

Pompen & Compressoren

Marc Borremans



ACADEMIA
PRESS

Uitgeverij Academia Press
Prudens Van Duyseplein 8
9000 Gent
België

www.academiapress.be

Uitgeverij Academia Press maakt deel uit van Lannoo Uitgeverij,
de boeken- en multimediativisie van Uitgeverij Lannoo nv.

ISBN 978 90 382 1612 6
D/2010/4804/95
NUR 950

Marc Borremans
Pompen & compressoren
Gent, Academia Press, 2017, 358 p.

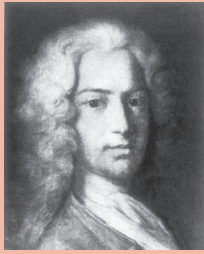
Derde (ongewijzigde) druk, 2017
Tweede (herwerkte) druk, 2015
Eerste druk, 2010

Vormgeving cover: Studio Lannoo

© Marc Borremans & Uitgeverij Lannoo nv, Tielt

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

POMPEN



Hoofdstuk 1: Algemene begrippen

Daniel Bernoulli

1.1 Hydrostatica	P1.1
1.2 Debiet	P1.1
1.3 Wet van Bernoulli	P1.1
1.4 Statische en dynamische druk	P1.2
1.5 Viscositeit	P1.2
1.6 Uitbreiding Wet van Bernoulli	P1.3
1.7 Laminaire en turbulente stroming	P1.4
1.8 Hydraulische weerstanden	P1.5
1.9 Een Voorbeeld	P1.6
1.10 Opvoerdruk	
1.10.1 Geodetische opvoerdruk	P1.7
1.10.2 Statische opvoerdruk	P1.8
1.10.3 Manometrische opvoerdruk	P1.8
1.10.4 Theoretische opvoerdruk	P1.9
1.11 Wet van Bernoulli in bewegende stelsels	P1.10
1.12 Draagvleugel	
1.12.1 Draagvleugelprofiel	P1.10
1.12.2 Terminologie	P1.11
1.12.3 Dynamica	P1.11
1.12.4 Toepassingen	P1.13

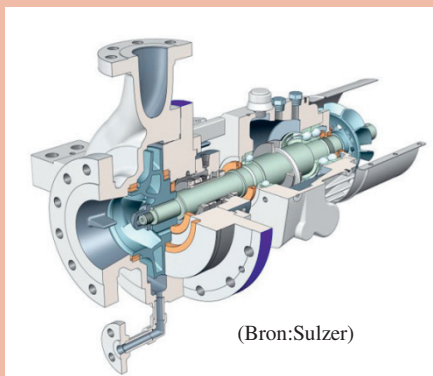


Hoofdstuk 2: Zuigerpompen

Triplex pomp (Bron: PumpCat)

2.1 Enkelwerkende zuigerpomp	
2.1.1 Werking	P2.1
2.1.2 Debiet	P2.1
2.1.3 Kleppen	P2.2
2.1.4 Afdichting	P2.2
2.1.5 Plunjerpompen	P2.3
2.1.6 Handpomp	P2.3
2.1.7 Membraanpompen	P2.3
2.1.8 Triplexpompen	P2.3
2.2 Dubbelwerkende pomp	P2.4

2.3 Zuighoogte	
2.3.1 Theoretisch	P2.6
2.3.2 Dampspanning	P2.6
2.3.3 Snelheid	P2.7
2.3.4 Barometerstand	P2.7
2.3.5 Wrijving	P2.8
2.3.6 Versnelling	
2.3.6.1 Kinematica	P2.8
2.3.6.2 Dynamica	P2.10
2.4 Luchtdrukketels	
2.4.1 Zuigzijde	P2.11
2.4.2 Perszijde	P2.12
2.5 Karakteristieke grootheden	
2.5.1 Manometrische opvoerdruk	P2.13
2.5.2 Theoretische opvoerdruk	P2.13
2.5.3 Vermogen en rendement	P2.14
2.6 Voorbeeld	P2.15
2.7 Hydrofoorinstallatie	P2.18
2.8 Besluiten	P2.19



Hoofdstuk 3: Radiale turbopompen

3.1 Werking	P3.1
3.2 Waaiervormen	P3.3
3.3 Snelheidsdriehoeken	P3.5
3.4 Debiet	
3.4.1 Definitie	P3.6
3.4.2 Debietsbepalende component van de snelheid	P3.6
3.4.3 Relatieve debiet	P3.6
3.5 Statische drukstijging in gesloten pomp	P3.8
3.6 Theoretische opvoerdruk	
3.6.1 Bernoulli in bewegend stelsel	P3.10
3.6.2 Bespreking	P3.10
3.6.3 Theoretische opvoerdruk	P3.11
3.7 Oefeningen	
3.7.1 Oefening 1: snelheidsdriehoeken	P3.11
3.7.2 Oefening 2: stootvrije intree	P3.13
3.8 Diffusor	P3.14
3.9 Invloed schoepvorm	
3.9.1 Grafisch	P3.16
3.9.2 Analytisch	P3.16
3.10 Pompkarakteristiek	
3.10.1 Leidingkarakteristiek	P3.17
3.10.2 Opstellen pompkarakteristiek	P3.18
3.10.3 Pomprendement	P3.18
3.10.4 Invloed toerental	P3.19
3.11 Similitude	P3.19

