

Technische innovaties voor het verlagen van integrale kosten en milieubelasting

Nieuwe en bestaande civiele en werktuigbouwkundige
kunstwerken

Versiedatum: 27 mei 2003



D. Ros

NIO-A-N-200313

Syllabus n.a.v. het symposium op 3 april 2003

Technische Innovaties voor het verlagen van de integrale kosten en milieubelasting

Nieuwe en bestaande civiele en werktuigkundige kunstwerken

In deze syllabus worden mogelijkheden gegeven voor het verlagen van de integrale kosten en milieubelasting van civiele en werktuigkundige kunstwerken vanuit de ontwerpfase en tijdens de gebruiksfase.

Beschreven is hoe ontwerp- en onderhoudskeuzes gemaakt kunnen worden op basis van de integrale kosten gedurende de gehele gebruiksduur van het object.

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	5
1.1	Doelstelling en kader	5
1.2	Wat zijn integrale kosten?	5
1.3	Contante waarde (CW)	6
1.4	Praktijkproblemen	6
1.5	Mogelijkheden om de integrale kosten te verlagen	7
1.5.1	Technieken	7
1.5.2	Kennisoverdracht	7
1.5.3	Contractvorm met belang aannemer in onderhoudsarm ontwerp	7
2	Ontwerpvereenvoudiging: ontwerpen door weglaten	8
2.1	Glijgeleiding in plaats van wielgeleiding	8
2.2	Afdichtseisen glijafdichting	9
2.3	Glijfender	9
2.4	Vervalbelaste glijafdichting	9
2.5	Hydrogeleiding	10
2.5.1	Hydrovoeten	10
2.5.2	Hydrofenders	10
2.6	Tribologische eigenschappen	11
2.6.1	Tribowaarden van translerende glijvlakken	11
2.6.2	Tribowaarden van glijlagers in wielgeleidingen	12
2.6.3	Wrijvingscoëfficiënt, gemiddelde, standaardafwijking en bovenwaarde	12
2.6.4	Wrijvingscoëfficiënt en lagercoëfficiënt volgens praktijkmetingen	13
2.7	Visco-elastische indrukking van UHMPE	13
3	Beschermmogelijkheden van staal tegen corrosie	14
3.1	Aluminium deklagen als alternatief voor verflagen	14
3.1.1	Toepassingen	14
3.1.2	Werking van de alulaag	14
3.1.3	Laagdikte, milieu en beschermduur	15
3.1.4	Alulagen bij staal/betonovergangen	15
3.2	Kathodische bescherming van staal (in combinatie met een alulaag)	15
4	Vezelversterkte kunststof (VVK)	16
5	Sterkteweefsels voor flexibele waterkeringen	17
6	Zeer hogesterktebeton (B85...B200)	18
6.1	Algemeen	18
6.2	Damwand	18
6.3	Beweegbare brug	19
6.4	Rijdek van een beweegbare brug	19
6.5	Schuiven voor stormvloedkeringen	20
7	Vangkabels van kunststof	21
7.1	Staalkabel	21
7.2	Kunststof vangkabel	21
8	Kostenvergelijkingen	23
8.1	Glijgeleiding versus wielgeleiding	23
8.2	Damwandvarianten	23
8.3	Schuifvarianten Stormvloedkering Oosterschelde	25
8.4	Verfspuiten versus aluminiseren	25

9	Vermindering milieubelasting en milieuvergelijkingen	27
9.1	Vermindering milieubelasting door ontwerpvereenvoudiging	27
9.2	Milieuvergelijkingen	27
9.2.1	Milieuvergelijking remmingwerken	27
9.2.2	Milieuvergelijking toegangsbrug binnenhaven Noordland	28
9.2.3	Milieuvergelijking verfspuiten of aluminiseren roldeur 5	28
10	Samenvatting en conclusies	29
10.1	Samenvatting	29
10.1.1	Zeer hogesterktebeton	29
10.1.2	Vezelversterkte kunststof	29
10.1.3	Stalen constructiedelen	29
10.1.4	Flexibele keringen	29
10.1.5	Kunststof vangkabels	30
10.2	Conclusies	30
11	Literatuurvermelding	31

1 Inleiding

1.1 Doelstelling en kader

In deze syllabus zijn een aantal mogelijkheden beschreven om de integrale kosten en milieubelasting van nieuwe en bestaande civiele constructies te verlagen.

De informatie in deze syllabus past in het kader van LCCM: Life Cycle Cost Management. Hierbij wordt gestreefd om keuzes van ontwerp- en materiaalvarianten objectief te maken op basis van de contante waarde van de integrale kosten die in de gehele levensduur en bij het afdanken van het object zullen worden gemaakt.

Ook tijdens de gebruiksfase van objecten is het kostenbesparend om onderhoudskeuzes alsnog te baseren op de contante waarde van de integrale kosten.

1.2 Wat zijn integrale kosten?

Met de integrale kosten wordt hier bedoeld het totaal van de:

1. Ontwerpkosten inclusief de kosten van het ontwerpbestek.
2. Bouwkosten.
3. Onderhoudskosten en bijkomende montagekosten ten behoeve van het onderhoud.
4. De bedrijfskosten. Dit zijn de kosten voor het maken van het onderhoudsbestek, het begeleiden van de uitvoering van het onderhoud, het uitvoeren van milieumaatregelen en de indirecte kosten die het gevolg zijn van het onderhoud zoals het realiseren van (vaar)wegafzettingen, enzovoort. De bedrijfskosten keren bij iedere onderhoudsactie terug.
5. Economische en maatschappelijke kosten, bijvoorbeeld door omvaren indien een sluis voor onderhoud wordt stilgelegd. Deze kosten kunnen vaak niet worden achterhaald en meegenomen, maar zijn er wel.
6. Kringloopkosten en milieueffecten bij het afdanken of hergebruiken, voorzover die in kosten kunnen worden uitgedrukt.

Uit praktijkervaring blijkt dat met name de bedrijfskosten, waaronder de kosten voor milieumaatregelen, een groot deel uit kunnen maken van de integrale kosten. De integrale kosten worden getotaliseerd over de gehele verwachte ontwerplevensduur of (rest)levensduur.

De ontwerper legt de kiem voor deze kosten. In de gebruiksfase kunnen technische innovaties voor het verlagen van de integrale kosten vaak alsnog worden toegepast.

De onderhoudsvrije periode van objecten heeft grote invloed op de integrale kosten. Hoe langer deze is, hoe groter het onderhoudsinterval kan zijn. Het aantal malen dat de onderhouds- en bedrijfskosten uitgegeven moeten worden gedurende de levensduur van het object, kan dan dalen. Dit betekent dat een duurdere variant bij het bouwen over de totale levensduur gezien toch goedkoper kan te zijn.

1.3 Contante waarde (CW)

Een toekomstige investering is lager dan een investering vandaag, ook als daar dezelfde werkzaamheden tegenover staan. Geld dat in de toekomst wordt uitgegeven, kan nu op de spaarbank worden gezet of voor andere investeringen worden gebruikt die in de tussentijd extra geld opbrengen. Kapitaliseren is dus het verlagen van de toekomstige investering met de rente van dat bedrag vanaf nu totdat de investering werkelijk gedaan wordt.

Weliswaar zet de overheid het bedrag niet tegen rente op de spaarbank. De overheid investeert. Er wordt echter van uitgegaan dat de investering hetzelfde rendement oplevert.

Toekomstige kosten van varianten die vergeleken gaan worden, moeten worden teruggekapitaliseerd naar heden zoals hieronder is aangegeven. Deze teruggekapitaliseerde waarde wordt de Contante – tegenwoordige - Waarde (CW) genoemd: dit is het bedrag dat nu (fictief) tegen 4% wordt uitgezet om de toekomstige kosten mee te kunnen betalen. Dit “disconto” wordt door het ministerie van financiën vastgesteld.

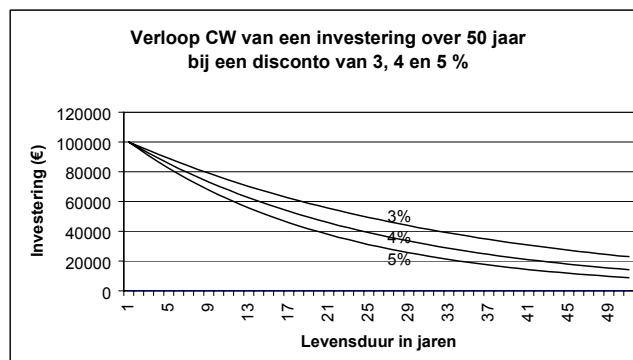
De CW van een bepaalde investering laat zich als volgt berekenen:

$$CW = X / (1+r/100)^N, \text{ waarin:}$$

X = Grootte van de investering
r = Disconto 4%
N = Voorziena tijdstip van de investering jaren

Voorbeelden	Investering (€)	Na (jaren)	Disconto %	CW (€)
1	100 000,-	10	4	67 556,-
2	100 000,-	25	4	37 512,-
3	100 000,-	50	4	14 071,-

Uit het onderstaande voorbeeld bij 3% (bovenste lijn), 4% (middelste lijn) en 5% (onderste lijn) blijkt dat de CW van een investering lager wordt naarmate het investeringsmoment verder in de toekomst ligt.



1.4 Praktijkproblemen

De technische innovaties die in deze syllabus zijn beschreven, zijn veelal geïnspireerd door praktijkproblemen bij bewegende en vaste civiele constructies:

- Onderling bewegende grensvlakken van beweegbare waterkeringen slijten of roesten vast.

- Grensvlakken van stalen constructiedelen worden aangetast door corrosie.

De gevolgen van deze aantastingen zijn:

- Aanzienlijke onderhouds-, bedrijfs- en maatschappelijke kosten.
- Hogere onderhoudsfrequentie.
- Vermindering van de beschikbaarheid en betrouwbaarheid (storingen).

