

LIGHTHOUSE REPORTS

# Miljöpåverkan av en hamns undervattensbuller

*A synthesis of knowledge*



En förstudie utförd inom Trafikverkets branschprogram Hållbar sjöfart som drivs av Lighthouse

## **Miljöpåverkan av en hamns undervattensbuller**

Analys av forskningsbehov kring källor och effekter samt åtgärder och styrmedel för att mildra problemet

### **Författare**

Torbjörn Johansson, IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Jan Hallander, SSPA Sweden AB

Rickard Bensow, Chalmers Tekniska Högskola

Edvard Molitor, Göteborgs Hamn

Clas Gustafsson, Furetank

Dan Ericsson, Lysekils Hamn

Karl Jivén, IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Denna förstudie har genomförts inom Trafikverkets branschprogram Hållbar sjöfart, som drivs av Lighthouse.

## Summary

In recent years, the impact of underwater noise on marine life has gained increasing international interest. Shipping, construction work and port operations are some examples of strong sources of noise in the seas. Sounds and noise can affect marine life in different ways, through physical influences on hearing and other organs, through influences on behavior, and through masking of their own sounds and natural sounds in the environment.

Harbour noise contains noise from ships and construction work but cannot be predicted from knowledge of these as operating characteristics differ. The literature study provides a background to the problem, inventing instruments, rules and recommendations in the field, as well as reviewing the literature regarding noise levels close to ports and effects on marine life. Only a handful of studies on the underwater noise in harbours have been published. Our review of these shows that noise in harbours is similar to that which can be measured near a shipping lane. However, there are indications that harbor noise also contains relatively rare but very strong transient sounds, that are not found near shipping lanes. Such sounds would, if present, have a significant detrimental impact on marine life. Therefore, the presence and characteristics of these strong transients needs to be further investigated through source measurements complemented with long-term measurements. The parties of this concept study have the relevant expertise and links to address this issue in an effective way and will seek to obtain funding to answer the many questions about underwater noise in harbours.

## Sammanfattning

Undervattensbullers inverkan på marint liv har under senare år erhållit ett allt större internationellt intresse. Sjöfart, konstruktionsarbeten och hamnverksamhet är några exempel på starka källor till buller i haven. Ljud och buller kan påverka marint liv på olika sätt, genom fysisk påverkan på hörsel och andra organ, genom påverkan på beteende, och genom maskering av egna läten och naturliga ljud i omgivningen.

Hamnbuller innehåller buller från fartyg och konstruktionsarbeten, men kan inte förutsägas från kunskap om dessa då operationskaraktäristika skiljer sig åt. Denna studie ger en bakgrund till problemet, inventerar styrmedel, regler och rekommendationer på området samt går igenom litteraturen med avseende på bullernivåer nära hamnar och effekter på marint liv. Det har gjorts få studier av undervattensbuller i hamnar. Vår genomgång av de studier som har genomförts har visat att bullret i hamnar liknar det som uppmätts nära fartygsleder. Dock finns tecken på att hamnbuller innehåller relativt sällsynta men mycket starka ljud som inte förekommer i fartygsbuller eller bullret nära farleder för fartyg. Sådana ljud utgör troligen en mycket stark störning av det marina livet. Därför behöver detta undersökas vidare, bl a genom mätningar av ljudlandskap och mätningar på enskilda bullerkällor. Parterna i denna förstudie har tillsammans den kompetens och de kontakter som behövs för att adressera denna fråga, och kommer att gå vidare och söka räta ut de många frågetecknen om undervattensbuller i hamnar.

## Innehåll

1. Inledning	5
2. Ljud i havet	7
2.1 Ljudnivåer	7
2.2 Ljudutbredning	7
2.3 Naturligt bakgrundsbuller	8
2.4 Biologiska ljud	9
2.5 Antropogent (mänskligt skapat) buller	9
2.6 Speciella förhållanden i hamnar	10
Operativa förhållanden	10
Miljön	10
3. Undervattensbuller från fartyg	12
4. Styrmedel	14
5. Klassregler	16
6. Riktlinjer och åtgärdsrekommendationer	17
IMO	17
AQUO och SONIC	19
ECHO, CISMaRT och Transportation Canada	19
7. Nivåer och effekter	20
Nivåer i hamnar	20
Nivåer och observerade effekter vid pålning	20
Nivåer utomskärs	21
Sammanställning av publicerade resultat om ljudnivåer	23
8. Vidare arbete	26
9. Referenser	27
Appendix: Green Marine kriterier för undervattensbuller	30

## 1. Inledning

Den här rapporten är resultatet av en förstudie under Lighthouse branschforskningsprogram Hållbar Sjöfart, finansierat av Trafikverket. Förstudien har haft titeln ”Miljöpåverkan av en hamns undervattensbuller – analys av forskningsbehov kring källor och effekter samt åtgärder och styrmedel för att mildra problemet”, och dess uppdrag har varit att göra inledande undersökningar och bygga konsortium för ett projekt som undersöker undervattensbuller från en hamn och hur detta kan reduceras.

Sjöfart, konstruktionsarbeten och hamnverksamhet är några exempel på starka källor till buller i haven. Det finns förslag på bullerdämpande åtgärder för handelsfartyg, men styrmedel saknas i princip helt varför dessa inte har slagit igenom. Hamnbuller innehåller buller från fartyg och konstruktionsarbeten, men kan inte förutsägas från kunskap om dessa då operationskaraktäristika skiljer sig dramatiskt. I hamnar har buller i luft studerats betydligt mer än undervattensbuller. Göteborgs Hamn har till exempel haft flera tidigare projekt om buller i luft, t ex NEPTUNUS<sup>1</sup>, men inget om buller i vatten.

Undervattensbullers inverkan på marint liv har under senare år erhållit ett allt större internationellt intresse. Frågan började få publicitet på 1990-talet då ett antal uppmärksammade masstrandningar av marina däggdjur skedde i samband med flottövningar där aktiv sonar användes. Ljud och buller kan påverka marint liv på olika sätt, genom fysisk påverkan på hörsel och andra organ, genom påverkan på beteende, och genom maskering av egna läten och naturliga ljud i omgivningen. Undervattensbuller påverkar både fisk, marina däggdjur och ryggradslösa djur och försvårar bland annat födosökande, reproduktion, kommunikation, och undvikande av rovdjur, men det saknas tillräcklig kunskap om bulleremissioner från fartyg och hamnverksamhet för att införa effektiva åtgärder och minska problemen. Undervattensbuller är ett starkt växande forskningsområde där nivåer utomskärs är relativt väl kända, men buller från hamnar och nivåer inomskärs är mycket lite studerat, och påverkan på miljön är dåligt utforskad. Vad man vet idag sker fysisk påverkan endast vid höga ljudnivåer, medan beteenderespons och maskering sker vid lägre ljudnivåer. Idag pågår mycket forskning inriktad på beteenderespons. Faktorer som kan påverka en populations hälsa och överlevnad är till exempel flykt från naturligt habitat, störning av födoupptag och störning vid känsliga tidpunkter såsom parning.

EU:s havsmiljödirektiv (europaparlamentets och rådets direktiv 2008/56/EG av den 17 juni 2008 om upprättande av en ram för gemenskapens åtgärder på havsmiljöpolicens område) dikterar att det senast år 2020 ska råda god miljöstatus i europeiska hav. Direktivet inkluderar alla vatten från kusten till den yttre gränsen för den ekonomiska zonen (EEZ). Direktivet listar elva så kallade deskriptorer, vilka definierar god miljöstatus. Den elfte, deskriptor nummer 11, lyder ”Tillförsel av energi, inbegripet undervattensbuller, ligger på nivåer som inte påverkar den marina miljön på ett negativt sätt”. I kommissionens beslut av den 1 september 2010 om kriterier och metodstandarder för god miljöstatus i marina vatten (2010/477/EU) anges, för uppföljning av deskriptor 11, två indikatorer på god miljöstatus som riktar sig mot olika typer av ljudkällor. Den första berör höga impulsiva ljud som

---

<sup>1</sup> <https://neptunes.pro>

kommer från bl.a. undervattensexpllosioner, sonarer och seismiska tryckluftskanoner, och den andra gäller kontinuerliga ljud från främst fartyg. Havsmiljödirektivet kan ses som en lägsta nivå som medlemsländerna bör följa och införliva i nationell lag men länderna kan gå längre med hårdare lagar. I Sverige har havsmiljödirektivet omvandlats till havsmiljöförordningen (2010:1341) som är inskriven i svensk lag sedan 2010.

Buller i hamnar kan analyseras dels i relation till buller från andra källor, och dels i relation till de nivåer som skulle gälla om hamnen inte bedrivit sin verksamhet. Några veckor i oktober och november 2019 hade Preemraff i Lysekil reducerad verksamhet, ett s.k. driftsstopp. De har Sveriges näst största hamn med 1500 anlöp per år. Hamnen ligger i Brofjorden norr om Lysekil. Under driftsstoppet var raffinaderiverksamheten och fartygstrafiken till hamnen starkt begränsade. Detta utgjorde ett sällsynt tillfälle att undersöka hur mycket en hamn och fartygstrafiken dit kan bidra till undervattensbullret i ett område. Med finansiering från Havs- och Vattenmyndigheten spelade IVL tillsammans med Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI in buller under driftsstoppet. Dessa data kommer att användas för att undersöka hur mycket en hamn bidrar till undervattensbullret i dess närområde.

