

Faalpreventie en kostenverlaging van beweegbare waterkeringen en bruggen met levensduurborging van glijvlakken



- schuifgeleidingen
- glijdende afdichtingen
- glijlagers
- glijopleggingen
- tandflanksmering
- staalkabels

Inkijkttekst

Hoofdonderwerpen:

- Belangrijkste faaloorzaken en zwakste schakels
- Kiezen voor de ontwerp- en onderhoudsvariant met de laagste TCO
- Tribologie voor het verlagen van de TCO
- Controle op temperatuurstijging door wrijvingswarmte en indrukking
- Ontwerpen door weglaten
- Corrosietypen en corrosiepreventie
- Materiaal- en deklaagkeuze bij glij- en afdichtvlakken, translerend
- Materiaal- en deklaagkeuze bij glij- en afdichtvlakken, roterend
- Ontwerpen van demonteerbare asverbindingen
- Faalmechanismen bij voorspanbouten en railbanen
- Faalpreventie bij open tandwieloverbrengingen
- Faalpreventie door functioneel monitoren
- Verlagen TCO door ontwerpen op trek
- Verlagen TCO met niet-roestende materialen
- Verlagen TCO d.m.v. alternatieve ontwerp-, materiaal- en constructievarianten
- Verlagen TCO met checklist faalpreventie
- Rekenvoorbeelden tijdsafhankelijke temperatuurstijging

ISBN: 9789090391892

Kenmerk: MRC-143-FPN-2025.1

Versiedatum: 5-12-2024

Auteur: Mink Ros

Voorwoord

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van zeer veel kunstwerken waaronder sluiscomplexen, beweegbare waterkeringen en bruggen met glijvlakken. Bij elkaar vormen deze een praktijklaboratorium dat ons een schat aan betrouwbare faalkennis heeft opgeleverd.

Deze faalkennis beantwoordt de volgende vragen:

- Wat zijn de voornaamste faalmechanismen van kunstwerken met glijdende afdichtvlakken?
- Hoe kunnen deze faalmechanismen worden gekwantificeerd?
- Welk onderdeel van kunstwerken met glijdende afdichtvlakken is de zwakke schakel en bepalend voor de beschikbaarheid ervan?
- Hoe kunnen faalmechanismen worden beheerst of omzeild?

De faalkennis die in dit document is samengevat, werd opgebouwd in ruim 40 jaar en heeft geïnspireerd tot ontwerp- en onderhoudsaanbevelingen voor het uitsluiten van de meest optredende faaloorzaken. Deze kennis is tot op heden geactualiseerd.

Benutting van deze aanbevelingen leidt aantoonbaar tot beheersing van de beschikbaarheid van deze kunstwerken, en daarmee tot verlaging van de integrale kosten gedurende het ontwerpen, realiseren en het onderhouden, ofwel de Total Cost of Ownership, de TCO. Bovendien daalt daarmee de milieubelasting.

Dit, en mijn wens om deze expertise te delen is mijn motivatie bij het documenteren ervan. Dit kennisdocument is geworteld in het achterliggende digitale archief waarin alle ontwerp- en onderhoudsaspecten systematisch zijn vastgelegd.

Ik wens u veel succes bij het toepassen van deze informatie bij het aanbieden, ontwerpen, bouwen, onderhouden en beheren van kunstwerken met en zonder glijvlakken!

Mink Ros

*Vanaf 1968 tot 2004 technisch onderzoeker bij de Bouwdienst RWS en sindsdien technisch adviseur vanuit MRCONSULT B.V.
Oktober 2024.*