1.5 Mogelijkheden om de integrale kosten te verlagen

1.5.1 Technieken

De ontwerper legt de kiem voor de integrale kosten van de constructie. Het is het meest effectief om technieken voor het verlagen van deze kosten direct in de ontwerpfase toe te passen. De meeste van deze technieken kunnen in de gebruiksfase alsnog worden toegepast, zie de onderstaande tabel.

Technieken voor verlaging van de integrale kosten (Zie beschrijving van deze technieken in de volgende hoofdstukken)	Toepasbaar in de	
	ontwerp- fase	gebruiks- fase
1. Ontwerpvereenvoudiging	Ja	Ja
2. Staal geleverd (referentie)	Ja	Ja
3. Staal met diktetoeslag zonder conservering, na circa 20 jaar alsnog te conserveren met een alulaag boven water en kathodische bescherming in water	Ja	Ten dele
4. Staal gealuminiseerd	Ja	Ja
5. Staal boven water gealuminiseerd en onder water kathodisch beschermd met opofferingsanoden (KBOA) of met opgedrukte stroom (KBOS)	Ja	Ja
6. Vezelversterkte kunststof (VVK)	Ja	Ten dele
7. Weefselversterkt rubber (balg- en klepstuwen)	Ja	Nee
8. Zeer hogesterktebeton	Ja	Ten dele

1.5.2 Kennisoverdracht

Kennisoverdracht is onder meer mogelijk met:

- De Checklist Productverbetering [2].
- Interne en externe ontwerpaanbevelingen, zie de literatuurlijst.

De Checklist Productverbetering is een "levend" document met aanbevelingen voor ontwerpers en beheerders. Deze aanbevelingen zijn opgesteld naar aanleiding van praktijkproblemen. Doel van deze Checklist is het voorkomen van ontwerpfouten en het realiseren van productverbetering.

Doordat het maken van het ontwerp en het uitvoeren van onderhoud steeds meer aan de markt wordt overgelaten, komt benutting van praktijkervaringen van beheerders door ontwerpers in het gedrang. Daarom moet kennis voor het verlagen van de integrale kosten in ontwerpaanbevelingen worden vastgelegd en aan de markt ter beschikking worden gesteld. De "kenniscirkel" voor het leren van fouten en het verlagen van de integrale kosten moet in stand blijven, ook als de markt ontwerpt.

1.5.3 Contractvorm met belang aannemer in onderhoudsarm ontwerp

De aannemer heeft belang bij het ontwerpen en bouwen van een constructie met lagere integrale kosten indien hij ook offreert voor de onderhoudskosten gedurende een aanzienlijke periode van minstens 15 jaar.

2 Ontwerpvereenvoudiging: ontwerpen door weglaten

Als onderdelen weggelaten kunnen worden, levert dit een dubbele besparing op: een besparing op zowel de bouw- als de onderhoudskosten. Bovendien neemt de betrouwbaarheid van de constructie daardoor toe.

2.1 Glijgeleiding in plaats van wielgeleiding

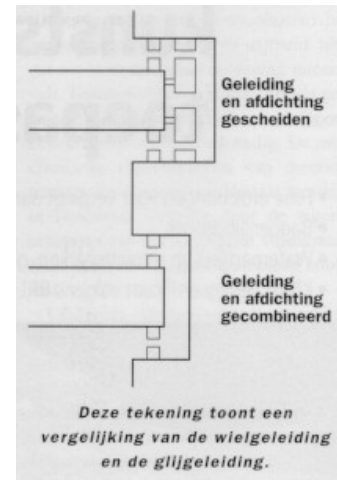
Bij bewegende constructies zoals hefschuiven, hefdeuren en "rol" deuren is ontwerpvereenvoudiging mogelijk door deze niet rijdend, maar glijdend te geleiden of ondersteunen. Geleiding en afdichting kunnen daardoor worden geïntegreerd in de "glijafdichting". Het aantal bewegende onderdelen (onder water) neemt af naar nihil, en daarmee de onderhoudskosten. Bovendien is de nisconstructie hierbij eenvoudig en goedkoop.

Het glijdend geleiden is mogelijk met het wrijvingsarme en slijtvaste UHMPE (Ultra Hoog Moleculair Polyetheen) als glijbaan op het vaste – meestal het betonnen deel - van de constructie, in combinatie met de roestvaststalen glijder die zich bij voorkeur op het bewegende deel van de constructie bevindt. In dit hoofdstuk zijn wrijvings- en slijtagewaarden ("tribowaarden") van materiaalcombinaties opgenomen.

Plaatsing van de roestvaststalen glijder op het bewegende deel van de constructie heeft de volgende voordelen:

- De edeler oppervlakte is dan kleiner: het edeler roestvaststaal moet volledig geïsoleerd worden van het onderliggende staal om galvanische corrosie daarvan te voorkomen.
- De glijder komt dan regelmatig boven water. Daardoor neemt de kans op spleetcorrosie van het roestvaststaal af tot nihil.

Toelichting: roestvaststaal is eigenlijk zuurstofbehoevend staal. Zuurstof is nodig om de beschermende oxidehuid in stand te houden. De hoeveelheid zuurstof in spleten die zich continu in water bevinden, is binnen één tot enkele weken opgebruikt waarna het roestvaststaal begint te roesten.



2.2 Afdichteisen glijafdichting

Bij hoge afdichteisen van de beweegbare waterkering kan de beweegbare waterkering kan de glijbaan van UHMPE smal worden uitgevoerd, zie de bijgaande foto. Een controle op slijtage en de afvoer van wrijvingswarmte is noodzakelijk [33].



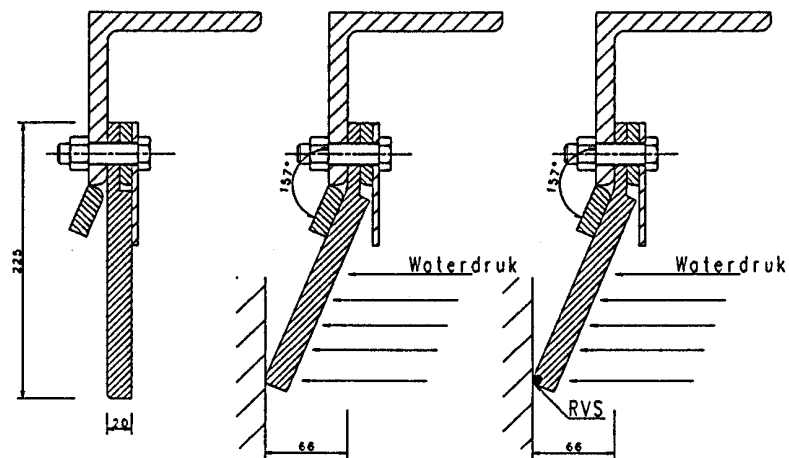
2.3 Glijfender

Indien een glijdende en verende afdichting gewenst is, bijvoorbeeld bij translerende glijafdichtingen, onderafdichtingen met dwarsverplaatsingen en voor het afdichten van enkele draaideuren, kan gebruik worden gemaakt van het "glijfender", een combinatie van een rubber afdichtprofiel met een aangesmolten wrijvingsarme toplaag van UHMPE.



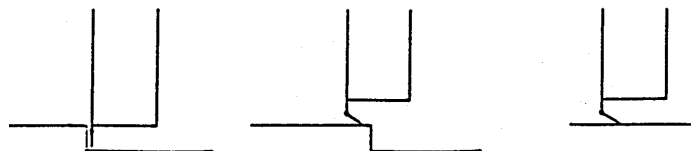
2.4 Vervalbelaste glijafdichting

Voor het realiseren van een glijafdichting die door het verval wordt aangedrukt tegen het afdichtvlak, kan de bijgaande vervalbelaste glijafdichting van UHMPE worden gebruikt, bijvoorbeeld als verende plaat van glij- en roldeuren. Indien het afdichtvlak van UHMPE is, dient de afdichtrand van RVS te worden uitgevoerd, zie de rechtse schets.



Toestand in rust Aangedrukte toestand RVS neus bij loopvlak van UHMPE

De vervalbelaste glijafdichting kan ook gebruikt worden als onderafdichting van puntdeuren zonder drempel. De effectieve kolkhoogte kan daardoor toenemen.



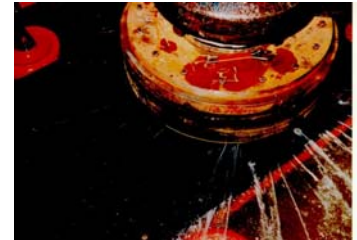
2.5 Hydrogeleiding

2.5.1 Hydrovoeten

In plaats van rolwagens kunnen "hydrovoeten" worden gebruikt voor het ondersteunen van sluisdeuren. De hydrovoeten zorgen ervoor dat de sluisdeur glijdt over een dunne waterfilm. De hydrobaan is van UHMPE. Het aantal bewegende delen onder water daalt daardoor sterk. Daar staat tegenover dat er een pompinstallatie nodig is. Deze is echter onderhoudbaar in de glijdeur.

Redenen om de hydrobaan niet van roestvaststaal, maar van UHMPE te maken zijn:

1. Onvlakheden en beschadigingen van een hydrobaan van UHMPE nemen tijdens de passages van de hydrovoet af door vervorming en slijtage.
2. Onvlakheden van een roestvaststaal hydrobaan nemen nauwelijks af.
3. Bij beschadiging van een roestvaststaal hydrobaan - bijvoorbeeld door een anker - zou deze als schaaft werken en de hydrovoet bij elke passage afslijten.
4. Een roestvaststaal hydrobaan zou galvanische corrosie van het omringende staal veroorzaken en zelf door spleetcorrosie kunnen worden aangetast. Daarom wordt permanente toepassing van roestvaststaal in water zoveel mogelijk vermeden.



