

$$L_{HM} = a_1 a_{SKF} \left( \frac{C}{P} \right)^p$$

# Bepaling van de lagergrootte

<b>Systeembenadering en betrouwbaarheid .....</b>	<b>50</b>
<b>Draaggetal en levensduur .....</b>	<b>51</b>
Dynamische lagerbelasting en levensduur .....	51
Statische lagerbelasting .....	51
<b>Bepaling van de lagergrootte d.m.v. de levensduurtheorie.....</b>	<b>52</b>
Nominale levensduur .....	52
SKF levensduur .....	52
SKF levensduur modificatiefactor $a_{SKF}$ .....	53
Smearing – viscositeitsverhouding $\kappa$ .....	59
Overweging van EP-toevoegingen .....	61
Factor $\eta_e$ voor verontreinigingsgraad .....	62
Een speciaal geval – correctiefactor $a_{23}$ .....	68
Berekening levensduur onder verschillende bedrijfsomstandigheden .....	70
Invloed van de bedrijfstemperatuur .....	71
Vereiste nominale levensduur .....	71
<b>Dynamische lagerbelastingen.....</b>	<b>73</b>
Berekening van dynamische lagerbelasting .....	73
Equivalente dynamische lagerbelasting .....	74
Vereiste minimumbelasting .....	75
<b>Bepaling van de lagergrootte d.m.v. het statisch draaggetal .....</b>	<b>76</b>
Equivalente statische lagerbelasting .....	76
Vereist statisch draaggetal .....	77
Controle van het statisch draagvermogen .....	77
<b>Berekeningsvoorbeelden .....</b>	<b>78</b>
<b>SKF berekeningsprogramma's .....</b>	<b>82</b>
SKF Interactive Engineering Catalogue.....	82
SKF bearing beacon .....	82
Orpheus .....	82
Beast .....	83
Overige programma's .....	83
<b>SKF Engineering Consultancy Services .....</b>	<b>84</b>
Geavanceerde computerprogramma's .....	84
<b>SKF levensduurtesten .....</b>	<b>85</b>

## Bepaling van de lagergrootte

De lagergrootte die voor een toepassing gebruikt moet worden, kan in eerste instantie worden bepaald aan de hand van het draaggetal met betrekking tot de toegepaste belastingen en de vereisten inzake levensduur en betrouwbaarheid. Waarden voor het dynamisch draaggetal  $C$  en het statisch draaggetal  $C_0$  staan vermeld in de producttabellen. Zowel de statische als de dynamische belastingen moet afzonderlijk worden gecontroleerd. Statische belastingen zijn niet alleen belastingen die worden toegepast wanneer het lager in ruststand verkeert of met een laag toerental draait ( $n < 10 \text{ min}^{-1}$ ), maar dienen ook ter controle van de statische veiligheid ten opzichte van zware stootbelastingen (belastingen van heel korte duur). Dynamische belastingen moeten ook worden gecontroleerd aan de hand van een representatief spectrum van belastingcondities op het lager. Dit belastingsspectrum dient alle (hoge) piekbelastingen te omvatten die in uitzonderingsgevallen kunnen optreden.

## Systeembenadering en betrouwbaarheid

In de SKF formule voor levensduurberekening wordt de spanning ten gevolge van de uitwendige belasting beschouwd, samen met de spanning ten gevolge van de oppervlaktetopografie, de smering en de kinematica van de rolcontactvlakken. De invloed van deze gecombineerde spanningen op de levensduur van een lager biedt een betere voorspelling van de werkelijke

prestaties van het lager binnen een bepaalde opstelling.

Vanwege de complexiteit van dit geheel valt een gedetailleerde beschrijving van de theorie buiten de reikwijdte van deze catalogus. Er wordt dan ook een vereenvoudigde "catalogus" beschrijving gegeven onder de kop "SKF levensduur". Hiermee kunnen gebruikers het volledige potentieel van de levensduur van een lager benutten, beheerste downsizing toepassen en zicht krijgen op de invloed van smering en verontreiniging op de gebruikslevensduur van een lager.

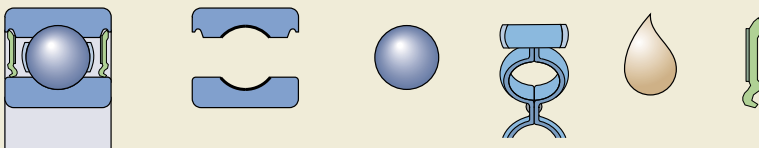
Materiaalvermoeiing van de rolcontactvlakken is meestal het belangrijkste uitvalsmechanisme bij wentellagers. Een criterium op basis van loopbaanvermoeiing is dan ook meestal voldoende voor de selectie en groottebepaling van een wentellager voor een bepaalde toepassing. Internationale normen als ISO 281 zijn gebaseerd op de materiaalvermoeiing van rolcontactvlakken. Toch is het belangrijk te onthouden dat het complete lager kan worden beschouwd als een systeem waarbinnen de levensduur van iedere component, dus kooi, smeermiddel en afdichting (→ fig. 1), indien aanwezig, in gelijke en soms in overheersende mate bijdraagt aan de effectieve levensduur van een lager. In theorie wordt de optimale gebruiksduur bereikt wanneer alle componenten dezelfde levensduur bereiken.

Met andere woorden: de berekende levensduur zal overeenkomen met de werkelijke gebruiksduur van het lager wanneer de gebruiksduur van de overige componenten minstens

Fig. 1

### Lagersysteemlevensduur

$$L_{\text{lager}} = f(L_{\text{loopbanen}}, L_{\text{rollichamen}}, L_{\text{kooi}}, L_{\text{smeermiddel}}, L_{\text{afdichtingen}})$$



even lang is als de berekende lagerlevensduur. Componenten die bijdragen zijn bijvoorbeeld de kooi, de afdichting en het smeermiddel. In de praktijk is de belangrijkste factor vaak materiaalvermoeiing.

## Draaggetal en levensduur

### Dynamische lagerbelasting en levensduur

Het dynamische draaggetal C wordt gebruikt voor berekeningen waarbij dynamische belastingen worden uitgeoefend op lagers, d.w.z. bij lagers die roteren onder belasting. Dit getal is de lagerbelasting die volgens ISO 281:1990 een levensduur van 1 000 000 omwentelingen oplevert. Aangenomen wordt dat de belasting constant van grootte en richting is en radiaal is voor radiale lagers en zuiver axiaal, dus centraal werkend, voor axiale lagers.

De dynamische draaggetallen voor SKF lagers worden bepaald in overeenstemming met de in ISO 281:1990 omschreven procedures. De draaggetallen in deze catalogus zijn van toepassing op chroom-stalenlagers, met na warmtebehandeling een minimum hardheid van 58 HRC en werkend onder normale omstandigheden.

De lagers in de SKF Explorer kwaliteit zijn onder meer het resultaat van verbeteringen in materiaal en fabricagetechnieken van SKF. Hiervoor dienen aangepaste factoren te worden gebruikt bij de berekening van het dynamisch draaggetal volgens ISO 281:1990.

De levensduur van een wentellager wordt gedefinieerd als

- het aantal omwentelingen of
- het aantal bedrijfsuren bij een bepaalde snelheid,

dat het lager kan functioneren voordat het eerste teken van materiaalvermoeiing (uitbrokking) optreedt bij een van de ringen of rollichamen.

Uit praktijkervaring blijkt dat schijnbaar identieke lagers die onder identieke condities werken, verschillende levensduren hebben. Een duidelijker definitie van de term "levensduur" is dan ook van belang voor de berekening van de

lagergrootte. Alle informatie die SKF geeft over dynamische draaggetallen is gebaseerd op de levensduur die 90 % van een groep van voldoende omvang van schijnbaar identieke lagers kan verwachten of overschrijden.

Een lager kent diverse andere typen levensduur. Een daarvan is de "bedrijfslevensduur", d.w.z. de werkelijke levensduur van een lager onder werkelijke bedrijfscondities, voordat het lager bezwijkt. Let wel: de levensduur van een afzonderlijk lager kan slechts statistisch worden voorspeld. Levensduurberekeningen verwijzen uitsluitend naar een lagerpopulatie en een bepaalde graad van betrouwbaarheid, d.w.z. 90 %; verder worden fouten in het veld meestal niet veroorzaakt door materiaalvermoeiing maar zijn deze voornamelijk het gevolg van verontreiniging, slijtage, scheefstelling, corrosie of van falen van de kooi, smering of afdichting.

Een andere "levensduur" is de "specificatielevensduur". Dit is de levensduur zoals die is opgegeven door een autoriteit, bijvoorbeeld op basis van een hypothetische belasting en toerentalgegevens die zijn geleverd door diezelfde autoriteit. Meestal is dit een vereiste  $L_{10}$  levensduur op basis van ervaringen uit vergelijkbare toepassingen.

### Statische lagerbelasting

Het statische draaggetal  $C_0$  wordt gebruikt in berekeningen wanneer zich de volgende omstandigheden voordoen

- draaien bij zeer lage toerentallen ( $n < 10 \text{ min}^{-1}$ )
- zeer trage oscillerende bewegingen maken
- gedurende langere tijd stilstaan onder belasting.

Verder is het van groot belang de veiligheidsfactor ten opzichte van kortdurende belastingen te controleren, zoals stoot- of hoge piekbelastingen op een roterend (dynamisch belast) lager of wanneer het lager stilstaat.

Het statisch draaggetal volgens de definitie in ISO 76:1987 komt overeen met een berekende contactdruk in het midden van het zwaarst belaste rollichaam/loopbaancontact van

- 4 600 MPa voor zich instellende kogellagers
- 4 200 MPa voor alle overige kogellagers
- 4 000 MPa voor alle rollagers.

## Bepaling van de lagergrootte

Deze druk levert een totale blijvende vervorming van het rollichaam en de loopbaan op, die circa 0,0001 van de diameter van het rollichaam bedraagt. De belastingen zijn zuiver radiaal voor radiale lagers en centrish werkende axiale belastingen voor axiale lagers.

Controle van de statische draaggetallen wordt uitgevoerd door de statische veiligheidsfactor van de toepassing te controleren; deze is gedefinieerd als

$$s_0 = C_0/P_0$$

waarbij

$C_0$  = statisch draaggetal, kN

$P_0$  = equivalente statische lagerbelasting, kN

$s_0$  = statische veiligheidsfactor

De maximale belasting die een lager kan opnemen dient te worden gebruikt in de berekening van de equivalente statische lagerbelasting. Verdere informatie over de aanbevolen waarden voor de veiligheidsfactor en de berekening daarvan is te vinden in het gedeelte "Bepaling van de lagergrootte d.m.v. het statisch draaggetal" vanaf **pagina 76**.

## Bepaling van de lagergrootte d.m.v. de levensduurtheorie

### Nominale levensduur

De nominale levensduur van een lager volgens ISO 281:1990 is

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Bij constant toerental verdient het vaak de voorkeur om de levensduur te berekenen in bedrijfsuren, met de vergelijking

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10}$$

waarbij

$L_{10}$  = nominale levensduur (bij een betrouwbaarheid van 90 %), miljoenen omwentelingen

$L_{10h}$  = nominale levensduur (bij een betrouwbaarheid van 90 %), bedrijfsuren

$C$  = dynamisch draaggetal, kN

$P$  = equivalente dynamische lagerbelasting, kN

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

$p$  = exponent voor de levensduurformule

= 3 voor kogellagers

= 10/3 voor rollagers

### SKF levensduur

Voor moderne, kwalitatief hoogwaardige lagers kan de nominale levensduur aanzienlijk afwijken van de werkelijke levensduur in een bepaalde toepassing. De gebruiksduur in een bepaalde toepassing is afhankelijk van een aantal factoren die van invloed zijn, zoals smering, de graad van verontreiniging, scheefstelling, juiste montage en omgevingsinvloeden.

De richtlijn ISO 281:1990/Amd 2:2000 bevat dan ook een gemodificeerde levensduurformule als aanvulling op de nominale levensduur. Bij deze berekening wordt gebruik gemaakt van een modificatiefactor voor smering en verontreinigingsgraad van het lager en de vermoeingsbelastingsgrens van het materiaal.

In ISO 281:1990/Amd 2:2000 zijn dan ook voorzieningen voor lagerfabrikanten opgenomen ter aanbeveling van een geschikte methode voor het berekenen van de levensduurcorrectiefactor die moet worden toegepast op een lager, op basis van de bedrijfsomstandigheden. Bij de SKF correctiefactor voor de levensduurberekening,  $a_{SKF}$  wordt het concept toegepast van een vermoeiingsbelastingsgrens  $P_u$ , analoog aan deze die wordt gebruikt bij de berekening van overige machineonderdelen. De waarden van de vermoeiingsbelastingsgrens worden gegeven in de producttabellen. Verder wordt bij de SKF levensduurmodificatiefactor  $a_{SKF}$  gebruik gemaakt van de smeringscondities (viscositeitsverhouding  $k$ ) en een factor  $\eta_c$  voor verontreinigingsgraad om de bedrijfsomstandigheden van de toepassing weer te geven.

De SKF levensduurformule is in overeenstemming met ISO 281:1990/Amd 2:2000

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left( \frac{C}{P} \right)^p$$

Bij constante snelheid kan de levensduur met behulp van onderstaande formule worden uitgedrukt in bedrijfsuren

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 n} L_{nm}$$

Tabel 1

Waarden voor levensduurcorrectiefactor  $a_1$

Betrouwbaarheid %	Uitvalswaarschijnlijkheid %	Levensduur $L_{nm}$	$a_1$
90	10	$L_{10m}$	1
95	5	$L_{5m}$	0,62
96	4	$L_{4m}$	0,53
97	3	$L_{3m}$	0,44
98	2	$L_{2m}$	0,33
99	1	$L_{1m}$	0,21

waarbij

$L_{nm}$  = SKF levensduur (bij een betrouwbaarheid  $100 - n^1$  %), miljoenen omwentelingen

$L_{nmh}$  = SKF levensduur (bij een betrouwbaarheid at  $100 - n^1$  %), bedrijfsuren

$L_{10}$  = nominale levensduur (bij een betrouwbaarheid van 90 %), miljoenen omwentelingen

$a_1$  = correctiefactor levensduur voor betrouwbaarheid (→ **tabel 1**)

$a_{SKF}$  = SKF levensduurmodificatiefactor (→ **diagrammen 1 tot 4**)

$C$  = dynamisch draaggetal, kN

$P$  = equivalente dynamische lagerbelasting, kN

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

$p$  = exponent voor de levensduurformule = 3 voor kogellagers = 10/3 voor rollagers

In sommige gevallen verdient het voorkeur om de levensduur van een lager uit te drukken in andere eenheden dan miljoenen omwentelingen of uren. De levensduur van een lager voor wielaslagers in weg- en railvoertuigen wordt bijvoorbeeld meestal uitgedrukt in afgelegde kilometers. Om de omrekening van de lagerlevensduur in andere eenheden te vergemakkelijken geeft **tabel 2** op **pagina 58**, de meest gebruikte omrekenfactoren.