Vi kommer att genomlysna den vetenskapliga litteraturen om hamnbuller och jämföra rapporterade nivåer i hamnar med nivåer nära en fartygsled. Detta är en relevant jämförelse, då fartygsleder torde sprida buller till många fler platser än vad verksamheten i hamnar gör. Existensen av en hamn på en plats leder till fartygstrafik till hamnen och det i sin tur för med sig ökade bullernivåer i havet, men detta är en sekundär effekt. Den är värd att beakta vid planering av nya hamnar, men för existerande hamnar är den svår att påverka annat än genom att försöka påverka de rederier vars fartyg trafikerar hamnen. Det enda som en hamn direkt kan påverka är sin egen verksamhet, och det är effekter av denna vi fokuserar på i denna studie.

Vi inleder med bakgrundsinformation om ljud i havet och om fartygsbuller. Därefter presenteras de rekommendationer, åtgärder och styrmedel som idag används för att reducera buller som strålar ut i havet från olika källor. Resultat av tidigare forskningsprojekt kring nivåer och effekter av undervattensbuller i hamnar presenteras, och kompletteras med resultat kring buller från fartyg under gång. Vi avslutar med diskussion och förslag till vidare arbete.

## 2. Ljud i havet

Ljud i havet är ett komplicerat område. För att läsaren ska få en bild av varför undervattensbuller är ett så stort problem följer nu en kort bakgrund.

### 2.1 Ljudnivåer

Den mänskliga hörseln brukar sägas vara logaritmisk. Det betyder att ett ljud med dubbelt så stor energi inte upplevs som dubbelt så starkt, utan endast som något starkare. Ett ljud med tio gånger så stor energi kan upplevas som ungefär dubbelt så starkt. Vi kan höra ljud med ett energiomfång av ungefär 10-12 tiopotenser. För att lättare kunna hantera denna stora variation används en logaritmisk skala för ljudnivå. Enheten i denna skala kallas ”decibel” och förkortas dB. Vi har följande relationer mellan effektivvärden av ljudtryck  $p$ , ljudenergi  $W$  och ljudnivå  $L$  (dB):

$$L = 20 \frac{p}{p_{ref}}$$
$$L = 10 \frac{W}{W_{ref}}$$

Här är  $p_{ref}$  och  $W_{ref}$  referensvärden som man jämför med. I luft är referensvärdet för ljudtryck 20  $\mu\text{Pa}$ , vilket är ungefär det lägsta ljudtryck som en ung människa med god hörsel kan höra. I vatten utgår decibelskalan inte från människan – vilket kanske kan förstås i och med att vatten ju inte är vår ”hemmiljö”. Här är referensvärdet istället 1  $\mu\text{Pa}$ , och ljudnivåer anges som ”dB re 1  $\mu\text{Pa}$ ” vilket ska tolkas som nivå relativt 1  $\mu\text{Pa}$  uttrycket i decibel.

Det går inte att direkt jämföra ljudnivåer i luft och vatten. Detta beror dels på att referensvärdena för ljudnivåberäkning är olika, men också på att vatten har så mycket högre täthet än luft, vilket gör att ett visst ljudtryck i vatten motsvarar en betydligt lägre ljudenergi än motsvarande ljudtryck i luft. Det är ändå av begränsat intresse att räkna om till ett annat medium efter det är påverkan på miljön som är det viktiga, och det såklart är olika arter som påverkas i luft och i vatten.

### 2.2 Ljudutbredning

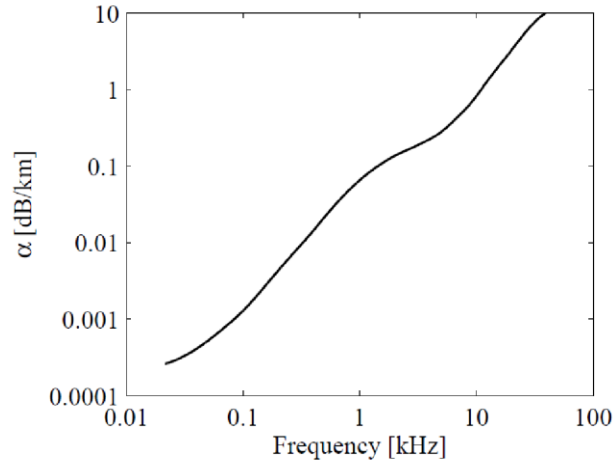
Ljud i haven utbreder sig i allmänhet betydligt längre än ljud i luft. Starka lågfrekventa ljud kan höras tiotals eller till och med hundratals kilometer från källan. Ett typiskt handelsfartyg kan höras på flera kilometers håll. Blåvalar kunde förr i tiden kommunicera över hela oceaner, och kunde på så sätt hitta varandra under och efter deras långa migrationer från polerna till tropikerna och tillbaka. Tyvärr går detta inte längre på grund av att bakgrundsbullret i det frekvensområde där blåvalarna kommunicerar är starkare idag.

Det finns tre huvudorsaker till att ljud kan utbreda sig så långt i vatten jämfört med i luft:

1. Absorptionen är betydligt lägre, särskilt för låga frekvenser. Figur 1 visar absorptionen som funktion av frekvens i vatten med en för de stora haven typisk salthalt. Notera hur stor variationen med frekvens är. Vid 30 kHz är dämpningen 10 dB/km. Även ett riktigt starkt ljud på 150 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  dämpas ner till bakgrundsbullernivåer på några km. Vid 100 Hz är dämpningen ungefär 0,001 dB/km. Det krävs alltså 1000 km utbredning för att absorptionen



ska dämpa ljudet med 1 dB. Vid dessa låga frekvenser kan man försumma absorptionen i de flesta praktiska beräkningar.



Figur 1. Ljudabsorptionen i saltvatten beror starkt av ljudets frekvens. Låga frekvenser absorberas nästan inte alls. Efter Wenz, (1962).

Det finns två gränssytor som ljudet kan reflekteras i – yta och botten, medan det i luft endast finns jordytan och ljud som sprids uppåt oftast dämpas ut. Vattenytan är också en väldigt bra reflektor för ljud.

1. Ljud i vatten går inte rakt. Ljudhastigheten beror på temperatur, tryck, och salthalt, och varierar ofta med djupet. I de stora haven leder detta ofta till att en "ljudkanal" bildas, där ljudvågorna kan utbreda sig utan att reflekteras som varken yta eller botten. Det i sin tur beror på att ljudvågor böjs mot områden med lägre ljudhastighet, och i ljudkanalen är ljudhastigheten lägre än över och under den.

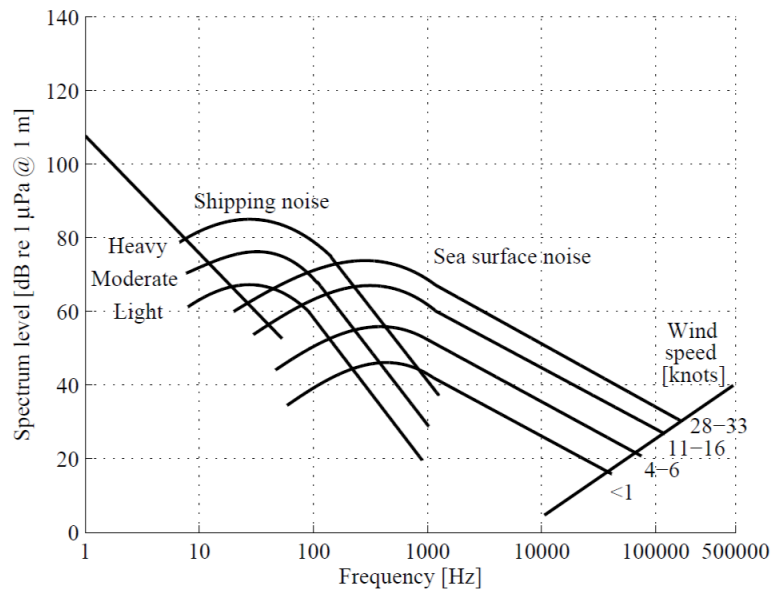
### 2.3 Naturligt bakgrundsbuller

Det finns en hel del naturligt buller i haven:

- Tektoniska rörelser i jordskorpan skapar lågfrekvent buller.
- Buller från vind och vågor dominerar det naturliga bakgrundsbullret vid mellanfrekvenser.
- Vid riktigt höga frekvenser dominerar termiskt brus, vilket orsakas av molekylernas rörelser.

Figur 2 nedan är en klassisk figur efter Wenz, (1962) som visar typiska nivåer av buller vid olika frekvenser på djupt hav långt från land. Både nivåer av naturligt buller och buller från avlägsna fartyg visas.

Havets invånare är alltså vana vid att leva i en bullrig miljö. Problemet med det undervattensbuller som människan skapar är att detta buller ofta är mycket starkare och av annan karaktär än det naturliga bullret. Vi utsätter alltså det marina livet för en miljö som de inte är utvecklade för.



Figur 2. Typiska spektra av bakgrundsbuller i haven i olika förhållanden på djupt vatten. Efter Wenz, (1962).

## 2.4 Biologiska ljud

Även biologiska ljud kan räknas in i bakgrundsbullret. Fisk, marina däggdjur, räkor och många sorters djur kommunicerar med ljud i vatten, och på vissa platser och i vissa frekvensband kan detta ge ett betydande bidrag till medel-ljudnivåerna. Ljud används även för att navigera och söka efter föda. Ljud är helt enkelt ett väldigt bra sätt att överföra information i vatten, och detta använder havets invånare på ofta finurliga sätt.

## 2.5 Antropogent (mänskligt skapat) buller

Bland det mänskligt skapade bullret får fartygsbuller och impulsljud från undervattensarbeten och militära sonarer mest uppmärksamhet. Fartygsbuller är ofta dominerande i frekvensområdet 10-1000 Hz (se Figur 2) och ligger som en matta under ytan i våra hav.

Fartygsbuller är ett konstant, ihållande ljud. Havsbaserade vindkraftverk ger också ifrån sig sådant buller vid låga frekvenser, om än inte vid lika höga nivåer som fartyg.