3.12 Werkingspunt	
3.12.1 Algemeen	P3.20
3.12.2 Vertakte persleiding	P3.21
3.12.3 Pompage	P3.22
3.13 Toepassingsveld	P3.23
3.14 Debietregeling	
3.14.1 Smoorregeling	P3.25
3.14.2 By-pass regeling	P3.25
3.14.3 Toerentalregeling	
3.14.3.1 Algemeen	P3.26
3.14.3.2 Bepaling nieuw werkingspunt	P3.27
3.14.4 Vergelijking	P3.30
3.15 Opstarten pomp	P3.31
3.16 Hoge druk pompen	P3.33



Axiaalpompe (Bron:Warman)

Hoofdstuk 4: Axiale turbopompen

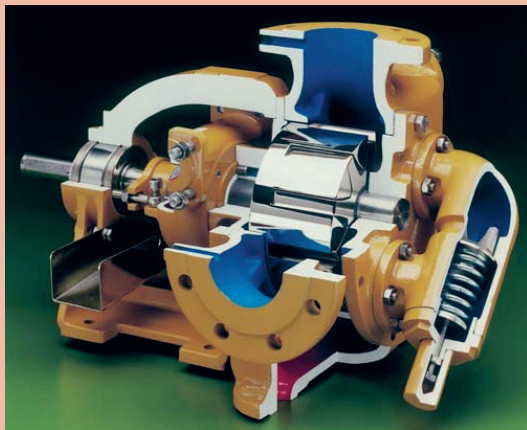
4.1 Werking	P4.1
4.2 Debiet	
4.2.1 Doorstroomsnelheid	P4.2
4.2.2 Doorstroomoppervlak	P4.3
4.3 Theoretische opvoerdruk	P4.4
4.4 Rekenvoorbeeld	P4.5
4.5 Diffusor	P4.6
4.6 Schoepprofiel	P4.6
4.7 Halfaxiale pompen	
4.7.1 Algemeen	P4.7
4.7.2 Helicoïdaalpompe	P4.8
4.7.3 Diagonaalpompe	P4.9



Hoofdstuk 5: Turbopompen (gevorderd)

5.1 Het specifieke toerental	
5.1.1 Eerste kengetal van Rateau	P5.1
5.1.2 Tweede kengetal van Rateau	P5.1
5.1.3 Homologe serie pompen	P5.2

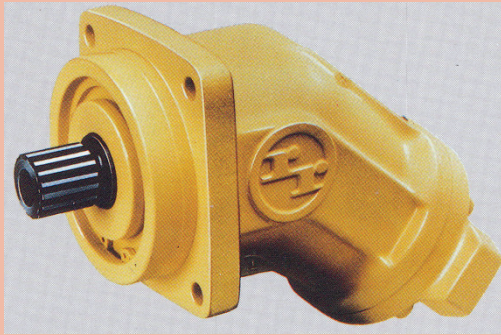
5.1.4	Homologe optimale serie pompen	P5.4
5.1.5	Kengetallen van Rateau bij axiale pompen	P5.5
5.1.6	Het specifieke toerental	P5.5
5.2	Cavitatie	
5.2.1	Het verschijnsel	P5.8
5.2.2	NPSH	P5.9
5.2.3	Karakteristieken	P5.11
5.2.4	Tegengaan van cavitatie	P5.13
5.2.5	Inducers	P5.13
5.3	Serieschakeling	P5.14
5.4	Parallelschakeling	P5.15
5.5	Invloed van de viscositeit	P5.20
5.6	Dubbelzijdige instroming	P5.24
5.7	Speciale turbopompen	
5.7.1	Dompelpompen	P5.24
5.7.2	Elektropompen	P5.26
5.7.3	Verontreinigde vloeistoffen	P5.28
5.7.4	Versnijderpompen	P5.29
5.8	Bouwwijzen	P5.30



Bron: Verder

Hoofdstuk 6: Roterende pompen

6.1	Roterende verdringerpompen	
6.1.1	Tandwielpompen	
6.1.1.1	Uitwendige vertanding	P6.1
6.1.1.2	Inwendige vertanding	P6.3
6.1.2	Rootspomp	P6.5
6.1.3	Wormpompen	P6.9
6.1.4	Peristaltische pompen	P6.11
6.1.5	Monopomp	P6.13
6.1.6	Flexwaaierpomp	P6.17
6.2	Roterende dynamische pompen	
6.2.1	Vijzelpomp	P6.19
6.2.2	Rotojet pomp	P6.20
6.2.3	Wervelwaaierpomp	P6.21
6.2.4	Zijkanaalpompe	P6.22
6.2.5	Schijvenpomp	P6.23



Boschrexroth

Hoofdstuk 7: Hydraulische pompen

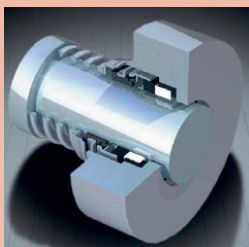
7.1 Inleiding	P7.1
7.2 Schottenpomp	P7.1
7.3 Plunjerpompen	
7.3.1 Radiale plunjerpompen	P7.2
7.3.2 Axiale plunjerpompen	P7.4



Fox

Hoofdstuk 8: Pompen met drijfmiddel

8.1 Straalpompen	
8.1.1 Inleiding	P8.1
8.1.2 Vloeistofstraal vloeistofpomp	P8.2
8.1.3 Vloeistofstraal vaste stof pompen,	P8.4
8.1.4 Vloeistofstraal mixers	P8.4
8.1.5 Stoomstraal vloeistofpomp	P8.5
8.1.6 De feedback pomp P	8.6
8.2 De luchtdruk pomp P8.7	



