

# Wrijving

<b>Benadering van het wrijvingsmoment</b> .....	<b>88</b>
<b>Nauwkeurigere berekening van het wrijvingsmoment</b> .....	<b>88</b>
<b>Het nieuwe SKF model voor berekening van het wrijvingsmoment</b> .....	<b>89</b>
Wrijvingsmoment bij rollen.....	90
Wrijvingsmoment bij glijden .....	90
Wrijvingsmoment van afdichtingen.....	90
Bijkomende effecten op het wrijvingsmoment van lagers .....	96
Smeerfilmreductiefactor.....	97
Smeermiddelverdringingsfactor.....	98
Stromingsverliezen bij oliebadsmering.....	98
Grenssmering bij lage toerentallen en viscositeit .....	100
Effect van speling en scheefstelling op wrijving.....	101
Effect van vetvulling op wrijving .....	102
<b>Wrijvingsgedrag van hybride lagers</b> .....	<b>102</b>
<b>Losbreekmoment</b> .....	<b>103</b>
<b>Energieverlies en lagertemperatuur</b> .....	<b>103</b>
<b>Berekeningsvoorbeeld</b> .....	<b>104</b>

De wrijving in een wentellager is de bepalende factor voor de warmteontwikkeling in het betreffende lager en is dus bepalend voor de bedrijfstemperatuur.

De hoeveelheid wrijving hangt af van de belasting en diverse andere factoren, met als belangrijkste: het lagertype en de lagerafmetingen, het bedrijfstoerental, de eigenschappen van het smeermiddel en de hoeveelheid smeermiddel.

De totale rolweerstand van een lager is opgebouwd uit de rollende en glijdende wrijving in het rolcontact, in contactvlakken tussen de rollichamen en de kooi, en tussen de geleidingsvlakken voor de rollichamen of de kooi, de wrijving in het smeermiddel en eventueel de glijdende wrijving van slepende afdichtingen.

## Benadering van het wrijvingsmoment

Onder bepaalde voorwaarden

- lagerbelasting  $P \approx 0,1 C$
- goede smering
- normale bedrijfsomstandigheden

kan het wrijvingsmoment met voldoende nauwkeurigheid worden berekend met behulp van een constante wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  en de volgende formule

$$M = 0,5 \mu P d$$

waarbij

$M$  = wrijvingsmoment, Nmm

$\mu$  = constante wrijvingscoëfficiënt van het lager (→ tabel 1)

$P$  = equivalente dynamische lagerbelasting, N

$d$  = lagerboringsdiameter, mm

## Nauwkeurigere berekening van het wrijvingsmoment

Eén manier om het wrijvingsmoment van een wentellager te berekenen is het wrijvingsmoment op te splitsen in een zogeheten last-onafhankelijk moment  $M_0$  en een last-afhankelijk moment  $M_1$  en deze later bij elkaar op te tellen

$$M = M_0 + M_1$$

Tot op heden was dit de benadering. Er zijn nu echter nauwkeurigere methoden beschikbaar als de verdeling is gebaseerd op het type wrijvingsbron, en niet afhankelijk van de belasting. In feite staat  $M_0$  voor de bijkomende uitwendige wrijvingsbronnen, samen met de "hydrodynamische" verliezen van rollende wrijving, die ook een last-afhankelijk deel heeft.

Tabel 1

Constante wrijvingscoëfficiënt $\mu$ voor niet-afgedichte lagers	
Lagertype	Wrijvingscoëfficiënt $\mu$
Groefkogellagers	0,0015
Hoekcontactkogellagers	
– eenrijig	0,0020
– tweerijig	0,0024
– vierpuntslager	0,0024
Zich instellende kogellagers	0,0010
Cilinderlagers	
– met kooi, als $F_a = 0$	0,0011
– volrollig, als $F_a = 0$	0,0020
Kegellagers	0,0018
Tweerijige tonlagers	0,0018
CARB lagers	0,0016
Kogeltaatslagers	0,0013
Cilindertaatslagers	0,0050
Tontaatslagers	0,0018

Voor een nauwkeurige berekening van het wrijvingsmoment in een wentellager moeten vier verschillende wrijvingsaandelen worden meegerekend:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

waarbij

$M$  = totaal wrijvingsmoment, Nmm

$M_{rr}$  = wrijvingsmoment bij rollen, Nmm

$M_{sl}$  = wrijvingsmoment bij glijden, Nmm

$M_{seal}$  = wrijvingsmoment van de afdichtingen, Nmm

$M_{drag}$  = stromingsverliezen, Nmm

Met deze nieuwe benadering worden de wrijvingsbronnen geïdentificeerd in ieder contact binnen het lager, en worden deze gecombineerd. Daarnaast kunnen de bijdrage van de afdichting en bijkomende uitwendige bronnen naar behoefte worden toegevoegd om het totale wrijvingsmoment te voorspellen. Aangezien bij dit model wordt gekeken naar ieder contact (loopbanen en spoorkragen), kan gemakkelijk rekening worden gehouden met ontwerpwijzigingen en oppervlakverbeteringen, zodat het model nog beter geschikt wordt om verbeteringen in SKF lagerontwerpen te weerspiegelen, en zodat het gemakkelijker bij te werken is.

In onderstaande secties begint het nieuwe SKF model voor het berekenen van wrijvingsmomenten met de eenvoudigste vorm van bijdragen van rollende-, glijdende- en afdichtingswrijving. In het hoofdstuk daarna worden de effecten van het oliepeil in het lager, grenssmering, smeermiddelverdringing en smeerfilmreductie beschreven.

## Het nieuwe SKF model voor berekening van het wrijvingsmoment

Het nieuwe SKF model voor de berekening van het wrijvingsmoment staat voor een nauwkeurigere berekening van het wrijvingsmoment in SKF wentellagers volgens onderstaande formule

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

Het nieuwe SKF model is afgeleid van zeer geavanceerde computerberekeningsmodellen, ontwikkeld door SKF, en geeft een benadering van referentiewaarden onder de volgende toepassingsvoorwaarden:

- Vetsmering of normale manieren van oliesmering: oliebad, oliedruppel en olie-inspuiting.
- Voor gepaarde lagers wordt het wrijvingsmoment voor beide lagers afzonderlijk berekend, waarna deze wordt opgeteld. De radiale belasting is gelijkmatig over de lagers verdeeld; de verdeling van de axiale belasting is afhankelijk van de lageropstelling.
- Belastingen die gelijk zijn aan of groter dan de aanbevolen minimumbelasting.
- Constante belastingen in grootte en richting.
- Normale speling tijdens bedrijf.

### Opmerking

De hier gegeven formules leiden tot tamelijk complexe berekeningen. Het verdient dan ook de sterke aanbeveling om gebruik te maken van de berekeningsmogelijkheden van de "SKF Interactive Engineering Catalogue", beschikbaar op cd-rom of online op [www.skf.com](http://www.skf.com).

## Wrijving

### Wrijvingsmoment bij rollen

Het wrijvingsmoment bij rollen wordt berekend aan de hand van formule

$$M_{rr} = G_{rr} (v n)^{0,6}$$

waarbij

$M_{rr}$  = wrijvingsmoment bij rollen, Nmm

$G_{rr}$  = een variabele, afhankelijk van

– lagertype

– gemiddelde diameter van het lager

$$d_m = 0,5 (d + D), \text{ mm}$$

– de radiale belasting  $F_r$ , N

– de axiale belasting  $F_a$ , N

$n$  = toerental,  $\text{min}^{-1}$

$v$  = kinematische viscositeit van de olie bij bedrijfstemperatuur,  $\text{mm}^2/\text{s}$  (bij vetsmering de basisolie-viscositeit)

De waarden voor  $G_{rr}$  worden verkregen met behulp van de vergelijkingen in **tabel 2** en de geometrische constanten R in **tabel 3**, vanaf **pagina 92**. Beide belastingen,  $F_r$  en  $F_a$ , worden altijd beschouwd als positief.

### Wrijvingsmoment bij glijden

Het wrijvingsmoment bij glijden wordt berekend met de formule

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

waarbij

$M_{sl}$  = wrijvingsmoment bij glijden, Nmm

$G_{sl}$  = een variabele die afhangt van

– het lagertype,

– de gemiddelde diameter van het lager

$$d_m = 0,5 (d + D), \text{ mm}$$

– de radiale belasting  $F_r$ , N

– de axiale belasting  $F_a$ , N

$\mu_{sl}$  = glijdend wrijvingscoëfficiënt waarvan de waarde bij volledig dragende smeerfilm, d.w.z.  $\kappa \geq 2$ , gelijk is aan:  
0,05 voor smering met minerale olie  
0,04 voor smering met synthetische olie  
0,1 voor smering met transmissieolie  
Voor cilinder- of kegelagers worden de volgende waarden genomen:  
0,02 voor cilinderlagers  
0,002 voor kegelagers

De waarden voor  $G_{sl}$  worden verkregen met behulp van de vergelijkingen in **tabel 2** en de geometrische constanten S in **tabel 3**, vanaf **pagina 92**.

### Wrijvingsmoment van afdichtingen

Bij lagers die zijn voorzien van slepende afdichtingen zijn de stromingsverliezen die voortkomen uit de afdichting vaak groter dan die uit het lager zelf. Het wrijvingsmoment van afdichtingen voor lagers die aan beide zijden zijn afgedicht, kan worden geschat aan de hand van de volgende formule

$$M_{seal} = K_{S1} d_S^\beta + K_{S2}$$

waarbij

$M_{seal}$  = wrijvingsmoment van de afdichtingen, Nmm

$K_{S1}$  = constante, afhankelijk van het lagertype

$K_{S2}$  = constante, afhankelijk van lager- en afdichtingstype

$d_S$  = loopvlakdiameter afdichting, vermeld in producttabellen (→ **tabel 4**, **pagina 96**)

$\beta$  = exponent afhankelijk van type lager en afdichting

Waarden voor de constanten  $K_{S1}$ , en  $K_{S2}$  en voor exponent  $\beta$  zijn te vinden in **tabel 4**, **pagina 96**.

$M_{seal}$  is het wrijvingsmoment dat voortkomt uit de twee afdichtingen. Wanneer er maar één afdichting is, bedraagt de wrijving  $0,5 M_{seal}$ .

Voor RSL afdichtingen in groefkogellagers met een buitendiameter van meer dan 25 mm wordt de berekende waarde van  $M_{seal}$  gebruikt, ongeacht of er één of twee afdichtingen zijn.

