

ENERGIETECHNIEK

STOOMTURBINES



Voorwoord

Voor u ligt het boek Energietechniek Stoomturbines, de nadruk is gelegd op de stoomturbine.

Dit boek behandelt de elementaire stoomturbinetheorie, zonder de lezer teveel te vermoeien met de snelheidsdriehoeken.

Veel aandacht is besteed aan de praktijk. Tevens is een apart hoofdstuk opgenomen betreffende rendementverbetering.

Was het vroeger zo dat bij de AVI's de prioriteit lag bij het verstoken van afval, thans zijn wij zover dat het tij begint te keren en men nu ook zoveel mogelijk energie aan het elektriciteitsnet tracht te leveren. Bij deze versie is meer aandacht besteed aan de verschillende typen turbines en op verzoek van de gebruikers is een hoofdstuk over smeerolie opgenomen.

Dit boek is ook bruikbaar voor vervolgcursussen en voor diegenen die goed op de hoogte zijn van deze materie. Voor hen kan het als naslagwerk dienen. In de tweede druk zijn enkele kleine wijzigingen doorgevoerd. In de derde druk is op verzoek van gebruikers een stuk over levensduurberekeningen opgenomen.

Bij de vierde druk is een uitbreiding betreffende de diverse verliezen en de berekening ervan opgenomen. Verder is een inleidend hoofdstuk aan de gasturbine besteed, dit omdat de stoomturbine vaak in combinatie met de gasturbine wordt ingezet.

De schrijver ontvangt gaarne opbouwende kritiek die de bruikbaarheid van dit boek kan vergroten.

Ing. A.J. de Koster

Hoofdplaat, september 2013

Energietechniek
Stoomturbines
Adviesbureau de Koster v.o.f.
Dorpsstraat 5
4513 AL Hoofdplaat
Tel. 0117-348223

ISBN 978-90-78142-34-8

info@martechopleidingen.nl
www.martechopleidingen.nl

Eerste druk juni 2005
Eerste herziene druk mei 2009
Tweede druk juli 2010
Derde druk april 2011
Vierde druk september 2013

© Adviesbureau de Koster, Dorpsstraat 5, 4513 AL Hoofdplaat. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Dit is tevens van toepassing op gehele of gedeeltelijke bewerking van deze uitgave.

Hoewel dit boek met veel zorg is samengesteld, aanvaarden wij geen aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en / of onvolkomenheden in dit boek.

Inhoud

1.0	Inleiding	7
1.1	De Black Box	11
1.2	Black Box toepassing op de straalbuis	14
1.3	Black Box toepassing op een turbine	16
1.4	Black Box toepassing op een afsluiter	19
1.5	De continuïteit formule	21
2.0	Soorten turbines	22
2.1	Gelijkdruk turbines	22
2.2	Overdrukturbine	23
2.3	Het arbeidsproces in de turbine	23
2.4	Algemene gegevens van de turbines	24
2.5	Opbouw van de turbine	28
2.5.1	Het huis	28
2.5.2	Bevestiging straalbuizen	29
2.5.3	Straalbuizen en berekeningen	31
2.5.4	Soorten straalbuizen	36
2.5.5	Bevestiging schoepen	38
2.5.6	Lagering	41
2.5.7	Labyrinten	43
2.6	De Laval turbine	44
2.7	De Zoelly turbine	46
2.7.1	Rekenmethodes voor de Zoelly turbine	49
2.8	De Curtis Turbine	51
2.8.1	Voordelen en nadelen van de Curtis Turbine	52
2.8.2	Rekenmethodes voor de Curtis turbine	55
2.9	De Parsons turbine	56
2.9.1	Kenmerken van de Parsons turbine	60
2.9.2	Rekenmethodes Parsons turbine	61
2.9.3	De evenwichtzuiger	62
2.9.4	Nadere theoretische beschouwing van de diameter van de evenwichtzuiger	64
2.9.5	Rekenvoorbeeld evenwichtzuiger	65
2.10	De Rateau turbine	67
2.11	Overzicht gegevens	70
2.12	Verliezen	70
2.12.1	Het straalbuisverlies	70
2.12.2	Het loopschoepverlies	71
2.12.3	Het uittrede verlies	72
2.12.4	Restverliezen	73
2.13	Voorbeeld berekening verliezen	74
2.14	Sperstoom	78
3.0	Het voorgeschakelde wiel	87
3.1	Het aantal trappen dat vervangen wordt, Curtis-Parsons	87
3.2	Het aantal trappen dat vervangen wordt, Curtis-Zoelly	90
3.3	Het aantal trappen dat vervangen wordt, Zoelly-Parsons	92
4.0	Smeerolie	93
4.1	Inleiding	93
4.2	Doel smering	93
4.3	Eigenschappen smeerolie	94
4.3.1	De viscositeit volgens SAE	94
4.3.2	Stolpunt	96

