

Tentamen weerstand en voortstuwing

Vakcode: MT527

Datum: 17 Jan. 2011

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!
5. Het maximaal te behalen aantal punten per deelvraag staat aan het eind van de vraag tussen haakjes aangegeven.

Gegeven fysische parameters en omgevingsparameters:

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

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

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

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

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

1 Mijl = 1852 m

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

Bijlagen: 2 maal diagram met open water karakteristiek B4.70 propeller

Sterkte toegewenst

Vraag 1:

Van oorsprong 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 wél 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.



Figure 1 Uw tentamen onderwerp is tot op heden nog te bewonderen in Bremerhaven. De cavitatie tunnel is als oorlogsbuit meegenomen naar University of Newcastle upon Tyne.

- Bij het testen van modellen van normale schepen om de weerstand te bepalen wordt er gebruik gemaakt van een aantal schaalregels. Wat zijn deze schaalregels en geef een fysische interpretatie. Deze schaalregels gebruikt men voor het bepalen van de modelsnelheid. Leg uit hoe dit in zijn werk gaat. (4 ptn)
- Zou u deze schaalregels ook toepassen voor het testen van onderzeeërs die zeer ver onder het wateroppervlak varen? (1 pt)
- Voor de weerstandskarakteristiek van de onderzeeër neemt u de volgende relatie: $R = cV^2$. Vindt u dit een fysisch verantwoorde karakteristiek? Op hoeveel snelheden zou u deze onderzeeër testen voor een weestands- en voorstuwingsproef? (3 ptn)
- Als men een weerstand wil uitrekenen met een model met een wrijvingsloze vloeistof, hoe ziet de weerstandskarakteristiek uit vraag c) er dan uit? (1 pt)
- Hoe wordt uit modeltesten het effectieve volgstreamgetal bepaald en is dit gelijk aan het nominale volgstreamgetal? (3 ptn)
- Bij 5 knoop heeft de (ware grootte) onderzeeër een weerstand van 18.98 kN (onderwater). Als de onderzeeër op maximum vermogen gaat varen, bij welke P/D haalt de dubbelschroefs

onderzeeër de maximale snelheid? Gegeven is dat het toerental 300 rpm is en de diameter van de schroeven 2m. Voor het volgroomgetal en zoggetal neemt u 0,15 respectievelijk 0,1. Gebruik het meegeleverde B4-70 schroefdiagram¹. Geef naast (historisch correcte) maximum snelheid zowel J en P/D. *Hint: we zijn nu niet op zoek naar het optimum rendement!* (5 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/scheepslengte 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 massastraagheidskrachten tot zwaartekracht aan in de stroming, het Reynoldsgetal geeft de verhouding tussen massastraagheidskrachten en visceuze krachten aan:

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

waarbij de subscripts 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.

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

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

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 schaaffecten te introduceren. Schaaffecten worden dus wel geïntroduceerd bij de verschaling 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: slordig gebruik van begrippen: -1 tot -3 ptn.

Geen fysische interpretatie van Fn en Rn: -1 pt.

- b. Diep onder water is de romp ver verwijderd van het wateroppervlak. De drukverstoring is hier verwaarloosbaar klein (drukverstoring van een varend lichaam neemt af met $1/r^2$ voor grote r, waarbij r de afstand is van het zwaartepunt van het lichaam tot het punt waarin we de druk willen weten). Hiermee is de golfvorming verwaarloosbaar klein waardoor er een

¹ We zijn op de hoogte van het feit dat de Wageningen B-serie in 1945 nog niet bestond en dat de bewuste onderzeeër een paar drie-blads schroeven heeft.

verwaarloosbare integraal van drukkrachten door het vloeistof oppervlak op het schip werkt. Hierdoor speelt de zwaartekracht (belangrijke kracht in golfvorming) geen rol meer. Froude schaling heeft hier dus geen betekenis meer. Rn schaling blijft relevant, maar geeft onpraktische modelsnelheden.