Het zijn de kleine dingen die het (niet) doen

Inhoudsopgave

1	AANLEIDING, INLEIDING EN LEESWIJZER.....	8
1.1	Inleiding	8
1.2	Leeswijzer.....	9
2	HOE KIES IK DE VARIANT MET DE LAAGSTE TCO?	10
2.1	Onderhoudsinterval als draaiknop van de TCO	10
2.2	Hoe kies ik de variant met de laagste TCO?.....	10
2.3	Toelichting op 'Contante Waarde' (CW) ofwel kapitaliseren	11
2.4	Kies contractvormen die faalpreventie bevorderen	12
3	TRIBOKENNIS VOOR LAGERE TCO	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Tribologische eigenschappen.....	13
3.2.1	Definities wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor	13
3.2.1.1	Wrijvingscoëfficiënt (f).....	13
3.2.1.2	Slijtfactor (k)	14
3.2.2	Materiaal-voorselectie	14
3.2.3	Wrijvingscoëfficiënten ter indicatie	15
3.2.4	Tribowaarden van veel gebruikte translerende glijvlakken.....	15
3.2.5	Bovenwaarden f van UHMWPE/RVS ruwheid <0,5 µm Ra	17
3.2.6	Reproduceerbaarheid van tribowaarden	17
3.2.7	Veiligheidsfactor op wrijvingscoëfficiënten.....	18
3.2.8	Veiligheidsfactor op slijtfactoren	18
3.2.9	Wrijvingscoëfficiënt van UHMWPE daalt met de glij snelheid.....	18
3.2.10	Tribowaarden van glijlagers in loopwielen	18
3.2.11	Wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor bij hydrogeleiding	20
3.2.11.1	Glijdeuren met hydrovoeten	20
3.2.11.2	Monitoring wrijvingscoëfficiënt en lagercoëfficiënt van hydrovoeten	20
3.2.12	Slijtfactoren van afdichtingen en stangdeklagen.....	22
3.2.13	Verlengen levensduur van staalkabels	23
3.3	Invloed van parameters en situaties op tribowaarden.....	24
3.3.1	Inleiding: tribowaarden zijn systeemeigenschappen	24
3.3.2	Stroeve en wrijvingsarme materialen.....	25
3.3.3	Invloed van de oppervlakteruwheid in glijrichting	26
3.3.4	Slijtage neemt evenredig toe met glijweg en vlaktedruk	26
3.3.5	Invloed temperatuur op wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor	26
3.3.6	Invloed vlaktedruk op wrijvingscoëfficiënt	26
3.3.6.1	Als de vlaktedruk toeneemt, vermindert de wrijvingscoëfficiënt.....	26
3.3.6.2	Hogere vlaktedruk door onvlakheid glijvlak	27
3.3.7	Invloed van slijtdeeltjes: abrasief of smerend	27
3.3.7.1	Bij ongesmeerde metaalcombinaties grotere oppervlakteruwheid.....	27
3.3.7.2	Ontwijken van smerende slijtdeeltjes	27
3.3.7.3	Stofsmering in glijvlakken van glijopleggingen.....	28
3.3.8	Afdichting of vervuiling van glijvlakken van glijopleggingen	28
3.3.9	Minder wrijving en slijtage in praktijksituaties.....	28

3.3.10	Geen zanddeeltjes in glijlagers onder water.....	28
3.3.11	Invloed van vervuiling bij horizontale glijbanen.....	29
3.4	Berekenen van slijtage en levensduur	29
3.4.1	Slijtage van schuifgeleidingen op sluisdeuren	29
3.4.2	Slijtage van geleidingen voor rol- of glijdeuren	30
3.4.3	Slijtage en levensduur bij glijlagers.....	30
3.5	Puntdeurlageringen.....	31
3.5.1	Slijtage en levensduur bij puntdeurlageringen	31
3.5.1.1	Slijtage en levensduur halsbeugellager.....	31
3.5.1.2	Slijtage en levensduur taatslager	32
3.5.1.3	Taatsschuifkracht, slijtage en levensduur taatslager	33
3.5.2	Slijtage bij hydrostatisch gesmeerde glijvlakken	34
3.5.3	Slijtage bij hydrodynamisch gesmeerde glijlagers.....	34
3.6	Berekenen temperatuurstijging door wrijvingswarmte	35
3.6.1	Temperatuurformule en indringtijd van de glijdende kunststof.....	35
3.6.2	Toelichting berekenen tijdsafhankelijke temperatuurstijging	36
3.6.3	Glijtijden	37
3.6.4	Indringdiepte - transportafstand.....	38
3.6.5	Berekenen ΔT indien p en v variëren	38
3.6.6	Afkoeltijd	38
3.6.7	Rekenvoorbeelden en voorbehoud	38
3.7	Berekenen visco-elastische indrukking van UHMWPE.....	39
3.7.1	Basisformule	39
3.7.2	Waarden van A en B voor de indrukkingformule.....	39
3.7.3	Meting factoren A en B aan prototypemeting	40
4	ONTWERPEN DOOR WEGLATEN MET TRIBOKENNIS.....	41
4.1	Van wielgeleiding naar glijgeleiding	41
4.1.1	Voorbeeld bij verticaal beweegbare waterkeringen	41
4.1.2	Van glijgeleiding naar hydrogeleiding	42
4.1.2.1	Vereenvoudigde fabricage montagevlak hydrobaan	42
4.1.2.2	Slijtage hydrozool en aanbeveling hydrozoolmateriaal	43
4.1.3	Hydrovoeten en hydrofenders	43
4.1.4	Ontwerpvereenvoudiging bij hydrogeleiding	43
4.2	Aanvullende sluisdeurondersteuning met wielen en hydrofenders	44
4.3	Glijafdichting	44
4.3.1	Glijafdichting met hoge afdichteisen.....	44
4.3.2	Glijafdichting van UHMWPE-rubber.....	45
4.3.3	Vervalbelaste glijafdichting	45
5	CORROSIETYPEN EN CORROSIEPREVENTIE.....	46
5.1	Faal-veroorzakende corrosietypen.....	46
5.1.1	Spleetcorrosie	46
5.1.1.1	Toelichting op het spleetcorrosieproces	46
5.1.1.2	Praktijkvoorbeelden spleetcorrosie	47
5.1.2	Galvanische corrosie.....	48
5.1.3	MIC (Microbiologisch geInduceerde Corrosie) en ALWC.....	48
5.1.4	Gelijkmatige corrosie	49