Hamnoperationer kan eventuellt också ge ifrån sig ihållande buller t ex från kontinuerlig drift av maskiner och fordon på land, där ljudet fortplantar sig ut i vattnet via vibrationer i marken. Fartyg vid kaj och för ankare skapar också buller både på land och i vatten, bland annat genom drift av motorer och generatorer.

Impulsivt buller består av korta ljud, men dessa kan vara väldigt starka. En vanlig och väl studerad källa till impulsivt buller är pålning för undervattenskonstruktioner. Pålning genererar kortvariga men mycket starka ljud i vattnet. Ljuden är impulsiva och repetitiva och bland de starkaste mänskligt skapade ljuden i vatten. Den största delen av ljudenergin alstras då pålhammaren träffar pålen som står delvis nedtryckt i havsbotten. Pålen expanderar då radiellt och strålar ut akustisk energi (Reinhall & Dahl, (2011)). Energi strålas också ut i havsbotten och propagerar där, varvid den också kan övergå till vattnet, eller färdas som ytvågor längs gränsytan mellan vatten och havsbotten (Tsouvalas & Metrikine, (2016)). Pålning beter sig alltså inte som en punktkälla till ljud, vilket gör det svårare att modellera och

beskriva dess utbredning. Ett typiskt påslag ger ett bredbandigt buller med större delen av energin under 1 kHz, men på nära håll även med energi över bakgrundsbullret upp till över 100 kHz. Många studier har publicerats om ljud från pålning vid konstruktion av vindkraftverk och dess miljöpåverkan. Pålningsljud har visats vara ett allvarligt hot mot flera arter av marina däggdjur, bl a knubbsäl och tumlare (Brandt et al., 2011; Dähne et al., 2013; Tougaard et al., 2009).

Aktiva sonarer använder starka undervattensljud för att leta efter objekt i vattnet eller i havsbotten. Efter flera mass-strändningar av marina däggdjur i samband med flottövningar (Frantzis, 1998; Jepsom et al., 2003) började militära aktiva sonarers påverkan på marint liv studeras. Sedan dess har flera NATO-länder bedrivit stora forskningsprojekt med syfte att undersöka vilka miljöeffekter sonarer har på marina däggdjur samt tagit fram kriterier för hur sonarer kan användas på ett säkrare sätt.

## 2.6 Speciella förhållanden i hamnar

I hamnar råder speciella förhållanden som påverkar bullernivåerna.

### Operativa förhållanden

Fartyg i och nära en hamn färdas inte i den fart de är designade för. Om farten är så låg att driften är kavitationsfri (under 9-14 knop beroende på fartyg) torde utstrålade bullernivåer bli lägre än i designfart, men vid farter där kavitation induceras är det svårt att säga hur utstrålat buller förhåller sig till bullret vid designfart. Vid manövrering i hamn använder vissa fartyg också bogtunnelstrutar eller reverserar propellern, vilket kan ge höga bullernivåer om än under en begränsad tid. Vid kaj har många fartyg en dieseldriven generator igång för att få ström; i norra Europa ser man dock att särskilt RoRo-fartyg i allt högre grad ansluter till landström.

Lastning och lossning innebär lyft och nedsättning av olika typer av last. Vid hastig nedsättning på land skapas en tryckvåg som fortplantar sig genom marken och kan propagera ut i vattnet som lågfrekvent ljud. Vid nedsättning på fartyg kan tryckvågen fortplanta sig som vibrationer genom fartyget och sedan stråla ut som buller. Med tanke på de stora och tunga laster som transporteras på fartyg kan dessa tryckvågor bli avsevärda. Men det är svårt att bedöma hur mycket som strålar ut i vattnet; här skulle mätningar behöva göras.

### Miljön

Vattendjupet är ofta litet, vilket påverkar ljudutbredningen. Vid utbredning en viss distans blir det fler reflektioner i yta och botten än på djupare vatten, men det är svårt att säga hur detta påverkar bullernivåerna. Viktigare är att på grunt vatten kan låga frekvenser inte utbreda sig. Gränsen för detta går vid "cutoff-frekvensen", vilken är omvänt proportionell mot vattendjupet (Forrest et al., (1993)). Under denna frekvens dämpas buller snabbt ut. Cutoff-frekvensen vid vattendjupet  $d$  ligger in intervallet  $(400/d)$  till  $(800/d)$ , uttryckt i Hz, beroende på bottenens akustiska egenskaper. Vid 30 m djup blir cutoff-frekvensen 13-26 Hz. En del av det utstrålade bullret från fartyg under gång ligger i eller under detta intervall, men det mesta ligger vid högre frekvenser. Vid 10 m djup blir cutoff-frekvensen 39-78 Hz, beroende på botten typ, det lägre värdet för hård botten. En stor del av bullret från fartyg under gång faller

i eller under detta intervall. För andra operationer i en hamn är det svårare att säga något om frekvensfördelningen.

Kajerna i en hamn påverkar också undervattensbullret. Dessa hårda ytor reflekterar ljud bra. Sådana reflektorer brukar leda till ökade bullernivåer jämfört med områden med mjukare begränsningsytor.

Många hamnar ligger i en bukt eller lite instängt. En sådan placering ger skydd för vågor. Men den innebär också att det finns många reflekterande ytor som undervattensljud kan studsas mot. När ljudet studsar mot sådana ytor leder det till ökade bullernivåer. Hårda begränsningsytor t ex berg eller gjutna kajer reflekterar bättre än sand eller lera.

### 3. Undervattensbuller från fartyg

Fartyg genererar betydande buller i frekvensområdet från ca 10 Hz (propellerns bladfrekvens) upp till 1 kHz (se fig. 2). De dominerande källorna är fartygets propeller, dess huvudmaskiner och större hjälpmaskiner (dieselgeneratorer). Propellern alstrar toner vid bladfrekvens och dess övertoner samt bredbandigt buller i hela frekvensområdet. Då kavitation uppstår på propellern ökar det genererade bullret signifikant. Volymförändring hos skikt-kavitation på propellerbladet förstärker bladfrekvenstonerna medan snabba kollapser av kavitation ger skarpa pulser vilka ger upphov till bredbandigt buller som kan sträcka sig upp till ca 100 kHz. Vid högre frekvenser är dock amplituden vanligen låg jämfört med bakgrundsbullret. Spetsvirvelkavitation är vanligen den form av kavitation som först uppkommer. Volympulsationer hos spetsvirvelkavitationen ger ofta en markant förhöjning av nivåerna i spektra omkring 100 Hz. Dieselmotorer bidrar framförallt till toner vid multipler av varvtalsfrekvens och cylindrarnas tändfrekvens. Dessa toner kan vara mycket distinkta i frekvensområdet 10 Hz till drygt 100 Hz, framförallt för propellrar med lite eller ingen kavitation.

Baserat på ovanstående skulle man kunna dra slutsatsen att propellrar alltid borde designas för att inte kavitera. Problemet är dock att en propeller som optimeras för maximal verkningsgrad vid en given fart, vilket är det normala för kommersiella fartyg, kommer att kavitera i viss mån. Kavitation kan minskas eller helt undvikas genom att öka bladarean eller genom att avlasta bladspetsarna, men det minskar propellerns verkningsgrad. Så kallade ”high added value ships” (till exempel forskningsfartyg, kryssningsfartyg och militära fartyg) med krav på komfort eller ljudutstrålning, där bränsleförbrukningen är av sekundär betydelse, designas ofta med krav att propellern skall vara kavitationsfri upp till en viss fart.

Då man opererar ett fartyg med fast propellerstigning vid lägre fart än designfarten så reduceras även kavitationen. Hastighetsminskning är därför bullerminskande för dessa fartyg. Dock är propellern inte optimal för den lägre farten. Om man skulle optimera propellern för den lägre farten kommer den att kavitera.

För fartyg som har propellrar med ställbar stigning (Controllable Pitch, förkortat CP) kan det istället hända att kavitationsbullret ökar vid reducerad fart. Det beror på att man helt eller delvis sänker hastigheten genom att reducera stigningen varvid kavitation uppstår på bladets trycksida. Fartyg som gör mycket anlöp och manövrering i hamnar, till exempel färjor, RoRo-fartyg och fartyg i kustnära trafik, har ofta CP-propellrar

I och nära hamnar går fartyg med reducerad fart, och då kan även bullret minska – men så behöver det inte bli då det också innebär att fartygen avviker från designkondition. Vid snabb acceleration och retardation är det vanligt att propellern kaviterar. Vid manövrering i hamnar används ofta bogtunneltrustrar som ofta kaviterar och som vanligen drivs med hydraulik som kan orsaka buller. Detta är dock förhållandevis kortvariga förlopp.

Just nu sker förändringar i sjöfartsbranschen som kan påverka de utstrålade bullernivåerna. Man undersöker även segel för stora oceangående fartyg. Då segling minskar belastningen på propellern bör det kunna bidra till minskad bullernivå. Man debatterar också hastighetsbegränsningar, främst motiverade av lägre bränsleförbrukning och lägre utsläpp till

luften. En nyligen publicerad studie tyder dock på samband mellan sänkt fart och sänkta bullernivåer (MacGillivraya et al., 2019). Som tidigare nämnts är det inte säkert att en hastighetssänkning leder till reducerad bullerutstrålning; ett fartyg är ofta anpassat för drift i en viss fart, och drift vid andra farter kan leda till sådana förändringar i propellerkavitationen att bullret faktiskt ökar eller i varje fall inte minskar nämnvärt.

