

Reduction of underwater noise from ships by propeller surface roughness

TRV 2019/119633

## Slutrapport

### Sammanfattning

Detta projekt har syftat till att ge underlag för en kommersialisering av tekniken att använda ytråhet för att minska bullerproblem hos fartygspropellrar; potentialen för detta hade demonstrerats i ett tidigare projekt finansierat av Vinnova (RoughProp, 2018-04085). Studierna har här utvidgats till att utveckla kunskapen kring hur ett ytråhetsmönster ska appliceras på en propeller för att balansera positiv effekt gentemot buller och negativ effekt på prestanda; verkan har studerats på en propeller i fullskala över en bred operationsprofil; effekter av variationer i inflöde har simulerats; experimentella studier har genomförts för att verifiera slutsatser; och en förstudie har gjorts där olika möjligheter att producera propellrar med ytråhet kommersiellt undersökts.

Resultaten är överlag positiva med en signifikant reduktion av kavitationsinsättning (i medel 22-35% för det studerade fallet) med måttlig minskning i verkningsgrad (1,4-1,8%) över propellerns fulla operationsprofil; detta gäller både i experiment och i simuleringar under testförhållanden. Vi har inte funnit några indikationer på att dessa resultat skulle försämrats för en propeller som opererar bakom ett fartyg. En relativt enkel och kostnadseffektiv lösning för att påföra ytråhetelement på en kommersiellt tillverkad propeller har identifierats. En plan för hur designmetodikerna ska implementeras hos Kongsberg har utvecklats och ytterligare simuleringar och experiment har planerats för att validera effekten på flera typer av kommersiella propellrar.

### Bakgrund

Utstrålat undervattensbuller (URN, efter engelskans Underwater Radiated Noise) från sjöfart har fått ökad uppmärksamhet som ett miljöproblem (Götz 2009, Jalkanen 2018). Det finns tydliga bevis på skadlig påverkan från URN på marint djurliv, framför allt relaterat till beteende förändringar, födointag, maskning av ljud och fysiologisk stress. För att möta dessa problem, drev man på IMO under 2014 igenom riktlinjer för att minska buller från kommersiell sjöfart. I dessa noterar man att en stor del, möjligen den största delen, av utstrålat undervattensbuller orsakas av propellerkavitation, och framför allt från spetsvirvelkavitation (TVC, efter engelskans Tip Vortex Cavitation) (IMO 2014, Blom 2017, Bosschers 2018). Åtgärder inom propellerdesign att minska buller står i regel i konflikt med att öka verkningsgraden, så högre krav på minskat buller riskerar att öka utsläppen till luft, som t.ex. växthusgaser, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> och partiklar, genom att fartygets bränsleförbrukning ökar.

I den första fasen av RoughProp, ett projekt finansierat av Vinnova, demonstrerades möjligheterna att minska TVC, och därmed buller, genom att applicera en liten mängd ytråhet på propellern.

Slutsatserna baserades på både experimentella resultat och välupplösta simuleringar och visade på vilken typ av ytråhet som hade goda effekter och var på bladet den skulle placeras för att på bästa sätt balansera effekterna på TVC och på propellerns verkningsgrad.

Detta projekt formulerades för att utvidga och applicera resultaten från Vinnova-RoughProp till kommersiella propellrar och studera effekten i fullskala vid relevanta operationspunkter för propellern.

#### Målsättningar

- Mål 1. Vidareutveckla förståelse och metodik för att bestämma var på propellerbladet ytråhet ska appliceras för att balansera positiva effekter på buller och negativa effekter på verkningsgrad.
- Mål 2. Analysera effekter av att propellern kommer att verka i kölvattnet av ett fartygsskrov. Detta påverkar både genom att propellerbladet kommer att verka med varierande last under ett varv och att det finns en hög nivå av turbulens i strömningen in till propellern.
- Mål 3. Avgöra om det finns en risk att få negativa effekter av kavitation kring ytråhetselementen, och om så är fallet, hur ska de bäst utformas.
- Mål 4. Validera resultaten experimentellt och undersöka hur tekniken kan implementeras i en kommersiell tillverkningsprocess.

#### Utfört arbete

Projektet har genomförts av en post-doc vid Chalmers tillsammans med seniora forskare på Chalmers och Kongsberg. Detaljer kring de studier som gjorts finns rapporterat genom publikationer och rapporteringen här hålls därför på en översiktligt nivå.

Simuleringar har genomförts främst vid Chalmers för ett akademiskt fall, en vinge med profiler inspirerade av propellrar, och två kommersiella propellrar från olika applikationsområden, en som man skulle kunna kalla en tyst propeller (t.ex. för en färja) och en standarddesign.

