

Nogmaals: Mystery Rekenliniaal Sun-Hemmi met n- en L-schaal Gerard van Gelswijk



In de MIR56 beschreef Otto van Poelje een Sun-Hemmi rekenliniaal met - naast de voor een eenvoudige liniaal gebruikelijke schalen - twee hem onbekende schalen.

Deze schalen worden met n respectievelijk L aangeduid. Na bestudering van deze liniaal en een liniaal uit de catalogus van Herman van Herwijnen komt hij terecht tot de conclusie dat deze liniaal bedoeld is voor de berekening van wentellagers.

Soorten wentellagers

Wentellagers is een verzamelnaam voor as-ondersteuning met wentelende elementen tussen twee ringen. Deze elementen kunnen zijn kogels, rollen en (cilinder-, kegel- of tonvormige) naalden, vandaar de benamingen kogellagers, rollagers, tonlagers, naaldlagers enz. In deze lagers treden hoge contactdrukken op en daarom moeten er hoge eisen gesteld worden aan materiaalkwaliteit, oppervlaktehardheid en nauwkeurigheid. Deze eisen hebben er onder meer toe geleid dat lagerfabrikanten hun eigen staal en slijpmachines gingen fabriceren.

Wentellagers worden onderverdeeld in twee hoofdgroepen: axiale en radiale lagers, geschikt voor respectievelijk hoofdzakelijk axiale en radiale belastingen. Een scherpe grens valt echter niet te trekken, omdat veel lagers zowel radiale als axiale belastingen kunnen opnemen.

Equivalente lagerbelasting
 dynamisch statisch
 $P = XF_r + YF_a$ $P_0 = 0,6F_r + 0,5F_a$
 Indien $P_0 < F_r$, dan met $P_0 = F_r$
 rekenen

Hoofd-afmetingen	Draag- getallen		Hoogst toelaatbaar toerental (uitvoering ¹⁾)		Gew. kg	Lager- nr.	Afmetingen			Inbouwmaten			Berekeningsfactoren								
	d	D	B	C			dyn. C ₀	stat. C ₀	norm. Z _{2Z}	norm. Z	RS, 2RS	d _a	D _a	r _a	dynamisch	F _a /F _r ≤ e		F _a /F _r > e			
mm	mm	mm	mm	mm	kgf	omw./min.	kg	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	e	X	Y	X	Y		
10	26	8	290	156	30000	36000	19000	0,019	6000	14,2	20	0,5	12	24	0,3	0,025	0,22	1	0	0,56	2
30	9	400	228	24000	30000	17000	0,032	6200	17	23,2	1	14	26	0,6	0,04	0,24	1	0	0,56	1,8	
35	11	630	380	20000	26000	15000	0,053	6300	17,7	26,8	1	14	31	0,6	0,07	0,27	1	0	0,56	1,6	
12	28	8	315	176	26000	32000	17000	0,022	6001	16,8	22,6	0,5	14	26	0,3	0,13	0,31	1	0	0,56	1,4
32	10	540	315	22000	28000	15000	0,037	6201	18,2	25,9	1	16	28	0,6	0,25	0,37	1	0	0,56	1,2	
37	12	765	475	19000	24000	14000	0,060	6301	19,5	29,7	1,5	17	32	1	0,5	0,44	1	0	0,56	1	
15	32	9	440	255	22000	28000	14000	0,030	6002	20,6	26,7	0,5	17	30	0,3						
35	11	610	360	19000	24000	13000	0,045	6202	21,5	29,2	1	19	31	0,6							
42	13	900	550	17000	20000	12000	0,082	6302	23,7	33,9	1,5	20	37	1							
17	35	10	475	285	19000	24000	13000	0,039	6003	23,1	29,2	0,5	19	33	0,3						
40	12	750	455	17000	20000	12000	0,065	6203	24,2	32,9	1	21	36	0,6							
47	14	1060	670	16000	19000	11000	0,12	6303	26,5	37,6	1,5	22	42	1							
20	42	12	735	455	17000	20000	11000	0,069	6004	27,2	35,1	1	24	38	0,6						
47	14	1000	630	15000	18000	10000	0,11	6204	28,5	38,7	1,5	25	42	1							
52	15	1250	800	13000	16000	9500	0,14	6304	30,3	42,1	2	26,5	45,5	1							
25	47	12	880	570	15000	18000	9500	0,080	6005	32	40,3	1	29	43	0,6						
52	15	1100	710	12000	15000	8500	0,13	6205	34	44,2	1,5	30	47	1							
62	17	1760	1160	11000	14000	7500	0,23	6305	36,6	50,9	2	31,5	55,5	1							
30	55	13	1040	695	12000	15000	8000	0,12	6006	38,2	47,1	1,5	35	50	1						
62	16	1530	1020	10000	13000	7500	0,20	6206	40,3	52,1	1,5	35	57	1							
72	19	2200	1500	9000	11000	6300	0,35	6306	44,7	59,9	2	36,5	65,5	1							
35	62	14	1250	865	10000	13000	7000	0,16	6007	43,7	53,6	1,5	40	57	1						
72	17	2000	1400	9000	11000	6300	0,29	6207	46,9	60,6	2	41,5	65,5	1							
80	21	2600	1830	8500	10000	6000	0,46	6307	49,5	66,1	2,5	43	72	1,5							
40	68	15	1320	950	9500	12000	6300	0,19	6008	49,2	59,1	1,5	45	63	1						
80	18	2400	1700	8500	10000	5600	0,37	6208	52,6	67,9	2	46,5	73,5	1							
90	23	3200	2280	7500	9000	5000	0,63	6308	56,1	74,7	2,5	48	82	1,5							