Även propellertillverkare är intresserade av buller. Vid design finns inga bra verktyg för att förutsäga hur mycket en viss propeller kommer att bullra, utan man arbetar med tumregler och empiriska data. Designtrenden har gått mot större propellar med mindre bladarea, vilket ger lägre varvtal (mindre perferihastighet kan reducera spetsvirvelkavitation) och högre verkningsgrad. Det kan dock ge problem med tryckpulser och vibrationer pga. mindre klarning mellan propeller och skrov. Den mindre bladarean riskerar att ge ökad mängd skikt-kavitation.

Modellförsök i kavitationstunnel kan användas för att förutsäga erosion och utstrålat buller med ganska god tillförlitlighet. Numeriska beräkningar med ”computational fluid dynamics” (CFD) fungerar bra för verkningsgrad, kavitationens påverkan på effekt och första till tredje ordningens tryckpulser. Men upplösningen är idag för låg för att kunna prediktera utstrålat buller mer än upp till några hundratals Hz och beräkningarna är enormt tidskrävande.

Det är viktigt att åtgärder för att reducera undervattensbuller från fartyg och hamnar inte leder till väsentligt högre bullernivåer ovanför vattenytan. De åtgärder som har föreslagits för att reducera undervattensbuller (t ex annan propeller- och skrovdessign, bättre motorupphängning, lägre fart, större propellar) borde inte leda till mer övervattensbuller, men det är viktigt att ha med frågan i diskussioner om åtgärder för att reducera undervattensbuller. I början av 2020 startar projektet SHIPNOISE, som mäter buller från fartyg i svenska farleder i luft och i vatten samtidigt. Projektet kommer att belysa skillnaderna i nivåer, effekter, regelverk och kunskapsläge. Trafikverkets Forsknings- och Innovationsportfölj finansierar och VTI, IVL och RISE utför projektet.

SHEBA, Sustainable Shipping and Environment of the Baltic Sea region, var ett BONUS-projekt som gjorde en holistisk bedömning av hur fartygstrafiken i Östersjön påverkar miljön. IVL ledde projektet som pågick 2015-2018. Projektet utvecklade ett Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) ramverk för att bedöma miljöpåverkan. Undervattensbuller kunde dock inte helt tas med i detta ramverk på grund av att dos-responsrelationer för bl a fisk och marina däggdjur är så bristfälligt kända. Man utvecklade också en källmodell för olika fartygstyper, som tillsammans med AIS-data kan uppskatta spektrum för utstrålat buller. Denna modell utvärderades med hjälp av en pilotstudie i ett litet område söder om Gotland, där modellen tillsammans med ljudutbredningsmodellering utgående från fartygs positioner vid varje tidpunkt gav uppskattning av bullernivåer vid ett antal mätpunkter. Dessa uppskattningar jämfördes med uppmätta nivåer, vilka predikterades relativt väl. Man noterade dock att en modell av den detaljgrad som användes här skulle bli alltför beräkningskrävande för att appliceras på ett större geografiskt område.

## 4. Styrmedel

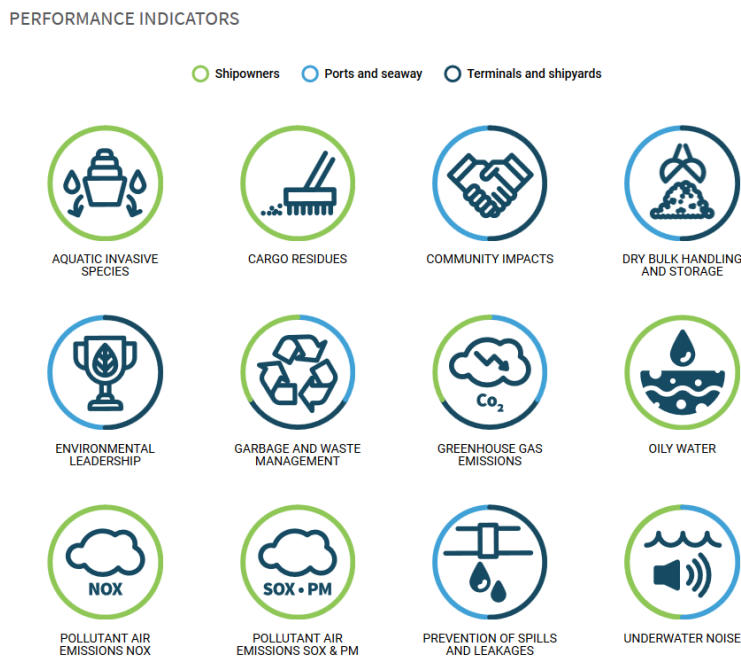
Vår uppfattning är att styrmedel krävs för att uppnå ökad hållbarhet i den konservativa och globalt konkurrensutsatta sjöfartsbranschen. Miljömedvetna rederier finns men är inte i majoritet. Furetank är ett exempel på ett rederi som fokuserar mycket på att reducera miljöpåverkan av sin fartygsdrift. De har tagit många steg på vägen mot att bygga och driva fartyg med mindre miljöpåverkan, och efterlyser kunskap om hur även påverkan från undervattensbuller kan minskas.

Som hamnägare sätter Göteborgs Hamn och Lysekils Hamn de hamnavgifter som nyttjande fartyg ska erlägga. Hamnägare har här möjlighet att premiera mer miljövänliga fartyg så som t ex Vancouver har gjort (se nedan). Differentiering av hamnavgifter kan baseras på etablerade miljöindex för fartyg. Vår uppfattning är att en bra väg att gå mot att kunna premiera låga nivåer av utstrålat undervattensbuller är att ta upp undervattensbuller i något miljöindex. De dominerande indexsystemen CSI och ESI har moduler för buller i luft, men ingen för undervattensbuller.

Vi noterar dock att Preemraffs hamn i Brofjorden har gått en annan väg för buller i luft; de har mätare för övervattensbuller från fartyg, och fartyg vars bullernivå ligger över en gräns får påpekanden. Vid upprepade påpekanden är fartygen inte längre välkomna.

Sedan 2007 har Vancouvers hamn under initiativet EcoAction erbjudit lägre hamnavgifter till mer miljövänliga fartyg (McIntyre, 2017). 2017 inkluderade de utstrålat buller i vattnet i deras kriterier för miljövänlighet; tystare fartyg får nu möjlighet att få reducerade hamnavgifter. Under 2019 ger kriterierna möjlighet till rabatt för fartyg med någon av fyra utpekade klassifikationer för tysta fartyg (Bureau Veritas, DNV-GL Silent-E, RINA DOLPHIN-notation, och Lloyd's UWN-L) och fartyg med någon av fem propellerdesigner som har visats reducera undervattensbuller. Man kan få guldnivå med 47 procent rabatt på hamnavgiften om man har en tyst fartygsklassifikation och bronsnivå med 23 procent rabatt om man har en av de fem listade propellerdesignerna. Under första kvartalet 2017 sökte och fick två fartyg bronsnivå.

Green Marine är ett frivilligt miljöcertifieringsprogram för nordamerikanska hamnar och rederier. 2017 deltog 38 hamnar i programmet. Bland dessa kan nämnas Halifax, New Orleans, Seattle och Gulfport. För att bli certifierade enligt programmet måste deltagande hamnar utvärdera sin miljövänlighet. Utvärderingarna syns av externa experter. Under 2017 lade Green Marine till indikatorer för undervattensbuller i sina certifieringsstandarder – se Appendix 1. Dessa indikatorer finns i fem nivåer, från nivå 1 som föreskriver övervakning och följning av regelverk till nivå 5 som kräver påvisad reduktion av undervattensbuller. Indikatorerna för undervattensbuller är sedan 2018 tvingande för att få Green Marine-certifiering (*Green Marine 2018 Performance Report*, (2018)). Figur 3 nedan visar de indikatorer som Green Marine använder 2019 (*Green Marine Environmental Program*, (2018)).

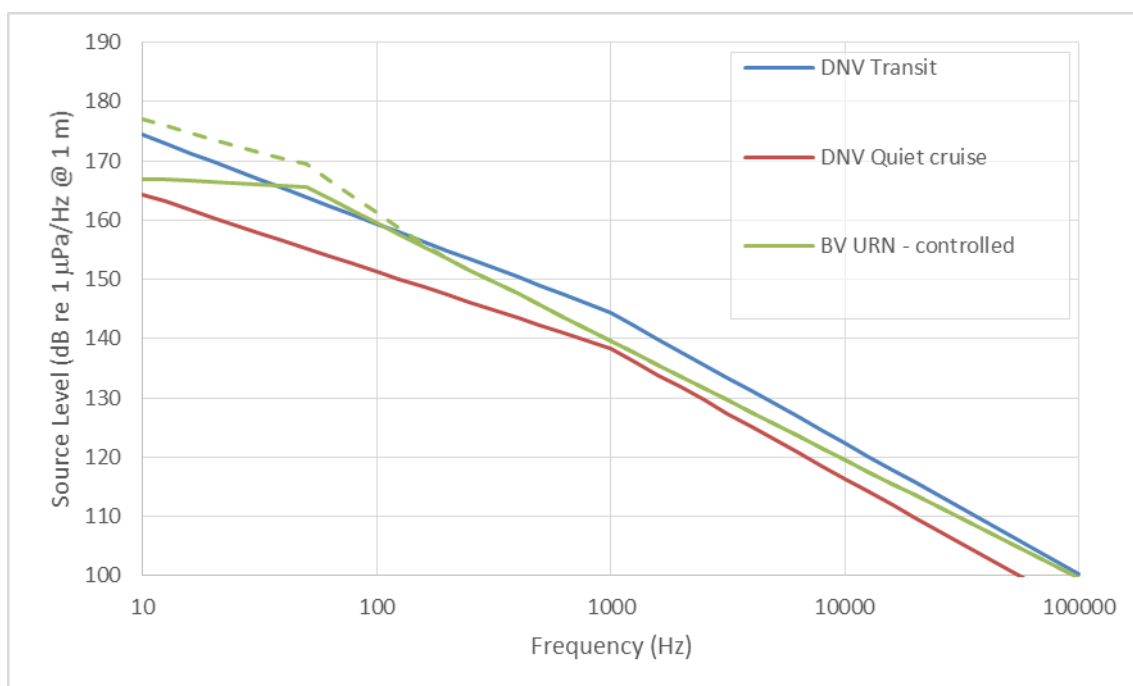


Figur 3. Green Marines hållbarhetsindikatorer för olika aktörer 2019.