5.3	Corrosiepreventie	49
5.3.1	Preventie van gelijkmatige corrosie	49
5.3.1.1	Eénlaags-verfsysteem en alulaag zonder aanvullende KB	50
5.3.1.2	Alulaagdikte, milieu en beschermduur	51
5.3.1.3	Milieu en laagdikteafnamesnelheid van alulagen	51
5.3.1.4	Alulagen bij staal/betonovergangen	51
5.3.1.5	Aanvullende corrosiepreventie d.m.v. KB	52
5.3.1.6	Preventie van galvanische corrosie	53
5.3.2	Preventie van spleetcorrosie	54
5.3.3	Preventie van MIC en ALCW	55
5.3.4	Corrosielandkaart	55
6	ONTWERPEN VAN TRANSLERENDE GLIJVLAKKEN	57
6.1	Schuifgeleiding op sluisdeuren, positie en bevestiging	57
6.2	Glijgeleiding van rol- glijdeuren.....	58
6.3	Glijgeleiding van hefdeuren	58
6.4	Corrosiepreventie bij RVS-glijders op stalen schuiven.....	59
6.5	Corrosiepreventie glijders en glijvlakken	59
6.6	Corrosiepreventie bij bevestiging UHMWPE-glijbanen	59
6.7	Materiaal- en positiekeuze van glijders en glijbanen	60
6.8	Corrosiepreventie en levensduur van hydraulische cilinders.....	61
6.8.1	Levensduur stangdeklaag m.b.t. corrosie	61
6.8.2	Stang- en zuigergeleiding	61
6.8.3	Afdichtingen	61
6.9	Glijgeleiding van stangen van cilinders en veerbuffers.....	61
7	ONTWERPEN VAN ROTERENDE GLIJVLAKKEN	62
7.1	Glijlagers, materiaalkeuze	62
7.2	Dwarsrotatie bij glijlagers	62
7.3	Glijlagers van UHMWPE, inbouwaanbevelingen	63
7.4	Puntdeurlagering.....	63
7.4.1	Halsbeugellager bovenzijde.....	63
7.4.1.1	Materiaalkeuze en bevestiging halsbeugelvoering	63
7.4.1.2	Ingekamerde UHMWPE halsbeugelvoering en bevestiging	64
7.4.1.3	Conservering van de halspen	65
7.4.2	Taatslager.....	65
7.4.2.1	Taatskom	65
7.4.2.2	Taatsmuts	66
8	ONTWERPEN VAN DEMONTEERBARE ASVERBINDINGEN.....	67
8.1	Scharnierende asverbindingen.....	67
8.2	Niet-scharnierende asverbindingen	68