2.5.2 Hydrofenders

Hydrofenders zijn langwerpige hydrovoeten. Hydrofenders kunnen grotere belastingen opnemen dan hydrovoeten. Bovendien kunnen hydrofenders door hun langwerpige vorm deel uitmaken van de afdichting van waterkeringen.

Hydrofenders kunnen worden toegepast voor het ondersteunen en geleiden van sluisdeuren, scheepsliften, translerende bruggen en megatransporten in het algemeen. In het kader van het onderzoek



Hydrocontact is een ontwerpprogramma voor hydrovoeten en hydrofenders ontwikkeld. Een promotieonderzoek met betrekking tot hydrogeleiding werd in december 2002 voltooid.

2.6 Tribologische eigenschappen

Tribologie is de wetenschap en kennis met betrekking tot wrijving, slijtage en smering bij onderling bewegende contactvlakken.

2.6.1 Tribowaarden van translerende glijvlakken

In de volgende tabel zijn f (wrijvingscoëfficiënt) en k (slijtfactor) van UHMPE in combinatie met materialen met verschillende oppervlakteruwheden weergegeven. De wrijvingskracht in een glijvlak kan worden berekend door de normaalkracht op het glijvlak te vermenigvuldigen met de wrijvingscoëfficiënt. De slijtage kan worden berekend door de slijtfactor k (mm^2/N) te vermenigvuldigen met de glijweg en de gemiddelde vlaktedruk.

De gegevens in deze tabel gelden bij de volgende conditie en parameters:

- In water.
- Een vlaktedruk van $2,5 \text{ N/mm}^2$.
- Een glijsnelheid van 10 mm/s .
- Een temperatuur lager dan 70°C .
- De opgegeven oppervlakteruwheid van de glijvlakken.

De oppervlakteruwheid van het hardere glijvlak heeft meer invloed op de tribowaarden dan het glijvlakmateriaal zelf. Bij een hogere vlaktedruk en bij een lagere glijsnelheid gelden lagere wrijvingscoëfficiënten, en andersom.

Materiaalcombinaties	Slijtfactor k (mm^2/N) ^	Wrijvingscoëfficiënt			Ruw- heid Ra (μm)
		f	fs	fso	
UHMPE / RVS	$4 \cdot 10^{-9}$ / $? \cdot 10^{-9}$	0,15	0,15	0,16	0,4
UHMPE / Alulaag op staal	$4 \cdot 10^{-9}$ / $0,3 \cdot 10^{-9}$	0,15	0,15	0,16	0,4
UHMPE / Azobé	$3 \cdot 10^{-9}$ / $10 \cdot 10^{-9}$	0,17	0,18	0,20	0,8
UHMPE / Verzinkt staal	$20 \cdot 10^{-9}$ / $1 \cdot 10^{-9}$	0,18	0,19	0,22	1,6
UHMPE / Graniet geboord	$35 \cdot 10^{-9}$ / nihil	0,19	0,20	0,23	2,0
UHMPE / Staal ongeroest	$40 \cdot 10^{-9}$ / nihil	0,20	0,21	0,24	2,5
UHMPE / Staalkabel vet	$40 \cdot 10^{-9}$ / nihil	-	-	-	-
UHMPE / Beton glad	$65 \cdot 10^{-9}$ / nihil	0,21	0,23	0,27	3,2
UHMPE / Staal geroest	$160 \cdot 10^{-9}$ / nihil	0,22	0,25	0,34	6,3
UHMPE / Beton ruw	$230 \cdot 10^{-9}$ / nihil	0,23	0,27	0,42	10,0

Opmerkingen bij de tabel:

- f: de dynamische wrijvingscoëfficiënt.
- fs: de statische wrijvingscoëfficiënt in de voorgaande glijrichting.
- fso: de statische wrijvingscoëfficiënt bij het omkeren van de glijrichting onder belasting (tegen de vezelrichting in). N.B.: schuttschuiven worden onder vervalbelasting geheven, maar dalen onbelast.
- Een temperatuurcontrole dient altijd te worden uitgevoerd [33].
- Bepalend voor de belastbaarheid van UHMPE is niet de vlaktedruk, maar de temperatuurstijging door wrijvingswarmte en de indrukking onder belasting.

De formule voor het berekenen van de indrukking van UHMPE onder belasting is weergegeven in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk.

2.6.2 Tribowaarden van glijlagers in wielgeleidingen

De kunststof lagerbus draait om de stilstaande metalen as. De contacthoek is circa 60°. Daarom moet er voor het berekenen van de slijtage van glijlager en as van worden uitgegaan dat de glijweg van de as circa zes maal zo groot als de glijweg van het glijlager. Als referentie zijn de tribologische eigenschappen genoemd van de vroeger gebruikelijke materiaalcombinatie Brons / Staal

De gegevens in deze tabel gelden onder de volgende condities en parameters:

- In water.
- Vlaktedruk circa 2 N/mm².
- Glijnsnelheid 100 mm/s.
- Temperatuur kleiner dan 70 °C.
- Onderstaande oppervlakteruwheid van de glijvlakken.

Materiaalcombinaties	Slijtfactor k (mm ² /N) ^	Wrijvings- coëfficiënt f (-)	Ruw- heid Ra (µm)
UHMPE / insmeltlegering ni-cr	1,1*10 ⁻⁹ / 0,1 *10 ⁻⁹	0,14	0,4
UHMPE / Insmeeltlegering ni-cr-wo	2,3*10 ⁻⁹ / 0,01*10 ⁻⁹	0,14	0,4
UHMPE / Staal geroest	1,9*10 ⁻⁹ / 0,3 *10 ⁻⁹	0,18	0,8
Referentiecombinatie Brons / Staal geroest	312*10 ⁻⁹ / 5,0 *10 ⁻⁹	0,38	proces- ruwheid

2.6.3 Wrijvingscoëfficiënt, gemiddelde, standaardafwijking en bovenwaarde

Uit een groot aantal wrijvingscoëfficiënten van UHMPE in combinatie met een glijvlakruwheid van 0,4 µm Ra zijn gemiddelde, standaardafwijking en bovenwaarden bepaald. De kans dat de wrijvingscoëfficiënt kleiner dan of gelijk is aan de volgende bovenwaarden, is respectievelijk 90, 95, 99 en 99,9%. Omdat bij glijgeleidingen en glijafdichtingen van (bijvoorbeeld) beweegbare waterkeringen alleen de bovenwaarden kritisch zijn, is gekozen voor eenzijdige betrouwbaarheidsintervallen.

Gemiddelde en standaardafwijking van de wrijvingscoëfficiënt van UHMPE zonder regeneraat als functie van de glijnsnelheid in combinatie met een oppervlakteruwheid van het samenwerkende metalen glijvlak van circa 0,4 µm Ra en bij de onderstaande conditie en parameters. De wrijvingscoëfficiënten onder natte conditie zijn lager.

Conditie	Vlaktedruk p (N/mm ²)	Glijnsnelheid v (mm/s)	Wrijvings coëfficiënt (f)		Wrijvings coëfficiënt (f)				Aantal n (-)
			Gemiddelde (u) (-)	Standaardafwijking (s) (-)	Boven waarden (z)				
					z(90%)	z(95%)	z(99%)	z(99,9%)	
Droog	1...50	0,01	0,084	0,013	0,100	0,105	0,114	0,124	8
Droog	1...50	0,1	0,093	0,010	0,106	0,110	0,117	0,124	8
Droog	1...50	0,7...3,5	0,098	0,012	0,114	0,118	0,126	0,135	12
Droog	1...50	10	0,113	0,017	0,136	0,142	0,154	0,167	9
Droog	1...50	100	0,136	0,017	0,158	0,164	0,176	0,188	8
Droog totaal	1...50	0,01...100	0,104	0,022	0,133	0,141	0,157	0,173	45

De wrijvingscoëfficiënt daalt met de glijnsnelheid. Dankzij deze eigenschap is de kans op stickslip nihil.

2.6.4 Wrijvingscoëfficiënt en lagercoëfficiënt volgens praktijkmetingen

Bij metingen aan de glijdeuren van de Prins Willem Alexandersluis in Schellingwoude zijn de beweegkrachten gemeten. Indien de hydrovoeten zonder waterfilm – dus rechtstreeks – over de hydrobaan glijden, is de wrijvingscoëfficiënten circa 0,1. Met watersmeerfilm bedraagt de verhouding tussen de wrijvingsweerstand en de verticale belasting op de hydrovoet - de "lagercoëfficiënt" - circa 0,01.

Door hydrogeleiding dalen wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor met tenminste een factor 10.

Wrijvingscoëfficiënt zonder hydrogeleiding Lagercoëfficiënt met hydrogeleiding	Slijtfactor k mm ² /N Hydrovoet / Hydrobaan RVS / UHMPE	Wrijvings- coëfficiënt f -	Ruwheid glijvlak in glijrichting Ra (µm)
Zonder hydrogeleiding	? *10 ⁻⁹ / 4*10 ⁻⁹	0,10	0,4
Met hydrogeleiding	1*10 ⁻⁹ / 0,4*10 ⁻⁹	<0,01	0,4

De k-waarde van het RVS-glijvlak van de hydrovoet blijkt relatief groot te zijn door de combinatie van oxidatie door het langsstromende water en slijtage (oxidatieve slijtage). Met behulp van een corrosievaste thermische spuitlaag met wolframcarbides kan deze aanzienlijk worden vermindert.

2.7 Visco-elastische indrukking van UHMPE

Het indrukkingsgedrag van UHMPE kan bij benadering worden beschreven met de formule [23]:

$$I = p \left(A + B \log \frac{tb}{tr} \right) \%$$

waarin:

- I = de procentuele indrukking van het materiaal onder belasting.
- p = de gemiddelde vlaktedruk (N/mm²).
- A = een constante voor het elastische deel van de vervorming (mm²/N).
- B = een constante voor het visco-elastische deel van de vervorming (mm²/N).
- tb = de gesommeerde belastingstijd in minuten (miniaal 1 minuut).
- tr = referentietijd: 1 minuut.

