

Fartygs undervattensbuller

Åtgärder för att minska negativ miljöpåverkan



© Transportstyrelsen

Sjö- och luftfart

Miljösektionen

Rapporten finns tillgänglig på Transportstyrelsens webbplats www.transportstyrelsen.se

Dnr/Beteckning 2024-001495

ISBN [\[Klicka och skriv\]](#)

Författare Julia Winroth och Torbjörn Johansson, IVL Svenska Miljöinstitutet

Månad År [\[Klicka och skriv\]](#)

Eftertryck tillåts med angivande av källa.

Förord

Denna rapport har tagits fram som en del av Transportstyrelsens arbete med att följa upp sjöfartens miljöpåverkan. Rapportens syfte är att ge en syntes av kunskapsläget om undervattensbuller från sjöfarten. Rapporten sammanställer resultat från vetenskaplig litteratur, pågående forsknings- och utvecklingsprojekt samt myndigheters och organisationers initiativ och publikationer. Syftet är att göra befintlig kunskap mer tillgänglig och belysa möjliga åtgärder för att minska undervattensbuller i svenska vatten.

Rapporten är framtagen av IVL Svenska Miljöinstitutet på uppdrag av Transportstyrelsen. Arbetet har genomförts av Julia Winroth och Torbjörn Johansson med bidrag från kollegor och i samarbete med Transportstyrelsens Marie Hankanen, Erland Lettevall och Isabella Hadenius. Transportstyrelsen vill särskilt tacka de forskare, experter och sakkunniga som bidragit med underlag och insikter under arbetets gång.

Arbetet med denna rapport är medfinansierat av Havs- och vattenmyndigheten genom anslag 1:11 Åtgärder för havs- och vattenmiljö.

[Klicka här och skriv stad, månad och år]

[Klicka och skriv namn]
[Klicka och skriv titel]

[Klicka och skriv namn]
[Klicka och skriv titel]

Sammanfattning

Undervattensbuller från kommersiell sjöfart utgör en betydande och långsiktig miljöbelastning i marina miljöer. Bullret överlappar i frekvens med ljud som marina organismer använder för kommunikation, orientering och reproduktion. Detta kan leda till maskering av djurens kommunikation, beteendeförändringar samt försämrad livsmiljö. I svenska havsområden med hög fartygstrafik är sjöfarten den dominerande källan till kontinuerligt lågfrekvent undervattensbuller. Nationella bedömningar av havsmiljön visar att god miljöstatus inte uppnås för denna belastning, vilket motiverar ett fortsatt och mer samlat arbete med att minska bulleremissionerna från fartyg.

Syftet med rapporten är att sammanställa kunskapsläget kring undervattensbuller från kommersiell sjöfart, med fokus på möjliga tekniska och operativa åtgärder. Rapporten ska fungera som ett kunskapsunderlag för myndigheter och andra aktörer i arbetet med att minska sjöfartens miljöpåverkan från undervattensbuller.

Rapporten bygger på en genomgång av vetenskaplig litteratur, tekniska rapporter, internationella riktlinjer samt pågående forsknings- och utvecklingsprojekt. Tyngdpunkten ligger på kontinuerligt undervattensbuller från fartyg, där propellerkavitation i de flesta fall är den dominerande bullerkällan vid normala driftsförhållanden. Andra viktiga bidrag är strukturöverfört buller från motorer och maskineri, särskilt vid låga hastigheter.

Tekniska åtgärder, alternativa framdrivningslösningar och operativa åtgärder kan bidra till minskat buller, ofta med tydliga kopplingar till energieffektivitet och minskad klimatpåverkan. Samtidigt konstateras att det i många fall saknas systematiska fullskalestudier som kvantifierar åtgärdernas faktiska effekt på utstrålat undervattensbuller under realistiska driftsförhållanden.

För att stärka både teknikutveckling och förvaltning betonas behovet av förbättrad mätinfrastruktur, standardiserade metoder och ökad transparens i modellering av fartygsbuller. Långsiktigt opererade mätstationer kan ge viktig återkoppling mellan mätningar och modellutveckling, förutsatt att data kan tillgängliggöras på ett säkert sätt.

Ekonomiska incitament lyfts fram som en avgörande drivkraft i den konkurrensutsatta sjöfartssektorn. Erfarenheter visar att tydliga och långsiktiga incitament, särskilt när de samverkar med energieffektivisering och klimatnytta, kan påskynda införandet av bullerreducerande åtgärder.

Avslutningsvis konstateras att internationellt samarbete är en förutsättning för ett effektivt arbete med att minska undervattensbuller från sjöfarten. Sjöfarten är global och nationella åtgärder får begränsad effekt om de inte samordnas. Ett aktivt svenskt deltagande i internationella processer är därför centralt för både miljönytta och långsiktig förvaltningskapacitet.

Summary

Underwater noise from commercial shipping constitutes a significant and long-term environmental pressure in marine environments. The noise overlaps in frequency with sounds used by marine organisms for communication, orientation and reproduction. This can lead to acoustic masking of animal communication, behavioral changes and degradation of habitat quality. Commercial shipping is the dominant source of continuous low-frequency underwater noise in areas with high shipping intensity. National assessments of the marine environment show that good environmental status is not achieved for this pressure, which motivates continued and more coordinated efforts to reduce noise emissions from ships.

The purpose of this report is to compile the current state of knowledge on underwater noise from commercial shipping, with a focus on potential technical and operational mitigation measures. The report is intended to serve as a knowledge base for authorities and other stakeholders in efforts to reduce the environmental impact of underwater noise from shipping.

The report is based on a review of scientific literature, technical reports, international guidelines, and ongoing research and development projects. The main focus is on continuous underwater noise from ships, where propeller cavitation is in most cases the dominant noise source under normal operating conditions. Other important contributions include structure-borne noise from engines and machinery, particularly at low speeds.

Technical measures, alternative propulsion solutions and operational measures can contribute to noise reduction, often with clear links to energy efficiency and reduced climate impact. At the same time, it is noted that systematic full-scale studies quantifying the actual effects of mitigation measures on radiated underwater noise under realistic operating conditions are often lacking.

To strengthen both technological development and environmental management, the report highlights the need for improved measurement infrastructure, standardised methods and increased transparency in ship noise modelling. Long-term operated measurement stations can provide

important feedback between measurements and model development, provided that data can be made available in a secure manner.

Economic incentives are highlighted as a key driver in the highly competitive shipping sector. Experience shows that clear and long-term incentives, particularly when aligned with energy efficiency and climate benefits, can accelerate the implementation of noise-reducing measures.

Finally, it is concluded that international cooperation is a prerequisite for effective efforts to reduce underwater noise from shipping. Shipping is a global activity, and national measures have limited effect unless they are internationally coordinated. Active Swedish participation in international processes is therefore essential for both environmental effectiveness and long-term management capacity.

Begrepp och förkortningar

Begrepp	Förklaring
<i>Automatic Identification System</i> (AIS)	Ett maritimt identifierings- och spårningssystem som använder VHF-baserade transpondrar på fartyg för att visa och dela information om fartyget och dess position, kurs och fart. Uppgifterna kan tas emot av andra fartyg, kuststationer, satelliter och används för sjösäkerhet, trafikledning och övervakning av fartygsrörelser.
<i>Cavitation Inception Speed</i> (CIS)	Den hastighet genom vattnet där kavitation uppkommer. På svenska används ibland termen kavitationsinsättning.
<i>Closest Point of Approach</i> (CPA)	Vid mätning av buller från fartyg passerar fartyget längs en i förväg bestämd mätbana. CPA är den punkt där fartyget är som närmast mätuppställningen.
Direktivitet	Även riktverkan. Beskriver hur en ljudkälla fördelar ljudenergin i olika riktningar. En ljudkälla som fördelar ljudet lika i alla riktningar kallas <i>omnidirektionell</i> , medan en som inte gör det kallas <i>direktiv</i> .
Havsmiljödirektivet (HMD)	Havsmiljödirektivet eller <i>Marine Strategy Framework Directive</i> (MSFD), är EU:s gemensamma regelverk för havsmiljön. Det är införlivat i svensk lagstiftning via havsmiljöförordningen. Syftet med havsmiljödirektivet är att uppnå eller upprätthålla en god miljöstatus, eller <i>Good Environmental Status</i> (GES), i Europas havsområden. Ett av de elva ämnesområdena som

	utvärderas handlar om undervattensbuller.
Kavitation	Kavitation uppstår när trycket i en vätska sjunker under ångtrycket, vilket leder till att ångbubblor bildas och sedan kollapsar i propellerflödet när trycket stiger. Denna kollaps sker ofta mycket snabbt och genererar tryckvågor som sprider sig som ljud i vattnet. Bullrets karaktär beror på vilken typ av kavitation som förekommer.
Kavitationsinsättning	Den hastighet genom vattnet där kavitation uppkommer. Den engelska termen används ofta, <i>Cavitation inception speed</i> med tillhörande förkortning CIS.
Källstyrka (eng. <i>Source level</i>)	Ljudtrycksnivån på en meters avstånd från en ljudkälla, vanligtvis baserad på mätningar på längre avstånd med korrektion för propageringsförluster. Källstyrka kan anges som bredbandig totalnivå eller som en funktion av frekvens. Enheten för källstyrka är dB re 1 μPa m.
<i>Lloyd's mirror</i> -effekten	<i>Lloyd's mirror</i> -effekten är en effekt av interferens mellan ljud som utbreder sig direkt från en källa och ljud från samma källa som reflekterats i vattenytan. Effekten är starkt destruktiv för källor nära ytan, låga infallsvinklar till mottagaren och låga frekvenser. Vid högre frekvenser kan effekten variera mellan konstruktiv och destruktiv interferens.
<i>Level of Onset of Biological adverse Effects</i> (LOBE)	Ett tröskelvärde som definierar när bullernivåer riskerar att orsaka biologiskt betydande negativa

effekter. Genom att relatera detta till en arts habitatkarta och en bullerkarta för samma område kan den andel av ett område som överskrider tröskeln beräknas. LOBE används på så sätt som indikator på ekologisk påverkan och avgör om god miljöstatus uppnås enligt havsmiljödirektivet.

Maskering

Maskering är ett akustiskt begrepp som används inom många olika områden. I den här rapporten används det för att beskriva när mänskligt buller gör det svårare för djur att höra och använda sina egna ljud för kommunikation, födosök och andra funktioner. Hur stort kommunikationsutrymme djur förlorar går att beräkna eftersom det finns ett direkt samband mellan mängden buller de utsätts för och det avstånd på vilket de kan uppfatta ljudsignaler.

Underwater Radiated Noise (URN)

Utstrålat undervattensbuller från en bullerkälla, till exempel ett fartyg.

Innehållsförteckning

FARTYGS UNDERVATTENSBULLER.....	1
ÅTGÄRDER FÖR ATT MINSKA NEGATIV MILJÖPÅVERKAN.....	1
FÖRORD.....	3
SAMMANFATTNING	4
SUMMARY	5
BEGREPP OCH FÖRKORTNINGAR.....	7
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	10
1 INLEDNING	12
1.1 Bakgrund.....	12
1.2 Syfte och frågeställningar	13
1.3 Metod	13
1.4 Avgränsningar.....	13
2 FARTYGS UNDERVATTENSBULLER PÅVERKAR DET MARINA DJURLIVET	14
2.1 Fartygs undervattensbuller är en betydande källa till störning	14
2.2 Undervattensbuller påverkar viktiga djurarter i svenska vatten	15
3 FARTYGS UNDERVATTENSBULLER, KÄLLOR OCH FAKTORER	18
3.1 Ett fartygs undervattensbuller har flera källor	19
3.2 Ljudnivåer och spektra för fartygs undervattensbuller varierar stort	21
3.3 Flera faktorer påverkar ett fartygs utstrålade undervattensbuller	23
3.3.1 Propeller och interaktion med vaken	23
3.3.2 Drivlina och energikälla	24
3.3.3 Hastighet	25
3.3.4 Trim, gångläge, lastfall, sjögång.....	25
3.3.5 Skydd mot påväxt med ultraljud	26
4 VERKTYG FÖR ATT KVANTIFIERA FARTYGS UNDERVATTENSBULLER	26
4.1 Mätningar av fartygs undervattensbuller	26
4.1.1 Dedikerade mätningars	27
4.1.2 Klassningar av fartygs undervattensbuller	28
4.1.3 Opportunistiska och autonoma mätningar	28
4.1.4 Ombordmätningar.....	30
4.2 Modeller av bullret i havsmiljön.....	31
4.2.1 Källmodeller	31
4.2.2 Ljudutbredning under ytan.....	33

4.2.3	Bullerkartläggning	34
4.3	Simuleringsverktyg för teknisk utveckling	36
5	ÅTGÄRDER SOM KAN MINSKA FARTYGS UNDERVATTENSBULLER....	37
5.1	Operativa åtgärder	37
5.1.1	Reducerad hastighet	37
5.1.2	Ruttplanering och -optimering	41
5.1.3	Skrov- och propellerunderhåll	42
5.2	Tekniska åtgärder	43
5.2.1	Propellerdesign och optimering av strömningsfältet	43
5.2.2	Minskning av skrovets friktionsmotstånd	46
5.2.3	Vindassistans	47
5.2.4	Motor och strukturvibrationer.....	47
5.2.5	Konversion till eldrift	48
5.2.6	Vertikala framdrivningssystem	49
5.2.7	Vattenjet	50
5.2.8	Störning av kavitationsfenomen	50
6	VÄGEN MOT EN MINSKNING AV FARTYGS UNDERVATTENSBULLER OCH DESS MILJÖPÅVERKAN	50
6.1	Ge fartygsägare incitament att arbeta med sitt undervattensbuller	51
6.1.1	Tydliggör miljöeffekterna av fartygs undervattensbuller och målbilden	51
6.1.2	Ekonomiska incitament	52
6.1.3	Tydliggör synergier mellan åtgärder för energieffektivitet och undervattensbuller	52
6.2	Möjliggörare för utveckling och styrning	53
6.2.1	Teknikutveckling och innovation.....	53
6.2.2	Förvaltning och uppföljning	54
6.3	När nationella åtgärder inte räcker – behovet av internationell samverkan	55
7	SAMMANSTÄLLNING OCH SLUTSATSER FRÅN SEMINARIUM OM ÅTGÄRDER MOT FARTYGS UNDERVATTENSBULLER, 17 MARS 2026 .	58
	REFERENSER.....	59

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Undervattensljud utgör en viktig informationsbärare för många vattenlevande djur. Fiskar, marina däggdjur och ryggradslösa djur använder ljud för att orientera sig, kommunicera, lokalisera byten och undvika rovdjur. Vissa mänskliga aktiviteter skapar ljud under ytan, också kallat antropogent undervattensbuller, som förändrar det naturliga ljudlandskapet och riskerar att störa biologiska funktioner och som påverkar vattenlevande arters beteende, fysiologi och habitatutnyttjande.

Den kommersiella sjöfarten är den största källan till kontinuerligt undervattensbuller på den globala skalan. Samtidigt utgör handelsflottan en ryggrad i det transportarbete som vårt moderna samhälle kräver med varor som behöver fraktas över stora avstånd på relativt kort tid. Fartyg genererar undervattensbuller främst genom kavitationsfenomen vid propellern och genom att motor och andra installationer ombord skapar vibrationer i stommen som sprids till skrovet och ut i vattnet. Det finns en mängd åtgärder som kan minska fartygs undervattensbuller, diverse tekniska lösningar vid nybyggnation och ombyggnationer, och operationella åtgärder under drift.

I Sverige hanteras undervattensbuller som en del av arbetet med att uppnå god miljöstatus enligt havsmiljödirektivet. Havs- och vattenmyndigheten ansvarar för uppföljning och bedömning av miljötillståndet i svenska havsbassänger, inklusive kontinuerligt undervattensbuller från sjöfart. Bedömningen sker i relation till fastställda miljökvalitetsnormer och utgör ett centralt underlag i den återkommande förvaltningscykeln, där statusbedömningar följs av arbete med åtgärdsprogram för havsmiljön.

Samtidigt hanteras frågor om undervattensbuller från sjöfart på internationell nivå inom flera parallella processer. Inom den Internationella sjöfartsorganisationen (International Maritime Organization, IMO) har frivilliga riktlinjer för att minska fartygs undervattensbuller antagits (IMO, 2023). I anslutning till riktlinjerna bedrivs en så kallad *experience building phase*, vars syfte är att samla erfarenheter från tillämpning av riktlinjerna och bygga kunskap. Det pågår även arbete inom EU, regionala havskonventioner och andra internationella samarbeten.

Även sjöfartens arbete med energieffektivitet har under de senaste decennierna intensifierats som en följd av internationella klimatmål och de styrmedel som utvecklats inom IMO för att minska utsläpp av växthusgaser från sjöfarten, samtidigt som energieffektivisering blivit ett viktigt medel för att begränsa bränslekostnader. Åtgärder för att öka energieffektiviteten kan samtidigt påverka fartygens undervattensbuller, både positivt och negativt,

vilket gör det angeläget att analysera samspelet mellan klimat- och bulleråtgärder.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna rapport är att sammanställa och tillgängliggöra befintlig kunskap om fartygs undervattensbuller. Rapporten ska utgöra ett underlag för Transportstyrelsens fortsatta arbete och en preliminär version ingår som diskussionsmaterial för ett seminarium som arrangeras i mars 2026.

Rapporten ska belysa vilka tekniska och operationella åtgärder som kan minska undervattensbuller i svenskt territorialvatten och, där det är möjligt, i svensk ekonomisk zon. Åtgärderna ska beskrivas utifrån ett kort och ett längre tidsperspektiv samt med fokus på eventuella synergier med andra miljömål, till exempel energieffektivitet.

Rapporten riktar sig främst till Havs- och vattenmyndigheten, Sjöfartsverket, Transportstyrelsen, länsstyrelsen, kommuner och hamnar, lärosäten och miljöorganisationer, sjöfartsbranschen, företag inom forskning och innovation inom undervattensbuller, samt andra beslutsfattare och myndigheter. Den ska besvara frågor som:

- Vilka tekniska och operationella lösningar kan minska undervattensbullret, på kort respektive lång sikt?
- Hur kan åtgärder för bullerreduktion samordnas med andra miljömål, till exempel lägre bränsleförbrukning?

1.3 Metod

Utgångspunkten för arbetet med denna rapport har varit IVL:s interna litteraturlöslager som sedan utökats under arbetet med nypublicerat material. Vår ambition har varit att även lyfta in den senaste kunskapen från pågående initiativ och projekt. I arbetet har generativa AI-verktyg använts som stöd för språklig bearbetning och strukturering av text. Författarna ansvarar fullt ut för innehållet.

Som del i Transportstyrelsens arbete med denna kunskapssammanställning ingår även ett seminarium med branschföreträdare och intressenter. En sammanställning av resultatet kommer även ingå i den publicerade rapporten. (Deltagarna kommer få ta del av en preliminär version av denna rapport som diskussionsunderlag).

1.4 Avgränsningar

I uppdraget från Transportstyrelsen ingick att göra en uppdelning av åtgärdsförslag på kort sikt och lång sikt, samt belysa konkreta förslag för svenskt territorialvatten och ekonomisk zon. Då få av de identifierade

studierna tydligt redovisar sådana tidsperspektiv eller geografiska avgränsningar har detta endast kunnat uppfyllas i begränsad omfattning.

2 Fartygs undervattensbuller påverkar det marina djurlivet

Detta kapitel ger en översiktlig bakgrund till hur fartygs och fritidsbåtars undervattensbuller kan påverka olika grupper av marina djur i svenska havsområden. Fokus ligger på övergripande påverkningsmekanismer och ekologisk betydelse, medan art-exemplen är illustrativa snarare än heltäckande.

2.1 Fartygs undervattensbuller är en betydande källa till störning

Den globala marina ljudbilden har förändrats under de senaste århundradena, i takt med industrialisering och ökad mänsklig aktivitet (Duarte *m.fl.*, 2021). Ett dynamiskt och naturligt ljudlandskap har förändrats mot att i ökande grad domineras av kontinuerligt, lågfrekvent buller från mänskliga källor, främst sjöfarten. Många marina arter är beroende av ljud för att orientera sig, kommunicera och hitta föda, och den ökade bullernivån kan påverka dessa funktioner på individ- och populationsnivå.

En omfattande översikt av undervattensbuller och dess påverkan på marina organismer med fokus på svenska förhållanden återfinns i Johansson *m.fl.* (2023). Rapporten beskriver dokumenterade effekter för olika arter och typ av påverkan, till exempel beteendeförändringar som flyktbeteende, försämrat födosök, tillfällig hörselnedsättning, samt typiska ljudnivåer och relevanta frekvensområden för bullerpåverkan på olika arter och artgrupper. Sårbarheten för undervattensbuller varierar mellan djurgrupper och arter beroende på skillnader i hörselsystem och vilka frekvensområden de kan uppfatta. Negativa effekter uppstår i första hand när bullrets frekvensinnehåll överlappar artens hörselområde och överstiger dess detektionströskel, men även arter som inte har några traditionella hörselreceptorer kan påverkas av undervattensbuller. Därtill tillkommer att bullerkänsligheten kan variera mellan olika livsstadier, tider på året och typ av aktivitet, exempelvis jakt eller lek.

Statusen för marina arter och livsmiljöer i svenska hav är i många fall kritisk. Enligt Havs- och vattenmyndighetens *Marin strategi för Nordsjön och Östersjön 2024–2029* (2024b) uppnår huvuddelen av de utvärderade arterna av marina däggdjur, fisk och sjöfåglar inte god bevarandestatus, det vill säga, vi har inte livskraftiga marina ekosystem. Särskilt allvarig är situationen för tumlare där ingen av de tre populationerna som förekommer i

svenska vatten bedöms ha god status. Den akut hotade Östersjöpopulationen är mycket liten och fortsatt utsatt för en kombination av påverkan, bland annat bifångst, miljögifter, försämrade bytesfisktillgång och bullerstörningar. Även för sälar och flera fiskarter är läget ansträngt.

Undervattensbuller verkar inte isolerat, utan som en av flera samtidiga belastningar på ekosystemen. För arter som redan är utsatta för andra stressfaktorer kan buller ytterligare minska möjligheterna till överlevnad. Effekter på individ- och populationsnivå kan därigenom i förlängningen påverka ekosystemens struktur och funktion. Både i regionala bedömningar och vetenskapliga översikter diskuteras att sådana förändringar potentiellt kan få betydelse för ekosystemtjänster, exempelvis tillgången på biomassa och fiskeresurser, även om osäkerheterna på systemnivå fortfarande är betydande (Maruf och Gullett, 2022; OSPAR, 2023).