Propellrarna har studerats vid olika konditioner, både vid designkondition samt vid lätt och tungt lastade off-design förhållanden. Anledningen är att den spetsvirvel som vi vill påverka formas på olika ställen och på olika sätt vid olika lastkonditioner. Bäst placeringen av ytråhet blir därmed olika i de olika fallen. Vidare har både modellskala, med möjlighet till experimentell validering, och fullskala studerats. I samtliga fall har propellrarna studerats i så kallad open water-förhållanden, dvs utan närvaron av ett skrov; detta för att förenkla de redan krävande simuleringarna samt underlätta jämförelsen med experiment.

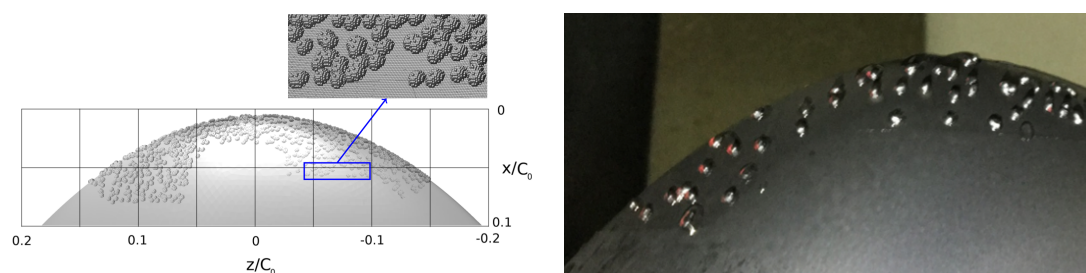
Simuleringar med skrov och propeller påbörjades inom projektet men vi lyckades inte bli klara med detta inom projekttiden. Den effekt vi förväntade oss att se genom denna simulering är dock

väsentligen inkluderad genom att vi studerat olika lastkonditioner enligt vad som nämnts ovan; varje propellerblad kommer att arbeta under varierande last under ett varv i skrovets kölvatten.

Vingen har använts i simuleringar där vi modellerat ett turbulent inflöde. Då ytråheten påverkar turbulensnivåerna nära ytan vilket i sin tur påverkar virvelbildningen är det av vikt att huruvida turbulens i vattnet som kommer in till propellern kommer att störa ytråhetens verkan. Utöver den lastvariation som nämnts ovan för ett propellerblad bakom skrovet så arbetar propellern även i en turbulent miljö.

Experiment har genomförts i kavitationstunneln på Kongsberg Hydrodynamic Research Centre. Samma propellrar som simulerats har använts även här och försök har gjorts både med släta propellrar och två olika mönster/typer av ytråhet.

Olika möjligheter att införliva ytråhet i Kongsbergs tillverkningsprocess har undersökts. Kontakt med olika underleverantörer har tagits kring möjliga material och applikationstekniker. Vidare har arbete med implementation i Kongsbergs designprocess initierats.



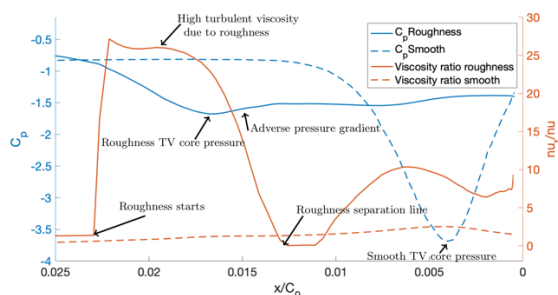
Figur 1. Exempel på ytråhet på vingen i simuleringar (vänster) och experiment (höger).

## Resultat

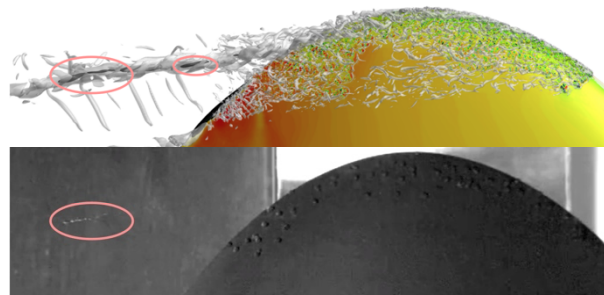
Överlag visar våra resultat att tekniken fungerar relativt. Data från våra studier visar dock att prestandaförlusten preliminärt är lite högre än önskvärt. Inga ökade problem med kavitation kring ytråhetselement har noterats. Detta indikerar att tekniken troligen inte kommer att användas för fartyg som inte har särskilda behov för tyst gång, antingen genom att ha särskilt höga krav på tyst gång och sen kavitationsinsättning eller har visat sig ha bullerproblem som behöver korrigeras. Dessa applikationer är dock tillräckligt intressanta för att undersöka möjligheten att prova tekniken, speciellt när det gäller retro-fit. Ytterligare erfarenhet genom utvecklingsarbete eller fartyg i drift kan dock förändra denna slutsats om man t.ex. ser att en mindre yta med ytråhet kan användas.

