

Tentamen weerstand en voortstuwing

Vakcode: mt527 + mt518 (oud)

Datum: 26-1-2012

Tijd: 1400 – 1700 u

Plaats:

Opmerkingen

1. Noteer uw studienummer en naam op elk blaadje dat u inlevert.
2. Dit tentamen is gesloten boek! Geen aantekeningen of formulebladen toegestaan.
3. Beargumenteer uw rekenantwoorden: zeg even kort wat u gaat doen, en waarom.
4. Let op uw eenheden!

Gegeven fysische parameters en omgevingsparameters:

Temperatuur water sleeptank: $T_s = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatuur zeewater: $T_z = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$

Soortelijke massa water sleeptank: $\rho_s = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Soortelijke massa zeewater: $\rho_z = 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Versnelling van de zwaartekracht: $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Dampdruk bij $15 \text{ } ^\circ\text{C}$: $p_v = 1706 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Dampdruk bij $10 \text{ } ^\circ\text{C}$: $p_v = 1226 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Kinematische viscositeit sleeptank water bij $T=15 \text{ } ^\circ\text{C}$: $\nu_{fw} = 1.139 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Kinematische viscositeit zeewater bij $T=10 \text{ } ^\circ\text{C}$: $\nu_{sw} = 1.354 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

$1 \text{ Mijl} = 1852 \text{ m}$

$1 \text{ knoop} = 1 \frac{\text{mijl}}{\text{uur}}$

Bijlagen: 1 maal diagram met open water karakteristiek B4.70 propeller

Ik wens u veel succes bij dit tentamen.

Vraag 1

De voorganger van de onderzeeboot is de “duikboot”, een apart soort schip dat af en toe even onder water kan, waarbij een fors snelheidsverlies optreedt. Rond 30 April 1945 vaart de eerste echte onderzeeër uit die wel geoptimaliseerd is voor het varen onder water en haalt daar ook een hogere snelheid. Deze schepen zijn 76,6 m lang met een waterverplaatsing (onder water) van 2,100 ton. Een serie accu's en electromotoren leveren een vermogen aan de schroef van totaal 3240 kW.



Uw tentamen onderwerp is vandaag de dag nog te bewonderen in Bremerhaven. De cavitatie tunnel is als oorlogsbuit meegenomen naar University of Newcastle upon Tyne.

- a. Bij het testen van modellen van normale schepen om de *weerstand* en de *gevraagde stuwkracht* te bepalen wordt er gebruik van een aantal schaalregels. Wat zijn deze schaalregels en geef een fysische interpretatie. Ter ondersteuning wordt hieronder de Navier Stokes vergelijking voor de x-richting gegeven:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

(3 ptn)

- b. Uit welke term in de Navier Stokes vergelijking kunt u het Froude getal afleiden? (2 ptn)
- c. Zou u deze schaalregels ook toepassen voor het testen van onderzeeërs die zeer ver onder het wateroppervlak varen? (2 ptn)
- d. Hoe ziet de weerstandskarakteristiek van een onderzeeboot model eruit in ver ondergedompelde toestand in een wrijvingsloze vloeistof? (2 ptn)
- e. Hoe kunt bepaalt u de drukverdeling om een onderzeeboot in ver ondergedompelde toestand als de potentiaal functie ϕ voor de omstroming gegeven is? (3 ptn)

Antwoorden

- a. Bij het doen van modelproeven moet in principe voldaan worden aan de drie gelijkvormigheidswetten: geometrische, kinematische en dynamische gelijkvormigheid. Deze wetten geven de verhoudingen tussen gelijke grootheden, zoals bijvoorbeeld de schroefdiameter/scheeps lengte verhouding (geometrische), de voortgangscoefficient van schroeven (kinematische: $J = \frac{V_a}{nD}$, waarmee de verhouding aanstroomsnelheid, omtreksnelheid bepaald is) en dynamische, bijv. het Froude en het Reynolds getal. Wat betreft de dynamische gelijkvormigheid moet voldaan worden aan identiteit van het Froude getal bij model en full scale, als ook aan het Reynolds getal. Het Froude getal geeft de verhouding van massa traagheidskrachten tot zwaartekracht aan in de stroming, het Reynolds getal geeft de verhouding tussen massa traagheidskrachten en visceuze krachten aan:

$$Fn = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}$$

waarbij de subscript m en s refereren aan "model", respectievelijk "ship".