Havs- och vattenmyndigheten har under 2024 för första gången genomfört en samlad bedömning av miljötillståndet i svenska havsbassänger med avseende på kontinuerligt lågfrekvent undervattensbuller, inom ramen för uppföljningen av god miljöstatus enligt havsmiljödirektivet (Havs- och vattenmyndigheten, 2024a). Indikatorn bygger på det så kallade överskottsbullret, det vill säga den del av ljudmiljön som tillförs av mänskliga aktiviteter och som överskrider den naturliga bakgrunden. Modellerade nivåer jämförs mot tröskelvärden som antas kunna medföra maskeringseffekter och i förlängningen potentiell påverkan på populationsnivå. Bedömningen visar att många svenska havsbassänger inte uppnår god miljöstatus för denna indikator. Särskilt tydligt är att havsbassänger med hög fartygstrafik inte klarar de uppsatta tröskelvärdena och myndigheten konstaterar vidare att det är mycket osannolikt att läget förbättras under kommande förvaltningscykel. Bedömningen visar att kontinuerligt undervattensbuller från sjöfart utgör en betydande och långsiktig belastning i flera svenska havsbassänger. Detta motiverar ansträngningar med att identifiera, analysera och följa upp tekniska och operativa åtgärder som kan minska fartygens bulleremissioner.

2.2 Undervattensbuller påverkar viktiga djurarter i svenska vatten

I detta avsnitt redovisas exempel på hur undervattensbuller kan påverka utvalda djurarter i svenska vatten. Genomgången är illustrativ snarare än heltäckande.

Torsk (Gadus morhua) spelar en central roll både i ekosystemen och för människan. Torsk både hör och vokaliserar lågfrekventa ljud och använder akustisk kommunikation, främst i samband med lek. Sierra-Flores m.fl. (2015) kunde visa att torsk uppfattar antropogent ljud i frekvensområdet 100–1000 Hz och att upprepade bullerexponering under lekperioden kan

minska äggproduktion och befruktningsgrad och minska mängden livskraftiga embryon. Stanley m.fl. (2017) fann att de lekplatser man gjorde inspelningar vid hade förhöjda nivåer av lågfrekvent undervattensljud från fartygstrafik och man kunde visa att det effektiva kommunikationsutrymmet för torsk krympte vilket kan få negativa konsekvenser för arten, speciellt under biologiskt känsliga perioder. Under lekperioden uppvisar dessutom torsk en hög platsbundenhet vilket gör att möjligheten att undvika buller genom simma undan kan vara begränsad (McQueen m.fl., 2024). En sammanställning av bullers påverkan på fiskars reproduktion kom fram till att kontinuerligt buller, typiskt från intensiv fartygstrafik, har större potential att maskera kommunikation än intermittent buller, som kan ge tillfälliga pauser med minskad maskering (de Jong m.fl., 2020). Dessutom bedöms fiskarter som använder lågfrekventa kommunikationssignaler, såsom torsk, vara mer sårbara. Sammantaget bedöms den akustiska miljön för torsk vara så viktig för svensk havsförvaltning att ett specifikt gränsvärde för god miljöstatus tillämpas i områden där torsklek kan förekomma (Havs- och vattenmyndigheten, 2024b).

Sill (strömming i Östersjön) (Clupea harengus) är en av de viktigaste nyckelarterna i svenska kustekosystem och spelar en avgörande roll som bytesfisk för rovfisk, säl och sjöfågel. Arten är också särskilt känslig för undervattensbuller eftersom den, liksom andra sillfiskar, har en förbindelse mellan simblåsan och innerörat som ger god hörselförmåga i låga och medelhöga frekvenser (Popper och Hawkins, 2019). I en tidig experimentell studie visade Schwarz och Greer (1984) att stillahavssill (*Clupea pallasii*) uppvisade undvikandebeteende vid exponering för lågfrekvent fartygsbuller (0–3000 Hz, 75–112 dB re 1 µPa) från större fartyg med konstant fart. Däremot observerades ingen tydlig respons på högfrekventa ljud från sonar och ekolod, vilket överensstämmer med artens begränsade hörsel i dessa frekvensområden.

Tumlare (Phocoena phocoena) är den enda valarten som lever permanent i svenska vatten och utgör en viktig del av kustekosystemen. Arten har höga krav på födotillgång och en låg reproduktionstakt, vilket gör den särskilt känslig för mänsklig påverkan. Enligt Artdatabanken är bifångst i fiskeredskap idag det allvarligaste hotet (SLU Artdatabanken, 2025). Miljögifter utgör fortsatt en betydande belastning, särskilt för Östersjöpopulationen. Tumlare har ett brett hörselspann från cirka 200 Hz till 180 kHz, med högst känslighet i det högfrekventa området mellan cirka 100 och 140 kHz, vilket sammanfaller med frekvensen för artens ekolokaliseringsklick (Kastelein m.fl., 2002; El-Dairi, Outinen och Kankaanpää, 2024). Trots att fartygsbuller domineras av lågfrekventa ljud, har fleras studier visat negativ påverkan på tumlare. Wisniewska m.fl. (2018) dokumenterade att buller från passerande fartyg kan leda till avbrutet

födosök och ökad simaktivitet hos tumlare, och Tougaard m.fl. (2015) konstaterade att tumlare påverkas av kontinuerligt lågfrekvent buller. Pigeault m.fl. (2024) visar att tumlare i Nordsjön tenderar att undvika områden med tät fartygstrafik. Koschinski m.fl. (2024) sammanfattar att kontinuerligt undervattensbuller kan ge upphov till beteenderesponser hos tumlare, inklusive maskering av biologiskt viktiga ljud och störningar i födosöksbeteende. Upprepad eller frekvent störning kan därigenom få konsekvenser för individers energibalans, vilket i förlängningen kan påverka överlevnad och reproduktion. Den lilla och akut hotade Östersjöpopulationen är särskilt sårbar för ytterligare störningar, inklusive undervattensbuller.

Mört (*Rutilus rutilus*) och abborre (*Perca fluviatilis*) är två vanliga arter i svenska kust- och sötvattensmiljöer. Mört har en välutvecklad hörsel med hög känslighet för lågfrekvent ljud (500–1000 Hz) men även viss känslighet för ljud upp till flera kHz. Abborre har en lägre känslighet för ljudtryck, och ett mer begränsat frekvensspann med högst känslighet runt 200–300 Hz och en övre gräns runt 300–1000 Hz. Denna skillnad beror på att mört, till skillnad från abborre, har en koppling mellan simblåsa och innerörat, vilket ökar känsligheten för ljudtryck (Amoser, Wysocki och Ladich, 2004). Studier som specifikt behandlar effekter av större fartygs undervattensbuller på dessa arter saknas, men i en svensk studie undersöktes hur de två arterna reagerade på buller från en utombordsmotor under födosök i en naturlig havsvik. Resultaten visade att mört reagerade tydligare och mer konsekvent på buller, med färre födosöksförsök, längre tid innan den vågade sig ut i det öppna och större tidsandel i vegetationen. Abborre minskade initialt sitt födosök vid buller men verkade sedan vänja sig vid situationen (Magnhagen, Johansson och Sigray, 2017).

Lerstubb (*Pomatoschistus microps*) är en liten kustlevande fisk som förekommer i grunda marina och brackvattensmiljöer längs den svenska västkusten, Öresund och i södra Östersjön. Arten använder akustisk kommunikation i samband med parning och studier av den närbesläktade arten bergstubb (*Pomatoschistus pictus*) visar att den producerar lågfrekventa ljud, i intervallet cirka 80–300 Hz, och har högst hörkänslighet i det området mellan ungefär 15 och 400 Hz (Popper och Hawkins, 2012). Laboriestudier visar att kontinuerlig exponering för bredbandigt undervattensbuller med frekvensinnehåll som liknar båt- eller fartygsbuller kan fördröja lekbeteenden och minska sannolikheten för lek (Blom m.fl., 2019). En senare studie visade att samma bullerexponering kan påverka tidiga livsstadier av arten. Kontinuerligt buller resulterade i en romläggning som innehöll färre ägg och täckte en mindre yta. Dessutom kläcktes de larver som exponerats under sin rom-tid, med mindre gulesäcksvolym

jämfört med de som exponerats för intermittent buller eller kontrollbehandling, det vill säga inget tillsatt buller (Blom *m.fl.*, 2024).

Pågående nationella projekt

Det nya forskningsprojektet ShrimpNoise tar sig an en av de största kunskapsluckorna inom undervattensbuller: hur ryggradslösa djur som kräftdjur, musslor och ostron påverkas av ljud från fartyg och fritidsbåtar i kustnära miljöer. Trots att ryggradslösa djur dominerar den marina faunan och har centrala ekologiska funktioner saknar vi idag insikter om hur de påverkas av undervattensbuller. I projektet utvecklas en ny typ av försöksuppställning som gör det möjligt att styra och återskapa fartygs- och båt ljud på ett kontrollerat och naturtroget sätt. Målet är att ta fram tillförlitliga data om vilka ljudnivåer som leder till beteendeförändringar eller andra effekter hos typiska arter som både har ett stort ekologiskt, och ett direkt ekonomiskt värde. Denna typ av kunskap saknas till stor del i dag men är nödvändig för att bedöma risker, utvärdera åtgärder och utforma effektiva förvaltningsstrategier, exempelvis hastighetsbegränsningar och regleringar i skyddade områden. ShrimpNoise finansieras av Formas och genomförs under 2025–2029 av IVL Svenska Miljöinstitutet i samarbete med Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet.

Det regionala projektet 8+fjordar¹ är ett pågående initiativ som syftar till att öka kunskapen om mänsklig påverkan i grunda fjord- och kustmiljöer, med fokus på bland annat fritidsbåtstrafik och biologiska värden. Inom ramen för projektet pågår akustisk övervakning i utvalda fjordar. Parallellt samlas biologiska data in, bland annat genom registrering av tumlarförekomst samt uppföljning av fiskrörelser med telemetri där man spårar märkta individer som är försedda med akustiska sändare. Projektet har även kommunicerat ambitioner att på sikt undersöka och testa olika lösningar för bullerdämpning i grunda vikar (Blom, 2025). Inom ramen för 8+fjordar görs även omfattande kombinationsförsök i kontrollerad laboratoriemiljö på hur fisk i olika levnadsstadier påverkas av både småbåts- och fartygstrafik, där undervattensbuller är en av faktorerna som undersöks. Projektet finansieras av Havs- och vattenmyndigheten och studierna genomförs under 2025–2026 av SLU Svenska Lantbruksuniversitetet och IVL Svenska Miljöinstitutet.

3 Fartygs undervattensbuller, källor och faktorer

Kapitlet syftar till att ge läsaren en förståelse för mekanismer som genererar undervattensbuller, karaktäristika hos bullret, samt vilka faktorer som påverkar hur mycket ett fartyg bullrar. För en beskrivning av

¹ <https://www.8fjordar.se/>

undervattensljud från olika naturliga och mänskliga källor hänvisas läsaren till Erbe m.fl. (2025).

3.1 Ett fartygs undervattensbuller har flera källor

Undervattensbuller från fartyg uppstår genom flera samtidiga mekanismer som tillsammans formar det ljud som strålar ut i vattnet. De viktigaste bidragen kommer från propellern, motor- och maskinrelaterade vibrationer samt från vattenflöden runt skrov (Possenti *m.fl.*, 2024). Vilken mekanism som dominerar beror i hög grad på fartygets hastighet, last- och driftförhållanden samt på utformning av framdrivningssystemet.

Propellern är en central källa till undervattensbuller från fartyg och bullret är i hög grad kopplat till förekomst av kavitation. De genererade ljudnivåerna och deras spektrala sammansättning påverkas av propellerns utformning, det vattenflöde som propellern verkar i, rotationshastighet, belastning och interaktion med flödet.

Kavitation kan generera både tonalt och bredbandigt ljud som dominerar ljudbilden över ett brett frekvensområde. Förekomsten av kavitation beror förenklat på belastningen på propellern, vilken i de flesta fall relaterar till fartygets hastighet genom vattnet (Noise Control Engineering, LLC, 2025). Den hastighet vid vilken kavitation först uppträder benämns *Cavitation Inception Speed* (CIS). För hastigheter över CIS dominerar vanligen kavitationsrelaterade processer det utstrålade undervattensbullret (IMO, 2023). Även under CIS kan propellern bidra till buller, bland annat genom tonala komponenter kopplade till bladpassagefrekvensen och dess övertoner (Portillo-Juan *m.fl.*, 2024).

Förutom att generera undervattensbuller som sprids ut i den marina miljön, bidrar kavitation också till ombordbuller på fartyget. Kavitation förekommer i olika former som var och en har olika beroende av propellerns geometri, belastning och det flöde som den verkar i. Vid svåra fall kan kavitation även leda till erosionsskador på propellerblad och roder (Ross, 1976). Traditionellt är det främst denna typ av kavitation som man försökt undvika vid propellerdesign, inte nödvändigtvis det undervattensbuller som sprids ut i miljön.

Det finns flera olika typer av **kavitation**:

Tip vortex-kavitation bildas vid spetsen av propellerbladen och kan observeras visuellt som spiralformade bubblor bakom bladet. Den kan uppstå och kvarstå över ett brett fartintervall där ljudet förskjuts i frekvens med ökande varvtal. Anses generellt som den viktigaste typen av kavitation för undervattensbuller.

Sheet-kavitation kan vid hög belastning täcka stora delar av propellerbladets framsida, där undertryck skapas. Den kan ge kraftigt, ibland tonalt, buller.

Cloud-kavitation är en typ av kavitation där sammanhängande moln av ångbubblor bildas och kollapsar samtidigt i propellerflödet. Detta ger upphov till kortvariga, bredbandiga ljudpulser med hög intensitet. Förekommer främst vid hög propellerbelastning och höga hastigheter.

Hub vortex-kavitation uppstår bakom propellern, nära navet. Den kan minskas med t.ex. *Propeller Boss Cap Fins*.

Att fastställa vilka kavitationsformer som är aktiva vid ett givet drifttillstånd för ett fullskaligt fartyg i verklig drift är förenat med betydande svårigheter. I praktiken baseras sådana analyser främst på höghastighetsfotografi, följt av manuell klassificering av observerade kavitationsmönster (Salinas, 2014; Smith *m.fl.*, 2025).

Utöver kavitation kan propellerbuller även innehålla bidrag från flödesinducerade vibrationer i propellerbladen, så kallad *propeller singing*, vilket kan ge upphov till distinkta tonala ljud vid vissa driftförhållanden (Ross, 1976).

Buller från motor och annat ombordmaskineri dominerar ofta vid låga hastigheter. Detta buller skapas när vibrationer från motor, hjälpmaskin, generator, växellåda etcetera, leds ner i vattnet via strukturvibrationer i skrov och via drivlinan. Bullret har ofta starka tonala komponenter vid låga frekvenser. De kan ofta ses vid multiplar av olika rotationsvarvtal, såsom motorvarvtalet, motorns tändfrekvens och rotationsvarvtal i växlar och drev, och är en viktig del av fartygs undervattensbuller (Hasenpflug *m.fl.*, 2021; Cruz *m.fl.*, 2022; Smith och Rigby, 2022; Helal, Fragasso och Moro, 2024).

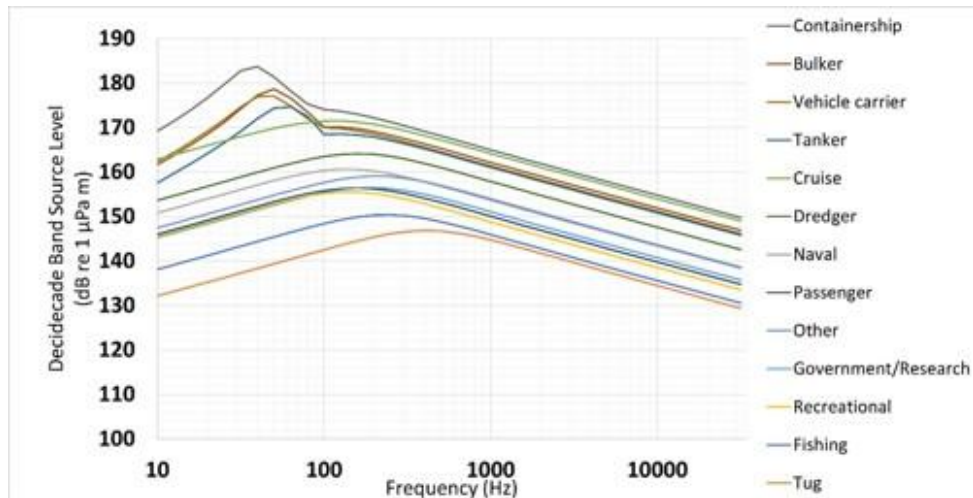
Flödesbuller uppstår när vatten strömmar runt skrov, roder, drev och andra strukturer. Det inkluderar både tryckfluktuationer mot skrovet och luftinblandning i ytvatten (Possenti *m.fl.*, 2024). Flödesbullret ökar generellt med fartygets hastighet och kan förstärkas vid hög sjö (Kendrick och Collins, 2019). I kommersiell sjöfart betraktas dock flödesbuller normalt

som en sekundär bullerkälla, eftersom kavitationsrelaterat buller vanligen dominerar det utstrålade undervattensbullret vid marschfart.

Eftersom flera bullermekanismer verkar samtidigt är det ofta svårt att avgöra vilken del av ett inspelat undervattensljud som härrör från vilken källa. Hasenpflug m.fl. (2021) genomförde en detaljerad karakterisering av undervattensbuller från ett fartyg genom simultana mätningar av undervattensljud, strukturvibrationer och luftburet ljud ombord, vilket möjliggjorde identifiering av maskin- och propellerrelaterade bidrag över ett brett hastighetsintervall. I Silent@Sea-projektet gjordes källidentifiering vid marschfart främst genom analys av tonala komponenter i utstrålat undervattensljud och externt luftburet buller till omgivningen (Johansson m.fl. 2023). Bland annat användes jämförelser mellan dieselektrisk drift och eldrift för att koppla observerade toner till specifika källor. Sammantaget visar studierna att källidentifiering av fartygs undervattensbuller är utmanande och ofta kräver underlag från flera olika typer av mätdata, kompletterat med information om olika ombordkomponenters driftstatus under mätningarna.

3.2 Ljudnivåer och spektra för fartygs undervattensbuller varierar stort

Fartygs undervattensbuller varierar stort mellan olika fartyg och driftförhållanden. För att kunna jämföra bulleremissioner används ofta måttet källstyrka som beskriver den ljudtrycksnivå en källa skulle ge upphov till på en meters avstånd. Typiska totala källstyrkor för fartyg ligger mellan 171–199 dB re 1 μ Pa m (The Vancouver Fraser Port Authority, 2018). Spektrumet av fartygs undervattensbuller domineras typiskt av låga frekvenser, med högst nivåer mellan cirka 40–300 Hz och avtagande energi mot högre frekvenser. Figur 1 visar typiska källspektrum för olika fartygskategorier, modellerade med den så kallade Jomopans-Echo-modellen (Merchant, Farcas och Seddon, 2024). Ljudet från fartyg skulle kunna beskrivas som ett bredbandigt brus med tonala inslag. Kavitationsrelaterat propellerbuller dominerar ofta spektrumet vid marschfart och den akustiska energin kan sträcka sig upp och över flera kilohertz.



Figur 1: Modellerade källspektrum för olika fartygskategorier med Jomopans-Echo-modellen (Merchant, Farcas och Seddon, 2024).

Direktivitet eller riktverkan beskriver hur ljudets styrka varierar med riktning från källan. Det finns studier som pekar på en tydlig riktverkan för fartygs undervattensbuller, särskilt vid frekvenser över 1 kHz där ljudnivån rakt akterut från propellern är avsevärt högre än i sidled på grund av att skrovet skärmar av (Catineau *m.fl.*, 2022). För speciella ljudkällor som ekolod och sonar är direktiviteten avsiktlig och kan vara mycket stark, beroende på syftet med systemet.

Källstyrka kan anges som *Radiated Noise Level*, (*Monopole*) *Source Level* eller *Environment-Affected Source Level*.

Radiated Noise Level (RNL) är avsett att beskriva de ljudnivåer som ett fartyg ger upphov till i den omgivande miljön i närheten av fartyget och används bland annat för jämförelser mellan fartyg, uppföljning över tid samt verifiering mot krav eller kriterier. RNL mäts enligt standardiserade procedurer och inkluderar interferenseffekter mellan direktutstrålat ljud och ytrefflektioner, den så kallade Lloyd's mirror-effekten.

Source level (SL), ibland *Monopole Source Level* (MSL), är ett mer idealiserat mått och behöver anges tillsammans med ett källdjup för att kunna användas i beräkningar. Den främsta användningen av SL är i modelleringar av undervattensbuller och framtagning av bullerkartor.

Environment-Affected Source Level (ASL) är en förenklad bestämning av ljudutbredningseffekter som kan användas när man har flera mätningar av samma fartyg på olika avstånd (Parsons *m.fl.*, 2021). Man gör då en linjär regression för att räkna "tillbaka" till vad ljudtrycksnivån är på en meters avstånd.

I stora mätstudier av undervattensbuller grupperas fartygen ofta efter fartygsklass, exempelvis containerfartyg, tankfartyg, kryssningsfartyg etcetera (MacGillivray *m.fl.*, 2022). Dessa funktionella indelningar baserade på transportuppgift och lasttyp kan sammanfalla med typiska kombinationer av skrovform, framdrivningssystem, huvudmaskineri och driftförhållanden, såsom designhastighet och lasttillstånd, som är relevanta för undervattensbuller. En sammanställning av detta slag ges av Müller *m.fl.* (2024), som visar hur skillnader i propellerutformning, maskinkonfiguration och operationella parametrar varierar mellan fartygstyper. Variationen i källstyrka är trots likheterna stor även inom samma fartygsklass. Studier visar att källnivån kan skilja upp till 20–40 dB mellan fartyg av liknande typ, beroende på skillnader i konstruktion, storlek, underhåll, last och driftförhållanden (Possenti *m.fl.*, 2024). Klassbaserade beskrivningar ger därmed en översiktlig bild av undervattensbuller men är i regel inte tillräckliga som underlag för att bedöma bullernivåer eller identifiera lämpliga åtgärder för enskilda fartyg.