Voor UHMPE geldt: A = 0,25 en B = 0,1 zodat I = p (0,25 + 0,1 log t) %, mits het belaste onderdeel rond of rechthoekig is en de oppervlakte volledig wordt belast. Indien de vorm langwerpig is (zoals bij glijstrippen vaak het geval is), dan halveert de indrukking. Indien slechts een deel van de oppervlakte wordt belast, dan vermindert de indrukking aanzienlijk. Indien het onderdeel is ingekamerd, dan geldt de formule voor het niet-gekamerde deel.

3 Beschermmogelijkheden van staal tegen corrosie

Veel beweegbare en vaste constructies van Rijkswaterstaat zijn van staal en worden geconserveerd met een verfcoating. Jaarlijks worden daaraan toegevoegd. In het ontwerpstadium dient een integrale kostenvergelijking te worden gemaakt tussen ontwerpen van staal en alternatieven en tussen conserveringssystemen met een organisch verfsysteem en alternatieven.

Naast de organische verflagen worden bij Rijkswaterstaat in hoofdzaak de volgende beschermmogelijkheden tegen corrosie van staal gebruikt:

- Thermisch gespoten aluminium deklagen als alternatief voor en in combinatie met een verfsysteem op staalconstructies en werktuigonderdelen [19].
- Kathodische beschermssystemen.
- Overige thermisch gespoten deklagen op werktuigonderdelen (deze worden hier niet besproken).

De eisen die aan de thermische spuitlagen worden gesteld, zijn vastgelegd in de Eisen Thermische Spuitlagen, NBD 10300 [6] conceptversie oktober 2002 of hoger.



3.1 Aluminium deklagen als alternatief voor verflagen

3.1.1 Toepassingen

De "alulaag" kan worden gebruikt voor het beschermen tegen corrosie van staalconstructies en stalen werktuigonderdelen zoals pen/gatverbindingen [25,27,29,32]. De alulaag kan na gladlijpen ook worden gebruikt als glijvlak voor glijlagers van kunststof [28].



3.1.2 Werking van de alulaag

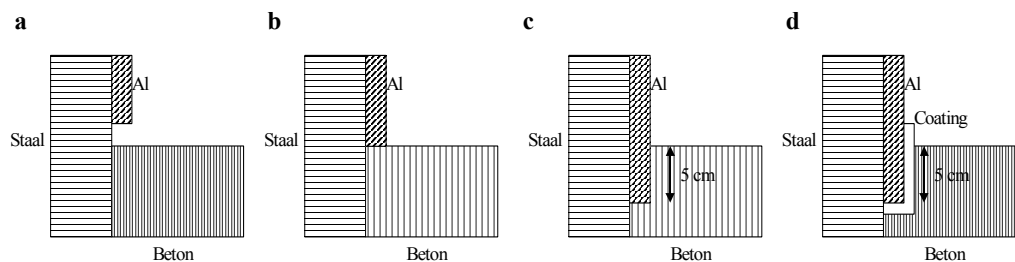
De alulaag is onedeler dan het onderliggende staal, beschermt daardoor kathodisch en offert zichzelf daarbij op, net zoals de zinklaag. De lange beschermduur van de alulaag is het gevolg van de vorming van aluminiumoxiden die de poriën verstoppen en de alulaag vrijwel volledig afsluiten. Daardoor neemt de oplosnelheid af tot een zeer lage waarde.

3.1.3 Laagdikte, milieu en beschermduur

De beschermduur van de alulaag neemt toe met de laagdikte. De laagdikteafname is in zeewater circa 1...5 μm per jaar, in zoet water een decade lager, en in lucht minder dan 0,1 μm per jaar [25,29]. Bij het kiezen van de laagdikte moet van een minimale laagdikte van 200 μm worden uitgegaan. Een dunnere laag geeft kans dat oxiden de poriën niet afsluiten en dat het staal daardoor roest.

3.1.4 Alulagen bij staal/betonovergangen

Bij contact van de alulaag met vloeibaar beton wordt waterstofgas gevormd [14]. Het waterstofgas kan waterstofbroosheid veroorzaken bij ingebetonneerd staal dat onder hoge spanning staat. Bovendien wordt het beton ter plaatse van de vorming van het waterstofgas poreus. Bij gealuminiseerde overgangen van staal naar beton kan contact met vloeibaar beton worden voorkomen door het betreffende deel van de alulaag vooraf te coaten [13].



3.2 Kathodische bescherming van staal (in combinatie met een alulaag)

Het natte deel van stalen constructiedelen in zeewater en zoetwater kan kathodisch worden beschermd. Kathodische bescherming van staal kan worden onderscheiden in:

- Kathodische bescherming door middel van opoffering van een minder edel metaal. Hiervoor werden vanouds zinkanoden gebruikt. Vanwege de belasting van het milieu door zinkemissie worden tegenwoordig aluminiumanoden gebruikt [3]. Om afsluiting van het anode-oppervlak door de vorming van de oxidehuid te voorkomen, worden aluminiumanoden gelegeerd met bijvoorbeeld indium.
- Kathodische bescherming door middel van opgedrukte stroom. Bij dit beschermingsysteem zijn geen opofferingsanoden nodig. De potentiaal van het te beschermen object wordt zodanig verlaagd dat corrosie wordt belet. Dit beschermingsysteem vraagt een voortdurende elektrische energie.

In het rapport "Kathodische beschermingsystemen voor stalen damwand" [18] worden techniek en kosten van beide systemen beschreven.

De meeste stalen constructiedelen in water bevinden zich voor een deel boven water. Het "droge" deel boven water kan niet kathodisch worden beschermd. In principe is het mogelijk om dat deel te beschermen met de alulaag. De gealuminiseerde overgangszone in water kan in principe zodanig kathodisch worden beschermd dat de alulaag niet wordt aangetast.

4 Vezelversterkte kunststof (VVK)

Vezelversterkte kunststoffen (VVK) zijn - mits juist gekozen en deskundig vervaardigd – langdurig chemisch resistent in een maritiem milieu. De kleur bevindt zich door het materiaal heen zodat cosmetisch onderhoud beperkt kan zijn. Meestal domineert de stijfheid van de constructie het ontwerp. Als gevolg daarvan kan VVK economisch zijn bij constructies die wel sterk, maar niet stijf behoeven te zijn zoals (schut)schuiven, sluisdeuren, drijvende remmingwerken, zelfopdrijvende waterkeringen en loopbruggen. Het lage gewicht ten opzichte van staal kan daarbij een voordeel zijn.

De mate waarin producten van VVK resistent zijn tegen veroudering in water, kan worden onderzocht door middel van versnelde veroudering van representatieve monsters in water bij 60 °C volgens NEN 7037. Met de resultaten van deze test is een voorspelling van de mechanische eigenschappen na een veroudering van 50 jaar mogelijk [7].

Kennis over de eigenschappen en het ontwerpen van constructies in VVK is recent vastgelegd in de volgende publicaties:

- VM-publicatie 119 in 2000 [24].
- CUR-ontwerpaanbeveling en achtergrondrapport C124: “VVK in civiele draagconstructies” [1]. Deze ontwerpaanbeveling zal worden uitgebreid. Voor dit vervolgetraject wordt deelname gezocht vanuit het bedrijfsleven.

Puntdeuren van de Spieringsluis in VVK



Trappen, looproosters en leuning van VVK



5 Sterkteweefsels voor flexibele waterkeringen

De meest voorkomende flexibele stuwen en waterkeringen zijn balgstuwen en klepstuwen. Een balgstuw is een afgesloten flexibele slang verbonden aan de bodem van de waterloop, die in gevulde toestand in staat is om water te keren. In lege toestand wordt het balgdoek door natuurlijke waterdruk opgeborgen op de bodem van de waterloop.



Balgstuwen worden gemaakt van weefselversterkt rubber. Het balgdoek krijgt de vereiste sterkte door middel van vulcanisatie aan sterkteweefsel, meestal van polyamide. De ervaring met balgstuwen uit polyamideversterkt weefsel bestaat reeds tientallen jaren. Polyamide is een geschikt materiaal gebleken vanwege de grote rek bij breuk in combinatie met een betrekkelijk grote sterkte. Krachtsconcentraties in het balgdoek door discontinuïteiten langs de inklemming blijven daardoor beperkt.

In het buitenland worden balgstuwen meestal gebruikt voor het beheersen en regelen van het waterpeil en zijn daarbij meestal gevuld met water of lucht. De drie balgstuwen bij Ramspol (functioneel in vanaf 2002) worden gebruikt als stormvloedkering en bevinden zich daarom meestal op de bodem van de waterloop. Voorafgaand aan het keren worden de balgstuwen gevuld met zowel water als lucht.

De klepstuw is een betonnen of metalen klep, scharnierbaar aan de bodem van de waterloop – ondersteund met een lucht- of watergevulde kussens van balgdoek. Indien de klepstuw is neergelaten, is het balgdoek opgeborgen onder de klep.

In principe lijkt het ook mogelijk om balgdoek te maken van weefselversterkt polyurethaan. Het sterkteweefsel wordt met vloeibaar polyurethaan dichtgegoten. Na uitharding van het polyurethaan is het sterkteweefsel waterdicht en bruikbaar als balgdoek. Nader onderzoek is nodig naar de hechting van het polyurethaan aan het rubber, met name ter plaatse van de inklemming.



6 Zeer hogesterktebeton (B85...B200)



Roeiboot 'De Zeemeeuw'
een duurzame beton-
constructie uit 1887 en nog
altijd intact te Sas van Gent

6.1 Algemeen

Door het beschikbaar komen van betonsoorten met een zeer hoge sterkte kunnen betonconstructies relatief licht worden uitgevoerd. Daardoor zijn nieuwe toepassingen in beton mogelijk geworden [17]. Dankzij de hoge dichtheid van het beton is een zeer lange onderhoudsvrije periode mogelijk. De eigenschappen ten aanzien van vermoeiing, kruip en krimp werden recent onderzocht door de TU Delft in het kader van het Bouwdienstonderzoek Maritiem Beton [4,12].