Under projektets gång har vi förbättrat vår förståelse för hur ytråheten påverkar propellerns spetsvirvel och dess förväntade bullerverkan. En viktig effekt är att ytråheten skapar ett kraftigare turbulent gränsskikt vilket hindrar strömningen längs propellerns yta att bygga upp virveln; följden blir en mer diffus initiering och utveckling av virveln med ett relativt konstant tryck i kärnan. I normalfallet (med

slät propelleryta) så kommer istället en koncentrerad virvelkärna bildas som hela tiden matas med rörelsemängd från ytströmningen och ger en trycksänka strax efter att virveln lämnat bladet. Detta förlopp är indikerat i figur 2 för vingen, och med ett exempel från både simulering och experiment i figur 3; notera att i bilden från simuleringen är icke-kaviterande virvelstrukturer visualiserade som inte syns i den experimentella bilden.

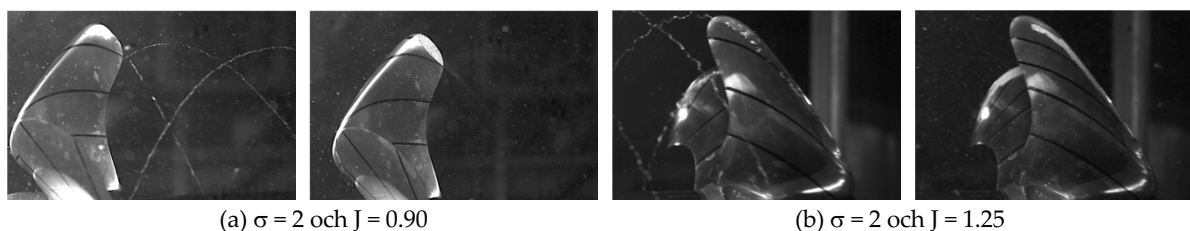


Figur 2. Utvecklingen av turbulens respektive tryck över vingens spets

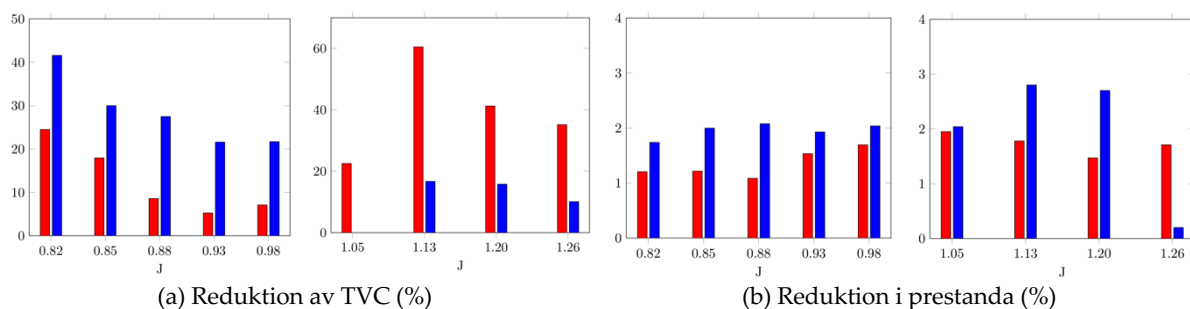


Figur 3. Jämförelse mellan simuleringsresultat (överst) och experiment (underst); de inringade strukturerna visar på kavitationsformering i spetsvirveln.

Ser vi istället till de faktiska resultaten för en propeller, så finns dessa exemplifierade i figurer 4 och 5. Visuellt syns en tydligt minskad spetsvivelkavitation bakom propellern med ytråhet (den högra bilden i (a) och (b)). Här har olika ytråhetsmönster applicerats på de två sidorna av bladet (synligt på spetsen av den högra bilden i (a) och längs framkanten i (b)) eftersom virveln formas på olika sätt i de två operationspunkterna. I figur 5 visas numeriska (röda staplar) och experimentella (blå staplar) prediktioner av kavitationsinsättning (dvs när kavitationen börjar uppstå i virveln) och prestandan hos propellern. Man vill här se höga värden för reduktionen av TVC och små värden för reduktion i prestanda. Simuleringar och experiment ger överlag samma tendenser även om absolutvärdena skiljer sig, framför allt när det gäller TVC. Det är värt att notera att de experimentella observationerna är behäftade med stora osäkerheter, framför allt när det gäller lätt lastade propellrar (d.v.s. för värdena till höger för högre  $J$ ). I medeltal noterar vi en försenad kavitationsinsättning med 21% och en försämrad prestanda med 1,5%. Den försenade insättningen är signifikant och ett mycket positivt resultat, men målsättningen var att inte försämra prestanda med mer än 1%. Ytterligare en positiv observation är att effekten är som störst utanför designpunkten vilket gör att en propeller med denna teknik blir mer robust gentemot hur fartyget framförs. Simuleringar har även gjorts i fullskala med en i medel försenad kavitationsinsättning med 22% och en försämrad prestanda med 1,4%.