I vissa studier har man försökt minska spridningen genom att normalisera spektra med exempelvis propellerdiameter och hastigheten för propellerbladens spets (Felli *m.fl.*, 2025). Resultaten indikerar att delar av bullerspektrumet kan domineras av likartade kavitationsmekanismer, medan variationen vid lägre frekvenser i större utsträckning påverkas av maskinbuller och andra källor.

3.3 Flera faktorer påverkar ett fartygs utstrålade undervattensbuller

Ett fartygs utstrålade undervattensbuller bestäms av flera samverkande faktorer, där både konstruktion, framdrivningssystem och driftförhållanden spelar en roll. Här ges en översikt av de viktigaste faktorer som identifierats i litteraturen och som påverkar bullerutstrålningen.

3.3.1 Propeller och interaktion med vaken

Som nämnts är kavitation typiskt den dominerande källan till undervattensbuller för ett fartyg som färdas i marschfart. Kavitationens uppkomst och omfattning styrs av samspelet mellan propellerns utformning, skrovets geometri, vaken och den belastning som propellern arbetar under. Propellerdesignen har därmed en central betydelse för det utstrålade undervattensbullret (American Bureau of Shipping, 2021; Smith och Rigby, 2022; Portillo-Juan *m.fl.*, 2024). Samtidigt rapporteras tekniska detaljer om propellerutformning sällan i akustiska studier, vilket begränsar möjligheterna att dra generella slutsatser. I praktiken används därför ofta interna databaser och erfarenhetsbaserade samband, exempelvis för tillämpning av PIANO-modellen (Lloyd *m.fl.*, 2024).

Enklare tumregler för bullerreduktion utgår ofta från att jämna ut och minska belastningen på propellerbladen, exempelvis genom större propellerdiameter, fler propellerblad, svepta blad eller lägre rotationshastighet. Sådana åtgärder begränsas dock ofta av praktiska förutsättningar, exempelvis krav på frigång från skrovet och djupgående.

Propellrar utformas traditionellt med fokus på hög framdrivningseffektivitet, där designen bland annat begränsas av risken för den erosion som kraftig kavitation kan orsaka. När även undervattensbuller inkluderas som designparameter blir avvägningarna mer komplexa. Samtidigt visar nyare studier att betydande reduktioner av undervattensbuller kan uppnås med liten eller ingen påverkan på framdrivningseffektiviteten genom anpassningar av propellerdesignen. Gaggero m.fl. (2025) genomförde en retrofitstudie av en mindre passagerarbåt där en numeriskt optimerad propeller installerades och verifierades genom fullskaletester. Resultaten visade minskade bullernivåer på ca 5–10 dB i delar av frekvensspektrumet, samtidigt som effektbehovet var i praktiken oförändrat jämfört med ursprungspropellern.

3.3.2 Drivlina och energikälla

Inom kommersiell sjöfart dominerar fortfarande konventionella marina bränslen baserade på petroleum, såsom olika typer av brännolja och marina destillatbränslen. Därutöver används i ökande omfattning alternativa bränslen som flytande naturgas, metanol och olika biodrivmedel, medan batterielektrisk drift och bränsleceller i dagsläget främst förekommer i mindre fartyg och i särskilda segment. Deselelektrisk drift lämpar sig särskilt väl för fartyg med varierande lastprofiler eller behov av dynamisk positionering, men används mer sällan i konventionella lastfartyg med långvarig jämn marschfart, där direkt mekanisk framdrift ofta är mer energieffektiv (Vard Marine Inc., 2023; Müller *m.fl.*, 2024; Noise Control Engineering, LLC, 2025).

För genereringen av undervattensbuller är energikällan i sig ofta av underordnad betydelse vid hastigheter över kavitationsinsättningen, eftersom propellerkavitation då typiskt dominerar ljudutstrålningen. Under sådana förhållanden förväntas därför det utstrålade undervattensbullret vara relativt likartat oavsett om framdrivningen sker med förbränningsmotor eller elektrisk motor, givet jämförbara propeller- och driftförhållanden. Skillnader mellan olika framdrivningssystem blir i stället främst relevanta vid hastigheter där motor- och maskinrelaterat buller kan utgöra en betydande del av det totala undervattensbullret.

3.3.3 Hastighet

Fartygs undervattensbuller ökar i de flesta fall med hastigheten genom vattnet, främst till följd av ökad belastning på propellern och mer utvecklad kavitation (Hasenpflug *m.fl.*, 2021; Possenti *m.fl.*, 2024). Sambandet mellan fart och buller är dock inte entydigt. Studier har visat att vissa fartyg, särskilt med reglerbar stigning, *controllable pitch propeller* (CPP), kan uppvisa förhöjda bullernivåer vid reducerad fart. McIntyre *m.fl.* (2021) analyserade undervattensbuller från åtta kustfärjor och fann att vissa fartyg med CPP uppvisade ökade bullernivåer vid reducerad fart, medan detta mönster inte observerades för fartyg med fast stigning. För de fartyg som uppvisade detta beteende kopplades fenomenet till förändrade kavitationsregimer vid låg belastning. Resultaten indikerar att hastighetsreduktion inte nödvändigtvis leder till minskat buller för alla fartygstyper.

Maskinrelaterat undervattensbuller uppvisar generellt en svagare koppling till hastighet än kavitations- och flödesbuller, och kan dominera vid låga farter eller vid specifik drift som exempelvis bogsering (Possenti *m.fl.*, 2024; Noise Control Engineering, LLC, 2025).

För olika fartygstyper kan typiska designhastigheter identifieras, exempelvis lägre för tankfartyg och högre för containerfartyg. Designhastigheten har stor betydelse för propellerutformningen och för det utstrålade undervattensbullret (Müller *m.fl.*, 2024; Helcom, 2025).

En detaljerad diskussion om hastighetens påverkan på undervattensbullret finns i avsnitt 5.1.1, som berör hastighetsreduktion som en åtgärd för att reducera undervattensbuller.

3.3.4 Trim, gångläge, lastfall, sjögång

Fartygs trim, lastfall och gångläge kan förväntas påverka det utstrålade undervattensbullret, men dessa faktorer har endast i begränsad utsträckning studerats systematiskt i litteraturen. Förändringar i last och trim påverkar flödesmotståndet mot skrovet och propellerbelastningen, vilket kan påverka förekomst och utbredning av kavitation (Noise Control Engineering, LLC, 2025). Studier på mindre fartyg visar även att gångläge och djupgående kan påverka hur strukturvibrationer överförs till vattnet (Smith, Grech La Rosa och Wood, 2024), men motsvarande effekter för större handelsfartyg är otillräckligt kartlagda. Sjögång kan även påverka fartyg genom våginducerade tryckvariationer och slag mot skrovet (*slamming*), vilket ger upphov till ökade strukturvibrationer (American Bureau of Shipping, 2017). I vilken utsträckning denna typ av excitation bidrar till det utstrålade undervattensbullret är begränsat studerat.

Effekter av driftfall och gångläge illustreras av ett delresultat från Silent@Seas-projektet, där jämförelser gjordes mellan närbesläktade fartyg Johansson m.fl. (2023). Vid jämförelse mellan två systerfartyg noterades tydliga skillnader i utstrålat undervattensbuller, vilket i detta fall kopplades till att det ena drevs med tre propellrar i stället för fyra under mätningarna. Den ökade belastningen på de kvarvarande propellrarna bedömdes vara orsaken till den tydliga ökningen av bullret.

3.3.5 Skydd mot påväxt med ultraljud

Ultraljudsbaserade antifouling-system används i växande omfattning och genererar kontinuerliga ljud i det högfrekventa området, vanligtvis mellan 20 kHz och 40 kHz (Weilgart, 2023). Enligt (Koschinski m.fl., 2024) överlappar signalerna från dessa system tumlarens känsligaste hörselområde vilket innebär risk för undvikandebeteende, temporär hörselskada och populationspåverkan i skyddade kustområden. Fältstudier har också visat negativa effekter på andra arter; i en studie vid Guadalupe minskade förekomsten av näbbvalar markant när turistbåtar med aktiva ultraljudssystem låg ankrade i området (Trickey *m.fl.*, 2022). Mätningar från Port of Vancouvers ECHO-program har visat att ljud från ultraljudsbaserade antifouling-system har potential att orsaka hörselskada hos tandvalar på korta avstånd och kan spridas flera kilometer (Martin m.fl. 2024). Laboratorietester har även visat stressreaktioner hos fastsittande ryggradslösa djur vid exponering för samma frekvensintervall (Varello *m.fl.*, 2023). Då de ultraljudsbaserade systemen ofta är aktiva även när fartyget ligger still kan de utgöra en kontinuerlig bullerkälla i kustnära och ekologiskt känsliga miljöer. Alternativa metoder för att hantera skrovpåväxt och deras potentiella bullerpåverkan behandlas vidare i avsnitt 5.1.3 och 5.2.2.

4 Verktyg för att kvantifiera fartygs undervattensbuller

Detta kapitel beskriver centrala verktyg för att analysera, kvantifiera och minska fartygs undervattensbuller. Verktygslådan omfattar mätmetoder för enskilda fartyg och flottor, modeller för att beskriva bullrets spridning och påverkan i miljön, samt simuleringsverktyg som används i teknisk utveckling och åtgärdsarbete. Tillsammans utgör dessa metoder ett praktiskt underlag för uppföljning, jämförelser och beslut om åtgärder.

4.1 Mätningar av fartygs undervattensbuller

Mätningar av fartygs undervattensbuller behövs för att kvantifiera och förstå bullret, följa upp åtgärder och skapa underlag för styrmedel. Beroende på

syfte och ambitionsnivå används olika mätansatser, från noggranna dedikerade mätningar till opportunistiska och autonoma system som möjliggör storskalig datainsamling.

4.1.1 Dedikerade mätningars

Dedikerade mätningar av ett fartygs undervattensbuller innebär att mätningen genomförs under kontrollerade former med ett samarbete med fartyg. Syftet är att uppnå så hög noggrannhet och reproducerbarhet som möjligt, samt att ge ett tillförlitligt underlag för jämförelser, teknisk analys och verifiering av bullerkrav.

Vid en dedikerad mätning tas fartyget vanligen ur ordinarie trafik och genomför ett antal passager i en fördefinierad mätbana, ofta vid en specifik mätplats som uppfyller mätgeometriska krav och där risken för störningar minimeras. Den akustiska mätutrustningen består av ett antal hydrofoner, ofta uppkopplade via signalkablar till en gemensam datainsamlingsenhet ombord på en följbåt där mättekniker kan övervaka inspelningarna. Fartyget passerar mätutrustningen flera gånger med samma last- och driftförhållanden, i rak kurs och med konstant hastighet, för att kvantifiera och säkerställa tillräcklig noggrannhet.

Mätningarna är starkt beroende av goda yttre förhållanden. Vind, vågor, regn och strömmar kan ge upphov till bakgrundsbuller och/eller flytta mätutrustning och följbåt. Även platsens djupförhållanden och tillgång till en tillräckligt lång och ostörd mätbana är avgörande. Större fartyg kräver dessutom lång sträcka för att vända och passera mätutrustningen upprepade gånger. Närhet till annan trafik kan begränsa möjligheten att genomföra ostörda mätningar. Sammantaget innebär detta praktiska begränsningar i när och var dedikerade mätningar kan genomföras.

Sammanfattningsvis är dedikerade mätningar kostsamma. De kräver avancerad utrustning, specialiserad personal och flera timmars fältarbete. För fartygsägaren innebär de dessutom att fartyget tas ur trafik, vilket kan medföra betydande inkomstbortfall. Mätresultaten gäller bara vid den kondition som mätningen genomfördes i, vill man exempelvis veta bullret vid olika hastigheter måste dessa mätas för sig. Detta har inneburit att relativt få dedikerade mätningar av enskilda fartyg genomförts hitintills.

Dedikerade mätningar är samtidigt det mest tillförlitliga sättet att bestämma undervattensbullret från ett enskilt fartyg. När standardiserade metoder används erhålls en kvantifierad noggrannhet och resultaten blir reproducerbara och kan användas för robusta jämförelser mellan fartyg. I kombination med detaljerad information om fartygets drift och tekniska system kan de också användas för att analysera vilka bullerkällor som dominerar utstrålningen.

4.1.2 Klassningar av fartygs undervattensbuller

Flera internationella klassningssällskap har utvecklat särskilda klassningsnotationer för undervattensbuller, det vill säga frivilliga klassificeringar som anger att ett fartyg uppfyller definierade krav på maximal bullerutstrålning under specificerade förhållanden. Fartyg som kan visa, genom dedikerade mätningar och analyser, att dess undervattensbuller inte överskrider angivna gränsvärden i de frekvensband som ingår kan erhålla en sådan notering i sitt klassningscertifikat. Som exempel har Lloyd's Register infört notationen UWN-L där driftkategori (Transit, Quiet eller Research) och aktuell fart i knop ingår i märkningen (Alvarez, 2025). DNV har motsvarande notation SILENT, med flera varianter som innebär olika ambitionsnivåer (Pettersen, 2025). Även andra klassningssällskap har motsvarande system med variationer i både ambitionsnivå och teknisk utformning.

Klassningsnotationer för undervattensbuller kan användas vid upphandling av nya fartyg, vid större ombyggnationer eller som målbild i rederiers långsiktiga arbete med att minska undervattensbuller. Klassningsnotationer kan även ingå som en komponent i frivilliga incitamentsprogram där fartyg med dokumenterat låg bullerutstrålning erbjuds reducerade hamnavgifter eller andra förmåner (Kindberg, 2025), se även avsnitt 6.

Samtidigt finns viktiga begränsningar. Metodik och krav skiljer sig mellan olika klassningssällskap, både vad gäller kravens nivå, val av akustiska mått och hur ljudutbredning hanteras i analysen. Detta innebär att klassningsnotationer från olika sällskap inte alltid är direkt jämförbara (Ainslie *m.fl.*, 2022).

4.1.3 Opportunistiska och autonoma mätningar

Vid opportunistiska mätningar av undervattensbuller passerar fartyget mätutrustningen i ordinarie trafik, utan samordning med externa mättekniker. Fartygen är ofta inte ens medvetna om mätningen och inga särskilda krav ställs på fart, last eller driftläge vid passagen. Med hjälp av AIS-data kan man få kopplingen i tid mellan uppmätta ljudnivåer och fartygens position, hastighet och grundläggande fartygsdata.

Det finns både fördelar och nackdelar med opportunistiska mätningar. De ger möjligheten att samla in stora datamängder från många fartyg under verkliga driftförhållanden. Detta har gjort metoden särskilt värdefull för att ta fram statistiska beskrivningar av fartygs undervattensbuller och för att analysera variationer inom och mellan olika fartygsklasser. Eftersom opportunistiska mätningar sker med begränsad kontroll över mätgeometri och driftförhållanden är dock osäkerheterna ofta stora, särskilt kopplade till ljudutbredningen mellan fartyg och mottagare. Rent opportunistiska

mätningar lämpar sig därför generellt inte för noggrann bestämning av källstyrkan av ett enskilt fartyg vid en specifik kondition.

Utvecklingen går mot mer strukturerade autonoma mätlösningar, där mätgeometri, sensorkonfiguration och analysmetodik optimeras, och där fartyg kan uppmanas följa en fördefinierad mätbana för ökad noggrannhet. Ett tidigt exempel är den realtidsstation utanför Göteborg som kombinerade opportunistiska passager med separata mätningar av ljudutbredningsförlust för att förbättra skattningar av källstyrka i grunt vatten (Andersson, Alenius, *m.fl.*, 2023). Jämfört med rent opportunistiska mätningar ger dessa system bättre kontroll över mätförhållandena och därmed mer jämförbara resultat, samtidigt som de kan drivas långsiktigt och med lägre kostnad än dedikerade mätningar.

I Kanada bedrivs långsiktig övervakning av fartygs undervattensbuller genom fasta mätstationer som används inom ramen för bland annat ECHO-programmet (Enhancing Cetacean Habitat and Observation), initierat av Vancouver Fraser Port Authority i Kanada (The Vancouver Fraser Port Authority, 2024). Programmet har pågått sedan 2014 och kombinerar operativa åtgärder, såsom frivilliga hastighetsreduktioner, med systematiska mätningar av fartygs undervattensbuller vilket resulterat i ett stort dataset av fartygs undervattensbuller.

På västkusten används bland annat Boundary Pass Underwater Listening Station, som har varit i kontinuerlig drift sedan 2020. Stationen består av två hydrofonmatriser placerade 300 meter från varandra på 190 meters djup, anslutna till land via en optisk kabel. Systemet möjliggör standardiserade mätningar av passerande fartyg och bakgrundsljud och används för att följa upp effekter av åtgärder över tid (Hannay *m.fl.*, 2023). På östkusten ligger MARS-stationen som sedan 2021 har samlat in över tusen akustiska mätningar av fartyg på djupt vatten (Mercure-Boissonnault *m.fl.*, 2023), se även projektets hemsida².

Det pågående svenska projektet InciteShip syftar till att utveckla och demonstrera ett autonomt, bojbaserat mätsystem för undervattensbuller från enskilda fartyg i ordinarie trafik. Projektet adresserar behovet av kostnadseffektiva mätmetoder som kan användas långsiktigt i kustnära och grunda vatten. Inom InciteShip utvecklas mätstationer som kombinerar hydrofoner, datainsamling och signalbehandling i ett självständigt system som kan mäta passerande fartygs buller. Två mätstationer byggs och placeras ut, en på västkusten och en på östkusten, med mätkampanjer under somrarna 2025 och 2026. Parallellt utreds metoder för att bedöma den potentiella miljöpåverkan, som ett steg i att kunna belöna fartyg vars

² <https://www.projet-mars.ca/en>

undervattensbuller har låg påverkan. InciteShip genomförs under perioden 2024–2026 och finansieras av Trafikverket. Projektet drivs av IVL Svenska Miljöinstitutet i samarbete med Totalförsvarets forskningsinstitut FOI, med expertstöd från SMHI. De mätstationer som utvecklas inom projektet kommer därefter att användas i fortsatt forskning, bland annat inom det nya projektet PUB TVÅ³, för samordnade fullskaliga mätningar som syftar till att verifiera effekten av tekniska och operativa åtgärder mot undervattensbuller (se även avsnitt 4.3).

I det avslutade EU-projektet LIFE-PIAQUO utvecklades SmartURN⁴, en bojbaserad mätstation för undervattensbuller som användes i Medelhavet för att mäta undervattensljud från enskilda fartyg. Tekniken planeras att tillämpas i det EU-finansierade projektet SEAMPHONI, där mätningarna kommer återupptas i Nordsjön och Medelhavet under 2026 och 2027.

Inom ramen för den av IMO pågående *experience building phase* har stationerna i InciteShip och SEAMPHONI identifierats som en relevant resurs och kommer att ingå i organisationens första sammanställning av tillgängliga mätstationer för mätning av fartygs undervattensbuller. I den initiala sammanställningen (februari 2026) utgör dessa båda projekt en betydande andel av de aktiva mätstationer som finns/kommer finnas tillgängliga utanför Nordamerika inom de närmsta åren, vilket understryker deras internationella relevans.

4.1.4 Ombordmätningar

På senare år har intresset ökat för metoder som möjliggör uppskattning av utstrålat undervattensbuller med hjälp av sensorer installerade ombord på fartyg. Drivkraften är behovet av kostnadseffektiva verktyg för att följa upp buller under verkliga driftförhållanden, där fullskaliga mätningar är för resurskrävande för att täcka variationer i hastighet, last, driftläge och yttre förhållanden såsom sjögång, strömmar och manövrering. Den främsta tillämpningen är återkoppling i realtid till besättningen, men tekniken diskuteras även som ett verktyg för verifiering av bullerkrav och anpassning till förändrade driftförhållanden.

Metoder för ombordbaserad uppskattning av undervattensbuller kan grovt delas in i analytiska och empiriska ansatser. Analytiska metoder bygger på förenklade, fysikaliska samband mellan vibrationer eller trycksignaler ombord och ljudnivån ute i vattnet och kan i princip tillämpas utan akustiska referensmätningar. De har prövats både vid icke-kaviterande drift (Cintosun, 2024) och för buller från propellerkavitation vid höga hastigheter (Bosschers, Koning och Schouten, 2023) med rimlig noggrannhet inom

³ <https://foiportalen.trafikverket.se/seprojekt/711>

⁴ <https://urn.quiet-oceans.com>

avgränsade driftslägen och frekvensband. I praktiken dominerar dock empiriska metoder där överföringsfunktioner mellan ombordssignaler och undervattensbullret bestäms genom referensmätningar. Dessa kan uppnå en noggrannhet i nivå med typisk mätosäkerhet men kräver dedikerade akustiska mätningar vid ett antal representativa driftlägen (Cintosun, 2024).

Ombordmätningar har även använts för att identifiera kritiska driftpunkter kopplade till propellerkavitation. Kesour m.fl. (2023) visar att vibrationsmätningar på skrovet ovanför propellern kan användas för att detektera förekomst av kavitation och för att skatta CIS. Genom att analysera hur vibrationsnivåer modulerade av propellerns axelvarvtal förändras med fartygets hastighet kunde CIS identifieras med god överensstämmelse med oberoende undervattensakustiska mätningar.

Parallellt med den akademiska forskningen har även kommersiella system för ombordbaserad övervakning av undervattensbuller utvecklats. DNV:s system ger realtidsinformation om hur hastighet, effektuttag och manövrering påverkar bullerutstrålningen för fartyg i rutt (Pettersen, 2025). Det pågående projektet LOWNOISER planerar också att testa ombordbaserade sensorsystem i kombination med referensmätningar och modeller, i syfte att bedöma olika åtgärder och metodernas tillförlitlighet i fullskalig drift (Dorgeville m.fl., 2025). Resultaten från sådana projekt förväntas bidra till ökad kunskap om hur ombordmätningar kan användas i praktiken.