John Crane

Hoofdstuk 9: Afdichtingen

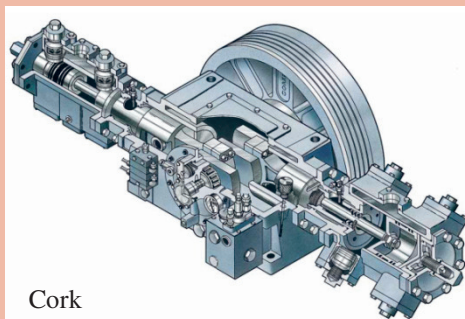
9.1 Inleiding	P9.1
9.2 Stopbuspakkingen	P9.2
9.3 Mechanische afdichtingen	
9.3.1 Basis Idee	P9.7
9.3.2 Terminologie	P9.8
9.3.3 De primaire dichting	P9.9
9.3.4 Secundaire dichting	
9.3.4.1 Pusher Seals	P9.14
9.3.4.2 Non-pusher seals	P9.18
9.3.5 Pusher vs. Non-pusher seal	P9.21

9.3.6. Tertiare afdichting	P9.22
9.3.7 Koeling dichting	P9.23
9.3.8 Hydraulische balans	P9.25
9.3.9 Meervoudige afdichtingen	P9.26
9.3.9.1 Drukloze opzet	P9.27
9.3.9.2 Onder druk staande opstelling	P9.27
9.3.10 Periferie	P9.28
9.3.11 Quenching	P9.29
9.3.12 Pakking vs. Mechanische afdichting	P9.31
9.4 Tegenschoepen	P9.32
9.5 Hydrodynamische afdichting	P9.32
9.6 Magnetische koppeling	P9.33

COMPRESSOREN

Hoofdstuk 1: Algemeen

1 Algemeen	
1.1 Terminologie	C1.1
1.2 Normaalvolume	C1.1
1.3 Arbeid en vermogen	
1.3.1 Technische arbeid	C1.1
1.3.2 Technisch vermogen	C1.2
1.3.3 Debiet	C1.3
1.3.4 Rendement van de compressor	C1.3
1.3.5 Types compressoren	C1.3
1.3.6 Keuze en selectie van compressoren	C1.5
Bijlage: compressiearbeid	C1.6

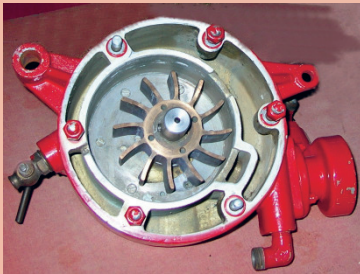


Cork

Hoofdstuk 2: Zuigercompressoren

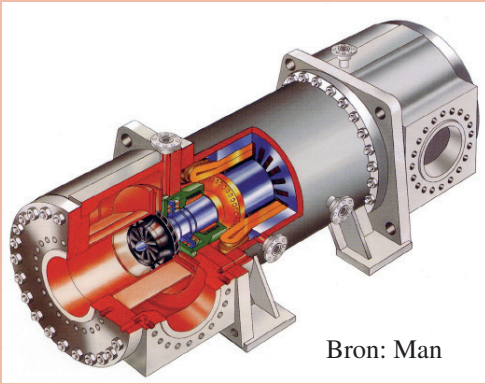
2.1 Indicatorgram	C2.1
2.2 Onderdelen	
2.2.1 Cilinders	C2.2
2.2.2 Afdichting	C2.3
2.2.3 Kleppen	C2.6
2.3 Volumetrisch rendement	C2.8
2.4 Membraancompressor	C2.10
2.5 Arbeid en vermogen	
2.5.1 Technische arbeid	C2.10
2.5.2 Isotherme compressie	C2.12
2.5.3 Polytrope compressie	C2.13
2.5.4 Besluiten	C2.14
2.6 Meertrapscompressoren	

2.6.1 Algemeen	C2.16
2.6.2 Tweetrapscompressor	
2.6.2.1 Algemeen	C2.17
2.6.2.2 Indicordiagram	C2.18
2.6.2.3 Tussendruk	C2.18
2.6.2.4 Arbeid per trap	C2.19
2.6.2.5 Compressietemperatuur	C2.20
2.6.2.6 Volumetrisch rendement	C2.20
2.6.2.7 Cilinderafmetingen	C2.20
2.6.2.8 Opstelling	C2.21
2.7.3 Drietrapscompressor	C2.22
2.8 Debietregeling	
2.8.1 Toerental	C2.23
2.8.2 Smoring zuigleiding	C2.23
2.8.3 Openhouden zuigklep	C2.24
2.8.4 Dode ruimte	C2.25



Hoofdstuk 3: Roterende verdringercompressoren

3.1 Rootscompressor	
3.1.1 Werking	C3.1
3.1.2 Arbeid	C3.2
3.1.3 Eigenschappen	C3.4
3.2 Schottenc compressor	
3.2.1 Werking	C3.7
3.2.2 Ontwerpdruk en persdruk	C3.7
3.2.3 Eigenschappen	C3.9
3.3 Schroefcompressoren	
3.3.1 Werking	C3.10
3.3.2 Eigenschappen	C3.13
3.3.3 Regeling	C3.17
3.3.4 Totaalschema persluchtcompressoren	C3.19
3.4 De Scroll compressor	C3.21
3.5 Tandrotor compressor	C3.22
3.6 Waterringcompressor	
3.6.1 Werking	C3.24
3.6.2 Eigenschappen	C3.26
3.7 Mono-schroef compressor	
3.7.1 Werking	C3.26
3.7.2 Eigenschappen	C3.30
3.8 Algemene regeling roterende verdringercompressoren	C3.31