Evenzo voor Rn:

$$Rn = \frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_s L_s}{\nu_s}$$

Uit beide gelijkvormigheidswetten kunnen we nu de verhouding tussen modelsnelheid / full scale ship snelheid afleiden.

$$\text{Volgens Froude: } \frac{V_m}{V_s} = \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

$$\text{waarbij } \lambda = \frac{L_s}{L_m}$$

$$\text{Volgens Reynolds Rn: } \frac{V_m}{V_s} = \frac{\nu_m L_s}{\nu_s L_m} \approx \lambda$$

Aan beide gelijkvormigheidswetten kan dus alleen voldaan worden als $\lambda = 1$. In de praktijk houden we de schaalwet van Froude aan, en wijken we af van de Reynolds gelijkvormigheid. Dit betekent dat we de golfmakende weerstand goed omschalen zonder schaalearde te introduceren. Schaalearde worden dus wel geïntroduceerd bij de verscaling van visceuze krachten, omdat we niet voldoen aan de Reynolds schaalregel. Hiervoor wordt echter gecorrigeerd door gebruik te maken van de bekende relatie tussen de vlakke plaat wrijvingsweerstandscoefficient C_F en de dimensieloze snelheid Rn (via bijv. ITTC '57 wrijvingslijn).

Beoordeling: -0.5 bij niet vermelden conflict in schaling modelsnelheid

Wanneer de drie gelijkvormigheidswetten genoemd worden, +0.5

-1.5 wanneer fysische interpretatie (verhouding massa traagheid / zwaartekracht of wrijvingskrachten) niet is genoemd.

Wanneer alleen Froudescaling genoemd wordt: 1 pt

- b. Het Froude getal volgt uit de dynamische vrij oppervlak randvoorwaarde. Deze rvwde stelt dat de druk aan het vrije oppervlak gelijk moet zijn aan de atmosferische luchtdruk min een drukbijdrage door de oppervlaktespanning van water. Deze rvwde is noodzakelijk door het voorkomen van een drukterm in het rechterlid van de N-S vergelijking.

Beoordeling: -1 bij niet vermelden dat het Fn getal uit de dynamische vrij oppervlak randvoorwaarde komt..

wanneer vrij oppervlak rvw uitgeschreven wordt, +0.5

- c. Omdat een onderzeer die ver onder water vaart geen golven en dus geen golfmakende weerstand produceert, spelen oppervlakte randvoorwaarden geen rol en hoeven we niet te voldoen aan de schaalwet van Froude. We kunnen dus bij een hogere modelsnelheid varen, die dichterbij het "full scale" R_n getal ligt.

Beoordeling: Vaak wordt de weerstand a.g.v. hydrostatische druk genoemd. Deze levert echter geen netto bijdrage (geïntegreerde kracht = 0): -1

- d. Een onderzeeboot die diep onder water recht uit vaart ondervindt hoofdzakelijk wrijvingsweerstand en visceuze drukweerstand: $R_r = R_f + R_{vp} = R_f (1+k)$
Omdat het medium wrijvingsloos wordt verondersteld, vallen deze weerstandstermen weg en is de totale weerstand voor alle snelheden dus gelijk aan nul.

Beoordeling: Geen golfweerstand en geen wrijvingsweerstand goed genoemd, maar wel vormweerstand genoemd: -1 pt.