Inom det pågående svenska utvecklingsprojektet Bedömning ombord av utstrålat undervattensbuller från fartyg (BOUB) undersöks möjligheten att med hjälp av ombordbaserade sensorer ge besättning och redare återkoppling i realtid om fartygens utstrålade undervattensbuller. Projektet, som genomförs av Chalmers tekniska högskola, omfattar både mättekniska lösningar samt studier av hur sådana system kan implementeras och användas operativt. Tekniken ska testas på två olika typer av fartyg, och både tillförlitlighet och möjligheten att generalisera systemen till andra fartygstyper behandlas. BOUB pågår under perioden 2025–2029 och finansieras av Trafikverket.

4.2 Modellering av bullret i havsmiljön

Modellering av undervattensbuller är ett centralt verktyg för att analysera sjöfartens påverkan i havsmiljön. I detta avsnitt beskrivs de grundläggande komponenterna i bullermodellering, från källmodeller och ljudutbredning till framtagning och användning av bullerkartor för olika syften.

4.2.1 Källmodeller

Källmodeller används för att beskriva hur mycket undervattensbuller fartyg genererar som funktion av exempelvis fart, storlek och fartygstyp. De utgör

en grundläggande byggsten i bullerkartläggning och är nödvändiga för att kunna analysera sjöfartens samlade bullerpåverkan och utvärdera effekter av olika åtgärder och scenarier.

För fartyg finns idag flera etablerade källmodeller, bland annat modellerna Wittekind, RANDI, Jomopans-Echo och PIANO (Wittekind, 2014; MacGillivray och de Jong, 2021; Lloyd *m.fl.*, 2024). Dessa skiljer sig i komplexitet och tillämpningsområde men samtliga bygger på omfattande mätdata och har validerats mot mätningar. Eftersom flera källmodeller används parallellt för fartyg kan deras antaganden och resultat jämföras, vilket har gett upphov till en aktiv diskussion om deras giltighet och tillämpbarhet. Särskilt diskuteras hur väl modellerna fångar teknikutvecklingen, skillnader mellan fartygstyper och hastighetsberoendet, samt vilka konsekvenser modellvalet får för storskaliga bullerkartläggningar och utvärderingar av åtgärder (dos Santos *m.fl.*, 2025; MacGillivray och Schuster, 2025).

Exempel på källmodeller

RANDI 3.1 från 1996 innehåller en semi-empirisk beskrivning av fartygsbuller baserad på ett referensspektrum för ett genomsnittligt fartyg (Breeding *m.fl.*, 1996). Källnivån uttrycks som funktion av frekvens och justeras utifrån fartygens hastighet och längd.

Jomopans-Echo, J-E, utvecklades i/ur det europeiska projektet Jomopans⁵. Motivet var att minska skillnaderna mellan observerade källnivåer i ECHO-programmets datamaterial och prediktioner från befintliga källmodeller (MacGillivray och de Jong, 2021). Modellen behåller beroendet av fartygens hastighet och längd från RANDI men introducerar fartygsklassspecifika referensspektra. En av J-E modellen styrkor är att det mesta av information som modellen behöver går att utläsa från AIS-data.

Wittekind's källmodell beskriver bidrag från maskineri samt från kavitationsbuller i låga respektive höga frekvensområden som separata komponenter (Wittekind, 2014). En central parameter är kavitationsinsättningen (*cavitation inception speed*, CIS). När fartygets hastighet överstiger CIS predikteras en tydlig ökning av källstyrkan till följd av kavitation. Modellen kräver dock teknisk information om fartyget och maskineri, vilket innebär att AIS-data behöver kompletteras med uppgifter från andra källor.

PIANO-modellen är en semi-empirisk källmodell där den totala källstyrkan i varje frekvensband beräknas som summan av bidrag från huvudmaskin, hjälpmaskiner och propellerkavitation (Lloyd *m.fl.*, 2024). Kavitationsbuller utgör en central del av modellen och beskrivs med ett spektrum som består

⁵ <https://northsearegion.eu/jomopans/index.html>

av en puckel i det lågfrekventa området, och ett avtagande bidrag i högre frekvenser. Spektralform och nivå bestäms utifrån propellerrelaterade och driftsrelaterade parametrar. Modellen innehåller en särskild funktion för fartyg med ställbar stigning, *CPP Controllable Pitch Propeller*. Det maskinrelaterade bullret i modellen tar hänsyn till faktorer som typ av motor, motormassa, installerad effekt, varvtal, antal motorer samt typ av motorupphängning. PIANO-modellen är en av de mest avancerade källmodellerna för fartygs undervattensbuller men den kräver omfattande indata, tillgång till detaljerad teknisk information och till viss del erfarenhetsbaserad kunskap.

4.2.2 Ljudutbredning under ytan

Ljud propagerar, sprids, snabbare i vatten än i luft eftersom det är ett tätare medium. Ljudets hastighet i vatten är omkring 1 500 m/s, vilket är fyra-fem gånger snabbare än i luft. Ljudet sprids avsevärt snabbare än marina däggdjurs förflyttning, exempelvis uppgår tumlarens maximala simhastighet till knappt 7 m/s (cirka 25 km/h)⁶. Ljudets hastighet i havet varierar med temperatur, tryck och salthalt och förändringar av dessa parametrar med djupet skapar ljudhastighetsprofiler som har stor påverkan på hur ljudet sprids (Andersson *m.fl.*, 2025). Våglängden för en ljudvåg av en viss frekvens i vatten är motsvarande fyra till fem gånger så lång som i luft, exempelvis ger 100 Hz en våglängd på ungefär 3 meter i luft och 15 meter i vatten.

Djupet är en viktig faktor för ljudutbredningen i vatten. För undervattensljud vid låga frekvenser med en våglängd som är i samma storleksordning som djupet hämmas ofta ljudutbredningen. Ljud med frekvenser under den så kallade *cut-off* frekvensen har svårt att sprida sig över större avstånd (Andersson *m.fl.*, 2016). Denna nedre frekvens för ljudutbredning i grunt vatten beror alltså på djupet, ju grundare vattnet är, desto högre blir den. I grunda områden påverkas ljudutbredningen även av interaktionen med botten vilket kan resultera i en svårmodellerad situation, speciellt över längre avstånd. Skärgårdsmiljöer bidrar med ytterligare komplexitet genom varierande djup, botten typ, öar och skär.

För ljud med höga frekvenser kan absorptionen av den akustiska energin i själva vattnet spela en större roll, speciellt över längre avstånd.

Modellering av ljudutbredning kan göras med olika detaljnivå och vilken som är resurseffektiv beror på den specifika situationen. En av de enklaste modellerna utgår från sfäriskt spridning och inkluderar en reflektion mot vattenytan, men bortser från interaktionen med botten. På korta avstånd fungerar detta tillvägagångssätt ofta bra. Riktigt avancerade modeller kan ta

⁶ <https://www.wwf.se/djur/arter/tumlare-i-ostersjon/#om-tumlarna>

hänsyn till förändringar i djup och bottentyp längs med vägen från en källa till en mottagare. De är dock beräkningsmässigt tunga och kräver dessutom att man har vetskap om de ingående parametrarna.

4.2.3 Bullerkartläggning

Med bullerkartor avses här geografiskt visualiserade modellresultat över undervattensbullrets rumsliga utbredning, baserade på källmodeller och ljudutbredningsberäkningar. Bullerkartor behövs för att synliggöra var och i vilken omfattning undervattensbuller förekommer, så att exponering av känsliga arter och miljöer kan bedömas, åtgärder prioriteras och effekter av styrmedel utvärderas. Där mätningar endast kan ge punktvisa underlag, kan bullerkartor ge en rumsligt sammanhängande beskrivning av bullersituationen. De kan även användas för scenarioanalyser som kan vara viktiga verktyg för att utvärdera effekter av styrmedel och åtgärder, innan de införs i verkligheten.

För att ta fram en bullerkarta krävs i grunden tre komponenter: information om bullerkällornas förekomst, en källmodell som beskriver hur mycket bullerkällorna alstrar, samt en modell för ljudutbredning i det aktuella området. För fartyg används ofta AIS-data för att beskriva fartygens positioner och rörelsemönster. Genom att kombinera dessa komponenter kan bullerkartor tas fram som beskriver den rumsliga fördelningen av undervattensbullret.

Om syftet är att utvärdera negativa maskeringseffekter för marina djurs kommunikation, behöver bullerkartan dessutom relateras till den naturliga bakgrundsnivån i området. Man analyserar då överskottsbullret (*excess noise*), det vill säga den ljudnivåökning som fartygen ger upphov över den naturliga ljudmiljön. För detta krävs även modeller eller underlag för den naturliga ljudnivån. Maskering är dock endast en av flera möjliga effektmekanismer, andra typer av påverkan kan behöva utvärderas med andra metoder.

Bullerkartor kan kombineras med andra typer av information. I Williams m.fl. (2015) analyseras påverkan av fartygs undervattensbuller i ett område på en specifik art genom att vikta den modellerade bullerexponeringen med artens hörselkänslighet. De anpassade bullerkartorna samkörs sedan med habitatkartor. På så sätt kan man få en fördjupad förståelse för i vilka geografiska områden undervattensbullret har störst risk att störa arten. Man behöver dock vara medveten om osäkerheterna som är kopplade till varje steg i metoden.

Bullerkartor används vanligen för att följa upp om miljömål och lagkrav uppfylls. Det kan röra sig om ett relativt lokalt område exempelvis vid miljöprovningar av havsbaserad vindkraft, eller på bassängskala, som i

Havs- och vattenmyndighetens uppföljning av god miljöstatus enligt havsmiljödirektivet (Havs- och vattenmyndigheten, 2024a). Dessa bullerkartor baseras främst på regionalt arbete i Helcom och Oskar, bland annat från projekten HOLAS3 (HELCOM, 2023) och Jomopans (Kinneging *m.fl.*, 2023).

Ett annat exempel på storskalig bullerkartläggning är NAVISON-projektet, som tagit fram bullerkartor för Europas havsområden, inklusive Östersjön (Sertlek *m.fl.*, 2024). Det huvudsakliga fokuset var scenariomodellering där ingångsparametrarna justerades för att analysera hur olika framtida policyinriktningar skulle kunna påverka den marina ljudmiljön över tid. De scenarier som studerades omfattade bland annat ett referensscenario (*business as usual*), minskade växthusgasutsläpp, riktade åtgärder för att minska undervattensbuller samt kombinationer av dessa. Inga bedömningar av biologisk påverkan av dessa scenarier gjordes.

Bullerkartor kan tas fram för olika syften, vilket har betydelse för vilka metodkrav som behöver uppfyllas. Om bullerkartor ska användas för absoluta jämförelser mot gränsvärden kopplade till biologisk påverkan krävs att metoder och resultat verifieras mot mätningar och att eventuella avvikelser kan förklaras. Samtidigt är storskalig bullerkartläggning med fullständig modellering av ljudutbredning mycket resurskrävande.

Om syftet i stället är att följa övergripande trender i sjöfartens bullerbidrag kan förenklade angreppssätt användas. Ett exempel är den ansats som utvecklats Jalkanen *m.fl.*, där kartor över sjöfartens akustiska energitillförsel tas fram utan att modellera resulterande ljudtrycksnivåer i miljön (2018). I metoden integreras Wittekindts källmodell för fartygsbuller i ramverket STEAM (*Ship Traffic Emission Assessment Model*) där fartygens utstrålade ljudenergi beräknas och summeras till ett mått på den samlade bullerbelastningen. Eftersom ljudutbredning inte behöver beräknas kan metoden tillämpas på mycket stora geografiska områden och användas för att följa hur sjöfartens bullerbidrag förändras över tid, exempelvis i samband med större förändringar i trafikmönster (Jalkanen *m.fl.*, 2022). Denna metod används även av Havs- och vattenmyndigheten i indikatorn *E.4.1 Tillförsel av kontinuerlig ljudenergi* för att följa hur den tillförda ljudenergin från fartyg utvecklas över tid i svenska havsbassänger i relation till uppsatta miljö kvalitetsmål (Havs- och vattenmyndigheten, 2025).

Bullerkartläggning av undervattensbuller är fortfarande ett område under utveckling. Skillnader i metodval, ingångsdata och använda mått innebär att resultat från olika projekt inte alltid är direkt jämförbara. Senare års studier lyfter behovet av ökad harmonisering och tydligare rekommendationer för modellupplösning och hantering av osäkerheter (Martin, Siderius, *m.fl.*, 2024; Sertlek *m.fl.*, 2024). En sådan samordning är en förutsättning för att

bullerkartor ska kunna jämföras mellan olika områden och projekt, och för att de långsiktigt ska kunna användas som ett robust underlag i förvaltning och internationellt samarbete.

4.3 Simuleringsverktyg för teknisk utveckling

Simuleringsverktyg har en viktig roll i utvecklingen av fartyg med avseende på undervattensbuller, eftersom de kan möjliggöra analys och optimering av bullerkällor redan i designfasen, innan fartyg byggs eller modifieras.

Undervattensbuller som orsakas av vibrationer i skrov och maskineri utgör en viktig komponent, särskilt vid låga till måttliga hastigheter där kavitation är begränsad. Dessa vibrationer kan mätas ombord och användas för att kalibrera strukturdynamiska modeller, vanligtvis baserade på finita elementmetoden (FEM). Den ljudutstrålning som vibrationerna ger upphov till i vattnet kan därefter uppskattas med vibroakustiska modeller, genom koppling till enklare analytiska modeller eller numeriska randelementmetoder (BEM).

Undervattensbuller som genereras av kavitation och flödesinducerade processer är betydligt svårare att modellera. Kavitation omfattar flera olika och ofta instabila fenomen, vars uppkomst och utveckling är starkt beroende av lokala flödesförhållanden (Portillo-Juan *m.fl.*, 2024). Analytiska modeller är i praktiken otillräckliga, och numerisk simulering med *Computational Fluid Dynamics* (CFD) kräver hög rumslig och tidsmässig upplösning för att fånga relevanta flödes- och kavitationsprocesser, vilket gör beräkningarna resurskrävande. Därtill är kopplingen mellan numeriskt beräknad flödesdynamik och resulterande akustisk emission inte alltid entydig, vilket innebär att både numeriska och experimentella studier ofta behöver kompletteras med empiriska antaganden. Trots detta är CFD ett centralt verktyg i teknisk utveckling och lyfts även fram i IMO:s riktlinjer för att minska undervattensbuller från fartyg som ett viktigt stöd i designfasen (IMO, 2023).

Utöver numeriska metoder används experimentella metoder, *Experimental Fluid Dynamics* (EFD), exempelvis modellförsök i kavitationstunnlar, för att studera kavitationsmönster och validera simuleringar. Sådana försök är dock behäftade med betydande skalningsproblem vilket påverkar både kavitationsutbredning och dess dynamik (Khraisat, 2025).

Mot denna bakgrund används simuleringsverktyg i praktiken främst för att jämföra och utvärdera alternativa designlösningar och åtgärder, snarare än för att förutsäga absoluta bullernivåer i miljön. Samtidigt pågår en snabb metodutveckling, där kombinationer av numeriska och experimentella verktyg successivt förbättrar möjligheterna att minska undervattensbuller redan i designfasen (Tomy, 2024).

Projektet PUB (Prediktionsmetoder för utstrålat fartygsbuller), jämförde modellskalförsök, numeriska simuleringar och fullskaliga mätningar av ett befintligt fartyg (Bensow *m.fl.*, 2025). Resultaten visade utmaningar kopplade till kavitationsdynamiken i modellskala, samt att maskinerirelaterat buller i vissa driftfall kunde dominera över propellerkavitation i de fullskaliga mätningarna. I det efterföljande projektet PUB TVÅ (Prediktion av UndervattensBuller med utvecklade Tjänster för Verkningsfulla Åtgärder) är fokus just att skapa ett mer robust underlag för design, ombyggnation och åtgärdsarbete kopplat till undervattensbuller från fartyg. Numerisk och experimentell fluiddynamik är en central del av projektet, där CFD-baserad modellering och modellförsök i kavitationstunnel används för att analysera bulleralstring, särskilt kopplat till kavitationsfenomen och propeller-skrov-interaktioner. Dessa studier kompletteras med fullskaliga mätningar av enskilda fartyg med hjälp av de bojbaseade mätsystem som utvecklas inom InciteShip. Projektet finansieras av Trafikverkets branschprogram Hållbar sjöfart som drivs av Lighthouse. Projektet leds av Chalmers tekniska högskola och genomförs under 2025–2028 i samarbete med IVL, RISE och KTH, och med aktiv medverkan från näringsliv och systemleverantörer.

5 Åtgärder som kan minska fartygs undervattensbuller

I det här kapitlet går vi igenom vilka åtgärder som föreslås i litteraturen för att minska fartygs undervattensbuller. Både tekniska och operationella åtgärder behandlas och påverkan på energieffektiviteten i de fall där det finns relevanta resultat i litteraturen.

5.1 Operativa åtgärder

Det här avsnittet beskriver åtgärder i form av styrmedel som kan införas av en beslutsfattare eller som frivilliga åtgärder som utförs av operatörer.

5.1.1 Reducerad hastighet

Undervattensbuller och energiförbrukning

Inom sjöfarten har sänkt hastighet, så kallad ”slow steaming”, länge använts som ett sätt att minska bränsleförbrukningen, särskilt under perioder med höga bränslepriser. Motståndet genom vattnet ökar kraftigt med farten, vilket gör hastighetsreduktion till en effektiv åtgärd. Minskat undervattensbuller ses i detta sammanhang som en positiv bieffekt (Nelissen, Király och Meijer, 2022; Vakili, White och Turnock, 2023; Vard Marine Inc., 2023; Noise Control Engineering, LLC, 2025). En studie argumenterar för att en global fartsänkning med 10 % kan minska

växthusgasutsläppen med drygt 10 % och reducera den totala akustiska energin från sjöfarten med omkring 40 % (Leaper, 2019) vilket motsvarar drygt 2 dB.

Huvudbudskapet i World Banks nya rapport ”Keys to Energy-Efficient Shipping” (2025) är att energieffektiviseringar är tillgängliga och kostnadseffektiva åtgärder, både för minskad klimatpåverkan och bränslekostnader. Enligt studien kan energieffektiviseringar minska utsläpp av växthusgaser med 23–39 % till 2030, och man pekar på att den största outnyttjade potentialen finns i just minskad hastighet. Containerfartyg uppvisar särskilt stor potential att minska utsläpp genom fartsänkning. Även i fartygsbranschens egna vägledningar betonas fartsänkning som ett snabbt sätt att minska både bränsleförbrukning och utsläpp. Exempelvis framhåller Wärtsilä (2025) att begränsningar av tillgänglig framdrivningseffekt sänker fartygets hastighet, reducerar energibehovet och kan användas för att snabbt uppfylla kraven i IMO:s EEXI-regelverk.

Sambandet mellan hastighet och energieffektivitet är dock inte alltid enkelt i praktiken. När fartyg drivs vid lägre hastigheter än vad de är designade för kan det innebära att motorer och övriga komponenter i framdrivningssystemet arbetar suboptimalt. Om det sker under en längre tid kan det vara nödvändigt att justera drivlinan och dess styrsystem för att undvika ogynnsamma driftlägen (Helcom, 2025; Wärtsilä Corporation, 2025).

Minskad hastighet leder ofta, men inte alltid till mindre undervattensbuller. Speciellt fartyg med ställbara propellrar, CPP *Controllable Pitch Propeller*, kan bullra mindre vid högre hastighet än vid lägre (McIntyre *m.fl.*, 2021). Ett praktiskt exempel på denna problematik kommer från BC Ferries i Kanada som genomfört en omfattande retrofit av ett passagerarfartyg med två CPP (Bae, 2025). Fartyget hade ursprungligen ett fast motorvarvtal och reglerade hastigheten enbart med propellerstigning vilket gav upphov till kavitation, vibrationer och sämre energieffektivitet vid lägre hastigheter. Genom att installera ett variabelt frekvensdrivsystem och nya, optimerade CPP kunde både varvtal och stigning regleras i kombination för att variera fartygets hastighet. Resultatet blev avsevärda minskningar av undervattensbullret på upp till 16 dB, samt förbättrad energieffektivitet på upp till 40 %.

Minskad hastighet medför miljövinster men kan även innebära vissa avvägningar. I de Jong *m.fl.* (2025) presenteras en kvalitativ analys av hur olika åtgärder mot undervattensbuller samverkar med andra miljötryck från sjöfarten. Fartsänkning var den åtgärd som författarna kom fram till gav flest positiva bieffekter, utöver sänkt undervattensbuller, och den med minst negativa miljöeffekter: ”...only weak trade-offs in the other shipping

pressures...”. Studien omfattar dock inte några transportlogistiska eller socioekonomiska avvägningar och man betonar att det behövs kompletterande analyser kring ekonomiska konsekvenser. Liknande iakttagelser förekommer i andra studier (till exempel Broeg, 2025).

Dessa typer av konsekvenser till följd av globala fartsänkningar ingår dock i World Banks analys av energieffektiviseringsåtgärder (2025) och i CE Delfts systemstudie av fartsenkning som åtgärd för att minska undervattensbuller (Nelissen, Király och Meijer, 2022). I båda studierna antas transportefterfrågan vara konstant och att inga logistiska förbättringar införs. Därmed krävs ökad kapacitet i flottan, med andra ord, fler fartyg. Trots det kommer båda studier fram till att de samlade nyttorna med fartsänkningar vida överstiger kostnaderna. Om även förbättrade hamnlogistiska processer införs, exempelvis minskade väntetider, kan behovet av ytterligare fartyg minska och därmed förstärka både miljö- och kostnadseffekten av fartsänkningar.

Studier baserade på modellering

Effekten av fartsenkning på undervattensbuller är komplex och påverkas av både lägre källstyrkor, förändrad exponeringstid och ljudutbredningsförhållanden. Flera modellstudier har analyserat dessa dimensioner.

Findlay m.fl. (2023) studerade effekten av fartsenkning med hjälp av Jomopans-Echo modellen utifrån tre biologiskt motiverade mått: maximal mottagen nivå, exponeringstid över bakgrund samt *acoustic looming* (hastigheten med vilken ljudnivån ökar när ett fartyg närmar sig ett djur). Studien utgår ifrån att en 20 % fartsenkning kan minska källstyrkan med omkring 6 dB. I en idealiserad miljö skulle det innebära att upp till 75 % färre djur exponeras vid varje tidpunkt. Trots längre passage genom området minskade både mottagna nivåer, *acoustic looming* och total exponeringstid över bakgrund.

