructie:

- een technische beschrijving van de constructie
- de functie van de infrastructuur
- de reden van verlies functie:
 - a. een technisch reden van veroudering
 - b. externe reden van een verwachte of onverwachte gebeurtenis door bv. botsing, vervuiling

- c. de mens, door fouten en acties ontstaan in ontwerpfase, uitvoering, gebruik, onderhoud, organisatie
- consequenties van functioneel verlies. Het eventueel verlies aan produktie moet een belangrijke rol spelen bij de keuze omtrent het onderhoud (buitengebruikstelling).
- de componenten in de constructie kunnen ingedeeld worden naar type:
 1. vaste componenten van de civiele constructie
 2. componenten van mechanisch bewegende delen
 3. elektrische en elektronische componenten
- verschillende soorten verouderingsgedrag:
De componenten van de civiele constructie worden over het algemeen blootgesteld aan één of twee verouderingsmechanismen. Door periodieke visuele inspectie komen we erachter wat de voortgang van het proces kwalitatief is. Kwantitatief kunnen we schade herkennen door het doen van metingen. Voorbeelden van veroudering zijn chloride-indringing, carbonatie van beton en vermoeiing, verrotting van materialen.

3.4.3 Aanpak van beheer

Een aanpak van beheer gaan we samenvatten in vier opeenvolgende stappen [1]:

1. De functies, het doel en de eisen van de constructie en afzonderlijke onderdelen.
2. Het doel van beheer en onderhoud.
3. De functionele relatie tussen de constructie en de componenten, bijvoorbeeld bezwijken van een onderdeel en verlies van de functionaliteit.
4. Een beslissingsmethode en een afstemming om de juiste onderhoudacties te ondernemen.

De vier opeenvolgende stappen uitvoeriger beschreven:

1. *De functies en eisen van de constructie en afzonderlijke onderdelen*
In een kunstwerk kan onderscheid worden gemaakt tussen vaste civiele onderdelen, bewegende mechanische onderdelen en elektrische onderdelen
2. *Het doel van beheer*
 - betrouwbaarheid: De waarschijnlijkheid dat een kunstwerk of een component daarvan gedurende een bepaalde tijdsperiode zijn functie kan vervullen.
 - bruikbaarheid: De hoeveelheid tijd of het aantal malen gedurende de levensduur, dat een kunstwerk zijn functie vervult.
 - duurzaamheid: Het vermogen van een kunstwerk om gedurende een tijdperiode zijn functie te blijven vervullen.
 - presenteerbaarheid: De bevindingen van het publiek en de toonbaarheid van het kunstwerk.

Een aanvullende doelstelling voor de beheerorganisatie is:

De kosten economisch te optimaliseren gedurende een bepaalde tijdsperiode (bijvoorbeeld de levensduur van de constructie).

3. *De functionele relatie tussen de constructie en de componenten, bijvoorbeeld bezwijken van een onderdeel en verlies van de functionaliteit.*

Het falen van kunstwerkonderdelen kan aan een drietal oorzaken toegeschreven worden, te weten: (I) menselijke fout, (II) externe oorzaken en (III) technische oorzaken zoals veroudering en overbelasting.

4. *Een beslissingsmethode en een afstemming om de juiste onderhoudacties te ondernemen*

De kwantitatieve regels voor de belangrijkste onderdelen dienen tezamen met de kwalitatieve regels voor de overige onderdelen te worden afgestemd tot een concept, waarin afstemming plaats vindt op criteria zoals (I) reductie kosten, (II) reductie van de tijd gedurende welke het kunstwerk niet of niet volledig inzetbaar is en (III) planning vanuit organisatorisch oogpunt.

3.4.4 Inspectie- en onderhoudstrategie

Er zijn drie basis-onderhoudstrategieën:

- I. **STORINGS-AFHANKELIJK ONDERHOUD (SAO)**

Als een component niet meer werkt wordt onderhoud gedaan. Deze strategie is kenmerkend voor kunstwerkonderdelen met relatief kleine risico's bij of op bezwijken. De kosten worden bepaald door de reparatie- of vervangingskosten plus de totale kosten van de gevolgen van het bezwijken, gedeeld door de verwachte gemiddelde levensduur, oftewel:

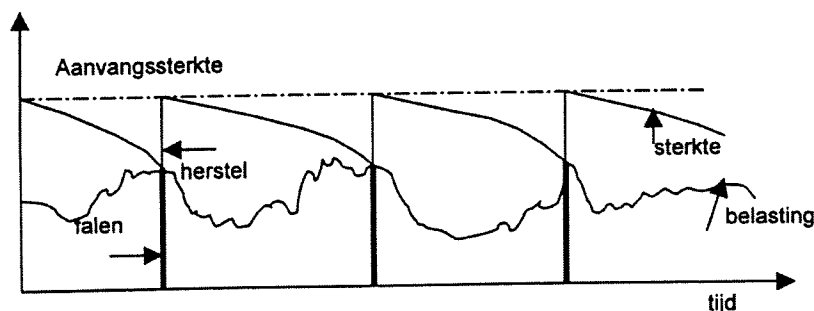
$$\text{verwachte totale kosten per jaar: } E_c = \frac{C_r + C_f}{T_c}$$

E_c = verwachting van de totale kosten per jaar voor onderhoud, vervanging of reparatie

C_r = reparatiekosten

C_f = faalkosten (door plotselinge uitval van de component worden grotere kosten gemaakt)

T_c = de verwachte gemiddelde levensduur van de component



Figuur 3

Schematische weergave van storingsafhankelijk onderhoud (SAO)

II. GEBRUIKSAFHANKELIJK ONDERHOUD (GAO)

Onderhoud wordt gedaan als een van tevoren vast gestelde tijdsperiode of belasting overschrijden wordt. Een plank wordt bijvoorbeeld vernieuwd als 20.000 voertuigen gepasseerd zijn. Deze strategie is kenmerkend voor kunstwerkonderdelen waarbij de gebruikstijd tot bezwijken goed voorspelbaar is en dus niet te veel spreiding vertoont. De aanpak leidt tot preventief onderhoud. Kosten worden bepaald door reparatie- en vervangingskosten en de kosten van bezwijken tot het moment waarop actie wordt ondernomen, gedeeld door de verwachte gemiddelde levensduur, oftewel:

$$\text{verwachte totale kosten per jaar: } E_c = \frac{C_r + P_f t_f \cdot C_f}{T_c}$$

E_c = de verwachte kosten per jaar van vervanging, reparatie of onderhoud

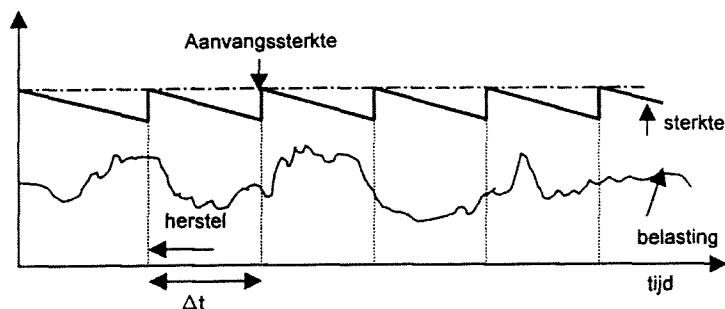
C_r = reparatiekosten

P_f = kans dat falen optreedt

t_f = tijdperiode in gebruik zijn van de component

C_f = de faalkosten

T_c = de verwachte gemiddelde levensduur van de component



Figuur 4 Schematische weergave van gebruiksaafhankelijk onderhoud (gao)

III. TOESTANDSAFHANKELIJK ONDERHOUD (TAO)

Onderhoud wordt gedaan als een bepaalde conditielimiet wordt bereikt en waargenomen. Deze strategie is kenmerkend voor kunstwerkonderdelen met relatief groot risico bij of op bezwijken. Inspectie is noodzakelijk en kan gedaan worden op voorwaarde dat de conditie meetbaar is of kan worden gemaakt. De inspectiekosten dragen bij aan de totale kosten, oftewel:

$$\text{verwachte totale kosten per jaar: } E_c = \frac{C_r + n \cdot C_i + P_f(n, g) \cdot C_f}{T_c}$$

E_c = verwachte kosten per jaar voor onderhoud, vervanging of reparatie

C_r = reparatiekosten

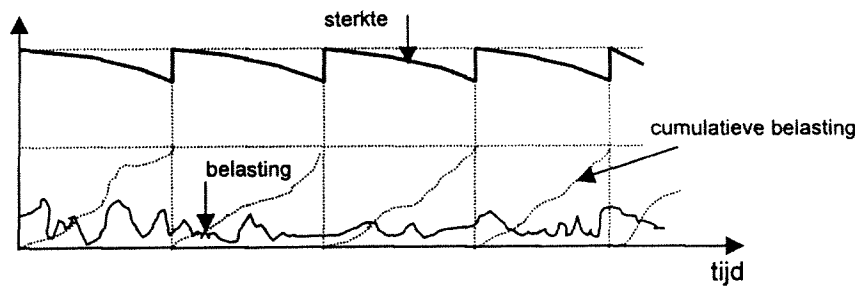
n = aantal handelingen gedurende periode ($n = 1..i$)

C_i = inspectiekosten

$P_f(n, g)$ = kans op voordoen situatie, als functie van het aantal keren dat inspectie gedaan wordt en de gemeten conditie

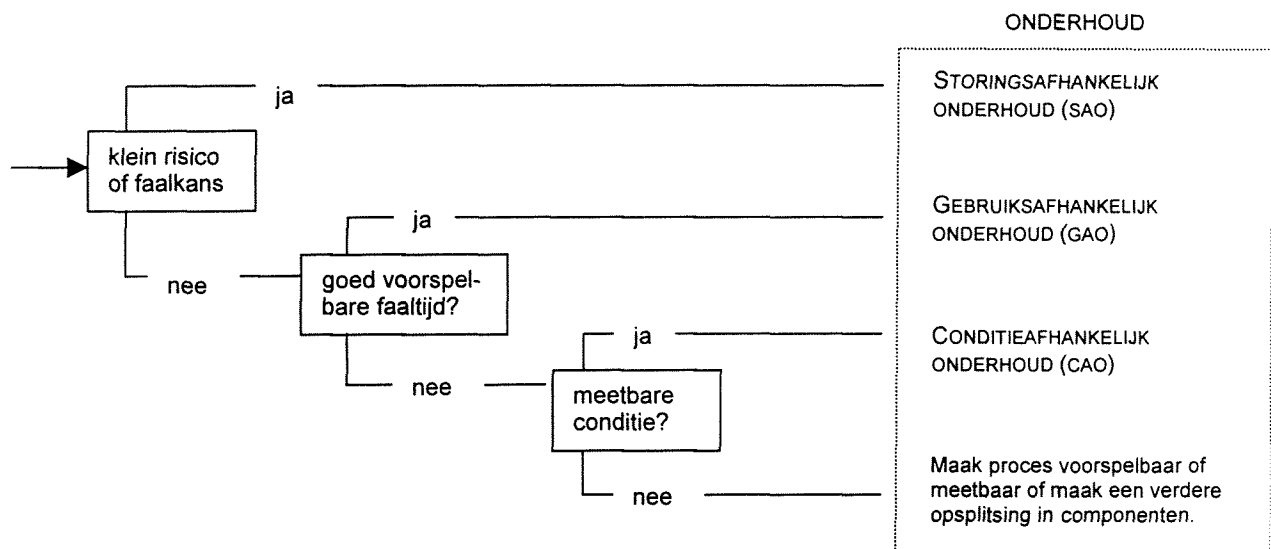
C_f = de faalkosten

T_c = de levensduur van de component



Figuur 5 Schematische weergave van toestandsafhankelijk onderhoud (tao)

Voor het kiezen van een strategie, kan gebruik gemaakt worden van het schema van figuur 6 [1]. Aan de hand van het antwoord op de vraag over de component is het mogelijk een bepaalde strategie te kiezen. Verrekening van het risico dat een component faalt, gebeurt door vermenigvuldiging van de kans dat een component daadwerkelijk faalt met de gevolgschade als gevolg van het falen van de component.



Figuur 6 Beslissingsboom voor de keuze van de juiste onderhoudstrategie [1]

Er zijn twee verschillende inspectiestrategieën:

- I. Inspectie na gebruik afhankelijk van een tijdsperiode of een belasting.
De strategie is theoretisch hetzelfde als gebruiksafhankelijk onderhoud.
- II. Inspectie afhankelijk van de conditie van component of constructie.
Deze strategie komt overeen met toestand afhankelijk onderhoud.

Bij storingsafhankelijk onderhoud is er geen inspectiestrategie op te stellen, omdat geen inspectie verricht wordt. Na falen wordt de component vervangen.

De keuze van de onderhoudstrategie wordt beïnvloed door verschillende aspecten:

- Bij sao wordt altijd correctief onderhoud gedaan en heeft het falen van de component een bepaalde consequentie.

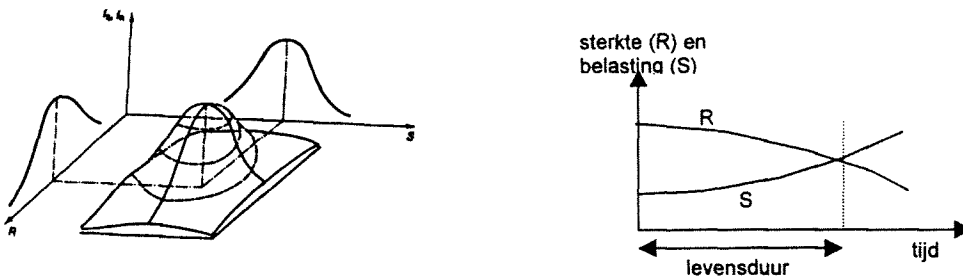
- Bij gao moet een relatie gemaakt worden tussen het falen van een component en het gebruik ervan, zodat preventief onderhoud wordt gedaan.
- Bij tao moet de achteruitgang meetbaar zijn wil je hier preventief onderhoud doen.
- Als er grote risico's zijn bij bezwijken moet niet gekozen worden voor de strategie sao.
- Als bezwijken goed voorspelbaar is in de tijd, dan kan gekozen worden voor de strategie gao.
- Als de achteruitgang van de component goed meetbaar is, dan kan gekozen worden voor de strategie tao.

Eigenschappen van civiele constructies die keuze naar strategie per onderdeel moeilijk maken:

- Vele onderdelen vertonen geen bezwijkgedrag
- Afhankelijk van de schaal waarop je naar de constructie kijkt kun je zeggen dat wordt onderhouden volgens een bepaalde strategie. Zo kan sao op componenten-basis, tao op constructieniveau betekenen.
- Budgettaire restricties bepalen de beslissingen rond onderhoud.
- Een externe reden kan het moment van het doen van onderhoud bepalen (een ramp).

Er zijn verschillende vormen van degradatieproces per onderdeel of constructie:

1. lineair verband tussen bezwijken en een tijdsperiode
2. afname kans op bezwijken (exponentieel)
3. toename kans op bezwijken (exponentieel)
4. discrete toename van de kans op functieuitval door bezwijken door bv. overbelasting
5. een plotselinge overgang naar bezwijken bijvoorbeeld instorten door overbelasting



Figuur 7 Sterkte en belasting op een component

De constructie wordt ontworpen met enige veiligheid. Dit betekent dat de waarschijnlijkheid van falen van de constructie onder een geaccepteerd niveau moet blijven. Gedurende een tijdsperiode kan de sterkte van de constructie afnemen door degradatie van componenten en is het mogelijk dat belastingen toenemen. Het degradatieproces is als verband uit te zetten met de sterkte en belasting tegen de tijd. Het verouderingsmodel is schematisch weergegeven in figuur 7. Het model is een benadering van de werkelijkheid. De betrouwbaarheidsfunctie die hierbij is op te stellen luidt:

$$Z = R - S, \text{ met}$$

$Z =$ betrouwbaarheid

$R =$ sterkte

S = belasting

Als $Z = 0$ is geen betrouwbaarheid over en faalt de constructie.

De technische levensduur van een kunstwerk is de tijdsduur die verstrijkt tussen de realisatie en het falen van het kunstwerk of het buitengebruikstellen van het kunstwerk als de normen van veiligheid worden overschreden.

Het volgende hoofdstuk behandelt de verschillende onderhoudsstrategieën voor civiel-technische constructies. Aan de hand van een eenvoudig voorbeeld toetsen we het computerprogramma Optimon. Een voorbeeld van een geboorde tunnel zoekt vervolgens naar een strategie die de beheerskosten minimaliseert. Een keuze van een strategie mag niet alleen gebaseerd zijn op minimale kosten van beheer van de constructie, maar moet per component overwogen worden.

4 Optimalisatie beheer van een component met Optimon

4.1 Inleiding

Optimon staat voor **optimalisatie van onderhoud**. Het softwarepakket is een optimalisatiepakket van onderhoud aan civiel-technische constructies, ontwikkeld door de instantie van toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO) voor de Bouwdienst Rijkswaterstaat. Voor de drie verschillende onderhoudsstrategieën: gebruiksaafhankelijk onderhoud (gao), storingsaafhankelijk onderhoud (sao) en toestandsaafhankelijk onderhoud (tao) kan Optimon kosten optimale onderhoudstrategieën bepalen. Het programma is na ontwikkeling, zes jaar geleden, niet in gebruik genomen door de Bouwdienst Rijkswaterstaat.

We beginnen met een theoretisch onderzoek naar de opbouw en de functie van Optimon. Dit hoofdstuk geeft twee voorbeelden opgesteld voor Optimon. Het eerste voorbeeld is een voorbeeld van het beheer van een roestende staaf. Aan de hand van dit gemakkelijke voorbeeld wordt het programma getoetst op bruikbaarheid. Het tweede voorbeeld is een voorbeeld van het beheer van een geboorde tunnel. Aan de hand van dit voorbeeld wordt de bruikbaarheid getoetst voor deze studie. Als beide voorbeelden zijn uit te voeren in Optimon, dan zal het programma gebruikt worden voor het onderzoek naar de technisch-economisch optimale strategie voor het beheren van geboorde tunnels.

Na deze inleiding volgt in paragraaf 4.2 een mathematische beschrijving van het gebruikte model ter bepaling van onderhoudstrategieën. Dit model is een één-component systeem, dat wil zeggen dat per component een strategie geoptimaliseerd wordt. Een component kan een materiaalsoort zijn, maar ook een combinatie daarvan; bijvoorbeeld gewapend beton (staal en beton) of tunnel (tunnelwand). In paragraaf 4.3, bladzijde 31, volgt een algemene beschrijving van de werking van het programma. Vervolgens wordt met een eenvoudig voorbeeld 'De roestende staaf', de verschillende strategieën vergeleken en wordt met het voorbeeld 'De geboorde tunnel' uiteindelijk bruikbaarheid voor deze studie getoetst. In de conclusie wordt het eindoordeel gegeven over het gebruik van Optimon voor mijn onderzoek naar de optimalisering van het beheer.

4.2 Modelering van beheer

4.2.1 Inleiding

Het fysisch en elektronisch laboratorium van TNO (TNO-FEL) heeft een model ontwikkeld voor het onderhouden van civiel-technische constructies zoals damwanden, bruggen, en andere mechanische en statische systemen. Er is een softwaresysteem ontwikkeld dat zowel optimale onderhoudstrategieën en minimale kosten vergelijkt, als van een gegeven strategie de gemiddelde kosten bekend zijn. Het model is gebaseerd op het Markov beslissingsproces. Allereerst wordt het algemene model uiteengezet en vervolgens wordt dit uitgewerkt voor de drie onderhoudsconcepten (gao, sao en tao). De gegevens zijn overgenomen uit het TNO-Defensieonderzoek Rapport nummer FEL-91-B320 exemplaar nummer 21 [19].

4.2.2 Het algemene model

Voor de modelering van een bepaalde onderhoudsplanning zijn gegevens nodig. Voordat een algemene beschrijving van het semi-Markov beslissingsmodel wordt beschreven volgt eerst een beschrijving van de gegevens en grootheden die een rol spelen.

GEGEVENS ONDERHOUDSPANNING

- het degradatieproces: een beschrijving van de eigen degradatie van het systeem als functie van de tijd. Bij civiele constructies kan gedacht worden aan corrosie, carbonatatie, vermoeiing, kruip en krimp.
- kosten:
 - inspectiekosten. Dit zijn kosten om te bepalen wat de conditie van het systeem is.
 - vaste faalkosten. Dit zijn de verwachte kosten van gevolgschade bij het optreden van een storing. En de gekwantificeerde kosten die indirect worden gemaakt door de buiten gebruikstelling, het verlies van prestige en het eventuele ongeluk. Deze kosten zullen hierdoor vele malen hoger zijn dan bij tijdige reparatie of vervanging van het systeem.
 - vervangingskosten. Dit zijn de kosten van vervanging van het systeem voor een nieuw systeem.
 - variabele faalkosten. Dit zijn de extra kosten per tijdseenheid gedurende storingen.
 - exploitatiekosten. Dit zijn alle kosten per tijdseenheid gedurende de ingebruikstelling bij normaal gebruik.
- tijdsduren:
 - de vervangingsduur. De benodigde tijd om het systeem te vervangen.
 - de inspectieduur. De benodigde tijd om het systeem te inspecteren.
 - de veragingsduur. De wachttijd tussen het moment van constatering (inspectie), dat onderhoudswerkzaamheden gedaan moeten worden en het moment dat de reparatie ook daadwerkelijk gedaan wordt.

HET (SEMI-) MARKOV BESLISSINGSMODEL

Een Markov beslissingsmodel wordt bepaald door de volgende parameters:

- toestandsverzameling De mogelijke toestanden waarin de component zich op beslissingstijdstippen kan bevinden.
- actieverzameling De mogelijke acties (afhankelijk van de toestand van de component) waarmee het onderhoudsproces wordt gestuurd.
- overgangskansen Kansmechanisme volgens welke de component de toestandsverzameling doorloopt.
- beslissingstijdstippen De tijdas met discrete stappen waarop men de component bekijkt (zijn conditie bepaalt), en het onderhoudsproces stuurt, door te beslissen tot wel of geen actie.

- kosten

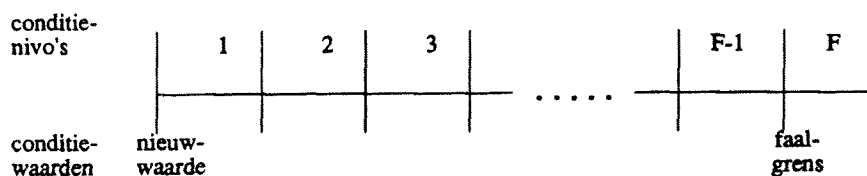
De kosten die de toestand van de component, afhankelijk van de gekozen acties, met zich meebrengen.

Men spreekt van een (semi-) Markov beslissingsmodel als het model niet uitgaat van vaste tijdstippen voor de beslissingsmomenten, maar deze laat hangen van het optreden van een gebeurtenis. Ofwel de tijdstippen worden beïnvloed door de te nemen acties. Het (semi-) Markov beslissingsmodel heeft de belangrijke eigenschap meegekregen dat het model "geheugenloos" is. Dat wil zeggen dat het toekomstig gedrag van de component kan worden beschreven als de huidige toestand bekend is.

Een aantal parameters zijn onafhankelijk van het gekozen onderhoudsconcept algemeen in te vullen in het (semi-) Markov onderhoudsmodel:

DE CONDITIESCHAAL

Dit is een belangrijk onderdeel van de toestandsverzameling. De conditiewaarde is de grootte die de mate van degradatie van een component weergeeft. Als gevolg van het degradatieproces doorloopt de conditie van een component een waardegebied: van nieuwwaarde tot faalgrens. De toestandsruimte wordt gediscrètiseerd voor de modellering als een Markov-model. De conditieniveaus zijn van 1 tot en met F genummerd, respectievelijk van nieuwwaarde tot faalgrens. Het aantal stapjes tussen 1 en F is zelf te kiezen. Hoe groter het aantal stapjes ($n = 1 \dots F$) des te groter de nauwkeurigheid. De rekentijd neemt evenredig toe.



Figuur 8 Discretisering van de conditieschaal [21]

In het algemeen zal de component niet continu observeerbaar zijn, er worden gedetailleerde inspecties uitgevoerd om de huidige conditie te achterhalen. In een aantal gevallen is een faalconditie wel direct merkbaar. Bij de modelering is onderscheid tussen wel en niet direct geconstateerde faalcondities. De conditie F wordt opgesplitst in:

- G = de faaltoestand die slechts door middel van inspectie geconstateerd wordt,
- G+1 = de faaltoestand die zonder inspectie bekend wordt.

ONDERHOUDSACTIES

Op het beslismoment kan men kiezen uit een aantal acties:

- niets doen tot volgende tijdstip,
- inspecteren van de component en

- de component vervangen of onderhouden afhankelijk van de gevonden conditie. Voor dit computerprogramma is onderhouden, onderhouden tot oorspronkelijke toestand, zodat een zo-goed-als-nieuw situatie optreedt. Er is geen verschil tussen vervangen en repareren.

OVERGANGSWAARSCHIJNLIJKHEDEN BIJ HET VEROUDERINGSPROCES

Onder het verouderingsproces van een component verstaan we zijn degradatie. De degradatie wordt beschreven als een continue stochastische functie van de tijd. Het degradatieproces wordt beschreven met behulp van de kans r_{kj} . Dit is de kans dat een component overgaat van de ene conditie (k) naar de andere conditie (j). Er is geen spontane vernieuwing mogelijk. De kansovergang loopt van 1 (nieuw) tot en met F (falen) en wordt tevens gesplitst in G (faaltoestand openbaard zich door inspectie) en in G+1 (faaltoestand openbaard zich niet door inspectie).

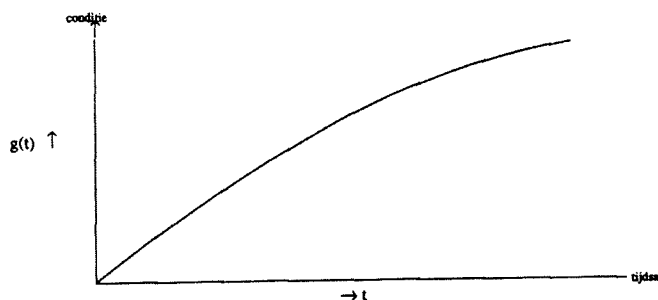
Veronderstelling 1:

In eerste instantie gaan we het degradatieproces veronderstellen als een continu verouderingsproces. De degradatie wordt als functie van de tijd weergegeven:

$$y_t = g(t), \text{ met}$$

y_t = de conditie op tijdstip t is en
 $g(t)$ = een stijgende functie van t.

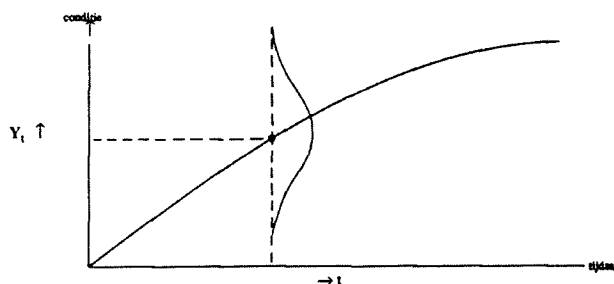
In paragraaf 4.2.6 gaan we in op het soort degradatieproces.



Figuur 9 Een continu verouderingsproces

Veronderstelling 2:

De conditie van de component op de y-as heeft een normale verdeling. Dit is het Gaussisch verouderingsproces.



Figuur 10 Gaussisch verouderingsproces

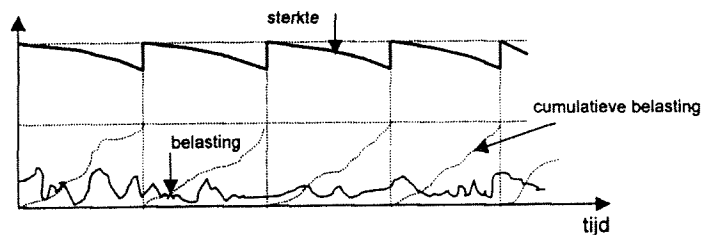
Veronderstelling 3:

Aangroeiing van het verouderingsproces in een kleine tijdperiode δ is onafhankelijk van de veroudering in voorgaande perioden.

Voor verdere beschrijving van achterliggende theorie wordt verwezen naar de literatuur [19].

4.2.3 Toestandsafhankelijk onderhoud (tao)

Tao is een zeer veel omvattend onderhoudsconcept. Bij tao wacht men een aantal tijdstappen tussen de inspecties. Gedurende die tijdstappen is de component vervallen tot nog onbekende conditie. Deze conditie wordt via de inspectie bekend. Bepaald wordt of de component vervangen wordt of wederom een aantal tijdstappen meegaat. Na verloop van tijd (na mogelijk enkele inspecties) zal de conditie van de component de afkeurgrens gepasseerd zijn, en wordt de component vervangen.



Figuur 11 Veroudering en inspecties bij toestandsafhankelijk onderhoud (tao)

Afhankelijk van de conditie van de component wordt een inspectie een aantal tijdstappen uitgesteld. Er wordt onthouden wanneer de laatste inspectie heeft plaatsgevonden. De parameter m wordt toegevoegd, om bij te houden wat het aantal tijdstappen is, sinds de laatste inspectie. Het gestelde Markov-model blijft hierdoor dus een 'geheugenloos'-model.

De drie afhankelijkheden in de toestandsverzameling (S) is de

- conditie van de component (k)
- het aantal tijdseenheden sinds de laatste inspectie (m)
- het maximaal aantal toegestane tijdseenheden tot de volgende inspectie vanaf de laatst geconstateerde conditie (M_k)

Uiteraard verloopt de conditie van de component van conditie 1 tot en met conditie falen (F) en uitgesplitst in faalconditie zonder of met inspectie geconstateerd (G of $G+1$). Hieruit volgt de volgende toestandsverzameling:

$$S = \{(k,m) \mid k = 1..G+1, m = 0..M_k, M_G = M_{G+1} = 0\}$$

Vervolgens kan de actieverzameling opgesteld worden, die bestaat uit:

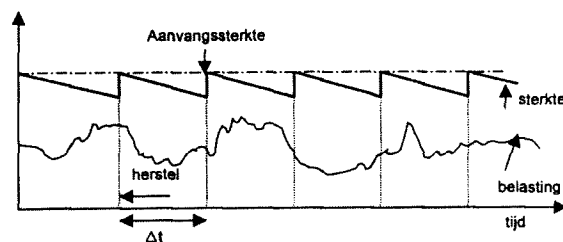
- 0 = niets doen
- 1 = inspecteren
- 2 = vervangen

Actie 2 kan alleen gekozen worden na actie 1 (= inspecteren), of na bereiken van conditie $G+1$.

Met de modelparameters kunnen we de overgangswaarschijnlijkheden, de tijden en de kosten opstellen. Er wordt gebruik gemaakt van een gereduceerd stelsel van relatieve waarden. Het gaat te ver om hier verder op in te gaan. In de literatuur is de theorie verder uitgediept [16], [17], [18] en [19].

4.2.4 Gebruiksafhankelijk onderhoud (gao)

Bij gebruiksafhankelijk onderhoud gaan we de component vervangen na een vast aantal tijdseenheden, ongeacht de bereikte conditie. Alleen als de faaltoestand $G+1$ vóór dat moment wordt bereikt, dan vervangen we de component direct of met vertraging enige tijd daarna.



Figuur 12 Veroudering en inspecties bij gebruiksafhankelijk onderhoud (gao)

De volgende toestandsverzameling kan worden opgesteld:

$S = \{1N, m\}, (k, 0) \mid m = 0..M_1, k = 1..G+1\}$, met

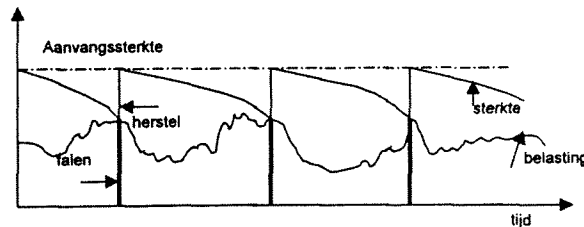
- k = conditie van de component,
- m = het aantal tijdseenheden sinds de laatste inspectie,
- M_k = het maximaal aantal toegestane tijdseenheden tot de volgende inspectie vanaf de laatst geconstateerde conditie,
- N = nieuwtoestand van de component.

Er moet een extra toestand $(1N, m)$ ingevoerd worden, omdat de toestand $(1, 0)$ onduidelijkheden oplevert voor het model. Zowel na een inspectie als na een vervanging kan men in de toestand $(1, 0)$ belanden. Het model schrijft dan direct vervangen voor wat niet juist is, omdat de component net vervangen is.

Ook voor deze strategie zijn de overgangswaarschijnlijkheden, de tijden en de kosten in het model op te stellen. Wederom verwijs ik naar de literatuur voor verdere uitdieping van deze theorie [16], [17] [18] en [19].

4.2.5 Storingsafhankelijk onderhoud (sao)

Bij sao doorloopt de component de conditieschaal helemaal, en gaan we vervangen na (zichtbaar) falen, ofwel na bereiken van conditie G+1. Er komen dus geen inspecties voor. Het degradatieproces komt dus altijd in conditie G+1 terecht.



Figuur 13 Veroudering en inspecties bij storingsafhankelijk onderhoud (sao)

De toestandsverzameling ziet er als volgt uit:

$S = \{(k,m), (G+1,0) \mid m = 0..M\}$, met

k = conditie van de component,

m = het aantal tijdseenheden sinds de laatste inspectie,

M = de bovengrens van het maximaal aantal toegestane tijdseenheden, zodat de kans om in toestand G+1 te komen voor de component dicht genoeg bij 1 ligt.

Vervolgens is de actieverzameling op te stellen, de eenstaps overgangswaarschijnlijkheden, het stelsel van relatieve waarden en de oplossingsmethode. Ik verwijs naar de literatuur [16], [17], [18] en [19].

4.2.6 Degradatieproces

Zoals gesteld in paragraaf 4.2.2 bladzijde 24 wordt degradatie als functie van de tijd weergegeven door:

$y_t = g(t)$, met

y_t = de conditie op tijdstip t is,

$g(t)$ = een stijgende functie van t is.

Er zijn een viertal degradatieprocessen te geven, die een rol spelen bij civiel-technische constructies, namelijk:

CORROSIE

Corrosie, ofwel roestvorming is een verouderingsproces, dat zich openbaard bij staal, die niet of onvoldoende worden beschermt door conservering of betondekking. Vocht en zuurstof in contact met staal zijn nodig om het corrosieproces op gang te brengen en te houden. Met hogere buitentemperaturen verloopt het proces sneller.

In Optimon is roestvorming aangenomen als een lineair proces. De verouderingsfunctie wordt gegeven door:

$g(t) = A \cdot t$, met

$g(t)$ = degradatie afhankelijk van de tijd

A = actieverzameling, $a \in A$

t = tijd

CARBONATATIE

Carbonatatie is een twee-traps verouderingsproces, dat voorkomt bij betonconstructies. In de eerste trap treedt een chemische reactie op. Door penetratie (diffusie) van CO_2 uit de lucht in de betonhuid worden aanwezige CA^{2+} en OH^- -ionen in het beton omgezet in calciumcarbonaat CaCO_3 . In de gacarbonateerde zone daalt de Ph-waarde, waardoor de bescherming van het daar aanwezige wapeningsstaal afneemt (depassiveert). In de tweede trap gaat dan het wapeningsstaal corroderen, mits de wapening zich bevindt in de gevaarlijke zone (wisselend nat-droog). Dit proces benaderen we met een wortel-functie [19]:

$g(t) = A \cdot \sqrt{t}$, met

$g(t)$ = degradatie afhankelijk van de tijd

A = actieverzameling, $a \in A$

t = tijd

KRIMP / KRUIP

Dit is een verouderingsproces die tezamen optreedt bij betonconstructies. Ze kunnen zorgen voor een in de tijd toenemende vervorming, met als mogelijk gevolg grote definitieve vervormingen, herverdeling van spanningen bij statisch onbepaalde constructies of afname van voorspanningen. Het volgende verband is gelegd [19]:

$g(t) = A (1 - e^{B(t-t_0)}) + C$, met

$g(t)$ = degradatie afhankelijk van de tijd

A = actieverzameling, $a \in A$

t = tijd

B = actieverzameling, $b \in B$

C = constante

VERMOEIING

Vermoeiing is een verouderingsproces, dat vooral speelt bij staalconstructies, doch een enkele keer ook bij beton.

Er zijn twee soorten benaderingen. De eerste methode beschouwt het aantal en de grootte van de te verwachten belastingswisselingen in de levensduur en bepaalt op grond daarvan een toelaatbare vermoeiingsspanning. De tweede methode berekent scheurgroei per belastingscyclus da/dN , waarbij a de reeds aanwezige scheur voorstelt en N het aantal belastingswisselingen.

De volgende verouderingsfunctie wordt gebruikt in Optimon [19]:

$g(t) = (C \cdot t + a_0)^2$, met

$g(t)$ = degradatie afhankelijk van de tijd

a = deel van actieverzameling, $a \in A$

t = tijd

C = constante

4.3 Computerprogramma Optimon

4.3.1 Functionele beschrijving

Optimon staat voor optimalisatie van onderhoud. Het is een computerprogramma waarmee kosten-optimale onderhoudstrategieën bepaald worden volgens verschillende onderhoudsconcepten. De gemiddelde jaarlijkse kosten van een specifieke onderhoudstrategie en de gemiddelde levensduur zijn te berekenen. Met het invullen van een jaarlijks reëel rentepercentage kunnen we ook de totale verdisconteerde kosten berekenen.

Bij de berekeningen kan gerekend worden met verschillende soorten kosten: reparatie-, inspectie-, faal- en exploitatiekosten en met verschillende soorten verouderingsprocessen: corrosie, vermoeiing, krimp / kruip en carbonatatie.

In Optimon gaan we uit van te onderhouden systemen bestaande uit één of meer componenten of onderdelen. Zoals al eerder gezegd zijn er drie onderhoudsstrategieën te onderscheiden:

- toestandsafhankelijk onderhoud (tao)
- gebruikafhankelijk onderhoud (gao)
- storingsafhankelijk onderhoud (sao)

Voor elk van deze concepten wordt de optimale onderhoudstrategie bepaald voor een component. In paragraaf 4.2.3, 4.2.4 en 4.2.5 is voor de drie verschillende strategieën een concrete beschrijving gegeven.

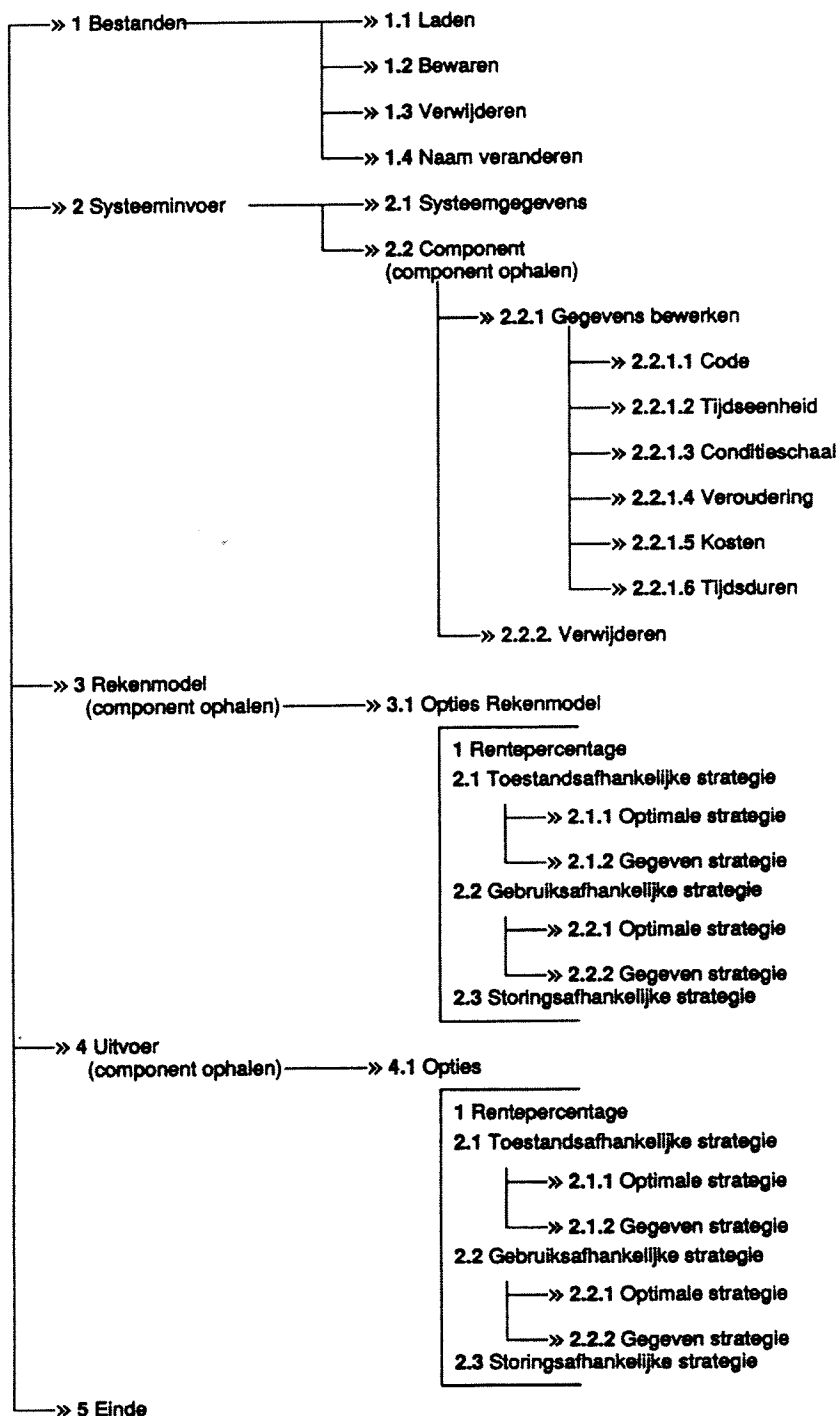
4.3.2 Gebruik van Optimon

Bij het opstellen van een onderhoudsplan kan Optimon antwoord geven op de vraag: "Hoe het best onderhoud uit te voeren"? Bepaalde afwegingen en vragen kunnen we maken en opstellen met betrekking tot het bepalen van een onderhoudstrategie:

- Wat is het beste onderhoudsconcept, ofwel de goedkoopste; gao, sao of tao?
- Een vergelijking van gemiddelde kosten of totale gediscoteerde kosten met de verschillende onderhoudsconcepten.
- De huidige onderhoudstrategie van een component vergelijken met een optimale strategie.
- Nagegaan wat de invloed is van hantering van het reële rentepercentage op de optimale onderhoudstrategie.
- Per component de gemiddelde kosten voor onderhoud per jaar berekenen.
- De totaal gesommeerde verdisconteerde kosten - tot falen optreedt - van onderhoud berekenen.
- Bij een gegeven onderhoudstrategie berekenen van een gemiddelde levensduur.
- Voor gao berekenen van het optimale vervangingsmoment.
- Voor tao berekenen van de optimale afkeurgrens.
- Voor tao berekenen van de volgende zaken: optimale inspectiegrens, hoe vaak en wanneer moet geïnspecteerd worden.

- Een afweging maken tussen periodiek inspecteren of toestandsafhankelijk inspecteren.

In onderstaande figuur 14 is de opzet van Optimon verduidelijkt.



Figuur 14 Functies en deelfuncties van Optimon [16]

De vijftal hierboven beschreven hoofdfuncties bepalen de structuur van Optimon. De hoofdfuncties zijn, zoals is te zien in figuur 14 bladzijde 32, onderverdeeld in een aantal deel- en sub-functies. In bijlage 2 is een uitgebreider schema gegeven van Optimon met de verschillende functies met een korte toelichting.

Optimon is enerzijds een ouderwets computerprogramma voor deze tijd. Het werkt onder Ms-DOS. Omdat het programma duidelijk is onderverdeeld in een vijftal hoofdfuncties met daaronder de sub-functies, is het programma betrekkelijk gebruikersvriendelijk. Door de provisorische opmaak en voortgang door de verschillende menu's wordt gebruikersvriendelijkheid snel tenietgedaan. Geregeld komt het voor dat het programma vastloopt.

Het zoeken naar de optimale strategie door variatie van invoerparameters is niet goed te vergelijken met het programma Optimon. Het is raadzaam eigenhandig de waarden te exporteren naar Ms-Excell. Ms-Excell is een geschikt programma voor het opstellen van grafieken om zodoende vergelijken te maken. Dit is te zien in de uitwerking van het standaard voorbeeld "De roestende staaf" in bijlage 3.

Voor een verdere gedetailleerde handleiding van het programma Optimon verwijs ik naar de literatuur [20].