¹⁾ zie pag. 36 speciale uitvoeringen

figuur 1

Berekening van wentellagers

Uiteraard hoeft de constructeur van een machine niet zelf wentellagers te construeren. Tegenwoordig zijn er wereldwijd vier grote concerns die wentellagers in alle soorten en maten in standaard-afmetingen fabriceren, voor kogellagers bijvoorbeeld met een as-diameter van 2,5 mm tot 105 mm. Daarnaast worden er in samenwerking met fabrikanten ook speciale lagers ontwikkeld; bij voorkeur maakt men dan gebruik van standaard kogels, rollen en kooien.

De constructeur moet een lager kiezen dat optimaal voldoet aan de ontwerpeisen. Deze ontwerpeisen hebben meestal betrekking op de levensduur, maar ook rondloopnauwkeurigheid, smeermogelijkheden en bedrijfstemperatuur kunnen een rol spelen.

De berekeningswijze van wentellagers is gestandaardiseerd, in Europa door ISO en in de Verenigde Staten door de Anti-Friction Bearing Manufacturers Association, nadat in eerste instantie de fabrikanten van lagers eigen berekeningsmethodes ontwikkeld hadden, welke ze met de voor de berekeningen relevante informatie in hun catalogi publiceerden (figuur 1). Het belangrijkste criterium is de levensduur, de andere eisen worden meestal met correctiefactoren in de berekening meegenomen.

Bij de berekening van wentellagers maakt men naast het onderscheid tussen radiale en axiale belasting ook onderscheid tussen statische en dynamische belasting. Daarnaast is het zo, dat sommige typen wentellagers een combinatie van axiale en radiale belasting kunnen opnemen.

De berekening van wentellagers op een statische belasting (als een as slechts nu en dan roteert – bijvoorbeeld de hoofd draaipunten van bruggen - of een schommelende beweging maakt) is gebaseerd op de blijvende vormveranderingen die in het materiaal optreden als de kogels of de rollen tegen de loopvlakken worden gedrukt. De tabellen in de catalogi vermelden voor die gevallen het statisch draaggetal C_0 van de verschillende lagers, dit is dus de toelaatbare belasting bij normaal (niet stotend) bedrijf.

In de berekeningsmethoden voor dynamisch belaste lagers moet men rekening houden met vermoeiing. De levensduur wordt gedefinieerd als het aantal omwentelingen L (of het aantal bedrijfsuren L_h bij constant toerental n) van een wentellager vóór de eerste verschijnselen van vermoeiing op een van de ringen of wentellichamen optreden.

Werktuigbouwkunde is echter geen exacte wetenschap en uit proeven en praktische ervaring is gebleken dat identieke lagers (ook die van dezelfde fabrikant), die onder gelijke omstandigheden gebruikt worden, niettemin een grote spreiding vertonen in de levensduur.

Daarom is het begrip "nominale levensduur" ingevoerd. Dit is het aantal omwentelingen dat tenminste 90% van dezelfde lagers in het gebruik kan maken voordat er vermoeiingsverschijnselen aan het ene of het andere onderdeel optreden.

In het kort kwam de berekening van de levensduur van bijvoorbeeld een groefkogellager (dit is een lager dat geschikt is voor het opnemen van radiale en axiale belastingen) in de zestiger jaren van de vorige eeuw er op neer dat men:

- 1) Uitgaande van een gekozen lager de levensduur berekende.
- 2) Uitgaande van de gewenste levensduur het vereiste draaggetal berekende.