Regionala bullerkarteringar visar att effekten kan variera geografiskt. I västra Medelhavet gav en begränsning till 10 knop en medianreduktion av modellerad nivå med hjälp av källmodellen RANDI3.1, upp till cirka 6 dB i 63- och 125 Hz-banden, medan 15 knop gav liten effekt Lajaunie m.fl. (Lajaunie m.fl., 2023). Effekten var störst i djupvattenområden, vilket kopplas till gynnsammare lågfrekvent ljudutbredning. I en svensk fallstudie i södra Kattegatt användes Jomopans-Echo modellen för att beräkna effekterna av en maxhastighet på 11 respektive 13 knop. Resultatet visade att den genomsnittliga ljudnivån minskade med cirka 4 respektive 2 dB i studerade mottagarpunkter (Andersson, Bensow, m.fl., 2023). Studien lyfter även juridiska begränsningar för införande av bindande hastighetskrav.

Flera studier bygger på källmodeller där hastighetsberoendet beskrivs med generella skalningsrelationer. I Jomopans-Echo antas källnivån skala starkt med hastighet (v^6), medan en empirisk regressionsmodell härledd från mätdata gav ett svagare och ofta frekvens- och fartygstypsberoende samband (Hannay *m.fl.*, 2019; dos Santos *m.fl.*, 2025). I dos Santos *m.fl.* (2025) innebar detta att samma fartsänkningsscenario gav olika beräknad bullerminskning beroende på modellval (cirka 2–4,5 dB med Jomopans-Echo jämfört med cirka 1–3 dB med regressionsmodellen). Skillnaderna kan delvis förklaras av att modellerna inkluderar maskinrelaterade respektive kavitationsrelaterade bidrag med olika detaljnivå, vilka i sin tur har olika hastighetsberoende.

I NAVISON-projektet ingår hastighetsreduktion som en av sex åtgärder i scenarier för framtida utveckling av undervattensbuller i europeiska havsområden (Sertlek *m.fl.*, 2024). Varje fartygs operativa hastighet begränsas till 75 % av designfarten och den längre restiden kompenseras för genom att flottan skalades upp för att bibehålla transportarbetet. Studien använde den semi-empiriska modellen PIANO, där maskin- och kavitationsbuller hanteras separat (Lloyd *m.fl.*, 2024). Effekten av enbart hastighetsreduktion särredovisades inte, eftersom åtgärden kombineras med andra tekniska och operativa åtgärder. I det så kallade undervattensbuller-scenariot där hastighetssänkningen ingår, minskar dock den modellerade ljudenergidentiteten över tid jämfört med ett business-as-usual-scenario, medan resultaten i växthuseffekt-scenariot varierar mellan fartygstyper och regioner.

Även långsiktiga modelleringar för Östersjön, baserade på Witterkinds källmodell, visar att den totala utstrålade bullerenergin har minskat över tid och att minskade genomsnittshastigheter bidragit till lägre buller per transportarbete för flera fartygstyper. Samtidigt uppvisar vissa segment, exempelvis LNG-tankfartyg, en motsatt utveckling kopplad till ökade hastigheter (Jalkanen *m.fl.*, 2025)

Implementerade fartsänkingsstudier

Riktade hastighetssänkningar i särskilda områden, så kallade *slow-down* program, har blivit en av de mest praktiserade och studerade åtgärderna för att minska undervattensbuller i synergi med minskade luftföroreningar och risken för kollisioner med valar. Utvärderingar från nordamerikanska program visar tydliga minskningar i både fartygens källstyrkor och den lokala ljudnivån (Hatch *m.fl.*, 2025). De flesta program är frivilliga och vanligast är att deltagande fartyg främst får fördelar i form av positiv företagsprofilering (Morten, 2025). Inom ramen för Environmental Ship Index (ESI) utvecklas en modul för undervattensbuller, där deltagande i frivilliga hastighetsreduktionsprogram kan ge poäng i systemet, vilket i vissa hamnar kan kopplas till ekonomiska incitament (Kindberg, 2025).

ECHO-programmet i Vancouver har funnits sedan 2014 och fokuserar på att minska fartygstrafikens negativa påverkan på hotade valar. Ett av försöken i programmet genomfördes 2017 då fartyg uppmanades att sänka farten till 11 knop under en tvåmånadersperiod (MacGillivray *m.fl.*, 2019). Den faktiska hastighetsreduktionen varierade mellan fartygstyper beroende på deras normala marschfart. AIS-data tillsammans med akustiska inspelningar användes för att uppskatta källstyrkan hos enskilda fartyg och betydande minskningar noterades hos deltagande fartyg med i genomsnitt 11,5 dB för containerfartyg, 10,5 dB för kryssningsfartyg, 9,3 dB för biltransportfartyg, 6,1 dB för tankfartyg och 5,9 dB för bulkfartyg. Minskningen var frekvensberoende. I ECHO-programmets senaste årsrapport framgår att över 80 % av fartygen deltog i programmet under 2024 och sänkte sin hastighet till mellan 11 och 14,5 knop beroende på fartygstyp och specifikt fartsänkingsområde (The Vancouver Fraser Port Authority, 2024). Den genomsnittliga ljudnivån vid programmets mätstationer för undervattensbuller minskade med 1,8–3,4 dB under fartsänkingsperioden.

Quiet Sound är ett annat regionalt fartsänkingsprogram som syftar till att minska undervattensbuller i ett habitat för späckhuggare. En akustisk utvärdering av 2023–2024 års genomförande visar att containerfartyg, biltransportfartyg och fraktfartyg i genomsnitt sänkte farten med 2–3 knop och samtidigt minskade sina beräknade källstyrkor (Matei *m.fl.*, 2024). Den genomsnittliga ljudnivån vid programmets mätstation minskade med 3 dB och andelen av tid med ljudnivåer under 110 dB ökade något.

Protecting Blue Whales and Blue Skies är ett fartsänkingsprogram längs Kaliforniens kust. Under 2024 reducerade deltagande fartyg sin genomsnittliga hastighet med cirka 2–3 knop, vilket motsvarade en minskning av den bredbandiga källstyrkan med omkring 2–5 dB. Vid en mätplats noterades samtidigt en minskning av den lokala medianljudnivån i 63 Hz-bandet med knappt 4 dB (ZoBell och Frasier, 2025). Resultaten visar att även måttliga hastighetsreduktioner kan ge tydliga akustiska effekter i områden med tät trafik.

5.1.2 Ruttplanering och -optimering

Ur ett energieffektivitetsperspektiv har rutt- och hastighetsplanering länge betraktats som centrala operativa styrmedel. Genom kunskap om väderförhållanden och strömmar kan man använda anpassning av fart, väg, och driftprofil för att minska bränsleförbrukning och utsläpp. Dock förutsätter det en förbättrad planering och informationsdelning mellan fartyg och landorganisation (Hüffmeier och Johanson, 2021).

Inom initiativ som exempelvis Blue Visby⁷ diskuteras hur förbättrad samordning och informationsdelning kan möjliggöra just-in-time-anlöp och jämnare hastighetsprofiler, genom att bryta den etablerade praktiken ”sail fast, then wait”. Dessa åtgärder utvecklas främst för att minska bränsleförbrukning och klimatpåverkan, men innebär samtidigt potential för minskat undervattensbuller genom lägre propellerbelastning.

Omläggning av fartygstrafik diskuteras som ett sätt att minska flera typer av miljöpåverkan, på senare år även undervattensbuller. Erfarenheter från projektet TANGO visar att ruttomläggning leder till en tydlig omfördelning av undervattensbuller i det berörda området (Lalander, Larsson Nordström och Andersson, 2022). I Kattegatt ökade bullernivåerna i det nya kustnära stråket med cirka 5–6 dB i norra delen och 3–4 dB i södra delen i 100 Hz-bandet, samtidigt som motsvarande minskningar observerades längs den tidigare huvudrutten. Fysikaliskt innebär en förändring på 3 dB en halvering eller fördubbling av ljudenergin. En halvering av trafikintensiteten ger därför typiskt en minskning på omkring 3 dB, vilket illustrerar att även relativt stora förändringar i trafikmängd ger måttliga förändringar i ljudnivå uttryckt i dB. I projektet analyserades även potentiella konsekvenser för marina däggdjur. Resultaten visade inte någon tydlig försämring av den akustiska habitatkvaliteten för tumlare, till skillnad från resultaten för torsk i 125 Hz-bandet. En separat analys baserad på en antagen undvikandezon kring passerande fartyg visade dock att fartygsrörelser kan medföra temporär undanträngning inom delar av trafikstråken.

Modellbaserade beslutsstöd har föreslagits som ett sätt att bättre beakta bullerpåverkan i operativ planering. Venkateshwaran m.fl. (2025) presenterar ett system där rutt- och hastighetsval optimeras för att minimera ackumulerad ljudexponering, baserat på modeller för fartygens källstyrka, ljudutbredning och djurens rumsliga förekomst. Studien visar att hastighetsanpassning i kombination med mindre ruttjusteringar kan ge betydande minskningar i beräknad bullerexponering. Samtidigt bygger resultaten uteslutande på modellering och illustrerar främst den teoretiska potentialen i operativ planering snarare än verifierade effekter i verklig drift.

5.1.3 Skrov- och propellerunderhåll

Regelbunden rengöring av biologisk påväxt på skrovet (*biofouling*) lyfts på många håll som en viktig och enkel åtgärd för att minska fartygs undervattensbuller och öka energieffektiviteten (Vard Marine Inc., 2023; Noise Control Engineering, LLC, 2025).

Propellerunderhåll har framförts som en åtgärd mot undervattensbuller, speciellt vid skador eller påväxt (Vard Marine Inc., 2023). I experimentella

⁷ <https://bluevisby.com>

studier har artificiell ytstruktur på propellerblad visats kunna påverka främst tip vortex-kavitation. Smith m.fl. (2024) jämförde tre propellertillstånd på en mindre båt och fann att en propeller med artificiell ytmodifiering hade cirka 5 dB lägre total källstyrka vid 6 knop. Vid 10 knop var skillnaderna små, 1–2 dB. Reduktionen kopplades till försvagad tip vortex-kavitation, medan andra kavitationsformer potentiellt kan förstärkas av ökad ytstruktur. Numeriska studier visar att artificiell skrovlighet kan minska kavitationens utbredning, men samtidigt försämra den propulsiva verkningsgraden med några procent beroende på utformning (Asnaghi m.fl., 2021). Det finns en möjlig akustisk vinst i vissa driftfall, men sambandet mellan ytstruktur, kavitation och energieffektivitet är komplext och ännu otillräckligt studerat (Zhu och Ma, 2024).

Principiellt innebär ett minskat motstånd att mindre framdriftsenergi krävs för att upprätthålla en given hastighet, vilket kan leda till lägre källstyrka. Om det minskade motståndet i stället utnyttjas till att öka farten kan nettoeffekten bli begränsad.

5.2 Tekniska åtgärder

Det här avsnittet beskriver tekniska åtgärder som kan införas vid nyproduktion och i vissa fall som retrofits på existerande fartyg.

5.2.1 Propellerdesign och optimering av strömningsfältet

Propellern utgör generellt den dominerande bullerkällan vid marschfart, och kavitation är i de flesta fall den huvudsakliga mekanismen bakom undervattensbullret. Uppkomsten och omfattningen av kavitation styrs av ett samspel mellan propellerns utformning, skrovets geometri, det strömningsfält som propellern arbetar i samt den belastning som krävs för att generera önskad dragkraft. Propellerdesign och strömningsförhållanden bör därför, om möjligt, hanteras integrerat för att minska undervattensbuller och förbättra framdrivningseffektiviteten.

En av de mest centrala parametrarna som man vill påverka när man utvecklar fartyg med lägre undervattensbuller är *cavitation inception speed*, (CIS). CIS anger den hastighet vid vilken kavitation först uppträder och är därmed starkt kopplad till undervattensbullret. Eftersom kavitation generellt dominerar vid högre farter innebär en högre CIS att risken för kraftfull alstring av undervattensbuller kan skjutas till högre hastigheter.

Under senare år har åtgärdsförslag mot undervattensbuller från fartyg sammanställts i flera översikter. Propellerdesign är en av de faktorer som ges stort utrymme med uppskattade förbättringar för utstrålat undervattensbuller på upp till ungefär 10 dB (Smith och Rigby, 2022; Vard Marine Inc., 2023; American Bureau of Shipping, 2025; Noise Control Engineering, LLC, 2025). En central princip för att minska risken för

kavitation är att minska och jämna ut belastningen på bladen, exempelvis genom en större propellerdiameter. Detta medför dock begränsningar kopplade till skrovgeometri och krav på avstånd till skrovet. Även specifika designåtgärder återfinns i litteraturen, exempelvis bakåtsvepta propellerblad som minskar belastningen vid bladspetsen, olika former av bladspetsmodifieringar, små hål i bladspetsen (*pressure pores*), optimering av bladprofilens stigvinkel (*pitch*), samt en så kallad *anti-singing edge* som hindrar att propellerbladet kommer i självsvängning.

Framdrivningseffektivitet är en central målsättning vid propellerdesign. För kommersiella fartyg är minskad bränsleförbrukning ett övergripande mål och de åtgärder mot undervattensbuller som prioriteras är i regel sådana som samtidigt bidrar till energieffektivisering (IMO, 2023). Senare studier visar dock att det i praktiken kan uppstå en avvägning mellan reducerad källstyrka och propellerns verkningsgrad. Foeth (2025) analyserade en familj av propellerutformningar för ett containerfartyg och visade att en reduktion av den totala källstyrkan från cirka 191 till 182 dB motsvarade en minskning av propellerverkningsgraden från cirka 73 till 67 %, medan mindre effektivitetsförluster (2–4 %) kunde vara förknippade med flera decibels skillnad i beräknad källstyrka. I studien dominerade tip vortex-kavitation för de mest effektiva propellerna. I en vidareutveckling presenterades en generell relation som innebär cirka 1 % ökat effektbehov per 3 dB bullerreduktion (Baudin *m.fl.*, 2025). Slutsatsen var att det går att uppnå bullerreduktioner i storleksordningen 3–9 dB med ett ökat effektbehov på 0–4 %. Icke-standardiserade bladsektioner, custom sections, visade potential för större bullerreduktion utan proportionellt högre effektförluster, men var samtidigt förknippade med ökad propellermassa och konstruktiva utmaningar.

Det är viktigt att notera att de flesta propelleroptimeringsstudier bygger på numeriska beräkningar och modellförsök, där osäkerheter i kavitation- och bullermodellering kan påverka resultaten. Fullskalemätningar av undervattensbuller är fortfarande ovanliga, vilket begränsar möjligheten att verifiera de numeriska resultaten. Ett undantag är retrofit-studien inom PIAQUO-projektet där en ny propeller optimerad för en mindre passagerarbåt designades genom numerisk optimering och utvärderades med modellförsök (Gaggero *m.fl.*, 2025; Tani och Marino, 2025). Det unika med studien utgörs av de efterföljande fullskalemätningarna där den nya propellern jämfördes med den befintliga. Resultaten visade godtagbar överensstämmelse mellan modellskala och fullskala för kavitationsrelaterade ljudkomponenter. I frekvensområdet upp till cirka 3 kHz observerades bullerreduktioner med den nya propellern på över 10 dB i vissa frekvensband med en marginellt försämrad framdrivningseffektivitet.

Propellerns verkningsgrad och det undervattensbuller som den genererar påverkas även av det strömningsfält som den verkar i och som skapas av skrov, roder och andra kringliggande strukturer. Inom fartygsbranschen har olika tekniska lösningar utvecklats för att optimera och nyttja flödet, till exempel *dysor* (rörliknande strukturer som placeras runt propellern), fenor eller utskott, och påbyggnader på propellernavet (Gaggero och Martinelli, 2021; Vard Marine Inc., 2023; Portillo-Juan *m.fl.*, 2024; American Bureau of Shipping, 2025; Noise Control Engineering, LLC, 2025). Effekten av sådana åtgärder är starkt beroende av fartygsspecifika förhållanden och vilken typ av kavitation som dominerar. I praktiken kräver effektiv implementering därför detaljerade analyser av det aktuella fartygets flödesfält och kavitationsregim; åtgärderna kan inte generellt appliceras utan anpassning.

- *Pre-swirl stators* består av fasta blad som monteras nära propellern och skapar ett motroterande flöde. Enligt Vard Marine Inc. (2023) kan tekniken förbättra inflödet, minska propellerkavitation och bidra till lägre undervattensbuller. Enligt Portillo-Juan *m.fl.* (2024) har de potential att minska både tonalt och bredbandigt buller, särskilt vid högre farter. Enligt Noise Control Engineering, LLC (2025) är det främst hub vortex-kavitation som minskar med dessa typer av strukturer. *Pump-jet* är en typ av pre-swirl stator som verkar lovande både ur energieffektivitet och undervattensbuller, speciellt minska risken för tip vortex-kavitation (Portillo-Juan *m.fl.*, 2024). I en modelleringsstudie på ett retrofitscenario för en passagerarfärja inom SATURN-projektet minskade bullret med 15–20 dB för frekvenser i mellanregistret samtidigt som verkningsgraden förbättrades med 7–22% (Baudin *m.fl.*, 2025)
- Vakutjämnande dysor, såsom Schneekluth- och Mewis-dysor, är ringformade strukturer före propellern som jämnar ut och påskyndar inflödet. De minskar variationer i belastning mellan propellerbladen och därmed risken för tip-vortex- och bladkavitation och undervattensbuller med upp till 5 dB (Noise Control Engineering, LLC, 2025). Tekniken behöver dock noggrann anpassning till skrov och driftförhållanden (Vard Marine Inc., 2023; Portillo-Juan *m.fl.*, 2024).
- Även så kallade *hull flow modification devices*, t.ex. vortexgeneratorer, syftar till att förbättra inflödet genom att påverka skrovets gränsskiktsflöde. De har störst potential att minska tip vortex och bladkavitation enligt Noise Control Engineering, LLC, (2025). Enligt Portillo-Juan *m.fl.* (2024) har tekniken i vissa fall minskat tryckvariationerna in mot propellern vilket borde ge en bullerreduktionen, även om det ännu inte kunnat kvantifieras.

- Strukturer som placeras i flödet vid, eller efter, propellern har utvecklats för att minska vortexbildning och återvinna rotationsenergi, främst för att förbättra framdrivningseffektiviteten men också minska risken för kavitation. Exempel på sådana tekniker är propellerbossfenor, PBCF *Propeller Boss Cap Fins*, roderbulber och alternativa rodersystem såsom *Gated rudder* (Özsayan m.fl., 2024; Köksal, 2025). Enligt Noise Control Engineering, LLC (2025) kan dessa tekniker ge en bullerreduktion, särskilt om hub vortex-kavitation är närvarande. Genom att reducera propellerns belastning kan de även förskjuta kavitationsinsättningen till högre hastigheter vilket kan ge ytterligare positiv effekt. Gaggero, S. och Martinelli (2021) lyfter dock att vissa konfigurationer kan ge upphov till nya vortexstrukturer med oklar bullerpåverkan.

Utöver konventionell geometrisk optimering av propeller och flödesfält kan det på längre sikt även finnas potential i att studera propellerbladens ytbehandling och materialegenskaper för att minska undervattensbuller och energiförluster (Asnaghi m.fl., 2021; Zhu och Ma, 2024). Dessa angreppssätt är dock i dagsläget främst av forskningsintresse och det saknas publicerade tillämpningar.

5.2.2 Minskning av skrovets friktionsmotstånd

En betydande del av ett fartygs framdrivningsenergi går åt till att övervinna friktionsmotståndet mellan skrov och vatten. Friktionsmotståndets storlek påverkas av skrovets ytjämnhet. Ett ökat friktionsmotstånd, exempelvis till följd av biologisk påväxt (*biofouling*), medför ett högre effektbehov och ökar risken för kavitation och generering av undervattensbuller.

Ytbehandling av skrovet för att förhindra biofouling (*antifouling*) kan spela stor roll - en korrekt vald beläggning, anpassad efter fartygstyp och driftsprofil, förbättrar energieffektiviteten och kan ge en viss bullerreduktion (Vard Marine Inc., 2023). Dock är publicerade studier som verifierar och kvantifierar dessa effekter är begränsade. Nyare silikonbaserade, biocidfria bottenfärger har visat god effekt mot påväxt i både Östersjön och på västkusten (Kim m.fl., 2025; Ytreberg, 2025). De bygger på en ytstruktur som gör det svårt för organismer att fästa, utan att avge koppar eller andra biocider. Tester visar också att de har lägre giftighet för vattenlevande organismer än traditionella kopparfärger även de inte nödvändigtvis är helt fria från miljöpåverkan (Lagerström m.fl., 2022).

Luftsmörjningssystem, *air lubrication systems* (ALS), innebär att luft tillförs under skrovet för att skapa ett bubbellager mellan skrovytan och det omgivande vattnet. Tekniken har utvecklats för att minska friktion och därmed energiförbrukning, men fullskalemätningar på ett kryssningsfartyg

visade signifikant reduktion av undervattensbuller vid 15 knop när systemet var aktiverat (Alvarez, 2025). Enligt redovisade mätresultat uppfyllde fartyget Lloyd's register-klassningen UWNL(Q15) med ALS i drift, medan motsvarande nivåer utan aktiverat system låg över klassningskravet. Samtidigt rapporterades nettoenergibesparing. Författaren framhåller dock att effekten är beroende av driftförhållanden och att ytterligare studier krävs innan resultaten kan generaliseras till andra fartygstyper. ALS är en av teknikerna som undersöks i det pågående Horizon Europe projektet LOWNOISER⁸. Fler oberoende studier och publicerade resultat behövs för att fördjupa förståelsen av tekniken och dess potential som åtgärd mot fartygs undervattensbuller.

5.2.3 Vindassistans

Vindassisterad framdrivning omfattar tekniker där vindenergi används som ett komplement till konventionell framdrivning, exempelvis genom rotorsegel, vingsegel eller drakar. Teknikerna har i första hand utvecklats för att minska bränsleförbrukning och klimatpåverkan, men bedöms även kunna påverka fartygs undervattensbuller genom reducerad belastning på huvudpropellern (Vard Marine Inc., 2023; Noise Control Engineering, LLC, 2025). Kunskapsläget avseende effekter på utstrålat undervattensbuller är dock i dagsläget begränsat. Det saknas systematiska mätstudier som kvantifierar bullerreduktion under realistiska driftsförhållanden. Utfallet förväntas vara beroende av fartygstyp, driftprofil och i vilken utsträckning vindassistansen ersätter konventionell framdrivning.