8.3	Borgen van asverbindingen	68
9	FAALPREVENTIE BIJ VERMOEIING VAN VOORSPANBOUTEN	69
9.1	Breuk van voorspanbouten	69
9.2	Voldoende steellengte voorspanbouten	70
10	FAALPREVENTIE BIJ WIELEN EN RAILBANEN	71
10.1	Plastische deformatie	71
10.2	Loskomen van railbanen	72
10.3	Alternatieve ondersteuning van roldeuren	73
11	FAALPREVENTIE BIJ OPEN TANDWIELOVERBRENGINGEN	74
11.1	Faaloorzaken bij open tandwielsmering	74
11.2	Wel of niet vervangen van de tandwieloverbrenging	75
11.3	Vergelijkbaarheid praktijksituatie bestaande testmethoden	75
11.4	Vergelijkbaarheid praktijksituatie RWS-Tandsmeertest	76
11.5	Smeerrondsel	76
12	FAALPREVENTIE D.M.V. FUNCTIONEEL MONITOREN	77
12.1	Prioritering inspectiemethoden	77
12.2	Praktijkvoorbeeld monitoring glijoplegging	78
12.3	Conclusies	78
12.4	Aanbevelingen	79
13	VERLAGEN TCO DOOR ONTWERPEN OP TREK	80
13.1	Inleiding	80
13.2	Toepassingsmogelijkheden	81
13.2.1	Vangkabels van kunststof	81
13.2.2	Balgkeringen en balgstuwen van flexibel sterktedoek	82
13.2.3	Kabelaandrijving voor basculebruggen	82
13.2.4	Kabelremmingwerk	82
14	VERLAGEN TCO MET NIET-ROESTENDE MATERIALEN	83
14.1	Inleiding	83
14.2	Zeer hogesterktebeton B110	83
14.2.1	Schuiven Oosterscheldekering	83
14.2.2	Ophaalbrug en pompwaaier in hogesterktebeton	84

14.2.3	Rijdek van een beweegbare brug	84
14.2.4	Glijdeur van zeerhogesterktebeton.....	84
14.3	Verlaging TCO met kunststoffen	85
14.3.1	Op slijtage belaste kunststoffen	85
14.3.2	Overige thermoplasten, thermoharders en elastomeren.....	86
14.3.3	Veroudering als faalmechanisme.....	86
15	VERLAGEN TCO MET DE CHECKLIST FAALPREVENTIE	88
16	BRONNEN, AFBEELDINGEN EN TABELLEN	96
16.1	Bronvermelding	96
16.2	Afbeeldingen en tabellen.....	102
	BIJLAGE 1 REKENVOORBEEDEN TEMPERAATUURSTIJGING	105
	BIJLAGE 2. TOETSING TEMPERAATUURFORMULE	108
	BIJLAGE 3. AFLEIDING TEMPERAATUURFORMULE.....	118
	BIJLAGE 4. F EN K VAN UHMWPE BIJ 20...150 °C.....	122
	BIJLAGE 5. STANDAARD TRIBOMETINGEN.....	123
	BIJLAGE 6. ANALYSE TAATSSCHUIFKRACHT IN TAATSLAGERS	125

Alle rechten voorbehouden

Niets uit dit boek mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van de auteur. Ondanks de grote zorgvuldigheid bij het samenstellen kunnen onvolkomenheden voorkomen. Neem bij twijfel contact op met de auteur.

Disclaimer

Hoewel dit kennis- en ervaringsdocument met grote zorg werd samengesteld, stelt de auteur zich niet aansprakelijk voor schade die door gebruik van informatie uit dit document zou opgetreden.

1 Aanleiding, inleiding en leeswijzer

1.1 Inleiding

Constructies zijn veelal samengesteld uit meerdere onderdelen. Het onverwachts falen van één onderdeel - de zwakste schakel - kan falen van de gehele constructie veroorzaken. Daarom is het van belang om zwakke schakels in constructies vooraf te kennen en de levensduur ervan zo te borgen dat het geëiste onderhoudsinterval van de constructie wordt gehaald. Daarmee dalen de kosten gedurende de gehele levensduur, ook wel aan geduid met 'integrale kosten' of met TCO: Total Cost of Ownership.

Het gaat in dit document vooral over constructies met en zonder glijvlakken in en bij water, met condens of in andere media. De praktijk levert in hoofdzaak de volgende faaloorzaken op volgorde van afnemende frequentie van optreden:

1. Ingewikkeldheid van de samengestelde constructie.
2. Materiaalverlies door slijtage.
3. Spleetcorrosie.
4. Glijden met te hoge wrijvingsweerstand en/of stickslip¹.
5. Galvanische en gelijkmatige corrosie.
6. Falen van de smering van open tandwieloverbrengingen
7. Vermoeiing van voorspanbouten.
8. Microbiologische corrosie (MIC).
9. Plastische deformatie van wielgeleidingen.
- 10 Veroudering van kunststoffen en elastomeren.