Bron: Man

Hoofdstuk 4: Turbocompressoren

4.1 Centrifugaalventilator	
4.1.1 Algemeen	C4.1
4.1.2 Statische en dynamische druk	C4.2
4.1.3 Soorten ventilatoren	C4.4
4.1.4 Gedrag verschillende waiertypes	C4.5
4.1.5 Studie van de karakteristiek	C4.6
4.1.6 Selectie van een ventilator	C4.7
4.2 Kruisstroom ventilatoren	C4.12
4.3 Zijkanaal ventilatoren	C4.13
4.4 Turboventilator	C4.14
4.5 Centrifugaalcompressor	C4.15
4.6 Axiaalventilatoren	
4.6.1 Algemeen	C4.20
4.6.2 Reactiegraad	C4.22
4.6.3 Contraroterende ventilatoren	C4.25
4.6.4 Variabele spoed	C4.26
4.7 Axiaalcompressor	C4.29
4.8 Een rekenvoorbeeld	C4.31
4.9 Pompgrens	C4.33
4.10 Vergelijking axiaal/radiaal compressor	C4.34
4.11 Regeling van turbocompressoren	C4.35
4.11.1 Toerental	C4.35
4.11.2 Smoring	C4.35
4.11.3 Variabele leischoppen	
4.11.3.1 Axiaalcompressor	C4.35
4.11.3.2 Centrifugaalcompressor	C4.39



Bron : Warman

Hoofdstuk 5: De Ejector

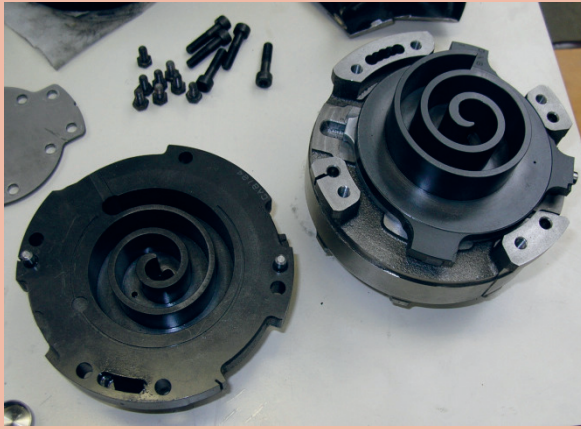
5.1 Stoomejector compressor	C5.1
5.2 Stroomstraal ventilator ejector	C5.2
5.3 Gasstraal ejector	C5.3



Hoofdstuk 6: Vacuümpompen

Boc Edwards

6.1 Bourbon manometers	C6.1
6.2 Vacuüm gebieden	C6.2
6.3 Grofvacuüm	
6.3.1 Membraanpompen	C6.3
6.3.2 Stoom straalpijp vacuümpompen (ejectors)	
6.3.2.1 Algemeen	C6.4
6.3.2.2 Meertraps stoom straalpijp	C6.4
6.3.2.3 Meertraps met mengwarmtewisselaar	C6.5
6.3.2.4 Meertraps met oppervlaktewarmtewisselaar	C6.6
6.3.3 Vloeistof straalpomp	C6.7
6.3.4 Gasstraal vacuümpomp	C6.7
6.3.5 Centrifugaal vacuümpomp	C6.8
6.3.6 Vloeistofringpompen	C6.8
6.4 Fijnvacuüm	
6.4.1 Schottenpomp	C6.9
6.4.2 De gasballast	C6.10
6.4.3 Wormvacuümpompen	C6.12
6.4.4 Scroll vacuümpompen	C6.12
6.4.5 Rollende zuiger	C6.13
6.4.6 Klauwpomp	C6.14
6.4.7 Roots vacuümpompen	C6.15
6.5 Hoogvacuüm	
6.5.1 Diffusiepompen	C6.18
6.5.2 Diffusie ejector pompen (booster)	C6.20
6.5.3 Turbomoleculaire pompen	C6.21
6.6 Ultrahoog vacuüm	
6.6.1 Sorptiepompen	C6.22
6.6.2 Adsorptiepomp	C6.23
6.6.3 Sublimatiepomp	C6.24
6.6.4 Ion-getterpomp	C6.25



Hoofdstuk 7: Koelcompressoren

7.1 Zuigercompressoren	C7.1
7.2 Centrifugaalcompressoren	C7.2
7.3 Mono-schroefcompressor	C7.3
7.4 Schroefcompressoren	C7.4
7.5 Scroll compressor	C7.5
7.6 Rollende zuiger	
7.6.1 Werking "rotary"	C7.8
7.6.2 De swing compressor	C7.9

Voorwoord

Wanneer men in een zoekrobot als Google het woord “pump” als sleutel opgeeft krijgt men tegenwoordig (2010) niet minder dan 94,1 miljoen referenties. Het woord “compressor” geeft een “hitrate” van 18 miljoen. Dit wijst erop dat beide apparaten een niet onaanzienlijk deel uitmaken van de infrastructuur van gebouwen en bedrijven.

Men rekent, wat betreft pompen, dat in een petrochemisch bedrijf één pomp per werknemer geïnstalleerd is!