Onderhouds- en vermoeiingsgevoelige constructies of delen daarvan die tot nu toe van staal worden gemaakt, kunnen in principe van beton worden uitgevoerd. Hierbij kan onder meer gedacht worden aan vaste waterkeringen zoals damwand, beweegbare waterkeringen zoals sluisdeuren en hefschuiven, en ook aan beweegbare bruggen zoals de ophaalbrug.

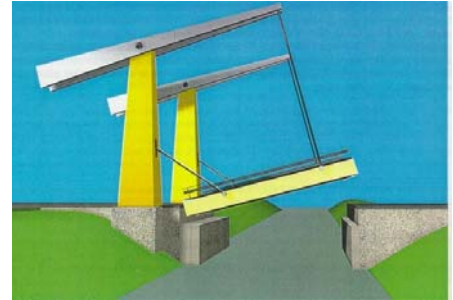
6.2 Damwand

Damwand maakt een niet onaanzienlijk deel uit van de civiele constructies die Rijkswaterstaat ontwerpt, beheert en onderhoudt. Vanouds werd damwand ontworpen in staal. Betonnen damwand wordt steeds meer toegepast. De onderhoudskosten van met name stalen damwand in zeewater zijn hoog als gevolg van aantasting door corrosie. Het beschermen van damwand tegen corrosie vindt meestal plaats door periodiek verven, al of niet in combinatie met kathodische bescherming. Ook wordt damwand met diktetoeslag gebruikt, al of niet in combinatie met een verfsysteem. Zie in het betreffende hoofdstuk een integrale kostenvergelijking van damwandvarianten.



6.3 Beweegbare brug

Een beweegbare brug van B200 is technisch en financieel haalbaar. Dit volgt uit voorontwerp [20,22] en uit materiaalonderzoek aan B200. De massa van het betonnen val zal met 25 tot 30% toenemen ten opzichte van het stalen val. Het betonnen deel van de brug is vrijwel onderhoudsvrij. Doordat de kleur zich in het materiaal bevindt, kan het onderhoud beperkt blijven tot periodiek schoonspuiten. De slijtlaag is ook van B200. Door de slijtvastheid van B200 blijft de aangebrachte ruwheid bestaan. Vervanging van de slijtlaag is daardoor niet nodig.



6.4 Rijdek van een beweegbare brug

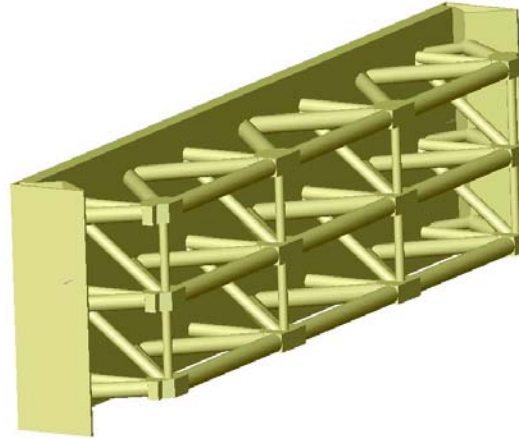
Houten rijdeken van beweegbare bruggen vragen veel onderhoud. Vervanging door een rijdek van B200 is recent gerealiseerd. De oppervlakte van het betonnen rijdek is voldoende ruw om als duurzame slijtlaag te fungeren.



6.5 Schuiven voor stormvloedkeringen

Uit diverse onderzoeken blijkt dat het technische en economisch haalbaar is om schuiven zoals die van de stormvloedkering Oosterschelde in zeer hogesterktebeton uit te voeren [8,15,26]. De vakwerkconstructie lijkt veel op die van de huidige stalen schuiven. Deze is gunstig, onder meer ten aanzien van de massa, hydraulische belastingen en eigen trilling van de schuif [15].

Schuif voor de stormvloedkering Oosterschelde in B200

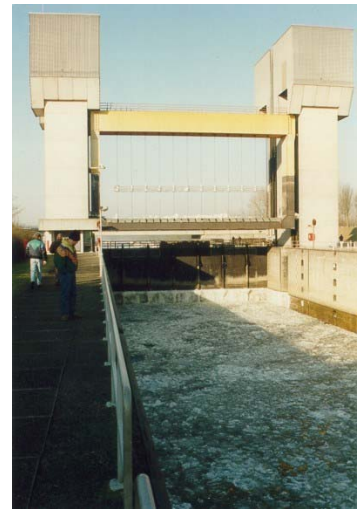


In het betreffende hoofdstuk is een integrale kostenvergelijking opgenomen van schuifvarianten voor de Stormvloedkering Oosterschelde.

7 Vangkabels van kunststof

7.1 Staalkabel

Kenmerkend voor de vangconstructies voor schepen is dat de vangkabel zelf (vrijwel) geen energie vernietigt. De kinetische energie van het af te remmen schip wordt per staalkabel vernietigd door een speciale reminstallatie. Dit kan een hydraulische cilinder zijn, een hydromotor of een mechanische wrijvingsrem. Afhankelijk van de situatie en het sluisdeurtype kan de reminstallatie zich bevinden in een speciale (kelder)ruimte of meebewegen met de sluisdeur die beschermd moet worden zoals bij hefdeuren. Voor het verticaal bewegen zijn dan speciale heftorens nodig, zoals bij de Duwvaartsluizen Wijk bij Duurstede en Tiel. Het aanbrengen van een vangconstructie met bijbehorende reminstallatie is meestal ingrijpend omdat bouwtechnische voorzieningen nodig zijn. Zeker voor bestaande sluisen kan dit een belemmerende factor zijn.



7.2 Kunststof vangkabel

De kinetische energie van het af te remmen schip wordt in een kunststof kabel gedeeltelijk opgeslagen als elastische energie en gedeeltelijk gedissipeerd door plastische vervorming.

Het belangrijke verschil met de stalen vangkabel is dat de kunststof vangkabel zelf de kinetische energie van het schip ten dele opneemt en ten dele vernietigt. Er is bij gebruik van kunststof vangkabels geen speciale reminstallatie nodig. Bouwkundige voorzieningen zijn daardoor minder ingrijpend dan bij stalen vangkabels. Daarom is de kunststof vangkabel eenvoudiger aan te brengen dan de stalen vangkabel met een afzonderlijke reminstallatie. Door het ontbreken daarvan is er in principe geen onderhoud nodig. De exploitatiekosten van de kunststof vangkabel kunnen hierdoor lager zijn dan bij de traditionele vangconstructie. Aangevaren kabels moeten in principe moeten vervangen.

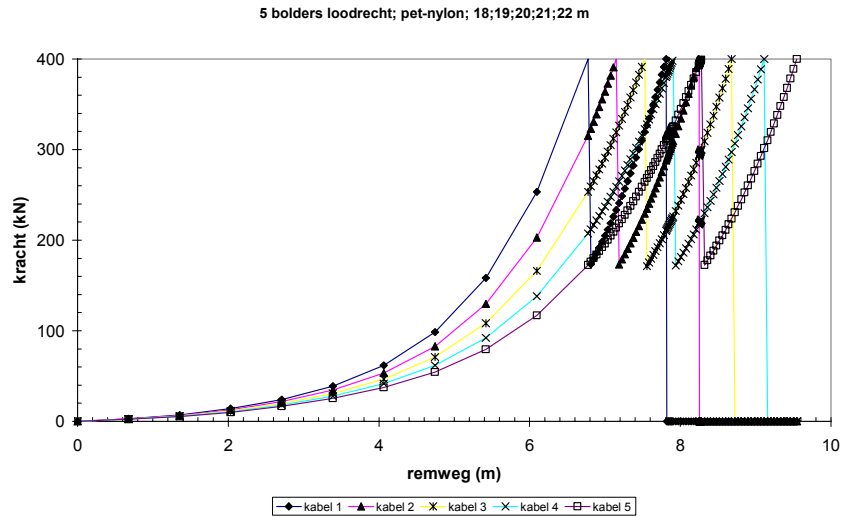


De kunststof vangkabel op deze foto bevindt zich in een stalen omhulling.

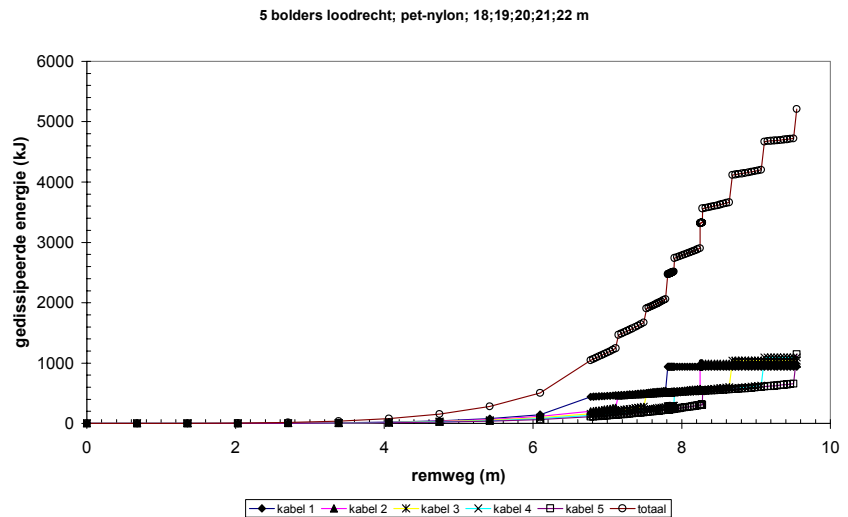
De kinetische energie van het schip wordt vernietigd door meerdere vangkabels die achtereenvolgens worden uitgerekt tot breuk. De kabels bevinden zich schuin onder elkaar zodat de kabels enigszins na elkaar door de scheepsboeg worden geraakt en de effectieve lengte van de kolk toch grotendeels behouden blijft. Terugslaan wordt voorkomen door het toegepaste weefstelsysteem en een omhullingsbuis van polyetheen.