4.3.3 Voorbeeld "De roestende staaf"

4.3.3.1 Inleiding

Er wordt in dit hoofdstuk een voorbeeld met Optimon opgezet, doorgerekend en geanalyseerd, met het doel de bruikbaarheid van computerprogramma te toetsen. De belangrijkste opties en mogelijkheden komen aan bod. Vanuit het standaard voorbeeld worden invoergegevens gevarieerd. In Ms-Excell zijn de gegevens en oplossingen geadministreerd. Vervolgens zijn grafieken gemaakt en geanalyseerd. De grafieken en de bijbehorende analyse zijn geplaatst in bijlage 3. Aan het einde van deze paragraaf volgen enige conclusies.

4.3.3.2 Invoergegevens

We gaan een eenvoudig voorbeeld bekijken, waarbij een stalen staaf gedurende zijn levensduur corrodeert. Aan de roestende staaf hangt een zwaar blok beton boven een voetpad met voetgangers.

De staaf heeft een bepaalde dikte en mag in totaal maximaal 5 mm doorroesten. Daarna worden trekspanningen in de overgebleven staaf zo groot, dat de kans op breken(=falen) van de staaf door het gewicht van het betonblok zeer groot is. De conditie van de staaf geven we aan door de afname in dikte van de staaf ten gevolge van corrosie. Bij een inspectie meten we de dikte van de staaf. De conditie van de staaf drukken we uit in de afname van de dikte.

De staaf faalt als 0 mm staaf over is om te roesten. De faalkosten bepalen we door geleden schade voortgekomen door het falen te kwantificeren. Het is mogelijk dat het betonblok bijvoorbeeld op een voetganger terecht is gekomen. Op deze manier ontstaan er extra kosten van gevolgschade. De faalconditie merken we zonder inspectie op. Elke keer als onderhoud uitgevoerd is, verkrijgen we de nieuwconditie van de component. De staaf vervangen we in zijn geheel en het is niet mogelijk de staaf gedeeltelijk te repareren. Dit is overigens een tekortkoming van het programma.

Het gekozen degradatieproces is corrosie. Voor het voorbeeld gebruiken we standaard invoergegevens. Het gemiddelde van doorroesten ligt op 0,5 mm/jaar en de spreiding is 0,5. Het gemiddelde is veel te hoog gekozen, gemiddeld wordt in Nederland een roestgemiddelde gehaald van 0,13 mm/jaar. Het voordeel is, dat het programma minder lang rekent en daardoor ook een kortere horizontale tijd heeft. De snelheid van roesten hangt af van de hoeveelheid beschikbare zuurstof, het chloride gehalte, de temperatuur en mate van propagatie in het degradatieproces.

Alle berekeningen worden op jaarbasis gedaan. Hieronder is in het kort samengevat wat de in te voeren gegevens zijn.

STANDAARD INGEVOERDE GEGEVENS VOOR OPTIMON

De algemene invoergegevens worden bewaard in het Systeem:

- ondergrens = 5 mm
- faalgrens = 0 mm De staaf met een bepaalde dikte mag maximaal 5 mm wegroesten.
- conditieniveau 10 Er zijn 10 lineair verdeelde tijdstappen richting faalgrens.
- verouderingsproces = corrosie
- spreiding = 0.5 mm/√jaar
- gemiddelde = 0.5 mm/jaar
- geldeenheid = fl
- inspectiekosten = fl 1.000,- per jaar
- vaste faalkosten = fl 10.000,- De directe kosten van vernieuwen na falen en de indirecte kosten door de buiten gebruikstelling, het prestige verlies en het eventueel ongeluk.
- reparatiekosten = fl 2.000,- tot fl 8.000,- De kosten zijn afhankelijk van de conditie die lineair verdeelt in de tijd achteruit loopt)
- exploitatiekosten = fl 0,-
- vertragsduur = geen Na constatering van schade nemen we aan dat direct reparatie wordt uitgevoerd.
- rentepercentage = 0% De geldwaarde wordt constant verondersteld in de tijd.

4.3.3.3 Uitvoergegevens

In bijlage 3 is de uitwerking en de analyse van deze berekeningen te vinden. In eerste instantie is alleen de standaard ingevoerde waarde berekend. Vervolgens zijn de invoergegevens rond de standaard ingevoerde waarden gevarieerd. In Ms-Excell zijn hiervan grafieken te maken, zodat een duidelijk beeld is te krijgen van de onderlinge relatie tussen verschillende strategieën.

Op de y-as zetten we de gemiddelde en gediscoteerde kosten en de levensduur van de component uit. Het reëel rentepercentage is 0 % bij berekening van de gemiddelde kosten. Het reëel rentepercentage is 5 % bij berekening van de verdisconteerde kosten. Op de x-as zetten we respectievelijk spreiding van corrosievorming, gemiddelde van corrosievorming, inspectiekosten, vaste faalkosten, reparatiekosten, exploitatiekosten en vertragsduur uit. Door variatie van invoergegevens op de x-as en berekening voor de verschillende onderhoudstrategieën, is er een verband te leggen tussen de verschillende invoergegevens en de verschillende strategieën.

4.3.3.4 Conclusie

Uit analyse van de verschillende grafieken in bijlage 3, blijkt dat het computermodel aan de verwachtingen voldoet. Voor verschillende uitkomsten in deze grafieken is een goede verklaring te geven en het programma loopt niet vast. De uitkomsten met verschillende strategieën zijn uitgezet tegen de variabele parameters op de x-as en de gemiddelde levensduur, de gemiddelde jaarlijkse kosten of de totale verdisconteerde kosten op de y-as.

Als een storingsafhankelijke onderhoudstrategie wordt gekozen, dan is de levensduur het grootst. Het is daarentegen de duurste strategie, omdat de faalkosten zeer hoog zijn. Gebruiksafhankelijk onderhoud is over het algemeen het goedkoopst, omdat Optimon de meest optimale periode kan berekenen van vervangen van de component. Door berekening van deze optimale periode wordt er precies vervangen op het moment dat moet worden geïnspecteerd. De inspectiekosten zijn dan bespaard. Er moet een grote mate van vertrouwen aanwezig zijn op juistheid van de invoergegevens. In de werkelijkheid is geen enkele beheerder in staat hieraan te voldoen. De berekening van de gebruiksafhankelijke strategie in Optimon is daarom onwerkelijk. Toestandafhankelijk onderhoud ligt qua kosten tussen de twee bovengenoemde strategieën. Voordat de uiteindelijk genormeerde toestand wordt bereikt is er inspectie gedaan om de toestand te achterhalen. Er zijn kosten aan inspectiewerkzaamheden.

Na vergelijking van de verschillende grafieken is er voldoende vertrouwen opgebouwd om het software pakket Optimon te blijven gebruiken. Paragraaf 4.3.4 gaat Optimon toetsen op bruikbaarheid voor deze studie. Het voorbeeld van 'De geboorde tunnel' is opgesteld met aangenomen invoergegevens.

4.3.4 Optimalisatie van beheer van een component bij een 'Geboorde tunnel'

4.3.4.1 Inleiding

In deze paragraaf gaan we een opsomming en kwantificering geven van de verschillende kosten die te maken hebben met het beheer van de geboorde tunnel. Er worden twee doelen nagestreefd:

- I. Is Optimon een goed computerprogramma voor het optimaliseringsvraagstuk van het onderhoud aan geboorde tunnels,
- II. is er een optimaal onderhoudsplan op te stellen?

In deze paragraaf worden aannames gedaan om aan de verschillende gegevens te komen. Op dit moment is het nog niet van belang de technische achtergrond en de invloed van de verschillende componenten in de tunnel te kennen.

In deze paragraaf beschouwen we de lining van de geboorde tunnel als de component. De tunnel wordt als drukstaaf beschouwd, bestaande uit gewapend beton dat door het verouderingsproces corrosie degradeert. Corrosie ontstaat op (wapening)staal; vocht en zuurstof zijn nodig om het corrosieproces op gang te brengen en te houden. De tunnelling mag vanwege veiligheid niet falen gedurende de gebruiksfase van de tunnel. Storingsafhankelijk onderhoud wordt om die reden uitgesloten als strategie, omdat de indirect gekwantificeerde kosten bij falen oneindig groot is.

4.3.4.2 Invoerparameters

De invoergegevens in deze paragraaf zijn aannames.

- De tunnelbuizen met een lengte van 2 x 945 m, bestaat uit 10.000 segmenten. De segmenten worden opgebouwd uit de componenten beton en wapening. Met een bepaalde betondekking wordt de wapening tegen corrosie beschermd.
- De gemiddelde tijd tot corrosie duurt 3,2 jaar. In de eerste 3,2 jaar vindt nog geen degradatie plaats (initiatiefase). Na die tijd corrodeert de wapening van het ondernet in het segment. Het volume van gecorrodeerd staal is groter. Door de interne betonspanningen zal de betondekking afbrokkelen.
- Als 50% van de betondekking afgebrokkeld is falen de segmenten. De ondergrens stellen we vast op 10 mm (100% van de totale dekking), de faalgrens stellen we vast op 0 mm (50% van de betondekking).
- In het Nederlandse klimaat roest een staaf, zoals gebruikt in het voorbeeld gemiddeld 0,1 mm per jaar. Omdat de betondekking het proces langzamer laat verlopen voeren we een snelheid van 0,05 mm/jaar in.
- De spreiding stellen we op 0,1 mm/ $\sqrt{\text{jaar}}$.
- Er zijn 10 conditieniveau's van nieuwtoestand tot falen.

Het gevaar is aanwezig dat de tunnelling faalt door de chloride-indringing. Daarom stellen we dat jaarlijks een inspectiebeurt moet plaatsvinden, om vast te stellen welke conditie de segmenten hebben aangenomen:

- 1% van de segmenten (= 100 op 10.000 segmenten) worden hierbij gedetailleerd gecontroleerd.
- 100 segmenten worden in 10 werkdagen van 8 uur met 2 werknemers en instrumentarium (á fl 2000,-) geïnspecteerd (= 160 á 320 manuur á fl 150,- (nachttarief)). De kosten van totale inspectie zijn kfl 26 tot kfl 52 per jaar.
- De tunnel hoeft niet te worden afgesloten, de inspectie wordt in de nachtelijke uren gedaan.

Afhankelijk van de conditie moet reparatie gedaan worden. Hiervoor moet een aannemer ingeschakeld worden. Als geen wapening bloot ligt, maar wel beton is afgebrokkeld worden de segmenten gepleisterd. Dit is het eerste conditieniveau. De kosten zullen ongeveer twee tot vier keer hoger zijn dan de inspectiekosten en dus rond de kfl 50 tot kfl 200 liggen. Er wordt aangenomen dat een aannemer gecontracteerd wordt, die materialen en manuren inzet om reparatie te doen. De tunnel wordt niet buiten gebruik gesteld.

Vlakbij het laatste conditieniveau falen ligt de wapening bloot en moeten meer segmenten gecontroleerd worden. Er zal een reparatie op grotere schaal moeten plaatsvinden en de tunnel moet worden afgesloten. Uit veiligheidsoverweging moet 30% van alle segmenten nauwkeurig worden gecontroleerd. De kosten in dat geval:

<i>kosten</i>	<i>van (kfl)</i>	<i>tot (kfl)</i>
afsluiten tunnel (directe kosten)	10	50
buiten gebruik tunnel (gevolgschade secundair = indirect) per dag aantal dagen afsluiting = 30 dagen	50 1.500	150 4.500
inspectie van 30 % van totaal aantal segmenten (0.30 x 10.000 x fl 70,-(dag) á fl 140,- (overuren) x 1,60 manuur)	336	672
reparatie (reparatiekosten = 20 keer de inspectiekosten)	2.000	4.000
Totaal	4.000	9.000

Tabel 1 Aanneme van kosten als op grote schaal de lining gerepareerd moet worden

De gevolgschade van het niet bruikbaar zijn van de tunnel is geraamd op kfl 50 tot kfl 150 per dag.

Als de tunnelling heeft gefaald, dan moet direct de tunnel worden afgesloten. Met falen wordt bedoeld, dat betrouwbaarheid door het conditieniveau van de degradatie ernstig bedreigd is.

De vaste faalkosten bestaan uit:

- buiten gebruikstelling (2 jaar afgesloten á 50.000,- per dag) = kfl 36.000
- vervangen totale lining (tot 40 % van nieuwwaarde lining) = kfl 25.000 tot kfl 60.000
- gekwantificeerde kosten door het ontstane ongeluk tijdens falen en het prestige verlies van de bouwsector.

Er wordt in dit voorbeeld geen rekening gehouden met de exploitatiekosten.

De volgende invoergegevens zijn voor Optimon op te stellen.

- ondergrens = 10 mm
- faalgrens = 0 mm
- conditieniveau 10
- verouderingsproces corrosie
- spreiding = 0,1 mm/ $\sqrt{\text{jaar}}$
- gemiddelde = 0,05 mm/jaar
- geldeenheid kfl (=fl1000,-)
- inspectiekosten = van kfl 26 tot kfl 52 per jaar
- vaste faalkosten = van kfl 61.000 tot kfl 96.000
- reparatiekosten (gunstig) = van kfl 50 tot kfl 4.000
- reparatiekosten (ongunstig) = van kfl 200 tot kfl 9.000
- exploitatiekosten = kfl 0
- vertragsduur = geen (na constatering van schade wordt direct reparatie uitgevoerd)
- rentepercentage = 0% (de geldwaarde blijft constant in de tijd)

De invoerparameters voor het beheer van de geboorde tunnel zijn te groot voor Optimon. De inspectie-, onderhoud-, en faalkosten kunnen worden omgerekend per meter tunnelbuis. Zelfs de beheerkosten per meter tunnelbuis zijn te groot voor het programma. Tevens is geprobeerd de berekening stabiel te maken door de spreiding te verkleinen tussen verschillende invoerparameters. Met name de faalkosten zijn erg hoog en kunnen we wellicht kleiner nemen. De berekening blijft instabiel.

4.3.4.3 Conclusie optimalisatie met Optimon

Het direct invullen van de parameters voor de geboorde tunnel geeft onzinnige uitkomsten in Optimon. Het kwantitatieve verschil tussen deze parameters en de parameters van het voorbeeld van "De roestende staaf" zijn zeer groot en hebben veel grotere spreiding. Te grote verschillen tussen parameters resulteert in een instabiele berekening. De uitkomsten die gegenereerd worden, zijn door instabiele berekening niet optimaal, onnauwkeurig en onzinnig.

Om de berekening stabiel te maken moeten de verschillende invoerparameters kleiner zijn en minder grote spreiding hebben. Dit is geprobeerd door de kosten per meter tunnelbuis in te voeren. Zelfs deze invoergegevens zijn te groot en hebben te grote spreiding. Hierdoor is het niet mogelijk het werkelijk beheer met Optimon te optimaliseren. Bovendien worden er te veel aannames gedaan om de invoerparameters voor Optimon te verkrijgen.

Geconcludeerd moet worden dat Optimon niet bruikbaar is, om dit optimaliseringvraagstuk, van het beheer van geboorde tunnels op te lossen. De uitwerking van het voorbeeld 'De roestende staaf' in Optimon en de theorie waarop het programma is gebaseerd heeft daarentegen wel verduidelijking gegeven in de aanpak van het probleem. Hoofdstuk 6 gebruikt gedeeltelijk de theorie van Optimon.

Het volgende hoofdstuk gaat in op de functionele en technische beschrijving van de aanleg van de geboorde tunnel. Vervolgens wordt een opsomming gegeven van de verschillende kosten die te maken hebben met de aanleg van de tunnel. Voor vier verschillende diameters zijn de kosten uitgewerkt. Deze inventarisatie van de aanlegfase van de geboorde tunnel is algemeen geldend voor geboorde tunnels in Nederland.

Hoofdstuk 6 gaat in op de componenten van de tunnelwand in de gebruiksfase. De tweede Heinoordtunnel is hierbij gebruikt als voorbeeld. Het doel en de technische beschrijving wordt per component beschreven. Per component gaan we in op het degradatieproces, de schade, de faalkans, faalkosten en de inspectie- en onderhoudwerkzaamheden. De opzet van het hoofdstuk volgt de theorie van Optimon. De kosten van beheer in de gebruiksfase worden niet geminimaliseerd met Optimon. Daarentegen worden een aantal scenario's opgesteld met een verschillend interval van renovatiewerkzaamheden. Het economisch meest optimale scenario wordt gekozen en uitgewerkt. De uitwerking omvat een begroting van de jaarlijks gemiddelde beheerskosten van de componenten die betrekking hebben op de tunnelwand.

5 Geboorde tunnels

5.1 Inleiding

Bij het beheren van geboorde tunnels moet er allereerst een goed beeld zijn van het ruimtelijk en constructief ontwerp van de boortunnel. Paragraaf 5.2 geeft een inventarisatie van het ruimtelijk ontwerp. Paragraaf 5.3 bladzijde 51 gaat in op het constructief ontwerp. Bij deze algemene inventarisatie stellen we de ontwerpvariabelen vast die we zullen gebruiken in dit onderzoek. In paragraaf 5.4 op bladzijde 61 beschouwen we tenslotte de kosten van het boren van tunnels voor vier verschillende diameters.

5.2 Ruimtelijk ontwerp

5.2.1 Inleiding

De functie van de geboorde tunnel, ofwel het type vervoermiddel dat gebruik maakt van de tunnelbuis, is voor een groot deel bepalend voor het ruimtelijk ontwerp van de geboorde tunnel. In het ruimtelijk ontwerp worden de vorm en de afmetingen van de boortunnel vastgelegd. De uiteindelijke geometrie wordt afhankelijk van de functie van de boortunnel bepaald in de drie hoofdrichtingen dwarsdoorsnede, langsdoorsnede en tracé. De volgende sub-paragrafen gaan in op de drie hoofdrichtingen en op de verschillende functies.

5.2.2 Hoofdrichtingen

DE DWARSDOORSNEDE

De inwendige diameter en de liningdikte bepalen de dwarsdoorsnede. Afhankelijk van het type vervoer door de tunnelbuis is een bepaalde minimale inwendige diameter vereist. De betonnen segmentale tunnelling moet de grond- en waterdruk tegenhouden en heeft daarom een minimaal vereiste dikte.

DE LANGSDOORSNEDE

De diepteligging, de hellingen en de boogstralen van de tunnelbuis bepalen de langsdoorsnede. De diepteligging wordt bepaald door de uitvoeringsmethode. Het type vervoer dat gebruikt maakt van de tunnelbuis bepaalt de hellingen en boogstralen.

HET TRACÉ (HET BOVENAANZICHT)

Het tracé is de baan die de tunnel volgt van bovenaf bekeken. De factoren die het tracé bepalen, zijn de ligging van de punten aan weerszijden van het obstakel die door de infrastructuur worden verbonden, de diepteligging, de diameter en de aanwezige bebouwing of infrastructuur. Veel verschillende soorten obstakels kunnen ondertunneld worden door geboorde tunnels (tabel 2).

obstakel	voorbeeld
kruisling van een spoorweg met een zeedoorgang	Kanaaltunnel (Fr & Eng)
kruisling van (langzaam-) verkeer met een rivier	Heinenoordtunnel (NL)
kruisling spoorweg met (beschermd) natuurgebied	Groene Hart-tunnel HSL (NL)
kruisling metrolijn met stedelijk gebied	Noord-zuidlijn (NL)
kruisling autoverkeer met waterbekken met hoge scheepvaartintensiteit	Westerscheldetunnel (NL)
kruisling autoverkeer met een natuurlijk obstakel (berg)	Mont-Blanc tunnel (Zw & Fr)

Tabel 2 Verschillende obstakels overbrugt door geboorde tunnels

5.2.3 Functioneel ontwerp

De geboorde tunnel dient de infrastructuur. Het type infrastructuur bepaalt de functie. Binnen de infrastructuur kennen we verschillende functies. De geboorde tunnel is voor een groot aantal van deze functies geschikt. De belangrijkste functies zijn:

- wegvervoer
- spoorwegvervoer
- stadsrailvervoer
- leidingvervoer

5.2.3.1 Het wegvervoer

Afhankelijk van het soort voertuig of persoon die de tunnel gebruikt zijn er verschillende categorieën van wegvervoer.

De drie belangrijkste categorieën zijn [ROA & RONA]:

Categorie AI autosnelwegen met gescheiden (hoofd)-rijbanen

Deze wegen hebben een belangrijke functie voor het lange afstandsverkeer en vormen een verbinding tussen de grote steden, landsdelen, en landen.

Categorie AII stadsautosnelwegen

Wegen rond de grote steden of verbindingen tussen categorie AI-wegen met een lagere ontwerpsnelheid dan categorie AI-wegen.

Categorie BIV niet autosnelwegen

Binnen elke categorie geldt een ontwerpsnelheid, die de baangeometrie vastlegt. De baangeometrische eisen van een tunnel bestaan uit:

1. HET LANGSHELLING-PERCENTAGE

Dit percentage geeft aan hoe snel de infrastructuur vanaf de diepe ligging weer bovengronds kan komen en bepaalt dus mede de minimale lengte van de tunnel. Bij hoogteverschillen tot 30 m mag een hellingpercentage van 6% genomen worden. Afhankelijk van grondgesteldheid en geografie is het hoogteverschil bij een geboorde tunnel ongeveer 25 m. Bij een grotere helling kan de lengte van tunnel en toeritten korter zijn, zodat kosten lager zijn[2].

2. DE BOOGSTRALEN

Op grond van rijtechnische overwegingen is er voor elk type infrastructuur een minimale zichtafstand vastgesteld. Naast een horizontale boogstraal is er ook een verticale boogstraal. Bij de verticale boogstraal gelden bepaalde maximale waarden voor de topboog of de dalboog. Die voor de topboog hangt af van de minimale zichtafstand bij het binnenrijden van de tunnel. Bij de dalboog is het zicht beperkt door het wegdek.

Bij tunnels voor het wegverkeer zijn een aantal voorzieningen vereist [2]:

VLUCHTWEGEN

De tunnel moet een vanuit elke rijkoker toegankelijke vluchtgang hebben. In elke rijkoker moet een eigen vluchtweg ondergebracht worden, tenzij elke 100 m een dwarsverbinding wordt gemaakt tussen beide tunnelbuizen. Dit is kostbaar en dus niet economisch. Voor de benadering van een calamiteit door brandweer is elke 500 m een dwarsverbindingen vereist.

VENTILATIE

De ventilatie van tunnels is van belang bij stagnerend verkeer, vluchtende automobilisten en in geval van brand. Met langsventilatie bij éénrichtingsverkeer of dwarsventilatie bij tweerichtingsverkeer in een tunnelbuis zijn grenswaarden gesteld aan de aanwezige hoeveelheid koolmonoxide (CO). Tevens wordt het zicht in de tunnel verslechterd door de aanwezige (rook)gassen en deeltjes. Normen en grenswaarden zijn beschreven in publicaties van KIVI en Bouwdienst Rijkswaterstaat.

BRANDVEILIGHEID

Er moeten voorzieningen aangebracht worden die een brandpreventief en brandwerend karakter hebben en voorzieningen welke een brandbestrijdend karakter hebben. Hittewerende bekleding aan de wanden en speciale voorzieningen voor kabels en tunnelinstallaties hebben een preventief karakter. Brandblusinstallatie en hulpposten moeten ervoor zorgen dat de calamiteit kan worden bestreden.

OPERATIONELE VEILIGHEID

Tijdens het in bedrijf zijn van de tunnel moeten verlichting, kleurstelling in tunnel, verkeerssignalering en bewaking, verkeersbegeleiding, intercominstallaties, luidspreker omroepinstallatie, een hoogfrequent radio communicatie installatie en eventueel videobewaking zorgen voor de operationele veiligheid.

De verschillende gebruikerswensen en -eisen zijn gedetailleerd beschreven in de richtlijnen voor het ontwerp van autosnelwegen en niet-autosnelwegen (ROA en RONA). In tabel 3 staan de belangrijkste baangeometrische eisen voor de drie bovenstaande categorieën.

gebruikerseisen en -wensen		categorie A I	wegvervoer categorie A II	categorie B IV
geometrie				
ontwerpsnelheid	[km/h]	120	90	80
maximale helling	[%]	4.5	4.5	5
gewenste helling	[%]			
min. horizontale boogstraal	[m]	750	350	260
gewenste horizontale boogstraal	[m]	2000	800	700
minimale verticale boogstraal (top)	[m]	10500	6000	2500
gewenste verticale boogstraal (top)	[m]	12500	6500	9000
min. verticale boogstraal (dal)	[m]	1200	700	500
gewenste verticale boogstraal (dal)	[m]	25000	13000	14000
minimale dwarselling	[%]	2.0	2.0	2.0
gewenste dwarselling	[%]	2.5	2.5	2.5
maximale dwarselling	[%]	5.0	5.0	5.0
vrije hoogte boven wegdek	[m]	4.50	4.50	4.50
aantal rijstroken per rijrichting		2 tot 4	2 tot 4	1
breedte rijstroken	[m]	3.50	3.25	3.10
breedte deelstrepen	[m]	0.15	0.15	0.10
breedte kantstrepen	[m]	0.20	0.20	0.15
breedte redresseerstroken	[m]	0.60	0.30	0.35
breedte objectafstandsmarge	[m]	1.50	1.00	1.00
geleideprofielen	[m]	0.225	0.225	0.225
min. inwendige breedte 2 rijstr./koker	[m]	9.05 - 10.45	8.50 - 8.95	8.30 - 8.75

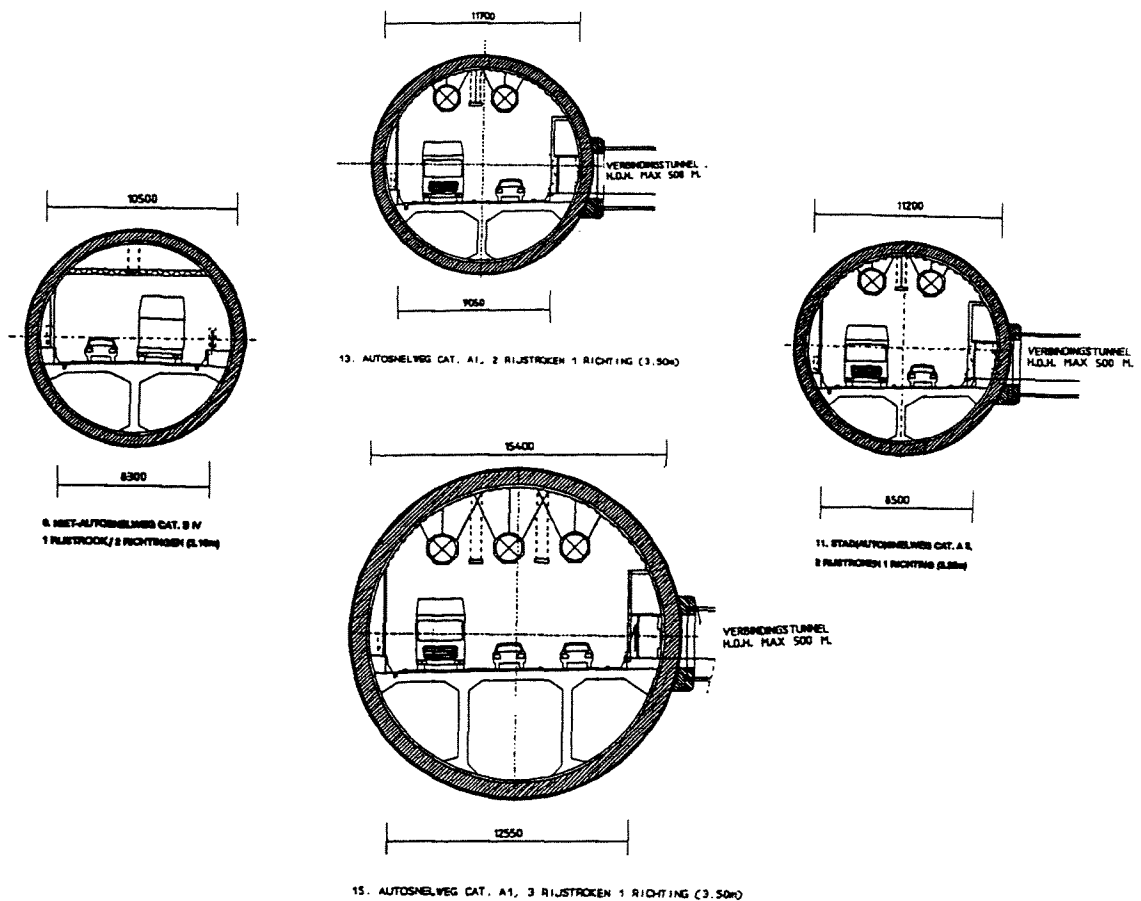
Tabel 3 Overzicht gebruikerswensen en -eisen verkeerstunnels [2]

Er kan nu een koppeling gemaakt worden tussen de richtlijnen gesteld voor het wegverkeer en de minimale diameter van de geboorde tunnel die benodigd is. Onderstaande tabel 4 geeft waarden hiervoor.

Nr.	Profiel-Gebruik	Diameter Inw. (m)
1	Niet-Autosnelweg cat. B IV, 1 rijstrook, 2 richtingen (3.10 m.)	10,5
2	Stads(auto)snelweg cat. A II, 2 rijstroken, 1 richting (3.25 m.)	11,2
3	Autosnelweg cat. A I, 2 rijstroken, 1 richting (3.50 m.)	11,7
4	Autosnelweg cat. A I, 3 rijstroken, 1 richting (3.50 m.)	15,4

Tabel 4 Overzicht van de inwendige diameters van geboorde verkeerstunnels [2]

De diameter van de geboorde verkeerstunnels is aanzienlijk. De Westerscheldetunnel is de eerste geboorde verkeerstunnel en wellicht ook de laatste [RWS]. Qua prijs zal een geboorde verkeerstunnel met een grote diameter moeilijk kunnen concurreren met een afgezonken tunnelbouwmethode. Figuur 27 A in paragraaf 5.4.3.14 op bladzijde 70 geeft een relatie tussen de kosten van aanleg van een geboorde tunnel en de minimale inwendige diameter. In figuur 15 is schematisch de doorsnede gegeven van geboorde verkeerstunnels met verschillende inwendige diameter.



Figuur 15 Doorsnede van geboorde tunnels voor autoverkeer [2]

5.2.3.2 Spoorwegvervoer

De geometrie van de tunnel, tracékeuze en de benodigde voorzieningen in de tunnel zijn afhankelijk van het verwachte treinverkeer. We onderscheiden hierin reizigers, goederen, en gemengd verkeer. Meestal is er sprake van gemengd verkeer. Een speciaal geval is de hogesnelheidslijn waarbij alleen sprake is van reizigersverkeer maar waar toch specifieke gebruikerswensen en -eisen gelden. Het spoorwegnet is toegankelijk voor de vele nationale en internationale reizigers- en goederentreinen.

Bij tunnels voor het spoorwegvervoer zijn een aantal specifieke voorzieningen vereist [2]:

MATERIEEL

Treinen rijden op spoorstaven die op een speciale manier zijn bevestigd op het ballastbed. De spoorstaven liggen op een vaste afstand uit elkaar. Er moet voorkomen worden dat binnen de tunnel overloopwissels, uitwijk- en opstelsporen benodigd zijn. Materieel voor de signalering en beveiliging moet aanwezig zijn in de tunnel.

DRUKGOLF

Een trein, die door een tunnel rijdt veroorzaakt aan de voorzijde een overdruk en aan de achterzijde een onderdruk. Verschillende grootheden zijn bepalend voor de grootte van deze drukgolf die zich met de geluidssnelheid door een tunnel voortplant. Materieel en het profiel van vrije ruimte dienen aangepast te worden om het discomfort bij de treinreiziger als gevolg van dit verschijnsel te verkleinen. Dit kan gedaan worden door aanleg van ventilatieschachten, grotere diameter tunnel, gebruik van een kleiner treinrijtuig of betere stroomlijning van de rijtuigen. De maximale snelheid van de trein is om die reden in grote mate afhankelijk van de minimale benodigde inwendige diameter en andersom.

De ontwerpsnelheid is afhankelijk van het verwachte treinverkeer. De ontwerpsnelheid bepaalt de geometrie van de tunnel en het tracé. Het gekozen tracé en de ontwerpsnelheid bepalen de maximaal toegestane hellingen, boogstralen en verkantingen. In tabel 5 staan de gebruikerswensen en -eisen voor het spoorwegvervoer gegeven.

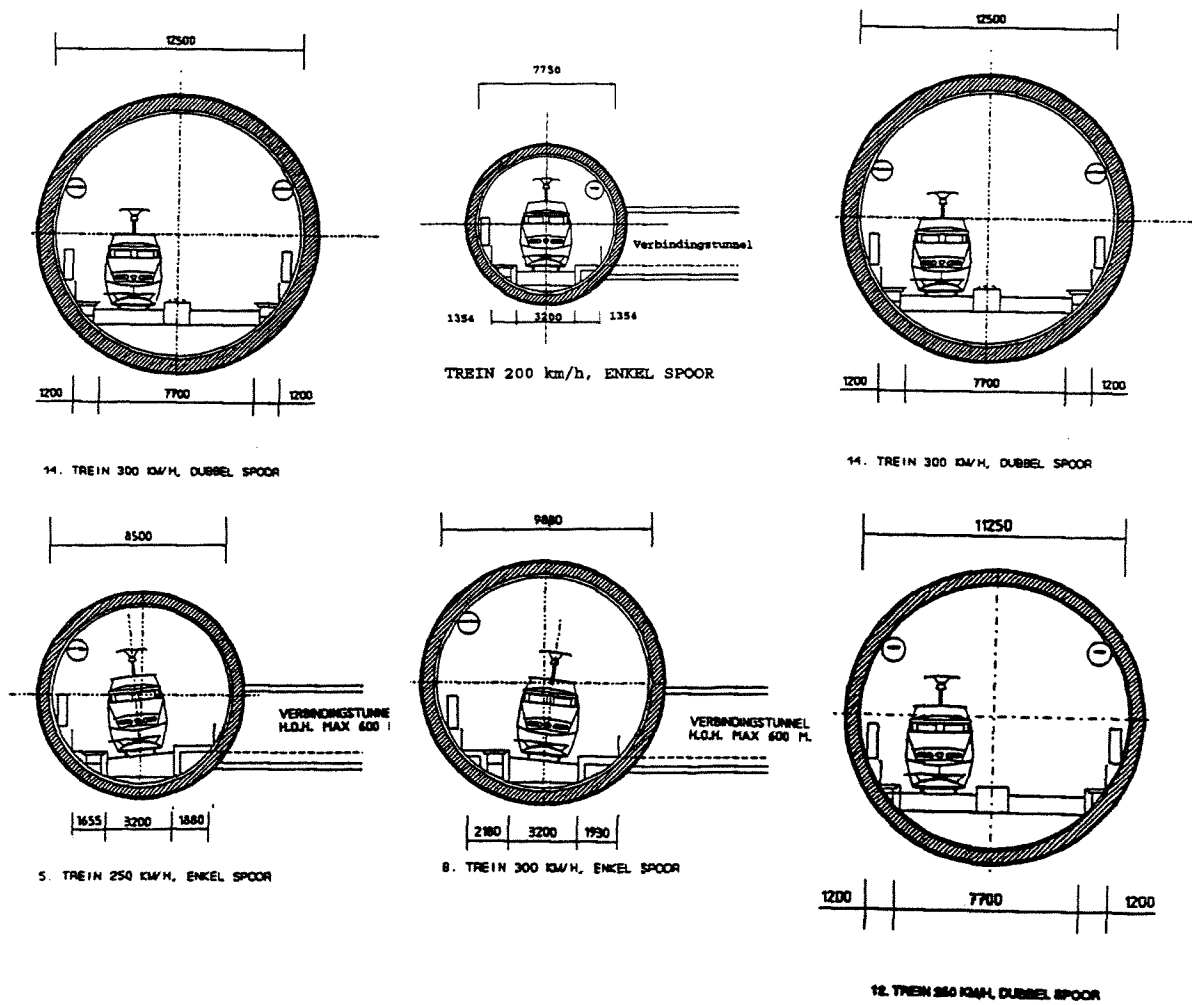
Gebruikerswensen en -eisen	spoorwegen			
	reizigers	goederen	HSL	
<u>geometrie</u>				
ontwerpsnelheid	[km/h]	160	80	300
maximale helling	[%]	2.5	2.5	2.5
gewenste helling	[%]	0.5	0.5	0.5
min. horizontale boogstraal	[m]	1700	800	4500
gewenste horizontale boogstraal	[m]	>10000	>4000	>6000
minimale verticale boogstraal (top)	[m]	10000	2500	16000
gewenste verticale boogstraal (top)	[m]	>16000	>4000	>25000
min. verticale boogstraal (dal)	[m]	10000	2500	16000
gewenste verticale boogstraal (dal)	[m]	>16000	>4000	>25000
verkanting	[mm]	30 - 70	30 - 70	30 - 70
perronlengte		270 - 430	-	430
<u>Doorsnede (profiel)</u>				
Profiel van vrije ruimte (PVR)		UIC GC	UIC GC	UIC GC
doorsnede i.v.m. drukgolf	[m ²]	30 / 55	-	70 / -
hoogtebeslag bovenleiding t.o.v. balastbed	[m]	+ 5.50	+ 5.50	+ 7.00
hoogtebeslag spoorstavenbevestiging	[m]	- 0.80	- 0.80	- 0.85
breedte eilandperron	[m]	3m vrij	-	3m vrij
breedte zijperron	[m]	3m vrij	-	3m vrij
hoogte perron t.o.v. balastbed	[m]	+ 0.84	-	+ 0.84
maat perron tot hart spoor	[m]	1.65	-	1.65

Tabel 5 Overzicht gebruikerswensen en -eisen spoorwegtunnels [2]

Het UIC profiel GC is het profiel van vrije ruimte dat voor alle nieuwe lijnen en voor alle grote verbouwingen van bestaande lijnen en nieuwe bebouwing langs bestaande lijnen moet worden toegepast. De minimale inwendige diameter van spoorwegtunnels wordt gegeven in tabel 6. De diameter van de spoorwegtunnels is veel kleiner dan bij verkeerstunnels. De geboorde tunnelmethode is daarom een geschikte methode voor de aanleg van spoortunnels. Figuur 16 geeft de verschillende doorsneden van een geboorde spoorwegtunnel.

Nr.	Profiel-Gebruik	Diameter Inw. (m)
1	Trein 200 km/h, enkel spoor	7,75
2	Trein 250 km/h, enkel spoor	8,50
3	Trein 300 km/h, enkel spoor	9,88
4	Trein 200 km/h, dubbel spoor	10,65
5	Trein 250 km/h, dubbel spoor	11,25
6	Trein 300 km/h, dubbel spoor	12,50

Tabel 6 Overzicht van de inwendige diameters van geboorde spoorwegtunnels [2]



Figuur 16 Doorsnede van geboorde tunnel voor spoorwegvervoer [2]

5.2.3.3 (Stads)railvervoer

(Stads)railvervoer en regionaal of stadsgewestelijk vervoer wordt in de regel toegepast in gebieden waar belangrijke geconcentreerde vervoerstromen worden verwacht. Het gaat hier met name om het reizigersvervoer met verschillende te gebruiken vervoerstypen zoals metro, sneltram en geleide bus. Met afstanden tussen de onderlinge stations rond de 1500 m en 2000 m is de maximaal benodigde baanvaksnelheid 90 á 100 km/h. De gemiddelde rijsnelheid is 50 km/h.

Vanwege economische gronden worden de stadsspoorwegen in het algemeen bovengronds op een eigen baan aangelegd. Alleen bij kruisingen van obstakels, rivieren, infrastructuurbundels of oude stadsgedeelten kan een tunnel overwogen worden.

Bij tunnels voor het (stads)railvervoer zijn een aantal specifieke voorzieningen vereist [2]:

VLUCHTWEGEN

Reizigers moeten een calamiteit snel kunnen verlaten via de vluchtweg. De vluchtweg moet duidelijk te vinden en te volgen zijn en zo kort mogelijk zijn. De diepteligging van de tunnel hangt hier nauw mee samen. In de tunnel zijn er looppaden, op de perrons fungeren de trappenhuizen als vluchtwegen. Er worden verschillende eisen gesteld aan de vluchtwegen.

VENTILATIE

De ventilatie bestaat uit ventilatieschachten met een directe verbinding met de buitenlucht. Op perrons dienen speciale voorzieningen aangebracht te worden om verontreinigingen in de lucht zo laag mogelijk te houden.

BRANDVEILIGHEID

Het uitgangspunt is om in de tunnel en op het perron niet of minder brandbare materialen te gebruiken. Plafonds moeten bespoten worden met een brandvertragend materiaal en kabels en leidingen dienen in betonnen kabelgoten weggestopt te worden.

SOCIALE VEILIGHEID

De loopverbindingen moeten in verband met de sociale veiligheid zo kort mogelijk gehouden worden. Veel aandacht moet besteed worden aan verlichting op het perron en het minimaliseren van het aantal obstakels. Zo dienen liften en roltrappen doorzichtig gemaakt te worden.

De gebruikerswensen en -eisen voor het (stads)railvervoer staan in tabel 7.

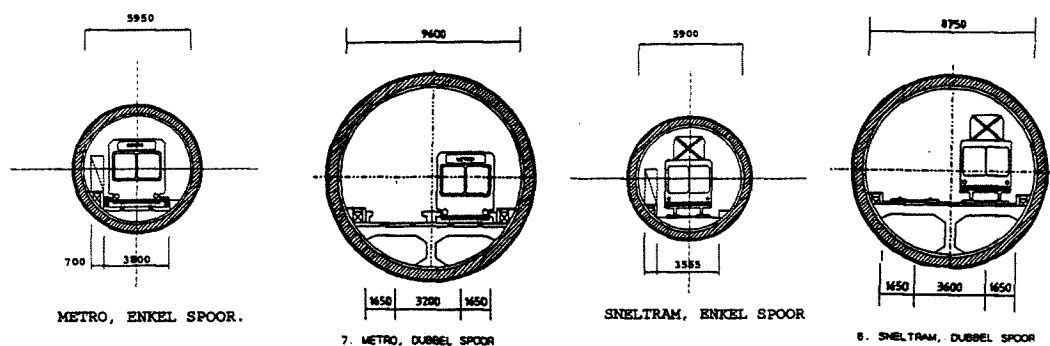
Gebruikerswensen en -eisen		stadsrailvervoer		
		metro	sneltram	geleide bus
geometrie				
ontwerpsnelheid	[km/h]	110	70	80
maximale helling	[%]	4	4	6
gewenste helling	[%]	1	1	1
min. horizontale boogstraal	[m]	240	240	135
gewenste horizontale boogstraal	[m]	>400	>75	540
minimale verticale boogstraal (top)	[m]	2500	1000	1200
gewenste verticale boogstraal (top)	[m]	>3600	>2000	20000
min. verticale boogstraal (dal)	[m]	2000	1000	350
gewenste verticale boogstraal (dal)	[m]	>3000	>2000	1500
verkanting	[mm]	<0.15	<0.15	
perronlengte		>125	>30	40 - 80
Doorsnede (profiel)				
Profiel van vrije ruimte (PVR)		diverse	diverse	
breedte eilandperron	[m]	8m vrij		9m vrij
breedte zijperron	[m]	5m vrij	3.50	5.50

Tabel 7 Overzicht gebruikerswensen en -eisen (stads)railvervoer [2]

Voor het (stads)railvervoer worden in tabel 8 inwendige diameters voor geboorde tunnels weergegeven. Evenals bij het spoorwegvervoer is het economisch rendabel de tunnelboormethode te gebruiken vanwege de kleine benodigde inwendige diameter.

Nr.	Profiel-Gebruik	Diameter Inw. (m)
1	Geleide bus, 1 strook	4,70
2	Sneltram, enkel spoor	5,90
3	Metro, enkel spoor	5,95
4	Sneltram, dubbel spoor	8,75
5	Metro, dubbel spoor	9,60

Tabel 8 Overzicht van de inwendige diameters van geboorde (stads)railtunnels



Figuur 17 Doorsnede van geboorde tunnel voor (stads)railtunnels [2]

5.2.3.4 Leidingvervoer

Er zijn in Nederland nog geen vervoerssystemen in gebruik die kunnen aangeven wat de vereiste doorsnede van een leiding moet zijn. Er worden momenteel in verschillende landen, waaronder Nederland, een aantal onderzoeken uitgevoerd naar nieuwe transportsystemen die gebruik maken van leidingen.