- e. We kunnen het snelheidsveld uit de potentiaalfunctie verkrijgen door:

$$\vec{v}(x, y, z) = \nabla \phi$$

m.b.v. de Bernoulli vergelijking kan een relatie gevonden worden tussen de snelheid en de druk in een potentiaalstroming:

$$\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = c, \text{ of}$$

$$\frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + \frac{p}{\rho} + gz = c$$

waarbij voor een stationaire potentiaalstroming de constante c overal in de vloeistof dezelfde is. De constante kan bepaald worden aan het vrij oppervlak waar $z=0$, $p=p_0$ en

$$\nabla \phi = \overline{U}_0$$

Vraag 2

We schrijven het jaar 2017. U wordt door een grote reder ingehuurd als expert om advies te geven over de scheepsvoortstuwning.

De reder wil de ontwerpsnelheid van het schip terugbrengen van 25 kn naar 19 kn gemiddeld. Hij wil echter toch ook desgewenst reizen met 25 kn kunnen varen.



De motor eigenschappen worden aangepast zodat de motor een optimaal verbrandingsrendement heeft bij een vermogen van 10,000 kW (= 10 MegaWatt) en een schroeftoerental van 108 rpm. Dit is ook het benodigde vermogen wat voorspeld wordt nodig te zijn bij 19 kn.

Verder blijkt uit modelproeven dat voor ware grootte het effectieve volgstroomgetal (=wake) $w = 0.18$ bedraagt en dat het zoggetal (= thrust deduction) $t = 0.11$ is.

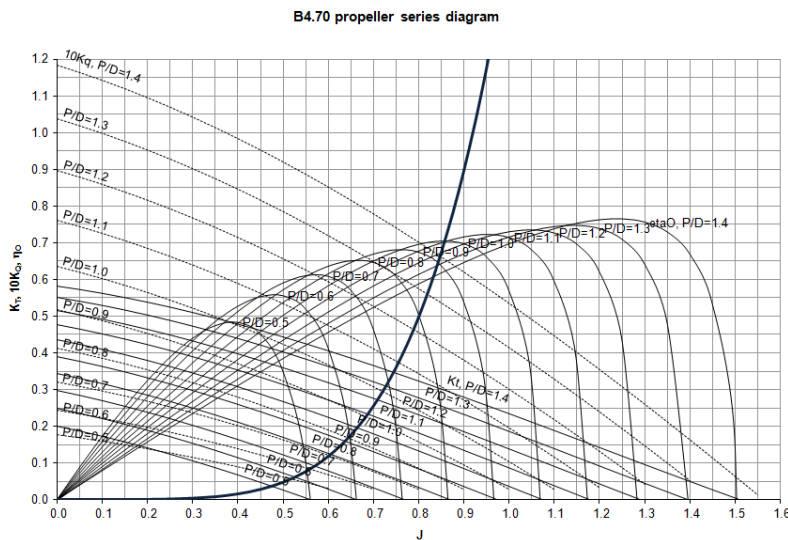
In uw tas draagt u altijd het inmiddels beroemd geworden B4-70 diagram met u mee, waarmee u vroeger geleerd heeft schroefontwerpen te maken. Dit diagram kunt u ook hier weer gebruiken..

- a. Bepaal de optimale spoed-diameter verhouding van de schroef bij een scheepssnelheid van 19 knopen. Een belangrijke randvoorwaarde hierbij is dat de propeller diameter niet groter mag zijn dan 6,10 m, i.v.m. de drukfluctuaties op de romp. Bepaal eveneens de volgende grootheden die bij deze schroef behoren (4 ptn):
- stuwkracht coefficient K_T
 - koppel coefficient K_Q
 - snelheidsgraad J
 - rendement η
 - bladoppervlak verhouding A_E/A_0
- b. Zou u een andere schroef kiezen als de schroefdiameter niet beperkt zou zijn? (2 ptn)
- c. Bereken of de onder a geselecteerde schroef ook de beste keuze is voor de hogere snelheid van 25 kn. U mag hierbij veronderstellen dat de weerstandstoename van 19 naar 25 kn evenredig is met de scheepssnelheid in het kwadraat: $R = cV^2$, waarbij R de totale scheepsweerstand is, c een constante en V de scheepssnelheid. (2 ptn)
- d. Bereken of de aanname dat de weerstand toeneemt met het kwadraat van de snelheid (subvraag c van deze opgave) wel of niet realistisch is. (2 ptn)