Figur 4. Experimentella observationer av TVC efter den släta propellern (till vänster i respektive par) och den med ytråhet (till höger). Ruta (a) visar ett fall nära designpunkten och ruta (b) en lätt lastad propeller.



Figur 5. Minskning av (a) TVC och (b) prestanda för olika operationspunkter för propellern med ytråhet jämfört med den släta; simuleringar med röda staplar och experiment med blå staplar.

Studierna kring effekten av inflödesturbulens visar på två saker: dels försvagas virveln redan i normalfallet något och dels påverkas inte effekten av ytråhet ytterligare. Simuleringar genomfördes för vingen vid två olika nivåer av inflödesturbulens och för både en slät vinge och en med ytråhet. Resultaten redovisas i tabell 1. För den släta vingen fås en förbättring kring TVC med 10-12% när inflödet är turbulent, dock med en signifikant försämrad prestanda på ungefär 4%. För vingen med ytråhet försenas TVC med ytterligare ca 30% medan prestandaförändringen är i stort sett oförändrad jämfört med den släta vingen.

Cases	Smooth			Tripped		
	Uniform	I=3%	I=4.5%	Uniform	I=3%	I=4.5%
$\sigma_i$	—	-10.4	-12.3	-29.4	-37.4	-40.4
$C_l$	—	-0.6	-1.2	-1.0	-0.6	-0.2
$C_d$	—	3.3	2.7	3.9	3.7	3.5

Tabell 1. Förändringar i kavitationsinsättning, lyftkraft och motståndskraft för vingen i olika fall av inflödesturbulens.

För att skala upp detta till ett försök på en riktig propeller har marknaden undersökts vad gäller lämpliga komponenter (storlek, material och applikationsprocess) och vi har funnit leverantörer som har cylinderstift i rätt dimensioner i både rostfritt stål och den bronslegering som används i propellar. I bägge fallen går det att svetsa på dessa med standardtekniker. Detta utgör en rimlig process i ett initialt skede.

## Framtida arbete

Ytterligare några steg behöver göras för att Kongsbergs ska kunna erbjuda en kund tekniken. Arbete är planerat för 2021 kring att implementera design- och utvärderingstekniker i Kongsbergs design-verktyg. Vidare är ytterligare experimentella försök schemalagda för hösten 2021, då geometriskt nedskalade versioner av ovannämnda stift kommer att användas för att kunna testa en identisk representation av hur det kan komma att se ut i verkligheten.

Ett viktigt resultat som saknas är hur det utstrålade bullret påverkas av att man installerar en propeller med ytråhet. Det går idag inte att prediktera buller med tillräcklig noggrannhet för att med säkerhet detektera effekten av ytråhet, här saknas det väsentlig forskning och utveckling. I projektet har istället TVC och kavitationsinsättning använts som proxy för hur buller påverkas.

## Publikationslista

Publikationer som direkt härör från forskning inom projektet:

Svennberg, U., Asnaghi, A., & Bensow, R.E. (2021). *On the Effect of Free Stream Fluctuations on a Wing-Tip Vortex Formation and Development*. Submitted to 34<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics. Washington DC, USA.

Bensow, R.E., Asnaghi, A. & Svennberg, U. (2021). *Controlled Surface Roughness Application in Tip Vortex Mitigation and Inception Delay*. 11<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation. Daejeon, Korea.

Svennberg, U., Asnaghi, A., Gustafsson, R., & Bensow, R.E. (2020). *New Insights into Roughness Applications in Tip Vortex Cavitation Inception Mitigation*. 33<sup>rd</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics. Osaka, Japan.

Publikationer med i huvudsak resultat från Vinnova-RoughProp som vidareutvecklats och publicerat under projektetiden:

Asnaghi, A., Svennberg, U., Gustafsson, R., & Bensow, R. (2021). Propeller tip vortex mitigation by roughness application. *Applied Ocean Research*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102449>

Asnaghi, A., Svennberg, U., Gustafsson, R., & Bensow, R. (2020). Investigations of Tip Vortex Mitigation By Using Roughness. *Physics of Fluids*, 32(6). <https://doi.org/10.1063/5.0009622>

Svennberg, U., Asnaghi, A., Gustafsson, R., & Bensow, R. (2020). Experimental analysis of tip vortex cavitation mitigation by controlled surface roughness. *Journal of Hydrodynamics*, 20(73). <https://doi.org/10.1007/s42241-020-0073-6>