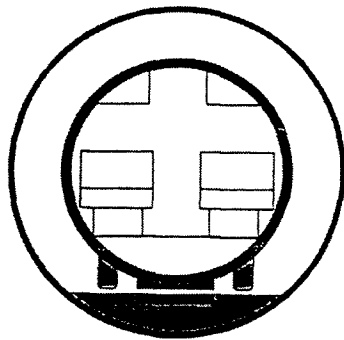
Het leidingvervoer zal een steeds belangrijkere plaats krijgen binnen de infrastructuur, in gebieden waar geconcentreerde vervoersstromen worden verwacht. De ondergrondse distributie ondervindt geen hinder van ander verkeer (congestie). We spreken hier van "dedicated tunnels" omdat de tunnel wordt aangelegd voor één type vervoer. De opdracht en het beheer van de tunnels en de leidingen wordt gedaan door particuliere organisaties, die gebaat zijn bij dit bepaald type vervoer. Efficiëntie wordt bereikt als:

- vervoerstromen vlot verloopt (veel sneller dan vervoer over weg),
- de infrastructuur zeer regelmatig gebruikt wordt voor het type vervoer,
- kosten van vervoer lager zijn dan vervoer over de weg.

Het gaat hier om vervoer van stukgoederen en containers in de volgende categorieën [2]:

- stedelijke distributie
- vervoer binnen een industrieel complex of zee- of luchthavengebied
- regionaal vervoer tussen enkele steden
- internationaal vervoer naar het achterland
- leidingtunnels

De gebruikerswensen en -eisen worden opgesteld door de opdrachtgever. Afhankelijk van het type vervoer wordt een inwendige diameter van de geboorde tunnel gekozen. Onafhankelijke organisaties dienen controle uit te voeren of voldaan is aan veiligheidvoorschriften.



Figuur 18

Dwarsdoorsnede van een leidingtunnelbuis [6]

5.2.4 Veiligheid

Ten aanzien van vervulling van de functie dient de tunnel veilig en betrouwbaar te zijn. Veiligheid wordt op verschillende manieren bereikt [2]:

1 VOORSCHRIFTEN

Door de beheerder zijn richtlijnen en eisen opgesteld voor minimale en maximale snelheid, type vervoer en wat vervoerd mag worden. Zo zijn tunnels in autosnelwegen (categorie A1) geschikt gemaakt voor vervoer van gevaarlijke stoffen.

2 VLUCHTWEGEN

Eisen zijn gesteld ten aanzien van de hoeveelheid vluchtwegen, de toegankelijkheid en de bescherming in de vluchtgang. In geboorde tunnels zal een vluchtweg voor beide rijkokers voorzien worden door het aanbrengen van een middentunnelkanaal tussen de beide rijkokers. In elke rijkoker van de geboorde tunnel wordt een eigen vluchtweg ondergebracht. Door het optimaliseren van de vluchtwegbreedte kan de buisdiameter gering gehouden worden.

3 VENTILATIE

In de tunnels is het van belang dat de lucht geventileerd wordt bij stagnerend verkeer, vluchtende passagiers en automobilisten en in geval van brand. In normale omstandigheden wordt door zuigerwerking van het rijdende verkeer voldoende geventileerd.

4 BRANDVEILIGHEID

In de tunnel moeten voorzieningen aanwezig en aangebracht zijn die ten eerste een brandpreventief en brandwerend karakter hebben en die ten tweede een brandbestrijdend karakter hebben. Tegen het dak en de wanden een hittewerende bekleding aanbrengen en het plaatsen van kabels van voorzieningen van tunnelinstallaties in via het dak en wanden ingestorte mantelbuizen.

5 EXPLOSIEBESTENDIGHEID

De geboorde tunnelbuis moet net als een afgezonken tunnel bestendig zijn tegen een inwendige statische overdruk van 1 bar. Dit levert geen problemen op, maar stelt de eis dat de gronddekking boven de tunnelbuis minimaal de dikte heeft van één maal de diameter van de tunnelbuis.

6 OPERATIONELE VEILIGHEID

Verlichting, kleurstelling, bewaking, intercominstallatie, videobewaking en verkeerssignalering dragen bij aan de operationele veiligheid.

5.3 Constructief ontwerp

5.3.1 Inleiding

Deze paragraaf geeft een inventarisatie van verschillende uitvoeringstechnieken van geboorde tunnels in Nederland. We gaan globaal in op de methode en de materialen die benodigd zijn. Paragraaf 5.3.2 gaat in op de uitvoeringsmethode. Vervolgens wordt ingegaan op de toe te passen liningtechniek. Tot slot behandelen we de benodigde materialen.

Deze paragraaf geeft een keuze voor bepaalde technieken en materialen. In de verdere studie naar het beheer van geboorde tunnels is uitgegaan van het gebruik van deze materialen. In hoofdstuk 6 gaan we verder in op de componenten van de geboorde tunnel.

5.3.2 Uitvoeringstechnieken

5.3.2.1 Beschrijving boorproces

Een tunnel wordt geboord van de ene schacht (startschacht) naar een tegenoverliggende schacht (ontvangstschacht). Er wordt geboord met een tunnelboormachine (TBM) die bestaat uit een boorschild met daarin onder andere aanwezig:

- een stalen cilinder
- een graafwiel (spaakwiel)
- afzetvijzels (voortbeweging schild)

De stalen cilinder heeft een diameter die groter is dan de buitenzijde van de tunnel, om een goede voortgang van het schild te bewerkstelligen. De ruimte wordt na plaatsing van de segmenten gevuld met grout.

Het graafwiel bestaat uit 3 tot 7 spaken met snijtanden die de grond weggraven of snijwielen op een gesloten frontplaat. Afhankelijk van het soort grond dat moet worden ontgraven zijn verschillende graafwielen te gebruiken.

De afzetvijzels worden geplaatst op de kopse kant van de laatst geplaatste segmenten. Het schild zet zich tegen de segmenten af, waardoor een voorwaartse kracht wordt verkregen die zorgt dat grond kan worden ontgraven. De drukkracht die op segmenten komt te staan stelt enige eisen aan de betonnen segmenten. In het volgende hoofdstuk zullen we uitvoerig ingaan op de verschillende componenten van de boortunnel. Gedurende het plaatsen van nieuwe segmenten is er geen vijzelkracht op te wekken. Het graven van de grond en het plaatsen van de segmenten is een discontinu proces. In paragraaf 5.3.3 gaan we nader in op de keuze van de liningopbouw.

De TBM bestaat uit:

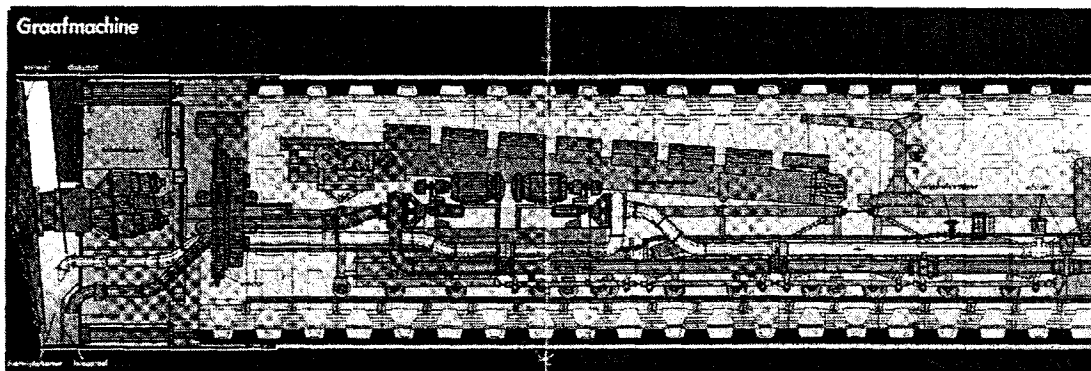
- een snijdeel met snijrad, mengkamer, werkkamer en duikwand. De duikwand is aanwezig omdat niet met atmosferische druk wordt gewerkt aan het boorfront in verband met de stabiliteit van dit front,
- een middendeel met de aandrijfmechanismen voor de TBM,
- een staartdeel met erector en volgrein. De erector is een robotarm, die de geprefabriceerde betonnen segmenten plaatst in de tunnelwand. Op de volgrein bevindt zich materieel en materiaal benodigd voor de voortgang van het boorproces.

5.3.2.2 Boormethoden

De methode van boren is afhankelijk van de bodemeigenschappen. De gecompliceerdheid van het proces en de kosten die daaruit voortkomen bepalen de keuze. De Nederlandse bodem wordt gekenmerkt door een zachte niet draagkrachtige grond en een hoge grondwaterspiegel. Daarom zijn we genoodzaakt een gesteund boorfront te gebruiken.

De meest gebruikelijke methoden met een gesteund boorfront worden kort beschreven:

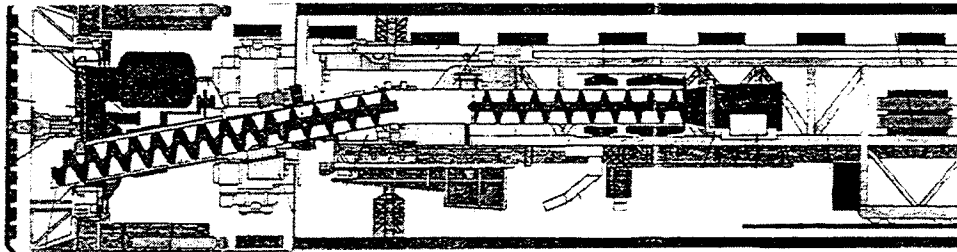
- Schildmethode met slurrydruk (vloeistofschild of hydroschild). De vloeistofschild methode wordt toegepast in zandige niet cohesieve gronden. Klei is een voorbeeld van cohesieve grond. Het boren wordt onmogelijk als grond verkleeft aan de spaakwielen. De productie van losgegraven grond neemt af. Door de hoge grondwaterspiegel en de waterdoorlatendheid van de grond moet het boorfront gesteund worden met een steunvloeistof (bentoniet). Door overdruk en gebruik van bentoniet ontstaat een afpleisterlaag die nagenoeg impermeabel is, zodat de druk over het gehele boorfront overgedragen kan worden. Tevens wordt de steunvloeistof gebruikt voor de afvoer van de afgegraven grond. Een scheidingsinstallatie bij de startschacht scheidt de grond van de steunvloeistof, waarna de steunvloeistof opnieuw gebruikt kan worden. Het scheiden van de grond en het bentoniet is een kostbare zaak en tevens milieubelastend, omdat niet voor 100% kan gescheiden worden. In figuur 19 is een doorsnede van een TBM met de slurrydruk schildmethode weergegeven. In bijlage 1 is een doorsnede van de tunnelboormachine gegeven, die gebruikt wordt voor het boren van de "Tweede Heinenoordtunnel". Hierbij is gekozen voor een tunnelboormachine met een vloeistofschild. In de bijlage is duidelijk te zien waar de verschillende onderdelen zich bevinden in de TBM. Tevens staat in bijlage 2 een schematische weergave van het scheidingsproces.



Figuur 19

Doorsnede van een tunnelboormachine met de slurrydruk schildmethode [2]

- Schildmethode met gronddruk (Earth Pressure Balans Shield, kortweg EPB-schild). Deze methode wordt toegepast bij het boren in cohesieve gronden met slechte waterdoorlatendheid. Een schroefvijzel steekt door een afgesloten drukwand heen en verwijdert de grond. Met additieven kunnen de eigenschappen van de afgegraven cohesieve grond aangepast worden. Dit gebeurt in de mengkamer tussen graafwiel en schroefvijzel. De druk in de mengkamer wordt met lucht geregeld en constant gehouden. Figuur 20 geeft een doorsnede van een gronddruk schildmethode.



Figuur 20 Doorsnede tunnelboormachine met gronddruk schildmethode [2]

Omdat grond niet precies cohesieve of niet cohesieve grondeigenschappen bevat, kunnen met gebruik van additieven beide schilden soms toegepast worden. De complexiteit van het boorproces en de kosten bepalen per lokatie welke de beste methode is. Tegenwoordig is het mogelijk beide hierboven beschreven schilden te huisvesten in één tunnelboormachine. Dit wordt een MIX-schild genoemd.

5.3.3 Liningtechnieken

5.3.3.1 Inleiding

De primaire functie van de lining is weerstand bieden tegen de gronddruk en tevens - in de Nederlandse omstandigheden - de waterdruk. Tijdens de aanlegfase dient de lining ook de reactiekrachten van het schild op te nemen. Er zijn verschillende technieken: meerwandige en enkelwandige systemen. De keuze wordt bepaald door de complexiteit van het proces, de kosten en de lokale omstandigheden. We zullen nu verschillende mogelijkheden beschrijven, waarna we een keuze maken voor één bepaalde techniek.

5.3.3.2 Dubbelwandige techniek

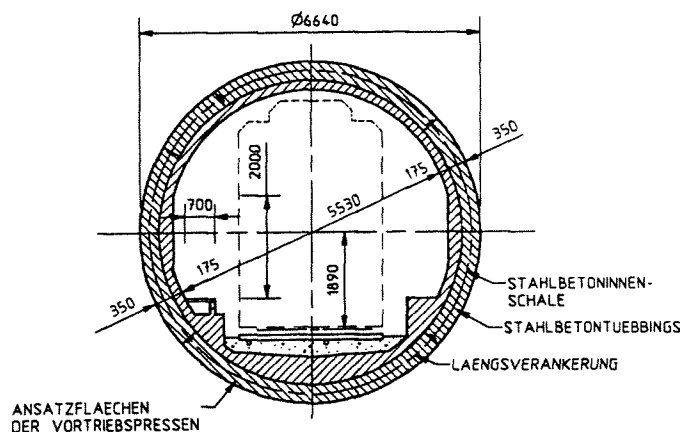
Omdat er in het verleden problemen zijn geweest met het waterdicht maken van de lining, is de dubbelwandige techniek bedacht.

De eerste of primaire wand wordt onder verhoogde luchtdruk in het schild gemonteerd en heeft de volgende functies:

- tijdelijke kering tegen grondwater
- opnemen vijzelkracht uit schild
- weerstand bieden tegen gronddruk

De tweede wand maakt uiteindelijk de wand definitief waterdicht door:

- Het plaatsen van een waterdichte laag tussen de primaire en secundaire wand met bitumen of een kunststoffolie.
 - Het storten van beton of plaatsen van geprefabriceerd beton die wel waterdicht is.
- Nadelen van een tweewandig systeem zijn de hogere kosten in vergelijking met een enkelwandig systeem en de grotere tunneldiameter, omdat de dikte van de lining is toegenomen.

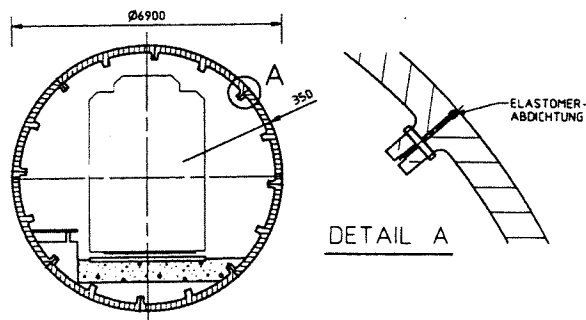


Figuur 21 Tweewandig systeem met waterdichte tussenlaag [2]

5.3.3.3 Enkelwandige techniek

Bij de enkelvoudige techniek vervult één wand de functies die beschreven zijn in paragraaf 5.3.3.2. De functie vervulling geldt voor zowel de tijdelijke als de definitieve fase. Een van de eerst ontwikkelde liningsystemen waren stalen gietijzeren segmenten. Daarna zijn betonnen segmenten ontwikkeld, omdat beton een veel goedkoper materiaal is. Betonnen segmenten zijn wel moeilijker waterdicht te maken. Door betere beheersing van toleranties van de segmenten en de ontwikkeling van betrouwbare neopreen profielen worden thans de enkelwandige betonnen segmenten systemen het meest toegepast. Deze techniek zullen we verder gebruiken in het vervolg van deze studie. Hoge toleranties maken de methode duur[2].

Er wordt veel onderzoek verricht op het gebied van geëxtrudeerd beton. Hierbij zijn geen geprefabriceerde segmenten nodig die door de vereiste toleranties heel duur zijn. Er wordt een plastische betonspecie achter het schild tussen de grond en de binnenbekisting geperst. Deze techniek heeft bij minder draagkrachtige gronden nog verdere ontwikkeling nodig.



Figuur 22

Enkelwandige waterdichte lining, U-bahn München [LOS 7.1] [2]

5.3.3.4 Lining materiaal

5.3.3.4.1 Inleiding

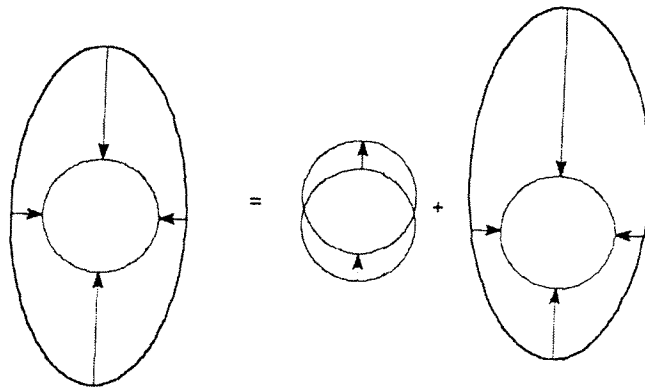
Een belangrijke kostenpost bij de aanleg van een boortunnel is het lining materiaal. Deze paragraaf besteedt aandacht aan de belastingen op de lining. Vervolgens gaan we dieper in op verschillende mogelijkheden van lining opbouw en te gebruiken materialen.

5.3.3.4.2 Belastingen

De lining moet de volgende belastingen weerstaan:

1. Permanente belastingen [2]:

- de waterdruk werkt alzijdig op de tunnelbuis. Afhankelijk van de diepteligging en de grondwaterstand staat er een constante druk loodrecht op de lining.
- het eigen gewicht
- maaiveld belasting
- installaties
- de gronddruk richting de holle tunnelbuis. Het eigen gewicht van de tunnel is gelijk aan het gewicht van de ontgraven grond. De resulterende krachtverdeling is een optelsom van de initiële grondspanningen (horizontaal en vertikaal), het eigen gewicht van de tunnel en de opwaartse waterdruk. Aan de bovenkant versterken het eigen gewicht van de tunnel en de gronddrukken elkaar en aan de onderkant werken zij elkaar tegen. Dit levert de volgende spanningverdeling op:



Figuur 23 Geschematiseerde resulterende drukverdeling [2]

2. Veranderlijke belasting [2]:

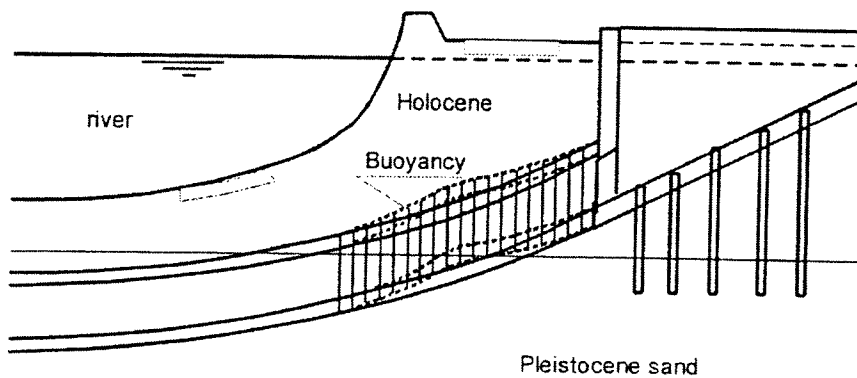
- verkeersbelastingen
- versnellingskrachten ten gevolge van verkeer
- belastingen tijdens montage
- vijzelkrachten uit schild
- druk ten gevolge van groutinjectie

3. Opgelegde vervormingen [2]:

- temperatuur variaties
- krimp en kruip van het beton
- kruip van de grond
- rotaties en plaatsingstoleranties

Door vervormingen en verplaatsingen van lining of segmenten tijdens aanleg van de boortunnel ontstaan zettingen. Als de segmenten van de lining goed op elkaar aansluiten veroorzaakt dit alleen aan de oppervlakte verzakkingen. In bebouwde gebieden kan dit tot schade van gebouwen lijden.

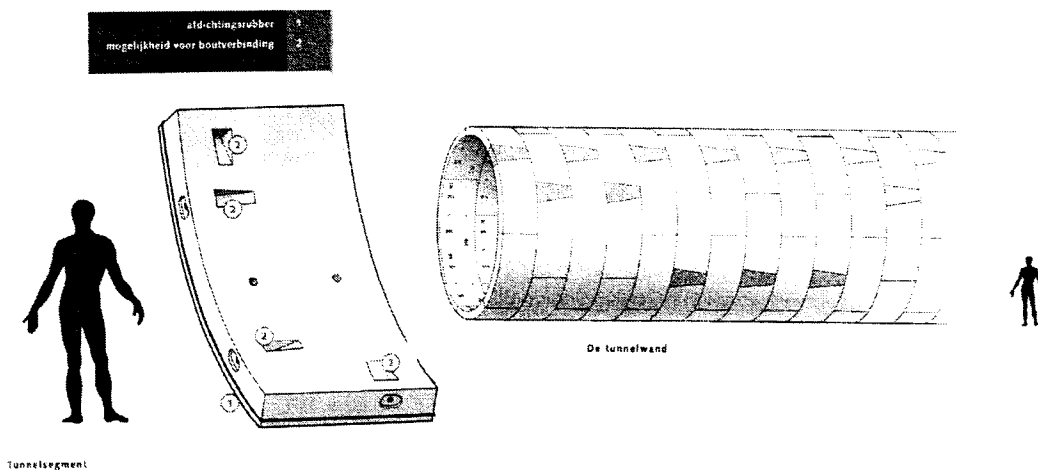
Ter beperking van de aanlegkosten van de toegangen tot de tunnel zal de diepteligging zoveel mogelijk worden beperkt. In de voorlopige ontwerpen voor Nederlandse boortunnels wordt de tunnel vaak gesitueerd ergens op de grens van holoceen en pleistoceen. Dit heeft te maken met de optredende krachtsverdeling, waarbij de stijfheid van de tunnelbuis en de stijfheid van de omgeving in verhouding staan met elkaar. De liggerwerking van de tunnelbuis speelt hierbij een rol. Met liggerwerking bedoelen we, dat elke ring van de tunnelbuis in evenwicht is met de omliggende grond. In figuur 24 is het principe van liggerwerking getekend.



Figuur 24 Principe liggerwerking [2]

5.3.3.4.3 Gewapend beton segmenten

De techniek die wij toegepassen in deze studie is een lining opgebouwd uit betonnen geprefabriceerde segmenten. De segmenten worden in het schild gemonteerd tot een volledige ring. De diameter die met dit systeem wordt gerealiseerd is ongeveer 3 m en groter. Het gebruik van gewapend beton is mogelijk geworden door technische ontwikkeling. Om de segmenten goed op elkaar aan te laten sluiten zijn toleranties heel klein en worden nieuw ontwikkelde voegmaterialen gebruikt. Figuur 25 toont een gedeeltelijk langsaanzicht van een tunnelbuis en een tunnelsegment gegeven [2].



Figuur 25 Gedeeltelijk langsaanzicht van tunnelbuis en tunnelsegment

Er zijn verschillende typen segmenten. De keuze wordt onder andere bepaald door:

- detaillering van de wapening
- verbinding tussen de elementen
- bekisting
- belasting op de elementen

De segmenten van de tunnel hebben niet allemaal dezelfde geometrie. Om de tunnel de gewenste alignement te geven is het noodzakelijk speciale ringen met een taps verloop te plaatsen. Door verschillende conische ringen achter elkaar te plaatsen kunnen bochten in het horizontale en verticale vlak gemaakt worden. Een combinatie maakt ruimtelijke krommingen mogelijk. Maximale kromming wordt bepaald door de tunnelboormachine en de gebruikerseisen van het type vervoermiddel.

De hoofdafmetingen van de segmenten zijn onder te verdelen in de breedte, de lengte de dikte. De volgende factoren bepalen de keuze van de afmeting.

De breedte is afhankelijk van:

- maximale lengte van de vijzels,
- beschikbare ruimte voor het transport en plaatsen van de segmenten,
- maximale gewicht dat door de erector kan worden gehanteerd.

De lengte is afhankelijk van:

- beschikbare ruimte voor transport en plaatsen van segmenten,
- maximale gewicht dat door de erector kan worden gehanteerd,
- aantal handelingen bij fabricage en montage,
- de krachtswerking in de elementen.

De dikte is afhankelijk van:

- de krachtswerking in de segmenten
- de grootte van de vijzelkrachten uit het schild op de segmenten
- de detaillering van de voegen in verband met de afdichting en de krachtsoverdracht tussen de segmenten
- de wijze waarop de segmenten onderling worden verbonden

Wapening is noodzakelijk omdat het segment zowel in de uitvoering als in de definitieve fase krachten moet opnemen. We onderscheiden twee soorten wapening:

Hoofdwapening: Door optredende momenten is het noodzakelijk in de omtrek- en langsrichting wapening aan te brengen. Het gebruikelijke wapeningspercentage is 0.2% á 0.3%.

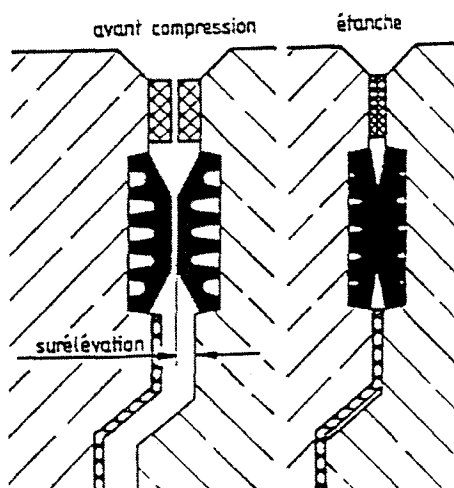
Detailwapening: Aangrijpende krachten op de segmenten moeten geleid worden en scheurvorming moet worden tegengegaan. Op twee belangrijke punten is extra wapening nodig, namelijk op de randen van de segmenten en bij de verbindingen tussen de segmenten.

Een verbinding tussen de segmenten wordt gemaakt met bouten. Deze bouten worden definitief of alleen tijdens de aanleg als verbinding gebruikt. Een verbinding is nodig om tijdens de montage meer stabiliteit te krijgen, voor de krachtsoverdracht in de definitieve fase of om ervoor te zorgen dat het afdichtingsmiddel ingedrukt blijft tijdens ontspanning. Figuur 25 op bladzijde 58 (het gedeeltelijk langsaanzicht van tunnelbuis en het tunnelsegment) toont de uitsparingen voor deze bouten. We zien dat de bouten het segment verbinden in de langsricting en in de omtreksrichting.

De segmenten moeten precies op elkaar aansluiten. Op de vier kopse kanten van de segmenten is een waterafdichtingsprofiel geplaatst. Er zijn twee verschillende waterafdichtingsprofielen:

- *Neopreen-profiel*

Dit profiel is speciaal voor de tunnelbouw ontwikkeld. Door de langs- en omtrekskrachten in de lining wordt het materiaal ingedrukt en ontstaat een afdichting. Deze kracht wordt geleverd door de vijzels en door de boutverbindingen. In de definitieve situatie wordt de kracht geleverd door de boutverbinding of door de lining bij voldoende grote en permanente langs- en omtrekskrachten. Onderstaande figuur 26 toont de werking van de indrukking van een neopreen profiel.



Figuur 26 Indrukking neopreen profiel

- *Hydrofiel-rubber*

In aanraking met water vergroot het profiel met een factor 7 tot 10 in volume, om zodoende een afdichting te verzekeren. Bij dit type is een initiële voorspanning door een boutverbinding noodzakelijk. Als het rubber in aanraking is geweest met water moet dit zich gedurende de gehele levensduur van de tunnel handhaven.

5.3.3.5 Overige materialen

Grout.

De schildmantel heeft een grotere diameter dan de uitwendige diameter van de tunnel, omdat de tunnelring binnen het schild wordt opgebouwd. Tijdens het voortbewegen van het schild ontstaat een spleetvormige opening achter de schildwand en rondom de pas geplaatste tunnelring. Om zettingen te voorkomen wordt deze ruimte tijdens het vooruitschuiven van het schild volgeperst met cement-grout. Er zijn verschillende injectiematerialen te gebruiken waaronder zand/cement, waterglas toevoegingen en zand/bentoniet. Het materiaal wordt ter plaatste van de staartafdichting van de TBM of door een opening haaks op de segmenten geïnjecteerd. Tussen de stalen schildmantel en de geplaatste segmenten bevindt zich een afdichting om toestromend grondwater tegen te houden.

5.4 Aanlegkosten geboorde tunnel

5.4.1 Inleiding

Deze paragraaf gaat in op de kosten van geboorde tunnels. Hierbij gaat het om geboorde tunnels, die voldoen aan het behandelde ruimtelijk en constructief ontwerp. We maken gebruik van nacalculaties van reeds uitgevoerde projecten. Een ruwe bepaling van de aanlegkosten is nodig om een optimale strategie voor het doen van onderhoud aan geboorde tunnels te bepalen. Een globale voorcalculatie van nieuwe projecten is slechts te maken, als een ruime risicomarge wordt aangehouden. Het overzicht dat we zullen geven is een algemene kostenindicatie en geen kostenraming. De gegevens komen uit "Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen; eindrapportage KIVI Tunneltechniek en ondergrondse werken 1993" [2].

5.4.2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

- Uitgegaan is van het prijspeil in Nederland, met prijsbasis 1992.
- De vermelde prijzen zijn kostprijzen. In verband met de in de voorgaande paragraaf genoemde grote risico's moeten de prijzen verhoogd worden met 8% algemene kosten (AK) en 12% winst en risico (W&R).
- We gebruiken de ruimtelijke en constructieve ontwerpmethodieken van paragraaf 5.2 en 5.3.
- De bodem bestaat uit pleistoceen zand met kleibestanddelen. We houden geen rekening met mogelijke obstakels in de grond.
- De gehanteerde normen zijn gebaseerd op de inzet van materieel zoals algemeen wordt gebruikt voor deze grondsoort en gefabriceerd door een gespecialiseerd ervaren bedrijf.
- De gehanteerde normen zijn gebaseerd op de inzet van gespecialiseerd, gekwalificeerd en ervaren personeel. Dit geldt zowel voor de uitvoering als voor de projectleiding.
- De verschillende boordiameters bedragen 6, 8, 10 en 13 m.
- De tunnelboormachine wordt één keer ingezet. We zullen 2 buizen met een lengte van elk 2,5 km boren.
- De minimum dekking is 1 á 1,5 maal de diameter.

- Tussen de twee tunnelbuizen wordt een onderlinge afstand van 1 maal de diameter aangehouden.
- Er wordt geboord met een tunnelboormachine met een schildmethode en slurrydruk (het hydroschild).

5.4.3 Aanlegkosten

5.4.3.1 Inleiding

Deze paragraaf behandelt voor de belangrijkste onderdelen en aspecten in het boorproces de boorkosten. We onderscheiden de volgende kostenposten:

- bouwplaats
- TBM
- afvoer van de grond
- scheidingsinstallatie
- lining
- groutinjectie
- bentoniet
- leidingen en kabels
- energie

Tot slot berekenen we in deze paragraaf de totale kosten voor de vier verschillende diameters 6, 8, 10 en 13 m. De belangrijkste kentallen van invloed op de kosten zijn de diameter, de omtrek en de oppervlakte van de doorsnede.

diameter [m]	omtrek [m]	opp. doorsnede [m ²]
6,00	18,84	28,26
8,00	25,12	50,24
10,00	31,40	78,50
13,00	40,82	132,66

Tabel 9 Omtrek en oppervlak van de doorsnede van een tunnelbuis van vier verschillende diameters

Veel bijkomende kosten hebben we niet meegenomen in de berekening. Het zijn directe bouwkosten voor onder andere:

- start-, ontvangst-, vlucht- of ventilatieschachten
- dwarsverbindingstunnels
- ondergrondse stations
- splitsingen
- toeritten
- weg- en railvoorzieningen
- ventilatie- en bedieningsgebouwen
- veiligheidsvoorzieningen
- afbouw tunnel
- geluidwerende voorzieningen

- daglichtroosters
- verkeerssignaleringsinstallaties
- videobewaking

5.4.3.2 De bouwplaats

De bedragen die in onderstaande tabel zijn weergegeven hebben betrekking op het materieel en het materiaal benodigd op de bouwplaats. De kosten zijn te verdelen in een éénmalig en een variabel deel. Zoals gezegd in de inleiding zijn hier niet de kosten voor de schacht in meegenomen. Er geldt een vuistregel dat 10% van de directe kosten van de bouwsom (vóór algemene kosten en winst & risico) besteed wordt aan de bouwplaatsinrichting, onderhoud en demobilisatie.

diameter [m]	totaal materiaal + materieel, incl. lopende kosten 10% van het project [kfl]	
	éénmalig	variabel
6	1.150	9.006
8	1.300	12.892
10	1.500	18.933
13	2.200	27.402

Tabel 10 Kosten voor materieel en materiaal op de bouwplaats per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.3 Tunnelboormachine

De totale kosten aan de TBM kunnen we uitsplitsten in kosten voor aankoop, mobilisatie en demobilisatie, omzet gedurende graafproces, bijbehorende loonkosten en een restwaarde. Onder de TBM wordt de volledige machine verstaan voor zover deze zich in de boorgang bevindt, beginnend bij boorkop en eindigend bij de laatste wagen achter aan de "trein" volgend op de boorkop.

Bij de kosten voor mobilisatie en demobilisatie is ook een bedrag meegenomen voor het, één keer omzetten van de TBM.

De restwaarde van de TBM hangt af van de vraag naar het hergebruik van de machine. Verkoop van een TBM vindt niet of slechts zelden plaats. Onderdelen van de TBM zijn na beëindiging van het werk wel elders inzetbaar.

diameter [m]	aankoop [kfl]	mobilisatie [kfl]	omzet [kfl]	demobilisatie [kfl]	loonkosten [kfl]	restwaarde [kfl]
6	12.000	1.250	900	400	4.000	1.500
8	17.500	1.650	1.100	500	5.000	2.000
10	26.000	2.100	1.300	650	6.500	2.500
13	40.000	3.000	1.700	950	8.500	3.500

Tabel 11 Kosten van de tunnelboormachine per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.4 Afvoer van grond

In de kostenbeschouwing gaan we ervan uit dat een TBM gebruikt wordt met een hydroschild. Dit betekent dat bentoniet als steundruk wordt gebruikt aan het boorfront. Een scheidingsinstallatie scheidt de grond van het bentoniet. De volgende paragraaf behandelt de kosten voor de scheidingsinstallatie, deze paragraaf behandelt de afvoer van de verontreinigde grond. Na scheiding bevat de grond 1% bentoniet. De grond zal zeker niet "hoogwaardig" zijn het hergebruik zal zeer beperkt zijn.

De kosten van afvoer van de grond zijn moeilijk precies vast te stellen. Ze hangen sterk af van lokatie en samenstelling van de grond. We nemen aan dat zich naast bentoniet geen andere verontreinigingen in de grond bevinden.

De gemiddelde kosten voor het afvoeren van de grond is fl 25,-.

diameter [m]	opp. doorsnede [m ²]	kosten per m ¹ [fl]	kosten voor 5000m [kfl]
6	28,26	706	3.532
8	50,24	1.256	6.280
10	78,50	1.962	9.812
13	132,66	3.316	16.582

Tabel 12 Kosten voor afvoer grond per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.5 Scheidingsinstallatie

In bijlage 2 is schematisch een scheidingsinstallatie weergegeven. Een scheidingsinstallatie scheidt met behulp van hydrocyclonen en met centrifuges de bentoniet van de grond. Fijnere deeltjes tot een afmeting van 10 µm kunnen worden verwijderd. Door toevoeging van middelen uit de scheikunde kunnen door uitvloeking nog kleinere bestanddelen worden verwijderd tot een afmeting van 4 µm.

De kosten van de installatie variëren met de vereiste produktie en dus met de diameter van de tunnel.

De restwaarde van de scheidingsinstallatie stellen we op 50%.

diameter [m]	aankoop [kfl]	mobilisatie [kfl]	demobilisatie [kfl]	restwaarde [kfl]
6	1.200	750	350	600
8	2.000	1.000	450	1.000
10	3.100	1.500	600	1.550
13	5.000	2.500	1.000	2.500

Tabel 13 Kosten van de scheidingsinstallatie per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.6 De lining

In paragraaf 5.3 (constructief ontwerp) hebben we gekozen voor geprefabriceerde betonnen segmenten. Tegenwoordig is dit de goedkoopste oplossing voor tunnels met een diameter groter dan 5 m.

De segmenten worden geproduceerd in zeer hoogwaardige stalen mallen. Met de productie van de segmenten zijn hoge maattoleranties geëist. De tunnelling wordt opgebouwd uit verschillende segmenten afhankelijk van de kromming in de asligging van de tunnel en de afmetingen van de tunnel. Op deze manier kunnen bochten in het verticale en horizontale vlak gemaakt worden. Per segment zijn afhankelijk van de productie en de lengte van de tunnel 1 á 2 mallen beschikbaar. Met 16 verschillende afmetingen segmenten moeten in totaal 16 of 32 mallen beschikbaar zijn. De kosten van één mal bedragen 60 tot 100 kfl.

Het boren gaat over het algemeen sneller dan de productie van segmenten. Om de boormachine bij te houden, is een grote voorraad ringen nodig.

In deze kostenopstelling hebben we geen rekening gehouden met de kosten van de lining door variatie van het aantal mallen. Een gemiddelde prijs van fl 1.350,- per m³ houden we aan. De dikte van de ring varieert ook enigszins met de diameter van de tunnel. In de praktijk gaat men uit van een wanddikte tussen 0.30 m en maximaal 0.50 m, afhankelijk van de diameter.

diameter [m]	wanddikte [m]	m ³ per m ¹	eenheidsprijs [fl]	kosten per m ¹	kosten voor 5000m [kfl]
6	0,30	5,37	1.350	7.250	36.250
8	0,35	8,42	1.350	11.370	56.850
10	0,45	13,50	1.350	18.230	91.150
13	0,50	19,62	1.350	26.500	132.500

Tabel 14 Kosten van de fabricage van de lining-segmenten per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.7 Groutinjectie

De ruimte tussen de snijrand van de machine en de ring wordt gevuld met grout; een mengsel van cement, zand, vlieg-as, bentoniet en water. Hierdoor wordt een goede krachtsoverdracht gerealiseerd tussen lining en omliggende grond en wordt een secundaire waterdichte laag gevormd.

In totaal moet zo'n 10 á 15 cm vrije ruimte gevuld worden met grout. Afhankelijk van de persdruk en de bodemgesteldheid verdwijnt 20% á 50% van het materiaal in de omliggende grond.

diameter [m]	omtrek [m]	volume [m ³ /m ¹]	prijs/m ³ [fl]	totaal prijs/m ¹ [fl]	kosten voor 5000m [kfl]
6	18,84	2,83	125	354	1.768
8	25,12	3,77	125	471	2.356
10	31,40	4,71	125	589	2.943
13	40,82	6,12	125	765	3.825

Tabel 15 Kosten van groutinjectie per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.8 Leidingen en kabels

Een groot aantal leidingen, kabels en andere voorzieningen zijn nodig in de tunnel. Het betreft:

- aan- en afvoerleidingen
- elektriciteitsvoorziening
- verlichting
- bentoniet
- grout
- spoor
- luchtverversing

De kosten zijn onder andere afhankelijk van diameter en lengte van de tunnel, eigenschappen van de grond en vereist vermogen.

De leidingen kan men voor de tweede tunnelbuis hergebruiken; daarom rekenen we met een lengte van 2500 m in plaats van 5000 m.

diameter [m]	prijs per m ¹ [fl]	kosten voor 2500 m [kfl]
6	1.200	3.000
8	1.500	3.750
10	1.900	4.750
13	2.500	6.250

Tabel 16 Kosten van aanleg van leiding en kabels per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.9 Bentoniet

Een scheidingsinstallatie en bentoniet als steundruk materiaal zijn alleen nodig als men gebruik maakt van een TBM met hydroschild. In deze kostenbeschouwing gaan we daarvan uit.

Het mengsel bentoniet en grond bevat ± 10% grond als het de tunnel wordt uitgedompd. Bentoniet bestaat voor het grootste deel uit water en voor ± 3 á 5% uit bentoniet. Aan het boorfront is praktisch geen verlies van bentoniet.

Het bentonietmengsel kan 10 keer circuleren, voordat het verbruikt is. Dit is afhankelijk van de eigenschappen van de grond. De totale hoeveelheid bentoniet die benodigd is, is onder andere afhankelijk van de diameter en de lengte van de tunnel, het soort scheidingsinstallatie en de stroomsnelheid.

diameter [m]	oppervlakte doorsnede [m ²]	prijs per m ³ [fl]	prijs per m ¹ [fl]	kosten voor 5000 m [kfl]
6	28,26	11	311	1.555
8	50,24	11	553	2.765
10	78,50	11	864	4.317
13	132,66	11	1.459	7.295

Tabel 17 Kosten van bentoniet per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.10 Energie

Er is energie benodigd voor de bouwplaats, de TBM en de scheidingsinstallatie. Een boorinstallatie met een diameter van 8 m heeft een geïnstalleerd vermogen van 3000 kW. Het volledige vermogen wordt in 30% van de bedrijfstijd gebruikt. De scheidingsinstallatie heeft een geïnstalleerd vermogen van 600 kW en wordt in 25% van de totale bedrijfstijd benut. Er zijn loonkosten voor de aanleg van de energievoorziening.

diameter [m]	vermogen [kWh]	loonkosten [kfl]	totale kosten [kfl]
6	2.725	385	3.495
8	3.600	385	4.230
10	4.800	390	5.225
13	6.000	400	6.195

Tabel 18 Kosten verbruik energie tijdens aanleg per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.11 Onderhoud en vervanging

Gedurende het productieproces is er voortdurend onderhoud aan onder andere TBM en scheidingsinstallatie. Er is slijtage van beitels en van andere slijtagegevoelige onderdelen van de machine. De geschatte kosten zijn per m³ berekent.

diameter [m]	oppervlakte doorsnede [m ²]	prijs per m ³ [fl]	prijs per m ¹ [fl]	kosten voor 5000 m [kfl]
6	28,26	25	707	3.532
8	50,24	25	1.256	6.280
10	79,50	25	1.988	9.937
13	132,66	25	3.317	16.582

Tabel 19 Kosten van onderhoud en vervanging van materiaal en materieel tijdens aanleg per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.12 Loonkosten

Het boorproces is een continu proces. In de weekenden ligt het boorproces stil voor onderhoud en vervanging van onderdelen van de TBM. Er wordt in drie ploegendienst continu gewerkt. Afhankelijk van de te boren diameter is een bepaalde omvang en samenstelling van de ploeg vereist. Elke ploeg werkt 8 uur per dag.

In tabel 20 is per diameter een bepaalde groepsgrootte verondersteld.

Er wordt ongeveer 10 meter per dag geboord. Het omzetten van de TBM duurt 2 maanden. Gedurende deze tijd wordt met 3 ploegen doorgerekend, feitelijk is niet de voltallige ploeg aanwezig. Met het meerekenen van extra kosten voor projectmanagement, verzekering en voorfinanciering, komen de totale gemiddelde loonkosten op f 115,- per uur.

diameter [m]	gemiddelde produktie [m/dag]	ploegen [aantal]	aantal personen per ploeg	manuur [uren x 1000]		kosten 5000 m [kfl]
				boren	mobilisatie + demobilisatie	
6	10	3	14	184	8	22.172
8	10	3	16	211	8	25.208
10	10	3	19	251	10	29.992
13	10	3	23	304	15	36.639

Tabel 20 Loonkosten per diameter tunnel in kfl.

5.4.3.13 Totale kosten

Deze paragraaf sommeert alle kosten voor de verschillende aspecten en onderdelen in het bouwproces van een geboorde tunnel. Voor algemene kosten en winst & risico brengen we zoals vermeld in de uitgangspunten totaal 20% in rekening. Na optellen verkrijgen we de kosten van de ruwbouw. Vervolgens delen we de kosten van ruwbouw op de lengte van de tunnel en krijgen we een kostprijs per meter tunnelbuis.

Zoals gebleken zijn veel aannames gedaan om tot deze kostenbeschouwing te komen. Risico's kunnen de bouwkosten zeer aanzienlijk beïnvloeden.

	boordiameter [m] ; kosten in [kfl]			
	6	8	10	13
BOUWPLAATS				
vast	1.150	1.300	1.500	2.200
variabel	9.006	12.892	18.933	27.402
BOORINSTALLATIE				
aankoop	12.000	17.500	26.000	40.000
mobilisatie	1.250	1.650	2.100	3.000
omzetten	900	1.100	1.300	1.700
demobilisatie	400	500	650	950
restwaarde	-1.500	-2.000	-2.500	-3.500
AFVOER GROND	3.535	6.280	9.815	16.585
SCHEIDINGSINSTALLATIE				
aankoop	1.200	2.000	3.100	5.000
mobilisatie	750	1.000	1.500	2.500
demobilisatie	350	450	600	1.000
restwaarde	-600	-1.000	-1.550	-2.500
LINING	36.250	56.850	91.150	132.500
GROUTINJECTIE	1.770	2.355	2.945	3.825
LEIDINGEN EN KABELS	3.000	3.750	4.750	6.250
BENTONIET	1.555	2.765	4.320	7.295
ENERGIE	3.495	4.230	5.225	6.195
ONDERHOUD EN VERVANGING	3.535	6.280	9.940	16.580
LOONKOSTEN	22.175	25.210	29.990	36.640
TOTAAL	100.221	143.112	209.768	303.622
OPSLAG VAN ALGEMENE KOSTEN EN WINST & RISICO	20%	20%	20%	20%
KOSTEN RUWBOUW	120.265	171.734	251.721	364.346
KOSTEN PER M¹ TUNNELBUIS	24	34	50	73

Tabel 21

Totale kosten van de aanleg van een geboorde tunnel per diameter in kfl.