Met voor dit doel ontwikkeld een geïkt rekenprogramma kunnen de diameter en de materiaalsamenstelling van de vangkabel worden bepaald [9,21].

Kracht versus remweg bij vijf vangkabels van polyester en nylon.



Energie versus remweg bij vijf vangkabels van polyester en nylon.



8 Kostenvergelijkingen

8.1 Glijgeleiding versus wielgeleiding

Het glijdend in plaats van rijdend geleiden van constructies leidt tot vermindering van de ontwerp- bouw- en onderhoudskosten. De vermindering van de ontwerpkosten – voornamelijk als gevolg van de eenvoud van de glijgeleiding - is in het onderstaande voorbeeld niet meegenomen.

Het onderstaande voorbeeld betreft de glijafdichting van de Volkerak Inlaatsluis. De gewichtskracht van wielen en afdrukinrichting is groter dan de wrijvingskracht in de glijafdichting.

Kosten	Wielgeleiding	Glijgeleiding
Bouwkosten (€)	6 miljoen	50 000,-
Onderhouden per jaar (€)	50 000,-	nihil

8.2 Damwandvarianten

Door de bekendheid met nieuwe materialen en technieken is het mogelijk om de integrale kosten van damwand te verlagen. Voor het maken van een objectieve afweging zijn de integrale gekapitaliseerde kosten van bestaande en nieuwe damwandvarianten met elkaar vergeleken, [16]. Deze varianten zijn:

1. Staal met verf.
2. Staal met diktetoeslag, na 20 jaar alsnog beschermd met een thermisch gespoten aluminium deklaag (een alulaag) boven water en met kathodische bescherming met opofferingsanoden (KBOA) onder water.
3. Staal met een alulaag op de voorzijde van de damwand, tot aan de bodem.
4. Staal met een alulaag boven water en KBOA onder water.
5. Staal met een alulaag boven water en KBOS (kathodische bescherming met opgedrukte stroom) onder water.
6. Beton B65.
7. Beton B200.

In de onderstaande tabel zijn de integrale kosten van damwandvarianten weergegeven. In de twee laatste kolommen zijn de kosten contant gemaakt. De kosten van de B200 zijn gebaseerd op het prijspeil van 2000.

INTEGRALE KOSTEN DAMWANDVARIANTEN Versie 21-8 2000	20 jaar	50 jaar	20 jaar	50 jaar
	€/ m2	€/ m2	€/ m2	€/ m2
File Damwandvarianten integrale kosten.xls	Zonder rente		CW bij 4%	
Staal geverfd, m=155 kg/m2	308	584	256	343
Staal met diktetoeslag, m=194, resp. 215 kg/m2	142	153	142	153
Staal met alulaag op voorzijde	163	173	163	173
Staal met alu boven water en KBOA			166	182
Staal met alu boven water en KBOS			180	185
Beton B85, m=560 kg/m2	125	125	125	125
Beton B200, m=240 kg/m2	296	296	296	296

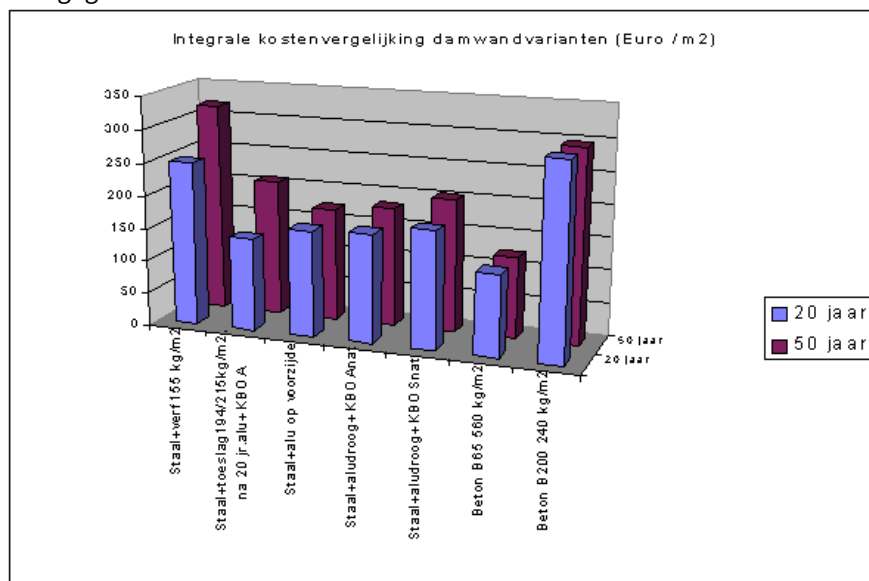
In deze vergelijking zijn de kosten voor het verwijderen en eventueel hergebruiken van damwand niet meegenomen. Ook is hier niet ingegaan op praktische mogelijkheden en beperkingen die gelden bij beton B65 ten aanzien van het inbrengen, het afdichten en het praktijkgedrag bij botsingen. De technische mogelijkheden met de veel lichtere damwand van B200 zijn veelbelovend. Verwacht wordt dat de prijs van dit betrekkelijk nieuwe materiaal flink zal dalen. Damwand van kunststof is in deze vergelijking niet meegenomen.

Op grond van de uitgevoerde vergelijking kunnen op dit moment de volgende conclusies worden getrokken:

1. Stalen geverfde damwand heeft de hoogste integrale kosten.
2. Betonnen damwand B65 heeft de laagste integrale kosten.
3. Staal met overdikte is op kortere termijn is het voordeligst.
4. Staal met een alulaag op de voorzijde is op langere termijn voordeliger dan staal met overdikte.
5. KB met OA (in combinatie met aluminiseren boven water) kan voordeliger zijn dan OS, maar dit is sterk afhankelijk van de situatie en de vereiste levensduur.
6. Betonnen damwand B200 kan dankzij staalvezels tegen een stootje en zal in de toekomst aantrekkelijke integrale kosten hebben.

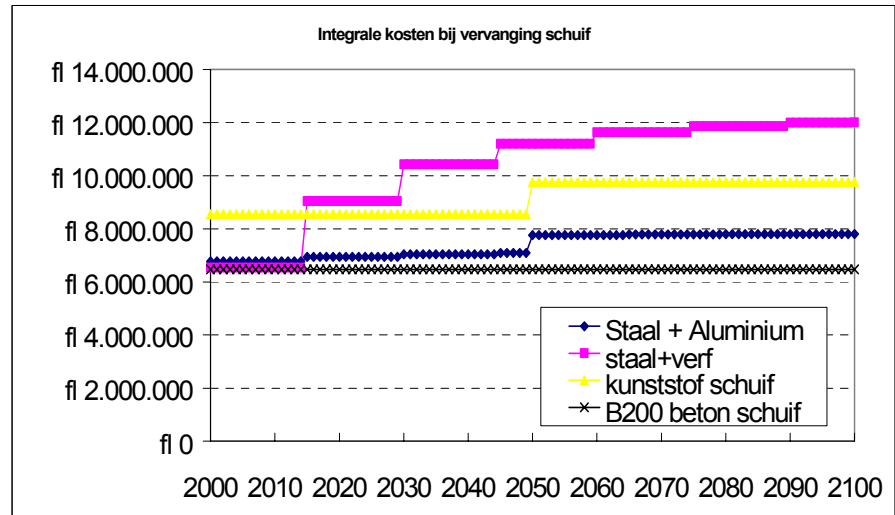
Voor het alsnog langdurig beschermen van damwand die zich nog in goede staat bevindt lijkt een alulaag boven water in combinatie met KB voor het onderwatergedeelte een goede oplossing.

In de grafiek is de contante waarde van de damwandvarianten grafische weergegeven.



8.3 Schuifvarianten Stormvloedkering Oosterschelde

Integrale kostenvergelijking van schuifvarianten stormvloedkering Oosterschelde bij nieuwbouwsituatie. Het lager worden van de "trap treden" (bij de variant Staal+Aluminium) is het gevolg van het contant maken van toekomstige kosten: het verminderen van toekomstige kosten met de rente daarvan tot het tijdstip van besteding.



Uit de tot nu toe gemaakte integrale kostenvergelijkingen van schuifconstructies in een maritiem milieu kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Bij bestaande constructies zijn de integrale kosten het laagst als deze alsnog worden gealuminiseerd.
- Bij nieuw te bouwen constructies zijn de integrale kosten het laagst als zeer hogesterktebeton als constructiemateriaal wordt gebruikt.
- Conserveren met een organisch verfsysteem heeft de hoogste integrale kosten.

8.4 Verfspuiten versus aluminiseren

Het gebied onder de getrapte lijn geeft aan na hoeveel jaar de integrale kosten van aluminiseren lager zijn dan van verfspuiten.