Figuur 1. Een constructie is net zo betrouwbaar als de zwakste schakel

Hieruit volgt dat belangrijke faaloorzaken kunnen worden voorkomen met kennis voor het:

1. Vereenvoudigen van constructies, ofwel 'ontwerpen door weglaten'.
2. Beheersen van wrijving en slijtage met 'tribokennis'.
3. Voorkomen van corrosie.
4. Beheersen van overige faaloorzaken: vermoeiing, plastische deformatie en overige faaloorzaken zoals verzameld in de checklist faalpreventie in het laatste hoofdstuk van dit document.

Met de informatie in dit document kunnen de zwakste schakels in deze constructies worden onderkend. Bovendien kan de levensduur van deze schakels aantoonbaar worden verlengd en geborgd zodat de beschikbaarheid van de gehele constructie wordt verlengd en geborgd. Daarmee daalt de TCO.

Hoewel deze kennis werd geïnspireerd door praktijkproblemen bij beweegbare waterkeringen met glij- en afdichtvlakken in en bij water, is deze breed

¹ Stickslip: een kleefglijverschijnsel dat ongelijkmatige beweging van een glijdend constructiedeel veroorzaakt, meestal gepaard gaand met geluidsverschijnselen die onder meer verband houden met eigen trillingsfrequenties.

toepasbaar gebleken voor bewegende constructies met glijvlakken in en bij vloeistoffen.

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 1	Uitgangspunt: <ul style="list-style-type: none">• Wat zijn de faaloorzaken op volgorde van afnemende frequentie?• Zwakste schakels bepalen het onderhoudsinterval en de TCO• Verleng en beheers het onderhoudsinterval van de zwakke schakels
Hoofdstuk 2	Hoe kies ik variant met de laagste TCO?
Hoofdstuk 3	Tribokennis voor lagere TCO
Hoofdstuk 4	Ontwerpen door weglaten met tribokennis
Hoofdstuk 5	Corrosietypen en corrosiepreventie
Hoofdstuk 6	Ontwerpen van translerende glijvlakken
Hoofdstuk 7	Ontwerpen van roterende glijvlakken
Hoofdstuk 8	Ontwerpen van demonteerbare asverbindingen
Hoofdstuk 9	Faalpreventie bij vermoeiing van voorspanbouten
Hoofdstuk 10	Faalpreventie bij wielen en railbanen
Hoofdstuk 11	Faalpreventie bij open tandwieloverbrengingen
Hoofdstuk 12	Faalpreventie d.m.v. functioneel monitoren
Hoofdstuk 13	Verlagen TCO door ontwerpen op trek
Hoofdstuk 14	Verlagen TCO met niet-roestende materialen
Hoofdstuk 15	Verlagen TCO met de Checklist faalpreventie
Hoofdstuk 16	Bronnen, afbeeldingen en tabellen
Bijlage 1	Rekenvoorbeelden temperatuurstijging door wrijvingswarmte
Bijlage 2	Toetsing temperatuurformule
Bijlage 3	Afleiding temperatuurformule
Bijlage 4	f en k van UHMWPE bij 20...150 °C
Bijlage 5	Standaard tribometingen
Bijlage 6	Principe taatsschuifkracht in taatslagers

2 Hoe kies ik de variant met de laagste TCO?

2.1 Onderhoudsinterval als draaiknop van de TCO

Constructies in onderhoud staan veelal stil. Daarbij ontstaan onderhoudskosten en gevolggkosten door productieverlies of door vertraging van scheepvaart- of wegverkeer. De optelsom van de onderhouds- en gevolggkosten noemen we hierna 'intervalkosten'. Bij elke onderhoudsactie herhalen deze kosten zich.

De totale kosten van een constructie over de gehele levensduur worden bepaald door:

- ontwerpkosten +
- fabricagekosten +
- intervalkosten maal het aantal malen in de levensduur dat onderhoud noodzakelijk is om falen te voorkomen.

Deze kosten worden aangeduid met 'TCO': Total Cost of Ownership², of ook wel door 'integrale kosten' over de totale levensduur.

We kunnen de TCO verlagen door het onderhoudsinterval te verlengen: het aantal malen dat door onderhoud intervalkosten optreden, neemt dan af. Met andere woorden: *het onderhoudsinterval is een belangrijke draaiknop van de TCO!* Bovendien: elke onderhoudsactie belast het milieu. Hieruit volgt dat ook de milieubelasting afneemt als het onderhoudsinterval toeneemt.