- c. Dit is inderdaad fysisch verantwoord, omdat de visceuze weerstand de enige weerstandscomponent is die overblijft (drifthoek nul aangenomen). En de visceuze weerstand kan uitgedrukt worden als: $R_v = (1+k) C_f \frac{1}{2} \rho V^2 S$, waarbij de wrijvingscoëfficiënt voor een kleine variatie in Rn (dus V), nagenoeg constant is (wrijvingslijn). De coëfficiënt c mag dus constant verondersteld worden, waardoor 1 snelheid genoeg is voor de bepaling hiervan. Beoordeling: Vraag over snelheden niet beantwoord of fout: -1 pt.
- d. Als er geen golfmakende weerstand en geen visceuze weerstand is, is de totale weerstand gelijk aan nul!
- e. Gegeven hier zijn zowel T en D voor een willekeurige snelheid ($R = cV^2$) als ook het toerental en vermogen (Q, n en D) bij de gevraagde maximale snelheid. Hiermee kunnen we voor deze max snelheid de K_Q uitrekenen ($K_Q=0.0629$). We zoeken nu de P/D verhouding of het werkpunt J waarbij de K_Q van de schroef uit het diagram (capability), overeenkomt met de door het schip gevraagde waarden (demand). We doen dit via de gevraagde stuwkracht K_t/J^2 op onderstaande wijze:

$$P_s = \frac{3240}{2} = 1620kW$$

$$n = 300rpm$$

$$w = 0,15$$

$$t = 0,1$$

$$D = 2m$$

$$\text{Bij } V=5 \text{ knoop } R=9727, \text{ dwz } R = cV_s^2 \Leftrightarrow c = \frac{R}{V_s^2} = \frac{9727}{(5 \cdot 1852/3600)^2} = 1470$$

Maximale snelheid bij een gegeven vermogen en toerental, K_Q is bekend:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} = \frac{P_D}{2\pi \rho n^3 D^5} = \frac{1620000}{2\pi \cdot 1025 \left(\frac{300}{60}\right)^3 \cdot 2^5} = 0,06289 -$$

Tevens kan met een K_T - J^2 kromme tekenen. Omdat $R \propto V_s^2$ val V_s er dus uit.

$$K_T = \left(\frac{K_T}{J^2}\right) J^2 = \left(\frac{T}{\rho n^2 D^4} \frac{n^2 D^2}{V_A^2}\right) J^2 = \left(\frac{\frac{c}{2} V_s^2}{\rho n^2 D^4 V_s^2 (1-w)^2}\right) J^2 = \left(\frac{\frac{c}{2}}{\rho (1-t)(1-w)^2 D^2}\right) J^2$$

$$K_T = \left(\frac{\frac{2869}{2}}{1025(1-0,1)(1-0,15)^2 \cdot 2^2}\right) J^2 = 0,5381J^2$$

Teken zowel de *constante* K_Q als de tweede graads K_T - J^2 lijn in het diagram.

Bij elke P/D aansnijding voor K_t hoort een K_Q . Eentje daarvan is gelijk aan 0,06289, dit is bij $P/D=1.3$ en $J=0.75$.

$$J = \frac{V_s(1-w)}{nD} \Leftrightarrow V_s = \frac{JnD}{1-0,15} = \frac{0,75 \cdot \left(\frac{300}{60}\right) \cdot 2}{1-0,15} = 17,15 \text{ kts}$$

Beoordeling:

Methode goed maar rekenfouten: 4.5 ptn

Methode goed betekent dat men zich realiseert dat K_q en K_t/J^2 gebruikt moeten worden.

Wel op K_t/J^2 gezocht maar geen rekening gehouden met K_q gelijkheid (demand en capability) en J maximaal genomen: 3 pt

Wel op K_t/J^2 gezocht maar geen of verkeerde argumentatie voor keuze aansnijding: 2

Gerealiseerd dat K_q gebruikt moet worden en goed uitgerekend: 1

w en/of t vergeten: -1 pt.

Gerekend met enkelschroef schip ipv dubbelschroef: -0.2

Vraag 2

Uit de actuator disk theorie blijkt een aantal parameters en fysische verschijnselen die van invloed zijn op het rendement.