Antwoorden

- a. Gegeven zijn het motorvermogen ($P_D = 10 \text{ MW}$) en het gewenste toerental van $n=108 \text{ rpm}$ bij een scheepssnelheid $V_S = 19 \text{ kn}$. We kunnen hieruit het beschikbare koppel Q berekenen: $Q = \frac{P_D}{2\pi n} = 884 \text{ kNm}$. Hiermee kunnen we in dimensieloze vorm berekenen wat het schip kan leveren aan de schroef als functie van de snelheidsgraad J, waarbij we rekening houden met het gegeven toerental n en de onbekende diameter D. De diameter kunnen we wegstrepen uit de vergelijking: $\frac{K_Q}{J^5} = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} = \frac{Q n^3}{\rho V_S^5 (1-w)^5} = 0.152$.

Deze capaciteit van het schip kunnen we plotten in het B 4-70 diagram waaruit we kunnen aflezen welke K_Q de schroef kan opnemen voor een aantal verschillende spoedwaardes P/D.



Uit de aansnijdingen van scheepscapaciteit en schroef-opname vermogen volgt voor elke P/D het werkpunt J en de bijbehorende K_T en η_0 . Het optimale rendement worden dan

gevonden voor een P/D van ca. 0.9. Uit het bijbehorende werkpunt $J=0.69$ volgt dan een optimale schroefdiameter van 6.5 m bij een rendement $\eta_0 = 0.66$.

Omdat de minimale J waarde 0.73 is, moet er dus een iets grotere J waarde (en dus kleinere diameter) dan optimaal gekozen worden: $J=0.73$. Bij deze J waarde is het rendement echter nog steeds 0.66. Bij deze J waarde van 0.73 horen de volgende schroefeigenschappen:

P/D	ca. 1.0
K_T	0.18
K_Q	.032
J	0.73
η_0	0.66
A_E/A_0	0.70 (het is immers een B4.70 schroef)

Het meest gegeven foute antwoord is dat men de J-waarde bepaalde a.d. hand van de maximale diameter, en voor die J-waarde dan een spoedverhouding nam met het hoogste rendement. Hierbij ga je er dan aan voorbij dat de spoed het toerental bepaald, en dus niet vrij te kiezen is omdat dit toerental geeist werd bij 108 rpm. Voor elke spoedwaarde zal het werkpunt van de schroef afzonderlijk bepaald moeten worden!

Beoordeling:

- 1-w vergeten: -1 pt
- Geen argumentatie en geen lijnen in B4-70 diagram: -2 pt.
- Rekenfout: -1 pt
- Goede A_E/A_0 : +0.5
- Verkeerde K_t of K_q : -1
- verkeerde K_Q : uit P_d gehaald: -0.5
- Op K_q/J_5 gezocht en verder alles fout: 2 pt
- Op K_t/J_4 , K_t/J_2 gezocht en verder alles goed: 2 pt
- Op K_q/J_3 gezocht en verder alles goed: 3 pt.

- b. Uit de beschouwing onder a blijkt dat we nauwelijks of geen rendement inleveren t.o.v. een iets grotere propeller. We zouden dus geen andere schroef hoeven te kiezen.

Beoordeling:

- Kiezen voor een grotere diameter omdat dit altijd het beste is: +1.5 (dit is overigens niet waar als het toerental een gegeven is).