## Geometrie en last-afhankelijke variabelen voor rollende en glijdende wrijvingsmomenten – radiële lagers

Lagertype	Wrijvingsvariabelen bij rollen $G_{rr}$	Wrijvingsvariabelen bij glijden $G_{sl}$
<b>Groefkogellagers</b>	als $F_a = 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} F_r^{0,54}$ als $F_a > 0$ $G_{rr} = R_1 d_m^{1,96} \left( F_r + \frac{R_2}{\sin \alpha_F} F_a \right)^{0,54}$ $\alpha_F = 24,6 (F_a/C_0)^{0,24}$ , graden	als $F_a = 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,26} F_r^{5/3}$ als $F_a > 0$ $G_{sl} = S_1 d_m^{-0,145} \left( F_r^5 + \frac{S_2 d_m^{1,5}}{\sin \alpha_F} F_a^4 \right)^{1/3}$
<b>Hoekcontactkogellagers<sup>1)</sup></b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n_2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n_2$
<b>Vierpuntslagers</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,97} [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^4 n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,26} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^4 n^2$
<b>Zich instellende kogellagers</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^2 [F_r + F_g + R_2 F_a]^{0,54}$ $F_g = R_3 d_m^{3,5} n^2$	$G_{sl} = S_1 d_m^{-0,12} [(F_r + F_g)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}]$ $F_g = S_3 d_m^{3,5} n^2$
<b>Cilinderslagers</b>	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,41} F_r^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,9} F_a + S_2 d_m F_r$
<b>Kegellagers<sup>1)</sup></b> Voor axiale belastingsfactor Y voor eenrijige lagers → producttabellen	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} (F_r + R_2 Y F_a)^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,82} (F_r + S_2 Y F_a)$
<b>Tweerijige lagers</b>	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,85} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,3} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ als $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ $G_{rr} = G_{rr,e}$ anders $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{0,25} (F_r^4 + S_2 F_a^4)^{1/3}$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,94} (F_r^3 + S_4 F_a^3)^{1/3}$ als $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ $G_{sl} = G_{sl,e}$ anders $G_{sl} = G_{sl,l}$
<b>CARB lagers</b>	als $F_r < (R_2^{-1,85} d_m^{0,78}/R_1^{1,85})^{2,35}$ $G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,97} F_r^{0,54}$ anders $G_{rr,l} = R_2 d_m^{2,37} F_r^{0,31}$	als $F_r < (S_2 d_m^{1,24}/S_1)^{1,5}$ $G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,19} F_r^{5/3}$ anders $G_{sl,l} = S_2 d_m^{1,05} F_r$

<sup>1)</sup> De voor  $F_a$  te gebruiken waarde is de axiale belasting

Tabel 2b

Geometrie en last-afhankelijke variabelen voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden – axiale lagere		
Lagertype	Wrijvingsvariabelen bij rollen $G_{rr}$	Wrijvingsvariabelen bij glijden $G_{sl}$
Kogeltaatslagere	$G_{rr} = R_1 d_m^{1,83} F_a^{0,54}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,05} F_a^{4/3}$
Cilindertaatslagere	$G_{rr} = R_1 d_m^{2,38} F_a^{0,31}$	$G_{sl} = S_1 d_m^{0,62} F_a$
Tontaatslagere	$G_{rr,e} = R_1 d_m^{1,96} (F_r + R_2 F_a)^{0,54}$ $G_{rr,l} = R_3 d_m^{2,39} (F_r + R_4 F_a)^{0,31}$ als $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ $G_{rr} = G_{rr,e}$ anders $G_{rr} = G_{rr,l}$	$G_{sl,e} = S_1 d_m^{-0,35} (F_r^{5/3} + S_2 F_a^{5/3})$ $G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,89} (F_r + F_a)$ als $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ $G_{sr} = G_{sl,e}$ anders $G_{sr} = G_{sl,l}$ $G_f = S_4 d_m^{0,76} (F_r + S_5 F_a)$ $G_{sl} = G_{sr} + \frac{G}{e^{10^{-6} (n v)^{1,4}} d_m}$

Tabel 3

Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden						
Lagertype	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen			wrijvingsmomenten bij glijden		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
Groefkogellagere	Zie tabel 3a			Zie tabel 3a		
Hoekcontactkogellagere						
– eenrijg	$5,03 \times 10^{-7}$	1,97	$1,90 \times 10^{-12}$	$1,30 \times 10^{-2}$	0,68	$1,91 \times 10^{-12}$
– tweerijg	$6,34 \times 10^{-7}$	1,41	$7,83 \times 10^{-13}$	$7,56 \times 10^{-3}$	1,21	$7,83 \times 10^{-13}$
– vierpuntslager	$4,78 \times 10^{-7}$	2,42	$1,40 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-2}$	0,9	$1,40 \times 10^{-12}$
Zich instellende kogellagere	Zie tabel 3b			Zie tabel 3b		
Cilindertagere	Zie tabel 3c			Zie tabel 3c		
Kegellagere	Zie tabel 3d			Zie tabel 3d		
Tweerijg-e tonlagere	Zie tabel 3e			Zie tabel 3e		
CARB lagere	Zie tabel 3f			Zie tabel 3f		
Kogeltaatslagere	$1,03 \times 10^{-6}$			$1,6 \times 10^{-2}$		
Cilindertaatslagere	$2,25 \times 10^{-6}$			0,154		
Tontaatslagere	Zie tabel 3g			Zie tabel 3g		

Tabel 3a

## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van groefkogellagers

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen		wrijvingsmomenten bij glijden	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
2, 3	$4,4 \times 10^{-7}$	1,7	$2,00 \times 10^{-3}$	100
42, 43	$5,4 \times 10^{-7}$	0,96	$3,00 \times 10^{-3}$	40
60, 630	$4,1 \times 10^{-7}$	1,7	$3,73 \times 10^{-3}$	14,6
62, 622	$3,9 \times 10^{-7}$	1,7	$3,23 \times 10^{-3}$	36,5
63, 623	$3,7 \times 10^{-7}$	1,7	$2,84 \times 10^{-3}$	92,8
64	$3,6 \times 10^{-7}$	1,7	$2,43 \times 10^{-3}$	198
160, 161	$4,3 \times 10^{-7}$	1,7	$4,63 \times 10^{-3}$	4,25
617, 618, 628, 637, 638	$4,7 \times 10^{-7}$	1,7	$6,50 \times 10^{-3}$	0,78
619, 639	$4,3 \times 10^{-7}$	1,7	$4,75 \times 10^{-3}$	3,6

Tabel 3b

## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van zich instellende kogellagers

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen			wrijvingsmomenten bij glijden		
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
12	$3,25 \times 10^{-7}$	6,51	$2,43 \times 10^{-12}$	$4,36 \times 10^{-3}$	9,33	$2,43 \times 10^{-12}$
13	$3,11 \times 10^{-7}$	5,76	$3,52 \times 10^{-12}$	$5,76 \times 10^{-3}$	8,03	$3,52 \times 10^{-12}$
22	$3,13 \times 10^{-7}$	5,54	$3,12 \times 10^{-12}$	$5,84 \times 10^{-3}$	6,60	$3,12 \times 10^{-12}$
23	$3,11 \times 10^{-7}$	3,87	$5,41 \times 10^{-12}$	0,01	4,35	$5,41 \times 10^{-12}$
112	$3,25 \times 10^{-7}$	6,16	$2,48 \times 10^{-12}$	$4,33 \times 10^{-3}$	8,44	$2,48 \times 10^{-12}$
130	$2,39 \times 10^{-7}$	5,81	$1,10 \times 10^{-12}$	$7,25 \times 10^{-3}$	7,98	$1,10 \times 10^{-12}$
139	$2,44 \times 10^{-7}$	7,96	$5,63 \times 10^{-13}$	$4,51 \times 10^{-3}$	12,11	$5,63 \times 10^{-13}$

Tabel 3c

## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van cilinderlagers

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen		wrijvingsmomenten bij glijden	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
<b>Lagers met kooi van de uitvoering N, NU, NJ of NUP</b>				
2, 3	$1,09 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
4	$1,00 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
10	$1,12 \times 10^{-6}$		0,17	0,0015
12, 20	$1,23 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
22	$1,40 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
23	$1,48 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015
<b>Volledige lagers van de uitvoering NCF, NJG, NNC, NNCF, NNC en NNF</b>				
All series	$2,13 \times 10^{-6}$		0,16	0,0015



## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van kegellagers

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen		wrijvingsmomenten bij glijden	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
302	$1,76 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
303	$1,69 \times 10^{-6}$	10,9	0,017	2
313 (X)	$1,84 \times 10^{-6}$	10,9	0,048	2
320 X	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,014	2
322	$2,27 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
322 B	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,026	2
323	$2,38 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2
323 B	$2,79 \times 10^{-6}$	10,9	0,030	2
329	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,009	2
330	$2,71 \times 10^{-6}$	11,3	0,010	2
331	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
332	$2,71 \times 10^{-6}$	10,9	0,018	2
LL	$1,72 \times 10^{-6}$	10,9	0,0057	2
L	$2,19 \times 10^{-6}$	10,9	0,0093	2
LM	$2,25 \times 10^{-6}$	10,9	0,011	2
M	$2,48 \times 10^{-6}$	10,9	0,015	2
HM	$2,60 \times 10^{-6}$	10,9	0,020	2
H	$2,66 \times 10^{-6}$	10,9	0,025	2
HH	$2,51 \times 10^{-6}$	10,9	0,027	2
Alle overige	$2,31 \times 10^{-6}$	10,9	0,019	2

## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van tweerijige tonlagers

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen				wrijvingsmomenten bij glijden			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
213 E, 222 E	$1,6 \times 10^{-6}$	5,84	$2,81 \times 10^{-6}$	5,8	$3,62 \times 10^{-3}$	508	$8,8 \times 10^{-3}$	117
222	$2,0 \times 10^{-6}$	5,54	$2,92 \times 10^{-6}$	5,5	$5,10 \times 10^{-3}$	414	$9,7 \times 10^{-3}$	100
223	$1,7 \times 10^{-6}$	4,1	$3,13 \times 10^{-6}$	4,05	$6,92 \times 10^{-3}$	124	$1,7 \times 10^{-2}$	41
223 E	$1,6 \times 10^{-6}$	4,1	$3,14 \times 10^{-6}$	4,05	$6,23 \times 10^{-3}$	124	$1,7 \times 10^{-2}$	41
230	$2,4 \times 10^{-6}$	6,44	$3,76 \times 10^{-6}$	6,4	$4,13 \times 10^{-3}$	755	$1,1 \times 10^{-2}$	160
231	$2,4 \times 10^{-6}$	4,7	$4,04 \times 10^{-6}$	4,72	$6,70 \times 10^{-3}$	231	$1,7 \times 10^{-2}$	65
232	$2,3 \times 10^{-6}$	4,1	$4,00 \times 10^{-6}$	4,05	$8,66 \times 10^{-3}$	126	$2,1 \times 10^{-2}$	41
238	$3,1 \times 10^{-6}$	12,1	$3,82 \times 10^{-6}$	12	$1,74 \times 10^{-3}$	9 495	$5,9 \times 10^{-3}$	1 057
239	$2,7 \times 10^{-6}$	8,53	$3,87 \times 10^{-6}$	8,47	$2,77 \times 10^{-3}$	2 330	$8,5 \times 10^{-3}$	371
240	$2,9 \times 10^{-6}$	4,87	$4,78 \times 10^{-6}$	4,84	$6,95 \times 10^{-3}$	240	$2,1 \times 10^{-2}$	68
241	$2,6 \times 10^{-6}$	3,8	$4,79 \times 10^{-6}$	3,7	$1,00 \times 10^{-2}$	86,7	$2,9 \times 10^{-2}$	31
248	$3,8 \times 10^{-6}$	9,4	$5,09 \times 10^{-6}$	9,3	$2,80 \times 10^{-3}$	3 415	$1,2 \times 10^{-2}$	486
249	$3,0 \times 10^{-6}$	6,67	$5,09 \times 10^{-6}$	6,62	$3,90 \times 10^{-3}$	887	$1,7 \times 10^{-2}$	180

Tabel 3f

## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van CARB lagere

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen		wrijvingsmomenten bij glijden	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
C22	$1,17 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-2}$
C23	$1,20 \times 10^{-6}$	$2,28 \times 10^{-6}$	$1,24 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-2}$
C30	$1,40 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-6}$	$1,58 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$
C31	$1,37 \times 10^{-6}$	$2,77 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
C32	$1,33 \times 10^{-6}$	$2,63 \times 10^{-6}$	$1,31 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$
C39	$1,45 \times 10^{-6}$	$2,55 \times 10^{-6}$	$1,84 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-2}$
C40	$1,53 \times 10^{-6}$	$3,15 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$
C41	$1,49 \times 10^{-6}$	$3,11 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$
C49	$1,49 \times 10^{-6}$	$3,24 \times 10^{-6}$	$1,39 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
C59	$1,77 \times 10^{-6}$	$3,81 \times 10^{-6}$	$1,80 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-2}$
C60	$1,83 \times 10^{-6}$	$5,22 \times 10^{-6}$	$1,17 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-2}$
C69	$1,85 \times 10^{-6}$	$4,53 \times 10^{-6}$	$1,61 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-2}$

Tabel 3g

## Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen en glijden van tontaatslagere

Lagerserie	Geometrische constanten voor wrijvingsmomenten bij rollen				wrijvingsmomenten bij glijden				
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
292	$1,32 \times 10^{-6}$	1,57	$1,97 \times 10^{-6}$	3,21	$4,53 \times 10^{-3}$	0,26	0,02	0,1	0,6
292 E	$1,32 \times 10^{-6}$	1,65	$2,09 \times 10^{-6}$	2,92	$5,98 \times 10^{-3}$	0,23	0,03	0,17	0,56
293	$1,39 \times 10^{-6}$	1,66	$1,96 \times 10^{-6}$	3,23	$5,52 \times 10^{-3}$	0,25	0,02	0,1	0,6
293 E	$1,16 \times 10^{-6}$	1,64	$2,00 \times 10^{-6}$	3,04	$4,26 \times 10^{-3}$	0,23	0,025	0,15	0,58
294 E	$1,25 \times 10^{-6}$	1,67	$2,15 \times 10^{-6}$	2,86	$6,42 \times 10^{-3}$	0,21	0,04	0,2	0,54

Wrijvingsmoment van de afdichting: Exponenten en constanten voor de berekening						
Type afdichting Lagertype	Lager buiten- diameter		Exponenten en constanten			Afdichting loop- vlak diameter $d_s^{1)}$
	D boven	t/m	$\beta$	$K_{S1}$	$K_{S2}$	
<b>RSL afdichtingen</b> Groefkogellagers	25	25 52	0 2,25	0 0,0018	0	$d_2$ $d_2$
<b>RZ afdichtingen</b> Groefkogellagers		175	0	0	0	$d_1$
<b>RSH afdichtingen</b> Groefkogellagers		52	2,25	0,028	2	$d_2$
<b>RS1 afdichtingen</b> Groefkogellagers		62 62 80 80 100 100	2,25 2,25 2,25 2,25 2,25	0,023 0,018 0,018 0,018 0,018	2 20 15 0	$d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$ $d_1, d_2$
Hoekcontactkogellagers	30	120	2	0,014	10	$d_1$
Zich instellende kogellagers	30	125	2	0,014	10	$d_2$
<b>LS afdichtingen</b> Cilinderlagers	42	360	2	0,032	50	E
<b>Afdichtingen CS, CS2 en CS5</b> Tweerijige tonlagers	62	300	2	0,057	50	$d_2$
CARB lagers	42	340	2	0,057	50	$d_2$

<sup>1)</sup> Aanduiding van de afmetingen vermeld in de producttabel

### Bijkomende effecten op het wrijvingsmoment van lagers

Voor een nog betere benadering van het werkelijke gedrag van het lager en indien er een nog nauwkeurigere berekening noodzakelijk is, kan het nieuwe SKF model bijkomende effecten berekenen; die aan de vergelijking kunnen worden toegevoegd. Deze bijkomende effecten zijn onder andere

- smeerfilmreductie
- smeermiddelverdringing uit de rollichaam/loopbaancontactzone bij oliedruppel-, olieinspuit-, vetsmering en oliebad-smering met laag oliepeil
- stromingsverliezen bij oliebad-smering

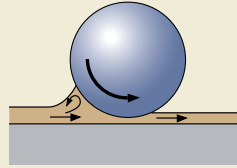
- grenssmering voor lage toerentallen en/of lage viscositeit.

Inclusief deze aanvullende bronnen wordt de vergelijking voor het totale wrijvingsmoment van een lager

$$M = \Phi_{ish} \Phi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}$$

Fig. 1

Retourstroom bij de invoer van het contact



Retourstroom van het smeermiddel

waarbij

$M$  = totaal wrijvingsmoment van het lager, Nmm

$$M_{rr} = G_{rr} (\nu n)^{0,6}$$

$$M_{sl} = G_{sl} \mu_{sl}$$

$$M_{seal} = K_{S1} d_s^\beta + K_{S2}$$

$M_{drag}$  = wrijvingsverliezen in het smeermiddel, Nmm

$\Phi_{ish}$  = smeermiddelreductiefactor

$\Phi_{rs}$  = smeermiddelverdringingsfactor

De reductiefactoren  $\Phi_{ish}$  en  $\Phi_{rs}$  zijn ingevoerd in het nieuwe SKF wrijvingsmodel ter verrekening van de effecten van respectievelijk de temperatuursafhankelijke smeermiddelreductie en de toerentalafhankelijke smeermiddelverdringing op de rollende wrijving. De wrijvingscoëfficiënt bij glijden msl neemt toe bij lage toerentallen en/of lage viscositeit ter verrekening van grenssmeringstoestand.

### Smeermiddelreductiefactor

Wanneer er voldoende smeermiddel aanwezig is in een lager, kan niet alles door het rolcontact gaan; slechts een kleine hoeveelheid smeermiddel wordt gebruikt voor het opbouwen van de smeermiddel. Hierdoor zal een deel van het smeermiddel voor de rol en het contactvlak terugstromen (→ fig. 1). Deze retourstroom veroorzaakt wrijving waardoor warmte ontstaat die een lagere viscositeit van de olie tot gevolg heeft.

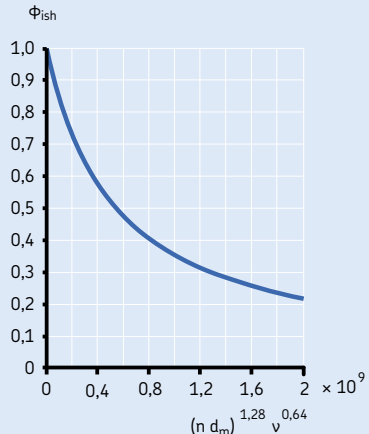
Voor het hierboven beschreven effect kan de reductiefactor worden benaderd met de volgende formule

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} (n d_m)^{1,28} \nu^{0,64}}$$

waarbij

Diagram 1

Smeermiddelreductiefactor  $\Phi_{ish}$



## Wrijving

$\Phi_{ish}$  = smeefilm reductiefactor  
 $n$  = toerental,  $\text{min}^{-1}$   
 $d_m$  = gemiddelde diameter van het lager, mm  
 $\nu$  = kinematische viscositeit van het smeermiddel bij bedrijfstemperatuur,  $\text{mm}^2/\text{s}$  (bij vetsmering de basisolieviscositeit)

Waarden voor de smeefilmreductiefactor  $\Phi_{ish}$  kunnen worden afgelezen uit **diagram 1** als functie van de gecombineerde parameter  $(n d_m)^{1,28} \nu^{0,64}$ .

## Smeermiddelverdringingsfactor

Voor oliedruppel-, olie- en laag niveau oliebadsmearing (bijvoorbeeld oliepeil lager dan het midden van het onderste rollichaam) en bij vetsmering kan overtollig smeermiddel worden weggedrukt door het overrollen van de loopbanen. Vanwege het lagertoerental of hoge viscositeit zal het smeermiddel aan de randen van de contactvlakken misschien niet voldoende tijd hebben om de loopbanen aan te vullen; dit effect heet "kinematische grenssmering" en veroorzaakt een kleinere smeefilm dikte en een verminderde rollende wrijving.