- a) Bespreek drie componenten of fysische verschijnselen die van invloed zijn op het rendement van de actuator disk; het zgn. "ideaal rendement η_i " (2 ptn)

Het ideaal rendement wordt gegeven door:

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \tau C_T}}, \text{ waarbij } \tau = \frac{T_P}{T} \text{ en } C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_P}$$

Drie componenten die dus van invloed zijn op het ideaal rendement zijn de stuwkracht T , de snelheid V en het oppervlak van de schroefschijf A_P .

- b) Om een maximaal rendement te verkrijgen, moeten deze componenten worden geoptimaliseerd. Hoe moeten deze componenten worden gevarieerd opdat een maximale rendement wordt behaald. (2 ptn)

C_T moet zo klein mogelijk zijn, dus T zo klein mogelijk, V , zo groot mogelijk en A_P eveneens zo groot mogelijk. Men zou ook vol kunnen houden dat τ klein mogelijk zou moeten zijn. Dit betekent echter een grote belasting op de straalbuis. Deze is echter eindig, daar de straalbuis op een gegeven ogenblik gaat overtrekken en zijn rendement verliest.

Beoordeling: Per goed benoemde component 0.7 pt tot een max van 2 ptn

- c) Geef aan hoe de verliestermen in het open water rendement veranderen door het toepassen van een ducted propeller, t.o.v. een propeller met dezelfde diameter zonder duct (3 ptn)

De verliestermen van een propeller zonder duct zijn:

- *axiaal kinetische verliezen. Dezen zijn verrekend in het ideaal rendement en worden uitsluitend bepaald door de belastingscoëfficiënt C_T .*
- *rotatie verliezen (en evt. radiale kinetische) verliezen.*
- *wrijvingsverliezen*
- *verliezen t.g.v. niet uniforme snelheidsverdeling in het zog van de propeller*

Door het toepassen van een duct of straalbuis (bij gegeven stuwkracht) wordt de propeller belasting lager, omdat de straalbuis een deel van de totale stuwkracht overneemt. Hierdoor worden de axiaal kinetische verliezen kleiner.

Omdat de duct werkt als een eindplaat op het propeller blad, zullen de afgaande tipwervels ook minder sterk zijn, waardoor de rotatie verliezen kleiner zullen worden. De wrijvingsverliezen van de schroef zullen ook iets kleiner worden omdat de propeller t.g.v. de

verminderde stuwkracht bij een iets lager toerental kunnen draaien. De buis zelf heeft echter extra wrijvingsweerstand.

Beoordeling: Bij het noemen van het verminderen van axiale verliezen en goede argumentatie: 3 ptn
bij noemen met argumentatie van vermindering rotatieverliezen en/of wrijvingsverliezen: 1
bonuspunt extra per verliespost (max. 2 bonuspunten)
Bij alleen benoemen van rotatieverliezen 1.5 pt.

- d) Teken in het bijgevoegde B-serie diagram de lijn voor het ideaal rendement voor de $P/D=1.4$ schroef. Waar treedt de grootste afwijking op tussen ideaal rendement en open water rendement? Wat is hiervan de reden? (3 ptn)

We kunnen C_T herleiden tot

$$C_T = \frac{8 K_T}{\pi J^2}. \text{ Daarmee kunnen we } \eta_i \text{ uitdrukken in } K_T \text{ en } J, \text{ en kunnen we haar dus in het}$$

open water diagram plotten voor een gegeven propeller, waarvan we voor elke J , de K_T waarde kunnen aflezen. De grootste afwijking tussen ideaal rendement en open water rendement treedt op bij de lichtste belasting (waarbij $K_T \approx 0$). Hier gaat het ideaal rendement naar 1 (geen wrijvingskoppel en geïnduceerd koppel, maar ook geen stuwkracht, terwijl het open water rendement negatief wordt (wel wrijvingskoppel).

Beoordeling: Bij verkeerd punt $J=1.5$ ($\eta_i = 1$) -0.2 pt als verder vraag goed is beantwoord

Bij goede figuur, maar niet benoemen waar afwijking tussen η_i en η_0 en wat oorzaak hiervan is: -0.5 pt.