2.2 Hoe kies ik de variant met de laagste TCO?

Tijdens het ontwerpen en het onderhouden van constructies doen zich meestal meerdere varianten voor die bepalend zijn voor de toekomstige TCO. Hoe bereken je de TCO van deze varianten?

Het objectief kiezen uit ontwerp- of onderhoudsvarianten is mogelijk als volgt:

1. Bereken per ontwerp- of onderhoudsvariant het totaal van de:
 - ontwerpkosten (als het gaat om een nieuwe constructie)
 - bouwkosten (als het gaat om een nieuwe constructie)
 - toekomstige intervalkosten min de rente van de toekomstige intervalkosten tot het jaar waarin deze worden geïnvesteerd (alsof de toekomstige intervalkosten op de spaarbank wordt gezet en daar rente opleveren).
2. De op deze manier berekende waarde wordt de 'contante waarde' van de ontwerp- of onderhoudsvariant genoemd en is gelijk aan de TCO van die variant.
3. Kies de variant met de laagste TCO.

² De kosten of opbrengsten die verband houden met het afdanken, hergebruiken en overige kosten zijn in het kader van dit document buiten beschouwing gelaten.

2.3 Toelichting op 'Contante Waarde' (CW) ofwel kapitaliseren

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 opleveren. 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 of de beheerder het bedrag niet tegen rente op de spaarbank. De beheerder 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 (ofwel tegenwoordige) Waarde (CW) genoemd: dit is het bedrag dat nu (fictief) tegen bijvoorbeeld 4 % wordt uitgezet om de toekomstige kosten mee te kunnen betalen. Dit 'disconto' (= rente - inflatie) 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

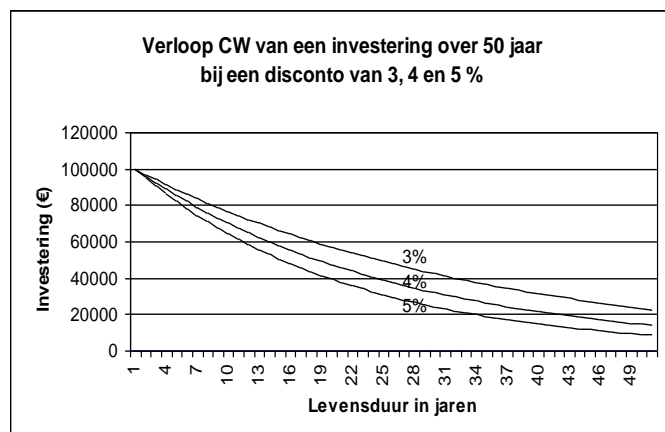
r = Disconto, b.v. 4%

N = Voorzien tijdstip van de investering in Jaren.

Tabel 1 Voorbeeld berekening CW na 10, 25 en 30 jaar

Investering [X] (€)	Disconto [r] %	Na [N] (Jaren)	CW (€)
100 000,-	4	10	67 556,-
100 000,-	4	25	37 512,-
100 000,-	4	50	14 071,-

Figuur 2. Verloop van de CW van een investering over 50 jaar bij 3, 4 en 5%



Uit dit 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.

2.4 **Kies contractvormen die faalpreventie bevorderen**

Kies voor contractvormen die toepassing van kostenbesparende technieken stimuleren [26]. De nadruk ligt daarbij meer op de TCO - en de milieubelasting - dan op de startkosten.

Naarmate de levensduur van de installatie langer is – bijvoorbeeld 35 jaar of meer – hebben eigenaar en beheerder gezamenlijk belang bij het toepassen van beschikbare kostenbesparende technieken.

3 Tribokennis voor lagere TCO

3.1 Inleiding

In bewegende constructies zijn minder onderdelen nodig als deze glijdend worden geleid in plaats van rijdend. Wielen, railbanen en puntbelasting worden dan omzeild. Geleiding en afdichting vallen dan samen. Nisconstructies worden vereenvoudigd, zie figuur 4.1 en 4.2. Daarmee verminderen de massa en de productiekosten en daalt de TCO. In hoofdstuk 4: 'Ontwerpen door weglaten met tribokennis' wordt hier nader op ingegaan.

Het translerend glijdend geleiden en afdichten van constructies gaat gepaard met wrijving en slijtage. Deze kunnen worden gekwantificeerd met de wrijvingscoëfficiënten en slijtfactoren in dit hoofdstuk. Bovendien worden in dit hoofdstuk materiaalcombinaties aanbevolen waarmee wrijving en slijtage kunnen worden beperkt. Deze informatie kan ook worden gebruikt voor het kiezen van materiaalcombinaties voor glijlagers, glijopleggingen en voor glijvlakken in het algemeen.