Toch vindt men in de recente literatuur geen enkel boek dat beide topics in één boek vat. Noch in het Nederlands, noch in het Engels. Zoek in het Engels maar eens op amazon.com naar een boek dat beide onderwerpen aankaart.

Met deze kennis als lout, en met 30 jaar doceerervaring op het terrein, zijn we begonnen aan een soort encyclopedisch werk. Het bevat het resultaat van een rooftocht doorheen “Google” om alle soorten pompen en compressoren te catalogeren en te beschrijven wat werking en eigenschappen betreft. Aan de lezer uit te maken welke pomp of compressor hij voor een bepaalde toepassing zal gebruiken. Zulke keuze zal trouwens niet rechtstreeks kunnen geëxtraheerd worden uit het boek, het kiezen van een pomp of compressor is vaak geen exacte wetenschap. Het is een afwegen van voor- en nadelen alvorens tot een definitieve keuze te komen. In deze context is het zo dat de vele soorten pompen en compressoren worden opgesomd, maar dat de auteur niemand dwingt om voor een bepaalde taak één type te gebruiken; het is aan de lezer om met behulp van extra informatie de pomp of compressor te kiezen voor de voor haar/hem liggende specifieke taak. Wij nemen hier nergens een standpunt over in, een taak kan vaak worden verricht door verschillende soorten pompen (compressoren). Argumenten van prijs, onderhoud, leefduur, regeling en dergelijke, spelen een rol in de definitieve keuze.

Dit boek is tot stand gekomen dankzij de hulp en medewerking van vele enthousiaste mensen en bedrijven, over de hele aardbol, die zich in deze discipline bewegen. Zij hebben mij toegelaten hun figuren en teksten belangeloos te mogen overnemen (vertalen). Als ik stel dat dit boek zich bij ieder ingenieur of technicus op het schap zou moeten bevinden, is dit geen pretentieuze uiting, mijn werk bestond er alleen maar in de aangeboden hoeveelheid informatie te verwerken tot een bruikbaar geheel.

Dit boek werd geschreven met het oog op een zo breed mogelijk publiek. Eerst en vooral werd er al gezegd dat dit werk encyclopedisch is. Dat houdt in dat voor educatieve doeleinden in scholen de docent/lector een aantal onderwerpen zal moeten selecteren en een aantal zal moeten weglaten. Het betekent ook dat op universiteiten het wiskundige ten volle kan worden gedoceerd, terwijl bij studenten van 16 jaar daarvan abstractie moet gemaakt worden en slechts de basisbegrippen dienen te worden onthouden.

Ik hoop dat dit boek een leemte in de literatuur in de Nederlandse taal opvult en mede door de verzorgde lay-out succes kent.

Opmerkingen allerhande zijn steeds welkom op mijn adres marc.borremans2@telenet.be

Marc Borremans

Dankwoord

- Voor het kritisch nakijken van typefouten en andere: Eddy Janssen, docent aan de Karel de Grote Hogeschool te Hoboken, Antwerpen en Bavo Verbrugge, doctorandus aan de Vrije Universiteit te Brussel
- Voor het bezorgen van raad en daad: Nys Benjamin, van John Crane, voor het hoofdstuk over mechanische afdichtingen en de heer Meynen van Eriks, voor zijn bijdrage over de stopbuspakkingen
- De heer Ian K Smith van John Crane voor het toelaten van het bewerken van zijn syllabus over mechanische afdichtingen en het overnemen van de tekeningen
- De heer Vandesteene van Daikin, voor het stuk over koelcompressoren
- De mensen van Atlas Copco, Wilrijk (Antwerpen) voor het gebruiken van hun manual “Compressed Air Manual” en voor de goede raad en aanmoedigingen
- De firma Oerlikon voor het mogen gebruiken van hun manual over vacuümtechnieken
- De heer Bernard De Jonghe en de firma GEA Jet Pumps voor het mogen gebruiken van hun documentatie
- De firma KSB die mij toeliet hun “KSB Industriecatalogus” en vooral “Auslegung von Kreiselpumpen” te gebruiken
- De vele bedrijven die mij toelieten hun documentatie te gebruiken: Duba De Backer Pompen, Dabpumps, VDL Klima, Compair, Wrpomptechniek, Riako, Aerzen, Colfaxpump, Grundfos, Howden, KSB, Seepex, Egger, Rolls-Royce, Goldpump, Bosch-Rexroth, Sterlingfluid, Allweiler, Weir, Hibon, Boc-Edwards, ... en zo vele andere vermeld bij de illustraties