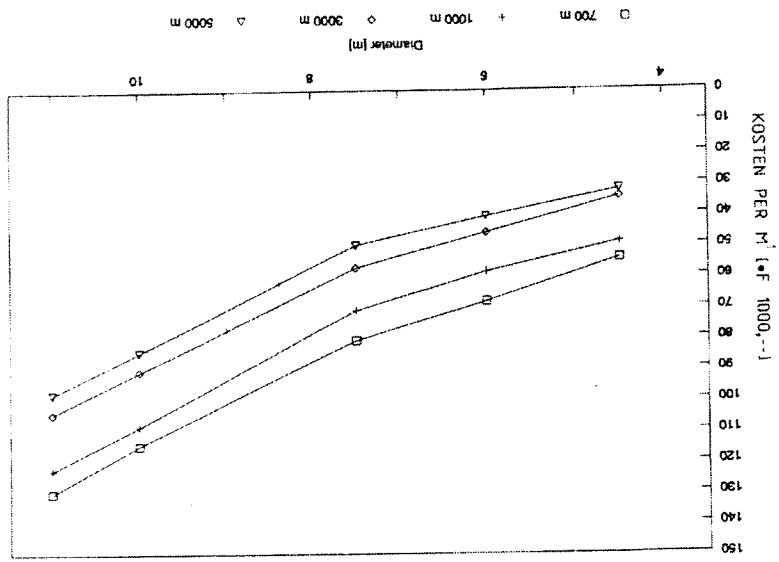
5.4.3.14 Vergelijking kosten

Niet alleen het Koninklijk instituut van Ingenieurs (KIVI), afdeling voor tunneltechniek en ondergrondse werken heeft studie gedaan naar de kosten van geboorde tunnels in Nederland. Ook TEC/Mott MacDonald heeft in opdracht van Bouwdienst Rijkswaterstaat onderzoek gedaan.

De kosten van de twee onderzoeken komen redelijk overeen met elkaar. De kosten zijn waardevol voor de studie naar de berekening van de kosten van een geboorde tunnel voor de gehele levensduur.

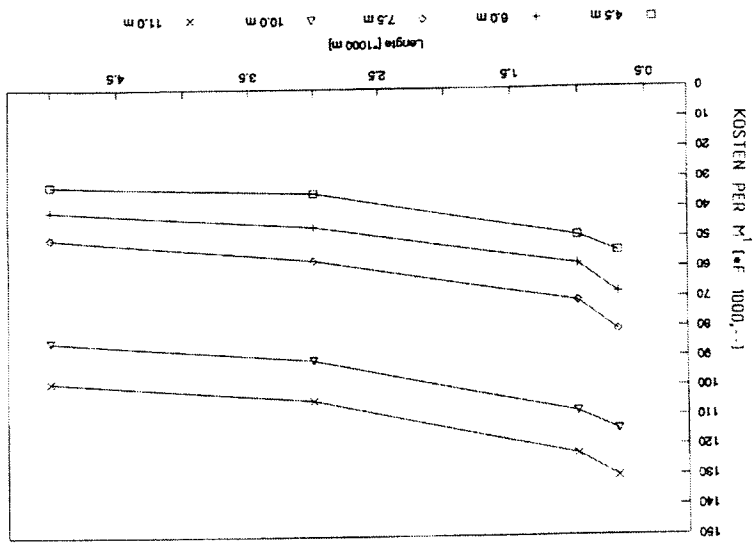
De diameter bepaalt in grote mate de hoogte van de kosten. Tunnels voor het wegverkeer vragen over het algemeen een grotere diameter door het meer rijbanen en hogere eisen aan het ruimtelijk ontwerp. Het is dan ook veel goedkoper om verkeerstunnels aan te leggen met de afgezonken tunnel-methode dan met de geboorde tunnel-methode. In onderstaande figuren is de prijs per meter geboorde tunnel uitgedrukt tegen respectievelijk de diameter en de lengte [TEC/Mott MacDonald].

Figuur 27 A toont voor vier tunnel lengtes het verband tussen de aanlegkosten per strekkende meter en de diameter van de geboorde tunnel.



Figuur 27 A Kosten per m¹ tunnelbuis in relatie tot de tunnel diameter [2]

Figuur 27 B toont voor vier tunnel diameters het verband tussen de kosten per strekkende meter en de lengte van de tunnel.



Figuur 27 B Kosten per m¹ tunnelbuis in relatie tot de tunnel lengte [2]

De belangrijkste kostengroep in tabel 21 is de lining, ofwel de uit betonnen segmenten opgebouwde tunnelwand. Het volgende hoofdstuk geeft een beschouwing van de afzonderlijke componenten van de geboorde tunnelwand. De verschillende degradatieprocessen en de uitwerking van dit proces in de gebruiksfase zullen we per component belichten. Informatie over de verschillende componenten met de technische beschrijvingen zijn afkomstig uit het project van de eerste geboorde tunnel in Nederland 'De tweede Heinenoordtunnel'.

Per component stellen we een maatgevend degradatieproces, het verloop van degradatie, de faalkans, de faalkosten en de bijbehorende inspectie- en onderhoudsstrategie vast. En we stellen verschillende scenario's van beheer op, waaruit we de meest optimale kunnen kiezen.

6 Componenten in de gebruiksfase

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de componenten van de tunnelwand van de geboorde tunnel. Het gaat alleen in op componenten die direct relevant zijn voor de instandhouding van de civiel-technische constructie in de gebruiksfase.

Het gaat om componenten die gebruikt zijn bij de aanleg van de tweede Heinenoord-tunnel. Paragraaf 6.2 geeft een korte beschrijving van dit project.

Na deze beschrijving zullen de volgende paragrafen in gaan op het doel, de gebruikte materialen, de technische beschrijving, de krachten en het degradatieproces van elke component. De schade veroorzaakt door dit degradatieproces, de inspectie van de degradatie van de materialen en de reparatie wordt beschreven. Tot slot volgt een begroting van instandhouding voor de gehele levensduur van de tunnel.

6.2 Tweede Heinenoord Tunnel

6.2.1 Inleiding

Onder de Oude Maas is een groep aannemers, verenigd in de Tunnel Combinatie Heinenoord (TCH), bezig met de aanleg van de eerste geboorde tunnel in Nederland. Rijkswaterstaat is de opdrachtgever. Zoals de naam al zegt is dit de tweede oeververbinding. De eerste tunnel ligt er pal naast. Er volgt nu een korte geschiedenis.

6.2.2 Eerste Heinenoord tunnel

De eerste Heinenoordtunnel was een oeververbinding in de A29 onder de Oude Maas en werd in 1969 in gebruik genomen. De aanleg vond plaats in een periode waarin de verkeersdrukke op de Nederlandse wegen explosief toenam. Bovendien ontstond met de aanleg van de Deltawerken een ontsluiting van Zeeland en de Zuid-Hollandse eilanden richting de Randstad. Het grootste knelpunt vormde de Barendrechtse brug over de Oude Maas. Hier ontstonden lange files, mede omdat de smalle brug voortdurend open stond voor het drukke scheepvaartverkeer van en naar Rotterdam [22].

6.2.3 Gebrek aan capaciteit

Door de aanleg van rijksweg A29 en de Heinenoordtunnel kwam een eind aan de congestieproblemen die de route tussen de Hoeksche Waard en de Randstad tot dan toe kende. Na het gereedkomen van de tunnel - die in beide richtingen rijstroken had voor het langzaam verkeer - groeide het verkeersaanbod gewoon door.

Zo zeer zelfs dat halverwege de jaren '70 per dag gemiddeld 40.000 motorvoertuigen van de oeververbinding gebruik maakten, 10.000 meer dan vooraf was verwacht. De capaciteit bleek onvoldoende te zijn en filevorming was het gevolg. De filevorming is vooral een economisch probleem: de A15 vormt de belangrijkste verkeersslagader voor het Europoort-gebied [22].

6.2.4 Mogelijke oplossingen

Halverwege de jaren '70 keek men al uitgebreid naar mogelijke oplossingen om de capaciteit van de Heinenoordtunnel te vergroten, zodat deze het groeiende verkeersaanbod zou kunnen verwerken. In eerste instantie zoekt men die oplossing in het aanleggen van een wisselstrook voor het snelverkeer. In de ochtendspits zou het verkeer naar Rotterdam daar gebruik van kunnen maken en in de avondspits het verkeer richting Zierikzee. Omdat dit echter geen structurele capaciteitsuitbreiding zou opleveren en er ook relatief hoge kosten mee waren gemoeid verdween de wisselstrook als een niet aantrekkelijk alternatief van tafel.

Na de keuze voor een aparte tunnel voor het langzame verkeer, werd in 1991 het langzaam verkeer uit de oostbuis (richting Rotterdam) overgebracht naar de westbuis. Daardoor kreeg het snelverkeer in de richting Rotterdam de beschikking over drie in plaats van twee rijstroken. Daarmee kwam er een eind aan de files in de ochtendspits [22].

6.2.5 Tunnel voor langzaam verkeer

In december 1994 is na keuze voor de variant met dubbele buizen gestart met het definitieve (bestek)ontwerp. De Tweede Heinenoordtunnel zal bestaan uit de volgende delen [22]:

- Het gesloten (boor)tunneldeel heeft een lengte van 945 meter lengte en bestaat uit twee buizen met een inwendige diameter van 7600 mm en wanddikte van 350 mm. De tunnelwand wordt opgebouwd uit ringen, in totaal 1266 stuks. Elke ring bestaat uit acht segmenten; er zijn dus 10.128 segmenten benodigd. De maximale helling is 1:30 en op het diepste punt ligt het wegdek op ongeveer 26 meter onder NAP.
- Op beide oevers staan startschachten, elk 37,5 meter lengte. Deze bestaan uit stalen combiwanden met een vloer van ongewapend onderwaterbeton, die is verankerd door middel van stalen trekpalen. Op de onderwaterbetonvloer is een constructieve betonvloer aangebracht. Om de druk van de grond te kunnen weerstaan is een (definitief) stempelraam aangebracht. Vanuit deze schacht start de boormachine. Nadat de tunnel in gebruik is genomen, vormen deze schachten de overgang van het gesloten naar het open tunneldeel. In elke schacht bevinden zich drie roltrappen en een lift, waarmee (brom)fietsers en voetgangers vanaf het maaiveld de tunnelingang veilig kunnen bereiken.
- Aan beide oevers bevindt zich een toerit van ongeveer 150 meter lengte, die is opgedeeld in drie secties: deels bestaande uit damwanden met onderwaterbeton, stempels en trekpalen, deels uit een betonnen bakconstructie op betonnen palen. De toeritten zijn bestemd voor het agrarisch verkeer, en hebben een helling van 1:15. Ze dienen als verbinding tussen de tunnelingang en het maaiveld.

- De rivierbodem in de Oude Maas wordt tegen erosie beschermd, zodat de bodem van de Oude Maas stabiel blijft en de benodigde bovendeckking voor de tunnel is gegarandeerd. De bescherming bestaat uit een zinkstuk met daarop een steenbestorting.

De totale kosten van het project zijn geraamd op 150 miljoen gulden voor de tunnel en 100 miljoen gulden voor de aansluitingsinfrastructuur.

6.3 De componenten

In tabel 22 zijn de verschillende componenten, die van belang zijn voor de stabiliteit van de tunnelwand en het gebruik van de geboorde tunnel ingedeeld in 5 componenten. De verschillende opeenvolgende paragrafen zullen deze componenten behandelen.

COMPONENT	MATERIAAL
1. segmenten	beton, wapening en rubberafdichtingprofiel
2. grout	cement, water en overig opvulmateriaal
3. triplexplaatjes	berkenhout
4. bodembescherming	polypropyleen, rijshout en stenen
5. elektromechanische voorzieningen en voorzieningen voor veiligheid	installaties voor o.a. verlichting, ventilatie, pompen, bewaking etc.

Tabel 22 Componenten en de bijbehorende materialen

Dit onderzoek gaat ervan uit, dat we te maken hebben met een degelijke tunnel. Er wordt geen rekening gehouden met menselijke ontwerpfouten gemaakt in de aanlegfase. Kosten voor herstel van een ontwerpfout bij de diverse componenten zijn extreem hoog. Daarnaast zal geen rekening gehouden worden met calamiteiten in de gebruiksfase door botsing of brand. Eventuele kosten kunnen afhankelijk van de ernst van het ongeluk zeer hoog oplopen. De kosten kunnen toegeschreven worden aan de veroorzaker, maar zeker niet aan de post regulier onderhoud. Een vergelijking tussen kosten aan de tunnel gemaakt in de aanleg- en gebruiksfase is dan niet realistisch en niet van belang voor dit onderzoek.

Tijdens een tunnelleven zijn de volgende kostenposten te onderscheiden:

- **EXPLOITATIE**
Dit zijn kosten, die direct samenhangen met het gebruik van de tunnel. Kosten zoals onder andere het arbeidsloon van de opzichter, verbruik elektriciteit en brandstof en kosten centrale meldkamer van de tunnel vallen hieronder. In paragraaf 6.4 volgt de berekening van een raming van de exploitatiekosten.
- **BUITENGEBRUIKSTELLING**
Kostenderving, omdat de infrastructuur gedurende buitengebruik geen economisch nut heeft. Paragraaf 6.5 gaat in op deze kostenderving.
- **INSPECTIE**
Loonkosten voor visuele inspectie, controle meterstand en uittesten op deugdelijke werking van de component of voorziening. Ook de kosten voor materieel benodigd om de inspectie te verrichten vallen hieronder.

- ONDERHOUD

Kosten van arbeidsloon, materieel en materiaal voor het doen van reparaties en vervanging van componenten.

De verschillende kosten aan de componenten worden afgeschreven naar deze bovengenoemde posten.

Voor het opstellen van een begroting van inspectie, onderhoud en vervanging stelt men een scenario op. Het scenario hangt af van de degradatiesnelheid van de verschillende componenten. Deze wordt constant verondersteld. Naarmate de levensduur van de tunnel toeneemt is het scenario negatiever door degradatie van de componenten. De strategie van beheer (inspectie en onderhoud) die wordt gekozen is toestandafhankelijk. Onderzoek met het computerprogramma Optimon heeft uitgewezen dat dit de goedkoopste strategie is. Per component is vast te stellen welk scenario gevolgd wordt.

De kosten worden gesommeerd voor de totale technische levensduur van de tunnel. De totale technische levensduur is 100 jaar gesteld. Met de netto contante waarde- (NCW) methode worden de jaarlijkse kosten teruggerekend naar het jaar van oplevering van de tunnel. Op deze manier is het mogelijk de kosten in de gebruiksfase te vergelijken met de kosten in de aanlegfase. Tevens kan men op deze manier een minimale contante waarde vinden voor uitgaven aan exploitatie, inspectie, onderhoud en buitengebruikstelling voor de verschillende hoofdcomponenten (tabel 22).

6.4 Exploitatie

Exploitatiekosten zijn maandelijks terugkerende kosten voor onder andere:

- arbeidsloon opzichter tunnel en bediening centrale meldkamer
- administratiewerk (logboeken, contracten en informatie-uitwisseling)
- reinigen van de tunnel en het buitengebied
- elektriciteitsvoorziening en verbruik brandstof
- overige kosten die periodiek terug komen

Kosten toegeschreven aan exploitatie worden gemaakt tijdens de normale ingebruikstelling van de tunnel. Deze kosten nemen gedurende de levensduur niet toe vanwege degradatie van componenten.

Op basis van het arbeidsloon wordt een kostprijs voor exploitatie berekend. De werkzaamheden toegeschreven aan de tunnel zijn afhankelijk van clustering van het aantal tunnels in dezelfde centrale meldkamer. De dienstkring Rhooon heeft een centrale meldkamer bij de Eerste Heinenoordtunnel. Vanuit deze meldkamer zal men de tweede Heinenoordtunnel, twee Beneluxtunnels en de Calandtunnel in de toekomst bedienen.

- Voor de bediening van twee tunnels zijn jaarlijks 7 operators nodig. Hierbij is rekening gehouden met vakantie, ziekte, dag- en nachtshiften. Één operator kost jaarlijks fl 70.000,- (bron: hoofd Regionale directie Rhooon).
- Overdag is er één tunnelopzichter aanwezig.

- Twee ongeschoolde werknemers reinigen de tunnel en het omliggende gebied elke twee weken gedurende één dag.

Overige exploitatiekosten worden verrekend door de kosten voor de operator, de opzichter en het reinigen met een factor 1.5 te vermenigvuldigen.

TOTALE EXPLOITATIEKOSTEN PER JAAR:

operator:	$\frac{1}{2} \times \text{kfl } 70 \text{ (loon)} \times 7 \text{ (aantal operators)}$	=	245 kfl
opzichter:	$\text{kfl } 70 \times 1$	=	70 kfl
reinigen:	$2 \times \frac{1}{2} \times 52 \times 8 \times \text{fl } 90,-$	=	37 kfl
totaal		=	352 kfl
totaal inclusief verbruikfactor (x 1.5)		=	528 kfl

De netto contante waarde van de exploitatiekosten van 10 jaar ingebruikstelling in het aanlegjaar is 10.480 kfl.

6.5 Buiten-gebruikstelling tunnel

Voor inspectie- en onderhoudwerkzaamheden moet een tunnelbuis voor enige tijd buiten gebruik gesteld worden. De tunnel wordt dan afgesloten voor alle verkeer en is alleen toegankelijk voor bevoegd inspectie- en onderhoudspersoneel. Inspectie en onderhoud in de tunnel gebeurt zoveel mogelijk 's nachts. Het nachttarief, dat werknemers ontvangen is hoog. Dit hoge nachttarief is nodig om buiten-gebruikstelling van de tunnel overdag te minimaliseren.

Voor renovatie is het nodig de tunnel gedurende bepaalde perioden voor alle verkeer af te sluiten. Bij een afsluiting let men op de volgende punten:

- De tijdsduur van buiten-gebruikstelling wordt geminimaliseerd; er wordt dag en nacht gewerkt (goedkoop dagtarief en duur nachttarief voor arbeidsloon van werknemers).
- De interval tussen buiten-gebruikstelling wordt zo lang mogelijk gehouden; na bijvoorbeeld 20 jaar wordt een tunnel gerenoveerd.
- Men stelt een tunnel bij voorkeur buiten-gebruik in economisch rustige tijden; gedurende de grote zomervakantie (extra premies worden betaald om werknemers hun bouwvakantie af te kopen).

KOSTEN VAN BUITENGEBRUIKSTELLING:

Een tunnel heeft net als alle infrastructuur een economisch nut. Er zijn verschillende manieren om het economisch nut te berekenen:

- Derving van opbrengst als gevolg van produktieverlies (bijvoorbeeld: de kostenderving van buitengebruikstelling per dag is de vermenigvuldiging van het nut van een auto die door de tunnel rijdt en het aantal auto's die per dag van de tunnel gebruik maken).
- Derving omdat in het aanlegjaar een bepaald bedrag geïnvesteerd is in de tunnel. Het geld is op dagen van buiten gebruik niet nuttig besteed.

Omdat dit onderzoek is opgesteld voor geboorde tunnels in het algemeen, is er geen kwantificering van de produktie op te stellen. Het economisch nut wordt berekend uit de rentederving van aanlegkosten van de tweede Heinenoord-tunnel. Het rentepercentage is gemiddeld 5 %.

Berekening:

Nieuwwaarde tunnel	= kfl 250.000
5 % van de nieuwwaarde	= kfl 12.500 per jaar
dagelijks economisch nut	= kfl 34

Het dagelijks economisch nut van de tunnel wordt gelijk gesteld aan de kostenderving van buitengebruikstelling.

De kosten van buiten-gebruikstelling zijn niet homogeen verdeeld over het etmaal, omdat gedurende de nachtelijke uren veel minder verkeer de tunnel passeert. We stellen het economisch nut in de nachtelijke uren op fl 0,-. De kosten van buitengebruikstelling wordt toegeschreven aan de uren overdag, totaal 34 kfl.

6.6 Segmenten

Elke component van de civiel-technische constructie heeft een bepaald doel in de aanlegfase en / of in de gebruiksfase. De wijze van vervullen van dit doel, de belastingen en bijbehorende risico's bepalen de eigenschappen van de component.

Er wordt ingegaan op het doel van de segmenten. Paragraaf 6.6.1 beschrijft de werking van het segment en volgt een technische beschrijving van het ontwerp gemaakt in de aanlegfase. Paragraaf 6.6.2 gaat in op de verschillende belastingen en de daardoor geïnitieerde degradatieprocessen in de gebruiksfase.

DOEL:

- weerstand bieden tegen de gronddruk en de waterdruk,
- segmenten onderling verbonden in een lining moeten waterdicht zijn,
- veilige doorgang voor het verkeer zijn.

De tunnel moet gedurende zijn gehele technische bestaan aan deze doelen voldoen. Wanneer niet voldaan wordt aan één van bovenstaande doelen moet de tunnel buiten-gebruik gesteld worden.

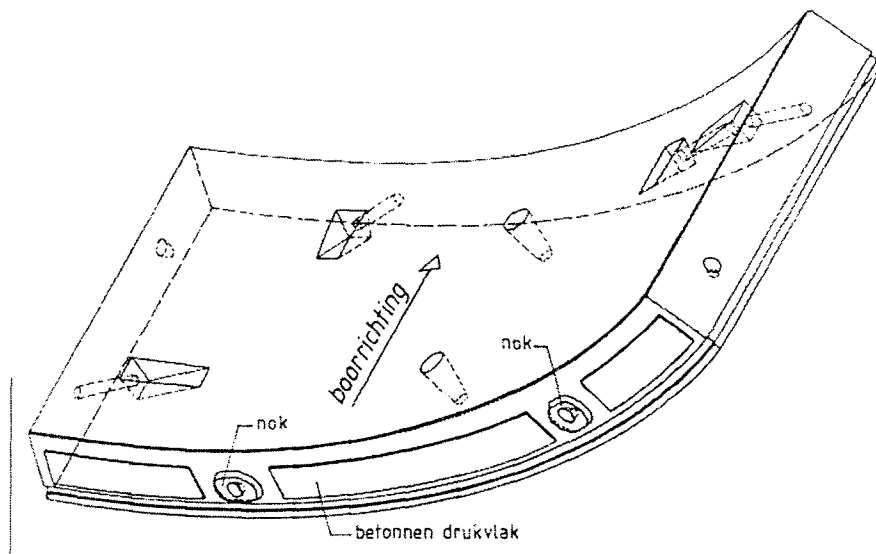
Een veilige doorgang betekent dat er zo min mogelijk risico is voor mensenlevens. Goed ontwerp, inspectie, onderhoud en exploitatie moeten de kans op falen klein houden. De tunnelwand is ontworpen met een kans op falen van 1×10^{-6} .

6.6.1 Aanlegfase

6.6.1.1 Werkwijze

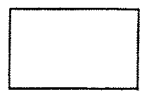

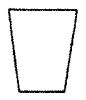
De tunnelling is opgebouwd uit ringen van geprefabriceerde betonnen segmenten met een breedte van 1,5 m. De segmenten van de tunnel hebben niet allemaal dezelfde geometrie. Er zijn 16 geometrisch verschillende segmenten gemaakt. Om de tunnel de gewenste alignement te geven is het noodzakelijk speciale ringen met een taps verloop te plaatsen. Door verschillende conische ringen achter elkaar te plaatsten kunnen bochten in het horizontale en verticale vlak gemaakt worden. Een combinatie maakt ruimtelijke krommingen mogelijk. Maximale kromming wordt bepaald door de tunnelboormachine en de gebruikerseisen van het type vervoermiddel. De lining wordt binnen de TBM opgebouwd. Een segment is een gebogen betonplaat. De buitenzijde van de plaat is glad afgewerkt. De segmenten worden geproduceerd in zeer hoogwaardige stalen mallen.

In de binnenzijde zijn inkassingen gemaakt voor boutverbindingen, alsmede sparingen om de erector in de boormachine op het segment te kunnen positioneren. In verband met de montageverbindingen, krachtoverdracht en waterafdichting tussen de segmenten, zijn deze in de kopse kanten van het segment voorzien van detailleringen. Onderstaande figuur 28 toont een tunnelsegment met de detailleringen. Twee naast elkaar liggende segmenten zijn een halve ring ten opzichte van elkaar verschoven. Om te zorgen dat de ringen elkaar onderling steunen, zijn ze in de ringvoeg voorzien van dwarskrachtverbindingen. Deze verbinding bestaat uit een betonnen nok aan het ene segment en een uitsparing in het andere (zie figuur 28)[12]. De boutverbindingen in langs- en omtrekrichting hebben alleen functie in de bouwfase.



Figuur 28 Detaillering van tunnelsegment [12]

De segmenten worden geplaatst in een ring. Elke ring bestaat uit zeven grote segmenten en een klein sluitsegment "wig" die met boutverbindingen wordt verbonden aan de naastgelegen ring. Over de zij en kopse vlakken langs de omtrek van elk segment bevindt zich het afdichtingrubber. Paragraaf 5.3.3.4.3 bladzijde 60 beschrijft de werking van dit rubber beschreven. De segmenten kunnen worden ingedeeld in drie typen, zie tabel 23.

segment			
vorm	rechthoekig	parallelogram	wig
aantal per ring	5	2	1
booglengte (m)	3,56	3,09 - 3,29	0,55 - 0,95
volume per segment (m ³)	1,87	1,68	0,40
massa per segment (kg)	4700	4200	1000

Tabel 23 Typen segmenten in een ring [12]

De alzijdige druk op de buitenzijde van de tunnelwand drukt segmenten en tussengelegen rubber afdichtingprofiel op elkaar.

6.6.2.2 Technische beschrijving

Er volgt nu een technische beschrijving van de segmenten geproduceerd voor de tweede Heinenoordtunnel. Achtereenvolgens wordt ingegaan op de samenstelling, betondekking, nabehandeling, wapening, boutverbindingen en het rubberprofiel. Afhankelijk van de keuze van materialen en maatvoering is een bepaald degradatieproces vast te stellen. Tevens is de snelheid waarmee het proces de initiatiefase en propagatiefase doorloopt te onderzoeken.

- Betonsamenstelling, druksterkte- en waterindringinggegevens [13]

cementmengsel	320 – 350 kg/m ³ 75% hoogovencement (CEM III/A 52,5) 25% portlandcement (CEM I 52,5) totaal slakgehalte van 43%
---------------	---

Het portlandcement verhardt heel snel en het hoogovencement heeft de voorkeur met betrekking tot duurzaamheid. De benodigde kwaliteit is sterktekwiteit B45, maar na 28 dagen uitharden is een feitelijke druksterkte van B65 ontstaan.

toeslag	rivierzand 0 – 4 mm riviergrind 0 – 32 mm
hulpstof	1,0 – 1,5% op cementmassa (kennelijk 1,2% Sikament 14)
water/cementfactor	< 0,45
waterindringing	vaak ongeveer 1 tot 2 mm, maar oplopend tot 10 - 15 mm
druksterkte	karacteristiek ongeveer 65 N/mm ²

- *Betondekking [13]*

De segmenten moeten volgens de samenstellingseisen van VBT voldoen aan milieuklasse 5^b. De volgende eisen gelden hierbij:

- maximale toelaatbare water/cementfactor voor gewapend beton: 0,50
- minimaal vereiste cementgehalte (kg/m³): 300
- er zijn geen eisen gesteld aan het luchtgehalte
- bij blootstellen aan sulfaat moet cement met hoge bestandheid tegen sulfaten worden gebruikt.

Het beton dat gebruikt is voldoet aan de gestelde eisen.

Volgens de conventionele eisen uit VBC art. 9.2 moet een minimale dekking van 25 mm gekozen worden. Dit wordt op de volgende manier vastgesteld:

- platen en wanden in milieuklasse 3 – 5 30 mm
 - niet nabewerkt oppervlak 0 mm
 - controleerbaar oppervlak (tijdens productie) 0 mm
 - kubusdruksterkte (f'_{ck}) groter dan 25 N/mm² 0 mm
 - hoog tolerantieniveau - 5 mm
-
- totaal 25 mm

Er is een keuze gedaan voor de volgende betondekking:

- binnen- en buitenzijde 35 mm
- kopvlakken 20 mm

De betondekking aan binnen- en buitenzijde van de segmenten is voldoende.

Volgens de conventionele bouwmethode is de dekking op de kopse kant van de segmenten 5 mm te weinig. De segmenten zijn na productie nog controleerbaar, waardoor nog eens 5 mm dekking in mindering gebracht mag worden.

- *Nabehandeling*

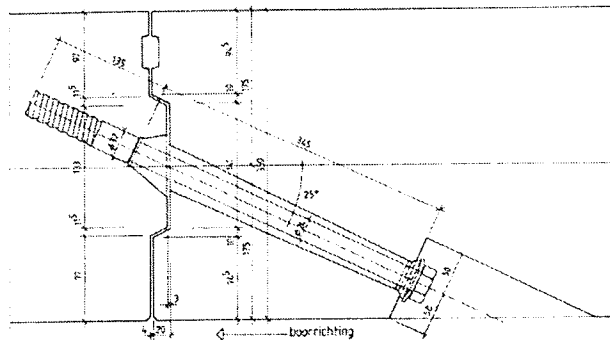
Na ontkisten is geen speciale nabehandeling vereist. De segmenten van bijvoorbeeld de Heinenoordtunnel zijn 2 dagen binnen opgeslagen en daarna buiten opgeslagen op een tasveld.

- *Wapening*

De segmenten zijn gewapend met volledig geprefabriceerde zachtstalen wapeningskooien, opgebouwd uit een orthogonaal boven- en ondernet Ø8 mm. In de randen zijn extra staven Ø10 mm en Ø12 mm aangebracht in verband met belasting in het vlak van de segmenten die buigende momenten kunnen veroorzaken. Om de slijtcrachten ten gevolge van de vieldruk en eventuele andere lokale belastingen op te kunnen nemen, is in de tandzones een groot aantal beugels Ø8 mm opgenomen. Het wapeningspercentage bedraagt ongeveer 100 kg/m³. De staalkwaliteit is FeB 500 HWL

- *Boutverbinding*

De boormachine zet zich met veertien vijzelsparen af tegen de tunnelwand. Om een segment te kunnen plaatsen, trekt de machine drie vijzelsparen terug. Daarbij wordt dus de druk van het achterliggende segment afgehaald. Om te zorgen dat het segment niet verplaatst en het rubberprofiel tussen de segmenten onderling verbonden blijft, worden de segmenten onderling verbonden. De segmenten in een ring, maar ook de ringen onderling, worden tijdelijk aan elkaar bevestigd met stalen bouten. Deze bouten worden vanuit een uitsparing in de binnenzijde van een segment in een kunststof schroefhuls in het aanliggende segment geschroefd. In figuur 29 is een boutverbinding gedetailleerd weergegeven.



Figuur 29 Boutverbinding tussen elementen [13]

- *Rubberprofiel:*

De betonnen segmenten worden voorzien van een afdichtingsprofiel. Er is gekozen voor EPDM-materiaal boven natuurrubber of neopreen, omdat EPDM goed bestand is tegen ozon, uitlaatgassen en water. Tevens is EPDM goed verwerkbaar. Het is slecht bestand tegen olie.

Dit profiel wordt geplaatst in een groef met een diepte van 8 mm en een breedte van 33 mm. Bij het plaatsen van de segmenten worden de rubberprofielen ingedrukt, waardoor de voegen tussen de segmenten waterdicht worden afgesloten. Het profiel is zó breed gemaakt, zodat bij kleine afwijking van plaatsing van de segmenten de rubberprofielen aansluiten op elkaar en er geen lekkage ontstaat. Treedt lekkage toch op na plaatsing van het segment, dan kan een tweede afdichtingsprofiel in de voeg worden aangebracht, zodat de lekkage gecontroleerd kan worden afgevoerd.

6.6.2 Gebruiksfase

In de gebruiksfase zullen de - in de aanlegfase beschreven - materialen degraderen door de degradatieprocessen. De degradatieprocessen worden geïnitieerd door de volgende externe en interne belastingen.

EXTERNE BELASTINGEN:

Drie externe belastingen spelen een rol:

1. neerwaartse gronddruk op de tunnel door aanwezige gronddekking
2. de neerwaartse druk van het eigen gewicht van de tunnelwand
3. de alzijdige waterdruk tegen de tunnelwand en de opwaartse waterdruk als gevolg van het hoogteverschil van de tunnelconstructie.

De neerwaartse belastingen worden opgevangen door de draagkrachtige ondergrond onder de constructie.

De kans dat één van deze belastingen gedurende het leven van de tunnel enigszins zal variëren is erg klein.

INTERNE BELASTINGEN:

Er werken aan de binnenzijde van de tunnel belastingen op de segmenten door verkeer in de tunnel (uitstoot uitlaatgassen, botsing), door krimp en uitzetting als gevolg van temperatuurschommelingen in de tunnel en door andere menselijke oorzaken.

Externe en interne belastingen kunnen zes verschillende mogelijke degradatieprocessen initiëren. Hiervoor kan men aangeven wat de zichtbare schade is en wat de kans is op dit schadeproces. De komende zes paragrafen behandelen deze verschillende processen. In paragraaf 6.6.3 volgt een begroting voor inspectie, onderhoud en buiten-gebruikstelling van de segmenten.

6.6.2.1 Vermoeiing

Dit degradatieproces bestaat uit twee fases, een initiatiefase en propagatiefase. In de initiatiefase worden de voorwaarden die noodzakelijk zijn voor het schadeproces vergaard. In de propagatiefase ontwikkelt het feitelijke schadeproces zich verder. Schadeontwikkeling in de propagatiefase verloopt veel sneller dan in de initiatiefase.

INITIATIEFASE:

De wisselende belasting door het verkeer in de tunnelbuis kan het degradatieproces initiëren. De schade kan alleen aan de binnenzijde van de tunnelwand worden waargenomen.

PROPAGATIEFASE:

Bij dit proces kan men via inspectie de volgende schades waarnemen in het beginstadium:

- diepe lange scheuren in de segmenten
- afgebrokkeld beton
- onderling afgeschoven segmenten
- ontstaan van lekkages

Schade neemt sneller toe omdat de bovengenoemde schade een nieuwe schadeproces initieert:

- bloot liggende wapening corrodeert, waardoor de sterkte van het segment wordt aangetast en vervolgens het beton afbrokkelt.

KANS OP SCHADE:

De mate waarin de schade toeneemt in een bepaalde periode bepaalt de maatgevendheid van dit degradatieproces. Als schade groot is, moet dit toegeschreven worden aan een fout in de ontwerpfase. Een afweging kan gemaakt worden tussen jaarlijks hoge onderhoudskosten. Het proces van degradatie verloopt langzamer, of er wordt een nieuwe tunnelling ontworpen aan de binnenzijde van de tunnel, die wel bestand is tegen het degradatieproces. Dit onderzoek beschrijft niet de fouten in de ontwerpfase en gaat niet verder in op bovengenoemde schade.

De kans dat dit hierboven beschreven proces zich zal openbaren is zeer klein omdat de belastingen constant en berekenbaar zijn, en omdat het kennisniveau van civiele ontwerpers bij ondergrondse werken groot is.

6.6.2.2 Degradatie als gevolg van krimp en uitzetting

INITIATIEFASE:

Door schommelingen van de temperatuur van de buitenlucht krimpen materialen en zetten materialen uit.

PROPAGATIEFASE:

Als het degradatieproces geïnitieerd is kan na inspectie de volgende schade waargenomen worden in het beginstadium:

1. oppervlakkige niet lange scheuren op het binnenvlak van de segmenten
2. oppervlakkig afgebrokkeld beton op het binnenvlak van de segmenten
3. op kopse- en zijvlakken van de segmenten ontstane scheuren en afgebrokkeld beton

In de propagatiefase is de volgende schade waar te nemen:

- grotere hoeveelheid afgebrokkeld beton en daardoor blootliggende wapening, dat gaat corroderen
- schade niet meer oppervlakkig maar dieper het segment ingewerkt

KANS OP SCHADE:

De segmentale tunnelwand die zich in de ondergrond bevindt is niet onderhevig aan grote temperatuur schommelingen, om de volgende redenen:

- Ruimte onder het maaiveld blijft relatief koel bij hogere temperaturen in de zomer en warm bij lagere temperaturen in de winter. Het gematigde klimaat, dat we kennen in Nederland is hierdoor in de tunnel nog gematigder. Bij in- en uitgang van de tunnel is de grootste temperatuurschommeling. Door overkappingen boven de in- en uitgang van de tunnel is het niet mogelijk dat direct zonlicht op de tunnelwand schijnt.
- De temperatuur van de ondergrond en het water rond de tunnelwand blijft het gehele jaar constant.
- Tussen de segmenten bevindt zich het rubber afsluitingsprofiel dat elastisch is. Dit vangt eventuele uitzetting en krimp van de segmenten op.
- Kennis van uitzetten en krimpen van de materialen staal, beton en rubber is groot.

De toename van de hoeveelheid zichtbare schade in een tijdsperiode, bepaalt de ernst van dit degradatieproces. Door de hiervoor genoemde punten is niet te verwachten dat door temperatuurschommelingen van de buitenlucht schade ontstaat aan de segmenten. Ontstaat wel schade in de gebruiksfase, dan moet dit toegeschreven worden aan een ontwerpfout.

6.6.2.3 Degradatie als gevolg van kruip en zetting

INITIATIEFASE:

Door de voortdurende belasting op de constructie en het materiaal treedt vervorming op. Het is mogelijk dat hierdoor materialen definitief vervormen, spanning herverdeeld wordt en dat voorspanning afneemt. Door zettingen van de achterliggende grond of het achterliggende grout schuiven segmenten af.

PROPAGATIEFASE:

De volgende schade is typisch voor dit degradatieproces:

- vervorming materiaal, vooral in het midden en de kopse kanten van de segmenten
- afname van spanningen alleen meetbaar met rekstrookjes bij zeer gedetailleerde inspectie
- segmenten schuiven onderling af met mogelijk serieeffect

Via inspectie kan men deze schade waarnemen.

KANS OP SCHADE:

Omdat het tijdsafhankelijke gedrag van de verschillende componenten van de segmenten zeer goed bekend is, is de kans zeer klein dat schade ontstaat aan het individuele segment. Door de stijve tunnelconstructie is de kans klein dat segmenten afschuiven door zettingen. Door het serieeffect in de segmenten (dwarsverbindingen) worden zettingen en bijbehorende herverdeling van belastingen door vele segmenten afgevoerd. Ernstige schade aan de segmenten moet toegeschreven worden aan een ontwerpfout.

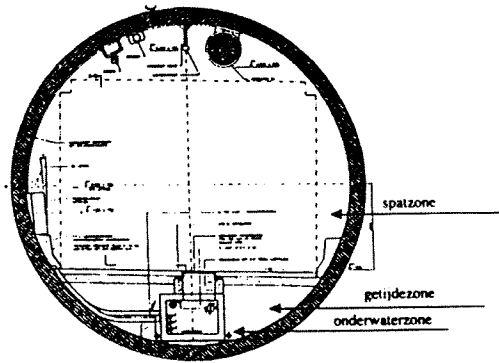
6.6.2.4 Degradatie als gevolg van corrosie

INITIATIEFASE:

Omdat beton niet helemaal dicht is kunnen chloride, zuurstof en waterdeeltjes erin trekken richting de wapening. Chloride, zuurstof, vocht en staal zijn de stoffen die corrosie veroorzaken. Chloride in het vocht als negatieve ionen en staal als positieve ionen initiëren het roestvormingsproces. Door de aanwezigheid van dooizouten die gebruikt worden bij gladheid in het verkeer worden twee delen van de tunnel blootgesteld aan chloride, namelijk:

- de binnenwand boven het rijdek, door opspattend water met dooizout (spatzone),
- de binnenwand onder het rijdek door doorgesijpeld lekwater met dooizout, onder te verdelen in de:
 - onderwaterzone, de zone is permanent nat,
 - getijdezone, zone wordt nat bij langsstromend lekwater.

Figuur 30 geeft de doorsnede van de geboorde tunnel, met delen van de tunnelwand waar chloride-indringing kan plaatsvinden.



Figuur 30 Doorsnede tunnelbuis met zones beïnvloedt door chloride-indringing [21]

In de voegen tussen de segmenten kunnen vocht, chloride en zuurstof terechtkomen en dit kan de wapening van het segment aantasten.

Het chloride-gehalte in materialen kan berekend worden met modellen van de wetten van Fick. De diffusie van chloride wordt als functie van tijd (t) en diepte (x) gegeven door [21]:

$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}} \cdot t} \right) \right), \text{ met}$$

- C_x = chloride-gehalte op plaats x na tijd t [-]
- C_s = chloride-gehalte in de buitenste laag [-]
- erf = error functie
- D_{cl} = diffusiecoëfficiënt [m^2/s]

Met de ervaring van betonconstructies in zeeklimaten zijn percentages van chloride-indringing te genereren [21]: Voor C_s worden waarden gevonden van 3 á 4%. Het kritische gehalte dat corrosie initieert (C_{cr}) ligt tussen 0,4% en 1,0%. Beton dat is gecarbonateerd, is nog slechter bestand tegen chloride-indringing door afname van de dichtheid van het beton. De diffusiecoëfficiënt (D_{cl}) wordt gesteld op $1,5 \cdot 10^{-12}$ [21]. Uit de voorgaande betrekking kan een eenvoudige formule afgeleid worden:

$$t_i = L^2 / (A \cdot D_{cl}), \text{ met}$$

- t_i = tijd tot initiatie [s]
- L = betondekking [m]
- A = constante die afhangt van C_s en C_{cr} . Als $C_s = 4\%$ en $C_{cr} = 1\%$ dan is $A = 2,65$; met $C_s = 3\%$ en $C_{cr} = 1\%$ is $A = 1,8$ [-]
- D_{cl} = diffusiecoëfficiënt van chloride indringing in beton [m^2/s]

Met dekking L van segmenten respectievelijk 35 mm, 20 mm en 15 mm kan met de hierboven beschreven formule een gemiddelde tijd (t_i) berekend worden tot corrosie. D_{cl} is de diffusiecoëfficiënt van chloride indringing in beton en A is de hierboven beschreven constante.

D_{Cl} [m^2/s]	A	L [mm]	t_i [jaar]
$1,5 \cdot 10^{-12}$	2,65	35	9,8
		20	3,2
		15	1,8
	1,8	35	14,4
		20	4,7
		15	2,6

Tabel 24 Gemiddelde tijd tot corrosie voor onderwater-, getijde- en spatzone [21]

Een verdubbeling van de diffusiecoëfficiënt verlengt de levensduur niet drastisch. De, in tabel 24 berekende tijd, is de tijd van corrosie in de initiatiefase. Vervolgens breekt de propagatiefase aan.

PROPAGATIEFASE:

Door de korte nabehandeling van het beton kunnen de verschillende stoffen wellicht sneller naar binnen treden. Op de kopse kanten van de segmenten is de dekking van het beton 5 mm te weinig. De dekking beschermt de segment tegen corrosie. Als de verschillende stoffen de wapening hebben bereikt ontstaat corrosie. De verroeste wapening heeft een groter volume dan de oorspronkelijke wapening. Er ontstaat een drukkracht op het beton en als er voldoende spanning is opgebouwd brokkelt beton af. Er komt meer wapening vrij te liggen dat vervolgens ook corrodeert.

De schade die waargenomen kan worden:

- het beton is afgebrokkeld vooral op plekken waar dekking minimaal is
- het beton heeft een bruine vochtige roestkleur

KANS OP SCHADE:

Op de kopse kanten van de segmenten is de dekking aan de lage kant. In paragraaf 6.6.2.2 bladzijde 81 is beschreven waarom de dekking te weinig is. Het aantastingproces door corrosie kan de duurzaamheid ernstig in negatieve zin beïnvloeden.

De kans dat dit degradatieproces optreedt, is aanwezig. Door juiste keuze van de materialen en in achtname van dekking en normen, verloopt het proces langzaam maar gestaag. Door tijdig inspecteren en onderhouden is de faalkans van de segmenten klein te houden.