In het geval van een combinatie van axiale en radiale belasting werd met behulp van in tabellen gegeven waarden een equivalente lagerbelasting P bepaald (figuur 1).

In geval 1) werd dan de levensduurfactor C/P berekend, waarna men in een tabel onder het betreffende toerental de verkregen waarde opzocht. Naar links gaande vond men dan in de eerste kolom de berekende levensduur van het lager (figuur 2). De lagerkeuze werd soms door het gekozen ontwerp bepaald, bijvoorbeeld een gering belaste holle as.

In geval 2) zocht men in de eerste kolom van de tabellen de gewenste levensduur. Naar rechts gaande vindt men dan onder het betreffende toerental de levensduurfactor C/P . Door deze te vermenigvuldigen met P vindt men het vereiste draaggetal C (figuur 2).

In deze tabellen vindt men ook een verklaring voor de waarden bij de L en n schaal, maar hoe deze gebruikt werden bij de beschreven liniaal is mij (nog) niet duidelijk; het door Otto gesuggereerde verband met de (niet aangeduide) K -schaal is volgens mij niet aanwezig. Vooral nog is deze liniaal voor mij een *gewone* rekenliniaal met twee *ongewone* schalen L en n , en het verband tussen deze schalen volgt naar mijn mening uit de tabellen in figuur 2.

De liniaal kon gebruikt worden voor het berekenen van wentellagers volgens de in het midden van de vorige eeuw gebruikte methoden.

Tabel II**Kogellagers**Levensduurfactor $\frac{C}{P}$ voor verschillende levensduren in bedrijfsuren bij verschillende toerentallen.

Levensduur in uren L _h	Omwentelingen per minuut													
	10	16	25	40	63	100	125	160	200	250	320	400	500	630
100				1,06	1,24	1,45	1,56	1,68	1,06	1,15	1,24	1,34	1,45	1,56
500				1,34	1,56	1,82	1,96	2,12	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67
1000			1,15	1,34	1,56	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36
1250		1,06	1,24	1,45	1,68	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63
1600		1,15	1,34	1,56	1,82	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91
2000	1,06	1,24	1,45	1,68	1,96	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23
2500	1,15	1,34	1,56	1,82	2,12	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56
3200	1,24	1,45	1,68	1,96	2,29	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93
4000	1,34	1,56	1,82	2,12	2,47	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32
5000	1,45	1,68	1,96	2,29	2,67	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75
6300	1,56	1,82	2,12	2,47	2,88	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20
8000	1,68	1,96	2,29	2,67	3,11	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70
10000	1,82	2,12	2,47	2,88	3,36	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23
12500	1,96	2,29	2,67	3,11	3,63	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81
16000	2,12	2,47	2,88	3,36	3,91	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43
20000	2,29	2,67	3,11	3,63	4,23	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11
25000	2,47	2,88	3,36	3,91	4,56	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83
32000	2,67	3,11	3,63	4,23	4,93	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6
40000	2,88	3,36	3,91	4,56	5,32	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5
50000	3,11	3,63	4,23	4,93	5,75	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4
63000	3,36	3,91	4,56	5,32	6,20	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4
80000	3,63	4,23	4,93	5,75	6,70	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5
100000	3,91	4,56	5,32	6,20	7,23	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6
200000	4,93	5,75	6,70	7,81	9,11	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6

Levensduur in uren L _h	Omwentelingen per minuut													
	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000
100	1,68	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56
500	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81
1000	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83
1250	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6
1600	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5
2000	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4
2500	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4
3200	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5
4000	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6
5000	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8
6300	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2
8000	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6
10000	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2
12500	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9
16000	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7
20000	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7
25000	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8
32000	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1
40000	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1	
50000	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1		
63000	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1			
80000	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1				
100000	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1					
200000	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1								

Tot besluit

De ontwikkeling van wentellagers staat natuurlijk niet stil en dit is onder meer merkbaar in de verhoging van de draaggetallen. In 1970 was het dynamisch draaggetal voor een bepaald type kogellager 9650 kgf en in 1990 124000 N, ofwel ca. 25% hoger.

Ook de berekeningsmethoden werden verfijnd en men kwam tot een algemene levensduurformule:

$$L = (C/F)^p.$$

Daarin is C het dynamisch draaggetal van het lager, dat wil zeggen het draagvermogen voor een levensduur van 1 miljoen omwentelingen. De exponent p is 3 voor kogellagers en 10/3 voor rollagers. Ook worden er meer correctiefactoren toegepast en dit leidt tot zeer complexe formules (figuur 3).