Voor de hierboven beschreven soort smeringsomstandigheden kan de smeermiddelverdringingsfactor bij benadering worden verkregen uit

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs}} \nu n (d + D) \sqrt{\frac{K_z}{2(D-d)}}}$$

waarbij

$\Phi_{rs}$  = smeermiddelverdringingsfactor  
 $e$  = basis van natuurlijk logaritme  $\approx 2,718$   
 $K_{rs}$  = een factor voor het soort smering  $3 \times 10^{-8}$  voor laag oliebadniveau en voor olie-inspuitingsmering  $6 \times 10^{-8}$  voor vetsmering en oliedruppelsmering  
 $K_z$  = lagertype afhankelijke geometrische constante ( $\rightarrow$  **tabel 5**)  
 $\nu$  = kinematische olieviscositeit bij bedrijfstemperatuur,  $\text{mm}^2/\text{s}$   
 $n$  = toerental,  $\text{min}^{-1}$   
 $d$  = lagerboringdiameter, mm  
 $D$  = buitendiameter van het lager, mm

## Stromingsverliezen bij oliebadsmearing

Tabel 5

Geometrische constanten  $K_z$  and  $K_L$  voor stromingsverliesberekening van het smeermiddel

Lagertype	Geometrische constanten	
	$K_z$	$K_L$
<b>Groefkogellagers</b> – een- en tweerijig	3,1	–
<b>Hoekcontactkogellagers</b> – eenrijig	4,4	–
– tweerijig	3,1	–
– vierpuntslager	3,1	–
<b>Zich instellende kogellagers</b>	4,8	–
<b>Cilinderlagers</b> – een- en tweerijig	5,1	0,65
– vollrolig, een- en tweerijig	6,2	0,7
<b>Kegellagers</b>	6	0,7
<b>Tweerijige tonlagers</b>	5,5	0,8
<b>CARB lagers</b> – met kooi	5,3	0,8
– vollrolig	6	0,75
<b>Kogeltaatslagers</b>	3,8	–
<b>Cilindertaatslagers</b>	4,4	0,43
<b>Tontaatslagers</b>	5,6	0,58 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Alleen voor enkel gemonteerde lagers

De stromings-, karn- en spatverliezen vormen een belangrijk aandeel in de totale wrijving en worden als stromingsverlies afhankelijke wrijvingsmoment  $M_{\text{drag}}$  in de berekening opgenomen.

Bij oliebadsmearing wordt het lager gedeeltelijk, of in speciale gevallen geheel, ondergedompeld. Onder deze omstandigheden kunnen de grootte en de geometrie van het oliereservoir samen met het oliepeil een grote invloed hebben op het wrijvingsmoment van het lager. Voor een zeer groot oliebad kunnen de stromingsverliezen in een lager bij benadering worden bepaald als functie van het oliepeil in het reservoir via de variabele  $V_M$ , uitgezet in **diagram 2** als functie van het oliepeil  $H$  (→ **fig. 2**) en de gemiddelde diameter van het lager  $d_m = 0,5 (d + D)$ . Hierbij wordt de invloed van de reservoirgrootte en invloeden van andere mechanische onderdelen die in de nabijheid van het lager actief zijn genegeerd. **Diagram 2** kan worden toegepast voor lagertoerentallen tot het referentietoerental van het lager. Bij hogere toerentallen en hoge oliepeilen kunnen andere effecten een belangrijke invloed hebben op het resultaat.

De variabele  $V_M$  in **diagram 2** is gerelateerd aan het wrijvingsmoment van stromingsverliezen voor kogellagers door

$$M_{\text{drag}} = V_M K_{\text{ball}} d_m^5 n^2$$

en voor rollagers door

$$M_{\text{drag}} = 10 V_M K_{\text{roll}} B d_m^4 n^2$$

waarbij

$M_{\text{drag}}$  = stromingsverliezen, Nmm

$V_M$  = variabele als functie van het oliepeil volgens **diagram 2**

$K_{\text{ball}}$  = kogellagergerelateerde constante, zie hieronder

$K_{\text{roll}}$  = rollagergerelateerde constante, zie hieronder

$d_m$  = gemiddelde lagerboringdiameter, mm

$B$  = breedte lagerbinnenring, mm

$n$  = toerental,  $\text{min}^{-1}$

Waarden voor de variabele  $V_M$  zijn af te lezen uit **diagram 2**; de rode curve geldt voor kogellagers en de blauwe voor rollagers.

De kogellagergerelateerde constante wordt gedefinieerd als

Fig. 2

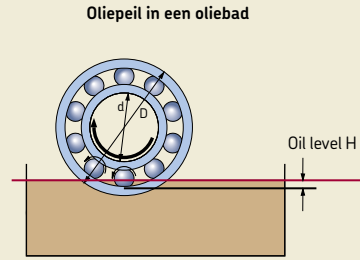
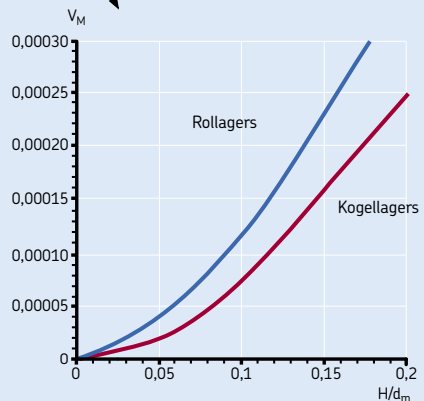
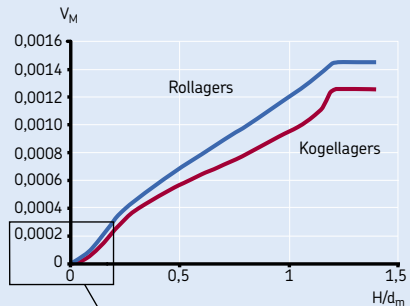


Diagram 2

Stromingsverliesvariabele  $V_M$



## Wrijving

$$K_{\text{ball}} = \frac{i_{\text{rw}} K_Z (d + D)}{D - d} \times 10^{-12}$$

en de rollagergerelateerde constante als

$$K_{\text{roll}} = \frac{K_L K_Z (d + D)}{D - d} \times 10^{-12}$$

waarbij

$K_{\text{ball}}$  = kogellagergerelateerde constante

$K_{\text{roll}}$  = rollagergerelateerde constante

$i_{\text{rw}}$  = het aantal kogelrijen

$K_Z$  = lagertype afhankelijke geometrische constante (→ **tabel 5, pagina 98**)

$K_L$  = rollagertype afhankelijke geometrische constante (→ **tabel 5, pagina 98**)

$d$  = lagerboringdiameter, mm

$D$  = buitendiameter van het lager, mm

### Opmerking

Om de stromingsverliezen bij olie-inspuitsmering te berekenen kan gebruik worden gemaakt van het oliebadmodel, met het oliepeil tot halverwege de diameter van het rollichaam; vervolgens wordt de verkregen waarde voor  $M_{\text{drag}}$  vermenigvuldigd met een factor twee.

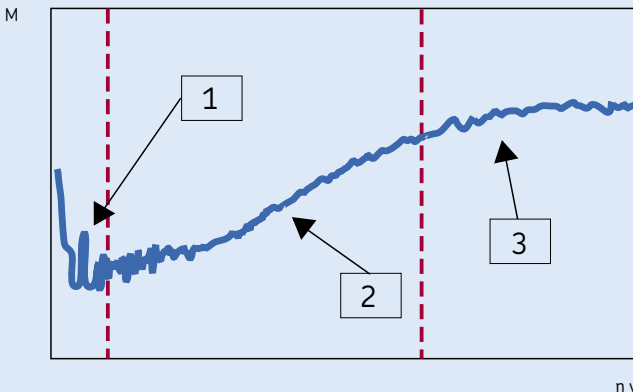
Om de stromingsverliezen te berekenen voor verticale asopstellingen kan een benaderde waarde worden verkregen met het model voor volledig ondergedompelde lagers, waarbij de verkregen waarde voor  $M_{\text{drag}}$  wordt vermenigvuldigd met een factor die gelijk is aan de breedte (hoogte) die is ondergedompeld ten opzichte van de totale lagerbreedte (-hoogte).

### Grenssmering bij lage toerentallen en viscositeit

Voor bedrijfsomstandigheden met lage  $\kappa$  waarden ( $\leq 2$ ) ligt de toepassing in het grenssmeringsregime; waarbij af en toe metallisch contact optreedt, dit verhoogt de wrijving. Een schets van een typisch lagerwrijvingsmoment als functie van toerental en viscositeit wordt afgebeeld in **diagram 3**. Tijdens de opstartperiode met toenemend toerental of toenemende viscositeit neemt het wrijvingsmoment af, aangezien er een smeerfilm wordt opgebouwd en het lager een elasto-hydrodynamische smering krijgt (EHL). Bij hogere toerentallen of viscositeit neemt de wrijving toe vanwege de dikkere smeerfilm, totdat de wrijving weer afneemt omdat grenssmering ontstaat en door thermische effecten.

Diagram 3

Lagerwrijvingsmoment als functie van toerental en viscositeit van het smeermiddel



Zone 1: Grenssmering  
Zone 2: EHL Elasto-hydrodynamische smering  
Zone 3: EHL + thermische en grenssmering-effecten

De coëfficiënt van glijdende wrijving kan worden berekend met de volgende vergelijking

$$\mu_{sl} = \Phi_{bl} \mu_{bl} + (1 - \Phi_{bl}) \mu_{EHL}$$

waarbij

$\mu_{sl}$  = coëfficiënt van glijdende wrijving

$\Phi_{bl}$  = wegingsfactor voor grenssmering, zie onder

$\mu_{bl}$  = coëfficiënt afhankelijk van de toevoegingen in het smeermiddel, waarde bij benadering

$\mu_{EHL}$  = wrijvingscoëfficiënt bij volledige smeerfilm:

0,05 voor smering met minerale olie

0,04 voor smering met synthetische olie

0,1 voor smering met transmissieolie

Voor toepassingen met cilinder- en kegellagers worden de volgende waarden genomen:

0,02 voor cilinderlagers

0,002 voor kegellagers.

De wegingsfactor voor het wrijvingsmoment bij glijden kan worden geschat aan de hand van de volgende vergelijking

$$\Phi_{bl} = \frac{1}{e^{2,6 \times 10^{-8} (n v)^{1,4} d_m}}$$

waarbij

$\Phi_{bl}$  = wegingsfactor voor het wrijvingsmoment bij glijden

e = basis van natuurlijk logaritme = 2,718

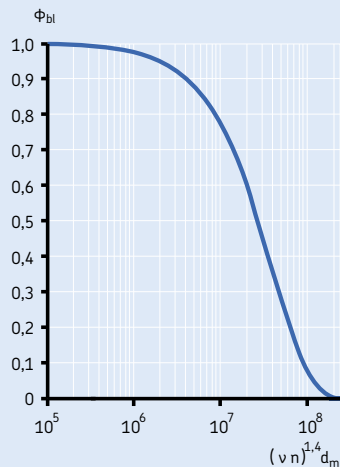
n = bedrijfstoerental,  $\text{min}^{-1}$

v = kinematische viscositeit van het smeermiddel bij bedrijfstemperatuur,  $\text{mm}^2/\text{s}$  (bij vetsmering de basisolie-viscositeit)

$d_m$  = gemiddelde diameter van het lager, mm

Diagram 4

Wegingsfactor voor glijdend wrijvingscoëfficiënt  $\Phi_{bl}$





## Wrijving

Een schatting van de wegingsfactor  $\phi_{bl}$  voor het wrijvingsmoment bij glijden kan worden gemaakt met de curve in **diagram 4**.