- c. Stel, de weerstand van het schip bij 19 kn is R_{19} . De weerstand bij 25 kn is dan:

$$R_{25} = R_{19} + c \left(\frac{25}{19} \right)^2. \text{ Omdat } c \text{ niet gegeven is, mogen we veronderstellen dat de constante}$$

in de weerstand $R_{19} = cV^2$ een zelfde waarde heeft als in de relatie voor de snelheid van 19 tot 25 kn. Dit betekent dat de dimensieloze stuwkracht die het schip van de schroef vraagt constant blijft over het snelheidsbereik:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{R}{(1-t)n^2D^4} \frac{n^2D^2}{V_a^2} = \frac{R}{(1-t)D^2V_s^2(1-w)^2}. \text{ Omdat } \frac{R}{V_s^2} = c \text{ en de diameter en}$$

interactiefactoren t en w ook niet veranderen, blijft de dimensieloos gevraagde stuwkracht van het schip hetzelfde, en daarmee de optimale spoed diameter verhouding en schroefdiameter.

Beoordeling:

- Weerstand goed uitgerekend mbv T_{19} maar rest niet goed: 0.7 pt.

- d. De aanname dat de weerstand kwadratisch toeneemt is voor representatieve lengtes van containerschepen en bijbehorende Froudegetallen niet realistisch omdat er nog een niet-verwaarloosbare golfmakende weerstand bij komt, die humps en hollows in de weerstandscoefficient laat zien, hetgeen duidt op een weerstand die niet evenredig toeneemt met de snelheid in het kwadraat.

Beoordeling:

Beredeneerd dat dit voor de wrijvingsweerstand en vormweerstand geldt, maar vergeten dat er ook nog een golfmakende weerstand is die met een hogere macht van V toeneemt: 1 pt.

Vraag 3

Het actuator disk model is een veel gebruikte modellering van een schroef in een stroming.

- Leg uit wat de actuator disk theorie inhoudt en welke aannames en vereenvoudigingen hierin gebruikt worden (3 ptn)
- De reder is geïnteresseerd in het verbeteren van het voortstuwingsrendement ivm de al maar stijgende brandstof prijzen. Kunt u aan de hand van het ideaal rendement iets zeggen over de verbetering van het open water rendement van een propeller met een straalbuis?

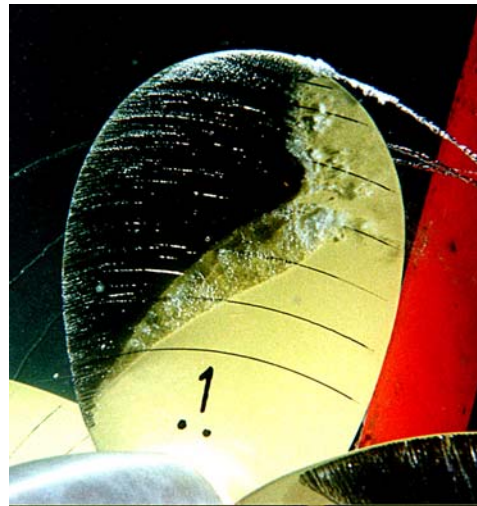
De generieke vorm van het ideaal rendement voor een schroef in een straalbuis is:

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \tau C_T}}$$

waarbij τ = stuwkrachtsverhouding $\frac{T_P}{T}$ (stuwkracht propeller / totale stuwkracht) en C_T de stuwkracht coefficient. U mag bij dit schip uitgaan van een $C_T = 1.1$ (3 ptn)

U heeft CFD (Computational Fluid Dynamics) berekeningen uit laten voeren aan een B4-85 propeller in een uniforme aanstroming. De spoedverhouding $P_{0.7}/D=1.0$. De snelheidsgraad J van de propeller bedraagt $J=0.7$. Hieruit krijgt u een gedetailleerde drukverdeling aangeleverd over het oppervlak van de schroef. De berekeningen zijn uitgevoerd bij een willekeurige omgevingsdruk die 90% van de atmosferische druk p_0 blijkt te zijn ($p_0=10^5$ Pa). De minimale drukcoëfficiënt C_p blijkt een waarde van -1.2 te hebben, en treedt op nabij de Leading Edge van het propeller blad op ca. 90% van de straal.