NOTATIES

Symbol	Betekenis	Eenheid
a	versnelling	m/s^2
a'	versnelling in zuigleiding	m/s^2
A	oppervlakte zuiger, oppervlak kanaal	m^2
A'	sectie zuigleiding, loodrecht oppervlak	m^2
c	absolute snelheid	m/s
c_b	snelheid aan buik	m/s
c_r	snelheid aan rug	m/s
C_x	liftcoëfficiënt	-
C_z	weerstandcoëfficiënt	-
D	diameter	m
F	kracht	N
F_c	centrifugaalkracht	N
g	valversnelling	m/s^2
H	hoogte	m
H_{geo}	geodetische opvoerhoogte	m
H_{man}	manometrische opvoerhoogte	m
H_p	geodetische pershoogte	m
H_w	wrijvingshoogte	m
H_z	geodetische zuighoogte, aanzuighoogte	m
L	lengte drijfstaang	m
L'	lengte zuigleiding	m
N	toerental	tpm
N_s	specifiek toerental	Afh.
$NPSH_a$	beschikbare NPSH	m
$NPSH_r$	vereiste NPSH	m
p	statische druk	Pa
p_a	atmosferische druk	Pa
p_{abs}	absolute druk	Pa
p_{dp}	dampdruk persreservoir	Pa
p_{dz}	dampdruk zuigreservoir	Pa
p_{dyn}	snelheidsdruk	Pa
p_{eff}	effectieve druk	Pa
p_{geo}	geodetische druk	Pa
P_{man}	manometrische opvoerdruk	Pa
p_p	druk in cilinder tijdens pers	Pa
p_s	statische opvoerdruk	Pa
P_t	technisch vermogen	Pa
p_{th}	theoretische opvoerdruk	Pa
p_{vp}	drukverlies in pomp	Pa
p_w	wrijvingsdruk	Pa
p_{wp}	wrijvingsverlies persleiding	Pa
p_{wz}	wrijvingsverlies zuigleiding	Pa
p_z	druk in cilinder tijdens zuig	Pa
R	reactiegraad	-
Q_M	massadebiet	kg/s
Q_V	volumetrisch debiet	m^3/s
Q_{Ve}	effectief debiet	m^3/s
R	krukstraal	m
Re	getal van Reynolds	-
s	slaglengte	m/s
u	sleepsnelheid	m/s
w	relatieve snelheid	J/kg
w_c	specifieke compressiearbeid	J/kg

NOTATIES

w_t	technische specifieke arbeid	J/kg
z	hoogtecoördinaat, aantal schoepen	m;-
ρ	soortelijke (specifieke) massa	kg/m ³
η	dynamische viscositeit	Pa.s
η_p	rendement pomp	-
η_i	rendement installatie	-
η_v	volumetrisch rendement pomp	-
ν	viscositeit, axiale doorstroomsnelheid	m ² /s;m/s
λ	verliescoëfficiënt, weerstands~	-
ξ	verliescoëfficiënt, weerstands~	-
ω	hoeksnelheid	rad/s
α	absolute invalshoek aan intreeschoek	rad
β	uitvalshoek aan uittree	rad

HOOFDSTUK 1: ALGEMENE BEGRIPPEN

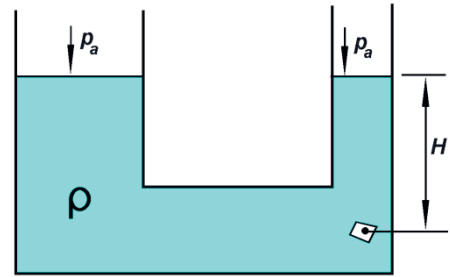
1.1. HYDROSTATICA

Bij vloeistoffen in rust geldt de zgn. wet van Pascal (figuur 1.1):

$$p = p_a + \rho \cdot g \cdot H$$

waarin :

- p : de statische druk in het beschouwde punt [Pa=N/m²]
- p_a : de atmosferedruk [ca. 1 bar = 10⁵ Pa]
- ρ : de soortelijke massa van de vloeistof [kg/m³]
- g : valversnelling [9,81 m²/s]
- H : de hoogte beneden het vloeistofoppervlak [m]



Figuur 1.1: Wet van Pascal

De standaard druk op zeeniveau bedraagt 1,013 bar. Deze druk is een *absolute* druk.

In de praktijk is meestal de *relatieve*, of *effectieve* druk p_{eff} van belang. Deze is het verschil tussen de absolute druk p_{abs} en de atmosferische druk p_a .

$$p_{eff} = p_{abs} - p_a$$

We onderscheiden volgende druk meettoestellen:

- Een *manometer* meet in het algemeen een effectieve druk, dat is een overdruk (t.o.v. de atmosferische druk).
- Een *vacuümmeter* meet een onderdruk (t.o.v. de atmosferische druk)
- Een *barometer* meet de absolute druk van de atmosfeer

Wat de eenheden betreft wordt tegenwoordig meer en meer een duidelijke notatie aangehouden. Men noteert als volgt: [bar(g)] of [bar_g] voor effectieve druk ("g" staat voor gauge = ijk) en [bar(a)] of [bar_a] voor absolute druk.

1.2. DEBIET

Beschouw een pijp met variabele doorsnede (figuur 1.2). Bij sectie 1 bezit het fluïdum een snelheid c en soortelijke massa ρ . De (dwars)oppervlakte is daar A_1 . Gebruiken we analoge notaties voor sectie 2.

Het *massadebiet*, d.i. de hoeveelheid massa die per tijdseenheid door sectie 1 stroomt, stroomt ook door de sectie 2.

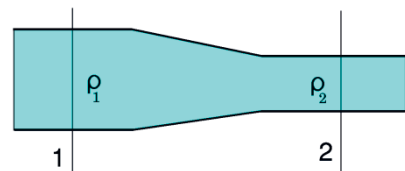
Het massadebiet Q_M wordt gegeven door:

$$Q_M = \rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \quad [\text{kg/s}]$$

In het geval van onsamendrukbare fluïda (vloeistoffen) is ρ constant. Men gebruikt dan evengoed het *volumetrische debiet*, d.i. de hoeveelheid volume die per tijdseenheid door een sectie stroomt:

$$Q_V = c_1 \cdot A_1 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$= c_2 \cdot A_2$$



Figuur 1.2: Debiet

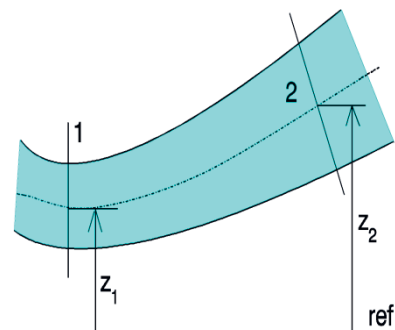
1.3. WET VAN BERNOULLI

De wet van Bernoulli drukt het behoud van energie uit voor *vloeistoffen*.