6.6.2.5 Degradatie als gevolg van carbonatatie

INITIATIEFASE:

Door diffusie van aanwezige CO_2 in de tunnel, afkomstig van uitlaatgassen van het verkeer, daalt de PH-waarde in de gecarbonateerde zone van het beton. Een verlaging van de PH-waarde passivert het beton en daarmee de bescherming van wapeningsstaal.

PROPAGATIEFASE:

Door carbonatatie verminderd de dichtheid van het beton. Chloride, water en vocht kunnen gemakkelijker binnentreden, waardoor uiteindelijk de wapening gaat corroderen. Hetzelfde degradatieproces volgt als bij corrosie. Uit experimenteel onderzoek van TNO-bouw [21] blijkt dat de water/cement-factor en de relatieve vochtigheid bepalende factoren zijn bij aantasting van beton door het aantastingmechanisme carbonatatie. In tabel 25 is het resultaat van het onderzoek gegeven. Uit het onderzoek is de volgende betrekking afgeleid:

$$C_x \text{ [mm]} = A \cdot \sqrt{t \text{ [jaar]}} \text{ , met}$$

C_x = carbonatatie diepte [mm]
 A = carbonatatiecoëfficiënt [mm/√jaar]
 t = tijdsduur in jaren [jaar]

Met de carbonatatiecoëfficiënt A verkregen uit de metingen is een gemiddelde levensduur berekend. De levensduur hangt sterk af van relatieve vochtigheid in de tunnel en de water/cement-factor. Gedurende de gebruiksfase is het mogelijk dat de relatieve vochtigheid verandert. De water/cement-factor wordt echter vastgelegd tijdens productie van de segmenten.

relatieve vochtigheid	water/cement-factor =0,45	water/cement-factor =0,55	water/cement-factor =0,65
50 %	6 / 10	3 / 5	2 / 4
65 %	18 / 33	4 / 8	3 / 5
80 %	186 / 330	5 / 10	4 / 7

Tabel 25 Gemiddelde levensduren (jaar) berekend met de carbonatatiecoëfficiënt A voor betondekkingen van 15 mm respectievelijk 20 mm [21].

De waargenomen schade is overeenkomstig het degradatieproces corrosie, namelijk:

- afbrokkelend beton op plekken waar dekking minimaal is
- het beton heeft een bruine roestkleur door roestvorming van de wapening

KANS OP SCHADE:

De maximale toegestane water/cement-factor is 0,50 volgens bovenstaande berekeningen. In werkelijkheid is een factor van 0,43 gehanteerd voor het beton van de segmenten. Daarnaast ligt de relatieve vochtigheid in de tunnel gemiddeld over het jaar gezien enigszins hoger dan 80 %. Er kan aangenomen worden dat de vereiste gemiddelde levensduur van 100 jaar gehaald wordt, als de relatieve vochtigheid gehandhaafd blijft. Door de grote marge zal het gemiddelde CO₂ gehalte in de tunnel te laag zijn om het proces van carbonatatie te initiëren.

6.6.2.6 Veroudering

INITIATIEFASE:

De materialen beton en staal verouderen gedurende de levensduur door verwerking. Rond elk segment loopt een rubber afsluitvoeg. Dit materiaal is speciaal ontworpen voor de aanleg van de geboorde tweede Heinenoord-tunnel. Over het verouderingsgedrag van dit rubber is weinig bekend. Er kunnen moeilijk uitspraken gedaan worden over de levensduur. Het enige dat bekend is, is dat rubber na een bepaalde levensduur relaxeert en daardoor veroudert.

PROPAGATIEFASE:

Het staal van de wapening veroudert niet zichtbaar. Door veroudering brokkelt beton en oppervlakkig pleisterwerk af.

Schade aan het afdichtingrubber is op de volgende manier waar te nemen:

- lokale vervorming van het rubber
- ontstaan van lekkages tussen de segmenten door niet goede aansluiting van het afdichtingrubber. Controle van de meters van de waterhuishouding in de tunnel geven een indicatie van lekkage door toename van wegpompen van water.

KANS OP SCHADE:

De kans is klein dat het beton of de wapening van de segmenten binnen de levensduur van 100 jaar in die mate verouderd is, dat overgegaan moet worden op vervanging van de segmenten. Deze kans is klein, omdat het verouderingsgedrag van deze twee componenten bekend is. Door inspectie en onderhoud is de faalkans van de segmenten door dit degradatieproces uitermate klein. Het is bekend dat gewapend beton een langere levensduur heeft dan 100 jaar.

Er is een aannemelijke kans dat het rubber relaxeert of verweert binnen de levensduur van de tunnel. Voldoet het rubber afdichtingsprofiel in zijn geheel niet en moet daarom een nieuw afdichtingsprofiel voor het oude worden geplaatst in de gehele tunnel, dan moet dit toegeschreven worden aan een ontwerpfout. De tunnelbuis moet voor langere periode buiten gebruik gesteld worden voor alle verkeer.

6.6.3 Faalkans en faalkosten

De segmenten in de tunnelwand zijn ontworpen met een faalkans van 1×10^{-6} per jaar. Dit is een kans waarbij een tunnelsegment één keer faalt in 1 miljoen jaar.

De aanlegkosten zullen oneindig groot zijn, als een oneindig kleine kans geëist wordt door de opdrachtgever. Er wordt daarom een zeker risico getolereerd. Oftewel, er is een zekere kans dat de component geheel of gedeeltelijk faalt en dat daardoor de constructie voor kortere of langere tijd zijn functie niet vervult. Kwantificering van het risico is te verkrijgen door de faalkans te vermenigvuldigen met de gevolgschade. In formule vorm:

$$\begin{aligned} \text{Gekwantificeerd risico} &= P_f \times \text{faalkosten, met} \\ P_f &= \text{de faalkans per jaar (0 - 1)} \end{aligned}$$

Bij de gegeven faalkans van 1×10^{-6} per jaar en een schade na falen van de segmenten van fl 1.000.000,- bedraagt het risico uitgedrukt in kosten fl 1,-.

De faalkans wordt uiteraard beïnvloed door inspectie- en onderhoudswerkzaamheden. De inspectie- en onderhoudswerkzaamheden zorgen ervoor, dat de kans op falen van de tunnelwand constant 1×10^{-6} per jaar is. Met de opstelling van de werkzaamheden in paragraaf 6.6.4 bladzijde 87 is deze veronderstelling aangenomen.

De kosten bij falen van de constructie zijn zeer hoog. De faalkosten worden bepaald door:

- buitengebruikstelling tunnel voor enige tijd,
- inspectie, reparatie en vervanging van segmenten,
- aantal slachtoffers tijdens falen constructie,
- verlies prestige Nederlandse bouwsector door slechte berichten nationaal en internationaal.

Afhankelijk van het tijdstip van falen, de hoedanigheid en de hoeveelheid schade kunnen de faalkosten aanzienlijk fluctueren.

De kosten per strekkende meter tunnelbuis zijn 34 kfl, tabel 21 op bladzijde 69. De gehele tunnelbuis (2 x 945 m) kost in dit geval 64.260 kfl. De helft van dit bedrag is uitgegeven aan het boren van de tunnelbuis (= 32.130 kfl). Als 10 % van de segmenten volledig faalt, dan zijn de kosten van vervanging 10 % van de helft van de totale kosten van de tunnel (= 3.213 kfl). Waarschijnlijk zullen de kosten hoger zijn, omdat de vervangskosten groter zijn dan de aanlegkosten. Daarbovenop komen de kosten van buitengebruikstelling á 3 maanden. De kosten van buitengebruikstelling zijn per dag 34 kfl, zie paragraaf 6.5 op bladzijde 77. Er wordt een factor 2 in rekening gebracht voor eventuele ontstane ramp en verlies aan prestige. De totale kosten van het falen van 10 % van de segmenten is in tabel 26 samengevat.

kostensoort	kosten (kfl)
reparatie en vervanging	3.213
buitengebruikstelling	3.060 +
subtotaal	6.273
overige faalkosten (verlies prestige, ontstane ramp) x 2	12.546 +
totaal	18.819

Tabel 26 Faalkosten bij falen van 10 % van de tunnelconstructie

Met een faalkans van 1×10^{-6} per jaar en de faalkosten van 19 miljoen gulden, is het gekwantificeerde risico ongeveer fl 19,-. Door de faalkans uiterst klein te houden, zal het gekwantificeerde risico, als verhouding met de inspectie- en onderhoudskosten, een klein aandeel hebben. Zolang de kosten van falen niet een factor 1000 hoger zijn bij deze faalkans of andersom, wordt het gekwantificeerde risico verder niet in rekening gebracht. In Nederland hebben we nog nooit zulke faalkosten meegemaakt, dus de veronderstelling nemen we aan.

6.6.4 Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden

6.6.4.1 Inleiding

Men kan scenario's opstellen waarbij de inspectie- en onderhoudswerkzaamheden variëren met het al dan niet doorgaan van renovatiewerkzaamheden. Periodieke werkzaamheden zijn groter bij toenemende degradatie van componenten. Het aantal renovatiebeurten varieert per scenario.

In deze paragraaf behandelen we vier scenario's:

1. geen renovatie
2. om de 10 jaar renovatie
3. om de 20 jaar renovatie
4. om de 30 jaar renovatie

Tijdens een renovatie worden grote inspectie- en onderhoudswerkzaamheden gedaan waarbij de tunnelbuis voor langere tijd buiten-gebruik wordt gesteld. Er wordt aangenomen dat na de werkzaamheden de situatie zo-goed-als-nieuw is. Vervolgens maken we alle kosten contant met de netto contante waarde-methode en bekijken we welk scenario het goedkoopst is.

Tijdens inspectie- en onderhoudswerk aan een segment wordt schade - ontstaan door de zes verschillende degradatieprocessen - respectievelijk gecontroleerd en gerepareerd. De schade openbaart zich op het segment. Van de zes verschillende degradatieprocessen zijn er twee processen cruciaal. Dit zijn:

- corrosie van de wapening door chlorideindringing
- veroudering van het rubber afdichtingprofiel door relaxatie

6.6.4.2 Aannames opstellen begroting inspectie- en onderhoudswerkzaamheden

De degradatie van de component segmenten neemt toe gedurende de levensduur tot renovatie gedaan is. Voor vier verschillende scenario's is deze degradatiesnelheid met bijbehorende kosten voor inspectie en onderhoud hetzelfde.

De loonkosten vormen de basis van de berekening van exploitatie, inspectie- en onderhoudskosten. Er wordt onderscheid gemaakt in niet geschoolde en geschoolde arbeid en in dag- en nachttarief. Een extra bedrag is per uur meegerekend voor projectmanagement, mobilisatie, verzekering en voorfinanciering. Het arbeidsloon voor een ongeschoolde en geschoolde werknemer verschilt een factor 1.5. Het arbeidsloon voor nachtarbeid en dagarbeid verschilt ook een factor 1.5.

soort loon	loonkosten per uur
ongeschoold dagtarief	fl 90,-
geschoold dagtarief	fl 135,-
ongeschoold nachttarief	fl 135,-
geschoold nachttarief	fl 200,-

Tabel 27 Het arbeidsloon voor nachtarbeid en dagarbeid voor geschoold en ongeschoold personeel [2]

Het reinigen en dagelijks onderhoud aan de tunnel doet ongeschoold personeel. Inspecties en onderhoud aan componenten doet geschoold personeel.

De renovatie is voor een deel inspectie- en onderhoudswerk. Voor een ander deel vindt renovatie plaats vanwege functionele veranderingen, die moeten plaatsvinden. Dit laatste deel blijft buiten beschouwing in dit onderzoek. Er wordt geen rekening gehouden met de functionele kosten van de tunnel, maar alleen met de kosten van de civiel-technische constructie.

Na renovatie is de toestand van de constructie zo-goed-als-nieuw en kan het degradatieproces opnieuw beginnen.

De aanlegkosten van de tunnelbuis vormen de basis van de totale renovatiekosten. Volgens tabel 21 op bladzijde 69 zijn de aanlegkosten van een meter tunnelbuis met een diameter van 8 m 34 kfl. Afhankelijk van het scenario neemt we een percentage van deze aanlegkosten voor renovatie. De kosten die op deze manier berekend worden, komen redelijk overeen met bedragen die Rijkswaterstaat in het verleden aan renovatiewerkzaamheden heeft uitgegeven. Van belang is het verschil in de hoogte van de percentages tussen verschillende scenario's. Elke renovatie heeft zijn vaste aanloopkosten. Het is hierdoor minder voordelig vaak te renoveren. Te weinig renoveren heeft als nadeel dat de verschillende degradatieprocessen in de propagatiefase belanden, waardoor schade aan de componenten sneller toeneemt. De onderhoudskosten zullen toenemen.

2/5 deel van de renovatiekosten is voor inspectiewerkzaamheden en 3/5 deel voor onderhoudswerkzaamheden. Voor inspectie- en onderhoudskosten aan civiel-technische constructies uitgegeven door Rijkswaterstaat, geldt ongeveer dezelfde verhouding. Het is een zeer ruwe schatting.

Als na het twintigste levensjaar geen renovatie gedaan is wordt een extra onzekerheidsfactor van de toestand van de tunnel in rekening gebracht. Tot renovatie neemt de factor jaarlijks 2,5 % toe.

Afhankelijk van het gekozen scenario komen er meer of minder dagen buiten gebruik van de tunnel voor.

6.6.4.3 Scenario 1: Geen renovatie

AANNAME GEDRAG TUNNELWAND EN SEGMENTEN:

Er wordt in dit scenario geen renovatiewerk verricht. Gedurende de levensduur van de tunnel degradeert de tunnel. De kosten van inspectie en onderhoud zullen exponentieel toenemen naarmate de levensduur toeneemt.

Het gedrag van de tunnelwandsegmenten is vast te stellen door meting van de hoeveelheid schade na een bepaalde tijdsperiode. Per periode, van vijf jaar, neemt schade toe door degradatie. In tabel 28 staat de hoeveelheid schade, in de eerste en in de laatste periode van de levensduur van de tunnel ontstaan bij dit scenario. Voor de tussenliggende periode is de schadeontwikkeling lineair.

periode	schade
0 – 5	50 segmenten (0,5 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 10 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
95 – 100	1000 segmenten (10 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 200 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage

Tabel 28 Zichtbare schade in vijf jaar in scenario 1

INSPECTIEWERKZAAMHEDEN:

Dit is de eerste geboorde tunnel in Nederland is. Over het gedrag van de tunnelwand is dus nog niets bekend. Vanaf het eerste levensjaar van de tunnel moet men inspecteren. De inspectie- en onderhoudsstrategie is toestandsafhankelijk.

- Wekelijks rijdt de opzichter door de tunnel. Hij inspecteert globaal de hierboven beschreven schade aan de segmenten. De berekening van deze kosten wordt gedaan in paragraaf 6.4 "exploitatiekosten". Segmenten die zichtbaar schade vertonen worden direct onderhouden in de nachtelijke uren.
- Gelijkmatic over de eerste vijf jaar verspreid moet 1 % van alle segmenten gedetailleerd geïnspecteerd worden. Dit zijn 20 segmenten per jaar. De tunnelringen en de segmenten in de ringen zijn genummerd en kunnen random door een computer uitgekozen worden. Per nacht kan een geschoolde werknemer gemiddeld 2 segmenten zeer gedetailleerd inspecteren op alle mogelijke degradatieprocessen. Het segment wordt dan visueel geïnspecteerd op alle zichtbaar zijnde vlakken. In verband met toename van degradatie moet het aantal inspecties toenemen. Tabel 29 geeft een voorbeeld van het aantal inspecties aan de segmenten in de eerste en laatste periode van de levensduur van de tunnel. Voor tussenliggende perioden nemen het aantal inspecties lineair toe.

jaren	inspectie
0 – 5	20 segmenten per jaar
95 – 100	400 segmenten per jaar

Tabel 29 Aantal inspecties in de eerste en laatste periode

- Controle van de meters van de waterhuishouding in de tunnel geeft een indicatie van lekkage door toename van wegpompen van water. Als er duidelijk lekkage is moet gedetailleerd geïnspecteerd worden.

In een logboek moet bijgehouden worden welke segmenten gedetailleerd geïnspecteerd zijn. Welk debiet dagelijks wordt verpompt uit de tunnel en welk debiet aan regen- of spoelwater de tunnel is ingestroomd. In een logboek moeten de meterstanden bijgehouden worden. Gedurende de levensduur van de tunnel wordt een beschrijving van de situatie en een uitleg van de werkzaamheden opgesteld.

De kosten van dit administratiewerk wordt toegeschreven aan de post exploitatiekosten. In paragraaf 6.4 zijn de exploitatiekosten berekend.

ONDERHOUDSWERKZAAMHEDEN:

De opzichter kan na goedkeuring door zijn directie een aannemer de schade laten herstellen. De tunnel wordt niet afgesloten, maar wordt in de nachtelijke uren gerepareerd. Buitengebruikstelling van de tunnel wordt zo voorkomen.

De reparatiewerkzaamheden bestaan meestal uit eenvoudig pleisterwerk, klein onderhoud. Op de plekken waar wapening zichtbaar is of lekkage is ontstaan, moet groot onderhoud gedaan worden. Één geschoolde werknemer kan gedurende 1 nacht aan 2 segmenten klein onderhoud verrichten. Twee geschoolde werknemers kunnen gedurende 1 nacht aan 1 segment groot onderhoud verrichten.

Wekelijks verricht één ongeschoolde werknemer gedurende nachtelijke uren onderhoud en reinigingswerk. Hij is daar 8 uur mee bezig.

KOSTEN TOTALE LEVENSDUUR:

De kosten voor materieel en materiaal worden als factor boven op de loonkosten meegerekend. Voor reinigen, onderhoud en klein onderhoud is de vermenigvuldigingsfactor 1,5 en voor groot onderhoud is de factor 2.

soort werkzaamheid	kosten per jaar (kfl)
wekelijks onderhoud en reinigen	$1 \times 135 \times 8(\text{uur}) \times 52(\text{dgn}) \times 1.5 = 82$
inspectie	$1 \times 200 \times 8 \times 10 (\text{segmenten}) \times 1.5 = 24$
klein onderhoud	$1 \times 200 \times 8 \times \frac{1}{2} \times 10 (\text{segmenten}) \times 1.5 = 12$
groot onderhoud	$2 \times 200 \times 8 \times 2 (\text{segmenten}) \times 2 = 13 +$
totaal	$= 131$

Tabel 30

Berekening inspectie- en onderhoudskosten eerste periode scenario 1

De kans op buitengebruikstelling neemt natuurlijk toe. Jaarlijks wordt de tunnel 1 dag buiten gebruik gesteld. Per tien jaar wordt er aangenomen dat er een dag aan buitengebruikstelling bijkomt.

jaren		kosten per jaar (kfl)
0 – 5	inspectie	24
	onderhoud	107
	buiten-gebruikstelling	34+
	totaal	165
95 – 100	inspectie	480
	onderhoud	582
	buiten-gebruikstelling	374+
	totaal	1.436

Tabel 31 Berekening eerste en laatste periode inspectie en onderhoud scenario 1

6.6.4.4 Scenario 2: Renovatie om de 10 jaar

AANNAME GEDRAG TUNNELWAND EN SEGMENTEN:

Er wordt in dit scenario elke 10 jaar gerenoveerd. De eerste 10 jaar van de levensduur van de tunnel komen overeen met scenario 1. Daarna wordt renovatie gedaan. Na renovatie wordt aangenomen dat de tunnelwand gaat degraderen vanaf de nieuwtoestand.

periode	schade
1. 0 – 5 jaar	50 segmenten (0,5% van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 10 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
2. 5 – 10 jaar	100 segmenten (1 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 20 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
3. renovatie	
4. 10 – 15 jaar	herhaling eerste cyclus

Tabel 32 Zichtbare schade per vijf jaar in scenario 2

INSPECTIEWERKZAAMHEDEN:

Dit zijn dezelfde werkzaamheden als beschreven in scenario 1. Na 10 jaar volgt er renovatie en is de situatie weer zo-goed-als-nieuw. Het aantal segmenten per inspectie staat in tabel 33.

jaren	inspectie
0 – 5	20 segmenten per jaar
5 – 10	40 segmenten per jaar
renovatie	
10 – 15	herhalen eerste cyclus

Tabel 33 Aantal te inspecteren segmenten per periode

ONDERHOUDSWERKZAAMHEDEN:

Dit zijn dezelfde werkzaamheden als beschreven in scenario 1. Na 10 jaar vindt renovatie plaats. De kosten hiervan behandelen we nu.

KOSTEN RENOVATIE:

Zoals eerder opgemerkt, rekenen we bij de renovatie alleen de inspectie en het onderhoud mee en niet de werkzaamheden ten behoeve van functionele veranderingen.

Gedurende de renovatie worden de segmenten geïnspecteerd. Elk segment dat schade vertoont wordt onderhouden. De tunnelwand wordt volledig gereinigd en krijgt eventueel een nieuwe brandwerende bekleding. Zoals blijkt uit de kosten voor inspectie en onderhoud in tabel 35, gaan we uit van een nieuwtoestand na renovatie.

De tunnelbuis wordt 20 werkdagen buiten-gebruik gesteld. De kosten van de renovatie zelf wordt geraamd op 7% van de aanlegkosten van de tunnelbuis. De aanlegkosten per strekkende meter tunnelbuis zijn 34 kfl (zie tabel 21 bladzijde 69). De inspectiekosten bedragen 2/5 deel van de totale kosten van renovatie, de onderhoudskosten 3/5 deel. De tunnel wordt negen keer gerenoveerd tijdens de levensduur.

soort renovatiewerkzaamheden	kosten per renovatie(kfl)	
inspectie	$2/5 \times 0.07 \times 34 \times 945 \times 2$	= 1.799
onderhoud	$3/5 \times 0.07 \times 34 \times 945 \times 2$	= 2.699
buiten-gebruikstelling	20×34	= 680 +
totaal		= 5.178

Tabel 34 Berekening inspectie- en onderhoudskosten renovatie elke 10 jaar

KOSTEN TOTALE LEVENSDUUR:

jaren	kosten per jaar (kfl)	
0 – 5	inspectie	24
	onderhoud	107+
	totaal	131
5 – 10	inspectie	48
	onderhoud	132+
	totaal	180
renovatie (elke 10 jaar)		5.178
10 – 15	inspectie	24
	onderhoud	107+
	totaal	131
Enzovoort		180

Tabel 35 Berekening totale inspectie- en onderhoudskosten per jaar, scenario 2

6.6.4.5 Scenario 3: Renovatie om de 20 jaar

AANNAME GEDRAG TUNNELWAND EN SEGMENTEN:

De tunnel wordt gemiddeld elke twintig jaar gerenoveerd. De cyclus herhaalt zich 5 keer tot dat een levensduur van 100 jaar is bereikt.

periode	schade
1. 0 – 5 jaar	50 segmenten (0,5% van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 10 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
2. 5 – 10 jaar	100 segmenten (1 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 20 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
3. 10 – 15 jaar	150 segmenten (1,5 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 30 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
4. 15 – 20 jaar	200 segmenten (2 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 40 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
5. renovatie	
6. 20 – 25	herhaling eerste cyclus

Tabel 36 Zichtbare schade per vijf jaar in scenario 3

INSPECTIEWERKZAAMHEDEN:

Dit zijn dezelfde werkzaamheden als beschreven in scenario 1. De cyclus herhaalt zich nu na 20 jaar.

jaren	inspectie
0 – 5	20 segmenten per jaar
5 – 10	40 segmenten per jaar
10 – 15	60 segmenten per jaar
15 – 20	80 segmenten per jaar
renovatie	
20 – 25	herhaling eerste cyclus

Tabel 37 Aantal te inspecteren segmenten per periode

ONDERHOUDSWERKZAAMHEDEN:

Dit zijn dezelfde werkzaamheden als beschreven in scenario 1. Na 20 jaar herhaald de cyclus zich weer.

KOSTEN RENOVATIE:

De tunnelbuis wordt 30 werkdagen buiten-gebruik gesteld. De kosten van de renovatie zelf wordt geraamd op 10% van de aanlegkosten van de tunnelbuis. De inspectiekosten bedragen 2/5 deel van de totale kosten van renovatie, de onderhoudskosten 3/5 deel. De tunnel wordt vier keer gerenoveerd tijdens de levensduur.

soort renovatiewerkzaamheden	kosten per renovatie (kfl)	
inspectie	$2/5 \times 0.10 \times 34 \times 945 \times 2$	= 2.570
onderhoud	$3/5 \times 0.10 \times 34 \times 945 \times 2$	= 3.856
buiten-gebruikstelling	30×34	= 1.020 +
totaal		= 7.446

Tabel 38 Berekening inspectie- en onderhoudskosten renovatie elke 20 jaar

KOSTEN TOTALE LEVENSDUUR:

jaren	kosten per jaar (kfl)	
0 – 5	inspectie	24
	onderhoud	107+
	totaal	131
5 – 10	inspectie	48
	onderhoud	132+
	totaal	180
10 – 15		229
15 – 20		278
renovatie		7.446
20 – 25		131
25 – 30		180
Enzovoort		229

Tabel 39 Berekening totale inspectie- en onderhoudskosten per jaar, scenario 3

In bijlage 4 en 5 zijn respectievelijk voor de berekening van de kosten van de periodieke beheerwerkzaamheden en de renovatiewerkzaamheden uitwerkingen gegeven. De uitwerkingen zijn gegeven in een tabel en grafisch.

6.6.4.6 Scenario 4: Renovatie om de 30 jaar

AANNAME GEDRAG TUNNELWAND EN SEGMENTEN:

De tunnel wordt gemiddeld elke dertig jaar gerenoveerd. De cyclus herhaalt zich 3 keer tot dat een levensduur van 100 jaar is bereikt. In het 90^{ste} levensjaar van de tunnel wordt een renovatie gedaan overeenkomend met renoveren om de tien jaar. Ontwikkeling van de hoeveelheid schade in de eerste 20 levensjaren van de tunnel komt overeen met de eerste 20 levensjaren van scenario 2.

periode	schade
1. 0 – 5 jaar	50 segmenten (0,5% van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 10 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
6. 25 – 30 jaar	300 segmenten (3 % van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 60 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
7. renovatie	
8. 30 – 35 jaar	50 segmenten (0,5% van totaal aantal segmenten) vertonen scheuren en afgebrokkeld beton 10 segmenten hebben blootliggende wapening of een lekkage
9. 35 – 40 jaar	herhaling eerste cyclus

Tabel 40 Zichtbare schade per vijf jaar in scenario 4

INSPECTIEWERKZAAMHEDEN:

Dit zijn dezelfde werkzaamheden als beschreven in scenario 1.

jaren	inspectie
0 – 5	20 segmenten per jaar
25 - 30	120 segmenten per jaar
renovatie	
30 - 35	herhalen eerste cyclus

Tabel 41 Aantal te inspecteren segmenten per periode

ONDERHOUDSWERKZAAMHEDEN:

Dit zijn dezelfde werkzaamheden als beschreven in scenario 1.

KOSTEN RENOVATIE:

De tunnelbuis wordt 40 werkdagen buiten-gebruik gesteld. De kosten van de renovatie zelf wordt geraamd op 14% van de aanlegkosten van de tunnelbuis. De inspectiekosten bedragen 2/5 deel van de totale kosten van renovatie, de onderhoudskosten 3/5 deel. De tunnel wordt vier keer gerenoveerd tijdens de levensduur.

wat	kosten (kfl)
renovatie inspectie	$2/5 \times 0.16 \times 34 \times 945 \times 2 = 4.113$
renovatie onderhoud	$3/5 \times 0.16 \times 34 \times 945 \times 2 = 6.169$
buiten-gebruikstelling	$40 \times 34 = 1.360 +$
totaal	$= 11.642$

Tabel 42 Berekening inspectie- en onderhoudskosten renovatie elke 30 jaar

KOSTEN TOTALE LEVENSDUUR:

jaren		kosten per jaar (kfl)
0 – 5	inspectie	24
	onderhoud	107+
	totaal	131
5 – 10	inspectie	48
	onderhoud	132+
	totaal	180
10 – 15		229
15 – 20		278
20 – 25		327
25 – 30		376
renovatie		10.999
30 – 35		herhaling cyclus

Tabel 43 Berekening totale inspectie- en onderhoudskosten per periode scenario 4

6.6.4.7 Optimalisatie kosten werkzaamheden segmenten

Onderstaande tabel 44 geeft de kosten van inspectie, onderhoud en buiten-gebruikstelling aan voor de vier scenario's. De kosten van de renovatiewerkzaamheden zijn verrekend naar de verschillende kostenposten van inspectie, onderhoud en buitengebruikstelling. In Ms-Excell zijn deze jaarlijkse kosten met de netto contante waarde methode teruggerekend en gesommeerd naar het jaar van aanleg van de tunnel.

De volgende vergelijking is gebruikt voor de berekening van de netto contante waarde:

$$K_c = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{K_t}{(1+i)^t}$$

In paragraaf 3.3.1 op bladzijde 15 is de theorie van de netto contante waarde-methode beschreven. Wij hebben een rentepercentage van $i = 5\%$ gehanteerd in deze berekeningen (Bron CBS).

De vier scenario's kunnen we nu met elkaar vergelijken..

	scenario 1 (kfl)	scenario 2 (kfl)	scenario 3 (kfl)	scenario 4 (kfl)
inspectie	3.168	3.511	2.571	2.916
onderhoud	5.221	6.580	5.004	5.399
buitengebruikstelling	2.739	1.918	1.754	1.929
Totaal (contante waarde)	11.128	12.009	9.330	10.243

Tabel 44 Kosten van inspectie, onderhoud, renovatie en buitengebruikstelling volgens vier verschillende scenario's aan de segmenten, teruggerekend naar jaar van aanleg van de geboorde tunnel.

Een beter interval van renoveren is op dit moment niet te geven. De verschillende aannames en onbekendheid zijn er de oorzaak van dat er sprake is van een onnauwkeurige begroting. Als het degradatieproces beter voorspelbaar is en de invoergegevens nauwkeuriger zijn, dan is het raadzaam een studie te doen naar een mogelijk beter interval van renoveren.

Voor de overige componenten wordt niet wederom een dusdanig uitgebreide analyse opgezet, van verschillende kosten gedurende de technische levensduur van de tunnel. We nemen aan dat de kosten voor de overige componenten minimaal zijn als hetzelfde scenario gekozen wordt.

6.7 Grout

Deze paragraaf gaat in op het doel van het grout, de werkwijze en de technische beschrijving in de aanlegfase en de belastingen en degradatie van de component in de gebruiksfase.

DOEL:

Opvullen lege ruimte tussen betonnen segmentale tunnelling en de omringende grond, zodat een gelijkmatige krachtenverdeling wordt verkregen.

Het grout dient niet als secundaire waterdichtende laag, waarbij de primaire laag het rubber afdichtingsprofiel is. De wijze waarop het grout wordt verwerkt geeft op voorhand geen garantie dat een betrouwbaar waterdicht of waterremmend schild rondom de tunnelbuis wordt gevormd. Bij de gekozen uitvoeringswijze is de laagdikte onzeker, plaatselijk zou de grout zelfs kunnen ontbreken. Er zijn geen eisen gesteld aan de waterdichtheid van het grout.

6.7.1 Aanlegfase

6.7.1.1 Werkwijze

De werkwijze van het grout is beschreven in paragraaf 5.3.3.5 "overige materialen" op bladzijde 61. De TBM heeft een grotere buitendiameter dan de betonnen tunnelwand. Om te voorkomen dat zakkingen van het maaiveld optreden wordt de lege ruimte - die het gevolg is van dit verschil in diameter - volgespoten met grout (mortel). Deze grout wordt met betonwagens aangevoerd en op de bouwplaats overgeladen in een groutcontainer met een inhoud van ongeveer 6 m³. Dat is de hoeveelheid die theoretisch nodig is voor het vullen van de lege ruimte van ongeveer 12 cm rond een tunnelring. Vervolgens wordt deze container door de portaalkraan de schacht in gehesen, op de trein gezet en naar de TBM vervoerd.

6.7.1.2 Technische beschrijving

- Het grout dat in de holle ruimte achter de tunnelling wordt gespoten heeft de volgende samenstelling:
 - portlandvliegascement CEM II/A-V (ca. 235 kg)
 - vliegasc (ca. 100 kg)
 - water (ca. 370 liter)

- bentoniet (ca. 8 kg)
- Nabehandeling:
 - Na inspuiting verhardt het grout binnen enkele uren. Er is geen nabehandelingproces voor het grout. De buitenzijde van de tunnelling is onbereikbaar. Het is daardoor niet te controleren of het grout alle lege ruimten heeft bereikt.

6.7.2 De gebruiksfase

EXTERNE BELASTINGEN:

Vier externe belastingen spelen een rol:

1. neerwaartse gronddruk op het grout door aanwezige gronddekking
2. de neerwaartse druk van het eigen gewicht van het grout
3. de alzijdige waterdruk tegen het grout en de opwaartse waterdruk als gevolg van het hoogteverschil.
4. uitwendige druk van de tunnelling op het grout

De neerwaartse krachten worden opgevangen door de draagkrachtige ondergrond onder de constructie.

De kans dat één van deze krachten gedurende de levensduur van de tunnel enigszins zal variëren is erg klein. Het grout bevindt zich daardoor in stabiel evenwicht.

INTERNE BELASTINGEN:

Er werken geen interne belastingen in het grout, omdat het uitgehard cement betreft. Er wordt aangenomen dat geen agressieve materialen het grout in kunnen trekken.

De interne en externe belastingen initiëren geen degradatieproces. Vastgesteld moet worden dat grout niet degradeert. Er wordt geen inspectie en onderhoud gedaan aan deze component. Als er complicaties optreden door veroudering, zetting of ander soort degradatie van het grout, dan moet dit toegeschreven worden aan een ontwerpfout.

FAALKANS EN FAALKOSTEN

De kans op falen van de constructie door het grout is nihil, omdat het grout niet degradeert. De faalkosten mogen oneindig groot zijn. Er is geen gekwantificeerd risico op te stellen.

6.7.3 Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden

Het grout degradeert niet. Er zijn geen inspectie en onderhoudswerkzaamheden aan deze component.

Kosten per jaar:

Inspectie	fl 0,-
Onderhoud	fl 0,-

6.8 Triplex plaatjes

DOEL:

In de aanlegfase moet een gelijkmatige overdracht van de vijzelkracht van de TBM op de tunnelsegmenten plaatsvinden. De kans op het afbrokkelen van beton op de kopse kanten van de segmenten is dan kleiner. Bij goede plaatsing worden geen segmenten beschadigd.

6.8.1 Aanlegfase

6.8.1.1 Werkwijze

In de voegen tussen de segmenten worden de ring- en vijzelkrachten overgedragen. Indien de segmenten in de voegen over de volledige dikte contact met elkaar maken, zullen de randen als gevolg van de vijzeldrukkracht een belasting ondergaan, waardoor beton kan afspringen.

Om dit te voorkomen zijn er in de kopse kanten van de segmenten, in de dikterichting gecentreerd, 4 tot 6 mm dikke betonnen drukvlakken aangebracht. Ter plaatste van de vijzelparen worden 2 mm dikke triplex plaatjes gelijmd; in totaal dus $14 \times 2 = 28$ centreerplaatjes per tunnelring. Hout is elastischer dan beton en daardoor beter geschikt om onder grote vijzeldrukspanning te staan.

Er zijn in totaal 35.448 triplex plaatjes in beide tunnelbuizen geplaatst met een totale dikte van 2532 mm. De verhouding van de dikte van de triplexplaatjes op de totale lengte van beide tunnelbuizen is 0,13 %. Dit is aanzienlijk voor een in de gebruiksfase nutteloze component.

6.8.1.2 Technische beschrijving

De afmeting van een triplexplaat is (l x b x d):

100 mm x 100 mm x 2 mm

Houtsoort: Fins berkenhout verzaagd tot triplex platen

Nabehandeling: geen (ongelakt hout)

6.8.2 De gebruiksfase

EXTERNE BELASTINGEN:

De tunnelringen sluiten zeer nauw op elkaar aan, omdat de maattoleranties voor deze nieuwe tunnelboortechiek hoog liggen. Tussen twee tunnelringen bevinden zich 28 centreerplaatjes die uitsluitend onder drukbelasting staan.

INTERNE BELASTINGEN:

De plaatjes bevinden zich aan de binnenzijde van de tunnelwand voor het rubber afdichtingsprofiel. Zuurstof en vocht breken lignine af in het hout en laten het hout relaxeren door hydrolyse.

Door de interne belastingen begint tijdens de levensduur van de tunnel één mogelijk degradatieproces.

AFBRAAK HOUT DOOR VERROTTING

INITIATIEFASE:

De hoge vochtigheidsgraad en het zuurstof initieert veroudering van hout. De hardheid van het hout bepaalt de levensduur. Omdat de plaatjes niet zijn nabehandeld zal het verouderingsproces snel in de propagatiefase zijn.

PROPAGATIEFASE:

Als de triplex platen verrot zijn, dan zal door de verminderde axiaalkracht de gewenste liggerwerking van de tunnel afnemen. In paragraaf 5.3.3.4.2 "belastingen" op bladzijde 56 is liggerwerking uitgelegd. De tunnelwand is in evenwicht met de op- en neerwaartse grond- en waterdruk in de omliggende grond.

De tunnelwand bestaat uit 633 in serie geplaatste tunnelringen die in evenwicht zijn met de omliggende grond- en waterdruk. Als het plaatselijk evenwicht verloren gaat door de degradatie is het mogelijk dat door liggerwerking een serie-effect optreedt. Door het serie-effect kan de vermindering van de axiaalkracht zich voortplanten en daardoor opeenhopen tussen twee bepaalde tunnelringen. Op deze manier is het mogelijk dat de afname van de axiaalkracht plaatselijk tussen twee tunnelringen groter kan worden. Tussen deze twee tunnelringen treedt ontspanning op tussen de segmenten.

Door de grote weerstand tussen de omliggende grond en de tunnelwand zal de ontspanning niet tot verplaatsing van de segmenten in de tunnelring lijden. De afname van de axiaalkracht resulteert in een ontspanning van het rubber afdichtingprofiel. De ontspanning vermindert de indrukking van het profiel. Afhankelijk van de elasticiteit van het afdichtingrubber zullen er lekkages langs het profiel ontstaan.

6.8.3 Faalkans en faalkosten

De faalkans van de triplexplaten is groot en kan geschat worden op ongeveer 1×10^{-3} per jaar. De kans dat hierdoor de tunnelconstructie faalt is aanzienlijk kleiner, ongeveer 1×10^{-6} per jaar. Deze kans komt overeen met de kans die in de ontwerpfase is aangenomen. Door de grote weerstand tussen de omliggende grond en de tunnelwand is de kans zeer klein dat afname van de axiaalkracht aanleiding geeft tot verplaatsing van segmenten. Vanwege de elasticiteit van het rubberprofiel is de kans klein dat lekkage ontstaat door dit degradatieproces.

Als lekkage wel ontstaat omdat de triplexplaatjes zijn verrot en het elastisch karakter van het rubberprofiel tegenvalt, dan moet dit toegeschreven worden aan een ontwerpfout. Er moet een onderzoek gestart worden, om na te gaan of het economisch rendabel is een nieuw afdichtingprofiel te plaatsen.

Het soort functie dat de tunnel vervult beïnvloedt de kans op schade. De plaatselijke verandering van de axiaalkracht door een voorbij rijdende trein met 200 km/h en de afgenomen axiaalkracht als gevolg van de degradatie brengen extra risico's mee. In de aanlegfase moet er naar gestreefd worden, materialen te gebruiken waarbij de kans op degradatie het kleinst is. Het is raadzaam uit te kijken naar een component die de triplexplaatjes kan vervangen bij de aanleg van nieuwe geboorde tunnels. Het materiaal van de plaatjes moet dusdanig gekozen worden, dat de kans op degradatie van de component minimaal is.

De faalkosten zijn hetzelfde als beschreven in paragraaf 6.7.3. Het gekwantificeerd risico is klein.

6.8.4 Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden

Gedurende het inspectiewerk aan de component segmenten wordt het rubberprofiel gecontroleerd op mankementen en lekkages. Gedurende groot onderhoud tijdens renovaties worden de segmenten en rubberprofielen aandachtig geïnspecteerd. De kosten van inspectie en onderhoud zijn verrekend in paragraaf 6.2.3.

Inspectiekosten:	fl 0,-
Onderhoudskosten:	fl 0,-

6.9 Bodembescherming

DOEL:

Beschermen grondlichaam naast en boven de tunnelconstructie. De vereiste dekking boven de tunnelconstructie moet de volledige technische levensduur van de tunnel gehandhaafd blijven.

6.9.1 Aanlegfase

6.9.1.1 Werkwijze

Om te voorkomen dat de tunnel door de opwaartse druk van het grondwater gaat opdrijven, is een voldoende groot grondlichaam boven de tunnelbuizen noodzakelijk. De bovendekking moet op zijn minst een halve tunneldiameter zijn. Dat is ongeveer 4,5 meter. Tijdens de bouwfase is door extra druk (steundruk) die op het boorfront wordt aangebracht, een grotere bovendekking nodig. De gronddekking boven de tunnelbuis is 8,5 meter dik. Als deze dekking ontbreekt, bestaat het gevaar van een "blow-out": de spoeling en de lucht aan het boorfront zullen zich door de grond een weg naar de oppervlakte banen.

Zowel aan de oevers als voor het tunnelgedeelte onder de rivier is een bovendeckking van 8,5 meter noodzakelijk. Omdat aan de landzijde van de zuidoever de dekking te gering was, is daar het maaiveld twee meter opgehoogd. Wat betreft de bodem van de rivier zijn maatregelen genomen om de vereiste dekking te garanderen en de bodem stabiel te houden en te beschermen tegen erosie. Daartoe is de gehele rivierbodem boven het tunneltracé bedekt met zinkstukken.

6.9.1.2 Technische beschrijving

Er zijn in totaal 13 zinkstukken van $70 \times 30 \text{ m}^2$ gemaakt op een bouwlocatie. De totale oppervlakte die wordt bedekt, is $70 \times 240 \text{ m}^2$ ($240 \text{ m} =$ breedte van de rivier). De breedte van de tunnelbuisconstructie met 2 tunnelbuizen en tussenliggende grond is $24,9 \text{ m}$ ($= 3 \times 8,3 \text{ m}$). De zinkstukken steken in de lengterichting dus aan iedere zijde $22,5 \text{ m}$ uit.

De zinkstukken bestaan uit:

- speciaal voor het zinkstuk gemaakt doek van polypropyleen
- smalle bundels (wiepen) van rijshout
- los rijshout
- stenen bedekking

De zinkstukken worden gemaakt door de stroken doek aan elkaar te naaien. Dan worden er in één richting wiepen (smalle bundels van rijshout) opgelegd. Vervolgens komt er een laag losliggend rijshout overheen, waarna er weer een partij wiepen in de dwarsrichting wordt aangebracht. Op deze wijze vormen de wiepen een rooster met daartussen rijshout.

Het zinkstuk wordt vervolgens in het water gesleept en met een ponton naar de afzinkplek gevaren. Het ponton ligt bovenstrooms en wordt verankerd met zogeheten spudpalen die in de rivierbodem gestoken worden. Wanneer het vloed is, komt het zinkstuk door de stroming gedeeltelijk onder water te liggen. Een boot met stortstenen vaart boven het zinkstuk en lost de stenen. In totaal worden er drie lagen steen gestort. De zinkstukken worden geplaatst met een overlap van 2 meter.

6.9.2 Gebruiksfase

EXTERNE BELASTINGEN:

- Door een te groot afvoerdebiet in de rivier kunnen zinkstukken afschuiven.
- Bij overgang van beschermde bodem naar onbeschermde bodem kan de onbeschermde bodem eroderen. In een volgend stadium kan de steenbedekking afrollen en zinkstukken afschuiven.
- Voor anker gaande schepen kunnen de bodembescherming met hun ankers kapot trekken.

INTERNE BELASTINGEN:

Het hout in de zinkstukken kan verrotten waardoor sterkte verloren gaat.

6.9.3 Faalkans en faalkosten

- Door goede regeling van het afvoerdebiet gedurende de seizoenen, is de kans klein (1×10^{-6}) dat het debiet zó groot wordt, dat daardoor de gehele bodembescherming afschuift. Bovendien zijn de zinkstukken extra beschermd met de steenbedekking. De kans op een extreme afschuifbelasting is zeer klein. De kans op schade is nog kleiner door de bescherming.
- Over een lengte van 70 meter is de bodembescherming aangelegd in de rivier. De lengte is niet groot en de bescherming vormt een discontinuïteit in de rivierbodem. De kans op schade is aanwezig ter plaatse van de overgang van bodembescherming en rivier bodem.
- De kans is zeer klein dat schepen voor anker gaan, omdat verkeerssignalering duidelijk maakt dat een tunnel gepasseerd wordt. De zinkstukken zijn bedekt met stenen. De kans is daardoor nog kleiner dat schade ontstaat aan de zinkstukken.
- De kans dat rijshout verrot gedurende de levensduur van de tunnel is aanwezig. De steenbedding en het polypropyleen blijven over. Voor de stabiliteit van de bodembescherming is dit genoeg. De watersnelheid bij de bodem door de bescherming is laag genoeg zodat erosie niet optreedt. Er treedt geen schade op.