### SKF levensduur modificatiefactor $a_{SKF}$

Zoals reeds vermeld staat deze factor voor de verhouding tussen de vermoeiingsbelastingsgrens ( $P_u/P$ ), de smeringsconditie (viscositeitsverhouding  $k$ ) en de graad van verontreiniging in het lager ( $\eta_c$ ). Waarden voor de factor  $a_{SKF}$  zijn te verkrijgen uit vier diagrammen, afhankelijk van het lagertype, als functie van  $\eta_c$  ( $P_u/P$ ) voor SKF standaard lagers en SKF Explorer lagers en verschillende waarden voor de viscositeitsverhouding  $k$ :

**Diagram 1: Radiale kogellagers, pagina 54.**

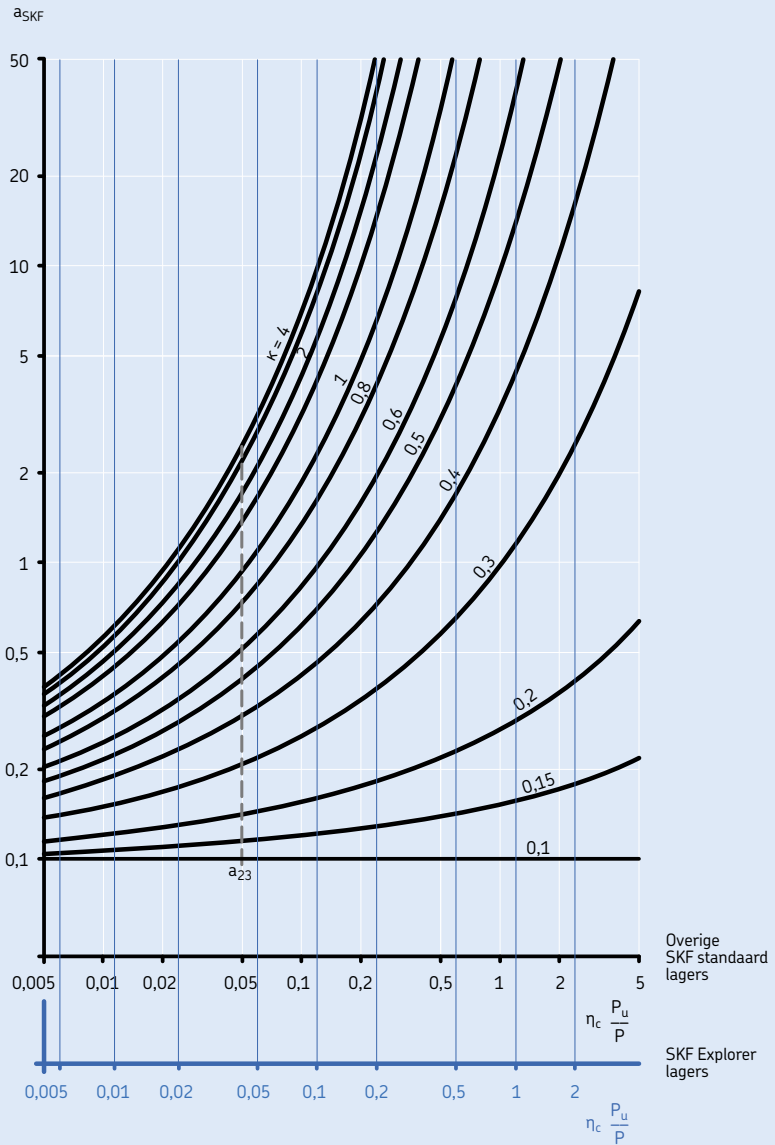
**Diagram 2: Radiale rollagers, pagina 55.**

**Diagram 3: Axiale kogellagers, pagina 56.**

**Diagram 4: Axiale rollagers, pagina 57.**

<sup>1)</sup> De factor  $n$  vertegenwoordigt de uitvalswaarschijnlijkheid, d.w.z. het verschil tussen de vereriste betrouwbaarheid en 100 %.

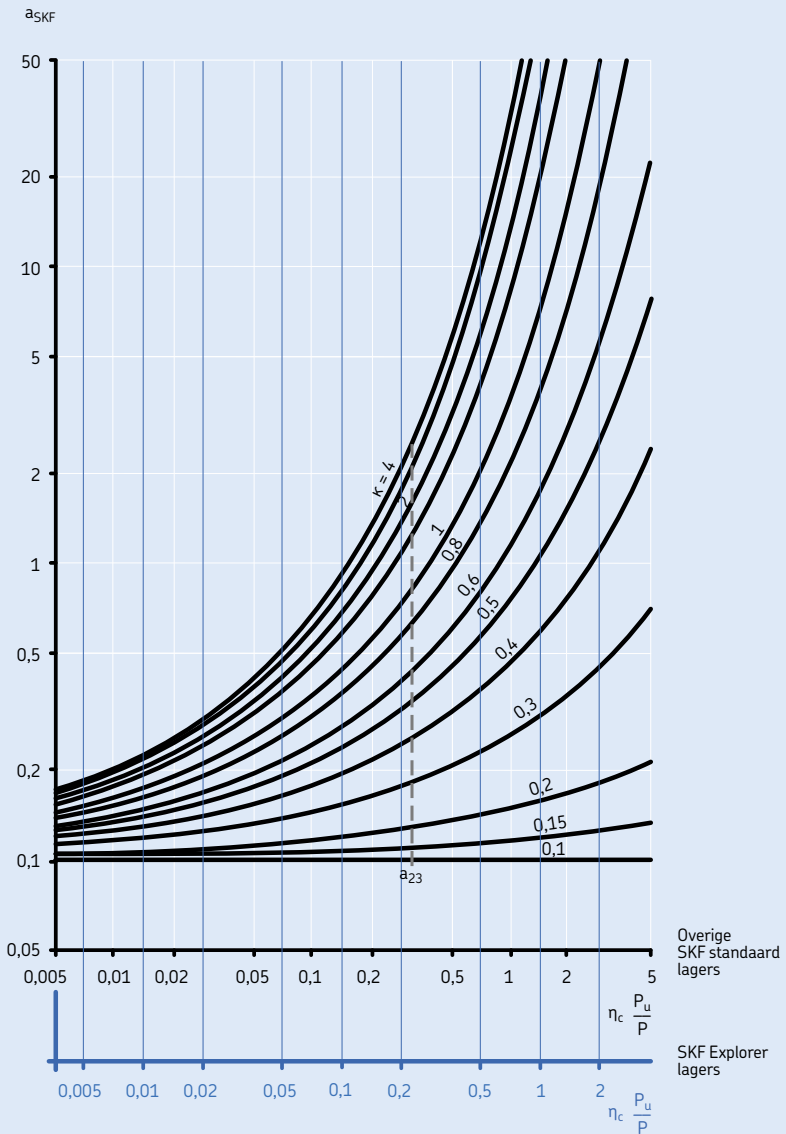
Factor  $a_{SKF}$  voor radiale kogellagers



Als  $\kappa > 4$ , gebruik kromme voor  $\kappa = 4$

Als de waarde van  $\eta_c (P_u/P)$  naar nul neigt, neigt  $a_{SKF}$  naar 0,1 voor alle waarden van  $\kappa$

De stippellijn markeert de positie van de oude  $a_{23}(\kappa)$  schaal, waarbij  $a_{SKF} = a_{23}$

Factor  $a_{SKF}$  voor radiale rollagers

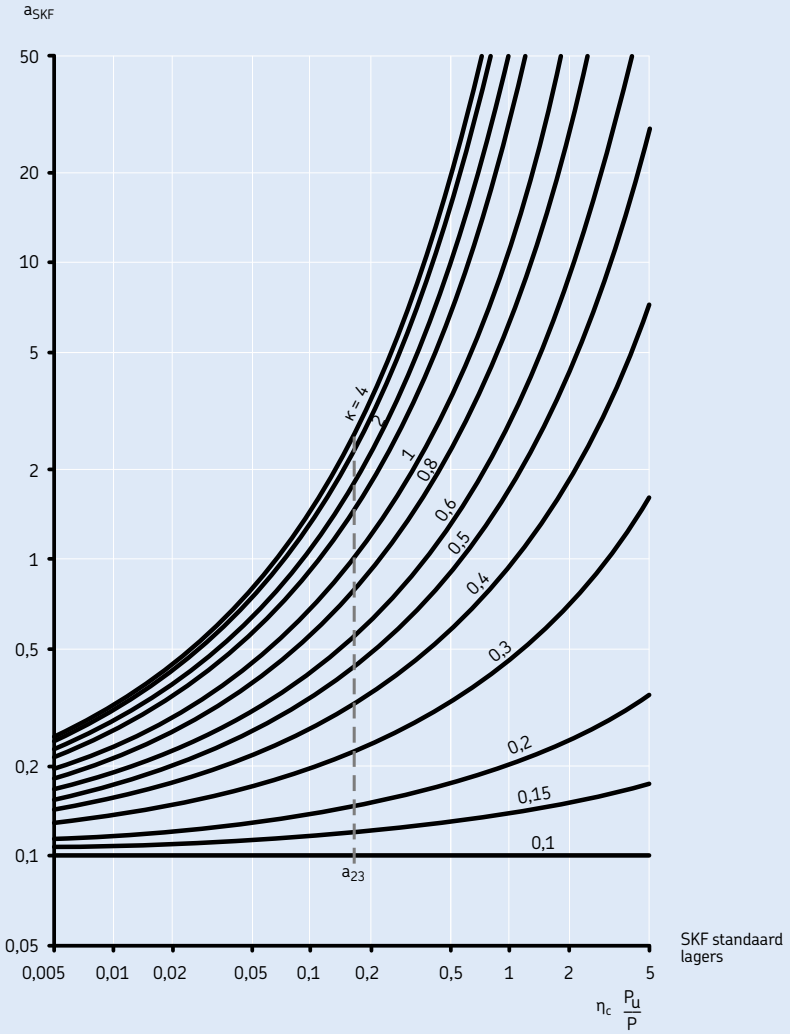
Als  $\kappa > 4$ , gebruik kromme voor  $\kappa = 4$

Als de waarde van  $\eta_c (P_u/P)$  naar nul neigt, neigt  $a_{SKF}$  naar 0,1 voor alle waarden van  $\kappa$

De stippellijn markeert de positie van de oude  $a_{23}(\kappa)$  schaal, waarbij  $a_{SKF} = a_{23}$



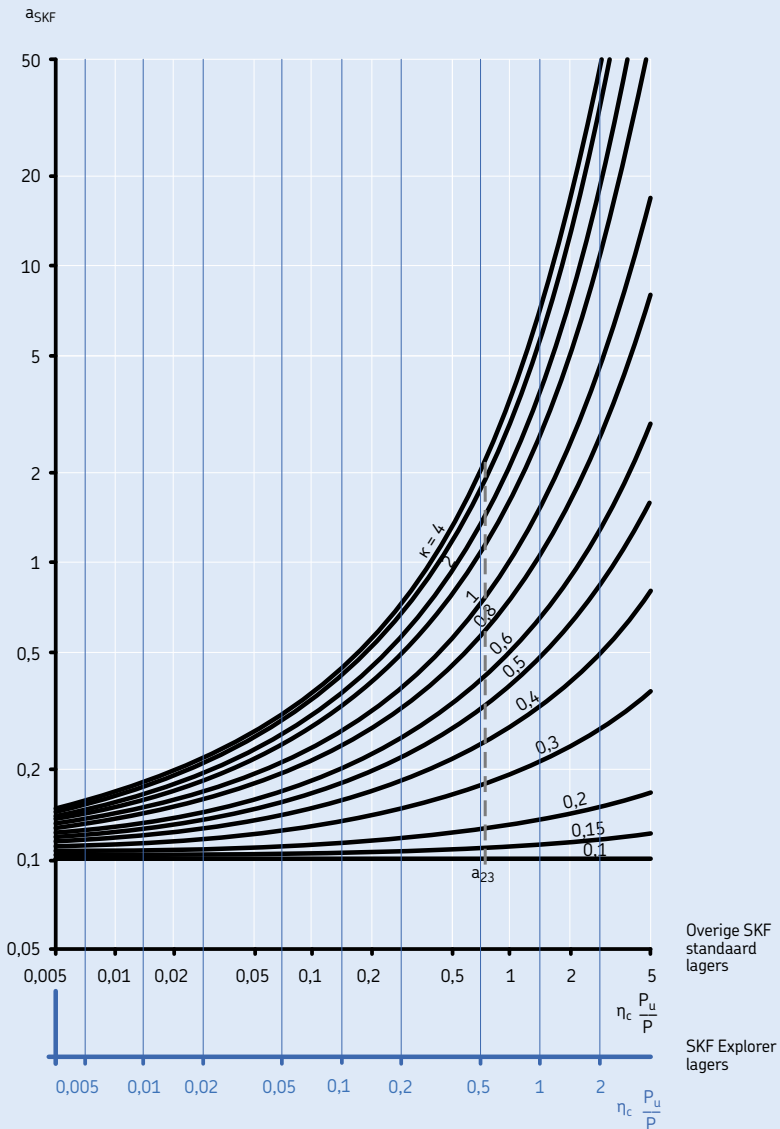
Factor  $a_{SKF}$  voor axiale kogellagers



Als  $\kappa > 4$ , gebruik kromme voor  $\kappa = 4$

Als de waarde van  $\eta_c (P_u/P)$  naar nul neigt, neigt  $a_{SKF}$  naar 0,1 voor alle waarden van  $\kappa$

De stippelijntje markeert de positie van de oude  $a_{23}(k)$  schaal, waarbij  $a_{SKF} = a_{23}$

Factor  $a_{SKF}$  voor axiale rollagers

Als  $\kappa > 4$ , gebruik kromme voor  $\kappa = 4$

Als de waarde van  $\eta_c (P_u/P)$  naar nul neigt, neigt  $a_{SKF}$  naar 0,1 voor alle waarden van  $\kappa$

De stippelijntje markeert de positie van de oude  $a_{23}(\kappa)$  schaal, waarbij  $a_{SKF} = a_{23}$

## Bepaling van de lagergrootte

De diagrammen zijn opgesteld voor waarden en veiligheidsfactoren die normaal worden geassocieerd met vermoeilingsbelastingsgrenzen voor andere mechanische componenten. Gezien de simplificaties van de SKF levensduurformule heeft het, zelfs bij accuraat vermelde bedrijfscondities, geen zin om voor  $a_{SKF}$  waarden boven de 50 te gebruiken.