### Effect van speling en scheefstelling op wrijving

Bij wijzigingen in speling en/of scheefstelling in lagers veranderd ook het wrijvingsmoment. Het hierboven beschreven model houdt rekening met normale speling zonder scheefstelling van het lager. Bij hoge bedrijfstemperaturen van het lager of bij hoge toerentallen kan de lagerspeling minder worden, wat kan leiden tot toename van de wrijving. Scheefstelling veroorzaakt meestal een toename van de wrijving; maar voor zich instellende kogellagers, tweerijige tonlagers, CARB lagers en tontaatslagers is de bij scheefstelling bijbehorende toename van wrijving verwaarloosbaar.

Voor specifieke toepassingsomstandigheden die gevoelig zijn voor wijzigingen in speling en scheefstelling kan contact worden opgenomen met de SKF application engineering service.

### Effect van vetvulling op wrijving

Wanneer vetsmering wordt gebruikt en wanneer het lager net is gevuld (of nagesmeerd) met de aanbevolen hoeveelheid vet, kan het lager een aanzienlijk hogere wrijvingswaarden opleveren tijdens de eerste uren of dagen van bedrijf (afhankelijk van het toerental) dan oorspronkelijk berekend was. Dit komt doordat het even duurt voordat het vet zich verdeeld heeft in de vrije ruimte in het lager; in die tussentijd wordt het gekneet en verplaatst. Om een schatting te maken van dit effect wordt het aanvankelijke wrijvingsmoment bij rollen vermenigvuldigd met een factor 2 voor lichte series en met een factor 4 voor zware series. Na deze inlooperperiode daalt het wrijvingsmoment tot vergelijkbare waarden als bij oliegesmeerde lagers; in vele gevallen zijn zelfs lagere waarden mogelijk. Als het lager is gevuld met een overmatige hoeveelheid vet, kan een hogere wrijvingswaarden in het lager het gevolg zijn. Raadpleeg het gedeelte "Nasmering" vanaf **pagina 237** of neem contact op met de SKF application engineering service voor meer informatie.

## Wrijvingsgedrag van hybride lagers

Vanwege de hogere elasticiteitsmodulus van keramische materialen hebben hybride lagers kleinere contactvlakken; hierdoor wordt de rollende en glijdende wrijving van de onderdelen lager. Verder is de dichtheid van keramische stoffen lager dan die van staal, waardoor de middelpuntvliedende krachten lager zijn. Ook dit kan zorgen voor lagere wrijving bij hoge toerentallen.

In bovenstaande vergelijkingen is het wrijvingskoppel voor hybride hoekcontactkogellagers berekend door de geometrische constanten  $R_3$  en  $S_3$  van de stalen lagers te vervangen door resp.  $0,41 R_3$  en  $0,41 S_3$

In constructies ontworpen voor hoge toerentallen is het gebruikelijk dat de lagers axiaal worden voorgespannen. De groefkogellagers zullen onder dergelijke omstandigheden functioneren als hoekcontactkogellagers en dus een vergelijkbare vermindering van wrijving bij hoge toerentallen hebben. Dergelijke wrijvingsberekeningen moeten echter worden uitgevoerd in samenwerking met de SKF application engineering service.

## Losbreekmoment

Het losbreekmoment van een wentellager wordt gedefinieerd als het wrijvingsmoment dat overwonnen moet worden voordat het lager zich vanuit rust in beweging zet. Bij normale omgevingstemperatuur, +20 tot +30 °C, beginnend bij snelheid nul en  $\mu_{sl} = \mu_{gl}$ , kan het losbreekmoment worden berekend met alleen het wrijvingsmoment bij glijden en het wrijvingsmoment van afdichtingen, indien aanwezig. Dus

$$M_{start} = M_{sl} + M_{seal}$$

waarbij

$M_{start}$  = losbreek-wrijvingsmoment, Nmm

$M_{sl}$  = wrijvingsmoment bij glijden, Nmm

$M_{seal}$  = wrijvingsmoment van de afdichtingen, Nmm

Het losbreekmoment kan echter aanzienlijk hoger liggen voor wentellagers met een grote contacthoek, maximaal vier maal zo hoog voor kegellagers uit de series 313, 322 B, 323 B en T7FC, en maximaal acht maal zo hoog voor tontaatslagers.

## Energieverlies en lagertemperatuur

Het energieverlies in het lager tengevolge van lagerwrijving kan worden verkregen met de vergelijking

$$N_R = 1,05 \times 10^{-4} M n$$

waarbij

$N_R$  = energieverlies, W

$M$  = totaal wrijvingsmoment van het lager, Nmm

$n$  = bedrijfstoerental, min<sup>-1</sup>

Als de koefactor (de door het lager af te voeren energie per graad temperatuurverschil tussen het lager en de omgeving) bekend is, kan een ruwe schatting worden gemaakt van de bedrijfstemperatuur van het lager met gebruikmaking van de formule

$$\Delta T = N_R / W_s$$

waarbij

$\Delta T$  = temperatuurstijging, °C

$N_R$  = energieverlies, W

$W_s$  = koefactor, W/°C

## Berekeningsvoorbeeld

Een tweerijig tonlager 22208 E moet functioneren bij een toerental van 3 500 min<sup>-1</sup> onder de volgende bedrijfsomstandigheden:

Radiale lagerbelasting  $F_r = 2\,990$  N

Axiale lagerbelasting  $F_a = 100$  N

Binnenringrotatie

Bedrijfstemperatuur +40 °C

Oliebadsmeting

Oliepeil  $H = 2,5$  mm boven de rand van de buitenringloopbaan bij stilstand. Minerale olie met een kinematische viscositeit  $\nu = 68$  mm<sup>2</sup>/s bij 40 °C

Vraag:

104

Wat is het totale wrijvingsmoment?

### 1. Berekening van de geometrie en belastingsafhankelijke variabelen

Volgens **tabel 2a** op **pagina 91** met gemiddelde lagerdiameter

$$d_m = 0,5 (d + D) = 0,5 (40 + 80) = 60 \text{ mm}$$

- Rollende wrijvingsvariabelen

$$\begin{aligned} G_{rr,e} &= R_1 d_m^{1,85} (F_r + R_2 F_a)^{0,54} \\ &= 1,6 \times 10^{-6} \times 60^{1,85} \times \\ &\quad (2\,990 + 5,84 \times 100)^{0,54} \\ &= 0,26 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{rr,l} &= R_3 d_m^{2,3} (F_r + R_4 F_a)^{0,31} \\ &= 2,81 \times 10^{-6} \times 60^{2,3} \times \\ &\quad (2\,990 + 5,8 \times 100)^{0,31} \\ &= 0,436 \end{aligned}$$

aangezien  $G_{rr,e} < G_{rr,l}$ , volgt

$$G_{rr} = 0,26$$

- Glijdende wrijvingsvariabelen

$$\begin{aligned} G_{sl,e} &= S_1 d_m^{0,25} (F_r^4 + S_2 F_a^4)^{1/3} \\ &= 3,62 \times 10^{-3} \times 60^{0,25} \times \\ &\quad (2\,990^4 + 508 \times 100^4)^{1/3} \\ &= 434 \end{aligned}$$

$$G_{sl,l} = S_3 d_m^{0,94} (F_r^3 + S_4 F_a^3)^{1/3}$$

$$= 8,8 \times 10^{-3} \times 60^{0,94} \times$$

$$(2\,990^3 + 117 \times 100^3)^{1/3}$$

$$= 1\,236,6$$

aangezien  $G_{sl,e} < G_{sl,l}$ , volgt

$$G_{sl} = 434$$

## 2. Berekening van het wrijvingsmoment bij rollen

$$M_{rr} = G_{rr} (v n)^{0,6} = 0,26 \times (68 \times 3\,500)^{0,6}$$

$$= 437 \text{ Nmm}$$

## 3. Berekening van het wrijvingsmoment bij glijden

Uitgaande van volledige smeefilmcondities,  $\kappa > 2$

$$M_{sl} = \mu_{sl} G_{sl} = 0,05 \times 434 = 21,7 \text{ Nmm}$$

## 4. Berekening van de smeefilmreductiefactor

$$\Phi_{ish} = \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} \times (n \times d_m)^{1,28} v^{0,64}}$$

$$= \frac{1}{1 + 1,84 \times 10^{-9} \times (3\,500 \times 60)^{1,28} 68^{0,64}}$$

$$\approx 0,85$$

## 5. Berekening van de smeermiddelverdringingsfactor

$$\Phi_{rs} = \frac{1}{e^{K_{rs} v n (d + D)} \sqrt{\frac{K_Z}{2(D-d)}}}$$

$$= \frac{1}{2,718^3 \times 10^{-8} \times 68 \times 3\,500 \times (40 + 80) \sqrt{\frac{5,5}{2 \times (80 - 40)}}}$$

$$\approx 0,8$$

## 6. Berekening van de stromingsverliezen bij oliebadsmearing

Met een smeermiddelverliesvariabele als functie van

$$H/d_m = 2,5/60 = 0,041$$

Aan **diagram 2 op pagina 99** is af te lezen dat de stromingsverliezen gering zijn, aangezien  $H/d_m < 0,1$ . Hiermee kan echter toch rekening worden gehouden. Voor rollagers wordt de smeermiddelverliesvariabele  $V_M$  circa  $0,3 \times 10^{-4}$ .