4.3.3	Oxidatiebestendigheid	96
4.3.4	Base Number (Neutralisatiegetal)	96
4.3.5	Viscositeit Index	96
4.3.6	Vlampunt	97
4.3.7	Dichtheid	97
4.4	Toevoegingen aan de olie (dopes)	97
4.4.1	Detergents, dispergerende dope	97
4.4.2	Biocides	98
4.4.3	Extreme pressure dopes	98
4.4.4	Hechtende dopes	98
4.4.5	VI improver	98
4.4.6	Anti schuim dopes	98
4.5	Soorten smering	98
4.5.1	Hydrodynamische smering	99
4.5.2	Grenssmering	99
4.5.3	Hydrostatische smering	100
4.5.4	Elasto hydrodynamische smering	100
4.6	Controle smeerolie	101
4.7	Smeerolie eigenschappen voor stoomturbines	102
4.8	Smering grote turbines	104
4.9	Regeloliesysteem	107
5.0	De Condensor	109
5.1	Inleiding	109
5.2	Factoren die van invloed zijn op het vacuüm	113
5.2.1	De druk in de luchtkoeler	114
5.3	De koelwatertemperatuur	115
5.4	Vervuiling van de condensor	118
5.5	Werkelijke berekening van de water gekoelde condensor	119
5.6	De luchtgekoelde condensor	124
5.7	De ejecteur	125
6.0	De ontgasser	129
6.1	De werking van de ontgasser, algemeen	130
6.2	De Stork voedingwaterontgasser	134
6.3	Gegevens van een willekeurige ontgasser	136
6.4	Wettelijke bepalingen van toepassing op de ontgasser	137
6.5	Theoretische beschouwing van de ontgasser	139
6.6	Rekenvoorbeeld Ontgasser	141
7.0	Rendementverbetering en aftapstoom	143
7.1	Aftapstoom	147
7.2	Het nut van aftap voorwarming	150
7.2.1	Systeem zonder aftap voorwarming	150
7.2.2	Systeem met aftap voorwarming	152
7.2.3	De aftapplaats	155
7.3	Het aantal voorwarmers	158
7.4	Voorbeeld met twee aftap voorwarmers	159
8.0	Theoretische beschouwing vermogensregeling	163
8.1	De vermogensvergelijking	163
8.2	De kegelwet van Stodola	165
8.3	Wijziging van de stoomhoeveelheid en gevolgen	167
8.4	Wijziging van de condensordruk	174
8.5	Overbelastingsregeling	178

9.0	Stoomkwaliteit	184
10.0	Rekenmethoden	188
10.1	Rendement en Vermogen van de Turbine	188
10.2	Thermisch en totaal rendement van de installatie	190
11	Levensduur van stoomturbines, algemeen	192
11.1	Richtlijnen voor stoomturbine onderhoud ABB en VGB	192
11.1.1	Aard en omvang van de inspecties en revisies	192
11.1.2	Het aantal draaiuren dat aan een start wordt toegekend	194
11.2	Rekenvoorbeeld turbine	194
11.3	Bepaling onderhoudsinterval Generator	195
11.4	Rekenvoorbeeld generator	196
11.5	ABB richtlijn	197
12.0	De Generator	198
12.1	De wisselstroomgenerator	198
12.2	De draaistroomgenerator	199
12.2.1	De werking	200
12.3	Het vermogen	202
12.3.1	Soorten vermogen	203
12.4	Parallel schakelen	204
13.0	De Gasturbine	205
13.1	Inleiding	205
13.2	Het proces in het p-V diagram	210
13.3	Layout installaties	215
13.3.1	Single Cycle	215
13.3.2	Combined Cycle	216
13.3.3	Cogeneration	218
13.3.4	Combined Cycle en Cogeneration	219
13.4	Theoretische beschouwing	220
13.5	Het theoretisch rendement	221
14.0	Opgaven	224
15.0	Gebruikte formules	234
15.1	Grootheden en eenheden	237