Inom det pågående svenska projektet PUB TVÅ ingår vindassistans som en av de tekniska åtgärder som ska utvärderas med hjälp av mätningar och modellering, se avsnitt 4.3.

5.2.4 Motor och strukturvibrationer

Strukturöverfört buller från motor och maskinell utrustning utgör en viktig källa till undervattensbuller, särskilt vid låga hastigheter. Vibrationsisolering syftar till att minska överföringen av vibrationer från motor och drivlina till skrov och vidare till det omgivande vattnet. Synergier för besättning och passagerare i form av minskad exponering för ljud och vibrationer kan uppstå.

Effektiva åtgärder kan innefatta korrekt dimensionering av vibrationsisolerande upphängning och elastiskt montage av motor och maskinell utrustning (Guy *m.fl.*, 2024; Noise Control Engineering, LLC, 2025). Sådana lösningar är väletablerade inom buller- och vibrationskontroll i andra tillämpningar, men det saknas i dagsläget rena åtgärdsstudier där

⁸ <https://lownoiser.eu>

vibrationsisolering har implementerats på fartyg och där effekten på utstrålat undervattensbuller har kvantifierats. Kanske kan det pågående projektet LOWNOISER ändra på det, då man bland annat kommer implementera vibrationsdämpande åtgärd i fullskala på ett kryssningsfartyg (Dorgeville *m.fl.*, 2025).

Vibrationsisolering kan genomföras som retrofit, men åtgärdens effektivitet beror på flera faktorer, inklusive skrovets styvhet, motorinstallationens utformning och samspelet med övriga bullerkällor ombord. Sambanden mellan vibrationer från motor och utrustning, och det utstrålade undervattensbullret kan analyseras med hjälp av överföringsanalys, *transfer path analysis*, där vibrationernas spridning via upphängningar och skrov till det omgivande vattnet studeras. Metoden är i princip tillämpbar även på befintliga installationer, men behöver fartygs- och installationsspecifik karakterisering av överföringsfunktioner och har därför hittills främst använts i forsknings- och designorienterade studier (exempelvis Fragasso, 2023).

Utöver åtgärder som riktas mot strukturöverföring av vibrationer finns även angreppssätt som syftar till att påverka ljudets spridning i vatten, exempelvis genom att använda luft som akustisk skärm. Tekniken används bland annat som åtgärd mot spridning av undervattensbuller vid pålningsarbete i marina miljöer. Inom EU-projektet SATURN har modellskaleförsök med ett så kallat Masker-system visat att luftbubblor under delar av fartygs skrov kan ge upp till 20 dB reduktion av utstrålat buller i mellanfrekvenser, men med ca 1 % negativ påverkan på framdrivningseffektiviteten (Lloyd, Lafeber och Bosschers, 2024)

5.2.5 Konversion till eldrift

Eldrift har många fördelar varav minskat luftbuller är en av dem. Tyvärr gäller det samma inte alltid för undervattensbullret.

Fältmätningar av tre hybridfartyg visar att övergång från dieseldrift till batteridrift inte nödvändigtvis minskar undervattensbullret i marschfart, trots att det ger tydliga fördelar vad gäller luftburet buller (Andersson *m.fl.*, 2024). I en jämförelse mellan hybridläge där dieselgeneratoren var i drift, och elektriskt läge med endast batteridrift, uppmättes inga signifikanta skillnader i undervattensljudnivåer för två av fartygen. Det tredje, mindre fartyget visade en ökning med cirka 5–10 dB i frekvensområdet 100–200 Hz vid användning av dieselgenerator. Resultaten visar att avvibrerade dieselgeneratorer som är mekaniskt fränkopplade från framdrivningen, inte behöver utgöra någon större källa till undervattensbuller.

I en annan studie undersöktes undervattensbuller från tre bogserbåtar med olika framdrivningssystem under verkliga driftförhållanden (Weiss, Spence

och Bonnice, 2024). Bogserbåtar har höga krav på momentant tillgänglig dragkraft och är därför ofta utrustade med kraftfulla dieselmotorer som vanligtvis är stumt monterade i skrovet och därmed ger upphov till betydande strukturöverförda vibrationer. Studien bekräftade detta genom att den batterielektriska bogserbåten hade avsevärt lägre undervattensljudnivåer än de två dieseldrivna fartygen i studien. Den eldrivna bogserbåten saknade dessutom de tonala komponenter som annars var framträdande i ljudbilden från de dieseldrivna fartygen.

Vid en konvertering kan det vara bra att säkerställa att man undviker att sprida högfrekventa tonala ljud ner i vattnet likt de som uppmättes för den eldrivna trimaranen i Gaggero m.fl. (2024).

5.2.6 Vertikala framdrivningssystem

Vertikala framdrivningssystem genererar dragkraft genom blad som roterar kring en vertikal axel under skrovet, vilket möjliggör styrbar dragkraft i 360° och mycket god manöverförmåga. Lösningar som Voith Schneider-propellrar och nyare koncept med individuellt styrda blad används i dag främst på fartyg med höga krav på manöverförmåga, såsom bogserbåtar och specialfartyg.

Vertikala framdrivningssystem kan ge lägre grad av kavitation vid vissa driftlägen och lägre utstrålat undervattensbuller jämfört med konventionella propellrar (Vard Marine Inc., 2023; Noise Control Engineering, LLC, 2025). Mätningar på en bogserbåt med Voith Schneider visar exempelvis lägre kavitationrelaterat buller vid höga lastfall jämfört en bogserbåt med traditionellt system (Weiss, Spence och Bonnice, 2024).

Modellstudier inom EU-projektet SATURN har analyserat en trokoidal vertikal propulsor, där blad roterar kring en vertikal axel och vrider individuellt under rotationen. CFD-beräkningar och skalmodellförsök visade rimlig överensstämmelse för tonala komponenter, medan bredbandigt buller inte kunde förutsägas. Ingen kavitation observerades i skalmodell, och vidare optimering samt fullskalig validering krävs innan bullerprestandan kan bedömas (Armenio, 2024).

Parallellt pågår kommersiell utveckling av nya vertikala framdrivningskoncept⁹, där ambitionen är att kombinera hög energieffektivitet, god manöverförmåga och minskad miljöpåverkan. För dessa lösningar saknas i nuläget oberoende, publikt tillgängliga studier av effekter på utstrålat undervattensbuller.

⁹ Exempelvis ABB Dynafin

5.2.7 Vattenjet

Vattenjet skiljer sig från propellerdrift genom att dragkraften skapas av en intern impeller, ett roterande pumphjul, som accelererar vatten genom ett utloppsmunstycke. Även om man främst förknippar denna teknik med vattenskotrar finns det exempel på mindre fartyg som drivs med vattenjet¹⁰. Fördelarna är exceptionell manövreringsförmåga, att de kan köra på grunt vatten och att de påstås vara mer effektiva vid höga hastigheter. Det finns inte några studier av undervattensbuller på fartyg som drivs av vatten-jet men studier på vattenskotrar indikerar relativt låga nivåer (Erbe, 2013; Johansson *m.fl.*, 2024).

5.2.8 Störning av kavitationsfenomen

Inom ramen för SATURN-projektet testades ett system där luft tillfördes i ett band framför propellern med syfte att dämpa kavitationsrelaterat buller (Lloyd, Lafeber och Bosschers, 2024; Baudin *m.fl.*, 2025). Luften som tillförs förändrar förhållandena för kavitationsbubblornas kollaps, i viss mån kan de även ge en akustisk skärmning. Modellskalet försök visade bullerreduktion på upp till 10 dB i de lägre frekvenserna men med viss påverkan på framdrivningseffektiviteten (1–2 %). Fortsatt utveckling behövs och tekniken behöver testas i fullskala innan dess potential kan bedömas.

Andra studier har fokuserat på att dämpa tip vortex-kavitation genom mer passiva åtgärder, såsom att fästa flexibla trådar vid propellerbladens spetsar (Smith och Rigby, 2022). Laboratieförsök indikerar att sådana lösningar kan minska eller undertrycka tip vortex-kavitation utan nämnvärd inverkan på propellerns verkningsgrad. Teknikerna är ännu inte prövade i fullskala, och ytterligare studier krävs för att bedöma deras praktiska tillämpbarhet under realistiska driftförhållanden.

6 Vägen mot en minskning av fartygs undervattensbuller och dess miljöpåverkan

Det föregående kapitlet har beskrivit åtgärder som kan minska undervattensbullret från fartyg. För att dessa åtgärder ska få genomslag och leda till faktisk miljönytta krävs dock mer än tekniska lösningar. Incitament, teknikutveckling och internationell samverkan behöver samverka för att möjliggöra implementering och långsiktig effekt i en global och konkurrensutsatt sjöfartssektor. I detta kapitel diskuteras dessa tre

¹⁰ <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/case-incat-tasmania>

perspektiv: hur incitament kan utformas, vilka möjliggörare som krävs för teknikutveckling och uppföljning, samt varför internationellt samarbete är en förutsättning för varaktig förändring.

6.1 Ge fartygsägare incitament att arbeta med sitt undervattensbuller

6.1.1 Tydliggör miljöeffekterna av fartygs undervattensbuller och målbilden

Studier visar att undervattensbuller från fartyg och andra mänskliga aktiviteter kan påverka marina organismer negativt. Samtidigt finns fortfarande betydande osäkerheter kring tröskelvärden och dos-respons-samband, det vill säga vid vilka ljudnivåer och med vilka egenskaper hos bullret som olika arter påverkas, och hur påverkan förändras med exponeringens styrka och varaktighet. Dessutom omfattar kunskapsläget i dag endast ett begränsat antal arter.

För att motivera fartygsägare och andra aktörer att vidta åtgärder mot undervattensbuller behöver påverkan kunna kommuniceras på ett mer begripligt sätt än enbart genom decibelnivåer. Det kan vara oklart för fartygsägare vad som i praktiken utgör ett önskvärt undervattensbuller och vilka målsättningar som är relevanta för ett visst fartyg eller en viss verksamhet. När åtgärder kan kopplas till skydd av en specifik art i ett avgränsat område, exempelvis späckhuggarna utanför Vancouver (Bae, 2025), skapas en lokal kontext som kan underlätta kommunikation och motivation för investeringar. I svenska vatten är tumlaren ett välkänt exempel på en ljudkänslig art, samtidigt som det finns potential att bredda förståelsen till fler djurgrupper och ekologiska sammanhang.

Utveckling av tekniska lösningar och styrmedel för minskat undervattensbuller kan gynnas av tydligare och mer operationella målbilder. I dag utgör klassningssällskapens frivilliga bullernotationer ett sätt att konkretisera krav på fartygs undervattensbuller, och de används i vissa sammanhang som målbild vid nybyggnation, ombyggnation eller inom incitamentsprogram. Dessa notationer ger en praktisk och tekniskt definierad referens, men är inte nödvändigtvis utformade för att spegla vad som är tekniskt och ekonomiskt rimliga bullernivåer för olika fartygstyper.

En ansats som nyligen har prövats är att, i likhet med etablerade energieffektivitetsindex, relatera undervattensbuller till utfört transportarbete. Jalkanen m.fl. (2025) normaliserar den utstrålade akustiska energin mot transporterad last och distans, vilket möjliggör jämförelser mellan fartygstyper där skillnader i transportfunktion beaktas. Ett sådant angreppssätt kan utgöra ett komplement till absoluta bullernivåer och bidra till mer transparenta och rättvisande mål- och incitamentsstrukturer.

På längre sikt skulle målbilden även kunna utvecklas för att i större utsträckning ta hänsyn till hur och var fartyget används, och beakta kunskaper om ekologisk påverkan i dessa områden.

6.1.2 Ekonomiska incitament

Ekonomiska incitament är ofta avgörande för att åtgärder ska få genomslag i den konkurrensutsatta sjöfartssektorn. Erfarenheter från internationella forum¹¹ visar att fartygsägare och operatörer i hög grad baserar sina beslut på kostnads–nytto–överbäganden. Åtgärder som kan integreras i befintliga affärsmodeller, minska investeringsrisk eller ge ekonomiska fördelar prioriteras, medan åtgärder med osäker återbetalning ofta skjuts på framtiden. I IMO:s riktlinjer (2023) betonas vikten av att skapa ramverk som underlättar frivillig implementering av bullerreducerande åtgärder, bland annat genom att synliggöra nyttor och sänka trösklar för tidig tillämpning. Erfarenheter från hamnar och frivilliga incitamentsprogram visar att även relativt begränsade ekonomiska signaler kan få betydande effekt, förutsatt att de är tydliga, långsiktiga och förutsägbara.

6.1.3 Tydliggör synergier mellan åtgärder för energieffektivitet och undervattensbuller

Fartygs undervattensbuller är nära kopplat till hur effektivt energi omvandlas till framdrivning. Kavitation, vibrationer och turbulenta flöden representerar energiförluster som både påverkar energieffektiviteten och bidrar till ökat buller. Det finns ett växande kunskapsunderlag som visar att åtgärder som syftar till ökad energieffektivitet ofta även kan leda till minskat undervattensbuller, exempelvis genom hastighetsanpassning, förbättrad propellerutformning, flödesförbättrande åtgärder och bättre matchning mellan framdrivningskomponenter (Leaper och Renilson, 2012; Smith och Rigby, 2022; IMO, 2023, 2023; Vard Marine Inc., 2023; Weilgart, 2023; Noise Control Engineering, LLC, 2025). Samtidigt skiljer sig kunskapsläget markant mellan dessa områden. Medan energianvändning och bränsleförbrukning normalt sätt kan följas upp med god precision i drift, är tillgången på verifierade mätdata för undervattensbuller mycket begränsad.

I den pågående utvecklingen mot mer effektiv logistik, såsom just-in-time-anlöp och minskat vänteläge vid hamn, finns potential att minska behovet av höga marschhastigheter. Sådana åtgärder diskuteras i första hand i relation till klimatpåverkan och energieffektivitet, men kan även medföra minskat

¹¹ Exempelvis IMO:s senaste expertworkshop om sambanden mellan energieffektivitet och undervattensbuller, se www.imo.org/en/about/events/pages/2025-workshop-on-the-relationship-between-ship-energy-efficiency-and-underwater-radiated-noise.aspx

undervattensbuller. Att tydligare demonstrera dessa samverkande effekter kan bidra till att åtgärder mot undervattensbuller i större utsträckning

I en studie av containerfartyg, baserad på före–efter-mätningar vid autonoma mätstationer utanför Vancouver, analyserades effekter av propellerbyten och tekniska åtgärds paket (Cosandey-Godin och Kukreti, 2025). Åtgärderna, som genomfördes i samband med ordinarie varvsbesök, omfattade allt från propellerbyten till kombinerade tekniska paket. Resultaten visade stor variation i undervattensbuller mellan fartyg utan åtgärder och en minskad spridning efter genomförda åtgärder, med tydliga reduktioner för de mest bullrande fartygen. Fartyg med måttliga energieffektivitetsförbättringar (1–3 %) uppvisade små minskningar i medianbuller. Vid 3–6 % förbättring sågs något ökade medianvärden, medan större förbättringar (6–10 %) åter sammanföll med minskade bullernivåer. Sambandet framstår därmed som komplext men indikerar att mer omfattande effektiviseringsåtgärder kan vara förenliga med bullerreduktion.

6.2 Möjliggörare för utveckling och styrning

Olika verktyg, metoder och infrastrukturer krävs för att möjliggöra utveckling, utvärdering och uppföljning av åtgärder för minskat undervattensbuller från fartyg. Fokus i det här avsnittet ligger på förutsättningar som kan stödja både teknikutveckling och en mer träffsäker uppföljning inom havsförvaltningen.

6.2.1 Teknikutveckling och innovation

När en tydlig målbild finns för vad som ska uppnås finns en stor potential att utveckla tekniska lösningar för tystare sjöfart med minskad miljöpåverkan. En central förutsättning för sådan innovation är tillgång till kostnadseffektiva verktyg som möjliggör utvärdering av bullerreducerande åtgärder i olika skeden av design och drift.

Numeriska modeller används i allt större utsträckning för att analysera propellerkavitation, flödesfält och strukturvibrationer redan i den tidiga designfasen. Dessa metoder är särskilt värdefulla för att jämföra alternativa utformningar och studera relativa förbättringar mellan närliggande designlösningar. Samtidigt pågår en fortsatt metodutveckling för att öka modellernas förmåga att ge mer kvantitativa uppskattningar av utstrålat undervattensbuller, inklusive dess frekvensberoende, under verkliga driftsförhållanden. I detta utvecklingsarbete är jämförelser mot experimentella skalförsök och fullskaliga mätningar en viktig komponent, både för kalibrering och för att successivt förbättra modellernas tillförlitlighet.

Utvecklingen av mätinfrastruktur är i detta sammanhang avgörande. Långsiktigt opererade, autonoma mätstationer för fartygs undervattensbuller möjliggör insamling av omfattande data under realistiska och varierande driftsförhållanden. De ger möjlighet att följa enskilda fartyg eller fartygsgrupper över tid och att jämföra ett referensläge med effekter av tekniska modifieringar eller förändrade driftstrategier. För att mätningar från olika system och platser ska kunna användas mer systematiskt krävs dock ett mer samordnat standardiseringsarbete.

Mätdata från autonoma stationer kan även utgöra ett viktigt underlag för vidareutveckling av källmodeller och andra beräkningsverktyg. Tillgång till standardiserade och tillförlitliga mätningar skulle kunna skapa förutsättningar för iterativ utveckling där modeller kan justeras och valideras mot observerade förändringar i bulleremission. En sådan återkoppling mellan mätningar och modellering kan möjliggöra mer träffsäkra kvantitativa bedömningar av bullerreducerande åtgärder och stödja långsiktig teknikutveckling. Det skulle även vara värdefullt att utveckla former för hur mätdata och modellverktyg skulle kunna tillgängliggöras för bredare användning och granskning, samtidigt som hänsyn tas till behov av anonymisering och skydd av enskilda aktörer.

6.2.2 Förvaltning och uppföljning

Parallellt med den tekniska utvecklingen krävs ett kontinuerligt kunskapsbyggande som stärker havsförvaltningens förmåga att följa upp och styra mot minskad bullerpåverkan. Arbetet med kontinuerligt undervattensbuller bedrivs inom ramen för havsmiljödirektivets återkommande förvaltningscykler, där miljöstatus bedöms i relation till fastställda miljökvalitetsnormer. Inom detta ramverk identifieras och bedöms för närvarande åtgärder med syfte att reducera den samlade belastningen från mänskliga aktiviteter. Valet av indikatorer, modellantaganden och gränsvärden har stor betydelse för vilka åtgärder som framstår som mest verkningsfulla i uppföljningen.

De metoder som används i Havs- och vattenmyndighetens uppföljning av indikator *11.2A Effekt av kontinuerligt lågfrekvent undervattensljud* (Havs- och vattenmyndigheten, 2024a) samt indikatorn *E.4.1 Tillförsel av kontinuerlig ljudenergi* (Havs- och vattenmyndigheten, 2025) har i nuläget begränsade möjligheter att inkludera effekter av tekniska bullerreducerande åtgärder på enskilda fartyg, utöver förändringar i hastighet. Detta innebär att genomförda tekniska åtgärder inte nödvändigtvis blir synliga i den övergripande miljöuppföljningen.

En relaterad utmaning rör kopplingen mellan modellerade bullerkartor och verkliga förhållanden. Validering sker i dag mot mätningar i ett begränsat antal punkter, och avvikelser mellan modell och mätning förklaras i

huvudsak genom osäkerheter i ljudutbredningsmodelleringen. Därmed finns begränsad återkoppling kring hur väl de källmodeller som används representerar den faktiska fartygsflottan i svenska vatten. Om teknikutveckling leder till förändrade bulleregenskaper hos fartyg är det oklart hur, och i vilken takt, sådana förändringar kommer att återspeglas i miljöbedömningen.

Ett område där det finns möjlighet till vidare metodutveckling är hanteringen av marina skyddade områden. Internationellt pågår diskussioner om hur undervattensljud och det marina ljudlandskapet kan inkluderas som skyddsvärden i förvaltningen. Om åtgärder införs som leder till förbättringar av den lokala ljudmiljön i sådana områden är det i dagsläget oklart i vilken utsträckning dessa förändringar avspeglas i den nationella miljöbedömningen, som huvudsakligen baseras på storskaliga och aggregerade indikatorer på havsbassängsnivå.

Scenarioanalyser kan utgöra ett värdefullt komplement till de expertbedömningar som används i det pågående arbetet med att ta fram åtgärdsprogram för havsmiljön i Sverige. Genom att analysera väl definierade åtgärdsscenarier, exempelvis riktade insatser mot de fartyg eller trafikmönster som bidrar mest till den samlade bullerbelastningen, skulle man på ett mer systematiskt sätt belysa vilka förändringar som i praktiken krävs för att miljö kvalitetsnormerna ska kunna följas. Ett scenario-baserat angreppssätt kan bidra med ett mer transparent underlag för prioritering av åtgärder utifrån miljönytta, genomförbarhet och kostnadseffektivitet.

För att havsförvaltningens uppföljning och styrning ska kunna utvecklas i takt med den tekniska utvecklingen krävs att modelleringen i ökad utsträckning görs tillgänglig. Detta gäller särskilt källmodeller för fartygsbuller, där möjligheten att representera tekniska bullerreducerande åtgärder i dag ofta är beroende av information i databaser som inte är öppet tillgängliga. Ökad transparens och tillgång till källmodeller och underliggande data är en viktig förutsättning för verifiering, vidareutveckling och för att nya lösningar ska kunna få genomslag i både modellering och miljöuppföljning.

6.3 När nationella åtgärder inte räcker – behovet av internationell samverkan

Internationellt samarbete är inte ett komplement utan en förutsättning för ett effektivt arbete med att minska fartygs undervattensbuller och dess miljöpåverkan. Genom ett aktivt och långsiktigt deltagande i IMO, EU, Helcom, Oskar och andra internationella forum kan Sverige både bidra till och dra nytta av den gemensamma kunskapsutvecklingen, samtidigt som svenska intressen och särskilda förutsättningar beaktas i den fortsatta utvecklingen.