INTEGRALE KOSTENVERGELIJKING VAN VERFSPUITEN / ALUMINISEREN (€ / m2)								
Levensduur jaren	Land lucht met zon bestraling		Zee lucht met zon bestraling		In zoet- en zeewater condens op schaduw- en ongelijke vlakken		In zee water en zeer agressief milieu	
	Verfinterval 25 jaar	Alu-interval 50 jaar	Verfinterval 20 jaar	Alu-interval 50 jaar	Verfinterval 15 jaar	Alu-interval 50 jaar	Verfinterval 10 jaar	Alu-interval 50 jaar
<i>Cursieve waarden = klein onderhoud</i>								
Nieuwbouw (0)	45	85	45	85	45	80	45	90
5								
10			69				145	
15	64				127			
20			132				213	
25	117	91		91	173			258
30			143				289	
35			172					
40	124				198			
45			192		219	105	310	
50	144	118	118					119
Totale integrale kosten over 50 jaar = vierkantemeterprijs bij 50 jaar * oppervlakte object								
50	143837	118277	192029	118277	219208	104625	310170	119071
Bestaand (0)								
5					148	217	148	217
10			163				248	
15	159				222			
20			227				316	
25	212	212		212	268			362
30			238				393	
35			267					
40	219				293			
45			287		314	246	413	
50	239	240	240					246
Totale integrale kosten over 50 jaar = vierkantemeterprijs bij 50 jaar * oppervlakte object								
50	238637	239777	286829	239777	314008	245671	413370	245671

In het voorgaande voorbeeld zijn de integrale kosten van verfspuiten en aluminiseren weergegeven bij nieuwe en bestaande objecten in diverse condities. Deze vergelijking is niet algemeen geldig. Per object dient de integrale kostenvergelijking te worden gemaakt voor het maken van een objectieve keuze.

Het onderstaande overzicht laat de invoergegevens zien van de voorgaande kostenvergelijking.

INVOER ONDERHOUDS- EN BEDRIJFSKOSTEN (€ / m²)

VERFSPUITEN		ALUMINISEREN	
Object: Voorbeeld	Oppervlakte = 1000	m ² = totaal van het object	
	Disconto = 4	% = rente - inflatie	
Nieuw object in land- en zeelucht met zonbestraling			
Verfapplicatie in fabriek inclusief stralen	45	Alu-applicatie in fabriek inclusief stralen	75
		Inclusief verflaag over alulaag	85
Nieuw object in zoet water condens op schaduwvlakken: ongelijke vlakken / klinknagels			
Verfapplicatie in fabriek inclusief stralen	45	Alu-applicatie in fabriek inclusief stralen	80
Nieuw object in zeewater en zeer agressief milieu			
Verfapplicatie in fabriek inclusief stralen	45	Alu-applicatie in fabriek inclusief stralen	90
Bestaand object in land- en zeelucht met zonbestraling			
Montagekosten	5	Montagekosten	5
Voor- en nabehandelen	15	Voor- en nabehandelen	25
Aanstralen+4 verflagen	35	Alu-applicatie+reinen+stralen	75
Bestekskosten: uren*uurloon/m ² object		Bestekskosten: uren*uurloon/m ² object	
500 77	39	500 77	39
Milieukosten	25	Milieukosten	25
Uitvoeringskosten aannemer	17	Uitvoeringskosten aannemer	22
Aanvoer materieel en bouwketen	1	Aanvoer materieel en bouwketen	3
Inrichtings- en huisvestingskosten	3	Inrichtings- en huisvestingskosten	3
Economische en maatschappelijke kosten	0	Economische en maatschappelijke kosten	0
TOTAAL	140	TOTAAL	197
Tussentijds klein onderhoud	35	Onderhoud verflaag op alulaag / 25 jaar	15
Bestaand object in zoet- en zeewater, condens op schaduw- en ongelijke vlakken			
Montagekosten	32	Montagekosten	26
Voor- en nabehandelen	1	Voor- en nabehandelen	2
Aanstralen+4 verflagen	38	Alu-applicatie+reinen+stralen	99
Bestekskosten: uren*uurloon/m ² object		Bestekskosten: uren*uurloon/m ² object	
500 77	39	500 77	39
Milieukosten	17	Milieukosten	14
Uitvoeringskosten aannemer	17	Uitvoeringskosten aannemer	22
Aanvoer materieel en bouwketen	1	Aanvoer materieel en bouwketen	3
Inrichtings- en huisvestingskosten	3	Inrichtings- en huisvestingskosten	3
Economische en maatschappelijke kosten	0	Economische en maatschappelijke kosten	0
TOTAAL	148	TOTAAL	207
Bestaand object in zeewater en zeer agressief milieu			
Montagekosten	32	Montagekosten	26
Voor- en nabehandelen	1	Voor- en nabehandelen	2
Aanstralen+4 verflagen	38	Alu-applicatie+reinen+stralen	99
Bestekskosten: uren*uurloon/m ² object		Bestekskosten: uren*uurloon/m ² object	
500 77	39	500 77	39
Milieukosten	17	Milieukosten	14
Uitvoeringskosten aannemer	17	Uitvoeringskosten aannemer	22
Aanvoer materieel en bouwketen	1	Aanvoer materieel en bouwketen	3
Inrichtings- en huisvestingskosten	3	Inrichtings- en huisvestingskosten	3
Economische en maatschappelijke kosten	0	Economische en maatschappelijke kosten	0
TOTAAL	148	TOTAAL	207
Bestaand object 1e maal aluminiseren			
Afboxen			10

Met "afboxen" wordt het dichtlassen bedoeld van ruimten die slecht toegankelijk zijn voor het aluminiseren.

9 Vermindering milieubelasting en milieuvergelijkingen

9.1 Vermindering milieubelasting door ontwerpvereenvoudiging

Onder de motto's: "Wat je niet maakt, behoeft geen onderhoud" en "ontwerpen door weglaten" wordt onder meer van de wielgeleiding overgegaan op de glijgeleiding of de hydrogeleiding (van rijden naar glijden) [5,23,30].

De milieubelasting neemt dan af door:

1. Vermindering van het materiaalgebruik: wielen en railbanen zijn overbodig; geleiding en afdichting zijn gecombineerd. Deurnissen zijn vereenvoudigd.
2. Vermindering van het energieverbruik door afname van het hefgewicht vanwege het ontbreken van wielen en afdrakinrichtingen.
3. Overbodig worden van smeermiddelgebruik in en bij water.
4. Het gebruik van UHMPE in plaats van staal en brons.

9.2 Milieuvergelijkingen

9.2.1 Milieuvergelijking remmingwerken

In 1994 werd een milieuvergelijking door middel van LCA-analyses uitgevoerd naar alternatieven voor de azobé-aanvaarbalken van remmingwerken. Aanleiding was het terughoudende beleid van Rijkswaterstaat ten aanzien van het gebruik van niet-duurzaam gewonnen tropische hardhout.

In dit onderzoek zijn [31] materiaalvarianten met elkaar vergeleken op volume-eenheid en functionele eenheid (= het volume dat voor die toepassing nodig is) bij de volgende milieueffecten.

1. Ozonlaagaantasting.
2. Uitputting grondstoffen.
3. Ecotoxiciteit.
4. Energie.
5. Broeikaseffect.
6. Verzuring.
7. Vast afval.
8. Vermesting.
9. Smog.
10. Humane toxiciteit.

Volgens dit onderzoek is de milieubelasting per volume-eenheid van gunstiger naar ongunstiger als volgt:

1. Duurzaam gewonnen hout uit Europa.
2. Duurzaam gewonnen hout uit Afrika.
3. Duurzaam gewonnen hout uit Australië.
4. Verduurzaamd hout.
5. *Beton**.
6. Recycling polyetheen.
7. Polyetheen.

8. Recycling thermoharder.
9. Thermoharder.
10. Geveerd staal.
11. Geveerd staal met glijstrippen.

*) Beton werd alleen in de vergelijking per volume-eenheid meegenomen. Echter, globale berekening van het betonvolume in relatie tot de milieubelasting van beton geeft aan dat de volgorde waarschijnlijk gelijk is aan de volgorde bij de functionele eenheid.

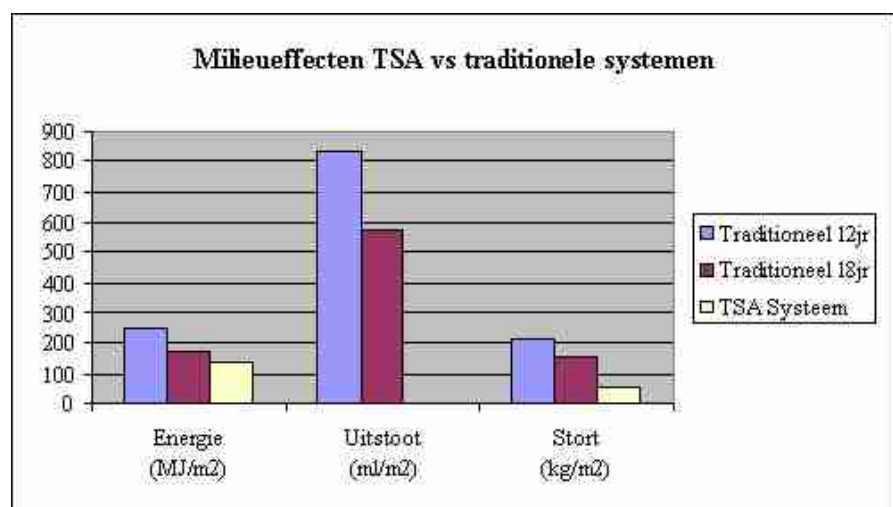
9.2.2 Milieuvergelijking toegangsbrug binnenhaven Noordland

Voor Directie Zeeland is in het kader van een materiaalkeuze voor een nieuwe toegangsbrug (loopbrug) een integrale kosten en een milieuvergelijking gemaakt [11]. De resultaten zijn in de volgende tabel samengevat. Er werd geen onderscheid gemaakt tussen de energiebehoefte bij verven en aluminiseren van de staalvariant.

Kosten in k€	STAAL+ VERF	STAAL+ ALULAAG	KUNSTSTOF GVK	RVS 316L	ALU-MINIUM
Bouwkosten	40	50	70	110	77
Onderhoudskosten 50 jaar	30	5	17	5	19
Totaalkosten	70	55	87	115	96
Milieubelasting Energie GJ excl. conservering	270	270	120	300	269
Milieubelasting water (m ³)	675	675	35	<staal	237
Milieubelasting lucht (Mm ³)	7,3	7,3	18	<staal	54
Kostenvolgorde	2	1	3	5	4
Milieuvolgorde	3	2	1	5	4

9.2.3 Milieuvergelijking verfspuiten of aluminiseren roldeur 5

In de volgende tabel zijn de milieueffecten samengevat van twee traditionele verfsystemen met een onderhoudsinterval van 12 respectievelijk 18 jaar en een alulaag (TSA: Thermal Sprayed Aluminium) met een onderhoudsinterval van 50 jaar [10]. Uit de vergelijking blijkt dat de conservering met het grootste onderhoudsinterval de laagste milieubelasting veroorzaakt.