2.5.4 Soorten straalbuizen

We onderscheiden in principe vier soorten straalbuizen.

- Rechte straalbuizen
- Convergerende straalbuizen
- Divergerende straalbuizen
- Convergerend - divergerende straalbuizen

De rechte straalbuis:

Op afbeelding 10 is schematisch een rechte straalbuis weergegeven.



Afbeelding 10. Schematische weergave van een rechte straalbuis.

Waarin:

- \dot{m} = Doorstromende hoeveelheid stoom in kg/sec.
- v_b = Soortelijk volume van de stoom voor de straalbuis in m^3/kg .
- v_e = Soortelijk volume van de stoom na de straalbuis in m^3/kg .
- c_a = Snelheid van de stoom voor de straalbuis in m/sec.
- c_0 = Snelheid van de stoom na de straalbuis in m/sec.
- p_b = Druk van de stoom voor de straalbuis in bara.
- p_e = Druk van de stoom na de straalbuis in bara.

Bij toepassing van verzadigde stoom zal voor deze buis de kritische drukverhouding van 0,57 bedragen, terwijl dit voor oververhitte stoom 0,54 bedraagt.

Als de verhouding, bij verzadigde stoom, tussen de einddruk en de begindruk kleiner of gelijk wordt aan 0,57 bedraagt de maximale snelheid door de buis 450 m/s.

Bij oververhitte stoom ligt deze verhouding op 0,54.

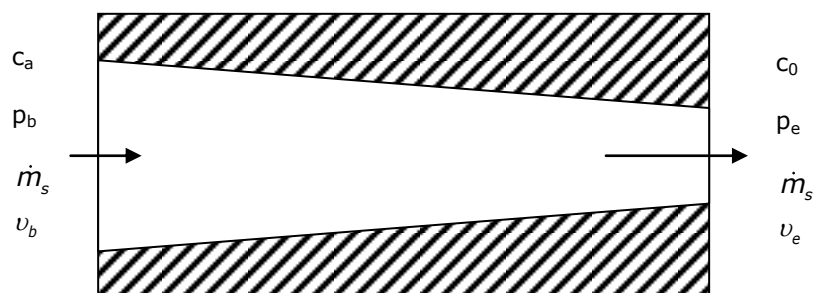
Stel dat, bij toepassing van oververhitte stoom, de druk voor de straalbuis 20 bara is en de druk na de straalbuis 10,8 bara, dan bedraagt de drukverhouding:

$$\frac{p_e}{p_b} = \frac{10,8}{20} = 0,54$$

Bij deze drukverhouding bedraagt de kritische snelheid en daarmee de maximaal haalbare snelheid circa 450 m/s. Als de druk na de straalbuis nog lager wordt, zal de snelheid niet toenemen, de kritische drukverhouding is immers bereikt. De maximaal haalbare snelheid is bij deze straalbuis dan ook gelijk aan de kritische snelheid. Bij drukverhoudingen die kleiner of gelijk zijn aan de genoemde getallen zal zich in de buis een "keel" instellen, dit is dan de zogenaamde stuw die de snelheid beperkt tot 450 m/s.

De convergerende straalbuis:

Op afbeelding 11 is een schematische weergave van een convergerende straalbuis weergegeven.