## 5. Klassregler

IACS (Association of Classification Societies) är en sammanslutning av de ledande klassningssällskapen. Som ovan nämnts har fyra av dessa (Bureau Veritas, DNV-GL, RINA och Lloyd's Register) tilläggsregler för undervattensbuller från fartyg. I Figur 4 jämförs DNV SILENT-E kravkurvor med motsvarande BV kravkurvor. Dessa kravkurvor är framtagna för fartyg som vill uppvisa en god miljöprofil (begränsad bullerspridning till omgivande miljö). Kravkurvorna för god miljöprofil är förmodligen satta utifrån vad som är rimligt att uppnå med en god design snarare är utifrån biologiska kriterier. Detta till skillnad från kravkurvor för specialfartyg som vanligen är satta utifrån sonar-prestanda.



Figur 4. BV "URN – controlled vessel" gränsvärden jämfört med DNV SILENT-E "Transit" och "Quiet cruise" gränsvärden. DNV tersbandsnivåer har konverterats till 1 Hz-bandnivåer för jämförelse med BV krav. Dessa kravkurvor är framtagna för fartyg som vill uppvisa en god miljöprofil (begränsad bullerspridning till omgivande miljö). Den streckade gröna kurvan (BV) är med korrektion för grunt vatten.

## 6. Riktlinjer och åtgärdsrekommendationer

### IMO

IMO (International Maritime Organization) startade 2008 (MEPC 57) en agendapunkt i MEPC (Marine Environment Protection Committee) om ”Noise Impacts on Marine Life” med sikte att anta icke-obligatoriska riktlinjer för minskning av undervattensbuller.

En ”korrespondensgrupp” startades för att behandla frågan ”Noise from commercial shipping and its adverse impact on marine life” och lades till MEPCs agenda vid MEPC 58 som en högprioriterad punkt. Korrespondensgruppens uppgift var att identifiera och ta itu med sätt att minimera den oavsiktliga spridningen av buller från kommersiell fartygstrafik till den marina miljön med avsikt att reducera potentiellt skadlig inverkan på marint liv. Gruppens arbete resulterade i rapporten *Noise from commercial shipping and its adverse impact on marine life*, (2009).

Med sikte på att erbjuda hjälp med reduktion av undervattensbuller från kommersiella fartyg och i enlighet med en rekommendation från underkommittén ”Ship Design and Equipment”, godkände MEPC 61 (2014) riktlinjer för att reducera undervattensbuller från kommersiell fartygstrafik med riktning mot skadlig inverkan på marint liv. Medlemsstater uppmanas att använda *Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life* (2014) för att göra alla berörda parter uppmärksamma på dessa.

De icke-tvingande riktlinjerna torde bara vara tillämpliga på kommersiell fartygstrafik och är menade att erbjuda generella råd angående reduktion av undervattensbuller till designers, varv och operatörer. Det fastslås att:

---

*Given the complexities associated with ship design and construction, the Guidelines focus on primary sources of underwater noise. These are associated with propellers, hull form, on-board machinery, and operational aspects. Much, if not most, of the underwater noise is caused by propeller cavitation, but on-board machinery and operational modification issues are also relevant. The optimal underwater noise mitigation strategy for any ship should at least consider all relevant noise sources.*

---

IMO ger en uppsättning definitioner och listar modeller/predikteringsmetoder för undervattensbuller som kan användas för att analysera bullerkällorna i fartyget, transmissionsvägar i fartyget samt för skattning av totalnivåer. Exempel på metoder som nämns är Computational Fluid Dynamics (CFD), Statistical Energy Analysis och Finite Element Analysis (FEM). En omfattande lista med referenser ges också.

Vi citerar från IMOs riktlinjer om åtgärder för att reducera utstrålat buller från fartyg:

---

*The largest opportunities for reduction of underwater noise will be during the initial design of the ship. For existing ships, it is unlikely to be practical to meet the underwater noise performance achievable by new designs. The following design issues are therefore primarily intended for consideration for new ships. However, consideration can also be given to existing ships if reasonable and practicable. While flow noise around the hull has a negligible influence on radiated noise, the hull form has influence on the inflow of water to the propeller. For effective reduction of underwater noise, hull and propeller design should be adapted to each other. These design issues should be considered holistically as part of the overall consideration of ship safety and energy efficiency.*

---

Riktlinjerna listar ett antal faktorer för propeller- och skrovdesign:

- Reduktion av kavitation genom att optimera propellerns egenskaper såsom: diameter, bladantal, stignings- och krökningsfördelning, svepning;
- Operation av propellrar med variabel stigning (CP);
- Modellförsök för att optimera propellern med avseende på tryckpulser och utstrålat buller;
- Rekommendationer för tryckpulsnivåer;
- Design av skrovform och bihang för att optimera medströmsfältet där propellern arbetar;
- Strukturoptimering för att reducera genväret av skrovexcitation och transmissionen av stömljud i skrovet.

För val och installation av ombordmaskineri listar riktlinjerna flera aspekter som designers, redare och varv bör beakta.

Riktlinjerna går igenom några ”retrofits” för existerande fartyg såsom:

- Design och installation av nya ”State-of-the-art” propellrar;
- Installation av medströmsmodifierande anordningar (”wake conditioning devices”);
- Installation av luftinjektion till propellrarna.

Bland operativa- och underhållsåtgärder nämner riktlinjerna:

- Rengöring av propeller och skrov;
- Val av fartygshastighet;
- Ruttplanering och operationella beslut.

Flera av faktorerna i riktlinjerna beskrivs i djupare detalj i en översiktsartikel (Leaper & Renilson, (2012)).

I början av 2019 (30 jan – 1 feb) genomfördes en teknisk workshop på temat ”Quieting Ships to Protect the Marine Environment” på IMO i London. Detta skedde på initiativ från Kanada med Transportation Canada som mötesvärd. Som utgångspunkt presenterade VARD en översiktsrapport (*Ship underwater Radiated Noise*, (2019)) om fartygsbuller och åtgärder för att minska detta. Denna rapport sammanfattas i ett inlägg till MEPC 74 inlämnat av Kanada.

### AQUO och SONIC

European Commission startade 2011, temat [SST.2012.1.1-1.] "Assessment and mitigation of noise impacts of the maritime transport on the marine environment" (coordinated topic within the framework of the "Ocean of Tomorrow") inom "Sjunde ramprogrammet". Detta ledde fram till starten av projekten AQUO (N°314227) och SONIC (N°314394) i oktober 2012. Projekten omfattade bestämning av bullerpåverkan från fartyg, bullerkällor, mätning av buller, känslighet hos marint liv samt utformning av riktlinjer för åtgärder.

Projektet AQUO listade lösningar för att reducera undervattensbuller från fartyg i AQUO (2014) samt skattade potentialen för buller reducering hos dessa (AQUO, 2015a), inverkan på bränsleeffektivitet (AQUO, 2015b) och inverkan på marint liv (AQUO, 2015c). Detta sammanfattades i *Underwater Noise Footprint of Shipping – The Practical Guide*, (AQUO, 2015d).

AQUO och SONIC-projekten utfärdade en gemensam sammanfattning av möjliga och rekommenderade åtgärder i *Guidelines for Regulation on UW Noise from Commercial Shipping (AQUO-SONIC, 2015)*.

### ECHO, CISMART och Transportation Canada

Kanada startade forskningsprogrammet ECHO som en nordamerikansk variant av AQUO och SONIC och genomförde studier av bullerkällor och olika åtgärder. Vancouver Fraser Port Authority och myndigheten Transportation Canada har varit drivande. Man har även bildat nätverket CISMART (Canadian network for Innovative Shipbuilding, Marine Research and Training) som ett samarbetsprojekt mellan industri, myndigheter och akademi i Kanada.

Inom ECHO genomfördes omfattande mätningar av fartygspassager under lång tid. De gjorde noggranna mätningar av bl.a. flera av BC Ferries fartyg och andra medverkande rederier. De studerade också "Vessel traffic management" i form av en frivillig hastighetssänkning i "Haro Strait" under en period 2017-2018 samt att flytta fartygstrafiken längre ut från ett känsligt område i "Strait of Juan de Fuca" 2018.

Utanför USA:s västkust har man i samarbete med Maersk gjort mätningar på fartyg före och efter "retro-fit" av anordningar för att minska bränsleförbrukningen genom att modifiera medströmmen, se MEPC 72/16/5.

## 7. Nivåer och effekter

### Nivåer i hamnar

En grupp forskare i västra Australien har i flera artiklar studerat undervattensbuller och dess miljöpåverkan i Fremantle Inner Harbour. Denna hamn ligger i floden Swan Rivers mynning i staden Perth i sydvästra Australien. Den har ca 1000 fartygsanlöp per år.

Man har visat att båttrafiken i hamnen påverkar den lokala populationen av flasknosdelfiner (Marley, Salgado Kent, Erbe, & Parnum, (2017)). Vid tider med mycket fartygstrafik rörde sig delfinerna snabbare, och tillbringade mer tid i rörelse och mindre tid att leta föda.

Delfinernas läten påverkades också av ökad båttrafik.