Daarna kan de rollager-gerelateerde constante worden verkregen uit

$$K_{roll} = \frac{K_L K_Z (d + D)}{D - d} \times 10^{-12}$$

$$= \frac{0,8 \times 5,5 \times (40 + 80)}{80 - 40} \times 10^{-12}$$

$$= 13,2 \times 10^{-12}$$

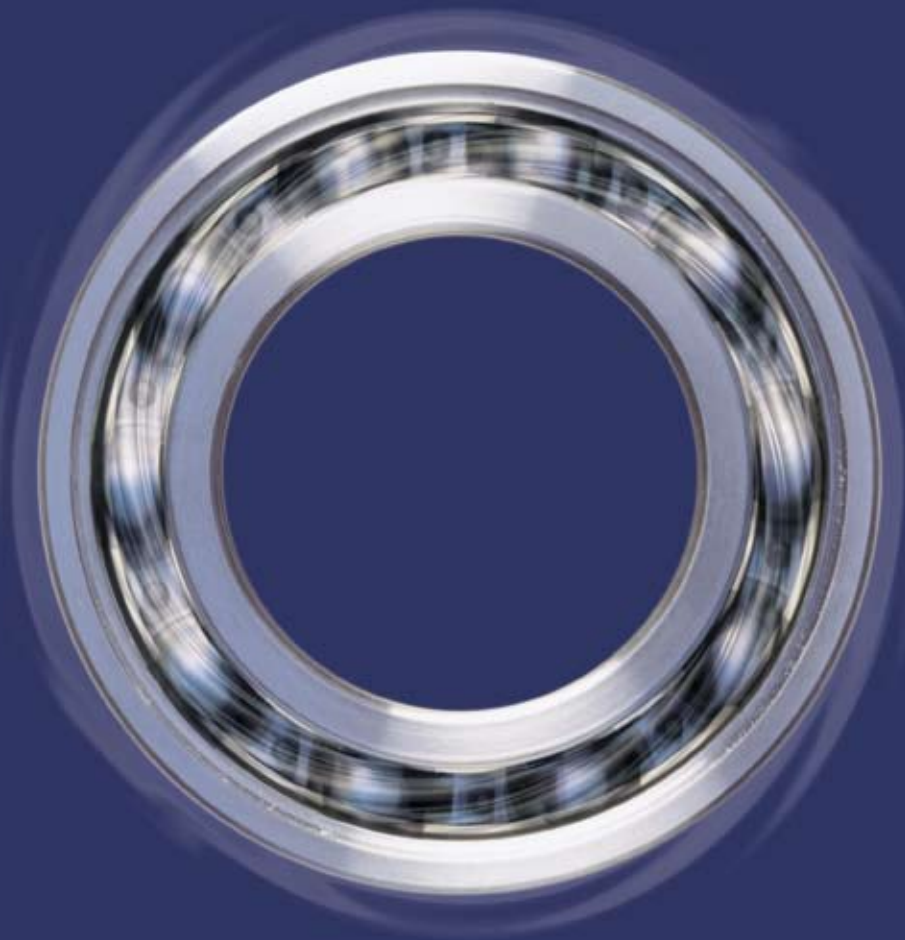
De stromingsverliezen kunnen bij benadering worden verkregen uit

$$M_{drag} = 10 V_M K_{roll} B d_m^4 n^2$$

$$= 10 \times 0,3 \times 10^{-4} \times$$

$$13,2 \times 10^{-12} \times 23 \times 604 \times 3\,500^2$$

$$= 14,5 \text{ Nmm}$$



# Toerentallen en trilling

<b>Referentietoerentallen</b> .....	<b>108</b>
Invloed van belasting en olieviscositeit op referentietoerental/toelaatbaar toerental.....	108
Toerentallen boven het referentietoerental .....	109
<b>Grenstoerentallen</b> .....	<b>114</b>
<b>Uitzonderlijke gevallen</b> .....	<b>114</b>
Lage toerentallen .....	114
Oscillerende bewegingen .....	114
<b>Trillingen in een lager</b> .....	<b>115</b>
Genereren van trillingen door een variërend aantal belaste rollichamen .....	115
Vormafwijkingen van componenten.....	115
Plaatselijke schade .....	115
Verontreiniging.....	115
<b>Invloed van de lagers op het trillingsgedrag van de toepassing</b> .....	<b>115</b>

## Toerentallen en trilling

Er is een grens aan het toerental waarbij wettellagers kunnen draaien. Meestal wordt deze grens bepaald door de bedrijfstemperatuur voor het gebruikte smeermiddel of door het materiaal van de lageronderdelen.

Bij welk toerental de uiterste gebruikstemperatuur wordt bereikt, is afhankelijk van de wrijvingswarmte die in het lager wordt gegenereerd (inclusief eventuele warmte van buiten) en de hoeveelheid warmte die van het lager kan worden afgevoerd.

Lagertype en -grootte, inwendige constructie, smering en warmteafvoer, evenals kooiontwerp, nauwkeurigheid en lagerspeling spelen een rol bij de bepaling van het haalbare toerental.

In de producttabellen worden meestal twee toerentallen vermeld: het (thermische) referentietoerental en het (kinematische) grenstoerental, waarvan de waarde afhankelijk is van de in overweging genomen criteria.

## Referentietoerentallen

Het (thermische) referentietoerental in de producttabellen staat voor een referentiewaarde aan de hand waarvan kan worden bepaald wat het toelaatbare bedrijfstoerental van het lager is, wanneer dat wordt onderworpen aan een bepaalde belasting en wanneer het draait met een bepaalde viscositeit van het smeermiddel.

De waarden van het referentietoerental in de tabel zijn in overeenstemming met ISO 15312 (waarbij axiale lagers niet worden vermeld). Deze ISO norm is vastgesteld voor oliesmering, maar geldt ook voor vetsmering.

Het referentietoerental voor een gegeven lager staat voor het toerental onder opgegeven bedrijfscondities, waarbij er een evenwicht is tussen de warmte die het lager zelf genereert en de warmte die naar de as, het huis en het smeermiddel wordt afgegeven. De referentiecondities volgens ISO 15312 voor het verkrijgen van dit warmte-evenwicht zijn

- een temperatuurstijging van 50 °C boven een omgevingstemperatuur van 20 °C, d.w.z. een lagertemperatuur van 70 °C, gemeten op de stilstaande buitenring van het lager, of op de huisring
- radiaal lager: een constante radiale belasting van 5 % van het statisch draaggetal  $C_0$

- axiale lagers: een constante axiale belasting van 2 % van het statisch draaggetal  $C_0$
- niet-afgedichte lagers met Normale speling

### voor oliegesmeerde lagers

- smeermiddel: minerale olie zonder EP-toevoegingen en met een kinematische viscositeit bij 70 °C van  $v = 12 \text{ mm}^2/\text{s}$  (ISO VG 32) voor radiale kogellagers  
 $v = 24 \text{ mm}^2/\text{s}$  (ISO VG 68) voor axiale rollagers
- smering: oliebad waarbij de olie tot aan de hartlijn van het onderste rollichaam komt

### voor vetgesmeerde lagers

- smeermiddel: normaal lithiumzeepvet met een minerale basisolie met een viscositeit tussen 100 en 200  $\text{mm}^2/\text{s}$  bij 40 °C (bijv. ISO VG 150)
- hoeveelheid vet: circa 30 % van de vrije ruimte in het lager.

Tijdens de eerste opstart van een met vet gesmeerd lager kan een piektemperatuur optreden. Het lager zal 10 tot 20 bedrijfsuren moeten draaien voordat de normale bedrijfstemperatuur wordt bereikt.

Onder deze specifieke omstandigheden is het referentietoerental voor olie- en vetsmering identiek.

Het kan nodig zijn de toerentallen te verlagen bij toepassingen met een roterende buitenring.

Voor bepaalde lagers, waarbij het grenstoerental niet alleen wordt bepaald door warmte van het rollichaam en/of de loopbaancontacten, worden alleen grenstoerentallen aangegeven in de lagertabellen. Hiertoe behoren bijvoorbeeld lagers met slepende afdichtingen.

## Invloed van belasting en olieviscositeit op referentietoerental/toelaatbaar toerental

Wanneer belasting en viscositeitswaarden worden toegepast die hoger zijn dan de referentiewaarden, zal de wrijvingsweerstand toenemen zodat een lager niet kan functioneren bij het voorgestelde referentietoerental, tenzij hogere temperaturen toelaatbaar zijn. Lagere viscositeitswaarden kunnen leiden tot hogere bedrijfstoerentallen.

De invloed van belasting en kinematische viscositeit op het referentietoerental zijn te verkrijgen uit de diagrammen:

$$n_{\text{toel}} = n_r f_p \frac{f_v \text{ actual base oil viscosity}}{f_v \text{ base oil viscosity ISO VG150}}$$

**Diagram 1:** Radiale kogellagers, **pagina 110.**

**Diagram 2:** Radiale kogellagers, **pagina 111.**

**Diagram 3:** Axiale kogellagers, **pagina 112.**

**Diagram 4:** Axiale rollagers, **pagina 113.**

### Oliesmering

Waarden voor de correctiefactoren voor oliesmering

- $f_p$ : voor de invloed van de equivalente dynamische lagerbelasting  $P$  en
- $f_v$ : voor de invloed van de viscositeit

zijn te verkrijgen uit de **diagrammen 1 t/m 4** als als functie van  $P/C_0$  en de gemiddelde lagerdiameter  $d_m$

waarbij

$P$  = equivalente dynamische lagerbelasting, kN

$C_0$  = statisch draaggetal, kN

$d_m$  = gemiddelde diameter van het lager  
=  $0,5 (d + D)$ , mm

De viscositeitswaarden in de diagrammen worden uitgedrukt in ISO aanduidingen, bijvoorbeeld ISO VG 32, waarbij de olieviscositeit  $32 \text{ mm}^2/\text{s}$  bij  $40^\circ\text{C}$  is.

Als de referentietemperatuur van  $70^\circ\text{C}$  ongewijzigd blijft, wordt het toelaatbare toerental verkregen uit

$$n_{\text{toel}} = n_r f_p f_v$$

waarbij

$n_{\text{toel}}$  = toelaatbaar lagertoerental,  $\text{min}^{-1}$

$n_r$  = referentietoerental,  $\text{min}^{-1}$

$f_p$  = correctiefactor voor lagerbelasting  $P$

$f_v$  = adjustment factor for oil viscosity

### Vetsmering

De diagrammen zijn ook geldig voor vetsmering. Het referentietoerental voor vetsmering is echter gebaseerd op basis-olieviscositeit VG 150, maar kan ook worden gebruikt voor viscositeitsbereik ISO VG 100 – ISO VG 200. Voor overige viscositeiten moet de waarde van  $f_v$  worden berekend als  $f_v$  voor de basisolieviscositeit bij  $40^\circ\text{C}$  van het geselecteerde vet, gedeeld door  $f_v$  voor een olie met ISO VG 150.

### Voorbeeld 1

Een groefkogellager, type 6210 wordt onderworpen aan een belasting  $P = 0,24 C_0$  de smeerring is middels een oliebad met een olieviscositeit van  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$  bij  $40^\circ\text{C}$ . Welk referentietoerental is te verwachten?

Voor lager 6210:  $d_m = 0,5 (50 + 90) = 70 \text{ mm}$ . Uit **diagram 1, pagina 110**, met  $d_m = 70 \text{ mm}$  en  $P/C_0 = 0,24$ ,  $f_p = 0,63$  en met  $P/C_0 = 0,24$  en ISO VG 68,  $f_v = 0,85$ .