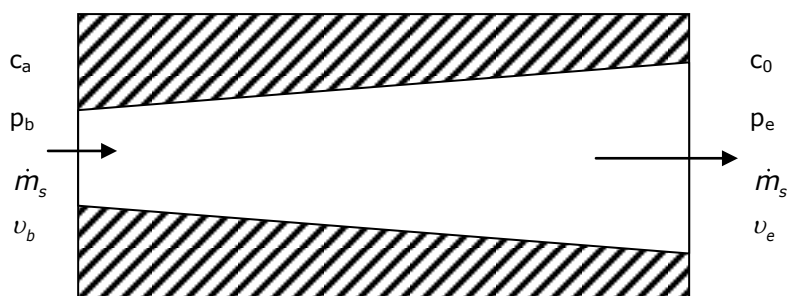


Afbeelding 11. De convergerende straalbuis.

Indien we ervoor willen zorgen dat de uitstroomsnelheid altijd onderkritisch blijft, dan kunnen we volstaan met een convergerende straalbuis. De constructie van dergelijke straalbuizen zijn zeer eenvoudig, dit kunnen gebogen schotten zijn. Deze straalbuizen worden dan ook wel schottenstraalbuizen genoemd. Bij convergerende straalbuizen is de einddruk altijd gelijk of hoger dan de kritische drukverhouding. De maximaal haalbare snelheid is bij deze straalbuis dan ook gelijk aan de kritische snelheid.

De divergerende straalbuis:

Op afbeelding 12 is een schematische weergave van een divergerende straalbuis weergegeven.

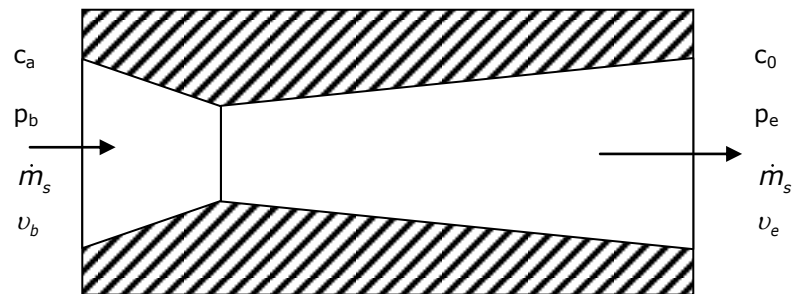


Afbeelding 12. De divergerende straalbuis.

Als de stoom een grotere snelheid moet worden gegeven dan de kritische snelheid dan is gebleken dat rechte en convergerende buizen daartoe niet geschikt zijn. Om hogere snelheden toe te passen dan de kritische snelheid wordt gebruik gemaakt van divergerende straalbuizen. In bepaalde gevallen waarin een grotere drukval en daarmee dus een grote warmteval gerealiseerd moet worden, worden divergerende straalbuizen toegepast. De maximaal haalbare snelheid is bij deze straalbuis groter of gelijk aan de kritische snelheid.

De convergerend divergerende straalbuis:

Op afbeelding 13 is een schematische weergave van een convergerend divergerende straalbuis weergegeven.



Afbeelding 13. De convergerend divergerende straalbuis.

Bij de diverse typen straalbuizen blijkt dat, uitgaande van oververhitte stoom, bij een expansie tot 0,54 maal de begindruk de vorm van de convergerende straalbuis de beste is. Als de einddruk lager is dan 0,54 maal de begindruk blijkt een divergerende buis juist geschikter te zijn. In de praktijk wordt dan vaak voor convergerend divergerende straalbuizen gekozen, dit in verband met het voorkomen van wervelingen als gevolg van hoge stoomsnelheden. De maximaal haalbare snelheid is bij deze straalbuis groter of gelijk aan de kritische snelheid.