Sjöfarten är i grunden en global verksamhet, där enskilda fartyg kan trafikera många olika havsområden under sin livstid och där miljöpåverkan ofta sker i andra länders vatten än där fartyget är registrerat eller ägt. Nationella åtgärder riskerar därför att få begränsad effekt om de inte samordnas internationellt. Staters rådighet över sjöfarten är dessutom delvis begränsad, särskilt i den ekonomiska zonen och på internationellt vatten. För undervattensbuller från fartyg, som i dagsläget saknar bindande globala gränsvärden, blir internationellt överenskomna riktlinjer, metoder och definitioner centrala för att åstadkomma ett effektivt och rättssäkert arbete.

Undervattensbuller från sjöfart är ett relativt ungt forsknings- och förvaltningsområde och det råder fortfarande betydande osäkerheter kring hur buller bäst ska kvantifieras, hur effektiva olika åtgärder är samt vilka ekologiska konsekvenser buller ger upphov till. Detta gäller särskilt i en kumulativ kontext där flera bullerkällor, såsom kommersiell sjöfart, fritidsbåtar och havsbaserad vindkraft, samverkar med andra miljöbelastningar som stigande vattentemperaturer och förekomst av farliga ämnen. Mot denna bakgrund är internationellt kunskapsutbyte nödvändigt för att undvika parallell metodutveckling och för att skapa jämförbara och robusta kunskapsunderlag.

Det pågående arbetet inom ramen för IMO:s *experience building phase* kan ses som ett strukturerat internationellt lärande, där erfarenheter av mätmetoder, tekniska lösningar och operativa åtgärder successivt byggs upp och delas mellan medlemsstater. Perioden har nyligen förlängts till 2028, vilket speglar behovet av ytterligare erfarenhetsuppbyggnad innan eventuella framtida steg mot mer formaliserad styrning kan övervägas. Inom detta arbete diskuteras bland annat frågor om tillgång till mätdata, hur särskilt känsliga marina områden kan beaktas och samordning av kartläggning av undervattensbuller samt utveckling av gemensamma metodiska angreppssätt för att stärka jämförbarheten mellan regioner.

Ur ett svenskt perspektiv är ett aktivt deltagande i internationella processer särskilt viktigt. Sjöfarten har stor betydelse för Sveriges handel och försörjning, samtidigt som en betydande del av den bullerpåverkan som förekommer i svenska hav genereras av internationell trafik. Möjligheterna att hantera undervattensbuller enbart genom nationella åtgärder är därmed begränsade, särskilt i en internationellt konkurrensutsatt sjöfartssektor. För att svenska förutsättningar och behov ska få genomslag i utvecklingen av gemensamma riktlinjer, metoder och framtida styrning krävs därför ett aktivt svenskt deltagande i internationella sammanhang.

Ett aktivt internationellt engagemang bidrar också till nationell kompetensuppbyggnad och långsiktig förvaltningskapacitet. Tillgång till data, insyn i metodutveckling och möjlighet att påverka definitioner och

indikatorer stärker Sveriges förmåga att bedriva en självständig och kunskapsbaserad miljöförvaltning. Det ökar även Sveriges trovärdighet som samarbetspartner i internationella projekt och processer, vilket i sin tur gynnar både myndigheter, forskningsaktörer och näringsliv.

7 Sammanställning och slutsatser från seminarium om åtgärder mot fartygs undervattensbuller, 17 mars 2026

Detta kapitel är avsett att sammanfatta centrala resultat, diskussioner och slutsatser från seminariet om åtgärder mot fartygs undervattensbuller som hålls den 17 mars 2026.

I denna version av rapporten som distribueras inför seminariet utgör kapitlet en plats-hållare. En sammanställning kommer att tas fram efter genomfört seminarium som baseras på presentationer, gemensamma diskussioner och behov som framkommer under dagen.

Syftet med sammanställningen är att lyfta fram gemensamma slutsatser, möjliga prioriteringar samt frågor där ytterligare kunskapsuppbyggnad, samverkan eller åtgärdsutveckling bedöms vara särskilt angelägna. Detta kapitel kommer därmed att fungera som en brygga mellan rapportens kunskapsunderlag och det fortsatta arbetet inom forskning, förvaltning och praktisk tillämpning.

Referenser

Ainslie, M.A., Martin, S.B., Trownc, K.B., Hannay, D.E., Eickmeier, J.M., Deveau, T.J., Lucke, K., MacGillivray, A.O., Nolet, V. och Borys, P. (2022) "International harmonization of procedures for measuring and analyzing of vessel underwater radiated noise", *Mar Pollut Bull*, 174, s. 113124. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113124>.

Alvarez, D. (2025) "The Market Uptake of Energy Saving Technologies". *2025 Workshop on the relationship between ship energy efficiency and underwater radiated noise*, London, 6 november. Tillgänglig vid: <https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbx?ref=Link>.

American Bureau of Shipping (2017) *Guidance notes on Noise and vibration control for inhabited spaces*. Tillgänglig vid: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/209_noisevibrationcontrolinhabitedspaces/Noise_and_Vibration_GN_e-Sept17.pdf.

American Bureau of Shipping (2025) *Energy Efficiency and Underwater Radiated Noise Technologies*. Technical Guide. Tillgänglig vid: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/Energy%20Efficiency%20and%20Underwater%20Noise%20Technologies.pdf>.

Amoser, S., Wysocki, L.E. och Ladich, F. (2004) "Noise emission during the first powerboat race in an Alpine lake and potential impact on fish communities", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), s. 3789–3797. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/1.1808219>.

Andersson, C., Johansson, T.A., Genell, A. och Winroth, J. (2024) "Fully electric ship propulsion reduces airborne noise but not underwater noise", *Ocean Engineering*, 302, s. 117616. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117616>.

Andersson, M.H., Alenius, E., Lalander, E., Linné, M., Rydin, Y.L., Nordström-Larsson, R. och Svedendahl, M. (2023) "Real-Time Monitoring of Underwater Radiated Noise Levels from Ships", i A.N. Popper, J. Sisneros, A.D. Hawkins, och F. Thomsen (red.) *The Effects of Noise on Aquatic Life*. Cham: Springer International Publishing, s. 1–16. Tillgänglig vid: https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_6-1.

Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., Sigray, P. och Wikström, A. (2016) *Underlag för reglering av undervattensljud vid pålning*. Rapport 6723. Naturvårdsverket. Tillgänglig vid:

<https://www.naturvardsverket.se/publikationer/6700/underlag-for-reglering-av-undervattensljud-vid-palning/>.

Andersson, M.H., Bensow, R., Glebe, D., Hassellöv, I.-M., Lalander, E., Langlet, D., Larsson, K., Malmberg, L.-G., Sundblad, E.-L. och Svedendahl, M. (2023) *Management Measures to Reduce Continuous Underwater Noise from Shipping* (C806 vol). 978-91-7883-555-3 (ISBN). Linnaeus University, Kalmar Maritime Academy. Tillgänglig vid: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-4384> (Åtkomstdatum: 19 juni 2024).

Andersson, M.H., Lalander, E., Nygren, J. och Thörn (2025) *Driftbuller från havsbaserade vindkraftsparker - En litteratur- och modelleringsstudie*. FOI-R--5800--SE. Stockholm: FOI Totalförsvarets forskningsinstitut. Tillgänglig vid: <https://www.foi.se/rapporter/rapportsammanfattning.html?reportNo=FOI-R--5800--SE>.

Armenio, S. (2024) *Report on Source Level and Propulsive Efficiency of Trochoidal Propulsion System*. SATURN Deliverable 4.4. Tillgänglig vid: <https://www.saturnh2020.eu/results>.

Asnaghi, A., Svennberg, U., Gustafsson, R. och Bensow, R.E. (2021) "Propeller tip vortex mitigation by roughness application", *Applied Ocean Research*, 106, s. 102449. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102449>.

Bae, C. (2025) "Working Towards a Quieter Fleet: BC Ferries' URN Journey". *2025 Workshop on the relationship between ship energy efficiency and underwater radiated noise*, London, 6 november. Tillgänglig vid: <https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxid?ref=Link>.

Baudin, E., Grassi, D., Muller, P., Foeth, E.-J., Lloyd, T. och de Angelis, E. (2025) "SATURN Stakeholder Webinar 2025: Demonstration of underwater noise reduction measures", 8 juli. Tillgänglig vid: <https://saturnh2020.eu/news/saturn-stakeholder-webinar> (Åtkomstdatum: 14 juli 2025).

Bensow, R.E., Khraisat, Q.S., Johansson, T.A., Andersson, C., Hallander, J., Liefvendahl, M., Kämpeskog, A., Persson, M. och Sigray, P. (2025) *PUB – Methods to predict radiated ship noise*. An innovation project carried out within the Swedish Transport Administration's industry program Sustainable Shipping, operated by Lighthouse. Tillgänglig vid: https://lighthouse.nu/images/Rapporter/IP6_2022_PUB.pdf.

- Blom, E.-L. (2025) ”Hur påverkar buller livet under ytan?”
Ekosystembaserad Havsförvaltning - Frukostseminarium, 4 februari.
Tillgänglig vid: <https://ebhf.se/frukostseminarium-arkiv/>.
- Blom, E.-L., Dekhla, I.K., Bertram, M.G., Manera, J.L., Kvarnemo, C. och Svensson, O. (2024) ”Anthropogenic noise disrupts early-life development in a fish with paternal care”, *Science of The Total Environment*, 935, s. 173055. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173055>.
- Blom, E.-L., Kvarnemo, C., Dekhla, I., Schöld, S., Andersson, M.H., Svensson, O. och Amorim, M.Clara.P. (2019) ”Continuous but not intermittent noise has a negative impact on mating success in a marine fish with paternal care”, *Scientific Reports*, 9(1), s. 5494. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41786-x>.
- Bosschers, J., Koning, J. och Schouten, R. (2023) ”Estimation of the underwater radiated noise by ship propeller cavitation using onboard sensors”, *29th International Congress on Sound and Vibration*.
- Breeding, J.E., Jr., P., Lisa A., B., Marshall, W., och Melanie H. (1996)
Research Ambient Noise DIrectionality (RANDI) 3.1 Physics Description.:
Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center. Tillgänglig vid:
<https://doi.org/10.21236/ADA316034>.
- Catineau, H., Cauchy, P., Robin, O., Gervaise, C., Mercure-Boissonnault, P., Lafrance, S. och St-Onge, G. (2022) ”Identification of Sources and Their Directivity in the Global Underwater Radiated Noise from a Merchant Ship”, *Canadian Acoustics*, 50(3), s. 108–109. Tillgänglig vid: <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/3872> (Åtkomstdatum: 05 november 2024).
- Cintosun, E. (2024) ”Derivations of transfer functions for estimating ship underwater radiated noise from onboard vibrations”, *Ocean Engineering*, 311, s. 118792. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118792>.
- Cosandey-Godin, A. och Kukreti, D. (2025) ”Preliminary Findings from Canada’s URN Management Pilot and Maersk’s Vessel Design Perspective”. *2025 Workshop on the relationship between ship energy efficiency and underwater radiated noise*, London, 7 november. Tillgänglig vid: <https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.
- Cruz, E., Lloyd, T., Lafeber, F.H., Bosschers, J., Vaz, G. och Djavidnia, S. (2022) ”The SOUNDS project: towards effective mitigation of underwater noise from shipping in Europe”. *22nd International Symposium on*

Nonlinear Acoustics, Oxford, UK, s. 070021. Tillgänglig vid:
<https://doi.org/10.1121/2.0001638>.

Dorgeville, E., Baudin, E., Koushan, K. och Molins Riera, S. (2025)
”Overview of the EU Horizon-funded project: LOWNOISER.
Demonstrating Energy Efficiency Technologies for Quieter Oceans”. 2025
*Workshop on the Relationship between Ship Energy Efficiency and
Underwater Radiated Noise*, London, november. Tillgänglig vid:
<https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.

Duarte, C.M., Chapuis, L., Collin, S.P., Costa, D.P., Devassy, R.P., Eguiluz,
V.M., Erbe, C., Gordon, T.A.C., Halpern, B.S., Harding, H.R., Havlik,
M.N., Meekan, M., Merchant, N.D., Miksis-Olds, J.L., Parsons, M.,
Predragovic, M., Radford, A.N., Radford, C.A., Simpson, S.D.,
Slabbekoorn, H., Staaterman, E., Van Opzeeland, I.C., Winderen, J., Zhang,
X. och Juanes, F. (2021) ”The soundscape of the Anthropocene ocean”,
Science, 371(6529), s. eaba4658. Tillgänglig vid:
<https://doi.org/10.1126/science.aba4658>.

El-Dairi, R., Outinen, O. och Kankaanpää, H. (2024) ”Anthropogenic
underwater noise: A review on physiological and molecular responses of
marine biota”, *Marine Pollution Bulletin*, 199, s. 115978. Tillgänglig vid:
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115978>.

Erbe, C. (2013) ”Underwater noise of small personal watercraft (jet skis)”,
The Journal of the Acoustical Society of America, 133(4), s. EL326–EL330.
Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/1.4795220>.

Erbe, C., Duncan, A.J., Gavrilov, A., Landero, M., McCauley, R.D.,
Parnum, I., Salgado-Kent, C. och Sidenko, E. (2025) ”Sources of
Underwater Noise”, i C. Erbe, A.J. Duncan, A. Gavrilov, M. Landero, R.D.
McCauley, I. Parnum, C. Salgado-Kent, och E. Sidenko (red.) *Marine
Mammal Acoustics in a Noisy Ocean*. Cham: Springer, s. 85–162.
Tillgänglig vid: https://doi.org/10.1007/978-3-031-77022-7_2.

Felli, M., Bosschers, J., De Angelis, E., Firenze, E. och Gjestland, T. (2025)
*Report on source level assessment matrix for different propulsor types and
mitigation solutions*. SATURN Deliverable 4.7. Tillgänglig vid:
<https://www.saturnh2020.eu/results>.

Findlay, C.R., Rojano-Doñate, L., Tougaard, J., Johnson, M.P. och Madsen,
P.T. (2023) ”Small reductions in cargo vessel speed substantially reduce
noise impacts to marine mammals”, *Science Advances*, 9(25), s. eadf2987.
Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf2987>.

Foeth, E.J. (2025) *Trade-off between Underwater Radiated Noise (URN) and Greenhouse Gas (GHG) Emissions in Propeller Design*. Report No. 77002-2-RD. Wageningen: MARIN – Maritime Research Institute Netherlands. Tillgänglig vid: <https://www.marin.nl>.

Fragasso, J. (2023) *Structure-borne noise of marine diesel engines: transfer-path analysis of onboard transmission and underwater radiation*. PhD Thesis. Memorial University of Newfoundland.

Gaggero, S., Gaggero, T., Tani, G., Villa, D., Rizzuto, E., Pinto, O., Becchi, P., De Angelis, E. och Viviani, M. (2025) "Propeller design by optimisation for underwater radiated noise reduction: a full scale application", *Ocean Engineering*, 333, s. 121412. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121412>.

Gaggero, S. och Martinelli, M. (2021) "Comparison of different propeller boss cap fins design for improved propeller performances", *Applied Ocean Research*, 116, s. 102867. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102867>.

Gaggero, T., Armelloni, E., Codarin, A., Chicco, C., Spoto, M., Franzosini, C., Ciriaco, S. och Picciulin, M. (2024) "Electric boat underwater radiated noise and its potential impact on species of conservation interest", *Marine Pollution Bulletin*, 199, s. 115937. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115937>.

Guy, M.-A., Kesour, K., Robin, O., Gagnon, S., St-Jacques, J., Vulliez, M., Tremblay, R. och Marquis, J.-C.G. (2024) "Effectiveness of standard mitigation technologies at reducing ships' machinery noise using a small-scale ship-like structure". *186th Meeting of the Acoustical Society of America and the Canadian Acoustical Association*, Ottawa, Ontario, Canada, s. 070001. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/2.0001912>.

Hannay, D.E., Grooms, C., Li, Z. och Quijano, J. (2023) "Boundary Pass Underwater Listening Station—Data management and processing", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(4_supplement), s. A220–A220. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0023339>.

Hannay, D.E., MacGillivray, A.O., Frouin-Mouy, H., Li, Z., Pace, F., Wladichuk, J. och Alavizadeh, Z. (2019) *Study of Quiet-Ship Certifications: Analysis using ECHO Ship Noise Database*. JASCO Applied Sciences.

Hasenpflug, H., Buul, W. van, Gilroy, L., Cintosun, E., Dupuis, J., Schael, S. och Homm, A. (2021) "BURNSi ORCA Class Acoustic and Vibration

Characteristics”, *Proceedings of DAGA 2021*. Vienna, Austria: DAGA Conference.

Hatch, L., McKenna, M., Burnham, R., Frasier, K., Gabriele, C., Hastings, S., Haver, S., Kunz, A., MacGillivray, A., Malinka, C., Morten, J., Reeves, L.P., Trounce, K., Vagle, S., Wood, J. och ZoBell, V. (2025) ”A call for comparable measurements of underwater radiated noise related to vessel speed reduction programs”, *JASA Express Letters*, 5(8), s. 087201. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0038636>.

Havs- och vattenmyndigheten (2024a) ”11.2A Förekomst och effekt av kontinuerligt lågfrekvent undervattensljud – Faktablad för att bedöma indikator för god miljöstatus enligt havsmiljöförordningen”. Havs- och vattenmyndigheten. Tillgänglig vid: <https://www.havochvatten.se/download/18.1d23b59c190125a43f2e9596/1719557061100/11-2a-forekomst-och-effekt-av-kontinuerligt-lagfrekventundervattensbuller.pdf>.

Havs- och vattenmyndigheten (2024b) *Marin strategi för Nordsjön och Östersjön 2024–2029*. Rapport 2024:12. Havs- och vattenmyndigheten. Tillgänglig vid: <https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/publikationer/2024-07-05-marin-strategi-for-nordsjon-och-ostersjon-2024-2029.html>.

Havs- och vattenmyndigheten (2025) ”Faktablad för att bedöma indikator till miljö kvalitetsnorm enligt 19 § havsmiljöförordningen E.4.1 Tillförsel av kontinuerlig ljudenergi”. Havs- och vattenmyndigheten. Tillgänglig vid: <https://www.havochvatten.se/download/18.78d8bc481964d44692f4306e/1745404414441/e-4-1-tillforsel-av-kontinuerlig-ljudenergi.pdf>.

Helal, K.M., Fragasso, J. och Moro, L. (2024) ”Underwater noise characterization of a typical fishing vessel from Atlantic Canada”, *Ocean Engineering*, 299, s. 117310. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117310>.

HELCOM (2023) *State of the Baltic Sea. Third HELCOM holistic assessment 2016-2021*. Baltic Sea Environment Proceedings n°194. Tillgänglig vid: https://helcom.fi/post_type_publ/holas3_sobs.

Helcom (2025) *Best Environmental Practice (BEP) and Best Available Technology (BAT) for the reduction of continuous underwater noise from shipping*. Draft. BSH.

Hüffmeier, J. och Johanson, M. (2021) ”State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships”, *Journal of Marine Science and*

Engineering, 9(4), s. 447. Tillgänglig vid:
<https://doi.org/10.3390/jmse9040447>.

IMO (2023) "Revised Guidelines for the Reduction of Underwater Noise from Commercial Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life". International Maritime Organization, IMO. Tillgänglig vid:
[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/Documents/MEPC.1-Circ.906%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20The%20Reduction%20Of%20Underwater%20Radiated%20NoiseFrom%20Shipping%20To%20Address...%20\(Secretariat\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/Documents/MEPC.1-Circ.906%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20The%20Reduction%20Of%20Underwater%20Radiated%20NoiseFrom%20Shipping%20To%20Address...%20(Secretariat).pdf).

Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Andersson, M.H., Majamäki, E. och Sigray, P. (2022) "Underwater noise emissions from ships during 2014–2020", *Environmental Pollution*, 311, s. 119766. Tillgänglig vid:
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119766>.

Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Liefvendahl, M., Bensow, R., Sigray, P., Östberg, M., Karasalo, I., Andersson, M., Peltonen, H. och Pajala, J. (2018) "Modelling of ships as a source of underwater noise", *Ocean Science*, 14(6), s. 1373–1383. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.5194/os-14-1373-2018>.

Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Majamäki, E., Liefvendahl, M., Bensow, R., Sigray, P., Östberg, M., Karasalo, I., Andersson, M., Peltonen, H. och Pajala, J. (2025) *Underwater noise emissions from Baltic Sea shipping in 2024*. Helsinki, Finland: HELCOM. Tillgänglig vid: <https://www.helcom.fi>.

Johansson, T.A., Andersson, C., Genell, A., Winroth, J. och Von Elern, F. (2023) *Noise from ships powered by LNG or electricity and its effects: a cross-domain investigation : Final report of the Silent@Sea project*. C809. IVL Swedish Environmental Research Institute. Tillgänglig vid:
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-4293> (Åtkomstdatum: 09 januari 2024).

Johansson, T.A., Andersson, Carl, Krång, A.-S. och Andersson, Cecilia (2023) *Underwater noise from fairways – policies, incentives and measures to reduce the environmental impact*. C743. IVL Swedish Environmental Research Institute. Tillgänglig vid:
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ivl:diva-4161> (Åtkomstdatum: 07 juli 2023).

Johansson, T.A., Lalander, E., Krång, A.-S. och Andersson, M.H. (2024) "Speed dependence, sources, and directivity of small vessel underwater noise", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 156(4), s. 2077–2087. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0028385>.

de Jong, K., Forland, T.N., Amorim, M.C.P., Rieucan, G., Slabbekoorn, H. och Sivle, L.D. (2020) "Predicting the effects of anthropogenic noise on fish reproduction", *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 30(2), s. 245–268.

Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1007/s11160-020-09598-9>.

de Jong, K., Murray, C.C., Anabitarte, A., Bailey, S., Drake, L., Fernandes-Salvador, J.A., Hasselov, I.-M., Heibeck, N., Jalkanen, J.-P., Lehtikainen, A., Merchant, N., Nylund, A.T. och Redfern, J.V. (2025) "Trade-offs and synergies in the management of environmental pressures: a case study on ship noise mitigation", *Marine Pollution Bulletin*, 218, s. 118073.

Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118073>.

Kastelein, R.A., Bunschoek, P., Hagedoorn, M., Au, W.W.L. och De Haan, D. (2002) "Audiogram of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency-modulated signals", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(1), s. 334–344. Tillgänglig vid:

<https://doi.org/10.1121/1.1480835>.

Kendrick, K. och Collins, T. (2019) *Ship underwater radiated noise*.