Het toelaatbare lagertoerental waarvoor een bedrijfstemperatuur van  $70^\circ\text{C}$  kan worden verwacht,  $n_{\text{toel}}$ , is dan

$$n_{\text{toel}} = 15\,000 \times 0,63 \times 0,85 = 8\,030 \text{ min}^{-1}$$

### Voorbeeld 2

Een tweerijig tonlager 22222 E wordt onderworpen aan een belasting  $P = 0,15 C_0$  en wordt gesmeerd met vet, de basisolieviscositeit van het vet is  $220 \text{ mm}^2/\text{s}$  bij  $40^\circ\text{C}$ . Welk referentietoerental is te verwachten?

Voor lager 22222 E:  $d_m = 0,5 (110 + 200) = 155 \text{ mm}$ . Uit **diagram 2, pagina 111**, met  $d_m = 155 \text{ mm}$  en  $P/C_0 = 0,15$ ,  $f_p = 0,53$  en met  $P/C_0 = 0,15$  en ISO VG 220,  $f_v \text{ actual} = 0,83$ ; met  $P/C_0 = 0,15$  en ISO VG 150,  $f_v \text{ ISO VG150} = 0,87$ .

Het toelaatbare lagertoerental waarvoor een bedrijfstemperatuur van  $70^\circ\text{C}$  kan worden verwacht,  $n_{\text{toel}}$ , is dan

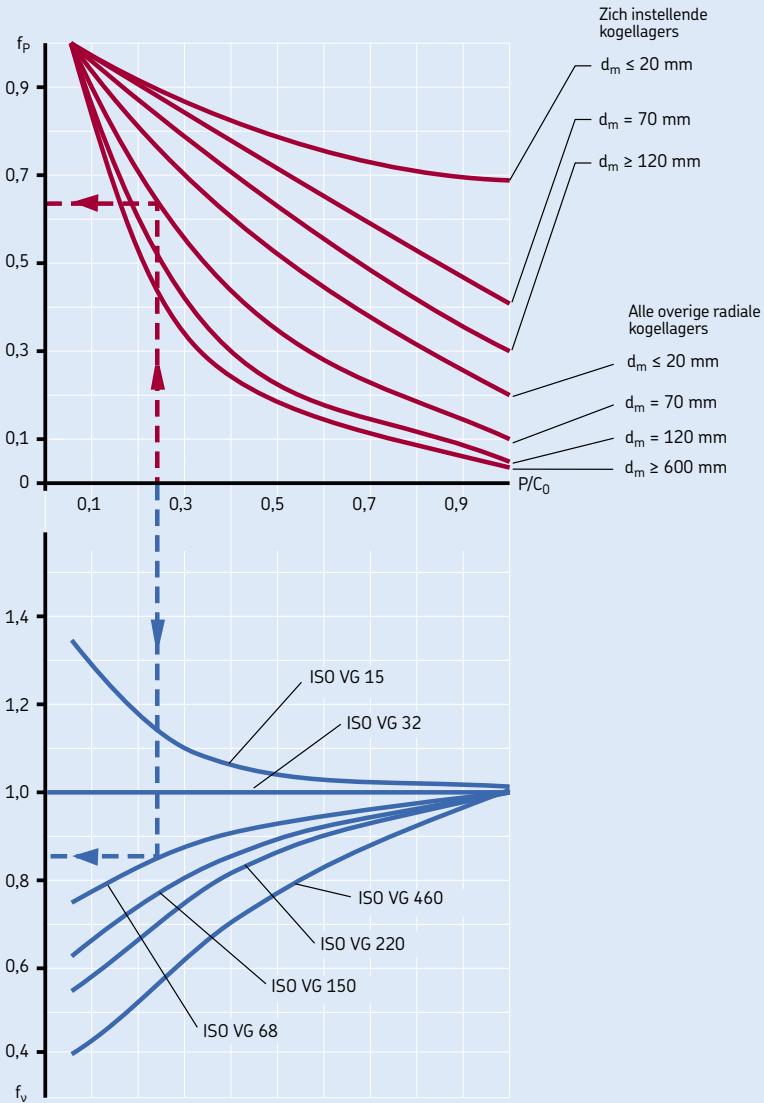
$$n_{\text{toel}} = 3\,000 \times 0,53 \times 0,83/0,87 = 1\,520 \text{ min}^{-1}$$

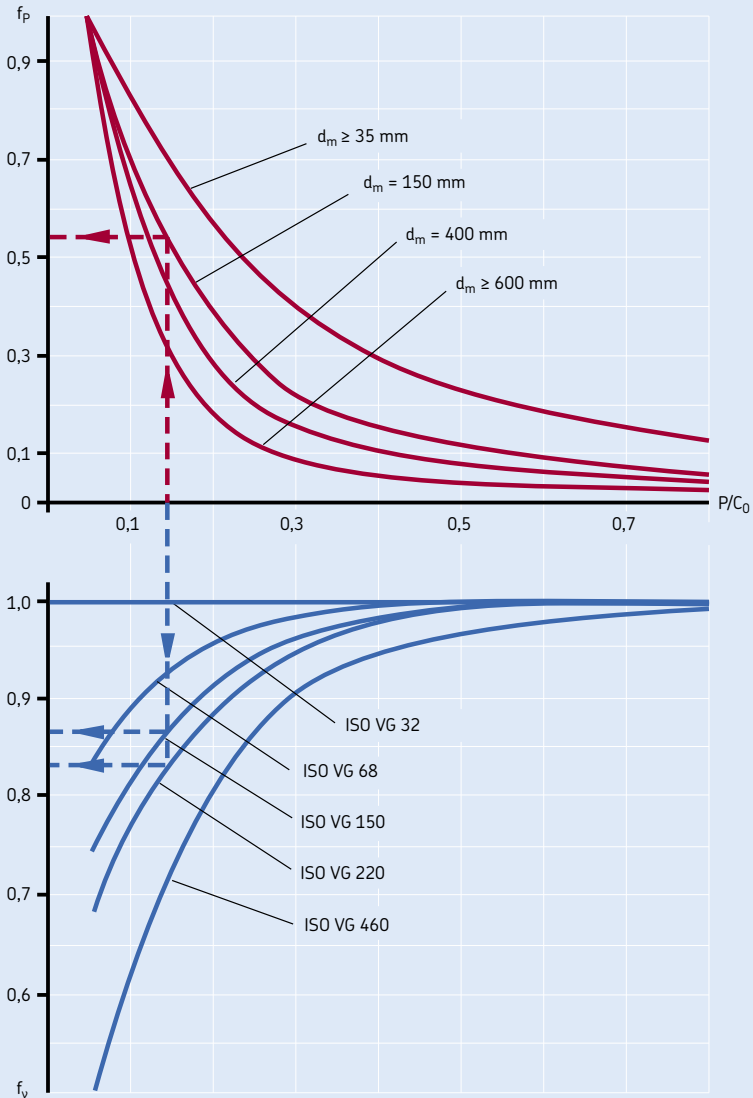
### Toerentalen boven het referentietoerental

Lagers kunnen worden gebruikt bij toerentalen boven het referentietoerental als de wrijving binnen het lager kan worden verminderd via een smeringssysteem dat nauwkeurig gedoseerde hoeveelheden smeermiddel toedient, of door warmte af te voeren via een circulerend oliesmeringssysteem, door koelribben op het huis of door luchtkoeling op het lager te richten (→ gedeelte "Methoden van oliesmering" vanaf **pagina 248**).