2.5.5 Bevestiging schoepen

Loopschoepen behoren tot de hoogst belaste onderdelen van de turbine. De volgende krachten werken op de schoepen:

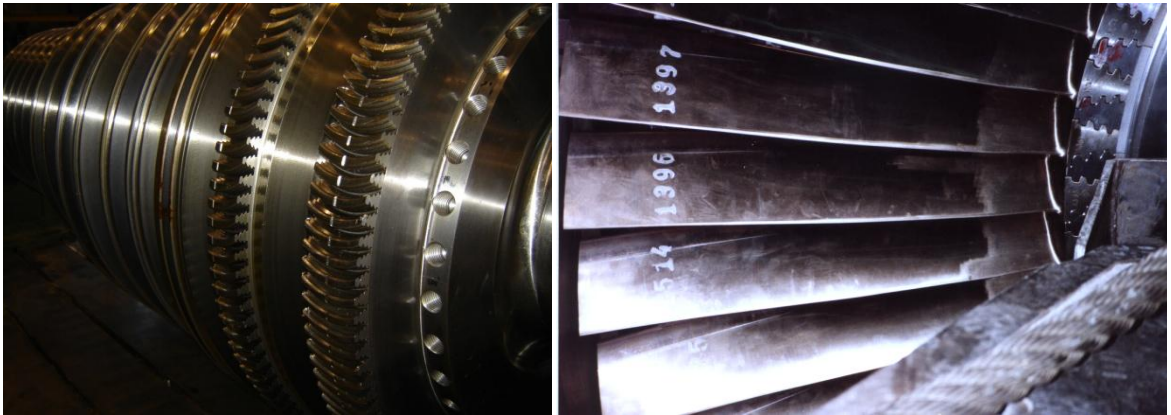
- omtrekskracht of tangentialkracht
- de axiale kracht
- de centrifugale kracht

Doordat de loopschoepen telkens leidschoepen passeren, is de aanstroming van stoom verschillend. De krachten die door de stoom op de loopschoepen worden uitgeoefend variëren hierdoor. Afhankelijk van het toerental hebben deze krachten een bepaalde frequentie. Komt nu deze frequentie overeen met het eigen trillingsgetal van de schoep, dan is slechts een zeer kleine kracht in staat de schoep in trilling te brengen en zodanig, dat deze kan breken. Om deze reden worden vooral lange schoepen voorzien van dekbanden of steundraden om deze een hoger eigen trillinggetal te geven.

Dekbanden op loopschoepen vergroten de massa van de schoep waardoor de centrifugale kracht toeneemt!

Op afbeelding 14 zijn twee foto's weergegeven met een loopschoepbevestiging volgens het dennenboom principe.