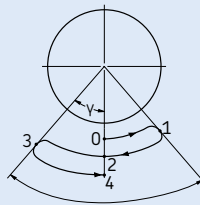
computerprogramma's ontwikkeld, waarin de SKF levensduurformule direct op het niveau van rolcontactdruk is ingebouwd, zodat andere factoren die van invloed zijn op de levensduur, zoals scheefstelling, asdoorbuiging en vervorming

## Berekening van de levensduurmodificatiefactoren $a_{SKF}$

SKF engineering programma's als "Bearing Select" of de "SKF Interactive Engineering Catalogue", beschikbaar op cd-rom of online op [www.skf.com](http://www.skf.com), kunnen ook worden gebruikt om de berekening van de factor  $a_{SKF}$  te vereenvoudigen. Bovendien heeft SKF geavanceerde

Tabel 2

### Eenheden omrekeningsfactoren voor lagerlevensduur



De complete oscillatie = 4  $\gamma$ , d.w.z. van punt 0 tot punt 4

Basiseenheden	Omrekeningsfactor Miljoenen omwentelingen	Bedrijfs- uren	Miljoenen kilometers afgelegd	Miljoenen oscillatiecycli <sup>1)</sup>
1 miljoen omwentelingen	1	$\frac{10^6}{60 n}$	$\frac{\pi D}{10^3}$	$\frac{180}{2 \gamma}$
1 bedrijfsuur	$\frac{60 n}{10^6}$	1	$\frac{60 n \pi D}{10^9}$	$\frac{180 \times 60 n}{2 \gamma 10^6}$
1 miljoen kilometers	$\frac{10^3}{\pi D}$	$\frac{10^9}{60 n \pi D}$	1	$\frac{180 \times 10^3}{2 \gamma \pi D}$
1 miljoen oscillatiecycli <sup>1)</sup>	$\frac{2 \gamma}{180}$	$\frac{2 \gamma 10^6}{180 \times 60 n}$	$\frac{2 \gamma \pi D}{180 \times 10^3}$	1

D = diameter voertuigwiel, m  
n = toerental,  $\text{min}^{-1}$   
 $\gamma$  = tt-amplitude (hoek van max. afwijking van middenpositie), graden

<sup>1)</sup> Not valid for small amplitudes ( $\gamma < 10$  degrees)

van het huis kunnen worden meegenomen (→ gedeelte "SKF berekeningsprogramma's" vanaf **pagina 82**).

### Smering – viscositeitsverhouding $\kappa$

De doeltreffendheid van een smeermiddel wordt voornamelijk bepaald door de mate van oppervlaktescheiding tussen de twee rollende contactoppervlakken. Wanneer er een adequate smeerfilm moet worden gevormd, moet het smeermiddel een bepaalde minimumviscositeit hebben wanneer de toepassing de bedrijfstemperatuur heeft bereikt. De conditie van het smeermiddel wordt beschreven door de nominale viscositeitsverhouding  $\kappa$  als verhouding tussen de werkelijke viscositeit  $v$  en de nominale viscositeit  $v_1$  voor adequate smering; waarbij beide waarden worden beschouwd bij bedrijfstemperatuur (→ gedeelte "Keuze van de smeerolie" vanaf **pagina 252**).

$$\kappa = \frac{v}{v_1}$$

waarbij

$\kappa$  = viscositeitsverhouding

$v$  = werkelijke bedrijfsviscositeit van het smeermiddel,  $\text{mm}^2/\text{s}$

$v_1$  = nominale viscositeit afhankelijk van de gemiddelde diameter van het lager en het toerental,  $\text{mm}^2/\text{s}$

Voor het vormen van een correcte smeerfilm tussen de rolcontactvlakken moet het smeermiddel een bepaalde minimale viscositeit hebben wanneer het de bedrijfstemperatuur heeft bereikt. De nominale viscositeit  $v_1$ , vereist voor afdoende smering, kan worden bepaald aan de hand van **diagram 5, pagina 60**, met de lagerdiameter  $d_m = 0,5(d + D)$ , mm, en het toerental van het lager  $n$ ,  $\text{min}^{-1}$ . Dit diagram is herzien, waarbij rekening is gehouden met de meest recente tribologische bevindingen op het gebied van wentellagers.

Wanneer de bedrijfstemperatuur uit ervaring bekend is of anderszins kan worden bepaald, kan de bijbehorende viscositeit bij de internationaal gestandaardiseerde referentietemperatuur van 40 °C worden verkregen uit **diagram 6 op pagina 61**. Het diagram is opgesteld voor een viscositeitsindex van 95. In **tabel 3** staan de vis-

cositeitsgraden volgens ISO 3448:1992, met het viscositeitsbereik per klasse bij 40 °C. Bepaalde lagertypen, bijvoorbeeld tweerijige tonlagers, kegellagers en tontaatslagers, hebben onder vergelijkbare bedrijfscondities normaal gesproken een hogere bedrijfstemperatuur dan andere lagertypen als groefkogellagers en cilinderlagers.

Tabel 3

#### ISO viscositeitsclassificatie volgens ISO 3448

ISO viscositeits-klasse	Kinematische viscositeitsgrenzen bij 40 °C		
	gemiddeld	min	max
–	$\text{mm}^2/\text{s}$		
<b>ISO VG 2</b>	2,2	1,98	2,42
<b>ISO VG 3</b>	3,2	2,88	3,52
<b>ISO VG 5</b>	4,6	4,14	5,06
<b>ISO VG 7</b>	6,8	6,12	7,48
<b>ISO VG 10</b>	10	9,00	11,0
<b>ISO VG 15</b>	15	13,5	16,5
<b>ISO VG 22</b>	22	19,8	24,2
<b>ISO VG 32</b>	32	28,8	35,2
<b>ISO VG 46</b>	46	41,4	50,6
<b>ISO VG 68</b>	68	61,2	74,8
<b>ISO VG 100</b>	100	90,0	110
<b>ISO VG 150</b>	150	135	165
<b>ISO VG 220</b>	220	198	242
<b>ISO VG 320</b>	320	288	352
<b>ISO VG 460</b>	460	414	506
<b>ISO VG 680</b>	680	612	748
<b>ISO VG 1 000</b>	1 000	900	1 100
<b>ISO VG 1 500</b>	1 500	1 350	1 650

## Bepaling van de lagergrootte

### Voorbeeldberekening

Een lager met een boringdiameter  $d = 340$  mm en een buitendiameter  $D = 420$  mm moet draaien bij een toerental van  $n = 500 \text{ min}^{-1}$ .

Aangezien  $d_m = 0,5 (d + D)$ ,  $d_m = 380$  mm, uit

**diagram 5**, bedraagt de minimale nominale viscositeit  $\nu_1$  die nodig is voor adequate smering bij de bedrijfstemperatuur circa  $11 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Uit

**diagram 6**, ervan uitgaande dat de bedrijfstemperatuur van het lager  $70^\circ\text{C}$  is, blijkt dat een smeermiddel uit viscositeitsklasse ISO VG 32,

met een werkelijke viscositeit van ten minste  $32 \text{ mm}^2/\text{s}$  bij de bedrijfstemperatuur van  $40^\circ\text{C}$  nodig is.

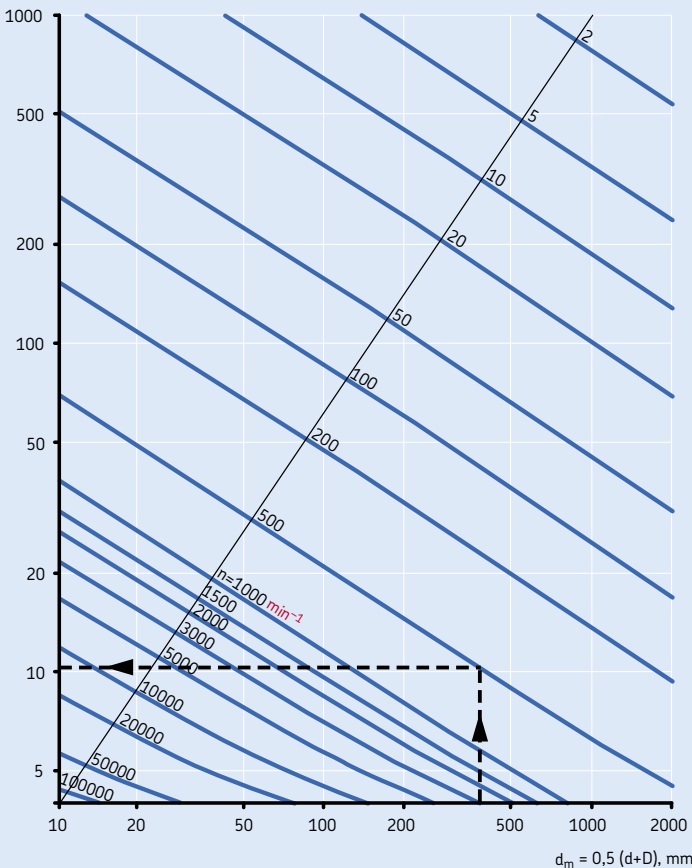
### Overweging van EP-toevoegingen

Verder is bekend dat bepaalde EP-toevoegingen in het smeermiddel de levensduur kan verlengen van lagers waarbij de smering anders onvoldoende zou kunnen zijn, bijvoorbeeld wanneer  $\kappa < 1$  en als de factor voor de verontreinigings-

Diagram 5

### Estimation of the minimum kinematic viscosity $\nu_1$ bij bedrijfstemperatuur

Vereiste viscositeit bij bedrijfstemperatuur



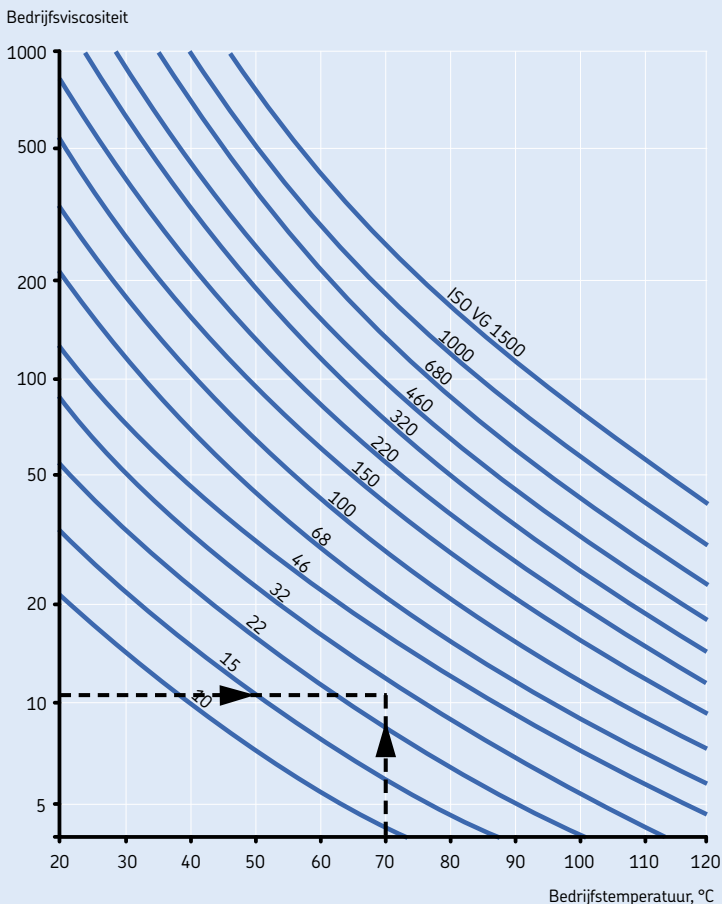
graad  $\eta_c \geq 0,2$ , volgens DIN ISO 281 Addendum 1:2003, kan een waarde van  $\kappa = 1$  in de berekening worden gebruikt als er een smeermiddel met bewezen effectieve EP-toevoegingen wordt gebruikt. In dit geval moet de levensduurmodificatiefactor  $a_{SKF}$  worden beperkt tot  $\leq 3$ , maar niet minder dan  $a_{SKF}$  voor normale smeermiddelen.

Voor het resterende bereik kan de levensduurmodificatiefactor  $a_{SKF}$  worden bepaald met behulp van de werkelijke  $\kappa$  van de toepassing. In

gevallen van ernstige verontreiniging, d.w.z. verontreinigingsfactor  $\eta_c < 0,2$ , moeten de mogelijke voordelen van een EP-toevoeging door testen worden aangetoond. Ook dient te worden gerefereerd aan de informatie over EP-toevoegingen in het hoofdstuk "Smering" vanaf **pagina 229**.

Diagram 6

Kinematische viscositeit  $v$  bij referentietemperatuur



## Bepaling van de lagergrootte

### Factor $\eta_c$ voor verontreinigingsgraad

Deze factor is ingevoerd om bij de berekening van de lagerlevensduur rekening te kunnen houden met verontreinigingen in het smeermiddel. De invloed van verontreinigingen op de lagervermoeiing hangt af van een aantal parameters zoals afmetingen van het lager, de relatieve smeerfilmdikte, afmetingen en verdeling van de vaste verontreinigingsdeeltjes, het type verontreiniging (zacht, hard enz.). De invloed van deze parameters op de levensduur van het lager is ingewikkeld en veel van de parameters zijn moeilijk te quantificeren. Het is dan ook niet mogelijk om voor  $\eta_c$  exacte waarden met een algemene geldigheid vast te stellen. Enkele richtlijnen worden gegeven in **tabel 4**.

Als het lager wordt gebruikt in een toepassing met goede praktijkresultaten en als in het verleden levensduurberekeningen waren gebaseerd op het gebruik van de oude correctiefactor  $a_{23}$ , dan kan een corresponderende (impliciete waarde) factor  $\eta_c$  worden afgeleid om een  $a_{SKF}$  equivalent te geven voor de correctie  $a_{23}$  als verklaard in gedeelte "Een speciaal geval – correctiefactor  $a_{23}$ " op **pagina 68**.

Op deze manier zal waarschijnlijk slechts een benaderingswaarde voor de effectieve  $\eta_c$  factor van de toepassing gevonden worden. Een tweede manier om voor de  $\eta_c$  factor een waarde te verkrijgen die representatief is voor een toepassing, is de verontreinigingsgraad van het smeermiddel te quantificeren als input voor de evaluatie van de waarde voor factor  $\eta_c$ .