10 Samenvatting en conclusies

10.1 Samenvatting

10.1.1 Zeer hogesterktebeton

Uit het vergelijken van integrale kosten en milieubelasting en blijkt dat zeer hogesterktebeton B100 tot B200 een aantrekkelijk materiaal is om gebruikt te worden voor stilstaande en bewegende civiele constructies.

10.1.2 Vezelversterkte kunststof

Voor constructies in een maritiem milieu die minder stijf behoeven te zijn en waarbij een laag gewicht en een lage milieubelasting ten opzichte van staal gewenst zijn, komt vezelversterkte kunststof VVK in aanmerking. Voorbeelden van dergelijke constructies zijn: puntdeuren, drijvende remmingwerken, zelfopdrijvende schuiven, loop- en fietsbruggen, trappen, leuning, bordessen, kabelgoten enzovoort.

10.1.3 Stalen constructiedelen

Voor stalen constructiedelen in een maritiem milieu en voor de permanente schaduwvlakken van staalconstructies in het algemeen geeft aluminiseren lagere integrale kosten en een lagere milieubelasting dan verfspuiten. De hogere applicatiekosten van het aluminiseren worden veelal bij de eerste uitgespaarde verfbeurt terugverdiend.

Bestaande stalen constructiedelen in zout water die met een verfcoating worden beschermd, dienen bovendien kathodisch te worden beschermd om putcorrosie te voorkomen op de plaatsen waar de verfcoating is verdwenen.

Agressieve putcorrosie blijkt op te kunnen treden bij stalen damwand ter plaatse van de aangetaste verfcoating. Dit kan worden vermeden door geen verfsysteem toe te passen bij oppervlakken die zich permanent in zout water bevinden.

Bij nieuwe damwand geeft het toepassen van diktetoeslag zonder conservingslaag, na 20 jaar gevolgd door kathodische bescherming, de laagste integrale kosten. De aanvankelijke aantasting door corrosie is mild doordat deze zich gelijkmatig over het gehele oppervlak verdeelt.

Bij reeds bestaande vaste stalen constructies lijkt het aantrekkelijk om het deel boven water alsnog te aluminiseren, en het gedeelte dat zich in het zoute water bevindt alsnog kathodisch te beschermen.

10.1.4 Flexibele keringen

Voor flexibele stuwen en stormvloedkeringen hebben zich twee varianten bewezen: de balgstuw van weefselversterkt rubber, en de klepstuw: een klep van beton op een kussen van weefselversterkt rubber. Beide keringen zijn vrijwel onderhoudsvrij. De aantasting van het landschap door horizonvervuiling is bovendien nihil.

10.1.5 Kunststof vangkabels

Vangkabels van kunststof brengen naast lagere integrale kosten een lagere milieubelasting met zich mee. Dit is het gevolg van het ontbreken van afzonderlijke reminstallaties met bijbehorende civiele constructies zoals heftorens.

10.2 Conclusies

1. De integrale kosten en milieubelasting van civiele en werktuigkundige kunstwerken in een maritiem milieu kunnen aanmerkelijk dalen door ontwerpvereenvoudiging, het gebruik van alternatieve materialen en het gebruik van alternatieve deklagen. Dit hangt samen met:
 - De verlenging van het onderhoudsinterval waardoor het aantal kostbare en milieubelastende werkzaamheden afneemt.
 - Het gebruik van alternatieve materialen die minder milieubelastend zijn.
2. Gebleken is dat het verlagen van de integrale kosten goed samen kan gaan met het verlagen van de milieubelasting.

11 Literatuurvermelding

1. CUR-Aanbeveling Vezelversterkte Kunststoffen in Civiele Draagconstructies (GVK-deel), met achtergrondrapport; concept; verschijnt in 2003.
2. Ros; Checklist Productverbetering; aanbevelingen voor het verlagen van de integrale kosten van te ontwerpen en te onderhouden civiele constructies; versie november 2002.
3. Ros; NIO-A-N-200225; Milieubelasting in een maritiem milieu door zink en de thermisch gespoten aluminium deklaag voor het beschermen van staal tegen corrosie; 6 november 2002.
4. Braam; Bosman TUD; BSI – Tijdsafhankelijk gedrag van belaste en onbelaste prisma's; Een jaar autogene krimp, uitdrogingskrimp en kruip; september 2002.
5. Ros; Wrijvingscoëfficiënt van zuiver UHMPE uv bij een oppervlakteruwheid van het hardere glijvlak van circa 0,5 $\mu\text{m Ra}$; gemiddelde, standaardafwijking en bovenwaarden; 2 juli 2002.
6. Eisen Thermische Smitlagen; NBD 10300; versie oktober 2002 en hoger.
7. Ros; PAO-cursus: Bepaling restfactor VVK door middel van versnelde veroudering; februari 2002.
8. Cheung; Detaillering B200-hefschuiven Stormvloedkering Oosterschelde; februari 2002.
9. Ros (BD-RWS), Breen (TNO-Industrie); Kunststof vangkabels beschermen sluisdeuren; Minder bouwvoorzieningen dan bij staalkabels; Land + Water nummer 9-2001 blad 52-54; september 2001.
10. Jong de J.A., Munter de A.J.; Rapport haalbaarheid aluminiseren roldeur 9, Westsluis te Terneuzen; 9 juli 2001.
11. Daniel, Nagtegaal, Van Houwelingen; Kunststof brug voor voetgangers en ... milieu; Land+Water nummer 9-2001.
12. Braam, Bosman (TUD); Rapport 25.5-01-10; BSI-balkjes statisch en dynamisch belast; april 2001.
13. Coolegem; TNO-rapport CA00.9045; Thermisch gespoten aluminium deklagen, beton en geometrie; betreft overgang gealuminiseerd staal naar beton; 20 november 2000.
14. Coolegem, Lauterbach; TNO-rapport CA00. 9003; Literatuurstudie naar de interacties tussen thermisch gespoten aluminium deklagen, staal en beton; 15 november 2000.
15. Tol; B200 betonnen schuiven voor de Stormvloedkering Oosterschelde; afstudeerrapport Bouwdienst Rijkswaterstaat NIO / TU Delft CT; november 2000.
16. Ros (NIO); Kenmerk: NIO-A-T-200047; Opbouw integrale kosten damwandvarianten; versie 19 oktober 2000.
17. Kaptijn; Toekomstige ontwikkelingen, zeer hoge sterkte beton; Overdruk uit de PAO-cursus: "Ervaringen met hogere sterkte beton", september 2000.
18. Gulikers (BST); Rapport KBDAMWAND-R0002; Kathodische beschermingsystemen voor stalen damwanden; 20 maart 2000.
19. Ros; Aluminium deklagen breken door bij Rijkswaterstaat; Otar; januari 2000.
20. Vergoossen; Ontwerp van een ophaalbrug in (zeer) hoge sterktebeton, voor verkeersklasse 600; Deelrapport 2: Ontwerp van het val van een

-
- ophaalbrug in Zeer Hoge Sterkt Beton en vergelijking integrale levensduurkosten staal-kunststof-beton; december 1999.
21. Breen TNO-Industrie; TNO-rapport Div499.1113; Haalbaarheidsonderzoek nylon vangkabels ter bescherming van sluisdeuren; 13 oktober 1999.
 22. Vergoossen; Ontwerp van een ophaalbrug in (zeer) hoge sterktebeton, voor verkeersklasse 600; Deelrapport 1: Literatuurstudie naar de eigenschappen, toepassingen en productietechnieken van Reactive Powder Concrete en Hoge Sterkte Beton; maart 1999.
 23. Ros; Thema: Kunststoffen in de Civiele Techniek; Land + Water nummer 1/2; februari 1999.
 24. VM-publicatie vm119; Vezelversterkte kunststoffen in constructieve toepassingen; 1999.
 25. Vreijling, Suurmond; TNO-Industrie; Corrosiebescherming met Thermisch Gespoten Aluminium Deklagen in Zeewater, Zoetwater en Lucht; TNO-rapport CA98.9032; 3 december 1998.
 26. A.J.M. Keuzenkamp; Hogesterktebetonnen schuiven in de Stormvloedkering Oosterschelde; januari 1998.
 27. Slot; TNO-rapport 97MI/00999/SLO; Belastbaarheid van een thermisch gespoten aluminium deklaag in een pen-gatverbinding; 5 december 1997.
 28. Honselaar; TNO-rapport 95Mi/00289/HON; Tribologische eigenschappen van Al-deklaag; in combinatie met UHMPE; 15 november 1995.
 29. Vreijling, Willemsen; Centrum TNO-Coatings; Aluminium deklagen voor stalen constructies in maritiem milieu; TNO-rapport nr. CA/95.1033; Evaluatie van de corrosiebescherming; 29 november 1995.
 30. Ros; NIO-R-95025; Triboregister; Wrijvingscoëfficiënten en slijtfactoren; juni 1995.
 31. Demmers, Goedkoop (Pré); Milieuvergelijking van remmingwerken; augustus 1994.
 32. Vreijling, Van Westing, Ferrari; Centrum TNO-Coatings; Literatuuronderzoek Aluminium deklagen voor stalen constructies in maritiem milieu; Rapportnummer C94.1010; 8 maart 1994.
 33. Ros; Berekening van de temperatuurstijging in glijvlakken door wrijvingswarmte; 10 maart 1987.

*** einde document ***