Frequentie

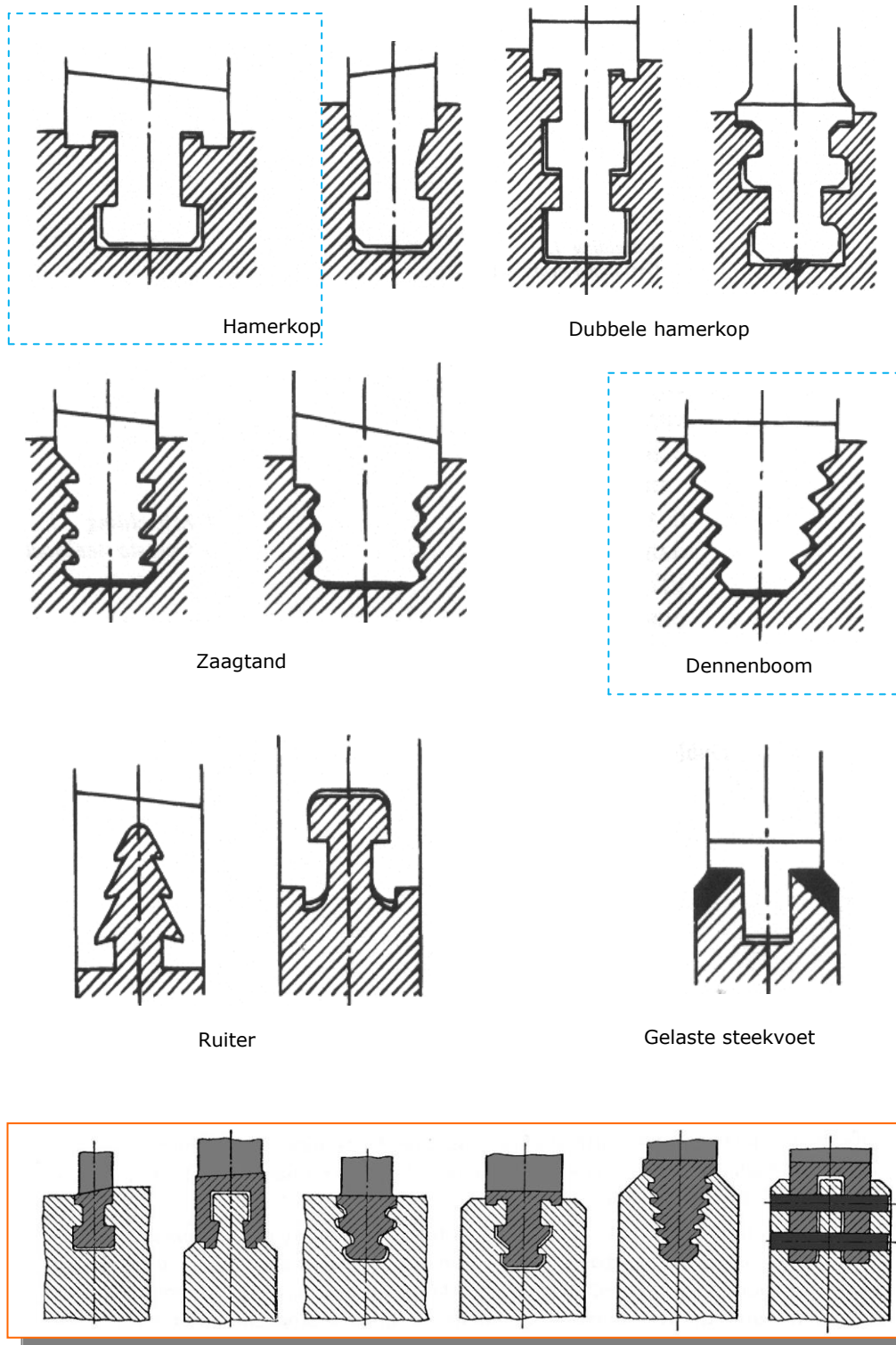


Afbeelding 14. Loopschoepbevestiging volgens het dennenboom principe.

Op afbeelding 14a zijn losse loopschoepen met hamerkop bevestiging weergegeven.



Afbeelding 14a. Loopschoepen met hamerkop bevestiging.



Afbeelding 15. Diverse loopschoep bevestigingen.

Ondanks het feit dat er vele schoepverbindingen zijn, worden er tegenwoordig twee typen veel gebruikt, de hamerkop en de dennenboomverbinding, deze zijn omkaderd. De rest is verouderd, maar bestaan nog wel.

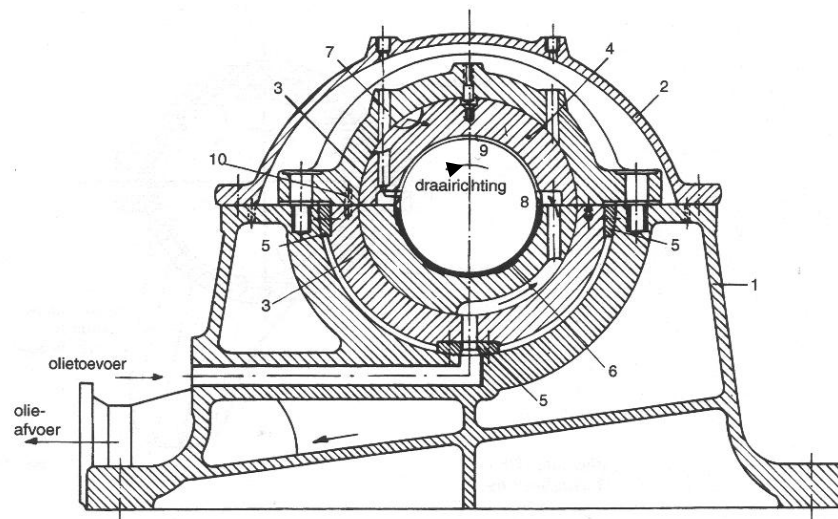
2.5.6 Lagering

Bij de turbine onderscheiden we hoofdzakelijk twee lagers, te weten:

- het draaglager
- het axiaallager

Draaglagers:

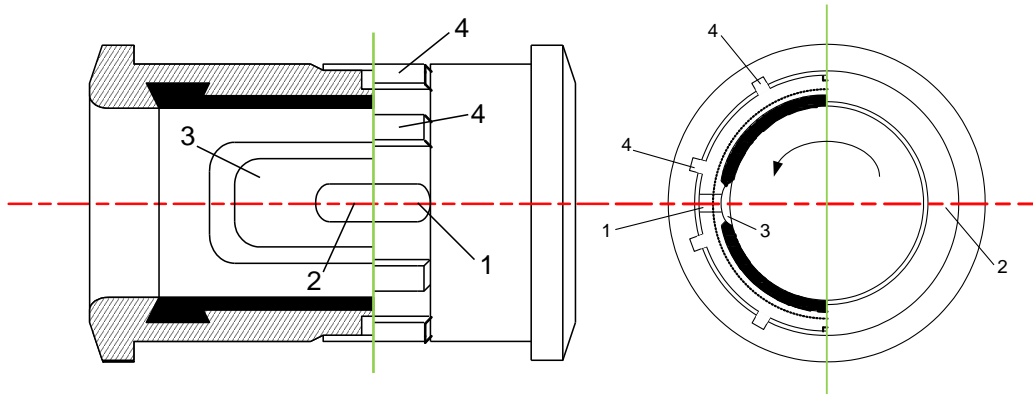
In verband met de hoge toerentallen worden bij turbines geen kogellagers of rollagers toegepast. Om deze reden worden glijlagers toegepast. Door toevoeren van een grote hoeveelheid olie kan de ontstane wrijvingswarmte worden afgevoerd, met andere woorden, de olie heeft zowel een smerende werking als een koelende werking. Tussen de as en het lager ontstaat door een combinatie van de oliedruk en de rotatiesnelheid zogenaamde volle filmsmering. Er is hier dus geen metallisch contact tussen as en lagerschaal. Op afbeelding 16 is een drukgesmeerd glijlager weergegeven. Op afbeelding 17 is een doorsnede van het lager te zien.



Afbeelding 16. Drukgesmeerd glijlager.

Legenda bij afbeelding 16:

1. Lagerhuis
2. Lagerdeksel
3. Zadel
4. Lagerschalen
5. Stelblok
6. Lagermetaal
7. Boring t.b.v. metingen
8. Olie toevoer
9. Rotor
10. Paspn



Afbeelding 17. Doorsnede glijlager.

Legenda bij afbeelding 17:

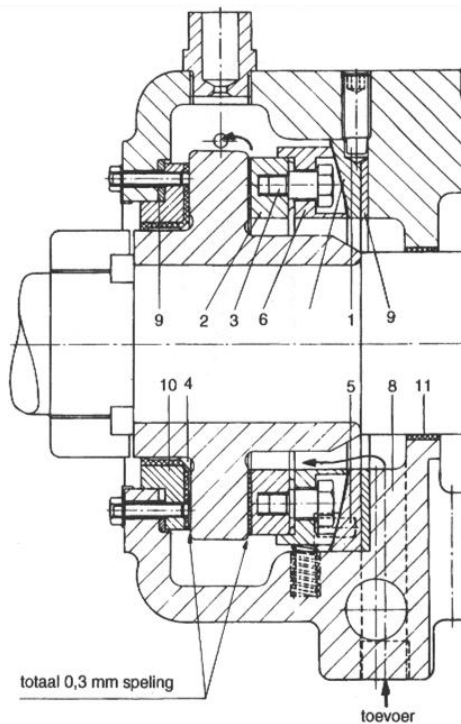
1. Olietoevoer
2. Olieafvoer
3. Olietoevoerruimte, wigvormig
4. Geleide nok voor lagerschaal

Het axiaallager:

Het axiaallager moet de draaiende rotor in axiale richting fixeren, dus ook de kracht in deze richting opvangen.

Bij gelijkdruk turbines is deze axiale kracht praktisch nul, bij overdrukturbines, reactieturbines, is deze kracht veel groter.