Tabel 4

#### Richtwaarden voor factor $\eta_c$ voor verschillende verontreinigingsgraden

Conditie	Factor $\eta_c$ <sup>1)</sup> voor lagers met diameter	
	$d_m < 100$ mm	$d_m \geq 100$ mm
<b>Bijzonder schoon</b> Deeltjesgrootte in de orde van smeerfilmdikte Laboratoriumcondities	1	1
<b>Zeer schoon</b> Olie gefilterd door zeer fijn filter Conditie kenmerkend voor levensduurgesmeerde lagers en tweezijdig afgedicht (rubber afdichtingen)	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
<b>Normale reinheid</b> Olie gefilterd door fijn filter Conditie kenmerkend voor levensduurgesmeerde lagers en tweezijdig afgedicht (beschermplaatjes)	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
<b>Licht verontreinigd</b> Lichte verontreiniging in het smeermiddel	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
<b>Verontreinigd</b> Conditie normaal voor lager zonder geïntegreerde afdichtingen, grove filtering, slijtagedeeltjes en deeltjes afkomstig uit omgeving	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
<b>Sterk verontreinigd</b> Lageromgeving zwaar verontreinigd en lageropstelling met niet-adequate afdichting	0,1 ... 0	0,1 ... 0
<b>Zeer sterk verontreinigd</b> Onder extreme verontreiniging kunnen $\eta_c$ waarden buiten schaal vallen; dit leidt tot ernstiger levensduurbekorting dan voorspeld met de vergelijking voor $L_{nm}$	0	0

<sup>1)</sup> De schaal voor  $\eta_c$  verwijst alleen naar normale, vaste verontreinigingsdeeltjes. Verontreiniging door water of andere vloeistoffen die nadelig is voor de levensduur is niet in de tabel opgenomen. Bij zeer ernstige verontreiniging ( $\eta_c = 0$ ) zal uitval optreden tengevolge van slijtage, en kan de nuttige levensduur van het lager korter zijn dan de nominale levensduur

## ISO verontreinigingsclassificatie en filterklasse

De standaardmethode voor classificatie van de verontreinigingsgraad in een smeringssysteem is beschreven in ISO 4406:1999. In dit classificatiesysteem wordt de uitkomst van de telling van vaste deeltjes omgezet in een code die gebruik maakt van een schaalnummer (→ **tabel 5 en diagram 7, pagina 65**).

Een methode voor controle van de verontreinigingsgraad van de lagerolie is de microscooptelling. Bij deze telmethode worden twee schaalnummers gebruikt voor het aantal deeltjes:  $\geq 5 \mu\text{m}$  en  $\geq 15 \mu\text{m}$ . Bij een andere methode wordt gebruik gemaakt van automatische deeltjestellers, waarbij drie schalen worden gebruikt om het aantal deeltjes aan te geven:

Tabel 5

### ISO classificatie – toewijzing van schaalnummer

Aantal deeltjes per milliliter olie		Schaalnummer
boven	t/m	
2 500 000		> 28
1 300 000	2 500 000	28
640 000	1 300 000	27
320 000	640 000	26
160 000	320 000	25
80 000	160 000	24
40 000	80 000	23
20 000	40 000	22
10 000	20 000	21
5 000	10 000	20
2 500	5 000	19
1 300	2 500	18
640	1 300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0,00	0,01	0

$\geq 4 \mu\text{m}$ ,  $\geq 6 \mu\text{m}$  en  $\geq 14 \mu\text{m}$ . De classificatie van de verontreinigingsgraad bevat drie schaalnummers.

Typische voorbeelden van classificaties voor de verontreinigingsgraad van smeeroilie zijn –/15/12 (A) of 22/18/13 (B) zoals getoond in **diagram 7 op pagina 65**.

Voorbeeld A betekent dat de olie tussen 160 en 320 deeltjes  $\geq 5 \mu\text{m}$  en tussen 20 en 40 deeltjes  $\geq 15 \mu\text{m}$  per milliliter olie bevat. Hoewel het ideaal zou zijn als smeeroilie continu gefilterd werd, zou de haalbaarheid van een filtersysteem afhangen van de optimalisatie tussen kostenverhoging en een toename van de prestatieduur van het lager.

Een filterbeoordeling is een indicatie voor de doelmatigheid van een filter. De doelmatigheid van filters wordt gedefinieerd als filtergetal of reductiefactor  $\beta$ , die gerelateerd is aan een bepaalde deeltjesgrootte. Hoe hoger waarde  $\beta$ , des te doelmatiger is het filter voor die bepaalde deeltjesgrootte. Daarom moeten zowel de waarde  $\beta$  als de specifieke deeltjesgrootte worden beoordeeld. Filtergetal  $\beta$  wordt uitgedrukt als de relatie tussen het aantal specifieke deeltjes voor en na filtering. Dit kan worden berekend als

$$\beta_x = \frac{n_1}{n_2}$$

waarbij

$\beta_x$  = filtergetal voor een bepaalde deeltjesgrootte afmeting x

x = deeltjesgrootte,  $\mu\text{m}$

$n_1$  = aantal deeltjes per volume eenheid (100 ml) groter dan x, stroomopwaarts van het filter

$n_2$  = aantal deeltjes per volume eenheid (100 ml) groter dan x, stroomafwaarts van het filter

### Opmerking

Filtergetal  $\beta$  heeft betrekking op slechts één deeltjesgrootte in  $\mu\text{m}$ , die wordt weergegeven als index, bijvoorbeeld  $\beta_3$ ,  $\beta_6$ ,  $\beta_{12}$ , enz. Een complete klasse van bijvoorbeeld “ $\beta_6 = 75$ ” houdt in dat slechts 1 van de 75 deeltjes van  $6 \mu\text{m}$  of groter het filter zal passeren.



## Bepaling van de lagergrootte

### Bepaling van $\eta_c$ bij bekende verontreinigingsgraad

Wanneer bij oliesmering het olieverontreinigingsniveau bekend is, ofwel uit een microscopische telling ofwel door een analyse met een automatische deeltjesteller volgens ISO 4406:1999, of indirect als gevolg van de filterverhouding die in een olieomloopsysteem wordt toegepast, kan deze informatie worden gebruikt bij de bepaling van factor  $\eta_c$  voor de verontreiniging. De factor  $\eta_c$  kan niet uitsluitend worden afgeleid uit de mate van olieverontreiniging. Deze hangt sterk af van de smeringsconditie, d.w.z.  $\kappa$ , en de grootte van het lager. Een vereenvoudigde methode volgens DIN ISO 281 Addendum 4:2003 wordt hier gegeven om factor  $\eta_c$  voor een bepaalde toepassing te verkrijgen. Via de olieverontreinigingsgraad (of de filterverhouding van de toepassing) wordt de verontreinigingsfactor  $\eta_c$  verkregen met de gemiddelde lagerdiameter  $d_m = 0,5 (d + D)$ , mm, en de viscositeitsverhouding  $\kappa$  van dat lager (→ diagrammen 8 en 9, pagina 66).

Diagrammen 8 en 9 geven typische waarden voor factor  $\eta_c$  voor olieomloopsmering met verschillende gradaties van oliefiltering en olieverontreinigingscodes. Vergelijkbare verontreinigingsfactoren kunnen worden toegepast in toepassingen waarin een oliebad amper een stijging veroorzaakt van de verontreinigingsdeeltjes in het systeem. Als daarentegen het aantal deeltjes in een oliebad in de loop van de tijd blijft stijgen vanwege overmatige slijtage of door verontreinigingen, moet dit worden weerspiegeld in de keuze van de factor  $\eta_c$  die is gebruikt voor het oliebadstelsel, zoals aangegeven in DIN ISO 281 Addendum 4:2003.

Voor vetsmering kan  $\eta_c$  op een vergelijkbare manier worden bepaald, hoewel de verontreiniging moeilijk meetbaar kan zijn en dus wordt gedefinieerd op eenvoudige, kwalitatieve wijze.

Diagrammen 10 en 11, op pagina 67 geven typische waarden voor factor  $\eta_c$  voor vetsmering voor respectievelijk zeer schone en schone bedrijfsomstandigheden.

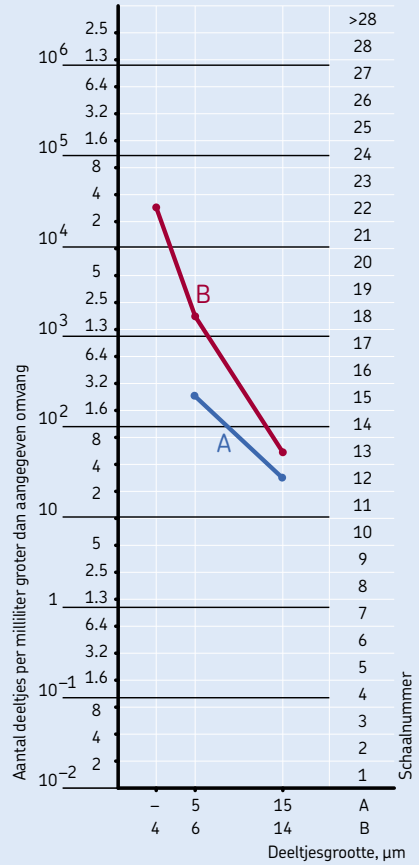
Voor andere gradaties van verontreiniging voor olieomloop, oliebad en vetsmering kan DIN ISO 281 Addendum 4:2003 worden geraadpleegd of contact worden opgenomen met SKF application engineering service.

Een beeld van de grote invloed die verontreiniging op vermoeiing en levensduur heeft, is te verkrijgen uit het volgende voorbeeld. Een

aantal 6305 groefkogellagers met en zonder afdichting zijn getest in een zeer verontreinigde omgeving (een tandwielkast met een groot aantal slijtage-deeltjes). Bij de afgedichte lagers trad geen uitval op – de test is om praktische redenen gestaakt nadat de afgedichte lagers minstens 30 maal zo lang hadden gedraaid als de experimentele levensduur van de niet-afgedichte lagers. De levensduur van de niet-afgedichte lagers bedroeg 0,1 van de berekende  $L_{10}$  levensduur, wat overeenkomt met een factor  $\eta_c = 0$  zoals vermeld in tabel 4, pagina 62.

Uit Diagram 1 t/m 4 vanaf pagina 54, blijkt het belang van reinheid bij smering uit de snelle afname van de waarden voor factor  $a_{SKF}$  bij een dalende waarde van factor  $\eta_c$ . Het toepassen van lagers met geïntegreerde afdichtingen is een goede en economische manier voor het verkrijgen van zeer schone omstandigheden in het lager.

ISO classificatie en voorbeelden voor deeltjestelling



A = microscopische deeltjestelling (-/15/12)  
 B = automatische deeltjestelling (22/18/13)

Diagram 8

Verontreinigingsfactor  $\eta_c$  voor  
 - oliecirculatiesmering  
 - vaste stoffen: verontreinigingsgraad -/15/12 volgens ISO 4406:1999  
 - filtergetal  $\beta_{12} = 200$

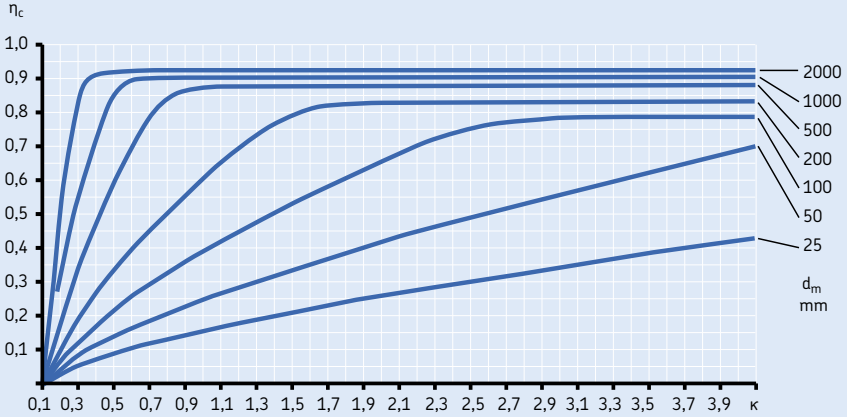


Diagram 9

Verontreinigingsfactor  $\eta_c$  voor  
 - oliecirculatiesmering  
 - vaste stoffen: verontreinigingsgraad -/17/14 volgens ISO 4406:1999  
 - filtergetal  $\beta_{25} = 75$

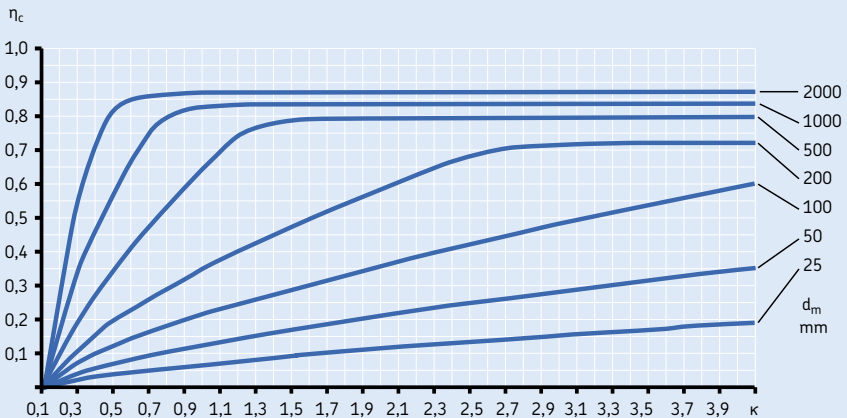


Diagram 10

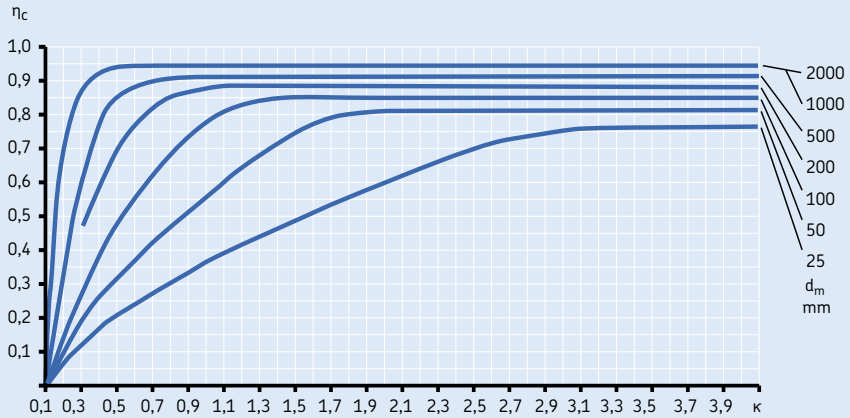
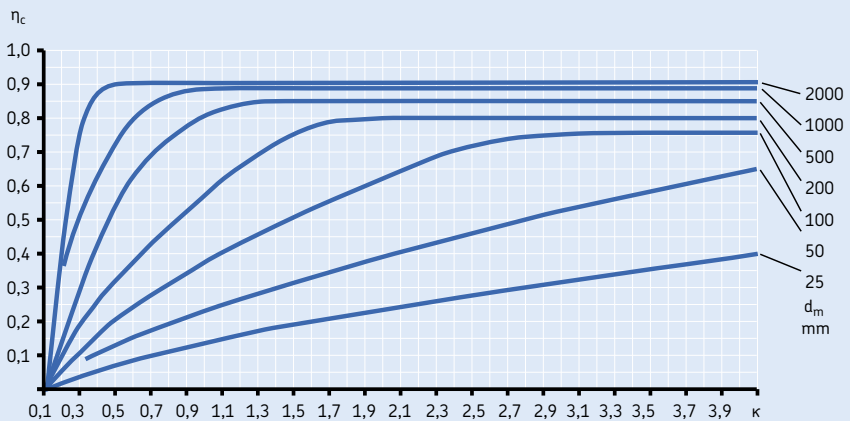
Verontreinigingsfactor  $\eta_c$  voor vetsmering, bijzonder schoon

Diagram 11

Verontreinigingsfactor  $\eta_c$  voor vetsmering, normale reinheid

## Bepaling van de lagergrootte

### Een speciaal geval – correctiefactor $a_{23}$

In vorige SKF catalogi is de levensduur gecorrigeerd met behulp van factor  $a_{23}$  voor materiaal en smering. Deze factor is in 1975 door SKF ingevoerd.