Tragzahlberechnung

Für die Berechnung der dynamischen Tragzahl eines Nadel- oder Rollenlagers liegt die Tragzahlformel nach der ISO-Empfehlung R 281 (DIN 622 Normentwurf) zugrunde:

$$C = f_c \cdot D_w^{29/27} \cdot (i \cdot l_{\text{eff}})^{7/9} \cdot z^{3/4} \text{ kp}$$

In dieser Formel bedeuten:

- D_w mm Rollkörperdurchmesser
- l_{eff} mm effektiv tragende Rollkörperlänge
- i - Anzahl der Rollkörperreihen
- z - Anzahl der Rollkörper einer Reihe

Der Wert f_c ist keine Konstante, sondern errechnet sich aus den nachfolgend aufgeführten Formeln:

$$f_c = 21,2 \cdot \hat{\sigma} \cdot \frac{(1 - \gamma)^{29/27}}{(1 + \gamma)^{1/4}} \cdot \left[1 + 1,193 \cdot \left(\frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \right)^{143/24} \right]^{2/9} \cdot \gamma^{2/9} \text{ für Radiallager}$$

$$f_c = 41 \cdot \hat{\sigma} \cdot \gamma^{2/9} \text{ für Axiallager}$$

In diesen Formeln bedeuten:

$$\gamma = \frac{D_w}{d_m}$$

d_m mm Rollkörpermittenkreis-Durchmesser

$\hat{\sigma}$ - eine von der Lagerbauart abhängige Konstante

figuur 3

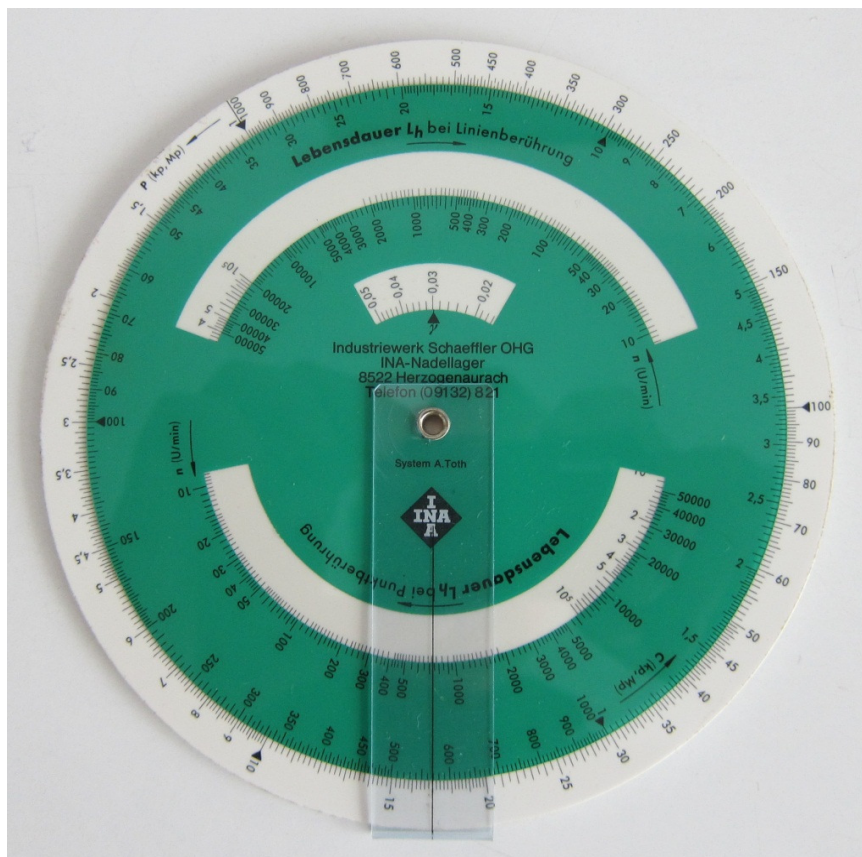
Literatuur

- Leerboek wentellagers 4^e druk 1971 SKF Veenendaal
- Leerboek wentellagers 10^e druk 1990 SKF Veenendaal
- Machineonderdelen 21^e druk ir. Jac. Stok en ir. C. Kros 1981 Dordrecht
- Machinery Handbook Twenty-first Edition 1980 New York
- Handleiding INA-Wälzlagerrechner IWA 03139 *

*Afbeeldingen van deze rekenschijf zijn hierna als figuren 4 en 5 in dit artikel opgenomen; de "Tragzahlberechnung" van figuur 2 is afkomstig uit de summierende gebruiksaanwijzing bij deze schijf.



figuur 4



figuur 5