Kennis van oeverwerken is binnen de civiele techniek in grote mate aanwezig. De verwachte levensduur van de bodembescherming is ruimschoots groter dan de levensduur van de tunnel. De levensduur is groter dan 100 jaar. Als de levensduur niet gehaald wordt, moet dit toegeschreven worden aan een ontwerpfout.

De faalkosten van de segmenten zijn beschreven in paragraaf 6.7.3. De kosten van het falen van de tunnelconstructie door het wegschuiven van de bodembescherming is op eenzelfde manier te begroten. Met overeenkomstige faalkans is het gekwantificeerd risico wederom klein.

6.9.3 Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden

Een toestandsafhankelijke strategie moet gevolgd worden. Door deze strategie worden werkzaamheden uitgesteld en dus kosten bespaard tot dat eerste schade waarneembaar is. Afhankelijk van de toestand moet globaal of gedetailleerd geïnspecteerd worden. De eerste tien jaar is geen toestandverandering te verwachten. Dit is ten dele afhankelijk van de grootte van het afvoerdebiet in de rivier in een bepaald jaar. Afhankelijk van de hoeveelheid geërodeerd bodemmateriaal moet een onderhoudsklus gestart worden.

Voor de berekening wordt gesteld dat na 20 jaar levensduur van de tunnel een veel te groot afvoerdebiet de rivierbodem heeft geërodeerd. Er moet nauwkeurig geïnspecteerd worden ter plaatse van overgangen tussen beschermde en onbeschermde rivierbodem.

Om kosten te besparen is het niet noodzakelijk in de vakantieperiode of in de nachtelijke uren inspectie- en onderhoudswerk te doen aan de bodembescherming. Voor dit werk hoeft geen infrastructuur afgesloten te worden en is er geen economische schade.

6.9.4 Scenario

AANNAME GEDRAG BODEMBESCHERMING:

Na de eerste inspectieronde moet vanwege degradatie onderhoud gedaan worden aan de bodembescherming ter plaatse van de overgang met de onbeschermd rivierbodern.

Na onderhoud wordt de situatie zo-goed-als-nieuw. Er wordt aangenomen dat dezelfde schade zich na 20 jaar weer zal openbaren.

In de berekening van de inspectie en onderhoudskosten wordt er rekening gehouden dat één keer extra wordt geïnspecteerd en onderhouden gedurende de levensduur van de tunnel vanwege een te hoog afvoerdebit door de rivier.

INSPECTIEWERKZAAMHEDEN:

Overgang tussen beschermde en onbeschermd bodern wordt geïnspecteerd door middel van peilwaarneming. De dieptemeting wijst uit of bodernmateriaal geërodeerd is. Als globale inspectie aangeeft dat bodernmateriaal geërodeerd is moet gedetailleerder inspectie gedaan worden. Er wordt bijvoorbeeld met twee duikers een gespecificeerde waarneming gedaan. De duikers besteden hier één werkweek aan. De materieelfactor is 1.5.

ONDERHOUDSWERKZAAMHEDEN:

Plaatselijk wordt een hoeveelheid zand en riviergrind gedeponeerd. Vervolgens moet deze hoeveelheid gelijkmatig over de rivierbodern verspreid worden. Het werk wordt in twee werkweken gedaan met 4 geschoolde werknemers. De materieel- en materiaalfactor is 2.

KOSTEN TOTALE LEVENSDUUR:

wat	kosten (kfl)
inspectie (peilstok)	$2 \times 135 \times 8 \times 20 \times 1.5 = 65$
inspectie (duikers)	$2 \times 135 \times 8 \times 5 \times 1.5 = 16$
totaal inspectie	= 81
onderhoud	$4 \times 135 \times 8 \times 10 \times 2 = 86$
totaal	= 167

Tabel 45 Kosten van werkzaamheden per periode (elke 20 jaar)

levensjaar	kosten (kfl)
20 ^{ste}	167
40 ^{ste}	167
60 ^{ste}	167
80 ^{ste}	167
extra	167

Tabel 46 Totale kosten bodembescherming gedurende levensduur tunnel

De netto contante waarde van de kosten is berekend in de tabel 46.

werkzaamheid	kosten (kfl)
inspectie	48
onderhoud	51
buitengebruikstelling	0
Totaal (contante waarde)	99

Tabel 47 De netto contante waarde van de werkzaamheden gedurende technische levensduur

6.10 Elektromechanische voorzieningen en voorzieningen voor veiligheid

DOEL:

Veilige ingebruikstelling van de tunnel ongeacht de functie gedurende de gebruiksfase. Als installaties uitvallen en hoofdvoorzieningen niet werken moet de tunnel buiten gebruik gesteld worden.

6.10.1 Aanlegfase

De voorzieningen in de geboorde tunnels verschillen niet veel met de voorzieningen in conventionele afgezonken tunnels.

Een deel van de elektromechanische voorzieningen worden gebruikt als noodvoorziening, voorziening voor een andere voorziening en veiligheidvoorziening. De voorzieningen kunnen op drie verschillende plaatsen gesitueerd zijn:

- binnen in de tunnelbuis
- buiten de tunnelbuis
- vlakbij de centrale meldkamer

Uit logistiek oogpunt moeten voorzieningen zoveel mogelijk bij elkaar geplaatst zijn. Tevens moeten zoveel mogelijk voorzieningen buiten de tunnelbuis geplaatst worden. Dit voorkomt extra buiten gebruikstelling en versnelling van veroudering.

De volgende hoofdvoorzieningen en bijbehorende installaties moeten, ongeacht de functie van de tunnel, aangelegd worden om de tunnel te gebruiken:

hoofdvoorziening	installaties
1. elektriciteit	noodstroom, laagspanning, hoogspanning, no-break
2. water	gemaal, afvoer, riolering, kelder
3. brandbeveiliging	hulpkast, pomp, leidingnet
4. verlichting	tunnel, nood
5. ventilatie	tunnel, vluchtgang
6. communicatie	videobewaking, luidspreker, intercom, telemetrie

Tabel 48 De verschillende installaties per hoofdvoorziening

Werkwijze hoofdvoorziening en bijbehorende installaties:

1. ELEKTRICITEIT

- Een noodstroominstallatie bestaande uit enige dieselgeneratoren levert stroom als de netspanning is weggefallen. Het aantal generatoren is afhankelijk van de hoeveelheid geleverd vermogen. Gedurende de levensduur van de tunnel wordt de dieselmotor voorverwarmd, waardoor de kans wordt verkleind dat de generator niet aan gaat.
- Een no-break installatie, die direct spanning levert als de normale netspanning is uitgevallen. Er zijn elektromechanische voorzieningen die gedurende de ingebruikstelling van de tunnel onder spanning moeten blijven staan. De dieselgenerator levert na ongeveer 15 minuten - als de motor op 100 % vermogen ronddraait – een gevraagde hoeveelheid stroom. De no-break installaties bestaan uit accu's die opgeladen worden door netspanning.
- Een step up - step down -installatie is een installatie die laagspanning omzet in hoogspanning of andersom. De hoogspanningskabel loopt door de tunnel naar de andere zijde van de tunnel om stroom te leveren aan de daar aanwezige elektromechanische voorzieningen.

De voorziening bevindt zich in de nabijheid van de tunnel buiten de tunnelbuis.

2. WATER

- De pompinstallatie voert hemelwater en reinigingswater af. Een middenpompkelder in het midden van de tunnel verzamelt het water. Tevens wordt hier opgemerkt of er lekkages zijn in de tunnelwand.
- Een gemaal in de omdijking bij de in- en uitrit van de tunnel zorgt ervoor dat de grondwaterspiegel op constante hoogte wordt gehouden. De omdijking heeft een ontwerphoogte, die gelijk is aan de hoog-waterspiegel van de rivier die met een kans van eens in de 100 jaar voorkomt.
- Een rioolpompinstallatie voert het vervuilde water af naar het gemeenteriool. Het water mag niet direct geloosd worden op een rivier, maar moet gezuiverd worden.

De pompinstallatie en het riool bevinden zich in de tunnelbuis onder het wegdek. Het is lastig om bij deze voorziening te komen. Het gemaal bevindt zich buiten de tunnelbuis.

3. BRAND

Met een hart op hart afstand van 50 meter is een brandblusinstallatie geplaatst. Hier bevinden zich een brandpomp, vulinstallatie, brandleiding en een hulppost. Uit een brandblusleiding komt een straal water met een toevoeging van 3 % schuim. Op deze manier kunnen ook benzinebranden geblust worden. Er bevinden zich 38 brandblusinstallaties in de tunnel. De voorzieningen bevinden zich in de tunnelbuis.

4. VERLICHTING

- In geval van nood zorgt de laagspanningverlichting voor verlichting. Onder andere kan hier gedacht worden aan de UIT-bordjes die verlicht moeten blijven bij calamiteiten.

- Van de tunnelverlichtings-installatie brandt gedurende normaal gebruik tijdens nachtelijke uren slechts 16 % van de totale verlichting. Op deze manier worden branduren en elektriciteit bespaard. Bij een calamiteit in de tunnel brandt 200 % van de verlichting. Per strekkende meter tunnel met een diameter van 8 meter zijn 3 verlichtingsarmaturen aanwezig. In de armaturen bevinden zich een tweetal energie besparende lampen. In totaal zijn er 5670 armaturen nodig.

De voorzieningen bevinden zich in de tunnelbuis.

5. VENTILATIE

- Paragraaf 5.2.3.1 op bladzijde 43 stelt dat het aantal (rook)gassen en deeltjes uitgestoten door het verkeer onder bepaalde genormeerde waarden moet blijven. De tunnelventilatie zorgt voor aanvoer van nieuwe frisse lucht en afvoer van vervuilde lucht. Afhankelijk van de verkeersintensiteit en de mate van afvoer van lucht bij ongelukken moet een bepaalde capaciteit aanwezig zijn in de tunnel. In normale omstandigheden draaien de ventilatoren op 5 % van hun capaciteit. Bij brand moet ventilatie ervoor zorgen dat de verstikkende rookgassen onmiddellijk verwijderd worden.
- De vluchtgang heeft een aparte ventilatie. Tijdens een calamiteit moet deze speciale voorziening ervoor zorgen dat geen (rook)deeltjes in de vluchtgang terecht kan komen.

De voorzieningen bevinden zich in de tunnelbuis.

6. COMMUNICATIE

Tijdens ingebruik zijn van de tunnel moet er communicatie zijn tussen de centrale meldkamer en het verkeer. Er zijn TV-, video-, omroep- en intercominstallaties. Vanuit de centrale meldkamer wordt de tunnel op afstand bediend en geregeld met behulp van een glasvezelverbinding. Vanuit de dichtbij gelegen centrale meldkamer van de Eerste Heine Noordtunnel kan de bediening geregeld worden. Enige elektromechanische voorzieningen worden uit veiligheidsoverweging dubbel uitgevoerd, zodat bij uitval niet de voorziening uitvalt.

De voorzieningen bevinden zich voor een deel binnen in de tunnelbuis, buiten de tunnelbuis langs de infrastructuur en in de centrale meldkamer.

6.10.2 Gebruiksfase

De elektromechanische voorzieningen degraderen net als de overige componenten door externe en interne belastingen.

EXTERNE BELASTINGEN:

- Voorzieningen worden blootgesteld aan de weersomstandigheden.
- Vooral in de spatzone worden voorzieningen blootgesteld aan vocht.
- Voorzieningen worden blootgesteld aan vervuilde lucht, uitgestoten door het verkeer.

INTERNE BELASTINGEN:

Kortsluiting en doorbranden doet de voorziening geheel of gedeeltelijk uitvallen. Door slijtage en veroudering van onderdelen werkt de voorziening niet meer deugdelijk.

Elektromechanische voorzieningen geplaatst in de tunnelbuis en langs de infrastructuur verouderen sneller door bovengenoemde externe belastingen.

6.10.3 Faalkans en faalkosten:

De kans op schade door veroudering van de voorzieningen is aanwezig (1×10^{-3}). Om te voorkomen dat de tunnel buiten gebruik wordt gesteld en om het veiligheidsniveau op een hoog niveau te houden, gedurende de gehele levensduur van de tunnel, moeten de voorzieningen periodiek geïnspecteerd en onderhouden worden. Het bepaalde veiligheidsniveau wordt gehaald bij een ontwerp faalkans van 1×10^{-6} voor de tunnelbuisvoorzieningen.

Het gekwantificeerde risico is klein als er onverhoopt een voorziening faalt. Door het grote aantal op zichzelf staande mechanische voorzieningen, zijn de faalkosten bij het falen van één elektromechanische voorziening lager dan de faalkosten van de segmenten. Bovendien is een groot deel van de voorzieningen niet zichtbaar voor het publiek. Door inspectie- en onderhoudswerkzaamheden wordt de faalkans klein en constant gehouden.

6.10.4 Inspectie- en onderhoudswerkzaamheden

De inspectiewerkzaamheden bestaan uit waarnemen van de toestand, testen voorziening op juiste werking en bijhouden van een logboek. In het logboek worden meterstanden bijgehouden, wordt beschreven wat de situatie is en wordt in het kort uitleg gedaan van de werkzaamheden. De contractvorming van de inspectie- en onderhoudswerkzaamheden ligt vast in het bestek dat 2 jaar geldig is (RWS). De aannemersgroep Technische Installaties (GTI) en Verkeerstechiek Nederland (VTN) zijn gedurende de besteksperiode verantwoordelijk voor de werkzaamheden.

Veel elektromechanische voorzieningen geven automatisch een signaal af aan de centrale meldkamer als er schade is of als de voorziening niet deugdelijk werkt. Er kan adequaat gereageerd worden door herstel van de voorziening. Vanwege de eis dat voorzieningen niet mogen uitvallen is de strategie van inspectie gebruiksafhankelijk.

Inspectie van de voorzieningen in de tunnelbuis die verkeersbelemmerend zijn moeten in de nachtelijke uren gedaan worden. Toch moeten zo veel mogelijk werkzaamheden gedurende werkdagen worden gedaan. Eens in de vier weken wordt een tunnelbuis in de nachtelijke uren afgesloten om verschillende voorzieningen te testen. De opzichter maakt wekelijks een ronde door de tunnel om eventuele schade te signaleren en om te inventariseren welk reinigingswerk gedaan kan worden.

De onderhoudswerkzaamheden kunnen in drie delen opgesplitst worden: Uit oogpunt van veiligheid en om kans van uitval te verkleinen wordt bij een bepaalde meterstand de component of de gehele voorziening vervangen.

- [1] Als de voorziening gedurende de periodieke test niet juist heeft gewerkt vindt reparatie plaats. In het uiterste geval worden verschillende componenten of de gehele voorziening vervangen.
- [2] Aanwezig vuil in de tunnelbuis en aan de voorzieningen wordt gereinigd.
- [3] Na bepaald gebruik moet de (gehele) voorziening vervangen worden.

De strategie van onderhoud bij de elektromechanische voorzieningen is gebruikafhankelijk. In onderstaande tabel is een samenvatting gegeven van een mogelijk scenario van het inspectie- en onderhoudswerk aan de verschillende voorzieningen die in de vorige paragraaf beschreven zijn. Er zijn - zoals is uitgewerkt voor de component segmenten - verschillende scenario's bedenkbare. Het scenario met minimale kosten is gesteld op eens in de 20 jaar grote renovatiewerkzaamheden verrichten.

Tussen haakjes is een raming gegeven voor het aantal benodigde manuren die besteed worden aan de werkzaamheden. Er wordt aangenomen dat het aantal manuren niet toeneemt door degradatie van de voorzieningen. De veiligheidsvoorschriften eisen dat voorzieningen niet (zichtbaar) mogen degraderen. Er moet in een eerder stadium werkzaamheden gedaan worden.

Voorziening	per	Inspectie (manuren)	Onderhoud (manuren)
1. ELEKTRICITEIT			
noodstroom	maand	meterstanden, vloeistof (1)	bijvullen vloeistof (1)
no-break	jaar	proefdraaien (8)	kleine reparatie (20)
step up - step down	20 jaar	demonteren (30)	reparatie, vervanging (220)
2. WATER			
(riool)pomp	maand	visueel (1)	reinigen (3)
gemaal	jaar	meterstanden (2)	kleine reparatie (88)
	20 jaar	gedetailleerd (64)	reparatie, vervanging (352)
3. BRAND-BEVEILIGING			
hulpkasten	maand	visueel (4)	reinigen, bijvullen (5)
	jaar	testen, gedetailleerd (64)	aanvullen, reparatie (48)
	20 jaar	geen	volledig vernieuwen (400)
4. VERLICHTING			
laagspanning	maand	visueel (3)	vervangen lampen (5)
tunnel	jaar	testen, gedetailleerd (30)	vervangen armaturen (60)
	20 jaar	geen	volledig vernieuwen (400)
5. VENTILATIE			
tunnel	maand	visueel (2)	reinigen (5)
nood	jaar	testen, gedetailleerd (40)	kleine reparatie (40)
	20 jaar	geen	volledig vernieuwen (300)
6. COMMUNICATIE			
TV, video, omroep etc.	maand	visueel (5)	reinigen (10)
	jaar	testen, gedetailleerd (48)	kleine reparatie (48)
	20 jaar	geen	volledig vernieuwen (400)

Tabel 49 Periodieke werkzaamheden aan de elektromechanische voorzieningen (uur)

KOSTEN PER JAAR:

In deze kostenberekening worden de kosten berekend voor exploitatie, inspectie, onderhoud en buiten gebruikstelling. De exploitatiekosten worden in de volgende paragraaf behandeld.

De loonkosten vormen wederom de basis van de berekening. De inspectiekosten worden vergroot met een factor 1.5 voor materieel. De onderhoudskosten met een factor 2 voor materieel en materiaal. Eens in de 20 jaar wordt een groot deel van de elektromechanische voorzieningen vernieuwd. Er wordt een factor 3 in rekening gebracht voor materieel en materiaal.

Het reinigen en dagelijks onderhoud aan de tunnel doet ongeschoold personeel. Inspecties en onderhoud aan de voorzieningen doet geschoold personeel.

De tunnel wordt voor het vernieuwen van de elektrotechnische installaties 30 dagen buiten-gebruik gesteld. Deze periode van buiten-gebruik kan door het gekozen scenario samenvallen met de periode buitengebruik voor het renoveren van de segmenten. De kosten hiervan zijn al verrekend in paragraaf 6.6.4.5 op bladzijde 97. Werkzaamheden aan de voorzieningen buiten de tunnel worden gedurende werkdagen gedaan en binnen de tunnel gedurende de nachtelijke uren.

Alle voorzieningen worden bij elkaar genomen voor de berekening van inspectie- en onderhoudskosten.

Inspectiekosten per jaar:

$$(34 \text{ (uur)} \times 135 \text{ (tarief)} + 350 \times 200) \times 1.5 / 1000 = 110 \text{ kfl}$$

Onderhoudskosten per jaar:

$$(36 \times 90 + 240 \times 135 + 120 \times 135 + 256 \times 200) \times 2 / 1000 = 206 \text{ kfl+}$$

$$\text{Totaal kosten per jaar} = 316 \text{ kfl}$$

Onderhoudskosten per 20 jaar:

$$\text{Inspectiekosten: } (0.5 \times 94 \times 135 + 0.5 \times 94 \times 200) \times 3 / 1000 = 47 \text{ kfl}$$

$$\text{Onderhoudskosten: } (0.5 \times 2072 \times 135 + 0.5 \times 2072 \times 200) \times 3 / 1000 = 1.041 \text{ kfl}$$

$$\text{Buiten-gebruikstelling: } 0 \times 34 = 0 \text{ kfl+}$$

$$\text{Totale kosten renovatie} = 1.088 \text{ kfl}$$

De onderstaande tabel geeft de kosten van inspectie, onderhoud en buiten-gebruikstelling. Wederom zijn de jaarlijkse kosten teruggerekend naar het jaar van aanleg met de netto contante waarde methode. In tabel 50 wordt de helft van de kosten van buiten-gebruikstelling meegerekend.

werkzaamheid	kosten (kfl)
inspectie	2.211
onderhoud	4.706
buitengebruikstelling	877
Totaal (contante waarde)	6.917

Tabel 50 Netto contante waarde van de werkzaamheden aan de elektromechanische voorzieningen

6.11 Begroting beheer van de geboorde tunnel

In tabel 51 staan de gemiddelde jaarlijks te begroten kosten voor inspectie, onderhoud, buiten-gebruikstelling en exploitatie van de vijf verschillende componenten. De renovatiekosten in het 20^{ste} jaar, zijn met de NCW-methode teruggerekend naar het aanlegjaar en toegevoegd aan de jaarlijkse kosten voor inspectie en onderhoud. Ditzelfde is ook gedaan met de buitengebruikstelling na 20 jaar.

Voor een geboorde tunnel met overeenkomende technische en constructieve beschrijving kunnen de bedragen uit tabel 50 jaarlijks gebudgetteerd worden. Een gedeelte van het budget moet gereserveerd worden voor de renovatiewerkzaamheden die elke 20 jaar plaats vinden.

component	gemiddelde kosten per jaar (kfl) (minimale - maximale degradatie)			
	inspectie	onderhoud	buitengebruik	exploitatie
1. segmenten	72 - 144	180 - 255	27	-
2. grout	0	0	0	-
3. triplexplaatjes	0	0	0	-
4. bodembescherming	4	4	0	-
5. voorzieningen	111	226	27	-
algemeen				528

Tabel 51 Verdeling gemiddelde kosten per component per jaar (inclusief renovatiekosten)

De totale jaarlijkse kosten voor de werkzaamheden in de eerste periode van de levensduur van de tunnel met minimale degradatie in de eerste periode tot maximale degradatie in de vierde periode staan in tabel 52. Als de jaarlijkse kosten geëxtrapoleerd worden naar de totale levensduur van de tunnel, dan blijkt dat voor deze tunnel de kosten voor de verschillende werkzaamheden in de gebruiksfase niet de aanlegkosten overschrijden.

periode	gemiddelde kosten per jaar (kfl)
1. 0 - 5 jaar	1.125
2. 5 - 10 jaar	1.174
3. 10 - 15 jaar	1.222
4. 15 - 20 jaar	1.271

Tabel 52 Totale gemiddelde jaarlijkse kosten per degradatieperiode (inclusief reservering van renovatiekosten)

Uit tabel 52 blijken de aanlegkosten van de tunnelwand groter te zijn dan de kosten van beheer. De aanlegkosten zijn ongeveer 150 miljoen gulden en een ruwe schatting van de beheerkosten, in het slechtste degradatiestadium, zijn ongeveer 127 miljoen gulden. Er blijft een residuele waarde over na 100 jaar. Na 100 jaar levensduur moet overwogen worden de tunnel nogmaals te renoveren voor hergebruik, de tunnel geheel te vernieuwen of de tunnel te slopen. De begroting is niet nauwkeurig, dus eventuele tegenvallers kunnen dit beeld aanzienlijk veranderen.

Diagram 1 brengt de verhouding in beeld van de jaarlijkse kosten aan werkzaamheden voor inspectie, onderhoud, buiten-gebruikstelling en exploitatie.

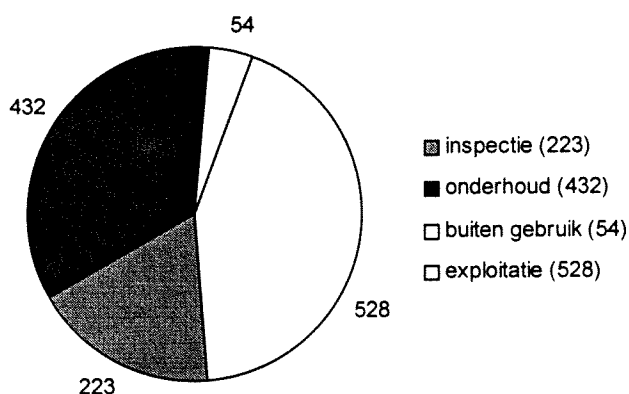


Diagram 1 Gemiddelde jaarlijkse kosten van de werkzaamheden (kfl)

Diagram 2 geeft de verhoudingen weer van de jaarlijkse kosten uitgegeven aan de verschillende componenten.

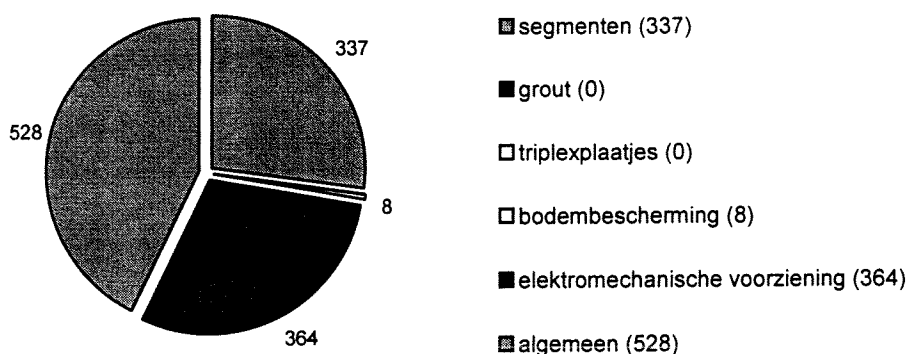


Diagram 2 Gemiddelde jaarlijkse kosten aan de verschillende componenten (kfl)

Sommatie van de kosten berekend met de NCW-methode geeft dezelfde verhouding, als de verhoudingen van de jaarlijkse kosten. Dit geldt zowel voor de verhouding van de kosten van de verschillende werkzaamheden als voor de verhouding van die van de verschillende componenten.

7 Organisatie van het beheer

7.1 Inleiding

De organisatie moet aansluiten op een gekozen beheerstrategie. Omgekeerd moet de beheerstrategie aansluiten op de organisatie. De beheerstrategie kan per component en per constructie anders zijn. Component en constructie kunnen onderling verschillen door een ander gevaaroorzaakniveau, de bedrijfsvorm en de gevareneffectklasse. Bovendien verschilt de technische beschrijving en het degradatieproces per component, zoals beschreven in hoofdstuk 6. Door de grote verscheidenheid aan constructies, componenten en de opgesomde verschillen stellen we niet een organisatie op die bepaald wordt door een enkele component. We moeten zoeken naar een open organisatiemodel waarbij de gegevensbehandeling eenduidig is, waardoor de beheerder op juiste, snelle en duidelijk interpreteerbare wijze de gegevens kan gebruiken. Hierbij dient de gebruiksfunctie van de infrastructuur centraal gesteld te zijn. In hoofdstuk 5 en 6 zijn we ingegaan op de eisen van de infrastructuur, in dit geval een geboorde tunnel. In dit hoofdstuk gaan we in op eisen van de organisatie. In eerste instantie beschouwen we de organisatie in het algemeen.

Een organisatie kan de constructie in eigen beheer nemen of het beheer uitbesteden. Er is ook een combinatie mogelijk. We nemen aan dat de constructie in eigen beheer is en dat werkzaamheden verricht worden in eigen organisatie en/of uitbesteed aan een aannemer. De manier van beheren van een component of constructie is afhankelijk van functie-eisen en streefbeelden. Deze worden opgesteld door de beheerorganisatie. De organisatie maakt een budget vrij voor beheer. De organisatie moet een keuze maken uit het gebruik van de schaarse te alloceren middelen in de uitvoering van het beheer. De betrouwbaarheid van constructie en component blijft hierbij op een constant niveau.

Alvorens een organisatiestructuur op te stellen met een ordening van de verschillende hiërarchische afdelingen, moet allereerst duidelijk zijn hoe het organisatieproces er uitziet. Het organisatieproces geeft aan hoe de organisatie werkt en welke gegevensstroom daarbij hoort. Met behulp van het organisatieproces-schema van een beheerder stellen we een beheerproces van civiel-technische constructies op. Het beheerproces is in twee onderdelen opgesplitst:

1. het inspectieproces
2. het onderhoudproces

Vervolgens gaan we op component-basis van de geboorde tunnel een inventarisatie maken van de hoeveelheid inspectie- en onderhoudswerkzaamheden. Er wordt een advies gegeven hoe de werkzaamheden organisatorisch het beste kan worden verricht. De renovatiewerkzaamheden die één keer in 20 jaar voorkomen gaan we niet behandelen. Deze exceptioneel grote opdracht komt niet jaarlijks terug. De organisatie is niet optimaal als we voor renovatiewerkzaamheden werknemers in eigen dienst nemen. Tot slot gaan we een organisatiemodel op stellen geldig voor de geboorde tunnel.

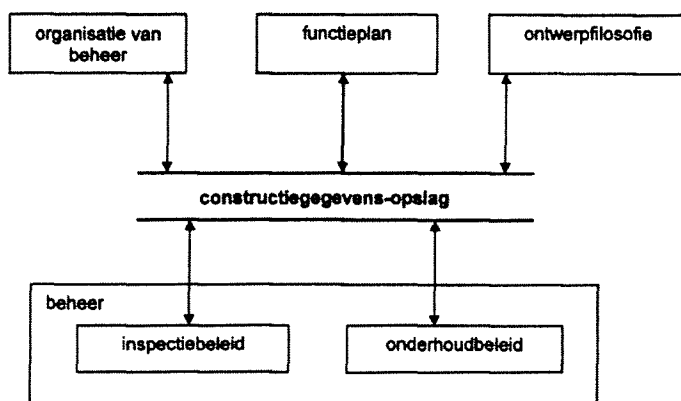
7.2 Het organisatieproces

In deze paragraaf beschrijven we een optimaal organisatieproces. Centraal in dit proces staat het constructiegegevens-opslag systeem. Het onderstaande proces is te gebruiken voor het beheren van alle infrastructuur, dat in beheer is. Infrastructuur die qua constructie of component overeenkomen met elkaar moeten we samen nemen in het constructiegegevens-opslag systeem. Op deze manier krijgen constructies van geboorde tunnels, dijken en viaducten een speciale afdeling in het systeem. Ter verduidelijking is het gehele proces weergegeven in een "Data Flow Diagram". We gaan in op de verschillende systemen in het diagram en de onderlinge relaties tussen de systemen.

Het organisatieproces is afhankelijk van de relatie tussen de verschillende processen die zich afspelen in een organisatie. Het model is te schematiseren als een "Data Flow Diagram" (DFD). Een DFD geeft een model weer als een netwerk bestaande uit één of meerdere systemen. De systemen verbinden we met elkaar als in een richting een gegevensstroom plaatsvindt. De systemen geven we aan met rechthoeken. De communicatielijnen en gegevensstromen geven we aan met pijlen tussen de verschillende systemen. De gegevensverzameling vindt plaats waar twee horizontale lijnen worden gehanteerd.

Een algemeen organisatieproces is weergegeven in figuur 31. Centraal zien we hierin het systeem constructiegegevens-opslag staan. Alle mogelijke gegevens van oriëntatiefase tot sloop van de constructie zijn hierin geadmistreerd. Het systeem dient gecomputeriseerd te zijn. Gegevens moeten gemakkelijk te administreren te zijn en gemakkelijk weer op te halen zijn. Door een goed werkend systeem 'constructiegegevens-opslag' wordt er in de toekomst een verantwoord ontwerpfilosofie opgesteld, de beheerorganisatie geoptimaliseerd en een optimaal inspectie- en onderhoudbeleid bepaald. Een beheerder moet de volgende doelen nastreven:

- maximale betrouwbaarheid
- minimalisatie van kosten
- beheersing van middelen en organisatie bij beheer
- maximale bruikbaarheid



Figuur 31 Algemeen organisatieproces voor beheer

De organisatie van het beheer beïnvloedt in grote mate de overige systemen in het organisatieproces. Naast de gestelde functie-eisen en de gestelde streefbeelden door de organisatie, moet de organisatie de te alloceren schaarse middelen beheersen. De schaarse middelen bestaan uit:

- tijd
- kosten
- kwaliteit
- organisatie
- informatie

Het functieplan legt voor de constructie, de componenten en de onderdelen de functie vast. In het functieplan is zeer gedetailleerd de technische werking de degradatieprocessen en de schade beschreven .

In de ontwerpfilosofie staan de gegevens betreffende de aanleg of fabricage van constructies, componenten en onderdelen. Vanwege een te behalen betrouwbaarheid stellen we normen, kengetallen en dus een filosofie van ontwerp op.

Aan de tegenoverliggende zijde van het constructiegegevens-opslag systeem zijn er de werkzaamheden in de gebruiksfase, die overeenkomen met het gestelde streefbeeld, de functie of de normen. Dit zijn de werkzaamheden van beheer, waaronder de inspectie- en onderhoudswerkzaamheden vallen.

7.3 Beheerproces

Wederom schematiseren we het model in een DFD. Dit is in figuur 32 weergegeven. In het beheerproces wordt het constructiegegevens-opslag systeem centraal geplaatst.

CONSTRUCTIEGEGEVENS-OPSLAG Het hart van het beheerproces. Aan de ene kant bevinden zich de systemen die er zorg voor dragen dat de schaarse middelen beheerst worden. Aan de andere kant bevinden zich de systemen die verantwoordelijk zijn voor uitvoer van beheer.

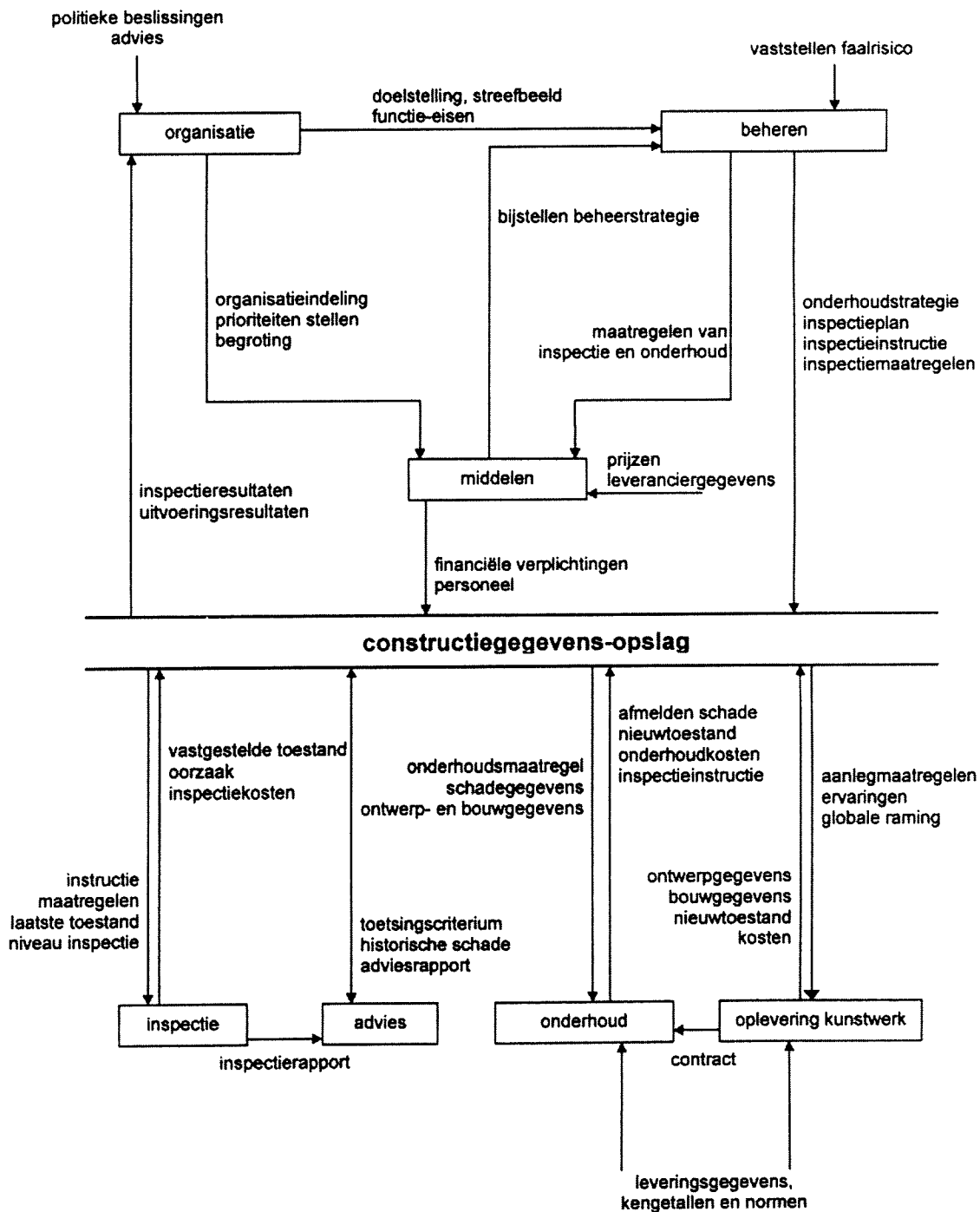
De volgende systemen bevinden zich aan de bovenkant van het systeem 'constructiegegevens- opslag':

ORGANISATIE De organisatie moet gehoor geven aan politieke beslissingen. Anderzijds dienen zij de politiek te adviseren. De organisatie komt aan haar informatie middels rapporten en gegevens aanwezig in het systeem constructiegegevens-opslag. De organisatie legt functie-eisen, doelstellingen en streefbeelden op aan het beheersysteem. Een streefbeeld is te concretiseren in functie-eisen. Een streefbeeld is bijvoorbeeld de opgelegde betrouwbaarheid van een tunnel gedurende de levensduur. Uiteindelijk moet de organisatie doorgeven aan het systeem middelen wat haar prioriteiten zijn, welke organisatieindeling daarbij past en hoe de bijbehorende begroting eruit ziet.

- BEHEREN** Het beheersysteem moet met een vastgesteld faalisico een beheerstrategie opstellen. Met de doelstellingen, streefbeeld en de functie-eisen van de organisatie kunnen we maatregelen van inspectie en onderhoud genereren. Het beheersysteem geeft aan welke middelen daarvoor nodig zijn. Anderzijds moet het systeem 'middelen' een voorstel van de bijstelling van de beheerstrategie doorgeven aan het beheersysteem. De constructiegegevens-opslag ontvangt gegevens van de te volgen onderhoudstrategie en van het inspectieplan, -instructie en -maatregelen.
- MIDDELEN** Het systeem 'middelen' geeft aan de constructiegegevens-opslag door welke we de schaarse middelen gebruiken en hoe. Het systeem ontvangt daarbij informatie van het beheer- en organisatiesysteem met welke prioriteiten, begroting en maatregelen van beheer men rekening dient te houden. Van *buitenaf* wordt met behulp van offertes van aannemers prijzen en leveranciergegevens bekend gemaakt.

Aan de andere kant van de gegevensopslag bevinden zich de systemen van uitvoering van beheer:

- INSPECTIE** Door middel van inspectie aan de constructie stellen we de toestand en de oorzaak vast. De informatie is van belang voor de gegevensopslag van de constructie. Anderzijds krijgt het systeem 'inspectie' instructie van de constructiegegevens-opslag van de te nemen maatregelen, de laatste toestand en het niveau van inspectie. Afhankelijk van de ouderdom van de component of de degradatiesnelheid kan inspectie grondiger zijn. Het systeem brengt een inspectierapport uit aan het advies-systeem.
- ADVIES** Het advies-systeem toetst de hoeveelheid schade, inspectie, onderhoud en bijbehorende kosten en brengt advies uit over te ondernemen stappen. Hierbij nemen we niet één inspectie in ogenschouw, maar alle gegevens die te maken hebben met de bewuste component of constructie. De informatie halen we uit het constructiegegevens-opslagsysteem.
- ONDERHOUD** Het onderhoudsysteem doet onderhoud als bekend is wat leveringsgegevens zijn en wat kengetallen en normen zijn van de component. Uit de constructiegegevens-opslag kunnen we de informatie verkrijgen van de schade, de onderhoudsmaatregel en de ontwerp- en bouwgegevens.
- OPLEVERING-CONSTRUCTIE** Tot slot is de oplevering van de constructie als systeem toegevoegd. Dit systeem zorgt voor de eerste invoer van de gegevens-opslag. Het systeem moet ervoor zorgen dat alle ontwerp- en bouwgegevens bekend zijn. Tevens wordt een beheerplan opgesteld met informatie over inspectie, onderhoud en kosten. Eventueel is er een contract opgesteld die de aanbestede aannemer verplicht om voor een aantal jaren van de levensduur van de constructie het beheer op zich te nemen. Anderzijds kan het systeem 'oplevering constructie' profiteren van gegevens opgeslagen in het systeem 'constructiegegevens-opslag'. Een aannemer kan ervaringen gebruiken, vroegtijdig maatregelen nemen in de aanlegfase waardoor duurzaamheid wordt vergroot en globaal ramingen opstellen van de totale kosten voor de levensduur van de constructie.



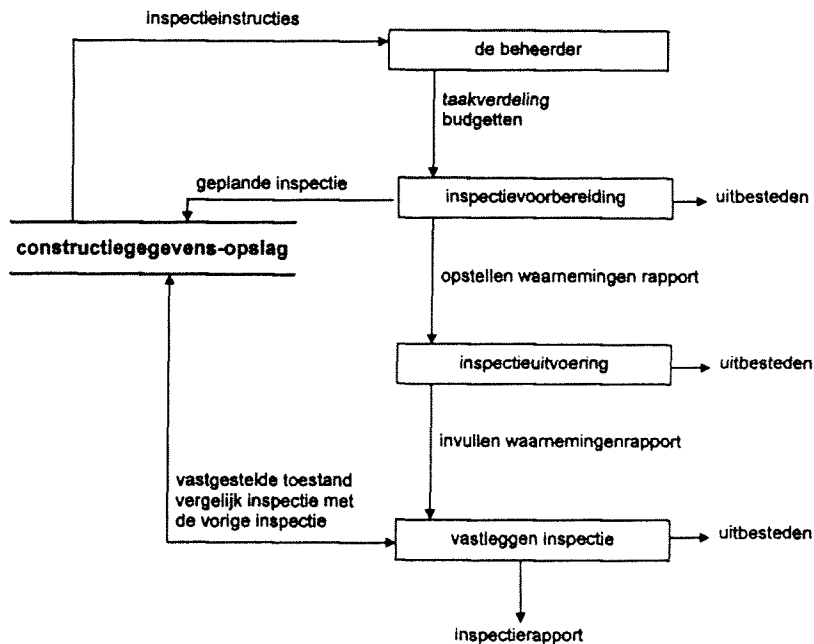
Figuur 32 Beheerproces

Een juiste opzet van de organisatie is bepalend voor een technisch-economisch optimale beheerstrategie. In een juiste opzet van een organisatie kent elk systeem haar functie en doelstelling en is de communicatie- en gegevensuitwisseling tussen de systemen optimaal.

7.4 Inspectieproces

In deze paragraaf kijken we één trede lager in de beheerorganisatie afgebeeld in figuur 32. Er ontstaat op deze manier een hiërarchische organisatiestructuur. In deze paragraaf lichten we het systeem 'inspectie' uit. In figuur 33 is het inspectieproces afgebeeld. Het inspectieproces kent de volgende systemen:

CONSTRUCTIEGEGEVENS-OPSLAG	Dit systeem is wederom het hart van het gehele proces. Alle informatie betreffende de component of de constructie ontvangt, verwerkt en verspreid dit systeem.
BEHEERDER	Dit systeem is organisatorisch verantwoordelijk voor het verrichten van inspectiewerkzaamheden. Het voert de inspectieinstructies uit, die het constructiegegevens-opslag systeem geeft. Deze organisatie stelt op haar beurt de begroting en een taakverdeling. Vervolgens begint de inspectievoorbereiding.
INSPECTIEVOORBEREIDING	Dit systeem heeft als taak de inspectie voor te bereiden. Een aannemer kan aanbesteed worden om de daadwerkelijke inspectievoorbereiding op zich te nemen. Dit is meestal dezelfde aannemer die de inspectieuitvoering ter hande neemt. Het systeem is verantwoordelijk voor het doorgeven van de geplande inspectie aan de constructiegegevens-opslag, het opstellen van een standaard waarnemingenrapport en het opstellen van een bestek. In tabel 53 is een standaard waarnemingenrapport opgenomen. In paragraaf 7.6 beschrijven we het rapport.
INSPECTIEUITVOERING	Overeenkomend met het bestek of de voorgeschreven werkopdracht uit de inspectievoorbereiding voert de organisatie of een aannemer de inspectie uit. Vervolgens gaan we een waarnemingenrapport invullen.
VASTLEGGEN INSPECTIE	Uiteindelijk dient dit systeem er zorg voor te dragen dat de gegevens op eenduidige wijze verdwijnen in het systeem constructiegegevens-opslag. De aannemer of organisatie van inspectieuitvoering stelt een inspectierapport op. de bekende gegevens in het opslagsysteem en de nieuwe gegevens kunnen men nu vergelijken.