In ISO 281:1990/Amd 2:2000 wordt verwezen naar dit type levensduurcorrectie als een speciaal geval van de meer algemene levensduurmodificatiefactor  $a_{SKF}$ . Bij de correctiefactor  $a_{23}$  wordt uitgegaan van een specifieke waarde voor de verhouding tussen verontreiniging en belasting  $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$ , gebruikt in de diagrammen voor de SKF levensduurmodificatiefactor  $a_{SKF}$ . Aangezien factor  $a_{23}$  uitsluitend afhankelijk is van de viscositeitsverhouding  $\kappa$ , wordt een  $a_{23}$  schaal gelegd over de  $\kappa$  krommen van de **diagrammen 1 t/m 4, vanaf pagina 54**, op het punt waarbij  $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$  is. De factor  $\eta_c$  voor de verontreinigingsgraad wordt dus

$$\eta_c = [\eta_c (P_u/P)]_{23} / (P_u/P)$$

De locatie van het punt waarop  $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$  wordt aangegeven met een stippellijn, en de waarden worden vermeld in **tabel 6** voor SKF standaard lagers en voor SKF Explorer lagers. Voor standaard radiale kogellagers is de overeenkomende  $\eta_c$  bijvoorbeeld

$$\eta_c = \frac{0,05}{P_u/P}$$

Op die locatie van de "verontreinigings-belastingsverhouding"  $[\eta_c (P_u/P)]_{23} = 0,05$  in **diagram 1, pagina 54**, is  $a_{SKF} = a_{23}$  en kan  $a_{23}$  rechtstreeks worden afgelezen van de  $a_{SKF}$  as met behulp van de  $\kappa$  schaal op de stippellijn. Daarna kan de levensduur worden berekend met de eenvoudige vergelijking

$$L_{nm} = a_1 a_{23} L_{10}$$

waarbij

$L_{nm}$  = SKF levensduur (bij een betrouwbaarheid 100 – n %), miljoenen omwentelingen

$L_{10}$  = nominale levensduur (bij een betrouwbaarheid van 90 %), miljoenen omwentelingen

$a_1$  = correctiefactor levensduur voor betrouwbaarheid (→ **tabel 1, pagina 53**)

$a_{23}$  = correctiefactor voor materiaal en smering, wanneer  $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$  (→ **diagrammen 1 t/m 4, vanaf pagina 54**)

Tabel 6

#### Verhouding verontreiniging-belasting $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$

Lager/ type	Verhouding $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$ voor SKF standaard lagers		SKF Explorer lagers
----------------	---	--	------------------------

#### Radiale lagers

Kogellagers	0,05	0,04
Rollagers	0,32	0,23

#### Axiale lagers

Kogellagers	0,16	–
Rollagers	0,79	0,56

Het gebruik van correctiefactor  $a_{23}$  impliceert in de praktijk een materiaalspanningssituatie die kan worden gekenmerkt door een waarde van  $\eta_c (P_u/P) = [\eta_c (P_u/P)]_{23}$ . Als de werkelijke  $\eta_c (P_u/P)$  van het lager hoger of lager is dan de waarde  $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$ , worden de levensduurprestaties onder- of overschat. Met andere woorden: toepassingen met hoge belasting en verhoogde verontreiniging of lage belasting en verbeterde reinheid worden niet goed weergegeven door correctiefactor  $a_{23}$ .

Voor standaardlagers die werken met een belastingsverhouding C/P van circa vijf, is als verontreinigingsgraad voor  $a_{23}$  will require an  $\eta_c$  nodig van ongeveer 0,4 – 0,5. Als de werkelijke reinheid van de toepassing lager is dan de normale waarde, leidt het gebruik van correctiefactor  $a_{23}$  tot een overschatting van de levensduurprestaties van het lager. Daarom wordt aanbevolen alleen de  $a_{SKF}$  methode te gebruiken om de betrouwbaarheid van de keuze van de lagergrootte te verbeteren.

De overeenkomst tussen correctiefactoren  $a_{23}$  en  $a_{SKF}$  is handig wanneer het nodig is om toepassingen om te rekenen die traditioneel ontworpen waren met behulp van correctiefactor  $a_{23}$  naar het gebruik van de meer algemene correctiefactor  $a_{SKF}$ . Een groot aantal toepassingen met bevredigende bedrijfsresultaten die aanvankelijk zijn berekend met correctiefactor  $a_{23}$  kan gemakkelijk worden omgerekend naar een equivalente factor  $a_{SKF}$ .

In de praktijk komt dit neer op de aanname van een verontreinigingsfactor  $\eta_c$  van de toepassing op basis van de "verontreinigingsbelastingsverhouding"  $[\eta_c (P_u/P)]_{23}$  als vermeld in **tabel 6**. Factor  $\eta_c$  die op deze manier is afgeleid, staat voor een simpele benadering van de werkelijke factor  $\eta_c$ . Deze eerste schatting van factor  $\eta_c$  kan verder worden verbeterd met behulp van oliereinheidscijfers – zie hiervoor gedeelte "Bepaling van  $\eta_c$  bij bekende verontreinigingsgraad" op **pagina 64**. Zie ook voorbeeldberekening 2 op **pagina 78**.

## Bepaling van de lagergrootte

### Berekening levensduur onder verschillende bedrijfsomstandigheden

In toepassingen met een lagerbelasting die varieert in grootte en richting en met toerentalwijzigingen, temperatuurschommelingen, veranderende smeringscondities en verontreinigingsgraad kan de levensduur van het lager niet rechtstreeks worden berekend zonder behoefte aan een tussenstap in de berekening: een equivalente belasting, gerelateerd aan de variabele belastingsomstandigheden. Gezien de complexiteit van dit systeem is deze tussenliggende parameter niet gemakkelijk te bepalen en zal deze de berekening niet vereenvoudigen.

Daarom is het bij fluctuerende bedrijfsomstandigheden nodig het belastingspectrum of de belastingscyclus van de toepassing te reduceren tot een beperkt aantal eenvoudiger belastingsvoorbeelden (→ **diagram 12**). Bij continu variabele belasting kunnen de afzonderlijke belastingsniveaus worden opgeteld en kan het belastingspectrum worden herleid tot een histogram van constante belastingsblokken die elk voor een bepaald percentage of een bepaalde tijdsfractie van het bedrijf van de toepassing staan. Hoge en middelhoge belastingen bekorten de levensduur van een lager in grotere mate dan lagere belastingen. Het is dan ook belangrijk om stoot- en piekbelastingen goed aan te geven in het belastingsdiagram, ook als dergelijke belastingen niet vaak voorkomen en beperkt blijven tot slechts enkele omwentelingen.

Binnen ieder bedrijfsinterval of "blok" kunnen de lagerbelasting en de bedrijfsomstandigheden worden herleid tot een gemiddelde met een zekere constante waarde. Bovendien laat het aantal bedrijfsuren of omwentelingen dat per bedrijfsinterval mag worden verwacht, zien welke levensduurfractie nodig is voor die bepaalde belastingsconditie. Wanneer het aantal omwentelingen met  $N_1$  wordt aangegeven voor belastingsconditie  $P_1$ , en wanneer  $N$  de totale levenscyclus van de toepassing is, dan zal levensduuraandeel  $U_1 = N_1/N$  worden gebruikt door belastingsituatie  $P_1$ , die een berekende levensduur heeft van  $L_{10m1}$ . Onder variabele bedrijfsomstandigheden kan de levensduur van het lager worden voorspeld met de volgende berekening

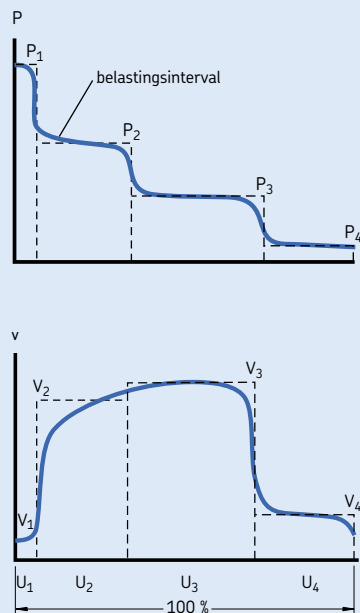
$$L_{10m} = \frac{1}{\frac{U_1}{L_{10m1}} + \frac{U_2}{L_{10m2}} + \frac{U_3}{L_{10m3}} + \dots}$$

waarbij

- $L_{10m}$  = nominale levensduur, miljoenen omwentelingen
- $L_{10m1}, L_{10m2}, \dots$  = aandeel van nominale levensduuren onder constante omstandigheden 1, 2, ... miljoenen omwentelingen
- $U_1, U_2, \dots$  = levensduuraandeel onder omstandigheden 1, 2 ...  
Let op:  $U_1 + U_2 + \dots = 1$

Het gebruik van deze rekenmethode is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van representatieve belastingsdiagrammen voor de toepassing. Een dergelijke belastingshistoriek kan ook worden afgeleid van typische bedrijfsom-

Diagram 12



standigheden of standaard bedrijfscycli die verwacht kunnen worden voor dit soort toepassing.

### Involed van de bedrijfstemperatuur

De afmetingen van een lager in bedrijf veranderen tengevolge van structurele transformaties in het materiaal. Deze transformaties (veranderingen) worden beïnvloed door temperatuur, tijd en materiaalspanning.

Om bij bedrijf ontoelaatbare wijzigingen in de afmetingen vanwege de structurele verandering te voorkomen, worden lagermaterialen onderworpen aan een speciale warmtebehandeling (stabilisatieproces → **tabel 7**).

Afhankelijk van het lagertype hebben standaard lagers, vervaardigd van doorgehard en inductie-gehard staal een aanbevolen maximale bedrijfstemperatuur, die varieert van 120 tot 200 °C. De maximale bedrijfstemperatuur is direct gerelateerd aan het warmtebehandelingsproces. Waar van toepassing is extra informatie te vinden in de inleidende tekst van de producthoofdstukken.

Als de normale bedrijfstemperaturen van de toepassing hoger zijn dan de aanbevolen maximumtemperatuur, wordt bij voorkeur een lager met een hogere stabilisatieklasse gebruikt.

Voor toepassingen met lagers die continu bij hoge temperaturen moeten werken kan het nodig zijn het dynamische draagvermogen van het lager te corrigeren.

Neem contact op met de SKF application engineering service voor meer informatie.

Een goede werking van lagers bij hoge temperaturen hangt ook af van het gekozen smeermiddel, en of die zijn smeereigenschappen zal behouden, en of er geschikte materialen zijn gebruikt voor afdichtingen, kooien enz.

(→ hoofdstuk "Smering" vanaf **pagina 229** en gedeelte "Materialen voor wentellagers" vanaf **pagina 138**).

In het algemeen is het raadzaam contact op te nemen met de SKF application engineering service voor lagers die werken bij hoge temperaturen en een hogere stabiliteitsklasse vereisen dan S1.

### Vereiste nominale levensduur

Voor de bepaling van de lagergrootte is het gebruikelijk de berekende nominale SKF levensduur te controleren aan de hand van de gespecificeerde levensduur van de toepassing, als deze beschikbaar is. Deze is meestal afhankelijk van het type machine en de vereisten ten aanzien van bedrijfsduur en betrouwbaarheid van de werking. Wanneer ervaring ontbreekt, kunnen de waarden in de **tabellen 8 en 9 op pagina 72** worden gebruikt.

**Tabel 7**

Maatstabiliteit	
Stabilisatieklasse	Stabilisatie tot
SN	120 °C
S0	150 °C
S1	200 °C
S2	250 °C
S3	300 °C
S4	350 °C



## Bepaling van de lagergrootte

Tabel 8

### Richtwaarden voor de vereiste nominale levensduur voor verschillende soorten machines

Soort machine	Specificatie levensduur Bedrijfsuren
Huishoudelijke apparaten, landbouwmachines, instrumenten, technische apparaten voor medisch gebruik	300 ... 3 000
Machines voor kortstondig of intermitterend bedrijf: elektrisch handgereedschap, hijsapparatuur in werkplaatsen, bouwmachines	3 000 ... 8 000
Machines voor kortstondig of intermitterend bedrijf met grote betrouwbaarheid: liften, kranen voor stukgoederen e.d.	8 000 ... 12 000
Machines voor 8-urig gebruik, die niet altijd ten volle worden belast: tandwielaandrijvingen voor algemene doeleinden, elektromotoren voor industrieel gebruik, roterende brekers	10 000 ... 25 000
Machines voor 8-urig gebruik, die ten volle worden belast: gereedschapswerktuigen, houtbewerkingsmachines, machines voor productiebedrijven, kranen voor bulkgoederen, ventilatoren, transportbanden, drukkerijmachines, seperatoren en centrifuges	20 000 ... 30 000
Machines voor 24-urig continubedrijf: tandwielkasten voor walswerken, middelgrote elektrische machines, compressoren, mijnliften, pompen, textielmachines	40 000 ... 50 000
Windenergie-machines, waaronder hoofdas, gondel, bladverstelrichting, generatorlagers	30 000 ... 100 000
Machines voor waterwerken, roterende ovens, kabelslagmachines, voortstuwingsinstallaties voor zeegaande schepen	60 000 ... 100 000
Grote elektrische machines, elektriciteitscentrales, mijnpompen, mijnventilatoren, schroefaslagers voor zeegaande schepen	> 100 000

Tabel 9

### Richtwaarden voor de vereiste nominale levensduur voor aspotlagers van railvoertuigen

Soort voertuig	Specificatie levensduur Miljoenen km
Goederenwagens volgens UIC bij continu optredende maximale asbelasting	0,8
Voertuigen voor massatransport: metro's, ondergrondse wagens, lichte spoor- en tramvoertuigen	1,5
Personen voertuigen voor langeafstandsverkeer	3
Diesel en elektrische units voor langeafstandsverkeer	3 ... 4
Diesel en elektrische locomotieven voor langeafstandsverkeer	3 ... 5

# Dynamische lagerbelastingen

## Berekening van dynamische lagerbelastingen

De op een lager werkende belastingen kunnen worden berekend volgens de wetten van de mechanica, mits de uitwendige krachten (bijvoorbeeld krachten voortkomend uit overgebracht vermogen, bedrijfsbelastingen of massa-krachten) bekend zijn of kunnen worden berekend. Wanneer de belastingscomponenten voor een enkel lager worden berekend, wordt ter vereenvoudiging de as beschouwd als een balk die rust op twee stijve, momentvrije punten. Elastische vervormingen binnen het lager, het huis of het machineframe worden buiten beschouwing gelaten, evenals de momenten die in het lager optreden tengevolge van doorbuiging van de as.