Samma forskargrupp har spelat in och analyserat undervattensbuller på två kustnära platser i västra Australien (Marley, Salgado Kent, Erbe, & Thiele, (2017)). Dels den hårt trafikerade Fremantle Inner Harbour i Perth, och dels Roebuck Bay, en plats som sades vara i stort sett opåverkad av människan. Undervattensloggers spelade in ca 1000 timmars buller under två månader från varje plats.

Man jämförde totala bullernivåer i frekvensområdet 10 Hz till 11 kHz. Medianen av dessa bullernivåer (beräknade som 10 minuters RMS-medelvärden) var 106 dB re 1  $\mu$ Pa i Fremantle Inner Harbour. Motsvarande värde i Roebuck Bay i juli var 87 dB re 1  $\mu$ Pa och i september-oktober 83 dB re 1  $\mu$ Pa. Detta är alltså skillnader av 19 respektive 23 dB, vilket i linjära enheter motsvarar att det i Roebuck Bay är 79 respektive 200 gånger mindre akustisk energi i bullret. Detta är stora skillnader. Skillnaderna var särskilt framträdande vid 80-160 Hz, där bullret i Fremantle dominerades av ljud från fartygstrafik hamnverksamhet.

Medan fartygstrafik och hamnverksamhet gav upphov till de mest framträdande och vanligaste ljuden i Fremantle Inner Harbour, kom de vanligaste ljuden i Roebuck Bay från ”snapping shrimps” (små räkor som knäpper med en klo) och de mest framträdande från fiskläten.

Bullernivåer i Lyttleton Harbour i Nya Zeeland rapporterades 2018 (Leunissen & Dawson, (2018)). Medianen av ljudnivån i Lyttleton Harbour varierade mellan 100,7 och 101,8 dB re 1  $\mu$ Pa beroende på inspelningsplats.

### Nivåer och observerade effekter vid pålning

Vid nybyggnation av kajer och andra strukturer i och på vatten är pålning vanligt. Pålning innebär att en stor mekanisk hammare gör kraftfulla slag på en påle av stål eller betong, som då trycks ned i havsbotten.

Vi refererade ovan till (Leunissen & Dawson, (2018)). Artikelns fokus är pålning vid reparation av hamnen efter att en jordbävning orsakat stora skador, och pålningens effekt på delfiner i hamnen. De högsta mätvärdena under pålning blev en pulsenergi av 158 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>s och ett toppvärde av ljudtrycket av 182 dB re 1  $\mu$ Pa. Dessa värden mättes 370 m från själva pålningen.

Flera tidigare artiklar har visat att tumlare uppvisar starka undvikandereaktioner vid pålning. Genom att använda så kallade T-PODs, automatiska loggers som detekterar tumlarens mycket speciella läten, visade Brandt *et al.* (2011) att tumlare undvek pålning vid konstruktion av vindkraftsparken Horns Rev II ut till 17,8 km från källan. Med samma metod visade Dähne *et al.* att tumlare undvek pålning vid konstruktion av vindkraftsparken Alpha Ventus ut till 10,8 km (Dähne *et al.*, (2013)). Vid mätplatser 25 och 50 km från pålningen detekterade de fler läten under pålning än vid pauser i pålningen. Detta tolkade de som att tumlare som fanns i pålningens närområde hade flyttat sig till områden mer än 10 km bort från pålningen.

### Nivåer utomskärs

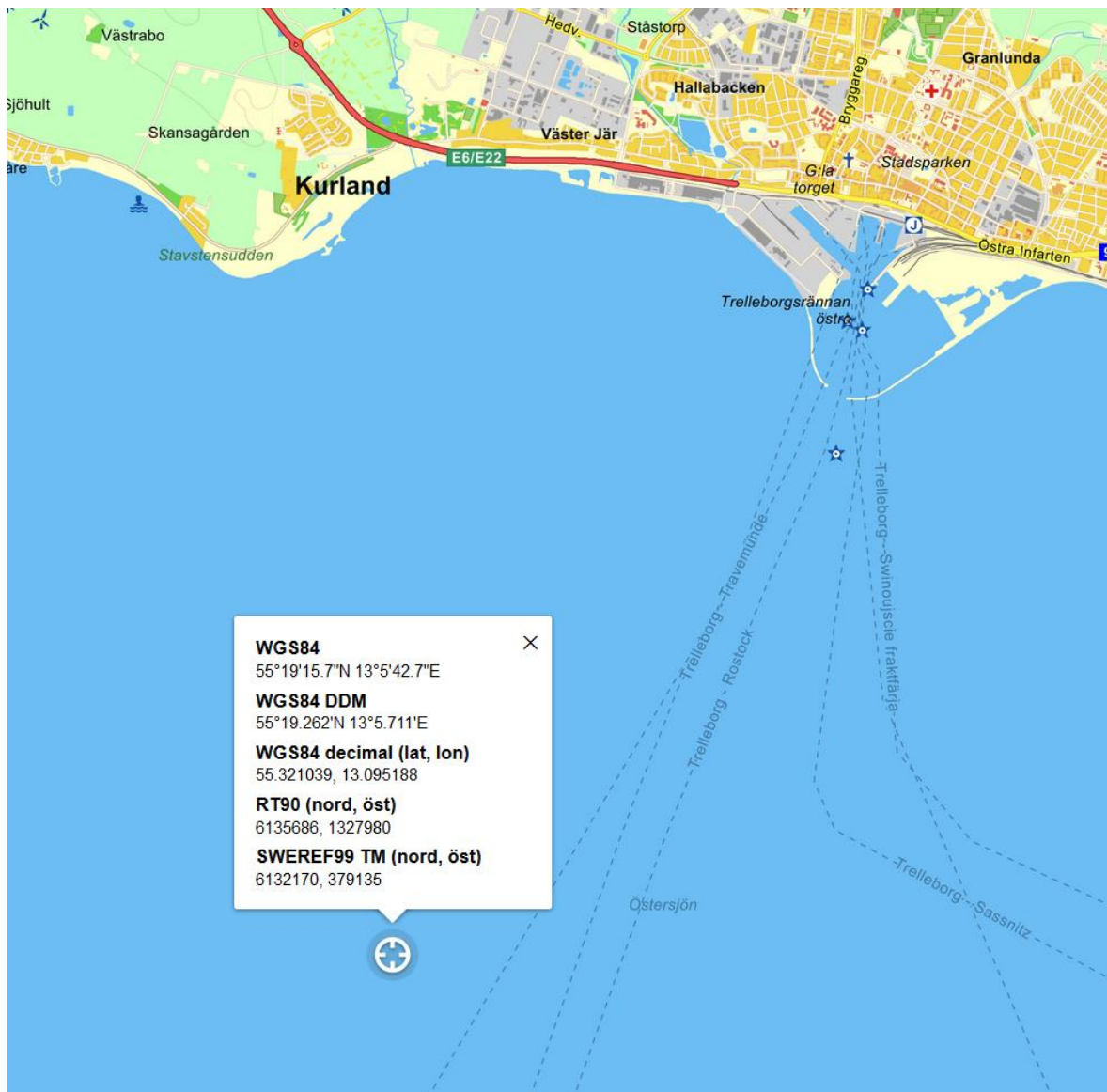
Under 2014 spelade EU Life+ BIAS-projektet (Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape) in undervattensbuller under 12 månader på 36 platser i Östersjön och Bälten. 2019 presenterades resultaten för 16 mätplatser och för frekvensbanden 63, 125 och 2000 Hz (Mustonen *et al.*, (2019)). Många av mätplatserna var placerade nära fartygs- och färjerutter, men det fanns även platser långt från mänsklig aktivitet. Då BIAS-projektet fokuserade på bullernivåer utomskärs fanns få mätplatser nära en hamn.

Skillnaderna mellan bullernivåerna på de olika mätplatserna var stora: nästan 50 dB i 63 Hz-bandet, 40 dB i 125 Hz-bandet och 15 dB i 2000 Hz-bandet. De större skillnaderna vid lägre frekvenser förklarades med olika intensitet i fartygstrafiken. Detta visar att trots att det finns naturligt buller i haven kan mänskligt skapat buller vara mångdubbelt starkare.

Man kom också fram till att årstidsvariationen är stark; bullernivåerna är upp till 15 dB högre på vintern än på sommaren. Detta beror främst på att ljudutbredningen är mer gynnsam på vintern, medan det varma ytvattnet på sommaren leder till att ljudvågor böjs mot botten och dämpas. Detta innebär att det är svårt att jämföra bullernivåer från olika tider på året – om de är inspelade på platser där ljudhastighetsprofilen i vattnet varierar under året, t ex platser med tydliga årstidsväxlingar.

Däremot såg man endast små variationer mellan år på de mätplatser där det fanns data från två år. Sådana variationer skulle man se om fartygstrafiken ändrats eller om någon annan aktivitet som bullrar mycket påbörjats eller avslutats under mätperioden, men i avsaknad av detta kunde man alltså se att medelvärdesbildat över ett år är bullernivåerna på en plats relativt konstanta.

Vi tittar närmare på den BIAS-mätplats som ligger närmast en hamn. Detta är mätplats nr 2, vilken ligger ca 6 km utanför Trelleborgs hamn och ca 1 km från flera färjerutter till kontinenten. Medel-bullernivåerna på denna plats under 2014 var i 63 Hz-bandet 101 dB re 1  $\mu$ Pa, i 125 Hz-bandet 105 dB re 1  $\mu$ Pa och i 2000 Hz-bandet 97 dB re 1  $\mu$ Pa. En kartbild som visar var mätplatsen ligger syns i Figur 5 nedan. Som synes är Trelleborgs hamn omgiven av vågbrytare. Dessa blockerar också undervattensljud på ett effektivt sätt. Ljud från hamnen kan färdas ut genom hamnens infart mellan vågbrytarna, men på grund av öppningens lilla bredd jämfört med hamnens utsträckning kommer en betydande del av hamnbullret att hindras från att nå mätstationen.