Figuur 33 Inspectieproces

7.5 Onderhoudproces

Naast het inspectieproces is er het onderhoudproces. In figuur 34 staat het onderhoudproces. Het organisatieproces kent dezelfde systemen, maar de gegevensstromen verschillen. Het voordeel is dat de organisatiestructuur duidelijker is als verschillende deelorganisaties hetzelfde opgebouwd zijn.

CONSTRUCTIEGEGEVENS-OPSLAG Wederom is dit het hart van het onderhoudproces. Gegevens van onderhoud aangaande de component of constructie moeten hier terecht komen.

BEHEERDER

De beheerder is organisatorisch verantwoordelijk voor het doen van onderhoud aan een constructie of component. De verschillende onderhoudsinstructies komen uit het gegevensopslag systeem. De beheerder stelt budgetten en een taakverdeling op en doet een aanvraag voor offertes.

ONDERHOUDVOORBEREIDING

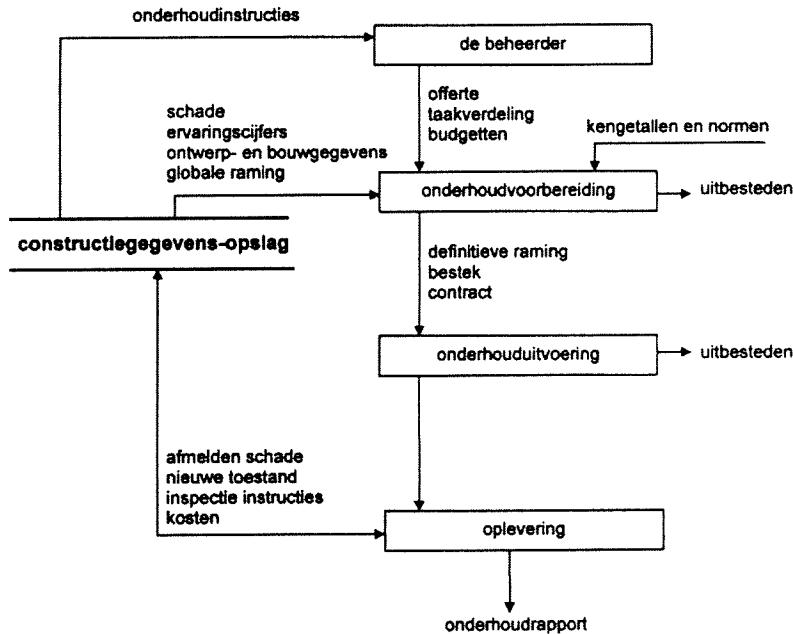
Dit systeem ontvangt van het gegevens-opslag systeem informatie over de schade, ervaringcijfers, ontwerp- en bouwgegevens en een globale raming van kosten. Mede aan de hand van extern verkregen nieuwe kengetallen en normen wordt een onderhoudsactie gevraagd. De werkzaamheden zijn uit te besteden aan een aannemer die gespecialiseerd is. De onderhoudsvorbereider ontvangt het bestek en gunt het project aan de aannemer. De definitieve raming van het project komt overeen met het vastgestelde budget gesteld door het beheersysteem.

ONDERHOUDUITVOERING

Na gunning van het project voert de aanbestede aannemer het onderhoud uit.

OPLEVERING

Dezelfde aannemer levert vervolgens het project op. De aannemer meldt de schade af, meldt de nieuwe toestand en adviseert eventueel nieuwe inspectieinstructie. De aannemer maakt tot slot de onderhoudskosten bekend.



Figuur 34

Onderhoudproces

7.6 Waarnemingenrapport

In het constructiegegevens-opslag systeem worden op hiërarchische wijze alle gegevens verzameld van het bepaalde kunstwerk, het constructieonderdeel, de component en het onderdeel. De gegevens dienen eenduidig te zijn en makkelijk op te sporen. Van het kleinste onderdeel in het kunstwerk tot de grootste onderdelen worden de gegevens verzameld op dezelfde waarnemingenbladen. In onderstaande figuur 35 staat een voorbeeld van een waarnemingenblad, die is uitgewerkt voor het ventilatiesysteem in de tunnelbuis.

Identificatiegegevens																
naam ventilatiesysteem		merk/type ?			schadegeval nr. 1			bladnr. xx van xx								
Eigen niveau (aankruisen)		Hoger niveau (benaming systeemdeel met schadegeval nr.)					Lager niveau (bladnummer samenstellende delen aankruisen)									
substelsysteem component onderdeel		x Naam: Ventilatiebuls														
			1*	2	3	4										
			5	6	7	8*										
Functie:		Circuleren lucht in tunnelbuis														
Leverancier:		GTI														
Onderhoudsgegevens																
SAO		faaleffect (aankruisen)			faal- oor- zaak	detectie- mogelijk- heid	wacht- tijd	aanloop- vertraging	systeem niet- beschik- baar	ver- vanging	totaal systeem niet- beschikbaar					
storing		lokaal	hoger	eind			uren	kosten	kosten	kosten	uren	kosten				
1.																
2.																
3.																
GAO		aandachtpunten					wacht- tijd	aanloop- vertraging	systeem niet- beschik- baar	ver- vanging	totaal systeem niet- beschikbaar					
frequentie incidentieel							uren	kosten	kosten	kosten	uren	kosten				
per week		visuele controle + schoonmaken					0	0	160	0	2	160				
per jaar																
TAO		toestandbeschrijving					wacht- tijd	aanloop- vertraging	systeem niet- beschik- baar	ver- vanging	totaal systeem niet- beschikbaar					
1.							uren	kosten	kosten	kosten	uren	kosten				
2.																
3.																
Faalgegevens																
T _{gr}	K _i	K _{tot}	T _{rep}	K _{rep, sa}	K _{rep, gao}	K _{rep, tao}	T _{rep1}	T ₀	T	T _{bg}	K _{bg}	K _v	α	K _{exp1}	K	P _f
specificatie: ontwerpgegevens																
Faalgevolgen																
storing		bedrijfsvorm			frequentie (x per jaar)	gevaaroorzaakniveau			gevaareffectklasse							
		uit	stand- by	functie		frequent	gematigd	nu en dan	catastrofaal		vervaarloos- baar					
1.																
2.																
3.																
opmerkingen:																
Naam inspecteur:						Datum:			Plaats:							
Handtekening:																

Tabel 53

Standaard waarnemingenblad

Hieronder volgt een beschrijving van de verschillende gegevens.

IDENTIFICATIEGEGEVENS

algemeen: De algemene gegevens zoals de naam, het merk, het typenummer en het administratienummer

soort: Is de schadeoorzaak waar te nemen op eigen niveau, een niveau hoger of een niveau lager?

- Op eigen niveau moet aangegeven worden of het een subsysteem, een component of een onderdeel betreft. Een subsysteem bestaat uit verschillende componenten en nog meer verschillende onderdelen. Een component bestaat uit verschillende onderdelen. De algemene gegevens noteren van de naam, de functie en de leverancier.
- Op een hoger niveau moet een verwijzing aangegeven worden naar dit hogere systeemdeel.
- Op een lager niveau kunnen de verschillende samenstellende delen aangekruist waarbij schade waargenomen is.

ONDERHOUDGEGEVENS

GAO / TAO	Afhankelijk van bepaald gebruik of bepaalde toestand wordt bijvoorbeeld het onderdeel onderhouden. De frequentie, de bijbehorende aandachtspunten, de wachttijd, de aanloopvertraging, de niet-beschikbaarheid door dit onderhoud, de vervangingskosten en de totale tijd van niet-beschikbaarheid wordt ingevuld en bijgehouden. De tijdsuren worden omgerekend in kosten.
SAO	Een bepaalde storing van bijvoorbeeld een onderdeel activeert de onderhoudsprocedure. Het faaleffect geeft aan of schade lokaal is gebleven, ontstane schade op hoger niveau schade heeft veroorzaakt of dat door schade het hele onderdeel heeft gefaald. Tevens wordt de faaloorzaak en detectiemogelijkheid beschreven. Daarnaast worden wachttijd, aanloopvertraging, niet-beschikbaarheid van onderdeel door dit onderhoud en totaal ingevuld en bijgehouden.

FAALGEGEVENS

Verskillende gegevens worden genoteerd, bijgehouden en gekwantificeerd geldend voor dit subsysteem, component of onderdeel. Er wordt van links naar rechts een beschrijving gegeven:

T_{gf}	= Tijd van gemiddeld falen, oftewel de periode die verstrijkt tussen ingebruikname en eerste storing.
K_i	= De kosten van inspectie
K_{itot}	= Sommatie van de kosten van inspectie
T_{rep}	= Gemiddelde reparatietijd na falen of vervangen
$K_{rep,sao}$	= Gemiddelde onderhoudskosten na een storing (T_{rep} x gemiddeld uurtarief plus vervangingskosten)
$K_{rep,gao}$	= Gemiddelde onderhoudskosten na bepaald gebruik
$K_{rep,tao}$	= Gemiddelde onderhoudskosten na bereiken van een bepaalde toestand
T_{rep1}	= Gemiddelde tijd die verstrijkt na reparatie tot opnieuw falen
T_o	= Gemiddelde tijd na ingebruikname waarop de veroudering begint. Door periodiek onderhoud kan T_o worden verlengd.
T	= Gemiddelde levensduur
T_{bg}	= Gemiddelde tijd van buiten gebruikstelling
K_{bg}	= Kosten van buiten gebruikstelling
K_v	= Vervangingskosten

- α = De hellingshoek, waarbij degradatieproces uitgezet is tegen de tijd
 K_{expl} = De gemiddelde exploitatiekosten
 K = De totale kosten van beheer
 P_f = De faalkans van het substeem, de component of het onderdeel

FAALGEVOLGEN

De faalgevolgen vinden alleen dan plaats als een storing optreedt waardoor het subsysteem, de component of onderdeel faalt. Ook al wordt de storings afhankelijke strategie (SAO) niet gevolgd, toch kan deze situatie altijd optreden. Gegevens worden in vijf delen verdeeld.

- | | |
|-------------------------|---|
| 1. storing | Een beschrijving van de storing die is opgetreden |
| 2. bedrijfsvorm | Het gevolg van falen is afhankelijk van de bedrijfsvorm. Er zijn drie mogelijkheden: <ol style="list-style-type: none"> 1. de voorziening staat gedurende ingebruikstelling uit 2. de voorziening staat gedurende ingebruikstelling stand-by 3. de voorziening staat gedurende ingebruikstelling aan |
| 3. frequentie | Het aantal keren per jaar dat falen kan optreden |
| 4. gevarenoorzaakniveau | De storing kan frequent voorkomen (= veel vaker dan normaal). De storing kan geregeld voorkomen (= beetje vaker dan normaal) of de storing kan zo nu dan voorkomen (nauwelijks vaker dan normaal). |
| 5. gevareneffectklasse | Het gevolg van de storing op het hoofdsysteem kan variëren van catastrofaal tot een verwaarloosbaar effect. Bij een catastrofale storing moet met een zeer groot financieel verlies rekening gehouden worden. |

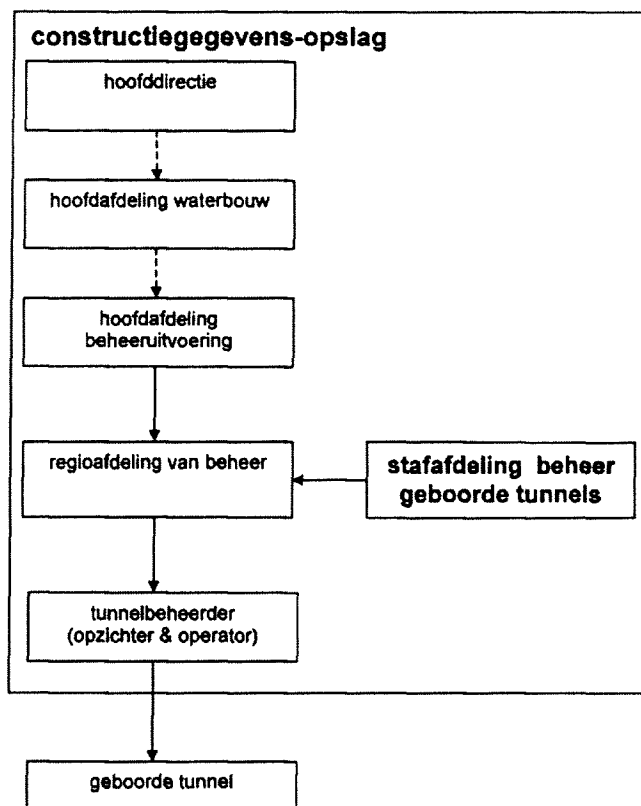
RAPPORT

Het rapport is geldig als de naam van de inspecteur, zijn handtekening, de datum en de plaats is ingevuld.

7.7 Het organisatiemodel van het beheer van de geboorde tunnel

De organisatie van het beheer is hiërarchisch opgebouwd. De gebruiksfunctie van de infrastructuur, in dit geval de geboorde tunnel, moet centraal gesteld worden. Dit wordt bewerkstelligd door het constructiegegevens-opslag systeem centraal te stellen. Er ontstaan op deze manier beter afgestemde beheerplannen en een beter overzicht van het beheergebied. In figuur 35 is het organisatiemodel weergegeven die geldt voor het beheer van de geboorde tunnel. In dit model zijn landelijk de geboorde tunnels verenigt in de stafafdeling beheer geboorde tunnels. Binnen deze afdeling kunnen onder andere gegevens, ervaringen, normen, nieuwe schadeinstructies en onderhoudsmaatregelen uitgewisseld worden tussen beheerders van verschillende geboorde tunnels. Het is noodzakelijk om een samenwerking tot stand te brengen met beheerders van soortgelijke infrastructuur binnen de beheerorganisatie. Op dezelfde manier kunnen voor andere soortgelijke constructies een stafafdelingen opgesteld worden.

Belangrijk aspect in dit organisatiemodel is het feit dat elke afdeling verbonden moet zijn met het constructiegegevens-opslag systeem. Het constructiegegevens-opslag systeem moet erop berekend zijn dat verschillende afdelingen, in het organisatiemodel, op een wijze een gegevensbehoefte hebben. De gegevensbehoefte kan organisatorisch en technisch van aard zijn.



Figuur 35 Organisatiemodel van het beheer van een geboorde tunnel

7.8 Beheer van de geboorde tunnel

Deze paragraaf gaat in op de periodieke beheerwerkzaamheden aan de geboorde tunnel. In dit geval wordt gekeken naar de organisatie van het beheer van de jaarlijks terugkerende werkzaamheden. In hoofdstuk 6 is voor elke component van de tunnelwand van de geboorde tunnel de inspectie- en onderhoudswerkzaamheden vastgesteld. De renovatiewerkzaamheden zijn geen jaarlijks terugkerende werkzaamheden en worden daarom niet meegenomen in analyse. Een organisatie dient opgezet te worden voor werkzaamheden die regelmatig terugkeren. Hieronder wordt de werkzaamheden samengevat:

component	inspectiewerkzaamheden	onderhoudwerkzaamheden
segmenten	<ul style="list-style-type: none"> - afhankelijk degradatieniveau 20 - 80 segmenten jaarlijks inspecteren - per nacht 2 segmenten gedetailleerd inspecteren per werknemer 	<ul style="list-style-type: none"> - afhankelijk degradatieniveau 50 - 200 segmenten jaarlijks klein onderhoud - afhankelijk degradatieniveau 10 - 40 segmenten jaarlijks groot onderhoud - per nacht 2 segmenten klein onderhoud per werknemer - per nacht 1 segment groot onderhoud per werknemer
grout	geen	geen
triplexplaten	werkzaamheden verricht door segmenten	werkzaamheden verricht door segmenten
bodembescherming	niet periodiek, maar tijdens renovatie	niet periodiek, maar tijdens renovatie
elektromechanische voorziening	zie tabel 49 hoofdstuk 6	zie tabel 49 hoofdstuk 6
algemene exploitatie	<ul style="list-style-type: none"> - jaarlijks 3,5 operators in centrale meldkamer - jaarlijks 2 opzichters in en rond de tunnel 	geen

tabel 54

Beheerwerkzaamheden aan een geboorde tunnel

De organisatie van beheer van de tunnel ligt in handen van de tunnelbeheerder (figuur 35). Dit geldt voor de algemene exploitatiewerkzaamheden gedurende gebruiksfase en de organisatie van inspectie- en onderhoudswerkzaamheden. De uitvoering van de verschillende werkzaamheden dient uitbesteedt te worden aan gespecialiseerde aannemers. In een openbare aanbesteding kan de beheerder een keuze doen voor een bepaalde aannemer waarbij de prijs-kwaliteit verhouding minimaal is. Dit geldt dus voor alle gespecialiseerde inspectie- en onderhoudswerkzaamheden aan de segmenten en de elektromechanische voorzieningen.

Administratie en controle van de werkzaamheden wordt gedaan door de tunnelbeheerder. Vervolgens vindt er een gegevensstroom plaats richting constructiegegevens-opslag. De tunnelbeheerder wordt gestuurd door het systeem van constructiegegevens-opslag, de beheerdienst geboorde tunnels en de regioafdeling van beheer. De beheerdienst en de regioafdeling wordt gestuurd door de hoofdafdeling beheeruitvoering. De hoofdafdeling waterbouw heeft de verantwoordelijkheid en het overzicht over alle waterbouwkundige constructies die in beheer zijn. De hoofddirectie heeft controle over alle constructies die in beheer zijn. Verschillende staf- en onderafdelingen verzorgen de overige niet behandelde organisatorische zaken van het beheer.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Inleiding

Ter afsluiting van dit onderzoek volgen in dit hoofdstuk de conclusies en aanbevelingen. In paragraaf 8.2 staan de conclusies en in paragraaf 8.3 de aanbevelingen van dit onderzoek.

8.2 Conclusies

BEHEER

- Voor verschillende componenten en onderdelen van de civiel-technische constructie is een inspectie- en onderhoudstrategie vast te stellen. Er zijn drie strategieën:
 - een storingsafhankelijke strategie
 - een toestandsafhankelijke strategie
 - een gebruikafhankelijke strategieKeuze van de strategie is afhankelijk van de functie en de risico's en bepaalt in grote mate de kosten van beheer.

- In de gebruiksfase zijn de volgende kostenposten te onderscheiden:
 - Kosten van beheer onder te verdelen in inspectie- en onderhoudskosten.
 - Exploitatiekosten die worden gemaakt tijdens het normale in gebruik zijn van de tunnel.
 - Kosten van buiten-gebruikstelling, omdat gedurende deze periode de tunnel geen economisch nut heeft, terwijl een grote investering is gedaan in het aanlegjaar. De exploitatiekosten bedragen meer dan 40% van de totale kosten van beheer in de gebruiksfase. Dit is daarmee de grootste kostenpost.

- Het huidige beheer is in de praktijk niet gebaseerd op een expliciet geformuleerde theorie.

In de laatste decennia zijn er, door de economische groei, een groot aantal nieuwe constructies bijgekomen. Door visuele inspectie wordt degradatie waargenomen. In een veelal te laat stadium worden onderhoudwerkzaamheden verricht, omdat het budget niet toereikend is of omdat de werkzaamheden een te lage prioriteit hebben. Achterstallig onderhoud aan civiel-technische constructies legt een grote druk op het beheerbudget in de toekomst.

- Uitvoering van beheerwerkzaamheden gedurende de gebruiksfase van de geboorde tunnel is van groot belang.

De tunnel is ontworpen en aangelegd met een zeer kleine kans op falen (1×10^{-6}). De faalkans blijft klein en constant door periodieke inspectie- en onderhoudwerkzaamheden te verrichten. Beheer waarborgt de betrouwbaarheid, de bruikbaarheid, de duurzaamheid en de presenteerbaarheid van de constructie.

- Voor de juiste beheermethodiek en -budgettering moet zeer veel kennis aanwezig zijn over de component, het verouderingsgedrag, de kosten van beheer en de consequentie van falen.

Een duidelijk interpreteerbare en geautomatiseerde gegevensverzameling van alle beheeraspecten per component is een belangrijk instrument om de kennis te vergaren.

OPTIMON

- Het programma Optimon is niet goed bruikbaar voor de optimalisering van het beheer van de geboorde tunnel.

Het programma is te gebruiken voor kleine gemakkelijke voorbeelden waarbij een eenvoudig degradatieproces geldt. De opbouw en de achterliggende theorie van het programma heeft veel duidelijkheid verschaft in de algemene beheertheorie en de gegevensverzameling.

DE GEBOORDE TUNNEL

- De aanlegkosten worden in grote mate bepaald door de lining, ofwel de uit betonnen segmenten opgebouwde tunnelwand.

Om het onderzoekerrein overzichtelijk te houden is alleen ingegaan op de componenten van de tunnelwand van de civiel-technische constructie.

- De gestelde technische levensduur van 100 jaar is geen hard gegeven. Het is een aanname, die wellicht niet haalbaar is.

Met normen en kentallen worden in de ontwerp- en aanlegfase aannames gedaan over duurzaamheid en faalkans van de constructie. Deze aannames hebben grote invloed op de kosten. Hoe kleiner de faalkansen mogen zijn des te hoger zullen de kosten zijn. Bij een oneindig kleine faalkans zijn de kosten oneindig hoog.

- Sommige kosten van beheer van de geboorde tunnel zijn moeilijk te voorspellen.

Bij het boren van een nieuwe tunnel worden soms nieuwe materialen ontwikkeld. Van deze nieuwe materialen is het degradatieproces nog onbekend. Daardoor zijn de toekomstige schade en bijbehorende herstelwerkzaamheden niet te voorspellen.

COMPONENTEN IN DE GEBRUIKSFASE

- De begroting van de kosten van beheer voor de componenten van de tunnelwand is zeer ruw en daardoor onnauwkeurig.

Met behulp van vele aannames is een begroting gegenereerd voor deze eerste inventarisatie van beheerkosten voor een geboorde tunnel. De begrote kosten kunnen in de praktijk best tientallen procenten hoger of lager uitvallen.

- De kosten van beheer van een geboorde tunnel zijn ongeveer even groot als de bouwkosten ervan.
Hierbij is geen rekening gehouden met schade door onverwachte tegenvallers en constructieve fouten uit de ontwerp- en aanlegfase.
- De beheerkosten zijn minimaal bij renovatie om de 20 jaar.
Tijdens een renovatie wordt de tunnel voor langere tijd buiten-gebruik gesteld en volledig geïnspecteerd en onderhouden. Na renovatie is de tunnel weer zo goed als nieuw.
- De betonnen segmenten en de elektromechanische voorzieningen vormen de grootste kostenpost van de componenten.
De inspectie- en onderhoudskosten van de betonnen segmenten zijn ongeveer 27% van de totale kosten van beheer en de elektromechanische voorzieningen ongeveer 29%. De werkzaamheden aan de triplexplaatjes zijn verdisconteerd in de werkzaamheden van de betonnen segmenten. De componenten grout en bodembescherming ondergaan geen periodieke beheerwerkzaamheden.

ORGANISATIE VAN BEHEER

- Een centraal opslagsysteem van constructie-gegevens is nodig voor een goede beheerorganisatie.
In de verschillende afdelingen, van tunnelbeheerder .. tot hoofddirectie, moet ieder op eigen wijze toegang hebben tot dit systeem. Dit zal bijdragen aan een beter geformuleerde beheermethodiek waarbij een optimaal beheerbudget past.
- Een stafafdeling 'Beheer geboorde tunnels' moet de samenwerking en gegevensuitwisseling tussen de verschillende regionale beheerdiensten, die soortgelijke constructies in beheer hebben, stimuleren.
De regionale beheerdienst is verantwoordelijk voor het beheer van civiel-technische constructie.

ALGEMEEN

- Er moet meer aandacht besteed worden aan de werkzaamheden en bijkomende kosten van beheer tijdens de ontwerp- en aanlegfase van een nieuwe civiel-technische constructie.
De moeilijke voorspelbaarheid van vele kostenposten en de krachten in de maatschappij maken het begrijpelijk dat er weinig aandacht is voor de gebruiksfase. De aandacht gaat uit naar de eisen en wensen van de verschillende groeperingen in de maatschappij (milieugroepering, omwonenden), die allen invloed proberen uit te oefenen op aanleg van de constructie.

8.3 Aanbevelingen

- Naast het ontwerp, de aanleg en de uitvoering dient ook beheer van civiel-technische constructies voldoende aandacht te krijgen.
Daartoe moet meer onderzoek gedaan worden naar de veroudering en degradatie van materialen. Vooral voor nieuwe materialen is dit onderzoek urgent.
- De berekeningen en optimalisatie dienen verfijnd te worden.
De begroting van beheer van de componenten van de geboorde tunnel in de gebruiksfase is zeer ruw en onnauwkeurig. Met meer kennis over het gedrag van de componenten en de beheerkosten is verfijning mogelijk en nodig.
- Stel een model op dat beheermethodieken en bijbehorende kosten berekent en optimaliseert voor verschillende civiel-technische constructies .
Het model dient volledig geïntegreerd te worden in het constructiegegevens-opslagsysteem van de beheerorganisatie.
- Bepaal in een vervolgonderzoek de haalbaarheid van de reorganisatie van de beheerorganisatie.
Binnen de beheerorganisatie dient het constructiegegevens-opslagsysteem centraal staan in het beheerproces. Een stafafdeling 'Beheer geboorde tunnels' moet de gegevensuitwisseling tussen beheerders van soortgelijke constructies verbeteren.

Verklarende woordenlijst

beheer	= het bestuur en toezicht op een constructie, component of onderdeel zodat het zijn functie kan blijven vervullen voor een gestelde tijdsperiode en betrouwbaarheid. Onderdelen van beheer zijn de inspectie- en onderhoudswerkzaamheden.
bentoniet	= boorvloeistof gebruikt bij boren in minder cohesieve grond, zodat afpleisterlaag ontstaat waardoor druk opgebouwd kan worden. Tevens wordt de afgegraven grond in suspensie met boorvloeistof (slurry) afgevoerd in persleidingen
betondekking	= dekking van beton op de wapening
blow-out	= de spoeling en de lucht aan het boorfront baant zich een weg door de grond naar de oppervlakte, als de dekking ontoelaatbaar is
CACO ₃	= calciumcarbonaat
cao	= conditieafhankelijk onderhoud
CO	= koolmonoxide
CO ₂	= koolstofdioxide
E&M	= elektronische en mechanische voorzieningen
EPB-schild	= tunnelboren met gronddruk-schildmethode (Earth Pressure Balance Shield)
erector	= een robotarm die de geprefabriceerde betonnen segmenten plaatst in de lining
FEL	= fysisch en elektronisch laboratorium
gao	= gebruiksafhankelijk onderhoud
gronddekking	= grondpakket boven de tunnelconstructie om opbarsten te voorkomen in de aanlegfase
grout	= opvulmateriaal van zand, cement, water en bentoniet
GTI	= Groep Technische Installatie
holoceen	= het huidige geologische tijdvak; ongeveer 10.000 jaar geleden begonnen.
HSL	= hoge-snelheids-lijn
hydrofiel-rubber	= rubber afsluitvoeg tussen segmenten, dat door aanraking met water een factor 7 tot 10 in volume toeneemt
hydrolyse	= splitsing van scheikundige stoffen onder opnemng van water
hydroschild	= tunnelboren met slurrydruk schildmethode (bentoniet)
inspectie	= alle activiteiten om een constructie, een component of een onderdeel nauwgezet in ogenschouw te nemen met het doel het te beoordelen en te keuren
kfl	= kilo florijn (fl 1000,-)
KIVI	= Koninklijk Instituut van Ingenieurs
lignine	= bestanddeel van de celwanden van hout (stof)
lining	= grond- en waterkerende constructie van de tunnel (tunnelwand)
N.A.P.	= Normaal Amsterdams Peil
NCW	= netto contante waarde
onderhoud	= alle activiteiten, die ten doel hebben een constructie, een component of een onderdeel in goede technische staat te houden, zodat het zijn functie kan blijven vervullen.

Optimon	= computerprogramma voor het optimaliseren van onderhoud
pleistoceen	= geologisch tijdvak dat 2.500.000 jaar geleden begon en dat 10.000 jaar geleden eindigde. Kenmerkend voor dit tijdvak is dat warme en koude perioden elkaar afwisselden.
renovatie	= alle activiteiten van inspecteren en onderhouden, waarna een zo-goed-als-nieuw situatie optreedt voor de gehele constructie.
ROA	= richtlijnen ontwerp autosnelwegen
RONA	= richtlijnen ontwerp niet autosnelwegen
RWS	= Rijkswaterstaat
sao	= storingsafhankelijk onderhoud
staartafdichting	= afdichting tussen de stalen schildmantel en de geplaatste segmenten om toestromend grondwater tegen te houden.
step up - step down -installatie	= voorziening die laagspanning omzet in hoogspanning of andersom
TBM	= tunnelboormachine
TCH	= Tunnel-Combinatie-Heinenoord
THT	= Tweede Heinenoordtunnel
TNO	= toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek
triplexplaatjes	= houtplaatjes op drukvlakken om de vieldrukkraft te verdelen over het gehele en de achterliggende segmenten
tunnelsegment	= een gebogen betonplaat, onderdeel van de tunnelling
VBC	= vereniging betonconstructie
VBT	= vereniging betontechniek
vloeistofschild	= tunnelboren met slurrydruk schildmethode (bentoniet)
VTN	= Verkeertechniek Nederland
W&R	= bedrag reserveren voor winst en risico voor bepaalde periode

Symbolenlijst

δ	= een infinitesimaal kleine tijdperiode
A	= actieverzameling, $a \in A$
A	= constante die afhangt van C_s en C_r
B	= actieverzameling, $b \in B$
C	= constante
C_f	= faalkosten
C_i	= inspectiekosten
C_r	= reparatiekosten
C_s	= chloridengehalte in de buitenste laag [-]
C_x	= chloridengehalte op plaats x na tijd t [-]
D_d	= diffusiecoëfficiënt van chloridenindringing in beton [m^2/s]
E_c	= verwachting van de totale kosten voor onderhoud, vervanging of reparatie
erf	= error functie
G	= de faaltoestand door middel van inspectie geconstateerd
$g(t)$	= degradatie afhankelijk van de tijd
G+1	= de faaltoestand zonder inspectie bekend
i	= rentepercentage
j, k	= conditie van de component
K_c	= huidige dagwaarde
K_t	= de kosten gemaakt in die bepaalde periode t
L	= betondekking [m]
m	= het aantal tijdseenheden sinds de laatste inspectie
M	= de bovengrens van het maximaal aantal toegestane tijdseenheden, zodat de kans om in toestand G+1 te komen voor de component dicht genoeg bij 1 ligt
M_k	= het maximaal aantal toegestane tijdseenheden tot de volgende inspectie vanaf de laatst geconstateerde conditie
n	= aantal handelingen gedurende periode ($n = 1..i$)
$n = 1 .. F$	= aantal stapjes (n) van nieuwconditie (1) tot faalconditie (F)
P_f	= kans dat falen optreedt
$P_f(n,g)$	= kans op voordoen situatie, als functie van het aantal keren dat inspectie gedaan wordt en de gemeten conditie
r_{jk}	= de kans dat de ene conditie (j) overgaat naar de andere conditie (k)
S	= de toestandsverzameling
t	= periode (maand, jaar)
T_c	= de verwachte gemiddelde levensduur van de component
t_i	= tijd tot initiatie [s]
t_r	= tijdperiode in gebruik zijn van de component

Literatuurlijst

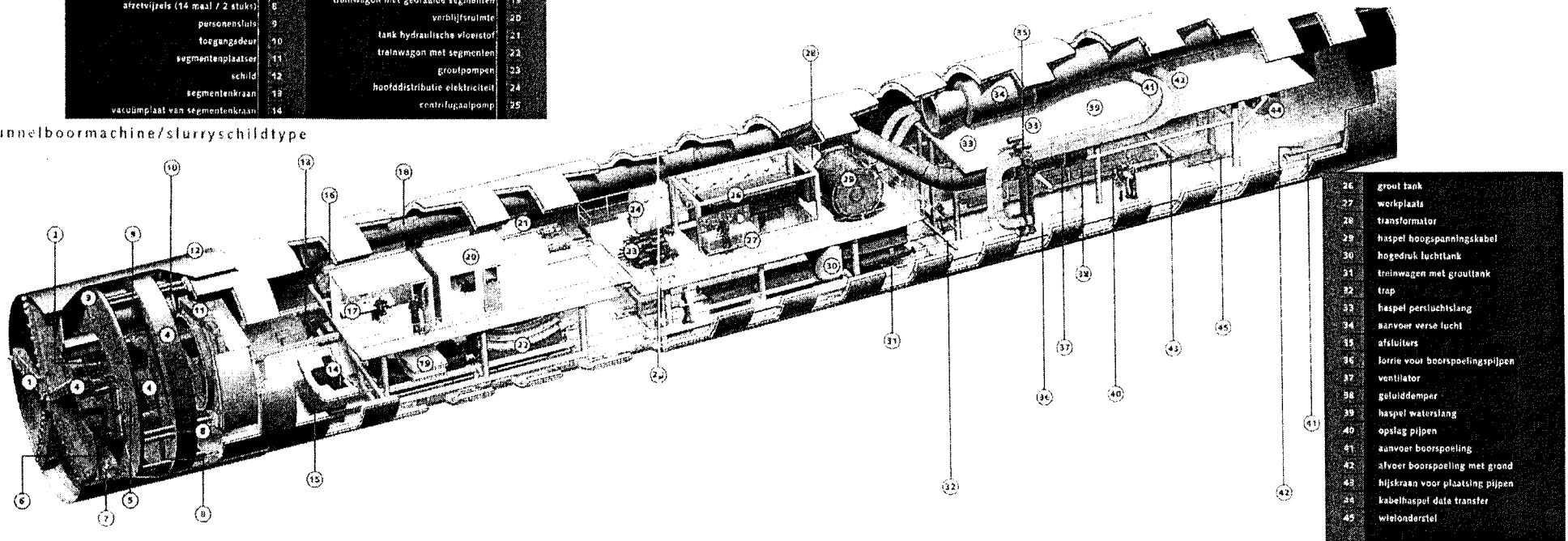
- [1] Inspection and maintenance strategies, Heron vol. 39 1994 no.2, 1994, A. van der Toorn
- [2] Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen; eindrapportage KIVI Tunneltechniek en ondergrondse werken 1993
- [3] Probabilistisch ontwerpen in de waterbouwkunde; november 1996, Vakgroep waterbouwkunde Prof. drs. ir. J.K. Vrijling
- [4] Onderhoudsmodellen bij logistiek & bedrijfszekerheid maart 1992 A. van der Toorn
- [5] Levensduur van betonnen kunstwerken Gespreksgroep bruggen januari 1990 Werkgroep II
- [6] Arbeitssicherheit in der Instandhaltung Becker Verlag TÜV Rheinland, 1986
- [7] N 500 Inventarisatie kunstwerkbeheer Intron & CUR rapporting; 1996 P Kole
- [8] Ondergronds bouwen Samenvatting Collegemateriaal Deel 1; 1997 Prof. ir. E. Horvat
- [9] Temperatuursinvloeden op tunnelconstructies, studierapport 3; KIVI 1970
- [10] Waterbouwkundige kunstwerken B.O. F9c / Ctwa5305 Prof. drs. ir. J.K. Vrijling, ir. K.G. Bezuyen, vakgroep waterbouwkunde 1997
- [11] Infrastructure Management, Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation and Renovation, W. Ronald Hudson, Ralph Haas, Waheed Uddin Mc.Graw-Hill 1997
- [12] Segmentenproductie Tweede Heinenoordtunnel, M.W.A.M. van Halderen, Cement No. 10, 1997, p.p. 47-51
- [13] Lessen uit de tweede Heinenoordtunnel – Duurzaamheid, ing. J. de Vries en Ir. A.J.M. Siemes, RWS Bouwdienst (Utrecht) en TNO Bouw (Rijswijk)
- [14] Toelaatbaar chloridengehalte in gewapend beton, CUR Rapport 97 deel 3
- [15] Standaardisatie van boortunnels, afstudeerrapport Leendert Kwak, 1996
- [16] Optimalisatie van onderhoudskosten van afzonderlijke systeemcomponenten, Hontelez, J.A.M., Wijnmalen D.J.D., FEL-TNO, 's- Gravenhage, rapport FEL-89-C379, 1989

- [17] A Markov decision algorithm for optimal inspections and revisions in a maintenance system with partial information, Tijms H.C., Van der Duyn Schouten F.A., European Journal of Operational Research, vol. 21, 1984
- [18] Optimalisering van inspectieintervallen, Vrouwenfelder A.C.W.M., IBBC-TNO, Delft, rapport B-85-536
- [19] Onderhoudsmodellering, Mathematische beschrijving van een model ter bepaling van onderhoudstrategieën voor één-component systemen.
- [20] OPTIMON Gebruikershandleiding versie2, ir. J.A.M. Hontelez, rapportnummer FEL-92-C273, exemplaarnummer 17, augustus 1992
- [21] Beoordeling van de duurzaamheid van de tunnelwand van de Tweede Heinenoordtunnel, TNO-rapport 97-BT-R1488
- [22] <http://www.cob.nl/tht/index.htm>

Bijlage 1 Tunnelboormachine en scheidingsinstallatie

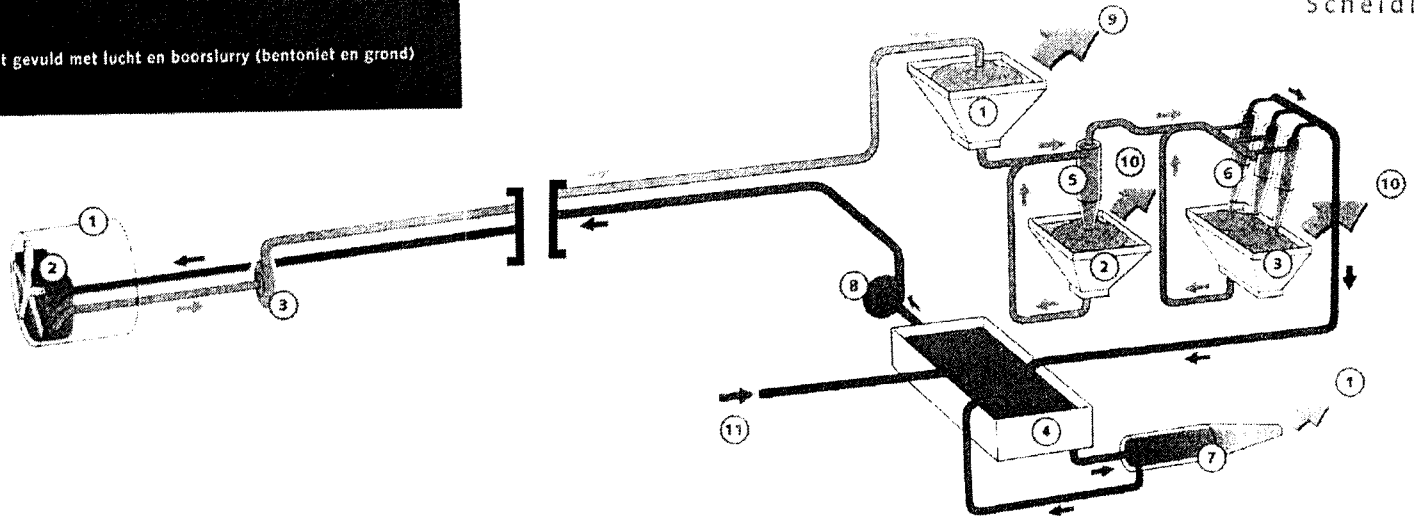
snijrad	1	segmenten aanvoer lorry	15
aandrijfmotor (5 stuks)	2	elektriciteitsvoorziening	16
toegangsdeur	3	controlepaneel	17
cylinders voor het verstellen van het snijrad	4	afvoer warme lucht	18
anti-torsie cilinders	5	trainwagon met gedraaide segmenten	19
afvoer boorspoeling met grond	6	verblijfsruimte	20
aanvoer boorspoeling (2 stuks)	7	tank hydraulische vloeistof	21
afretvijzels (14 maal / 2 stuks)	8	trainwagon met segmenten	22
personeelsluis	9	grootpompen	23
toegangsdeur	10	hoofddistributie elektriciteit	24
segmentenplaatsers	11	centrifugaalpompe	25
schild	12		
segmentenkraan	13		
vacuümplaat van segmentenkraan	14		

Tunnelboormachine/slurryschildtype



26	grout tank
27	werkplaats
28	transformator
29	haspel hoogspanningskabel
30	hogedruk lucht tank
31	trainwagon met grout tank
32	trap
33	haspel perslucht slang
34	aanvoer verse lucht
35	afsluiters
36	lorrie voor boorspoelingspijpen
37	ventilator
38	geluiddemper
39	haspel waterslang
40	opslag pijpen
41	aanvoer boorspoeling
42	afvoer boorspoeling met grond
43	hijskraan voor plaatsing pijpen
44	kabelhaspel data transfer
45	wielonderstel

- 1 de tunnelboor
- 2 drukcompartiment gevuld met lucht en boorslurry (bentoniet en grond)
- 3 de slurypomp



Scheidingsinstallatie

- 1 grove zeef
- 2 fijne zeef
- 3 fijne zeef
- 4 verzameltank
- 5 grote cycloon
- 6 kleine cyclonen
- 7 centrifuge
- 8 pomp
- 9 grond
- 10 slib
- 11 nieuw aangemaakte 'slurry'

Bijlage 2 Deel- en subfuncties van Optimon:

Deel 1

1 BESTANDEN	
Deze hoofdfunctie is opgedeeld in een viertal deelfuncties en betreft het ophalen, aanmaken (of: definiëren), bewaren en verwijderen van bestanden. Met een bestand wordt een object of systeem bedoeld, dat uit één of meerdere componenten kan bestaan.	
1.1	Laden
Een systeem of bestand wordt opgehaald, of een nieuwe kan worden gedefinieerd.	
1.2	Bewaren
Een systeem dat is opgehaald of aangemaakt, kan worden bewaard.	
1.3	Verwijderen
Gegevens kunnen worden weggegooid als ze niet meer nodig zijn. Van de lijst van systemen die reeds bewaard zijn, kan een systeem worden verwijderd. Alle gegevens van het betreffende bestand bent u dan voorgoed kwijt.	
1.4	Naam veranderen
Van een systeem dat is opgehaald of aangemaakt, kan de naam worden veranderd.	

Deel 2

2 SYSTEEMINVOER	
De gegevens van het systeem dat opgehaald is kunnen worden bekeken, aangepast of aangevuld. Dit betreft enige algemene systeemgegevens, maar vooral gegevens per component. Ook het aanmaken en verwijderen van componenten valt hieronder.	
2.1	Systeemgegevens
De algemene gegevens van een systeem, en niet specifiek een component betreffende, kunnen ingevuld of gewijzigd worden.	
2.2	Component
In eerste instantie moet een component gekozen worden:	
2.2a	Component ophalen of nieuwe definiëren.
Hierna kunnen de gegevens bekeken, gewijzigd en/of aangevuld worden:	
2.2.1	Gegevens bewerken
De gegevens zijn opgedeeld in een zestal blokken:	
2.2.1.1	Code
Betreft een code die aan een component gegeven kan worden.	
2.2.1.2	Tijdseenheid
De tijdseenheid (bijvoorbeeld half jaar, jaar, 3 jaar) waarin de tijdsafhankelijke gegevens dienen te worden uitgedrukt. Bovendien is dit de tijdseenheid waarin gerekend gaat worden.	
2.2.1.3	Conditieschaal
De eenheid, de nieuwwaarde en faalgrens van de conditie waarin de veroudering van de component wordt gemeten en aangeduid. Verder: het aantal te onderscheiden conditieniveaus en de verdeling van deze niveaus over de conditieschaal.	
2.2.1.4	Veroudering
Het soort verouderingsproces van de component (corrosie, vermoeiing, carbonatisatie, krimp/kruip) met bijbehorende parameters.	
2.2.1.5	Kosten
Inspectie- en conditie-afhankelijke reparatiekosten, evenals faalkosten, die opgedeeld zijn in een vast bedrag en een tijdsafhankelijk deel. Verder kunnen conditieafhankelijke, tijdsafhankelijke exploitatiekosten opgegeven worden.	
2.2.1.6	Tijdsduren
De wachttijd tussen een inspectie en een eventueel daarop volgende reparatie, afhankelijk van de gemeten conditie.	
2.2.2	Verwijderen
De gekozen component wordt met bijbehorende gegevens weggegooid.	