Bij goede formules en aanpak maar geen schets in schroefdiagram en geen positie max afwijking met verklaring: 1.5 pt.

- e) Kunt u aan de hand van dit diagram aangeven welke bladoppervlakverhouding A_e/A_0 deze propeller heeft? (1 pt)

Welke blad oppervlak verhouding zou een B4.70 propeller hebben? Zie diktaat voor definitie van de naamgeving.

091029

Vraag 3

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.

- a. Leid een dimensieloos criterium af voor het optreden van cavitatie inceptie. Bij welke uniforme aanstroomsnelheid verwacht u cavitatie inceptie? (3 ptn)
- b. Bij uitvoering van de cavitatie inceptieproeven op de propeller blijkt dat de cav. inceptie snelheid afwijkt van wat u berekent heeft. Welke redenen kunt u hiervoor bedenken? (het antwoord dat dit aan een fout in uw berekening ligt levert geen punten op, maar moet wel als een reële mogelijkheid beschouwd worden). (2 ptn)

- c. 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)
- d. Welke schaalwetten moeten we in acht nemen bij het uitvoeren van een cavitatie proef? Gevraagd wordt een antwoord in dimensieloze kentallen met fysische achtergrond (3 ptn)

Antwoorden:

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

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

dat $p=p_v$. Hieruit volgt dat

$$\text{waarbij } p = 0.9 p_{atm}$$

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

Bij afwezig zijn van afleiding: -0.5 pt

- b. De volgende mogelijke oorzaken kunnen genoemd worden

- verkeerde referentiedruk p_0
- schaaleffecten op cav. inceptie t.g.v. gebrek aan kernen
- verkeerd ingestelde conditie waardoor drukverloop anders is
- verkeerde p_v genomen omdat temperatuur bijv. niet is gemeten of verkeerd is gemeten.
- fout of onzekerheid in CFD berekeningen

Beoordeling: bij 4 van de vijf opties 2 pt. Voor elke goede reden 0.5 pt.

ontbreken van kernen wordt beloond met 1.5 pt.

- c. Wolkencavitatie over het blad is zeer dikwijls erosief. Het voorafgaande vlies en de dynamiek hiervan zal bovendien tot flinke drukfluctuaties leiden die het schip aanstoten zodat er trillingshinder optreedt. Bij grote cav. volumes zal bovendien de stuwkracht aangetast worden. Dit gebeurt echter pas bij grote cav. extensies (bijv. cav. lengte > 0.5 koorde). De stuwkracht wordt het eerst aangetast. Omdat het koppel aanvankelijk in gelijke mate wordt aangetast, blijft het rendement nog even gelijk. Bij erger wordende cav. zal ook het rendement aangetast worden.

Beoordeling:

Bij benoemen erosie en trillingshinder 1.5 tot 2.5 pt (afhankelijk van omschrijving).

Bij niet noemen effect op stuwkracht en later rendement: -0.5

bij niet benoemen trillingen of erosie: -1

- d. Bij het uitvoeren van een cavitatieproef is het in eerste instantie belangrijk dat de "weerstand" ($p-p_v$) tegen cavitatie goed omgeschaald wordt! Dit doen we via het cavitatie getal σ . Daarnaast is het belangrijk dat de verhouding van massastraagheidskrachten en visceuze krachten goed omgeschaald wordt (Rn). En eveneens is de verticale drukgradiënt belangrijk voor de verandering die het schroefblad ondervindt als het rond draait. Deze verticale drukgradiënt wordt bepaald door verhouding van omgevingsdruk p en hydrostatische druk ρgh . Deze verhouding is goed geschaald wanneer aan het F_n voldaan wordt (pag 255-256 diktaat)

Beoordeling: Als alleen cav. getal genoemd wordt: 2 ptn. Wanneer ook F_n genoemd wordt +1 pt.

Wanneer ook R_n genoemd wordt +1 pt. Alleen F_n : 1.5 pt

Benoemen geometrische en kinematische gelijkvormigheid: +0.5