Tijdens het glijden neemt in het contact tussen de glijvlakken de temperatuur toe door wrijvingswarmte. De temperatuur neemt toe met de glijtijden van de langs elkaar glijdende constructiedelen. Deze temperatuurstijging kan worden gecontroleerd met de temperatuurformule in paragraaf 3.6.

Van de in dit hoofdstuk aanbevolen materiaalcombinaties is één ervan steeds een kunststof. De reden hiervoor is dat combinaties van metalen veel wrijving en abrasieve slijtdeeltjes kunnen veroorzaken.

Onder belasting worden kunststoffen visco-elastisch ingedrukt. Deze indrukking kan worden gecontroleerd met de indrukkingsformule in paragraaf 3.7.

Bovendien is beschreven hoe omgevingsfactoren de wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor kunnen beïnvloeden. Hiermee wordt verklaard dat tribowaarden in praktijksituaties af kunnen wijken van de resultaten van tribometingen in het laboratorium.

3.2 Tribologische eigenschappen

3.2.1 Definities wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor

Tribologie is de wetenschap en techniek aangewend ter beheersing van wrijving en slijtage. In dit hoofdstuk worden wrijvingscoëfficiënten en slijtfactoren vermeld van materiaalcombinaties die in praktijksituaties worden aanbevolen.

3.2.1.1 Wrijvingscoëfficiënt (f)

De wrijvingscoëfficiënt is bepalend voor de wrijving tussen constructiedelen wanneer die óf overwonnen moet worden óf juist gewenst is. De wrijvingsweerstand kan worden berekend door de normaalkracht op het glijvlak te vermenigvuldigen met de wrijvingscoëfficiënt.

3.2.1.2 Slijtfactor (k)

De slijtfactor is bepalend voor de snelheid van afslijten en de levensduur van constructiedelen. De slijtage (mm) kan worden berekend door de slijtfactor k (mm^2/N) van een materiaalcombinatie te vermenigvuldigen met de verwachte glijweg (mm) en de gemiddelde vlaktedruk daarbij (N/mm^2).

3.2.2 Materiaal-voorselectie

Bij glijvlakken zijn een lage wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor meestal gewenst. Om stickslip te vermijden, is het bovendien gewenst dat het verschil tussen de statische en de dynamische wrijvingscoëfficiënt gering tot nihil is. Dit is het geval bij onder meer PTFE en bij UHMWPE mits de oppervlakteruwheid *in glijrichting* gering is: orde $0,5 \mu\text{m Ra}$ en kleiner. Doordat UHMWPE honderden malen slijtvaster is dan PTFE, heeft UHMWPE meestal de voorkeur zolang temperatuurstijging en indrukking bij dit materiaal toelaatbaar zijn.

- Van UHMWPE op basis van bijvoorbeeld GUR 4120 volgens de RWS Eisen glijdend belaste kunststoffen RTD 1027.2018 [7] zijn tientallen wrijvingscoëfficiënten beschikbaar waarmee door middel van statistiek bovenwaarden zijn berekend bij een betrouwbaarheid van 90, 95, 99 en 99,9%, zie paragraaf 3.2.5: 'Bovenwaarden f van UHMWPE / Glijvlakruwheid $<0,5 \mu\text{m Ra}$ '.
- Indien er voorkeur zou zijn voor een ander materiaal dan UHMWPE 4120, wordt aanbevolen om de wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor daarvan door middel van een representatieve tribotest – volgens bijlage 5 - te toetsen aan de GUR 4120-variant zodat vergeleken kan worden van de door middel van statistiek berekende bovenwaarden van UHMWPE.

Indien berekend is dat temperatuurstijging en/of indrukking bij UHMWPE ontoelaatbaar zijn, hebben de volgende alternatieven relatief gunstige tribowaarden:

1. PEEK PVX met een wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor die vergelijkbaar is met UHMWPE; nadeel van PEEK is de zeer aanzienlijk hogere volumeprijs.
2. HAWE³ (hardweefsel) ofwel composiet, een met weefseldoek versterkte kunsthar, eventueel gemengd met een vulstof zoals PTFE of MoS₂; de volumeprijs is aanzienlijk hoger dan van UHMWPE.