Een stromende vloeistof bezit drukenergie, snelheidsenergie en potentiële energie (figuur 1.3):

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

waarin z de hoogtecoördinaat voorstelt.

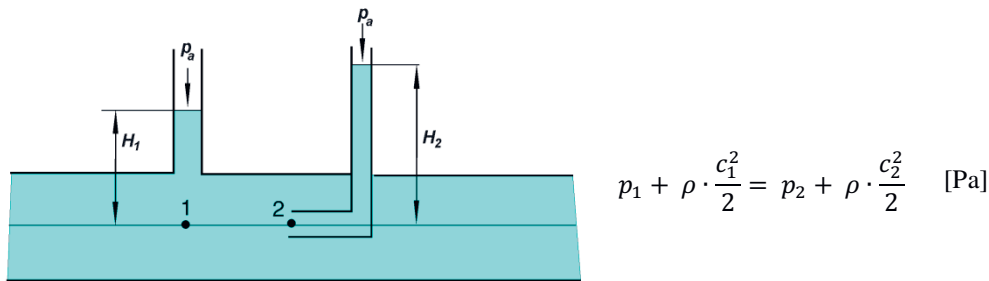


Figuur 1.3: Wet van Bernoulli



1.4. STATISCHE EN DYNAMISCHE DRUK

Beschouwen we een horizontale buis. De wet van Bernoulli toegepast op de punten 1 en 2 (figuur 1.4):



Figuur 1.4: Statische en dynamische druk

Het punt 2 is een zgn. stuwpunt: $c_2 = 0$

Waaruit:

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} \quad \text{zodat: } p_2 > p_1$$

In verticale zin is er geen beweging en kan de hydrostatica worden toegepast:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_a + \rho \cdot g \cdot H_1 \\ p_2 &= p_a + \rho \cdot g \cdot H_2 \end{aligned}$$

waaruit

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot (H_2 - H_1)$$

De hoogten H in de meetbuisjes zijn dus evenredig met de statische druk, maar uit het verschil der aflezingen kan men de dynamische druk (en zo de snelheid) bepalen (Pitot-buis).

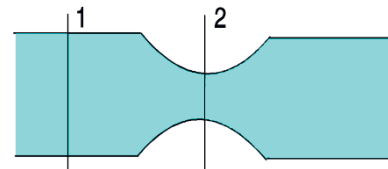
Beschouwen we nu een buis met vernauwde doortocht (venturi) (figuur 1.5):

In de keel zal de vloeistofsnelheid groter zijn dan erbuiten:

$$Q_v = c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 \quad \text{met: } A_1 > A_2$$

$$c_1 < c_2$$

De dynamische druk is in de vernauwing groter dan erbuiten.



Figuur 1.5: Venturi

Passen we nu Bernoulli toe:

$$p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2}$$

zodat :

$$p_1 > p_2$$

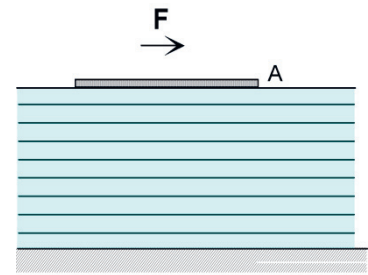
Men stelt vast dat de statische druk in dynamische druk kan omgezet worden en omgekeerd. Daarom is het in vele beschouwingen in de toegepaste mechanica gebruikelijk te spreken over de totale druk van een fluïdum, zijnde de som van statische en dynamische druk. De **totale druk** vertolkt dan de "totale energie-inhoud" van het fluïdum.

1.5. VISCOSITEIT

Deze paragraaf is geldig voor zowel vloeistoffen als gassen, daarom gebruiken we als generieke term "fluïdum". Beschouw een fluïdum in een open kanaal (figuur 1.6). M.b.v. een plaat wordt een horizontale kracht F toegepast met de bedoeling het fluïdum te bewegen. Stellen we ons nu voor dat het fluïdum bestaat uit een aantal horizontale lagen. Bovenaan "plakt" de fluïdumlaag d.m.v. cohesiekrachten aan de plaat.

Deze laag beweegt dan ook met de snelheid van de plaat mee. Helemaal onderaan echter beweegt de laag niet omdat ze daar door cohesie wordt vastgehouden aan de bodem van het kanaal. Het is duidelijk dat elke denkbeeldige laag dan ook een eigen snelheid c zal hebben, evoluerend van de hoogste snelheid bovenaan tot de snelheid nul onderaan.

Iedere laag oefent op een aangrenzende laag een weerstand uit (schuifspanning): zo remt de tweede laag bovenaan de plaat af, de tweede laag wordt door de derde laag afgeremd... Men spreekt van zgn. viskeuze wrijving tussen de lagen.



Figuur 1.6: Viscositeit

Wil men een stromend fluïdum hebben op constante snelheid dan is toch een kracht F nodig om deze snelheid te onderhouden. Deze kracht overwint de inwendige wrijving van het fluïdum, d.i. de wrijving die alle laagjes op mekaar uitoefenen.