Deze vereenvoudigingen zijn nodig om berekeningen voor een lageropstelling te kunnen maken met direct beschikbare middelen, zoals een rekenmachine. De gestandaardiseerde methoden voor de berekening van draaggetallen en equivalente belastingen zijn gebaseerd op vergelijkbare aannamen.

Het is mogelijk de lagerbelasting te berekenen op basis van de elasticiteitstheorie, zonder bovenstaande aannamen te doen; voor dergelijke berekeningen zijn echter ingewikkelde computerprogramma's nodig. Bij deze programma's worden lagers, as en huis beschouwd als veerkrachtige componenten van een systeem.

Uitwendige krachten, bijvoorbeeld afkomstig van het gewicht van de as met de daarbij behorende onderdelen of van het gewicht van een voertuig en de overige massakrachten, zijn ofwel bekend of kunnen worden berekend. Voor de bepaling van bedrijfsbelastingen (walskrachten, snijkrachten enz.), stootbelastingen en bijkomende dynamische krachten, bijvoorbeeld als gevolg van onbalans) is men vaak aangewezen op schattingen, gebaseerd op ervaringen met vergelijkbare machines of lageropstellingen.

## Tandwieloverbrengingen

Bij tandwieloverbrengingen kunnen de theoretische tandkrachten worden berekend aan de hand van het doorgeleide vermogen en het ontwerp van de vertanding. Er zijn echter bijkomende dynamische krachten, voortkomende uit

de vertanding zelf of uit de aandrijving of de aangedreven machine. Bijkomende krachten voortkomend uit de vertanding zijn meestal te wijten aan vormfouten van de tanden en aan onbalans in de roterende onderdelen. Vanwege de vereisten van een geruisarme werking worden er hoge eisen gesteld aan de nauwkeurigheid van de vertanding, en deze krachten zijn meestal zo klein dat ze te verwaarlozen zijn bij het maken van lagerberekeningen.

Bijkomende krachten voortkomend uit het type en de werking van de machines die aan het tandwiel gekoppeld zijn kunnen pas worden bepaald wanneer de bedrijfsomstandigheden bekend zijn. Hun invloed op de nominale levensduur van het lager wordt beschouwd als een "bedrijfsfactor" waarin de stootbelasting en het rendement van het lager tot uitdrukking komen. Waarden van deze factor voor verschillende bedrijfsomstandigheden worden meestal vermeld in de documentatie van de tandwielafabrikant.

## Riemoverbrenging

Bij riemoverbrengingen moet voor de berekening van as- en lagerbelasting rekening worden gehouden met de effectieve riemtrek (omtrekkracht), die afhankelijk is van het over te brengen koppel. De riemtrek moet worden vermenigvuldigd met een factor die afhangt van het soort riem, de voorspanning, riemspanning en andere bijkomende dynamische belastingen. Deze waarden worden meestal door de riemfabrikant opgegeven. Als er echter geen informatie beschikbaar is, kunnen de volgende waarden worden gebruikt voor

- tandriemen = 1,1 tot 1,3
- V-snaren = 1,2 tot 2,5
- vlakke riemen = 1,5 tot 4,5

De hoogste van de twee waarden hebben betrekking op die gevallen waar de afstand tussen de assen klein is, bij hoge of stootbelastingen of waar de riemspanning hoog is.

## Bepaling van de lagergrootte

### Equivalente dynamische lagerbelasting

Indien de met bovenstaande informatie berekende lagerbelasting  $F$  blijkt te voldoen aan de voor het dynamisch draaggetal  $C$  gestelde voorwaarden, d.w.z. de belasting is constant van grootte en richting en werkt radiaal op een radiaal lager of axiaal en centraal op een axiaal lager, dan geldt  $P = F$  en kan de belasting rechtstreeks in de levensduurformule worden ingebracht.

In alle andere gevallen is het noodzakelijk de equivalente lagerbelasting te berekenen. Hieronder wordt verstaan de hypothetische, in grootte en richting constante belasting (radiaal bij radiale lagers of axiaal en centraal bij axiale lagers) die, indien toegepast, dezelfde invloed zou hebben op de levensduur van het lager als de werkelijk optredende belasting waaraan het lager wordt onderworpen (→ fig. 2).

Radiale lagers worden vaak onderworpen aan gelijktijdig optredende radiale en axiale belastingen. Als de samengestelde belasting in richting en grootte constant is, kan de equivalente dynamische belasting  $P$  worden bepaald met behulp van de volgende, algemene, formule

$$P = X F_r + Y F_a$$

waarbij

$P$  = equivalente dynamische lagerbelasting, kN

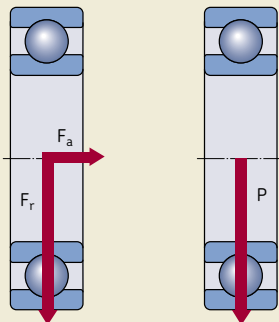
$F_r$  = werkelijke radiale belasting, kN

$F_a$  = werkelijke axiale belasting, kN

$X$  = radiale belastingsfactor voor het lager

$Y$  = axiale belastingsfactor voor het lager

Fig. 2



Een bijkomende axiale belasting beïnvloedt de equivalente dynamische belasting  $P$  alleen voor een eenrijig radiaal lager als de verhouding  $F_a/F_r$  een bepaalde waarde  $e$  overschrijdt. Bij tweerijige radiale lagers zijn zelfs kleine axiale belastingen al van invloed.

Dezelfde algemene formule is ook van toepassing op axiale lagers die zowel axiale als radiale belastingen kunnen opnemen. Voor axiale lagers die uitsluitend puur axiale belastingen kunnen opnemen, zoals kogeltaats- en cilindertaaitslagers, kan de vergelijking worden vereenvoudigd mits de belasting centraal aangrijpt, tot

$$P = F_a$$

Alle informatie en gegevens die nodig zijn voor het berekenen van de equivalente lagerbelastingen zijn te vinden in het tekstgedeelte dat aan producthoofdstukken en producttabellen voorafgaat.

### Veranderlijke lagerbelasting

In vele gevallen is de grootte van de belasting veranderlijk. De formule voor de berekening van de levensduur met veranderlijke bedrijfsomstandigheden moet dan worden toegepast (→ pagina 70).

### Gemiddelde belasting binnen een belastingsinterval

Binnen ieder belastingsinterval kunnen de bedrijfsomstandigheden licht afwijken van de nominale waarde. Ervan uitgaande dat de bedrijfscondities, bijvoorbeeld toerental en belastingsrichting, redelijk constant zijn en dat de grootte van de belasting constant varieert tussen een minimumwaarde  $F_{\min}$  en een maximumwaarde  $F_{\max}$  (→ diagram 13), kan de gemiddelde belasting worden verkregen uit

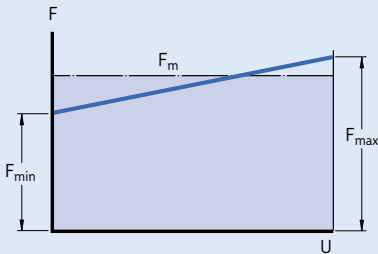
$$F_m = \frac{F_{\min} + 2 F_{\max}}{3}$$

### Roterende belasting

Wanneer, zoals te zien is in diagram 14, de belasting op het lager bestaat uit een belasting  $F_1$  die constant van grootte en richting is (bijvoorbeeld het gewicht van een rotor) en een roterende constante belasting  $F_2$  (bijvoorbeeld een onbalans) verkrijgt men de gemiddelde belasting uit

Diagram 13

Belastingsgemiddelde



$$F_m = f_m (F_1 + F_2)$$

Waarden voor de factor  $f_m$  kunnen worden afgelezen uit **diagram 15**.

Vereiste minimumbelasting

De verhouding tussen belasting en bedrijfslevensduur is bij zeer lage belastingen minder duidelijk. Er zijn dan andere uitvalsmechanismen dan vermoeuing van belang.

Om een lager naar tevredenheid te laten werken, moet het altijd worden onderworpen aan een bepaalde minimumbelasting. Als algemene vuistregel kan worden gehanteerd dat deze belasting minimaal 0,02 C moet zijn voor rollagers en 0,01 C voor kogellagers. Het belang van deze belasting neemt toe als er sprake is van aanzienlijke versnellingen in het lager en wanneer de toerentallen in de buurt van de 50 % of hoger zijn dan het referentietoerental in de producttabellen (→ hoofdstuk "Toerentallen en trilling" vanaf **pagina 107**). Als niet kan worden voldaan aan de minimumvereisten voor belasting, kan het gebruik van NoWear lagers worden overwogen (→ **pagina 943**).

Aanbevelingen voor het berekenen van de vereiste minimumbelasting voor de verschillende lagertypen worden gegeven in de tekst voortgaand aan de tabellengedeelten.

Diagram 14

Roterende belasting

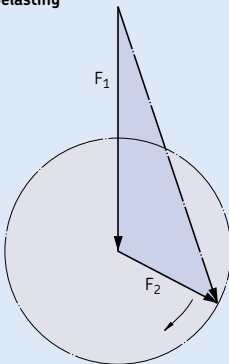
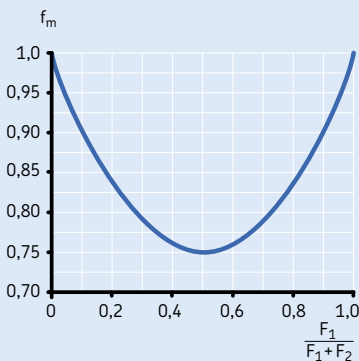


Diagram 15



## Bepaling van de lagergrootte d.m.v. het statisch draaggetal

De lagergrootte moet worden gekozen aan de hand van het statisch draaggetal  $C_0$  in plaats van de levensduur als een van de volgende omstandigheden zich voordoet:

- Het lager staat stil en wordt voortdurend, of met tussenpozen, onderworpen aan (stoot)belastingen.
- Het lager maakt onder belasting trage oscillerende of zich instellende bewegingen.
- Het lager draait onder belasting met een zeer laag toerental ( $n < 10 \text{ min}^{-1}$ ) en hoeft geen lange levensduur te hebben (de levensduurberekening zou in dit geval, voor een gegeven equivalente belasting  $P$ , een dusdanig laag benodigd dynamisch draaggetal  $C$  geven dat het lager indien geselecteerd op basis van de levensduur aanzienlijk zou worden overbelast bij bedrijf).
- Het lager roteert en wordt naast de normale bedrijfsbelasting onderworpen aan zware stootbelastingen.

In al deze gevallen wordt de toelaatbare belasting voor een lager niet bepaald door materiaalvermoeiing, maar door de hoeveelheid blijvende vervorming die de belasting veroorzaakt in de loopbaan. Belastingen die werken op een stilstaand lager of een langzaam oscillerend lager, of stootbelastingen op een draaiend lager kunnen zorgen voor afvlakking van delen van de rollichamen en indrukkingen in de loopbanen. Deze indrukkingen kunnen met onregelmatige tussenafstanden over de loopbaan verspreid zijn of kunnen op regelmatige afstand van elkaar liggen, corresponderend met de ruimte tussen de rollichamen. Als de belasting gedurende een aantal omwentelingen optreedt, dan zal de vervorming gelijkmatig over de hele loopbaan worden verdeeld. Blijvende vervormingen in het lager kunnen leiden tot trillingen in het lager, verhoogd lagergeruis en hogere wrijving. Ook is het mogelijk dat de lagerspeling zal toenemen of dat de aard van de passingen verandert.

In hoeverre deze veranderingen schadelijk zijn voor de lagerprestaties, hangt af van de eisen die aan het lager worden gesteld binnen een bepaalde opstelling. Het is dan ook nood-

zakelijk te voorkomen dat er blijvende vervormingen optreden of te zorgen dat er zo weinig mogelijk blijvende vervormingen ontstaan. Dit wordt bereikt door een lager met een voldoende statisch draagvermogen te kiezen wanneer aan een van de volgende eisen moet worden voldaan

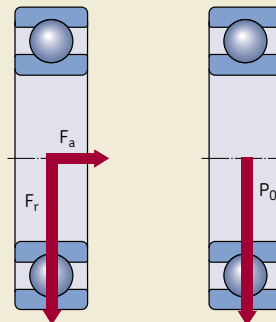
- hoge mate van betrouwbaarheid
- geruisarme werking (bijvoorbeeld voor elektromotoren)
- trillingsvrij bedrijf (bijvoorbeeld voor machinewerktuigen)
- constante wrijvingsmoment (bijvoorbeeld voor meet- en testapparatuur)
- lage aanloopweerstand onder belasting (bijvoorbeeld voor kranen).

### Equivalente statische lagerbelasting

Statische belastingen met zowel radiale als axiale componenten moeten worden omgerekend naar een equivalente statische lagerbelasting. Deze wordt gedefinieerd als de belasting (radiaal voor radiale lagers en axiaal voor taatslagers) die, indien toegepast, zou zorgen voor dezelfde maximale belasting van het rollichaam in het lager als de werkelijke belasting. Dit getal wordt verkregen uit de algemene vergelijking

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$$

Fig. 3



waarbij  
 $P_0$  = equivalente statische lagerbelasting, kN  
 $F_r$  = werkelijke radiale lagerbelasting (zie onder), kN  
 $F_a$  = werkelijke axiale lagerbelasting (zie onder), kN  
 $X_0$  = radiale belastingsfactor voor het lager  
 $Y_0$  = axiale belastingsfactor voor het lager

### Opmerking

Bij het berekenen van  $P_0$  moet de maximale belasting worden gebruikt die kan optreden, en moeten de radiale en axiale componenten in bovenstaande vergelijking worden ingevoegd (→ fig. 3). Als een statische belasting in verschillende richtingen op een lager inwerkt, zal de grootte van deze componenten veranderen. In deze gevallen moeten die belastingscomponenten worden gebruikt die de hoogste waarde opleveren voor de equivalente statische lagerbelasting  $P_0$ .