³ In een (roterende) testopstelling waarbij de smerende vulstof (PTFE of MoS₂) van het HAWE kan inbedden in de ruwheidsdalen van het samenwerkende glijvlak zijn de meetwaarden van wrijvingscoëfficiënt en slijtfactor lager t.o.v. de meetwaarden in de praktijksituatie van translerende schuifgeleidingen. Oorzaak is het wegvallen van smerende invloed van het vulmateriaal vanwege de grote relatieve oppervlakte van het samenwerkende glijvlak in de praktijksituatie ten opzichte van de testopstelling.

- a. De dynamische wrijvingscoëfficiënt van HAWE is onder vergelijkbare condities en parameters circa het dubbele ten opzichte van UHMWPE: circa 0,20 of hoger [12,13,44,70].
- b. De statische wrijvingscoëfficiënt van HAWE is onder vergelijkbare condities en parameters hoger dan de dynamische, circa 0,25 of hoger [12,13]; daardoor kan HAWE stickslip veroorzaken bij een relatief lage glij snelheid en in combinatie met een kritisch massa-veersysteem.
- c. De slijtfactor van HAWE is onder vergelijkbare condities en parameters circa het drievoudige ten opzichte van UHMWPE: circa $11 \cdot 10^{-9} \text{ mm}^2/\text{N}$ [12,13].

3.2.3 Wrijvingscoëfficiënten ter indicatie

De onderstaande tabel vermeldt wrijvingscoëfficiënten van verscheidene materialen waaronder PTFE en UHMWPE tegen staal. De systeemparameters zoals vlaktedruk, glij snelheid en oppervlakteruwheid in glijrichting bij deze waarden zijn onbekend. Daardoor zijn deze waarden slechts indicatief.

Tabel 2. Indicatie van wrijvingscoëfficiënten van materialen tegen staal

Aluminium	0,9	Messing	0,5	Staal	0,7
Brons	0,3	Nylon	0,3	Tin	0,4
Chroom	0,5	Platina	0,4	UHMWPE	0,1
Diamant	0,1	Polycarbonaat	0,2	Witmetaal PB	0,5
Gietijzer	0,4	POM	0,2	Witmetaal SN	0,8
Azobé	0,4	PTFE	0,1	Zilver	0,4
Koper	0,7	PVC	0,5	Zink	0,5
Lood	0,8	Rubber	5,0		

Bron: Philips CFT.

3.2.4 Tribowaarden van veel gebruikte translerende glijvlakken

In tabel 3 zijn wrijvingscoëfficiënt f en slijtfactor k van UHMWPE (op basis van GUR 4120) weergegeven in combinatie met glijvlakken gesorteerd op toenemende oppervlakteruwheid in glijrichting.

De gegevens in tabel 3 gelden bij de volgende situaties:

- In water. Bij droge glijvlakken is de wrijvingscoëfficiënt is nauwelijks hoger. Dit wordt veroorzaakt door de lage adhesie: UHMWPE stoot de watermoleculen af, en daarmee de smerende invloed ervan. De slijtfactor bij droge glijvlakken kan dalen indien de relatief zachte slijtdeeltjes van kunststof de glijvlakken van elkaar scheiden en daardoor als smeermiddel werken. Dit verschijnsel wordt hierna aangeduid met 'stofsmering', zie paragraaf 3.3.7.
- Vlaktedruk: $2,5 \text{ N/mm}^2$.
- Glij snelheid: 10 mm/s .
- Temperatuur: $< 70^\circ\text{C}$.
- Bij een hogere vlaktedruk en bij een lagere glij snelheid gelden lagere wrijvingscoëfficiënten, en andersom; de verklaring hiervan is beschreven in paragraaf 3.3.6: 'Invloed van parameters en situaties op tribowaarden'.
- De oppervlakteruwheid *in glijrichting* van het hardere glijvlak heeft meer invloed op de tribowaarden dan het hardere glijvlakmateriaal zelf.

Uit tientallen praktijkgetoetste metingen van de wrijvingscoëfficiënt van UHMWPE in combinatie met een glijvlakruwheid in glijrichting van $0,5 \mu\text{m Ra}$ zijn

gemiddelde, standaardafwijking en bovenwaarden vermeld bij een betrouwbaarheid van 90%, 95% en 99% en 99,9 % en bij vlaktedrukken van 1...50 MPa en bij glijsnelheden van 0,01 mm/s tot 100 mm/s, zie tabel 4.

Bronnen voor deze info zijn: [14,18,34,60,67,70,91,98,99,103,105].

Einde inkijkttekst