Bij vloeistoffen en gassen geldt voor zgn. Newtoniaanse vloeistoffen en gassen:

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dc}{dz}$$

Waarin:

A [m²]: het oppervlak waarop de kracht F werkzaam is

c [m/s]: de lokale snelheid van het fluïdum

z [m]: de positie volgens een verticale as

η [Pa·s]: de dynamische viscositeitscoëfficiënt (oude eenheid, niet S.I.: 1 Poise = 0,1 Pa·s)

Het voorgaande geval van een open kanaal kan gemakkelijk worden uitgebreid tot het geval van een buis waar een fluïdum in stroomt: het volstaat het geval van figuur 6 te spiegelen rond de plaat (figuur 1.7).



Er is dan tevens een kracht F nodig om een vloeistof (gas) door een leiding te sturen op constante snelheid, of, wat op hetzelfde neerkomt: er is een drukverschil over de pijp nodig om de inwendige wrijving van de vloeistof (of het gas) te overwinnen.

Figuur 1.7: Kanaal

In de praktijk blijkt de uitdrukking $\frac{\eta}{\rho}$ vaak voor te komen. Daarom definieert men de kinematische viscositeit ν :

$$\nu \equiv \frac{\eta}{\rho}$$

De dimensies zijn: [m²/s]

Soms gebruikt men een niet S.I. eenheid, de Stokes, met 1 [St] = 10⁻⁴ [m²/s]

Opmerking: niet alle vloeistoffen gedragen zich Newtoniaans, met name in de voedingsindustrie heeft men vaak te maken met vloeistoffen waarbij de viscositeitscoëfficiënt afneemt naarmate de afschuifnelheid toeneemt, dus naarmate de snelheid toeneemt.

1.6. UITBREIDING WET BERNOULLI

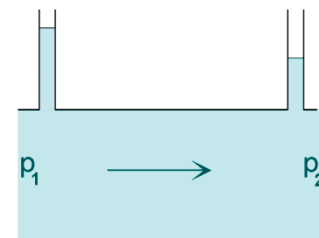
Beschouw een leiding met wrijvingsverlies (figuur 1.8).

De klassieke wet van Bernoulli:

$$p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2}$$

is nu niet meer geldig omdat

$$p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} > p_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2}$$



1.8: Wrijvingsverlies

Noteren we het drukverlies door wrijving bvb. p_W , dan mag men schrijven:

$$p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2} + p_w$$

In het algemeen wordt dat:

$$p_1 + \rho \cdot \frac{c_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \rho \cdot \frac{c_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_w$$

Door nu te delen door $\rho \cdot g$ kan men de wet van Bernoulli schrijven in de eenheid meter:

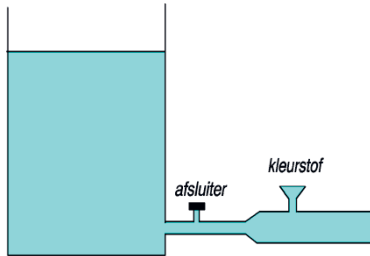
$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{c_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + H_w$$

Met het wrijvingsverlies in meter:

$$H_w = \frac{p_w}{\rho \cdot g} \quad [\text{m}]$$

1.7. LAMINAIRE EN TURBULENTE STROMING

Beschouw een vat waaraan een leiding is aangesloten (figuur 1.9). Op de leiding is een afsluiter geplaatst zodat het debiet en dus de snelheid van het stromende fluïdum kan geregeld worden. Langs een vulopening voegt men nu kleurstof toe.



Wanneer de snelheid niet te groot is bemerkt men dat de stroming zeer regelmatig is: de kleurstofdeeltjes lopen in evenwijdige banen. Men spreekt over een laminaire stroming. Bij grotere snelheden echter begint de kleurstof zich te vermengen met het fluïdum: er ontstaan wervels. Dit is een turbulente stroming.

Figuur 1.9: Soorten stroming

Het onderscheid tussen laminaire en turbulente stroming wordt gemaakt a.d.h.v. het getal van Reynolds:

$$\text{Re} \equiv \frac{c \cdot D}{\nu}$$

Waarin:

c : de gemiddelde snelheid van de vloeistof [m/s]

D : de diameter van de leiding [m]

ν : de kinematische viscositeit [m^2/s]

Men kan gemakkelijk nagaan dat het getal van Reynolds dimensieloos is.

Wanneer voor een bepaalde stroming in een ronde buis Re lager is dan het getal 2300 is de stroming laminair, zoniet turbulent.

Bij laminaire stroming zijn de wrijvingverliezen p_w evenredig met de vloeistofsnelheid c , maar bij een turbulente stroming nemen **deze drukverliezen kwadratisch toe met de snelheid**.

Men kan zich de vraag stellen of men in de praktijk laminaire dan wel turbulente stromingen ontmoet. Stel het geval van water op 20°C dat door een pijp met diameter 0,1 m stroomt. Opdat de stroming laminair weze mag de snelheid niet groter zijn dan:

$$c = \frac{2300 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5}}{0,1} = 0,03 \quad [\text{m/s}]$$

Deze snelheid is erg laag. Praktisch heeft men bijna steeds te maken met een turbulente stroming. Echter, daar bij turbulentie de wrijvingsverliezen evenredig zijn met het kwadraat van de snelheid zal men deze toch moeten beperken. In de regel bedraagt de snelheid voor water in leidingen ca. 1,5 m/s.