Figur 5. BLAS-projektets mätboj nr 2 placerades 6 km utanför Trelleborgs hamn och nära färjeleder till kontinenten. Kartbild från eniro.se.

### Sammanställning av publicerade resultat om ljudnivåer

Tabell 1 och Tabell 2 ger en sammanställning av rapporterade bullernivåer i och i närheten av hamnar. För jämförelse presenteras också nivåer som mätts nära fartygsleder. Tabellerna har satts samman av resultat från vetenskapligt publicerade artiklar.

Tabell 1 visar totala bullernivåer i breda frekvensband. Frekvensbanden varierar, men innehåller utom i ett fall bandet 30 Hz – 11 kHz. Här brukar huvuddelen av mänskligt genererat buller finnas. Medianen av ljudnivån i hamnen Lyttleton Harbour i Nya Zeeland varierade mellan 100,7 och 101,8 dB re 1  $\mu$ Pa beroende på inspelningsplats. I Fremantle Inner Harbour i Perth, Australien var medianen något högre – 106 dB re 1  $\mu$ Pa. Som jämförelse varierade medianer av ljudnivåer uppmätta nära en intensivt trafikerad fartygsled i St Lawrence Strait mellan 102,4 och 116,7 dB re 1  $\mu$ Pa beroende på inspelningsplats. Dessa resultat tyder alltså inte på att median-nivån i en hamn skulle vara högre än nära en fartygsled.

De rapporterade medelnivåerna i Tabell 1 ger en annan bild än mediannivåerna i samma tabell. Medelnivåerna i Lyttleton Harbour ligger 16-19 dB över motsvarande medianer. Artikeln redovisar 95:e percentiler av nivåerna, och visar att medelvärdena även ligger över dessa. Detta tyder på ett ljudlandskap med ett fåtal (<5 % av inspelningstiden) mycket starka ljud. Dessa kommer inte från den pålning som Leunissen & Dawsons artikel hamnar om, då dessa resultat beräknades för inspelningar då pålning inte förekom.

Tabell 2 visar nivåer vid 63, 125 och 2000 Hz. Dessa nivåer är medel över standardiserade frekvensband, så kallade tredjedels oktavband. 63 Hz-bandet sträcker sig från 56 till 70 Hz, och 125 Hz-bandet går från 111 till 140 Hz, medan 2000 Hz-bandet går från 1780 till 2240 Hz. Alla resultat i tabell 2 kommer från BIAS-projektet och publicerades 2019 (Mustonen et al., (2019)). Tabellen redovisar medel- och mediannivåer från ett helt års inspelningar på fyra platser i Östersjöregionen. Dessa platser karaktäriseras av liknande intensitet i fartygstrafiken i området kring respektive inspelningsplats. Två av dessa platser ligger så långt från närmaste hamn att de inte kan anses påverkade av buller från den. En plats ligger visserligen relativt nära en hamn, men på grund av hamnens läge i en smal vik och en avskärmande landtunga kan även denna plats sägas vara avskärmad från hamnbuller. Den fjärde platsen ligger 6 km utanför Trelleborgs hamn, och påverkas både av fartygsbuller och av buller från hamnen. Vågbrytare runt hamnen begränsar dock bullerutstrålningen till havet. Tabell 2 visar att bullernivåerna utanför Trelleborgs hamn inte är högst bland de fyra platserna; denna titel vinnas istället av inspelningsplatsen i Stora Bält. Notera också att skillnaderna mellan motsvarande medel- och medianvärden är maximalt 2 dB. Detta står i stark kontrast till de 16-19 dB skillnad som noterades i Lyttleton Harbour.

Resultaten som presenterats här inbjuder till spekulation. Vi spekulerar att ljudlandskapet i en hamn karaktäriseras av mediannivåer som styrs av fartygstrafiken i och i anslutning till hamnen. Vidare spekulerar vi att ljudlandskapet i en hamn karaktäriseras av en liten andel mycket starka ljud, som kan härröra från fartygs framförande och/eller aktiviteter på land i hamnen. För att verifiera dessa spekulationer skulle man behöva göra fler inspelningar av buller i en eller flera hamnar och analysera statistik av bullernivåer. Det vore också intressant att identifiera källorna till de starkast förekommande ljuden.



Tabell 1. Total bullernivå i olika miljöer. Djup anger djup vid inspelningsplatserna.

Typ	Källa	Plats	Djup	Antal	Omgivning	Aktivitet	Datum	Mediannivå (dB re 1 µPa)	Medelnivå (dB re 1 µPa)	Frekvensband
<b>Hamn</b>	Leunissen & Dawson, (2018)	Lyttleton Harbour, NZ	6,5-9	3	Långsmal vik, 2 km tvärs. Inspelning ca 0,2, 1 och 2 km från hamnen	Största hamnen på sydön i Nya Zeeland	27 feb – 25 mars 2015	101,1 (0,2km) 100,7 (1 km) 101,8 (2 km)	119,2 (0,2km) 119,6 (1 km) 117,9 (2 km)	20Hz-150kHz 2Hz-30kHz 2Hz-30kHz
<b>Sund, fartyg</b>	Castellote et al., (2012)	Gibraltar sund	500	2	Sund, ca 10 km tvärs	Mycket intensiv fartygstrafik – 105000 fartygspassager per år	Minst 88 dagar mellan oktober 2008 och januari 2009		112,5	10Hz-585Hz
<b>Sund, fartyg</b>	McQuinn et al., (2011)	St Lawrence Strait, KAN	>15m	6	Sund, ca 10 km tvärs	Sex olika avstånd till fartygsled med intensiv trafik- 4127 fartygspassager per år	Juni – september 2005	102,4-116,7		30Hz-23kHz
<b>Hamn</b>	Marley, Salgado Kent, Erbe, & Thiele, (2017)	Fremantle Inner Harbour, AUS	5	1	Flod med hamn på båda sidor, 500 m bred	1000 fartyg per år anlöper	30/4-14/6 2015	106		10Hz-11kHz
<b>Hamn</b>	Wale et al., (2013)	Portsmouth, Plymouth, Gravesend, UK		3	Stora hamnar				92-106	-20kHz

Tabell 2. Bullernivå i 63- och 125 Hz-frekvensbanden i olika miljöer. Data från BLAS-projektet (Mustonen et al., (2019)). Enligt Mustonen et al., (2019) figur 2 är den statistiska fördelningen av antal fartyg på olika avstånd, medelvärdesbildat över hela 2014, liknande vid alla dessa positioner. Nivåer i tredjedels oktavnband (dB re 1  $\mu$ Pa).

Plats	BIAS pos. nr	Djup (m) och bottentyp	Avst. från land (km)	Hamn	Medel, 63 Hz	Median, 63 Hz	Medel, 125 Hz	Median, 125 Hz	Medel, 2 kHz	Median, 2 kHz
Trelleborg, SE	2	25, grovt substrat	6	Sveriges näst största hamn sett till godsmängd	101	99	105	103	97	97
Stora bält, DK	36	27, blandad/lera-lerig sand	4	Inte påverkad av hamnbuller	109	110	107	108	97	97
Hiumaa, EST	22	70, lera/lerig sand	23	Inte påverkad av hamnbuller	95	95	97	96	89	91
Arkona-bukten, DE	34	44, lera till lerig sand	35	Inte påverkad av hamnbuller	105	105	100	100	87	88

## 8. Vidare arbete

Kontinuerligt ihållande buller påverkar marint liv på flera olika sätt. Kortvariga ljud med hög energi påverkar också marint liv, men på ett annat och tydligare sätt. Det är därför viktigt att utreda om det verkligen är så att ljudmiljön i hamnar karaktäriseras av en matta av fartygsbuller med kortvariga, starka ljud. Detta kan göras genom långtidsinspelningar i flera hamnar, t ex Göteborgs hamn och någon annan svensk hamn. Lysekils hamn är inte lämplig för långtidsinspelningar på grund av den militära närvaron i området.

Om förekomsten av starka impulsiva ljud påvisas behöver flera undersökningar göras. Hur låter fartygen när de färdas långsamt genom hamnen? Är de den dominerade bullerkällan, eller skapar verksamheten på land så mycket buller i vattnet att detta dominerar? Vilka aktiviteter i hamnen skapar buller i vattnet, och på vilka nivåer? Här bör man utföra kontrollerade aktiviteter i hamnen och samtidigt spela in bullret i vattnet. På grund av att Lysekils hamn är relativt liten och relativt få aktiviteter pågår samtidigt skulle den passa bra för experiment med kontrollerade aktiviteter i land och samtidig korttidsinspelning. Detta får anpassas efter militärens direktiv.

Parterna som medverkar i denna förstudie utgör en lämplig gruppering för vidare studier av undervattensbuller i hamnar. IVL kan bidra med mätningar och uppskattning av nivåer och effekter. SSPA har också kompetens inom mätningar och även inom tekniska åtgärder på fartyg. Tillsammans med våra Chalmers, Furetank och våra hamnpartners kan lämpliga åtgärder och styrmedel för att reducera hamnbullers påverkan på miljön föreslås. Här bör man också knyta till sig en referensgrupp där Havs- och vattenmyndigheten, Sjöfartsverket, Trafikverket, Redareföreningen och någon ytterligare hamn skulle kunna vara lämpliga deltagare.