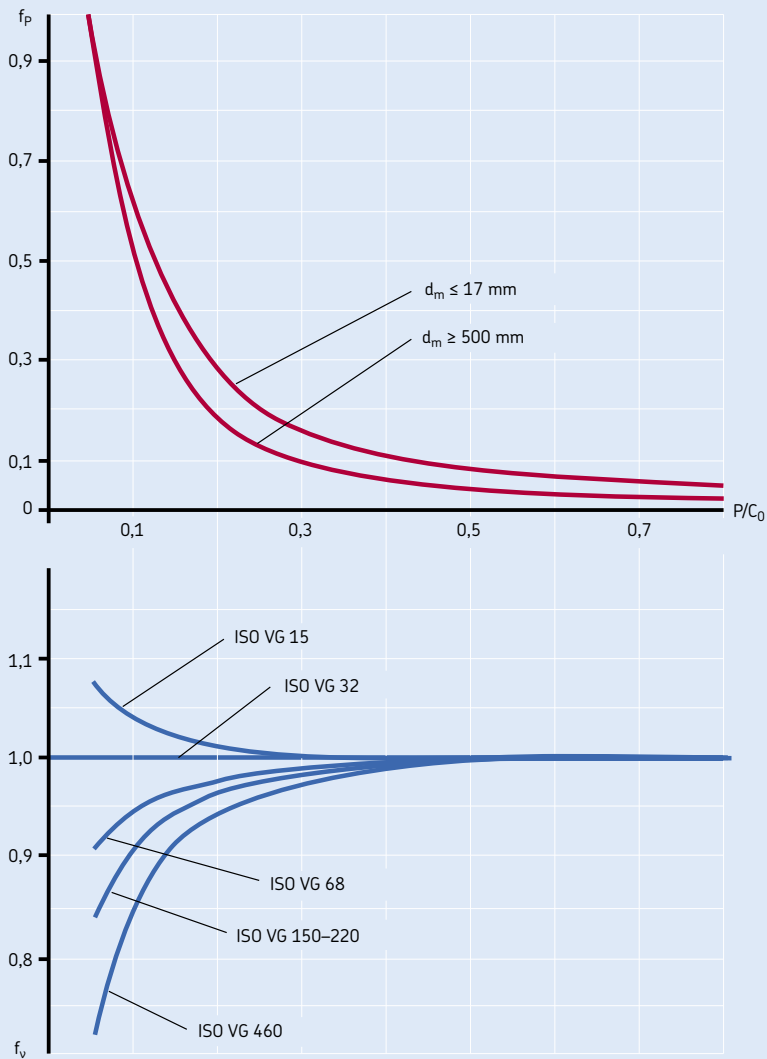


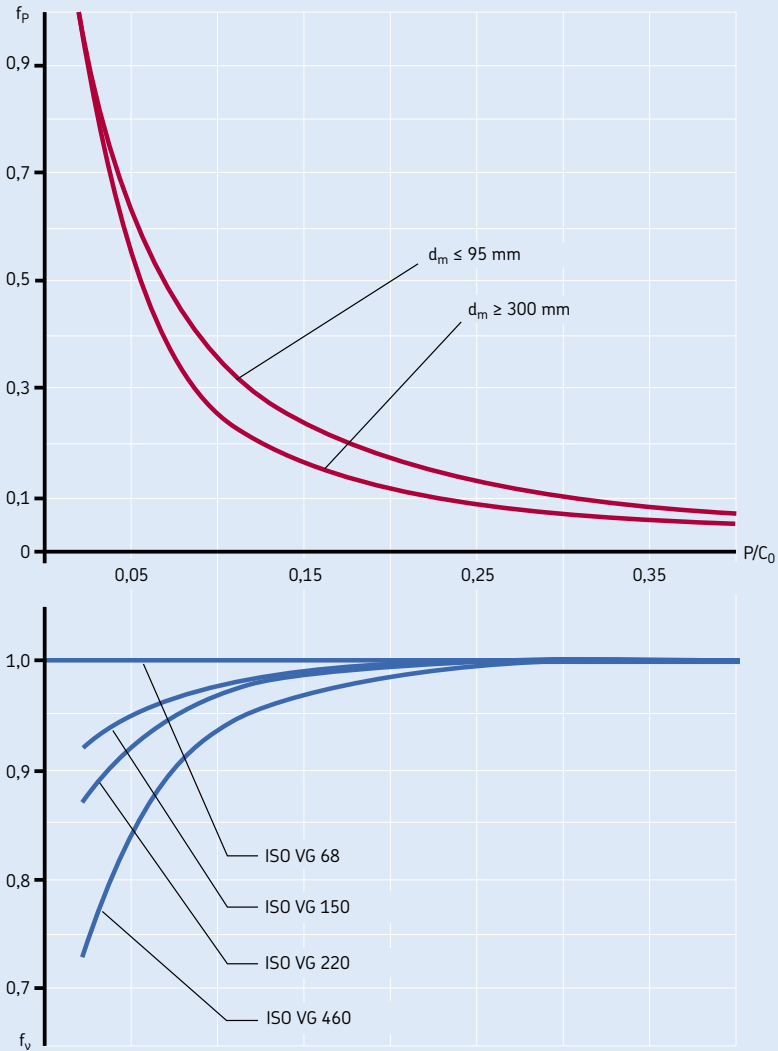
Correctiefactoren  $f_p$  en  $f_v$  voor radiale kogellagers



Correctiefactoren  $f_p$  en  $f_v$  voor radiale rollagers

Correctiefactoren  $f_p$  en  $f_v$  voor axiale kogellagers



Correctiefactoren  $f_p$  en  $f_v$  voor axiale rollagers

## Toerentallen en trilling

Zonder deze voorzorgsmaatregelen kunnen alle toerentalverhogingen boven het referentietoerental leiden tot overmatige stijging van de lagertemperatuur. Een stijging van de lagertemperatuur betekent dat de viscositeit van het smeermiddel daalt, waardoor het moeilijker wordt om een smeerfilm op te bouwen, wat zal leiden tot nog hogere wrijving en verdere temperatuurstijgingen. Als tegelijkertijd de speling in het lager minder wordt vanwege een hogere temperatuur van de binnenring, kan het lager uiteindelijk verklemd raken. Een toerentalstijging boven het referentietoerental houdt meestal in dat het temperatuurverschil tussen de binnen- en de buitenring groter is dan normaal. Meestal is er dan ook een lager met lagerstelling C3 nodig (groter dan Normaal), en het kan nodig zijn de temperatuurverschillen binnen het lager nader te bestuderen.

## Grenstoerentallen

Het grenstoerental wordt bepaald door criteria als stabiliteit of sterkte van de kooi, smering van de kooigeleidingsvlakken, centrifugale en gyroscopische krachten op de rollichamen, precisie en overige beperkende factoren, zoals afdichtingen en smeermiddel voor afgedichte lagers.

Ervaring uit laboratoriumproeven en uit de praktijk toont aan dat er maximale toerentallen zijn die niet mogen worden overschreden om technische redenen of vanwege de hoge kosten die het met zich meebrengt om de bedrijfstemperatuur op een acceptabel niveau te houden.

De grenstoerentallen die in de lagertabellen staan vermeld, zijn geldig voor het lagerontwerp en de getoonde standaard-kooiuitvoering.

Wanneer lagers moeten draaien bij hogere toerentallen dan in de tabellen vermeld worden, dienen enkele van de beperkende factoren te worden verbeterd – bijvoorbeeld loopnauwkeurigheid, kooimateriaal en -ontwerp, smering en warmteafvoer. Het is dan ook raadzaam contact op te nemen met de SKF application engineering service.

Bij vetsmering moeten nog enkele aspecten in beschouwing worden genomen, zoals smering van de kooigeleidingsvlakken en de afschuifsterkte van het smeermiddel. Deze worden bepaald door de basisolie en de verdikker (→ gedeelte "Vetsmering" vanaf **pagina 231**).

Sommige kogellagers zonder afdichting hebben een zeer lage wrijving; de vermelde referentietoerentallen kunnen in dat geval hoger zijn dan de grenstoerentallen. De toelaatbare toerentallen moeten dus worden berekend en moeten worden vergeleken met de maximale toerentallen. De laagste van de twee waarden moet worden aangehouden.

Let wel: als lagers bij hoge toerentallen goed moeten functioneren, dienen ze te worden onderworpen aan een minimale belasting. Meer hierover is te vinden in de inleidende teksten van de producttabellen onder de vermelding "Minimale belasting".

## Uitzonderlijke gevallen

In bepaalde gevallen zijn andere overwegingen belangrijker dan de grenstoerentallen.

### Lage toerentallen

Bij zeer lage toerentallen kan geen elastohydrodynamische smeerfilm worden opgebouwd in de contacten tussen de rollichamen en de loopbanen. Bij dergelijke toepassingen moeten meestal smeermiddelen met EP-toevoegingen worden gebruikt (→ gedeelte "Vetsmering" vanaf **pagina 231**).

### Oscillerende bewegingen

Bij dit type bewegingen verandert de draairichting voordat het lager een gehele omwenteling heeft voltooid. Aangezien de rotatiesnelheid nul is op het punt waar de draairichting verandert, kan er geen volledige hydrodynamische smeerfilm worden behouden.

In dergelijke gevallen is het belangrijk een smeermiddel met een effectieve EP-toevoeging te gebruiken; hierdoor ontstaat een grens-smeerfilm die belasting kan opnemen.

Het is niet mogelijk een grens of getal te geven voor de snelheid van dergelijke oscillerende bewegingen, omdat de bovengrens niet wordt opgelegd door warmte-evenwicht maar door de massakrachten die hierbij een rol spelen. Bij iedere richtingsverandering bestaat het gevaar dat de rollichamen tengevolge van de massa over een korte afstand zullen glijden waardoor materiaalaansmering kan ontstaan. De toelaatbare versnellingen en vertragingen

zijn afhankelijk van de massa van de rollichamen en de kooi, het type en de hoeveelheid smeermiddel, de speling en de lagerbelasting. Voor drijfstanden worden bijvoorbeeld lagers met voorspanning met relatief kleine rollichamen met een kleine massa gebruikt. Er zijn geen algemene richtlijnen te geven en de bewegingen moeten per afzonderlijk geval meer in detail worden geanalyseerd. Het is raadzaam contact op te nemen met de SKF application engineering service.

## Trillingen in een lager

Meestal genereert een wentellager zelf geen ruis. Wat wordt waargenomen als "lagergeruis" is in feite het hoorbare effect van de trillingen die direct of indirect worden gegenereerd door het lager op de omringende structuur. Om deze reden worden geluidsproblemen meestal beschouwd als trillingsproblemen die betrekking hebben op de complete lagerconstructie.

### Genereren van trillingen door een variërend aantal belaste rollichamen

Wanneer op een lager een radiale belasting wordt toegepast, varieert het aantal belaste rollichamen enigszins tijdens bedrijf, bijv. 2-3-2-3... Dit genereert een variatie in de richting van de belasting. De hieruit voortvloeiende trilling is niet te vermijden, maar kan wel worden verminderd door een axiale voorspanning toe te passen, zodat alle rollichamen worden belast (dit is niet mogelijk bij cilinderlagers).

### Vormafwijkingen van componenten

In toepassingen met een vaste passing tussen de lagerring en het huis of de as kan de lagerring de vorm aannemen van het aanliggende onderdeel. Als er vormafwijkingen aanwezig zijn, kunnen deze tijdens het bedrijf voor trillingen zorgen. Het is dus belangrijk de as en het huis te bewerken volgens de benodigde toleranties (→ gedeelte "Toleranties voor cilindriciteit" op **pagina 194**).

### Plaatselijke schade

Door verkeerd gebruik of onjuiste montage kunnen kleine delen van de loopbanen en de rolli-

chamen worden beschadigd. Tijdens bedrijf genereert het overrollen van een beschadigd lageronderdeel een specifieke trillingsfrequentie. Frequentie-analyse van de trillingen kan aan het licht brengen welk lageronderdeel schade heeft opgelopen. Dit principe wordt gebruikt bij SKF Condition Monitoring apparatuur voor het detecteren van beschadigde lagers.

Raadpleeg voor het berekenen van SKF lagerfrequenties het hoofdstuk "Berekeningen" in de SKF Interactive Engineering Catalogue op cd-rom of online op [www.skf.com](http://www.skf.com).

### Verontreiniging

Bij bedrijf onder vervuilde omstandigheden kunnen verontreinigingen in het lager terechtkomen, waar ze worden overrold door de rollichamen. Het hierdoor ontstane trillingsniveau is afhankelijk van de hoeveelheid, de afmetingen en de samenstelling van de overrolde verontreinigingen. Er wordt geen kenmerkend frequentiepatroon gegenereerd. Wel kan er een hoorbaar en storend geruis ontstaan.

## Invloed van de lagers op het trillingsgedrag van de toepassing

In vele toepassingen is de lagerstijfheid vergelijkbaar met de stijfheid van de omringende constructie. Dit geeft de mogelijkheid om trillingen van de toepassing te verminderen door het juiste lager (inclusief voorspanning en lagerspeling) en de opstelling hiervan binnen de toepassing te kiezen. Er zijn drie manieren om trillingen te verminderen:

- Het verwijderen van de kritische aanstoottrilling uit de toepassing.
- Het dempen van de kritische aanstoottrilling tussen trillingsbron en de resonerende onderdelen.
- Het wijzigen van de stijfheid van de constructie waardoor de resonantiefrequentie verandert.