Deel 3

3 REKENMODEL	
Van een systeem dat opgehaald is en waarvan de gegevens ingevoerd zijn, kunnen onderhoudsstrategieën doorgerekend en/of bepaald worden. Dit gebeurt per component en per onderhoudsconcept. Alvorens daadwerkelijk te gaan rekenen moet worden aangegeven welke component het betreft, welk type onderhoudsstrategie en met welk rentepercentage gerekend moet gaan worden. In eerste instantie moet een component gekozen worden:	
3a Component ophalen	
Nadat de component gekozen is, aangeven welke berekening uitgevoerd moet gaan worden:	
3.1 Opties Rekenmodel	
Hierbij moet aangegeven worden het rentepercentage waarmee gerekend gaat worden:	
1 Rentepercentage	Indien een rentepercentage "0" wordt ingevuld, dan worden de gemiddelde kosten per jaar berekend. Indien een rentepercentage groter dan nul wordt ingevuld, dan worden de totale gediscoteerde kosten bepaald.
Verder aangeven volgens welk onderhoudsconcept een strategie berekend gaat worden:	
2.1 Toestandsafhankelijke strategie	
2.1.1 Optimale strategie	
2.1.2 Gegeven strategie	
2.2 Gebruiksafhankelijke strategie	
2.2.1 Optimale strategie	
2.2.2 Gegeven strategie	
2.3 Storingsafhankelijke strategie	
In elk van de gevallen worden gemiddelde kosten per jaar, dan wel de totale gediscoteerde kosten, en levensduur van de strategie bepaald. In 2.1.1 en 2.2.1 worden ook de parameters van de optimale strategie bepaald; in 2.1.2. en 2.2.2. moeten eerst de parameters van de strategie opgegeven worden.	

Deel 4

4 UITVOER	
Van een systeem dat opgehaald is en waarbij er reeds resultaten zijn, of als deze zo juist met behulp van hoofdfunctie 3: Rekenmodel bepaald (en bewaard) zijn, kunnen deze resultaten bekeken worden.	
4a Component ophalen	
4.1 Opties:	
1 Rentepercentage	
2.1 Toestandsafhankelijke strategie	
2.1.1 Optimale strategie	
2.1.2 Gegeven strategie	
2.2 Gebruiksafhankelijke strategie	
2.2.1 Optimale strategie	
2.2.2 Gegeven strategie	
2.3 Storingsafhankelijke strategie	
In elk van de gevallen worden de resultaten op het scherm getoond en is er de mogelijkheid om de gegevens op papier te printen en/of op een tekstfile te schrijven.	

Deel 5

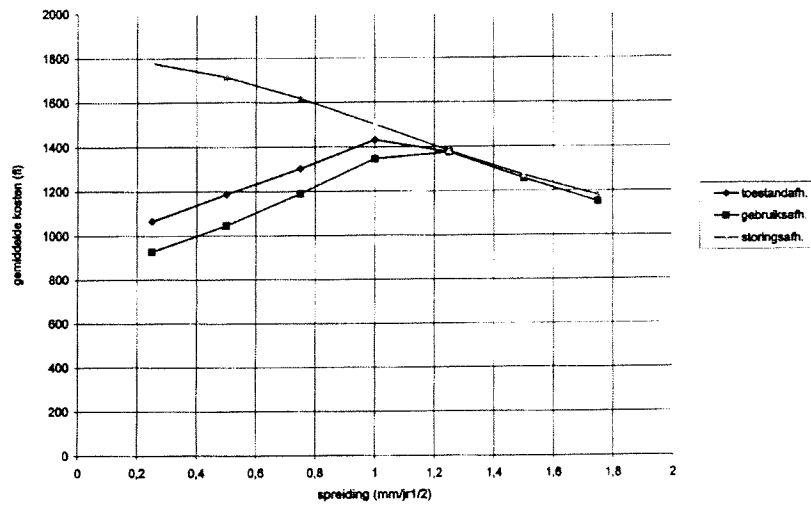
5 EINDE
Met deze optie sluit u de werkzaamheden met OPTIMON af. Nagegaan wordt of u de laatste gegevens al bewaard heeft; als dat niet zo is, dan wordt gevraagd of ze weggegooid, dan wel bewaard moeten worden. In het geval dat de gegevens bewaard moeten worden wordt gevraagd onder welke naam.

Bijlage 3 Uitwerking en analyse van de uitvoer in Optimon van het voorbeeld 'De Roestende staaf'.

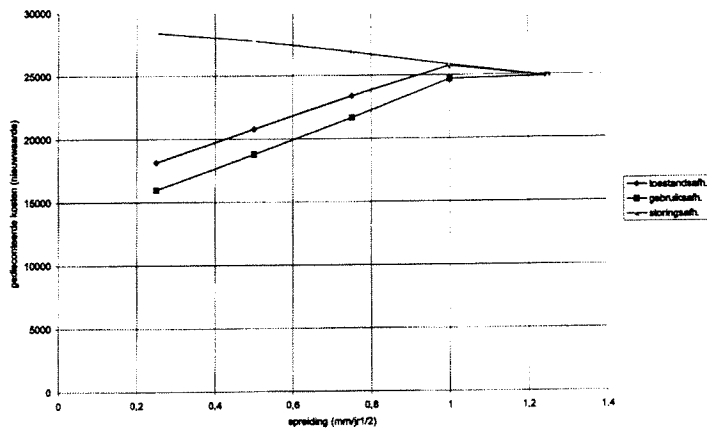
GRAFIEKEN VERKREGEN DOOR VARIATIE VAN INVOERPARAMETERS IN OPTIMON.

VARIATIE VAN DE SPREIDING (GRAFIEK 1 + 2 + 3)

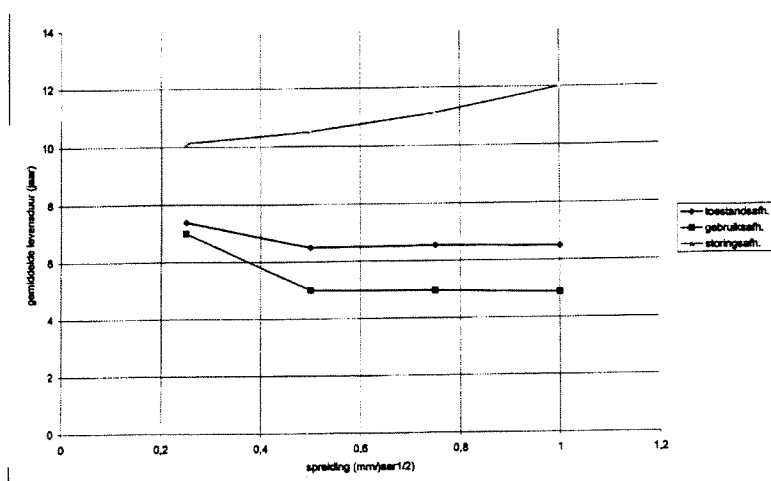
Grafiek 1



Grafiek 2

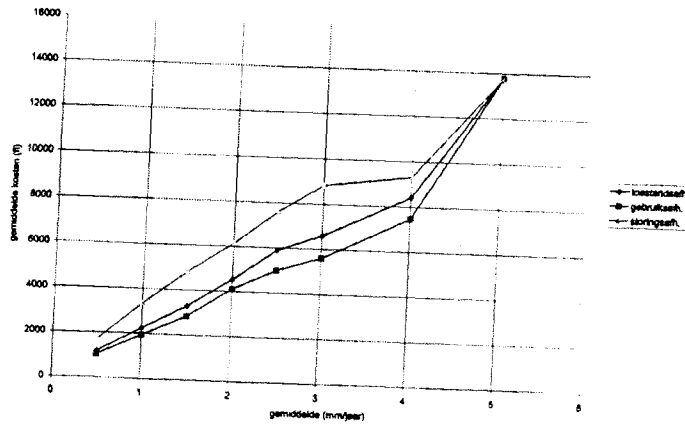


Grafiek 3

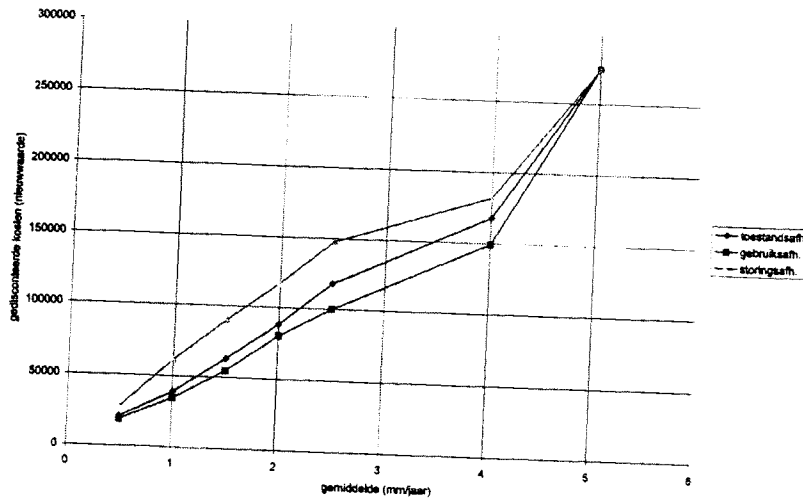


VARIATIE VAN HET GEMIDDELDE (GRAFIEK 4 + 5 + 6)

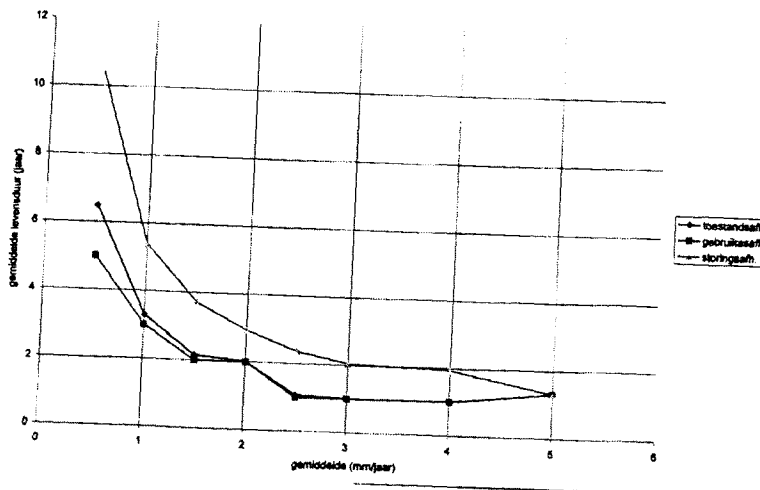
Grafiek 4



Grafiek 5

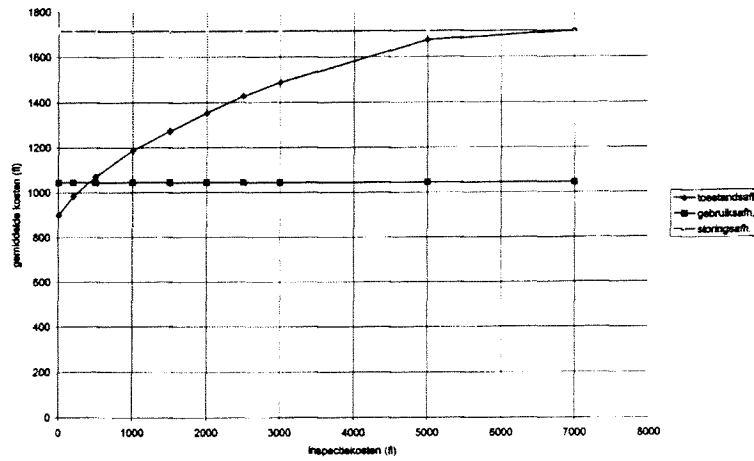


Grafiek 6

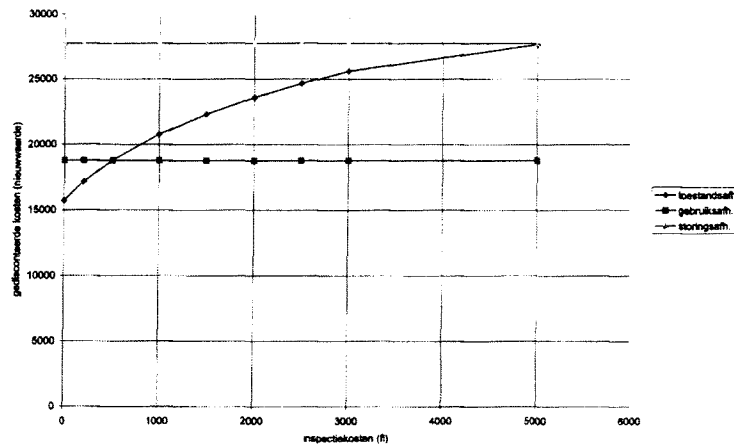


VARIATIE VAN INSPECTIEKOSTEN (GRAFIEK 7 + 8 + 9)

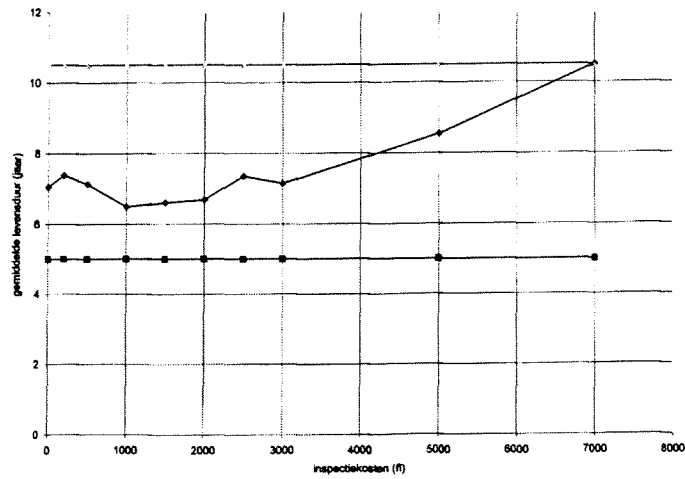
Grafiek 7



Grafiek 8

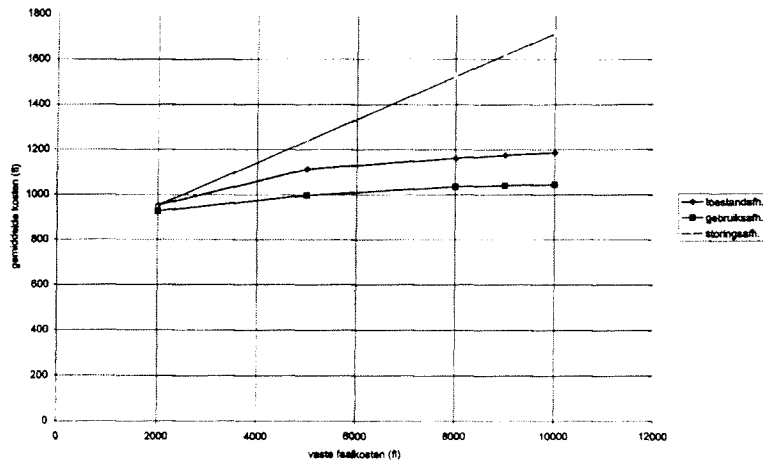


Grafiek 9

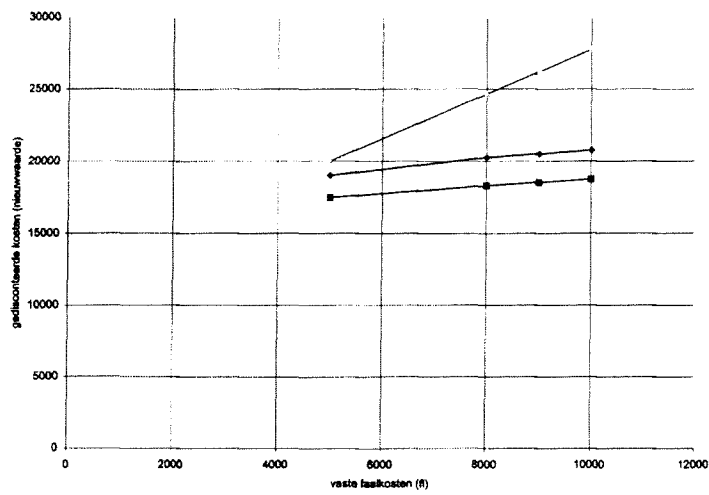


VARIATIE VAN VASTE FAALKOSTEN (GRAFIEK 10 + 11 + 12)

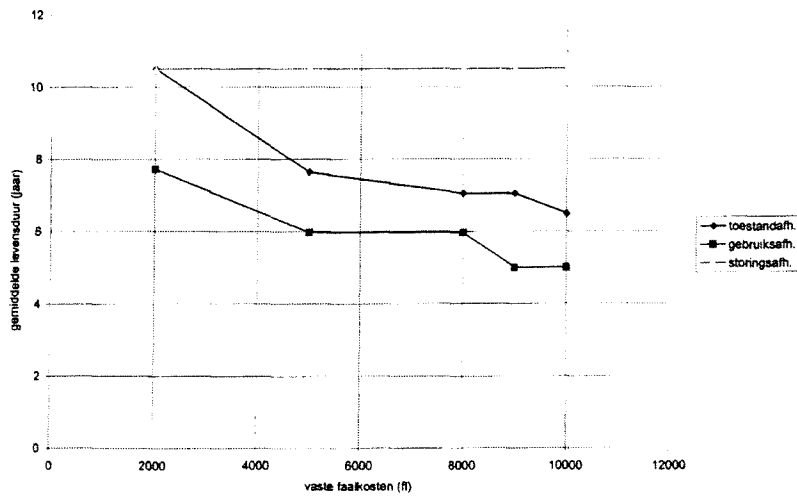
Grafiek 10



Grafiek 11

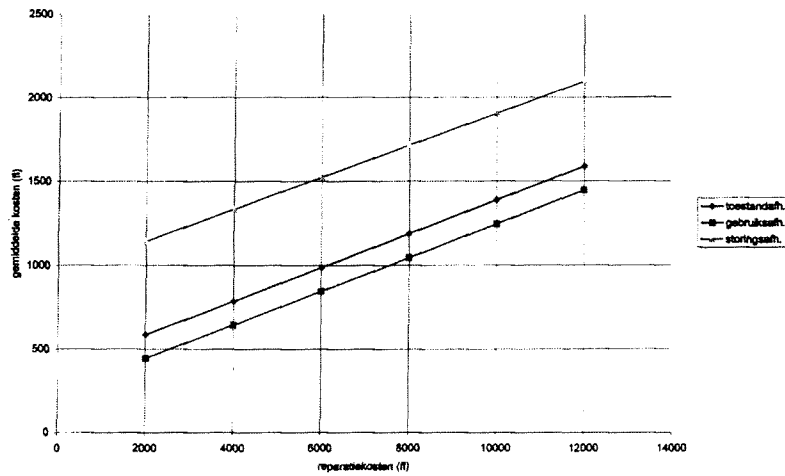


Grafiek 12

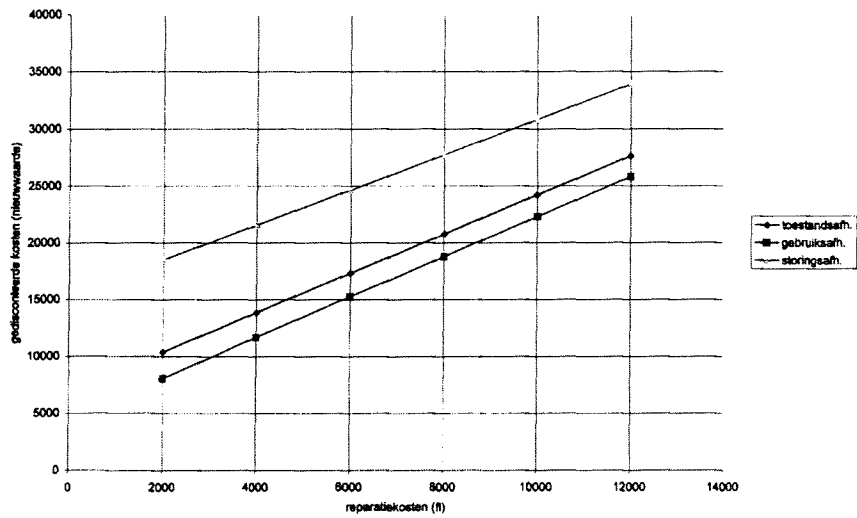


VARIATIE VAN REPARATIEKOSTEN (GRAFIEK 13 + 14 + 15)

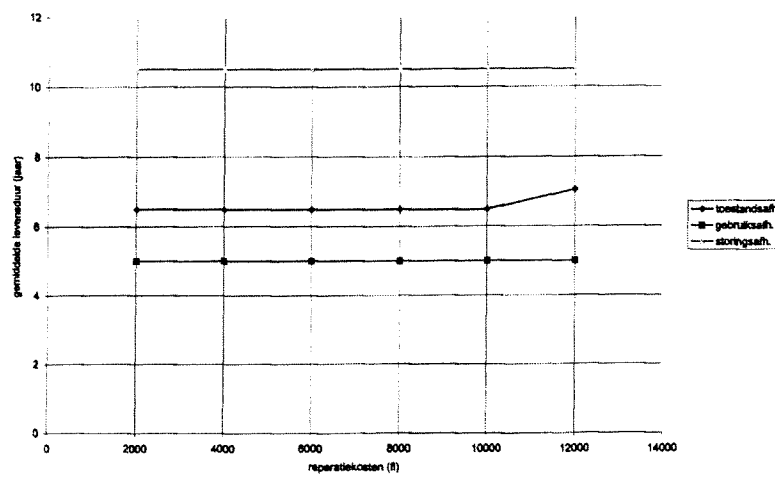
Grafiek 13



Grafiek 14

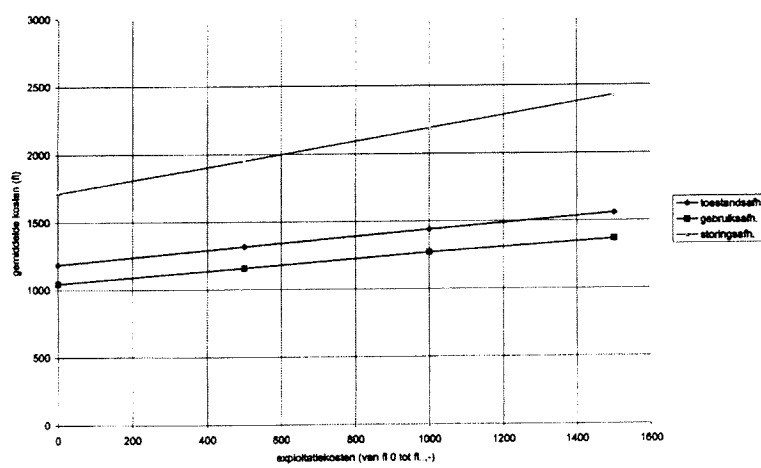


Grafiek 15

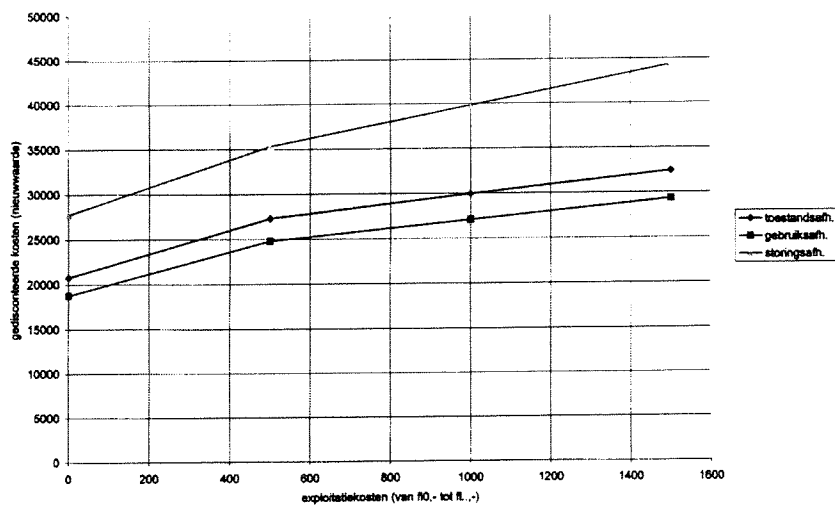


VARIATIE VAN EXPLOITATIEKOSTEN (GRAFIEK 16 +17 + 18)

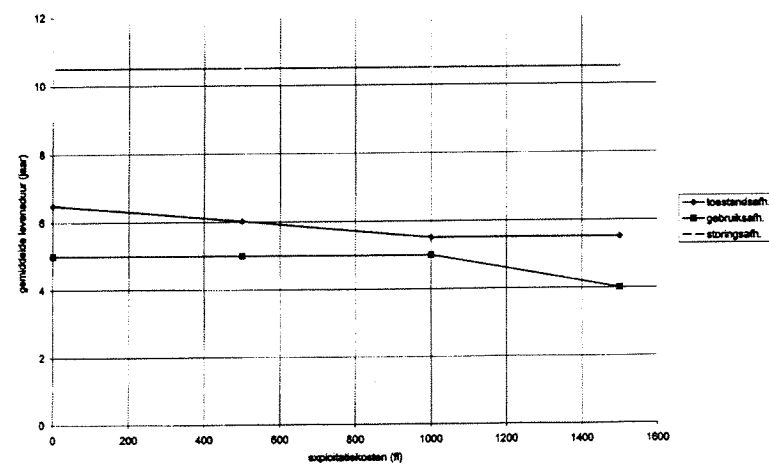
Grafiek 16



Grafiek 17

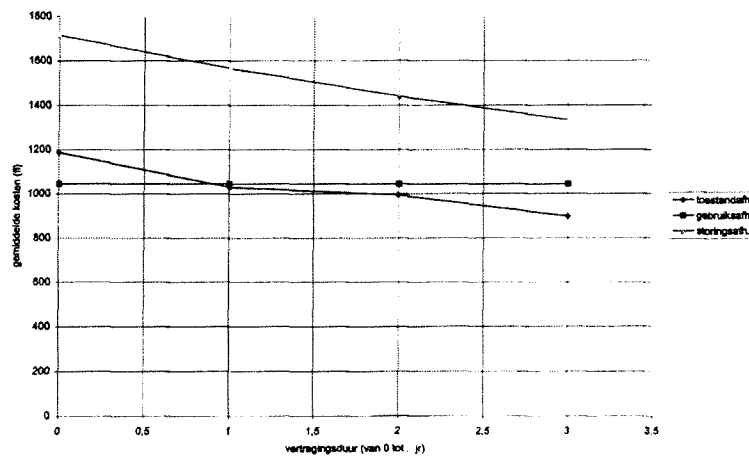


Grafiek 18

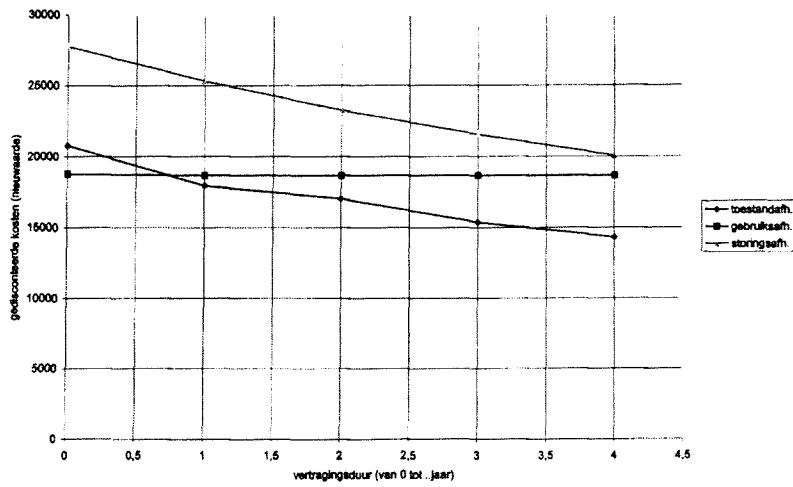


VARIATIE VAN VERTRAGINGSDUUR (GRAFIEK 19 + 20 + 21)

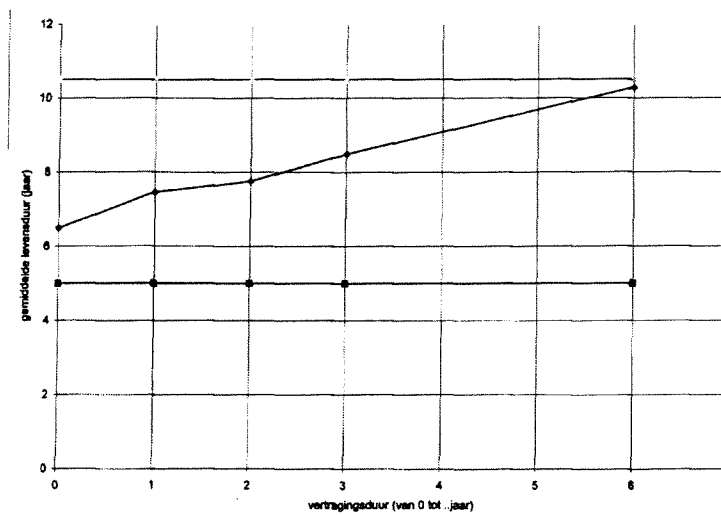
Grafiek 19



Grafiek 20



Grafiek 21



ANALYSE VAN GEGENEREERDE UITVOER

Het verloop van de uitkomsten van totale gediscoteerde kosten (met 5% waardedaling en gemiddelde jaarlijkse kosten) heeft hetzelfde verloop voor verschillende gevarieerde invoergegevens. Ofwel, er hoeft geen onderscheid tussen gemiddelde en gediscoteerde kosten gemaakt te worden. Het verschilt een factor 18 tussen elkaar. Vervolgens gaan we het verloop van de verschillende onderhoudstrategieën in de desbetreffende grafiek, ten opzichte van elkaar vergelijken en afhankelijk de levensduur vergelijken.

De staaf heeft de grootste levensduur als de strategie sao is. Dit is logisch omdat in dat geval de component in het verste degradatiestadium met langste levensduur, namelijk falen mag komen.

Een lagere gemiddelde levensduur doet voor alle drie verschillende strategieën de gemiddelde jaarlijkse kosten evenredig stijgen.

Optimon berekent met de ingevoerde gegevens de meest optimale periode voor het vervangen van de component bij gao. Zodoende is de strategie gao altijd de meest geschikte strategie om de laagste gemiddelde kosten te krijgen met de daarvoor langste levensduur. Tevens worden kosten bespaard omdat bij de strategie sao inspectiekosten worden gemaakt, die bij de strategie gao niet nodig zijn.

Vergelijk variatie van de spreiding (grafiek 1 + 2 + 3):

- SAO Als de spreiding groter wordt is het onzekerder wanneer de staaf is doorgeroest. Voor de strategie sao betekent een grotere spreiding een eventuele grotere kans om langer mee te gaan. De gemiddelde levensduur stijgt. Hierdoor worden de gemiddelde jaarlijkse kosten lager bij grotere spreiding.
- GAO EN TAO Bij grotere spreiding is de kans groter dat de component moet worden afgekeurd na gebruik of bij inspectie. De gemiddelde jaarlijkse kosten zullen dus stijgen. Bij spreidingen tussen 0,25 en 0,50 mm/ $\sqrt{\text{jaar}}$ wordt het effect van hogere gemiddelde jaarlijkse kosten versterkt door een daling van de gemiddelde levensduur.

Vergelijk variatie van het gemiddelde (grafiek 4 + 5 + 6):

- SAO, TAO EN GAO Een stijging van de gemiddelde hoeveelheid roest die ontstaat per jaar doet de gemiddelde jaarlijkse kosten stijgen. De gemiddelde levensduur van de staaf loopt exponentieel af. In de werkelijkheid is een gemiddelde roestvorming van 5 mm/jaar niet redelijk. Voor het voorbeeld is hiermee wel gerekend. Duidelijk is te zien dat door de grootte van de spreiding de gemiddelde levensduur boven de 1 ligt bij 5 mm/jaar roestvorming.

Vergelijk variatie van inspectiekosten (grafiek 7 + 8 + 9):

- TAO Alleen bij deze strategie wordt na een aantal tijdseenheden geïnspecteerd. Hierdoor zal een vergroting van de inspectiekosten hogere gemiddelde kosten opleveren.

Vergelijk variatie van vaste faalkosten (grafiek 10 + 11 + 12):

- SAO Bij deze strategie wordt gewacht tot de component faalt. Vergroting van de vaste faalkosten geeft direct hogere gemiddelde jaarlijkse kosten. De levensduur blijft hierbij natuurlijk constant.
- TAO EN GAO Een vergroting van de vaste faalkosten laat een kleine stijging zien van de gemiddelde jaarlijkse kosten. Omdat er onzekerheid aanwezig is dat ook hier een component faalt, wordt de kans van falen steeds meer verkleint naarmate de vaste faalkosten toeneemt. Optimon blijft naar de meest optimale waarde van gemiddelde jaarlijkse kosten zoeken. Een verkleining van de kans wordt bewerkstelligd door de gemiddelde levensduur te verkleinen.

Vergelijk variatie van reparatiekosten (grafiek 13 + 14 + 15):

- SAO, TAO EN GAO Een toename van de jaarlijkse reparatiekosten geeft een toename van de gemiddelde jaarlijkse kosten. De gemiddelde levensduur is constant.

Vergelijk variatie van exploitatiekosten (grafiek 16 + 17 + 18):

- SAO, TAO EN GAO Een toename van de jaarlijkse exploitatiekosten geeft een toename van de gemiddelde jaarlijkse kosten. De gemiddelde levensduur blijft nagenoeg constant.

Vergelijk variatie van vertragingsduur (grafiek 19 + 20 + 21):

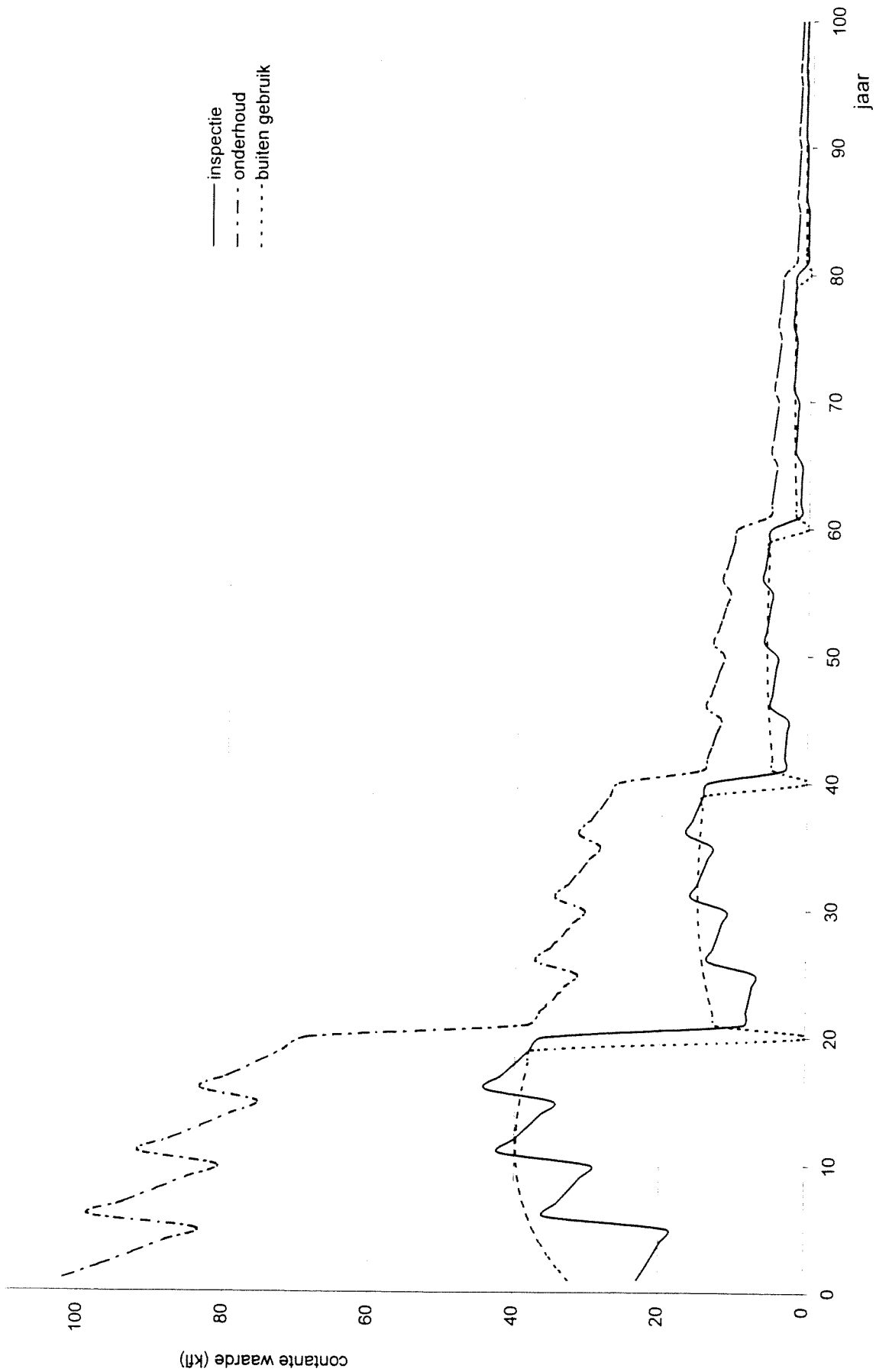
- SAO De gemiddelde kosten gaan omlaag, omdat door de vertragingsduur het enige tijd duurt voordat de component vervangen wordt waardoor er tot enige tijd na falen geen kosten worden gemaakt. De gemiddelde levensduur blijft constant.
- GAO Na een vooraf gegeven gebruik wordt de component vervangen. Er is geen vertragingsduur, dus de gemiddelde kosten blijven constant bij vergroting van de vertragingsduur. Dit geldt ook voor de gemiddelde levensduur.
- TAO Bij grotere vertragingsduren zal de staaf een langere tijd blijven functioneren. Hierdoor zullen de gemiddelde kosten dalen en de gemiddelde levensduur stijgen. Omdat bij falen vaste faalkosten in rekening wordt gebracht zullen de gemiddelde kosten per jaar niet veel afnemen.

Bijlage 4

De kosten en bijbehorende contante waarde van de periodieke
 beheerwerkzaamheden (inspectie, onderhoud en buiten gebruik) voor
 scenario 3. Renovatie vindt om de 20 jaar plaats.

jaar	kosten		kosten		kosten	
	inspectie	contante waarde	onderhoud	contante waarde	buiten gebruik	contante waarde
1	24	23	107	102	34	33
2	24	22	107	97	37,4	34
3	24	21	107	92	40,8	35
4	24	20	107	86	44,2	36
5	24	19	107	84	47,6	37
6	48	36	132	99	51	38
7	48	34	132	94	54,4	39
8	48	32	132	89	57,8	39
9	48	31	132	85	61,2	39
10	48	29	132	81	64,6	40
11	72	42	157	92	68	40
12	72	40	157	87	71,4	40
13	72	38	157	83	74,8	40
14	72	36	157	79	78,2	39
15	72	35	157	76	81,6	39
16	96	44	182	83	85	39
17	96	42	182	79	88,4	39
18	96	40	182	76	91,8	38
19	96	38	182	72	95,2	38
20	96	36	182	69	0	0
21	24	9	107	38	34	12
22	24	8	107	37	37,4	13
23	24	8	107	36	40,8	13
24	24	7	107	33	44,2	14
25	24	7	107	32	47,6	14
26	48	13	132	37	51	14
27	48	13	132	36	54,4	15
28	48	12	132	34	57,8	15
29	48	12	132	32	61,2	15
30	48	11	132	31	64,6	15
31	72	16	157	35	68	15
32	72	15	157	33	71,4	15
33	72	14	157	31	74,8	15
34	72	14	157	30	78,2	15
35	72	13	157	28	81,6	15
36	96	17	182	31	85	15
37	96	16	182	30	88,4	15
38	96	15	182	29	91,8	14
39	96	14	182	27	95,2	14
40	96	14	182	26	0	0
41	24	3	107	14	34	5
42	24	3	107	14	37,4	5
43	24	3	107	13	40,8	5
44	24	3	107	13	44,2	5
45	24	3	107	12	47,6	5
46	48	5	132	14	51	5
47	48	5	132	13	54,4	5
48	48	5	132	13	57,8	6
49	48	4	132	12	61,2	6
50	48	4	132	12	64,6	6
51	72	6	157	13	68	6
52	72	6	157	12	71,4	6
53	72	5	157	12	74,8	6
54	72	5	157	11	78,2	6
55	72	5	157	11	81,6	6
56	96	6	182	12	85	6
57	96	6	182	11	88,4	5
58	96	6	182	11	91,8	5
59	96	5	182	10	95,2	5
60	96	5	182	10	0	0
61	24	1	107	5	34	2
62	24	1	107	5	37,4	2
63	24	1	107	5	40,8	2
64	24	1	107	5	44,2	2
65	24	1	107	4	47,6	2
66	48	2	132	5	51	2
67	48	2	132	5	54,4	2
68	48	2	132	5	57,8	2
69	48	2	132	5	61,2	2
70	48	2	132	4	64,6	2
71	72	2	157	5	68	2
72	72	2	157	5	71,4	2
73	72	2	157	4	74,8	2
74	72	2	157	4	78,2	2
75	72	2	157	4	81,6	2
76	96	2	182	4	85	2
77	96	2	182	4	88,4	2
78	96	2	182	4	91,8	2
79	96	2	182	4	95,2	2
80	96	2	182	4	0	0
81	24	0	107	2	34	1
82	24	0	107	2	37,4	1
83	24	0	107	2	40,8	1
84	24	0	107	2	44,2	1
85	24	0	107	2	47,6	1
86	48	1	132	2	51	1
87	48	1	132	2	54,4	1
88	48	1	132	2	57,8	1
89	48	1	132	2	61,2	1
90	48	1	132	2	64,6	1
91	72	1	157	2	68	1
92	72	1	157	2	71,4	1
93	72	1	157	2	74,8	1
94	72	1	157	2	78,2	1
95	72	1	157	2	81,6	1
96	96	1	182	2	85	1
97	96	1	182	2	88,4	1
98	96	1	182	2	91,8	1
99	96	1	182	1	95,2	1
100	96	1	182	1	98,6	1
Totaal	6000	1048	14450	2719	6735,6	1150

Grafiek waarin de contante waarde van de periodieke beheerwerkzaamheden (inspectie, onderhoud en buiten gebruik) voor scenario 3 uitgezet zijn tegen het levensjaar van de geboorte tunnel. Renovatie vindt om de 20 jaar plaats.



Bijlage 5 De kosten en bijbehorende contante waarde voor scenario 3 van de renovatiewerkzaamheden (inspectie, onderhoud en buiten-gebruik), die om de 20 jaar plaatsvinden.

jaar	kosten		kosten		kosten	
	inspectie	contante waarde	onderhoud	contante waarde	buiten gebruik	contante waarde
1		0		0		0
2		0		0		0
3		0		0		0
4		0		0		0
5		0		0		0
6		0		0		0
7		0		0		0
8		0		0		0
9		0		0		0
10		0		0		0
11		0		0		0
12		0		0		0
13		0		0		0
14		0		0		0
15		0		0		0
16		0		0		0
17		0		0		0
18		0		0		0
19		0		0		0
20	2570	909	3856	1453	1020	384
21		0		0		0
22		0		0		0
23		0		0		0
24		0		0		0
25		0		0		0
26		0		0		0
27		0		0		0
28		0		0		0
29		0		0		0
30		0		0		0
31		0		0		0
32		0		0		0
33		0		0		0
34		0		0		0
35		0		0		0
36		0		0		0
37		0		0		0
38		0		0		0
39		0		0		0
40	2570	365	3856	548	1020	145
41		0		0		0
42		0		0		0
43		0		0		0
44		0		0		0
45		0		0		0
46		0		0		0
47		0		0		0
48		0		0		0
49		0		0		0
50		0		0		0
51		0		0		0
52		0		0		0
53		0		0		0
54		0		0		0
55		0		0		0
56		0		0		0
57		0		0		0
58		0		0		0
59		0		0		0
60	2570	138	3856	206	1020	56
61		0		0		0
62		0		0		0
63		0		0		0
64		0		0		0
65		0		0		0
66		0		0		0
67		0		0		0
68		0		0		0
69		0		0		0
70		0		0		0
71		0		0		0
72		0		0		0
73		0		0		0
74		0		0		0
75		0		0		0
76		0		0		0
77		0		0		0
78		0		0		0
79		0		0		0
80	2570	52	3856	78	1020	21
81		0		0		0
82		0		0		0
83		0		0		0
84		0		0		0
85		0		0		0
86		0		0		0
87		0		0		0
88		0		0		0
89		0		0		0
90		0		0		0
91		0		0		0
92		0		0		0
93		0		0		0
94		0		0		0
95		0		0		0
96		0		0		0
97		0		0		0
98		0		0		0
99		0		0		0
100		0		0		0
Totaal	6000	1523	15424	2285	4080	605

Grafiek waarin de contante waarde van de renovatiewerkzaamheden (inspectie, onderhoud en buiten-gebruik) in scenario 3 uitgezet zijn tegen het levensjaar van de geboorde tunnel. Renovatie vindt plaats om de 20 jaar.