Alle informatie en gegevens die nodig zijn voor het berekenen van de equivalente lagerbelastingen zijn te vinden in het tekstgedeelte dat aan producthoofdstukken en producttabellen voorafgaat.

### Vereist statisch draaggetal

Wanneer een lagergrootte wordt bepaald op grond van het statisch draagvermogen staat een bepaalde veiligheidsfactor  $s_0$  voor de relatie tussen het statisch draaggetal  $C_0$  en de equivalente statische belasting  $P_0$ . Aan de hand hiervan

wordt het vereiste statische draaggetal berekend.

Het vereiste statisch draaggetal  $C_0$  is te berekenen met

$$C_0 = s_0 P_0$$

waarbij  
 $C_0$  = statisch draaggetal, kN  
 $P_0$  = equivalente statische lagerbelasting, kN  
 $s_0$  = statische veiligheidsfactor

Richtwaarden op basis van praktijk en ervaringen worden gegeven in **tabel 10** voor de statische veiligheidsfactor  $s_0$  voor kogel- en rollagers voor diverse toepassingen waarbij een rustige loop gewenst is. Bij hogere temperaturen neemt het statisch draagvermogen af. Verdere informatie wordt op verzoek toegestuurd.

### Controle van het statische draagvermogen

Voor dynamisch belaste lagers is het raadzaam, indien de equivalente statische belasting  $P_0$  bekend is, te controleren of het statisch draagvermogen voldoende is, met de vergelijking

$$s_0 = C_0/P_0$$

Als de verkregen waarde voor  $s_0$  minder is dan de aanbevolen richtwaarden (→ **tabel 10**), dient een lager met een hoger statisch draaggetal te worden geselecteerd.

Tabel 10

#### Richtwaarden voor statische veiligheidsfactor $s_0$

Soort bedrijf	Roterende lagers						Niet-roterende lagers	
	Vereisten ten aanzien van geruisarm bedrijf						Kogel-lagers	Rol-lagers
	onbelangrijk		normaal		hoog			
	Kogel-lagers	Rol-lagers	Kogel-lagers	Rol-lagers	Kogel-lagers	Rol-lagers	Kogel-lagers	Rol-lagers
Gelijkmatig, trillingsvrij	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normaal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Uitgesproken stootbelastingen <sup>1)</sup>	≥ 1,5	≥ 2,5	≥ 1,5	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Voor tontaatslagers is het aanbevolen  $s_0 \geq 4$  te gebruiken

<sup>1)</sup> Wanneer de grootte van de stootbelasting niet bekend is, moeten  $s_0$  waarden worden gebruikt die minstens zo groot zijn als de hierboven vermelde. Als de grootte van de stootbelasting exact bekend is, kunnen lagere waarden worden toegepast voor  $s_0$

## Berekeningsvoorbeelden

### Voorbeeld 1

Een SKF Explorer 6309 groefkogellager moet draaien bij  $3\,000\text{ min}^{-1}$  onder een constante radiale belasting  $F_r = 10\text{ kN}$ . Er wordt oliesmering gebruikt met olie met een werkelijke kinematische viscositeit  $v = 20\text{ mm}^2/\text{s}$  bij normale bedrijfstemperatuur. De gewenste betrouwbaarheid is 90 % en er wordt aangenomen dat de bedrijfsomstandigheden bijzonder schoon zijn. Wat is de nominale en de SKF levensduur?

a) De nominale levensduur voor een betrouwbaarheid van 90 % is

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

Uit de producttabel voor lager 6309,  $C = 55,3\text{ kN}$ . Aangezien de belasting zuiver radiaal is  $P = F_r = 10\text{ kN}$  (→ "Equivalent dynamische lagerbelasting" op **pagina 74**).

$$L_{10} = (55,3/10)^3 = 169\text{ miljoen omwentelingen}$$

of in bedrijfsuren, met

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60\text{ n}} L_{10}$$

$$L_{10h} = 1\,000\,000 / (60 \times 3\,000) \times 169 = 940\text{ bedrijfsuren}$$

b) De SKF levensduur voor een betrouwbaarheid van 90 % is

$$L_{10m} = a_1 a_{SKF} L_{10}$$

- Aangezien er een betrouwbaarheid van 90 % wordt vereist, moet de levensduur  $L_{10m}$  worden berekend en  $a_1 = 1$  (→ **tabel 1, pagina 53**).
- Uit de producttabel voor lager 6309,  $d_m = 0,5(d + D) = 0,5(45 + 100) = 72,5\text{ mm}$

- Uit **diagram 5** op **pagina 60** blijkt dat de olieviscositeit bij bedrijfstemperatuur voor een toerental van  $3\,000\text{ min}^{-1}$ ,  $v_1 = 8,15\text{ mm}^2/\text{s}$ . Dus  $\kappa = v/v_1 = 20/8,15 = 2,45$
- Ook uit de producttabel:  $P_u = 1,34\text{ kN}$  en  $P_u/P = 1,34/10 = 0,134$ . Aangezien de omstandigheden zeer schoon zijn,  $\eta_c = 0,8$  en  $\eta_c P_u/P = 0,107$ . Met  $\kappa = 2,45$  en met behulp van de SKF Explorer schaal van **diagram 1**, op **pagina 54** kan de waarde  $a_{SKF} = 8$  worden verkregen. Volgens de berekening voor de SKF levensduur

$$L_{10m} = 1 \times 8 \times 169 = 1\,352\text{ miljoen omwentelingen}$$

of in bedrijfsuren, met

$$L_{10mh} = \frac{10^6}{60\text{ n}} L_{10m}$$

$$L_{10mh} = 1\,000\,000 / (60 \times 3\,000) \times 1\,352 = 7\,512\text{ bedrijfsuren}$$

### Voorbeeld 2

Het SKF Explorer 6309 groefkogellager in voorbeeld 1 maakt deel uit van een bestaande toepassing die enkele jaren geleden is berekend met correctiefactor  $a_{23}$ . Deze toepassing voldoet volledig aan de vereisten. Nu komt het verzoek de levensduur van het lager opnieuw te berekenen in termen van correctiefactor  $a_{23}$  en ook van factor  $a_{SKF}$  (gebaseerd op praktijkervaringen met deze toepassing), d.w.z.  $a_{SKF} = a_{23}$ . Tot slot moet de equivalente factor  $\eta_c$  worden verkregen voor het verontreinigingsniveau in de toepassing onder conditie  $a_{SKF} = a_{23}$ .

- Met  $\kappa = 2,45$ , waarbij de  $\kappa$  schaal wordt toegepast boven op de  $\kappa$  krommen voor de SKF levensduurcorrectiefactor  $a_{SKF}$  van **diagram 1** op **pagina 54**, factor  $a_{23} \approx 1,8$  die op de  $a_{SKF}$  as kan worden gelezen. Rekening houdend met het feit dat deze toepassing volledig voldoet aan de vereisten, kan veilig worden aangenomen dat  $a_{SKF} = a_{23}$ , dus

$$L_{10mh} = a_{23} L_{10h} = a_{SKF} L_{10h}$$

en

$$L_{10mh} = 1,8 \times 940 = 1\ 690 \text{ bedrijfsuren}$$

- Factor  $\eta_c$  overeenkomend met deze levensduurcorrectiefactor is in overeenstemming met **tabel 6** op **pagina 68** en voor een SKF Explorer 6309 lager met  $P_u/P = 0,134$

$$\eta_c = [\eta_c (P_u/P)]_{23} / (P_u/P) = 0,04/0,134 = 0,3$$

### Voorbeeld 3

Een bestaande toepassing moet worden gecontroleerd. Een 6309-2RS1 groefkogellager met geïntegreerde afdichtingen en vetvulling werkt onder dezelfde condities als beschreven in voorbeeld 2 ( $\kappa = 2,45$ ). De verontreinigingsgraad van deze toepassing moeten worden gecontroleerd om te bepalen of het mogelijk is de kosten voor een minimale vereiste levensduur van 3 000 bedrijfsuren te verlagen.

- Gezien de vetsmering en geïntegreerde afdichtingen kan de verontreinigingsgraad worden gekenmerkt als zeer schoon en uit **tabel 4** op **pagina 62** blijkt dat  $\eta_c = 0,8$ . Met  $P_u/P = 0,134$ ,  $\eta_c (P_u/P) = 0,107$ , uit de SKF Explorer schaal in **diagram 1** op **pagina 54** en  $\kappa = 2,45$ ,  $a_{SKF} = 8$ .

$$L_{10mh} = 8 \times 940 = 7\ 520 \text{ bedrijfsuren}$$

- Voor een, indien mogelijk, goedkopere versie van dezelfde lageropstelling wordt een SKF Explorer 6309-2Z lager met beschermplaatjes gekozen. De verontreinigingsgraad kan worden gekenmerkt als normale reinheid en uit **tabel 4** op **pagina 62** blijkt dat  $\eta_c = 0,5$ . With  $P_u/P = 0,134$ ,  $\eta_c (P_u/P) = 0,067$ , uit de SKF Explorer schaal in **diagram 1** op **pagina 54** en  $\kappa = 2,45$ ,  $a_{SKF} = 3,5$ .

$$L_{10mh} = 3,5 \times 940 = 3\ 290 \text{ bedrijfsuren}$$

Conclusie: Indien mogelijk zou bij deze toepassing gebruik kunnen worden gemaakt van een goedkopere oplossing door het lager met afdichtingen te vervangen door een lager met beschermplaatjes.

Let wel: het gebruik van de levensduur op basis van correctiefactor  $a_{23}$  staat deze ontwerp-evaluatie niet toe. Bovendien zou het niet mogelijk zijn de vereiste levensduur te halen ( $\rightarrow$  voorbeeld 2, berekende levensduur met correctiefactor  $a_{23}$  zou slechts 1 690 bedrijfsuren opleveren).

### Voorbeeld 4

Het SKF Explorer 6309 groefkogellager in voorbeeld 1 maakt deel uit van een bestaande toepassing die enkele jaren geleden is berekend met correctiefactor  $a_{23}$ . Uit de praktijk zijn er klachten over lagerfalen gekomen. Het ontwerp van deze lageropstelling moet worden geëvalueerd om te bepalen welke stappen nodig zijn om de betrouwbaarheid te verhogen.

- Eerst wordt de levensduur bepaald aan de hand van factor  $a_{23}$ . Met  $\kappa = 2,45$ , waarbij de  $\kappa$  schaal wordt toegepast boven op de  $\kappa$  krommen voor de SKF levensduurcorrectiefactor  $a_{SKF}$  van **diagram 1** op **page 54**, factors  $a_{23} \approx 1,8$  die op de  $a_{SKF}$  as kan worden gelezen.

$$L_{10mh} = a_{23} \times L_{10h} = 1,8 \times 940 \\ = 1\ 690 \text{ bedrijfsuren}$$

- Factor  $\eta_c$  overeenkomend met deze levensduurcorrectiefactor is in overeenstemming met **tabel 6** op **pagina 68** en voor  $P_u/P = 0,134$

$$\eta_c = [\eta_c (P_u/P)]_{23} / (P_u/P) = 0,04/0,134 = 0,3$$

- Een microscooptelling van een oliemonster dat uit deze toepassing is genomen, toont aan dat de verontreinigingsklasse  $-/17/14$  is volgens ISO 4406:1999. De verontreiniging bestond voornamelijk uit slijtagedeeltjes die uit het systeem zelf afkomstig waren. Dit kan worden gekenmerkt als "verontreinigd", dus uit **tabel 4** op **pagina 62** en ook uit **diagram 9** op **pagina 66**,  $\eta_c = 0,2$ . Met  $P_u/P = 0,134$ ,  $\eta_c (P_u/P) = 0,0268$ , uit de SKF Explorer schaal in **diagram 1** op **pagina 54** en  $\kappa = 2,45$ ,  $a_{SKF} \approx 1,2$ .

$$L_{10mh} = 1,2 \times 940 = 1\ 130 \text{ bedrijfsuren}$$



## Bepaling van de lagergrootte

- Door het SKF Explorer 6309-2RS1 groefkogellager met geïntegreerde slepende afdichtingen te gebruiken kan de verontreinigingsgraad worden teruggebracht tot "zeer schoon". Vervolgens blijkt uit **tabel 4** op **pagina 62** dat  $\eta_c = 0,8$ . Met  $P_u/P = 0,134$ ,  $\eta_c (P_u/P) = 0,107$ , uit de SKF Explorer schaal in **diagram 1** op **pagina 54** en  $\kappa = 2,45$ ,  $a_{SKF} = 8$ .

$$L_{10mh} = 8 \times 940 = 7\,520 \text{ bedrijfsuren}$$

Conclusie: Deze toepassing heeft een verontreinigingsgraad die ernstiger is dan factor  $\eta_c = 0,3$  voor verontreinigingsgraad impliciet wanneer gebruik wordt gemaakt van factor  $a_{23}$  terwijl de werkelijke bedrijfsomstandigheden, die kenmerkend zijn voor vervuilde industriële transmissies, een factor  $\eta_c = 0,2$  nodig maken bij gebruik van factor  $a_{SKF}$ .

Dit kan een verklaring zijn voor de fouten die bij deze toepassing zijn opgetreden. Het gebruik van een SKF Explorer 6309-2RS1 groefkogellager met geïntegreerde slepende afdichtingen zal de betrouwbaarheid verhogen en dit probleem verhelpen.

## Voorbeeld 5

De bedrijfscyclus van een SKF Explorer tweerijig tonlager 24026-2CS2/VT143 dat wordt gebruikt in een zwaar transportsysteem in een staalfabriek, draait onder bedrijfsomstandigheden die in onderstaande tabel worden vermeld.

De statische belasting van deze toepassing is redelijk nauwkeurig bepaald, waarbij rekening is gehouden met de massastraagheid van de belasting tijdens bedrijf en het optreden van stootbelastingen bij een plotseling wegvallende belasting.

De dynamische en statische belastingscondities van deze toepassing moeten worden gecontroleerd, waarbij wordt uitgegaan van een vereiste bedrijfslevensduur van 60 000 uur en een minimale statische veiligheidsfactor van 1,5.

- Uit de producttabel en de inleidende tekst blijkt:

Afmetingen:

$$C = 540 \text{ kN}; C_0 = 815 \text{ kN}; P_u = 81,5 \text{ kN}$$

Afmetingen:

$$d = 130 \text{ mm}; D = 200 \text{ mm},$$

$$\text{dus } d_m = 0,5 (130 + 200) = 165 \text{ mm}$$

Vetvulling: Een lithiumzeepvet op basis van minerale olie met EP-toevoegingen en consistentieklasse NLGI 2, met toelaatbaar temperatuurbereik tussen  $-20$  en  $+110$  °C en een basisolieviscositeit bij 40 en 100 °C van respectievelijk 200 en 16 mm<sup>2</sup>/s.