Beide soorten turbines zijn echter van axiaal lagers voorzien. Op afbeelding 18 is een axiaal druklager weergegeven.



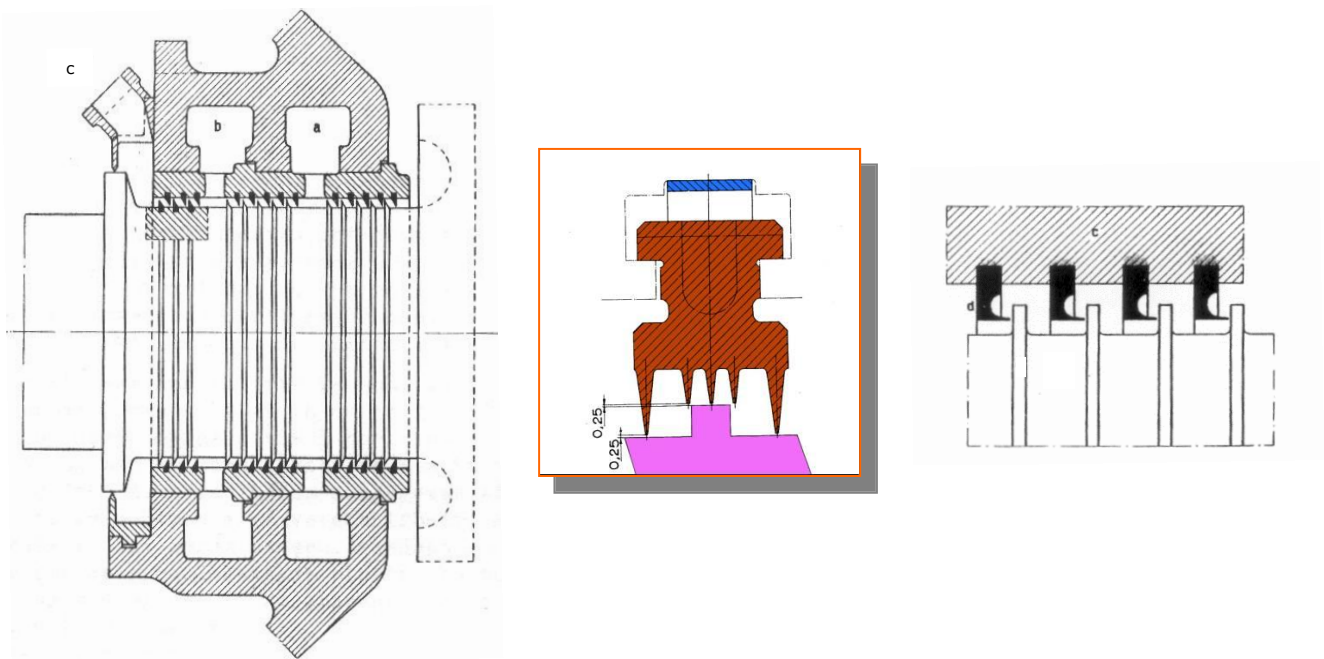
Afbeelding 18. Axiaallager.

Legenda bij afbeelding 18:

1. Borgpen
2. Drukblok
3. Kopbout
4. Oliekanaal
5. Borgpen
6. Houder
7. Onderlegging
8. Drukklagerhuis
9. Vulling
10. Contraring
11. Olieafdichting

2.5.7 Labyrinten

In het huis van een draaiende turbine bevindt zich stoom onder een zekere druk. Waar de as het huis verlaat moet om deze reden een afdichting zijn aangebracht. Door de grote omtreksnelheden kan enkel met labyrintafdichtingen gewerkt worden. Deze afdichtingen dichten niet hermetisch af, dus moet men een bepaald lekverlies accepteren. Op afbeelding 19 zijn twee soorten labyrinten weergegeven. Bij a en b bevindt zich de sperstoomtoevoer.



Afbeelding 19. Labyrintafdichting, links en midden is een labyrint met radiale speling en rechts een labyrint met axiale speling weergegeven.