Technical report Report 368-000-01 Rev 5. Vard Marine Inc., s. Report 368-000-01 Rev 5. Tillgänglig vid:

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/tc/T29-151-2019-eng.pdf&ved=2ahUKEwjNyLHUmYmLAXUpCRAIHbJsEdkQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw12eLA8mhT1Xx6EZ5DG2vOZ.

Kesour, K., Camerin, P., Gauthier Marquis, J.-C. och Gervaise, C. (2023) "Assessment of Propeller Cavitation Inception Speed Based on Onboard Vibration and Underwater Acoustic Data", *Canadian Acoustics*, 51(3), s. 232–233. Tillgänglig vid: <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/4086> (Åtkomstdatum: 05 november

2024).

Khraisat, Q.S. (2025) *Numerical Investigation of Scale Effects on Cavitation and Underwater Radiated Noise*. Lic. Chalmers University of Technology.

Tillgänglig vid: <https://research.chalmers.se/en/publication/546730>.

Kim, Y., Lagerström, M., Granhag, L. och Ytreberg, E. (2025) "Sustainable Hull maintenance strategies in Baltic Sea region through case studies of RoPax vessels", *Marine Pollution Bulletin*, 211, s. 117453. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117453>.

Kindberg, L.B. (2025) "Development of an ESI Underwater Radiated Noise Module". 2025 *Workshop on the Relationship between Ship Energy Efficiency and Underwater Radiated Noise*, London, 6 november.

Tillgänglig vid:

<https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.

Kinneging, N., Andersson, M.H., De Jong, C., De Jong, K., Fischer, J., Kosecka, M., Kvadsheim, P., Merchant, N., Norro, A., Robinson, S. och Tougaard, J. (2023) "Joint Monitoring Program for Ambient Noise in the North Sea", i A.N. Popper, J. Sisneros, A.D. Hawkins, och F. Thomsen (red.) *The Effects of Noise on Aquatic Life*. Cham: Springer International Publishing, s. 1–11. Tillgänglig vid: https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_79-1.

Koschinski, S., Owen, K., Lehnert, K. och Kamińska, K. (2024) "Current species protection does not serve its porpoise—Knowledge gaps on the impact of pressures on the Critically Endangered Baltic Proper harbour porpoise population, and future recommendations for its protection", *Ecology and Evolution*, 14(9). Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1002/ece3.70156>.

Köksal, Ç.S. (2025) "Comparative URN measurements on MV ERGE using conventional vs. Gate Rudder systems under the H2020 GATERS project". *2025 Workshop on the Relationship between Ship Energy Efficiency and Underwater Radiated Noise*, London, 6 november. Tillgänglig vid: <https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.

Lagerström, M., Wrange, A.-L., Oliveira, D.R., Granhag, L., Larsson, A.I. och Ytreberg, E. (2022) "Are silicone foul-release coatings a viable and environmentally sustainable alternative to biocidal antifouling coatings in the Baltic Sea region?", *Marine Pollution Bulletin*, 184, s. 114102. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114102>.

Lajaunie, M., Ollivier, B., Ceyrac, L., Dellong, D. och Le Courtois, F. (2023) "Large-Scale Simulation of a Shipping Speed Limitation Measure in the Western Mediterranean Sea: Effects on Underwater Noise", *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), s. 251. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3390/jmse11020251>.

Lalander, E., Larsson Nordström, R. och Andersson, M.H. (2022) *Changes in the underwater soundscape in Kattegat due to shipping re-routing*. FOI-R--5334--SE. Emilia Lalander, Robin Larsson Nordström, Mathias H. Andersson. Tillgänglig vid: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1902402/FULLTEXT01.pdf>.

Leaper, R. (2019) "The Role of Slower Vessel Speeds in Reducing Greenhouse Gas Emissions, Underwater Noise and Collision Risk to

Whales”, *Frontiers in Marine Science*, 6, s. 505. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00505>.

Leaper, R. och Renilson, M. (2012) ”A review of practical methods for reducing underwater noise pollution from large commercial vessels”, *International Journal of Maritime Engineering*, 154(A2).

Lloyd, T., Daniel, J.M., Bosschers, J. och Schuster, M.G. (2024) ”‘PIANO’ : a physics-based semi-empirical source level model for fleet-scale ship URN prediction”. *8th International Symposium on Marine Propulsors (smp 2024)*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.15480/882.9335>.

Lloyd, T., Lafeber, F.H. och Bosschers, J. (2024) ”Ship URN mitigation by air injection : model-scale experiments and application to full-scale measurement data”. *Eighth International Symposium on Marine Propulsors smp’24, Berlin, Germany, March 2024*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.15480/882.9336>.

MacGillivray, A.O., Ainsworth, L.M., Zhao, J., Dolman, J.N., Hannay, D.E., Frouin-Mouy, H., Trounce, K.B. och White, D.A. (2022) ”A functional regression analysis of vessel source level measurements from the Enhancing Cetacean Habitat and Observation (ECHO) database”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(3), s. 1547–1563. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0013747>.

MacGillivray, A.O. och de Jong, C. (2021) ”A Reference Spectrum Model for Estimating Source Levels of Marine Shipping Based on Automated Identification System Data”, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), s. 369. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3390/jmse9040369>.

MacGillivray, A.O., Li, Z., Hannay, D.E., Trounce, K.B. och Robinson, O.M. (2019) ”Slowing deep-sea commercial vessels reduces underwater radiated noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(1), s. 340–351. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/1.5116140>.

MacGillivray, A.O. och Schuster, M. (2025) ”Modeling source levels of marine shipping”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 157(4_Supplement), s. A179–A179. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0037830>.

Magnhagen, C., Johansson, K. och Sigra, P. (2017) ”Effects of motorboat noise on foraging behaviour in Eurasian perch and roach: a field

experiment”, *Marine Ecology Progress Series*, 564, s. 115–125. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3354/meps11997>.

Martin, S.B., MacGillivray, A.O., Wood, J.D., Trounce, K.B., Tollit, D.J. och Angadi, K. (2024) ”Sound Emissions from Ultrasonic Antifouling Equipment”. Redigerad av A.N. Popper, J.A. Sisneros, A.D. Hawkins, och F. Thomsen, s. 261–276. Tillgänglig vid: https://doi.org/10.1007/978-3-031-50256-9_102.

Martin, S.B., Siderius, M., Ainslie, M.A., Halvorsen, M.B., Hatch, L., Prior, M.K., Brooker, D., Caplinger, J., Erbe, C., Gebbie, J., Heaney, K.D., MacGillivray, A.O., Matthews, M.-N., Oppeneer, V.O., Schäfke, A., Schoeman, R.P. och Sertlek, H.Ö. (2024) ”Verifying models of the underwater soundscape from wind and ships with benchmark scenarios”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 156(5), s. 3422–3438. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0026597>.

Maruf och Gullett, W. (2022) ”Tackling anthropogenic underwater noise through the Convention on Biological Diversity: Progress and future development”, *Marine Policy*, 146, s. 105293. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105293>.

Matei, M., Charish, R., Quinn, M., Wilder, F., Tabbutt, S. och Wood, J. (2024) *Quiet Sound Vessel Slowdown 2023. SMRU Consulting report to Quiet Sound*. Appendix to the report ”Results of the 2023-2024 Voluntary Commercial Shipping Slowdown in Washington Waters for the Protection of Southern Resident Killer Whales”. Tillgänglig vid: <https://quietsound.org/>.

McIntyre, D., Lee, W., Frouin-Mouy, H., Hannay, D. och Oshkai, P. (2021) ”Influence of propellers and operating conditions on underwater radiated noise from coastal ferry vessels”, *Ocean Engineering*, 232, s. 109075. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109075>.

McQueen, K., Sivle, L.D., Forland, T.N., Meager, J.J., Skjæraasen, J.E., Olsen, E.M., Karlsen, Ø., Kvadsheim, P.H. och De Jong, K. (2024) ”Continuous sound from a marine vibrator causes behavioural responses of free-ranging, spawning Atlantic cod (*Gadus morhua*)”, *Environmental Pollution*, 344, s. 123322. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123322>.

Merchant, N., Farcas, A. och Seddon, R. (2024) *Continuous anthropogenic sound indicator assessment for the UK Marine Strategy*. Tillgänglig vid: <https://moat.cefas.co.uk/pressures-from-human-activities/underwater-noise/continuous-noise/> (Åtkomstdatum: 16 februari 2026).

Mercure-Boissonnault, P., Cauchy, P., Rabetoandro, F.F., Gervaise, C., St-Onge, G., Mérindol, J., Perrier de la Bathie, C., Catineau, H. och Lafrance, S. (2023) "The Mars Database – Source Levels Measured for the Fleet Navigating the St. Lawrence Estuary", *Canadian Acoustics*, 51(3), s. 236–237. Tillgänglig vid: <https://jaa.caa-aca.ca/index.php/jaa/article/view/4111> (Åtkomstdatum: 05 november 2024).

Morten, J. (2025) "Protecting Blue Whales and Blue Skies: A collaborative partnership for safer whales, cleaner air, and a quieter ocean". 2025 *Workshop on the Relationship between Ship Energy Efficiency and Underwater Radiated Noise*, London, 6 november. Tillgänglig vid: <https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.

Müller, A., Maquil, T., Heilbeck, N., Heitmüller, S., Juretzek, C. och Krüger, C. (2024) *Inventory of Measures to Mitigate Anthropogenic Underwater Noise – Shipping*. M173483/03 Version 2. Hamburg, Germany: Müller-BBM Industry Solutions GmbH, Niederlassung Hamburg, s. 40.

Nelissen, D., Király, J. och Meijer, C. (2022) *Blue Speeds for shipping - Economic analysis and legal framework to achieve environmental benefits*. Technical report Publication code: 22.210439.096. CE Delft. Tillgänglig vid: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2022/10/CE_Delft_210439_Blue_Speeds_for_shipping_Def.pdf.

Noise Control Engineering, LLC (2025) *Current Technologies and Management Practices for Reducing Underwater Radiated Noise Produced by Vessels*. Report 2025-021. Billerica, MA: Noise Control Engineering, LLC. Tillgänglig vid: <https://noise-control.com>.

OSPAR (2023) *Underwater Noise Thematic Assessment*. London: OSPAR Commission. Tillgänglig vid: <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/qsr-2023/thematic-assessments/underwater-noise>.

Parsons, M.J.G., Erbe, C., Meekan, M.G. och Parsons, S.K. (2021) "A Review and Meta-Analysis of Underwater Noise Radiated by Small (<25 m Length) Vessels", *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), s. 827. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3390/jmse9080827>.

Pettersen, Ø.S. (2025) "Silent notation and EE considerations at the design stage and afterwards". 2025 *Workshop on the relationship between ship energy efficiency and underwater radiated noise*, London, 7 november. Tillgänglig vid: <https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.

Pigeault, R., Ruser, A., Ramírez-Martínez, N.C., Geelhoed, S.C.V., Haelters, J., Nachtsheim, D.A., Schaffeld, T., Sveegaard, S., Siebert, U. och Gilles, A. (2024) "Maritime traffic alters distribution of the harbour porpoise in the North Sea", *Marine Pollution Bulletin*, 208, s. 116925. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116925>.

Popper, A.N. och Hawkins, A. (red.) (2012) *The Effects of Noise on Aquatic Life*. New York, NY: Springer New York (Advances in Experimental Medicine and Biology). Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7311-5>.

Popper, A.N. och Hawkins, A.D. (2019) "An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes", *Journal of Fish Biology*, 94(5), s. 692–713. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>.

Portillo-Juan, A., Saettone, S., Andersen, P. och Ferrer, E. (2024) "Hydro-acoustic optimization of propellers: A review of design methods", *Applied Ocean Research*, 151, s. 104158. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104158>.

Possenti, L., de Nooijer, L., de Jong, C., Lam, F.-P., Beelen, S., Bosschers, J., van Terwisga, T., Stigter, R. och Reichart, G.-J. (2024) "The present and future contribution of ships to the underwater soundscape", *Frontiers in Marine Science*, 11. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1252901>.

Ross, D. (1976) *Mechanics of Underwater Noise*. TETRA TECH INC PASADENA CA. Tillgänglig vid: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA075101> (Åtkomstdatum: 29 mars 2022).

Salinas, R. (2014) *On-site measurements-Experimental data for accurate identification and quantification of Cavitation Noise and other sources*. D 3.3. TSI.

dos Santos, F., Bosschers, J., Lloyd, T. och Hermans, M. (2025) *Effect of speed reduction on underwater radiated noise of ships sailing on the Dutch North Sea*. Report No. 77002-3-RD. Wageningen: MARIN – Maritime Research Institute Netherlands. Tillgänglig vid: <https://www.marin.nl>.

Schwarz, A.L. och Greer, G.L. (1984) "Responses of Pacific Herring, *Clupea harengus pallasii*, to Some Underwater Sounds", *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(8), s. 1183–1192. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1139/f84-140>.

Sertlek, Ö., MacGillivray, A.O., Lloyd, T., Hermans, M., Wood, M., Schuster, M., Ainslie, M. och Pace, F. (2024) *NAVISON Final Report: Calculation and analysis of shipping sound maps for all European seas from 2016 to 2050*. Lisbon: European Maritime Safety Agency (EMSA). Tillgänglig vid: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2024/10/NAVISON-Underwater-noise-2024_10.pdf.

Sierra-Flores, R., Atack, T., Migaud, H. och Davie, A. (2015) "Stress response to anthropogenic noise in Atlantic cod *Gadus morhua* L.", *Aquacultural Engineering*, 67, s. 67–76. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.06.003>.

SLU Artdatabanken (2025) *Artfakta: tumlare (Phocoena phocoena)*. Tillgänglig vid: <https://artfakta.se/taxa/100106> (Åtkomstdatum: 09 december 2025).

Smith, T.A., Grech La Rosa, A., Piggott, G., Gaivota, J.A.N. och McMorran, S.S. (2024) "An experimental study of underwater radiated noise from a small vessel with damaged and fouled propellers", *JASA Express Letters*, 4(12), s. 126002. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1121/10.0034612>.

Smith, T.A., Grech La Rosa, A., Piggott, G., Gaivota, J.A.N. och McMorran, S.S. (2025) "Propeller cavitation on small craft: Underwater noise measurements and visualisation from full-scale trials", *Ocean Engineering*, 317, s. 120024. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120024>.

Smith, T.A., Grech La Rosa, A. och Wood, B. (2024) "Underwater radiated noise from small craft in shallow water: Effects of speed and running attitude", *Ocean Engineering*, 306, s. 118040. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118040>.

Smith, T.A. och Rigby, J. (2022) "Underwater radiated noise from marine vessels: A review of noise reduction methods and technology", *Ocean Engineering*, 266, s. 112863. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112863>.

Stanley, J.A., Van Parijs, S.M. och Hatch, L.T. (2017) "Underwater sound from vessel traffic reduces the effective communication range in Atlantic cod and haddock", *Scientific Reports*, 7(1), s. 14633. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14743-9>.

Tani, G. och Marino, A. (2025) "Propeller design by optimization: UNIGE and Fincantieri experience". *2025 Workshop on the relationship between*

ship energy efficiency and underwater radiated noise, London, 6 november.

Tillgänglig vid:

<https://sway.cloud.microsoft/O9T8ZP3rYy4rzbxd?ref=Link>.

The Vancouver Fraser Port Authority (2018) *ECHO Program Voluntary Vessel Slowdown Trial Summary Findings*. Vancouver Fraser Port

Authority. Tillgänglig vid:

<https://www.ceaa.gc.ca/050/documents/p80054/125750E.pdf>

(Åtkomstdatum: 24 maj 2022).

The Vancouver Fraser Port Authority (2024) *2024 Annual report Enhancing Cetacean Habitat and Observation (ECHO) Program*. Vancouver, Canada.

Tillgänglig vid: <https://www.portvancouver.com/environment/healthy-ecosystem/echo>.

Tomy, J.P. (2024) *Predicting Underwater Radiated Noise from Ship Propellers*. PhD. Technical University of Denmark. Tillgänglig vid:

https://orbit.dtu.dk/files/380089668/PhD_Thesis_Joseph_Praful_Tomy.pdf

(Åtkomstdatum: 03 april 2025).

Tougaard, J., Wright, A.J. och Madsen, P.T. (2015) "Cetacean noise criteria revisited in the light of proposed exposure limits for harbour porpoises",

Marine Pollution Bulletin, 90(1–2), s. 196–208. Tillgänglig vid:

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.051>.

Trickey, J.S., Cárdenas-Hinojosa, G., Rojas-Bracho, L., Schorr, G.S., Rone, B.K., Hidalgo-Pla, E., Rice, A. och Baumann-Pickering, S. (2022)

"Ultrasonic antifouling devices negatively impact Cuvier's beaked whales near Guadalupe Island, México", *Communications Biology*, 5(1).

Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03959-9>.

Vakili, S., White, P. och Turnock, S. (2023) *The impact of shipping's*

energy efficiency measures on reduction of underwater radiated noise, and opportunities for co-benefit. Technical report Version 4-02.11.2023.

Southampton Marine and Maritime Institute (SMMI). Tillgänglig vid:

<https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2023/11/Final-report-ver-4-02-11-Vahid-Without-track-changes.pdf>.

Vard Marine Inc. (2023) *Ship energy efficiency and underwater radiated noise*. Technical report Report 545-000-01. Ottawa: Vard Marine Inc.

Tillgänglig vid:

https://publications.gc.ca/collections/collection_2024/tc/T22-266-2024-eng.pdf.

Varello, R., Asnicar, D., Boaga, J. och Cima, F. (2023) "Behavioural Responses to Ultrasound Antifouling Systems by Adult Solitary Ascidians", *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6), s. 1115. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3390/jmse11061115>.

Venkateshwaran, A., Deo, I.K. och Jaiman, R.K. (2025) "MUTE-DSS: A Digital-Twin-Based Decision Support System for Minimizing Underwater Radiated Noise in Ship Voyage Planning". arXiv. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2508.01907>.

Weilgart, L. (2023) *Best Available Technology (BAT) and Best Environmental Practice (BEP) for Mitigating Three Noise Sources: Shipping, Seismic Airgun Surveys, and Pile Driving - Technical Series No. 46*. Technical report Technical Series No. 46. CMS Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals. Tillgänglig vid: <https://www.cms.int/en/publication/best-available-technology-bat-and-best-environmental-practice-bep-mitigating-three-noise>.

Weiss, Z., Spence, J. och Bonnice, B. (2024) *Vessel-Generated Underwater Radiated Noise Comparison Study (Tugs): eWOLF, Tioga, and Leader*. Technical report NCE REPORT 2024-079. Maritime Administration (MARAD). Tillgänglig vid: <https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/2024-11/NCE%20REPORT%202024-079%20MARAD%20Vessel-Generated%20Underwater%20Radiated%20Noise%20Comparison%20Study%20%28Tugs%29%20Rev%200.pdf>.

Williams, R., Erbe, C., Ashe, E. och Clark, C.W. (2015) "Quiet(er) marine protected areas", *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), s. 154–161. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.012>.

Wisniewska, D.M., Johnson, M., Teilmann, J., Siebert, U., Galatius, A., Dietz, R. och Madsen, P.T. (2018) "High rates of vessel noise disrupt foraging in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*)", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1872), s. 20172314. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2314>.

Wittekind, D.K. (2014) "A Simple Model for the Underwater Noise Source Level of Ships", *Journal of Ship Production and Design*, 30(1), s. 7–14. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.5957/JSPD.30.1.120052>.

World Bank (2025) *Keys to Energy-Efficient Shipping*. Washington DC. Tillgänglig vid: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/7aa98029-2105-4560-8428-28876f25bdd1/content>.

Wärtsilä Corporation (2025) *51 great ways the maritime industry could reduce its greenhouse gas emissions*. Helsinki: Wärtsilä Corporation.

Tillgänglig vid:

https://brandhub.wartsila.com/m/640f0512d79cd6d7/original/50-great-ways-the-maritime-industry-could-reduce-its-greenhouse-gas-emissions-eBook.pdf?utm_source=web&utm_medium=bwp&utm_term=marine&utm_content=bwp&utm_campaign=bwp-lead-scoring.

Ytreberg, E. (2025) ”Enkelt att minska fritidsbåtars miljöpåverkan”. *Baltic Breakfast – Östersjöcentrum, Stockholms universitet*, Stockholm, 14 maj.

Tillgänglig vid: <https://www.su.se/stockholms-universitets-ostersjocentrum/policyverksamhet/baltic-breakfast> (Åtkomstdatum: 14 maj 2025).

Zhu, M. och Ma, L. (2024) ”A review of recent advances in the effects of surface and interface properties on marine propellers”, *Friction*, 12(2), s. 185–214. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0716-4>.

ZoBell, V.M. och Frasier, K.E. (2025) *Source Levels and Noise Levels of Participating Vessels during the 2024 Protecting Blue Whales and Blue Skies Program*. Technical Memorandum 672. Marine Physical Laboratory.

Özsayan, S., Aydın, Ç., Köksal, Ç.S., Ünal, U.O. och Korkut, E. (2024) ”Assessment of the gate rudder system on the cavitation and underwater radiated noise characteristics of a containership”, *Ocean Engineering*, 313, s. 119391. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119391>.

Denna rapport riktar sig till myndigheter, forskare, sjöfartsaktörer och andra intressenter som arbetar med havsmiljöförvaltning, sjöfart, marin planering och miljöbedömning. Syftet är att sammanställa det aktuella kunskapsläget om undervattensbuller från kommersiell sjöfart och belysa möjliga vägar för att minska dess miljöpåverkan.

Rapporten beskriver hur fartyg bidrar till kontinuerligt undervattensbuller i marina miljöer, vilka tekniska och operativa faktorer som påverkar bullerutstrålningen samt vad som i dag är känt om biologiska effekter på marina organismer. Vidare behandlas tekniska och operativa åtgärder, alternativa framdrivningslösningar, mät- och modelleringsmetoder samt förutsättningar för uppföljning inom havsmiljöförvaltningen.

Avslutningsvis belyser rapporten betydelsen av ekonomiska incitament, teknikutveckling och internationellt samarbete för att åstadkomma varaktiga minskningar av undervattensbuller från sjöfarten. Rapporten är avsedd att utgöra ett kunskapsunderlag för fortsatt forskning, förvaltningsarbete och utveckling av styrmedel och åtgärder på nationell och internationell nivå.