### Voorbeeld 5/1

#### Bedrijfscondities

Gebruiks-interval	Equivalent dynamische belasting	Tijds-interval	Toerental	Temperatuur	Equivalent statische belasting
–	kN	–	min <sup>-1</sup>	°C	kN
1	200	0,05	50	50	500
2	125	0,40	300	65	500
3	75	0,45	400	65	500
4	50	0,10	200	60	500

• De volgende berekeningen zijn gemaakt of de waarden zijn bepaald:

1.  $v_1$  = vereiste viscositeit,  $\text{mm}^2/\text{s}$   
(→ **diagram 5** op **pagina 60**)  
– input:  $d_m$  en toerental
2.  $v$  = werkelijke bedrijfsviscositeit,  $\text{mm}^2/\text{s}$   
(→ **diagram 6** op **page 61**)  
– input: smeermiddelviscositeit bij  $40\text{ }^\circ\text{C}$  en bedrijfstemperatuur
3.  $\kappa$  = viscositeitsverhouding  
– berekend ( $v/v_1$ )
4.  $\eta_c$  = factor voor verontreinigingsgraad  
(→ **tabel 4** op **pagina 62**)  
– “zeer schoon”, lager met afdichtingen:  
 $\eta_c = 0,8$
5.  $L_{10h}$  = nominale levensduur volgens de vergelijking op **pagina 52**  
– input: C, P en n
6.  $a_{SKF}$  = uit **diagram 2** op **pagina 55**  
– input: SKF Explorer lager,  $\eta_c$ ,  $P_u$ , P en  $\kappa$
7.  $L_{10mh1,2, \dots}$  = SKF levensduur volgens de vergelijking op **pagina 53**  
– input:  $a_{SKF}$  en  $L_{10h1,2, \dots}$
8.  $L_{10mh}$  = SKF levensduur volgens de vergelijking op **pagina 70** – input:  $L_{10mh1}$ ,  $L_{10mh2}$ , ... en  $U_1$ ,  $U_2$ , ...

De SKF levensduur van 84 300 uur is langer dan de benodigde gebruiksduur; de dynamische belastingcondities van het lager zijn op deze manier gecontroleerd.

Tot slot wordt de statische veiligheidsfactor van deze toepassing bekeken.

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{815}{500} = 1,63$$

$$s_0 = 1,63 > s_{0\text{-req}}$$

Uit bovenstaande vergelijking blijkt dat de statische veiligheid van deze toepassing is gecontroleerd. Aangezien de statische belasting nauwkeurig is bepaald, vormt de relatief kleine marge tussen de berekende en de aanbevolen statische veiligheid geen reden tot zorg.

#### Voorbeeld 5/2

##### Rekenwaarden

Gebruiks-interval	Equivalente dynamische belasting	Vereiste viscositeit $v_1$	Bedrijfsviscositeit $v$	$\kappa^{(1)}$	$\eta_c$	Nominale levensduur $L_{10h}$	$a_{SKF}$	SKF levensduur $L_{10mh}$	Tijds-interval	Resulterende SKF levensduur $L_{10mh}$
–	kN	$\text{mm}^2/\text{s}$	$\text{mm}^2/\text{s}$	–	–	h	–	h	–	h
1	200	120	120	1	0,8	9 136	1,2	11 050	0,05	84 300
2	125	25	60	2,3	0,8	7 295	7,8	57 260	0,40	
3	75	20	60	3	0,8	30 030	43	1 318 000	0,45	
4	50	36	75	2	0,8	232 040	50	11 600 000	0,10	

<sup>1)</sup>Vet met EP-toevoegingen

## SKF berekeningsprogramma's

SKF bezit een van de meest uitgebreide en krachtige sets van modellerings- en simulatieprogramma's binnen de lagerindustrie. Deze lopen uiteen van gebruiksvriendelijke programma's op basis van de formules in de Hoofdcatalogus van SKF tot de meest geavanceerde berekenings- en simulatiesystemen die op parallelle computers draaien.

De filosofie van ons bedrijf is een assortiment van programma's te ontwikkelen dat voldoet aan een aantal vereisten van de klant; van redelijk eenvoudige ontwerpcontroles via tamelijk complexe onderzoeken tot aan de meest geavanceerde simulaties voor lager- en machineontwerp. Waar mogelijk zijn deze programma's beschikbaar voor gebruik in het veld op laptops, pc's of werkstations van SKF engineers of van de klant. Bovendien wordt speciale aandacht geschonken aan integriteit en uitwisselbaarheid van de verschillende systemen.

### Interactive Engineering Catalogue

De Interactive Engineering Catalogue (IEC) is een gebruiksvriendelijk programma voor selectie en berekening van lagers. Lagerzoekacties zijn beschikbaar op basis van aanduiding of afmetingen en ook eenvoudige lageropstellingen kunnen worden geëvalueerd. De gebruikte vergelijkingen komen overeen met deze in de SKF Hoofdcatalogus.

Verder kunnen hiermee CAD lagertekeningen worden vervaardigd en geïmporteerd in tekeningen van de toepassingen die zijn ontwikkeld met de belangrijkste CAD softwarepakketten.

De Interactive Engineering Catalogue bevat naast het complete assortiment van wentellagers ook catalogi over lagerconstructies, lagerhuizen, glijlagers en afdichtingen.

De SKF Interactive Engineering Catalogue wordt gepubliceerd op cd-rom of via het internet op [www.skf.com](http://www.skf.com).

### SKF bearing beacon

SKF bearing beacon is het nieuwe mainstream-lagertoepassingsprogramma waarmee SKF engineers de beste oplossing zoeken voor de lageropstellingen van klanten. Dit programma is het resultaat van diverse jaren specifiek onder-



zoek en ontwikkeling bij SKF en biedt de mogelijkheid tot modelleren in een 3D grafische omgeving van flexibele systemen waarvan klantcomponenten deel uitmaken. Het combineert de mogelijkheid voor het modelleren van generieke mechanische systemen (waarbij ook assen, tandwielen, huizen enz. worden gebruikt) met een nauwkeurig lagermodel voor een diepteanalyse van het systeemgedrag binnen een virtuele omgeving. Verder worden er lagervermoeiingsevaluaties uitgevoerd, vooral met behulp van de SKF levensduur.

### Orpheus

Met het numerieke programma Orpheus worden studie en optimalisatie van het dynamisch gedrag van geruis en trillingskritieke lagertoepassingen als elektromotoren en tandwielkasten uitgevoerd. Orpheus kan worden gebruikt voor het oplossen van de volledige niet-lineaire bewegingsvergelijkingen van een lageropstelling en de omringende componenten, inclusief tandwielen, assen en huizen.

Orpheus kan diepgaand inzicht geven in, en advies geven over, het dynamisch gedrag van een toepassing, inclusief lagers, en rekening houden met vormafwijkingen (golven) en montagefouten (scheefstelling). Hierdoor kunnen SKF experts de meest geschikte lagertypen en grootten bepalen, evenals de corresponderende montage- en voorspanningscondities voor een bepaalde toepassing.

## **Beast**

Beast is een simulatieprogramma waarmee SKF engineers de details van de dynamiek binnen een lager kunnen simuleren. Dit kan worden gezien als een virtuele testopstelling waarin detailstudies worden uitgevoerd van krachten, momenten enz. binnen een lager en onder bijna iedere belastingsconditie. Op deze manier kan het "testen" van nieuwe concepten en ontwerpen in kortere tijd worden uitgevoerd en wordt meer informatie verkregen in vergelijking met het traditionele, fysieke testen.

## **Overige programma's**

Naast de hierboven genoemde programma's heeft SKF speciale computerprogramma's ontwikkeld waarmee SKF wetenschappers de klanten kunnen voorzien van lagers met een geoptimaliseerde afwerking van het lageroppervlak, zodat de levensduur van een lager ook onder zware bedrijfscondities zo lang mogelijk zal zijn. Met deze programma's kan de dikte van de smeerfilm worden berekend in elasto-hydrodynamisch gesmeerde contacten. Daarnaast wordt de lokale filmdikte tengevolge van de vervorming van de drie-dimensionele oppervlakte-topografie binnen dergelijke contacten tot in de details berekend, evenals de daaruit voortvloeiende vermindering van de lagervermoeingslevensduur.

Bij het completeren van de noodzakelijke capaciteiten voor hun taak maken SKF engineers gebruik van commerciële pakketten voor het uitvoeren van bijvoorbeeld analyses van enkele elementen of generieke systeemdynamiek. Deze programma's worden geïntegreerd met de eigen systemen, zodat een snellere en robuustere connectie mogelijk wordt met klantgegevens en -modellen.

## SKF Engineering Consultancy Services

De basisinformatie voor het berekenen en ontwerpen van een lageropstelling is te vinden in deze catalogus. Maar bij sommige toepassingen is het wenselijk om de verwachte levensduur van het lager zo nauwkeurig mogelijk te voorspellen, ofwel omdat er onvoldoende ervaring is met soortgelijke lageropstellingen, ofwel omdat economische en/of bedrijfsveilige overwegingen van groot belang zijn. In dergelijke gevallen verdient het aanbeveling de "SKF Engineering Consultancy Services" te raadplegen. De experts van deze service leveren berekeningen en simulaties met high-tech computerprogramma's en kunnen bogen op een bijna honderdjarige ervaring op het gebied van roterende machineonderdelen.

Zij steunen u, vanuit de volledige technische expertise van SKF. De SKF toepassingspecialisten kunnen

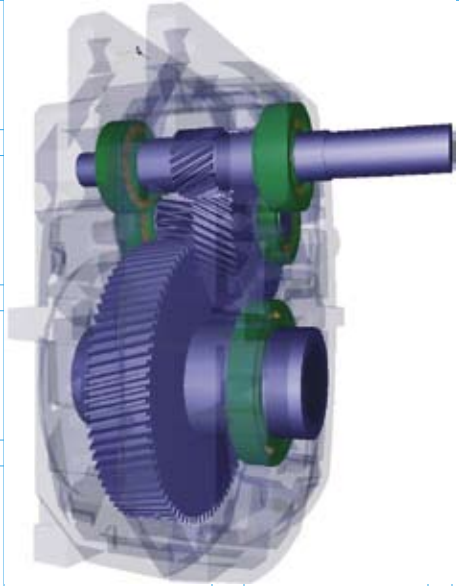
- de technische problemen analyseren
- de juiste systeemoplossing voorstellen
- de juiste smering en een geoptimaliseerde onderhoudspraktijk selecteren.

SKF Engineering Consultancy Services biedt een nieuwe benadering van services met betrekking tot machines en installaties voor producenten en eindgebruikers. Een aantal van deze servicevoordelen zijn:

- Snellere ontwikkelingsprocessen en kortere tijd voor het op de markt brengen.
- Vermindering van implementatiekosten door virtueel testen voor aanvang productie.
- Verbeterde lageropstellingen door minder geruis en lagere trillingsniveaus.
- Hogere belastingsgraad door upgraden,
- Langere levensduur door verbeterde smering of afdichting.

### Geavanceerde computerprogramma's

Binnen SKF Engineering Consultancy Services wordt gewerkt met bijzonder geavanceerde computerprogramma's die kunnen worden gebruikt voor



- analytische modellering van complete lageropstellingen, bestaande uit as, huis, tandwiel, koppelingen enz.
- statische analyse, d.w.z. bepaling van elastische vervormingen en druk in onderdelen van mechanische systemen
- dynamische analyse, d.w.z. de bepaling van het trillingsgedrag onder bedrijfscondities ("virtueel testen")
- visuele presentatie en animaties van structurele en componentdoorbuiging
- optimaliseren van systeemkosten, bedrijfsduur, trillings- en geruisniveau.

De High-Tech computerprogramma's die binnen de SKF Engineering Consultancy Services als norm voor berekeningen en simulatie worden gebruikt, worden kort beschreven in het gedeelte "SKF berekeningsprogramma's".

Voor verdere informatie over de activiteiten van de SKF Engineering Consultancy Services kan contact worden opgenomen met de dichtstbijzijnde SKF vestiging.

## SKF levensduurtesten

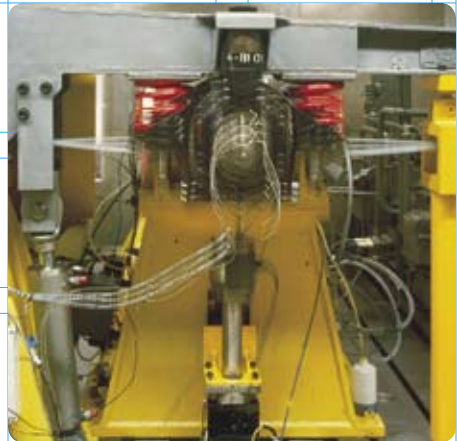
SKF duurtesten worden uitgevoerd in het SKF Engineering & Research Centre in Nederland. Deze testfaciliteiten zijn vanwege de geavanceerde technologie en het aantal proefopstellingen uniek binnen de lagerindustrie. Verder wordt hier ondersteunend werk verricht voor de researchcentra van de grotere SKF productiebedrijven.

SKF voert levensduurtesten uit om haar producten continu te kunnen verbeteren. Het is van groot belang de fundamentele natuurkundige wetten te doorgronden en te formuleren met betrekking tot lagergedrag als functie van interne en externe variabelen. Dergelijke variabelen kunnen bijvoorbeeld materiaaleigenschappen zijn, de interne geometrie en conformiteit van een lager, kooiontwerp, scheefstelling, temperatuur en overige bedrijfsomstandigheden. Een groot aantal invloedrijke factoren is echter niet van statische, maar van dynamische aard. Voorbeelden hiervan zijn de topografie van ten opzichte van elkaar werkende contactvlakken, de materiaalstructuur, de interne geometrie en de eigenschappen van het smeermiddel, die tijdens het gebruik van het lager continu veranderen.

SKF voert ook levensduurtesten uit om

- de toezeggingen in de productcatalogi te kunnen waarborgen
- de kwaliteit van de productie van SKF standaard lagers te controleren
- te onderzoeken wat de invloed van smeermiddelen en smeercondities is op de levensduur van het lager
- de ontwikkeling van theorieën voor de materiaalvermoeiing in rolcontacten te ondersteunen
- onze producten te vergelijken met concurrerende producten.

De krachtige en streng gecontroleerde procedure voor het testen van de levensduur in combinatie met onderzoek van testresultaten met behulp van moderne, zeer geavanceerde apparatuur, maakt het mogelijk deze factoren en de interacties op systematische wijze te onderzoeken.



SKF Explorer lagers zijn een voorbeeld van de implementatie van de geoptimaliseerde invloedsfactoren op basis van analytische simulatiemodellen en experimentele controle van zowel losse onderdelen als complete lagers.