- Bij welke uniforme aanstroomsnelheid verwacht u cavitatie inceptie? (3 ptn)
- U laat vervolgens proeven uitvoeren bij een cavitatie getal $\sigma=0.7$ en neemt vliescavitatie waar die achter het vlies opbreekt en als wolkencavitatie over de rest van het blad met de stroming meegenomen wordt. Kunt u dit als vertegenwoordiger van de reder accepteren? Kunt u bovendien aangeven of deze situatie een effect zal hebben op de stuwkracht en het rendement? (3 ptn)



- Welke maatregelen kunt u bedenken om de onder d geschetste situatie te verbeteren? (2 ptn)

Antwoorden

- Actuator disk theorie behelst een eenvoudig model van een schroef in een uniforme stroming. De schroef wordt voorgesteld door een schijf (disk) die een axiale kracht uitoefent op een wrijvingsloze stroming. De kracht uit zich door een druksprong over de schijf. In het model worden alleen axiale beschouwingen meegenomen (dus geen radiale en tangentele snelheden en fluxen). De propeller wordt voorgesteld als een krachterschijf

met uniforme verdeling van de krachten (oneindig aantal bladen, uniforme radiale belasting).

Beoordeling:

Wanneer geen goede omschrijving, maar wel begrip getoond van de vereenvoudingen en aannames: 1.5 pt.

- b. We kunnen het open water rendement schrijven als:

$\eta_0 = \eta_i - c$, waarbij c is ca. 0.17 voor een open B-series propeller in het werkpunt.

Globaal mogen we stellen dat een verbetering in ideaal rendement proportioneel is met een verandering in open water rendement. Als we schattingen aannemen voor de bijdrage van de straalbuis in τ van 0.8 en 0.6 (zoals ook in diktaat genoemd), kunnen we de verbetering in open water rendement schatten voor een C_t van 1.1:

τ	η_i	η_i/η_i ($\tau=1$)
1	.82	1
.8	.84	1.03
.6	.87	1.07

Beoordeling:

Als genoemd wordt dat axiale verliezen afnemen door straalbuis en dat als gevolg van lager toerental de visceuze verliezen afnemen, maar wel extra visceuze verliezen door straalbuis: 3 ptn. Wanneer afname rotatieverliezen ook nog genoemd: +1 bonuspunt.

- c. Voor cavitatie inceptie (het moment waarop de schroef begint te caviteren), nemen we

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} = -C_p$$

aan dat $p = p_v$. Hieruit volgt dat

waarbij $p = 0.9 p_{atm}$

Substitutie levert een snelheid van $V = 12.13 \text{ m/s}$

Beoordeling: Bij gebruik van C_p ipv σ : geen punten

Bij gebruik van verkeerde p_{atm} : -1.5

Bij gebruik van verkeerde p_v : -1

Formules goed, maar rekenfoutje: -.5

- d. Wolken-cavitatie is vaak erosief als de wolken vlak boven het bladoppervlak imploderen. De vorm van wolken-cavitatie op de foto is derhalve niet acceptabel. Bovendien zorgt deze uitgebreide vliescavitatie waarschijnlijk ook voor grote drukfluctuaties en levert derhalve trillingsgevaar op. Dit is niet acceptabel voor de reder.

Vliescavitatie en wolken-cavitatie hebben pas bij grote extensie effect op rendement en stuwkracht. De cavitatie op de foto zal dit waarschijnlijk inderdaad tonen.

Beoordeling: Beargumenteerd afwijzen: 2pt

goede beschrijving van effect op rendement: +1 pt.

- e. Maatregelen om dit te verminderen zijn dus belasting omlaag of cav. getal omhoog:
- langzamer gaan varen (leidt tot een hogere C_{pmin})
 - grotere prop. diameter
 - groter bladoppervlak

Op het niveau van de schroefgeometrie kunnen nog maatregelen genomen worden om de drukverdeling op het schroefblad vlakker te maken (dus voorkomen van zuigpiek t.p.v. de Leading Edge van het blad. Ik verwacht echter niet dat deze detailmaatregelen genoemd worden.

Beoordeling: 1 punt per goed benoemde maatregel a t/m b. Bonus van plus 1 als detailmaatregel schroefontwerp genoemd wordt.