Forskningsmedel för vidare arbete kan sökas hos Trafikverket, särskilt sjöfartsdelen i deras Forsknings- och Innovationsportfölj men även branschforskningsprogrammet för Hållbar Sjöfart. Trafikverket finansierar dock inte studier med tyngd i effekter på miljön. För sådana studier kan Havs- och Vattenmyndigheten vara aktuella, antingen direkt eller som medfinansier till projekt inom EU JPI Ocean, Life eller Horizon 2020. Transportstyrelsen kan möjligen också finansiera vidare arbete. Medel för forskningsprojekt kan sökas hos Formas, men akademisk höjd och goda akademiska meriter är en förutsättning för att få medel i den hårda konkurrensen om Formas-medel. Vinnova skulle kunna finansiera projekt med innovationshöjd och företagsdeltagande som utvecklar tekniker eller metoder som adresserar undervattensbullers miljöpåverkan. Länsstyrelsen Västra Götaland är också en viktig aktör, som kan stötta en ansökan och bidra med frågeställningar och behov, men de har inga projektmedel att lysa ut. Västra Götalandsregionen kan möjligen också bli aktuella som medfinansier i EU-projekt.

## 9. Referenser

- AQUO project (2014). Comprehensive listing of possible improvement solutions and mitigation measures (D5.1). FP7-grant agreement no. 314227.  
[http://www.aquo.eu/downloads/AQUO\\_R5\\_9\\_List\\_Mitigation\\_Measures\\_rev1\\_0.pdf](http://www.aquo.eu/downloads/AQUO_R5_9_List_Mitigation_Measures_rev1_0.pdf)
- AQUO project (2015a). Assessment of the solutions to reduce underwater radiated noise (D5.3). FP7-grant agreement no. 314227.  
[http://www.aquo.eu/downloads/AQUO\\_D5.3\\_Assessment\\_URN\\_reduction\\_rev1.0.pdf](http://www.aquo.eu/downloads/AQUO_D5.3_Assessment_URN_reduction_rev1.0.pdf)
- AQUO project (2015b). Impact of Solutions on Fuel Efficiency (D5.5). FP7-grant agreement no. 314227.  
[http://www.aquo.eu/downloads/AQUO\\_D5.5\\_Impact\\_Fuel\\_Efficiency\\_rev1.0.pdf](http://www.aquo.eu/downloads/AQUO_D5.5_Impact_Fuel_Efficiency_rev1.0.pdf)
- AQUO project (2015c). Assessment of the solutions to reduce impact on marine life (D5.7). FP7-grant agreement no. 314227.  
[http://www.aquo.eu/downloads/AQUO\\_D5.7.%20Assessment%20of%20the%20solutions%20to%20reduce%20impact%20on%20marine%20life%20-%20public%20\(1.0\).pdf](http://www.aquo.eu/downloads/AQUO_D5.7.%20Assessment%20of%20the%20solutions%20to%20reduce%20impact%20on%20marine%20life%20-%20public%20(1.0).pdf)
- AQUO project (2015d). *Underwater Noise Footprint of Shipping – The Practical Guide* (D5.8 Synthesis of recommendations). FP7-grant agreement no. 314227.  
[http://www.aquo.eu/downloads/AQUO\\_D5.8\\_rev1.0\\_final.pdf](http://www.aquo.eu/downloads/AQUO_D5.8_rev1.0_final.pdf)
- AQUO-SONIC (2015). Guidelines for regulation on UW noise from commercial shipping. FP7-grant agreement no. 314227 and FP7- grant agreement no.314394.  
[http://www.aquo.eu/downloads/AQUO-SONIC%20Guidelines\\_v4.3.pdf](http://www.aquo.eu/downloads/AQUO-SONIC%20Guidelines_v4.3.pdf)
- Brandt, M. J., Diederichs, A., Betke, K., & Nehls, G. (2011). Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 421, 205-216.
- Castellote, M., Clark, C. W., & Lammers, M. O. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1), 115-122. doi:10.1016/j.biocon.2011.12.021
- Dähne, M., Gilles, A., Lucke, K., Peschko, V., Adler, S., Krügel, K., Siebert, U. (2013). Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany. *Environmental Research Letters*, 8(2), 025002. doi:10.1088/1748-9326/8/2/025002
- Forrest, T. G., Miller, G. L., & Zagar, J. R. (1993). Sound Propagation in Shallow Water: Implications for Acoustic Communication by Aquatic Animals. *Bioacoustics*, 4(4), 259-270. doi:10.1080/09524622.1993.10510437
- Green Marine 2018 Performance Report*. (2018). Retrieved from [https://green-marine.org/wp-content/uploads/2019/06/2018Perfo\\_Report\\_final\\_WEB.pdf](https://green-marine.org/wp-content/uploads/2019/06/2018Perfo_Report_final_WEB.pdf)
- International Maritime Organisation (IMO) (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life.*

- Leaper, R. C., & Renilson, M. R. (2012). A review of practical methods for reducing underwater noise pollution from large commercial vessels. *Intl J Maritime Engrg*, 154, Part A2.
- Leunissen, E. M., & Dawson, S. M. (2018). Underwater noise levels of pile-driving in a New Zealand harbour, and the potential impacts on endangered Hector's dolphins. *Mar Pollut Bull*, 135, 195-204. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.07.024
- MacGillivraya, A. O., Li, Z. and Hannay, D. E. (2019). Slowing deep-sea commercial vessels reduces underwater radiated noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* 146, 340. <https://doi.org/10.1121/1.5116140>
- Marley, S. A., Salgado Kent, C. P., Erbe, C., & Parnum, I. M. (2017). Effects of vessel traffic and underwater noise on the movement, behaviour and vocalisations of bottlenose dolphins in an urbanised estuary. *Sci Rep*, 7(1), 13437. doi:10.1038/s41598-017-13252-z
- Marley, S. A., Salgado Kent, C. P., Erbe, C., & Thiele, D. (2017). A Tale of Two Soundscapes: Comparing the Acoustic Characteristics of Urban Versus Pristine Coastal Dolphin Habitats in Western Australia. *Acoustics Australia*, 45(2), 159-178. doi:10.1007/s40857-017-0106-7
- McIntyre, D. (2017, 2017-05-05). Port Strategy - insight for port executives: Sound probe / underwater noise feature. Retrieved from <https://www.portstrategy.com/news101/port-operations/planning-and-design/underwater-noise-feature>
- McQuinn, I. H., Lesage, V., Carrier, D., Larrivée, G., Samson, Y., Chartrand, S., Theriault, J. (2011). A threatened beluga (*Delphinapterus leucas*) population in the traffic lane: Vessel-generated noise characteristics of the Saguenay-St. Lawrence Marine Park, Canada. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6), 3661-3673. doi:10.1121/1.3658449
- Mustonen, M., Klauson, A., Andersson, M., Clorennec, D., Folegot, T., Koza, R., Sigray, P. (2019). Spatial and Temporal Variability of Ambient Underwater Sound in the Baltic Sea. *Sci Rep*, 9(1), 13237. doi:10.1038/s41598-019-48891-x
- Performance Indicators for Ports & St. Lawrence Seaway Corporations – 2019*. Retrieved from [https://green-marine.org/wp-content/uploads/2019/03/2019\\_Summary\\_PortsSeaway.pdf](https://green-marine.org/wp-content/uploads/2019/03/2019_Summary_PortsSeaway.pdf)
- Reinhall, P. G., & Dahl, P. H. (2011). Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(3), 1209-1216. doi:10.1121/1.3614540
- Tougaard, J., Carstensen, J., Teilmann, J., Skov, H., & Rasmussen, P. (2009). Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena* (L.)). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(1), 11-14. doi:10.1121/1.3132523
- Tsouvalas, A., & Metrikine, V. A. (2016). Structure-Borne Wave Radiation by Impact and Vibratory Piling in Offshore Installations: From Sound Prediction to Auditory Damage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3). doi:10.3390/jmse4030044
- Vancouver Fraser Port Authority Fee Document effective January 1, 2019.

- Wale, M. A., Simpson, S. D., & Radford, A. N. (2013). Noise negatively affects foraging and antipredator behaviour in shore crabs. *Animal Behaviour*, *86*(1), 111-118.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.05.001>
- Wenz, G. M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *34*(12), 1936-1956. doi:10.1121/1.1909155

## Appendix: Green Marine kriterier för undervattensbuller

Urklipp från Green Marine Environmental Program, (2018):

### OBJECTIVE

Manage underwater noise sources during ongoing activities, development/construction, and/or port maintenance activities to reduce impacts to marine mammals.

### NOTES:

- Green Marine recognizes that underwater noise may potentially impact a broader range of acoustic species than just marine mammals. While the initial objective of this indicator covers marine mammals, future development may expand the scope.
- Applicable only for ports located on salt water.

LEVEL 1
Monitoring of regulations
LEVEL 2
<b>Fulfill 3 of the 4 following criteria:</b>
2.1. Promote and raise awareness of tenants and ship operators calling at the port about the issue of underwater noise by distributing pertinent information on the effects of underwater noise on marine mammal and sensitive areas.
2.2. Promote the provision of marine mammal sightings data from a stewardship program with a publicly available database (in Canadian and US waters) through a logbook program or a recognized application (like Whale Alert and Whale Report) to port users, pilots' associations, and ship operators calling at the port.
2.3. Summarize current knowledge to understand target species, to identify sensitive habitats, and to understand the port activities' zone of impact. For example, this may inform vessel traffic management (potentially including vessel routing and/or speed).
2.4. Require the services of a trained and experienced marine mammal observer (MMO) during port-related in-water construction or during on-land construction work (below high water) that is known to increase significantly the underwater noise soundscape. <u>Note:</u> This criterion is only applicable for ports or port tenants having ongoing construction work. The decision of requiring services of MMO should be based on seasonality, presence of endangered species, and sensitive areas.
LEVEL 3
3.1. Implement all applicable criteria listed at Level 2.
3.2. Develop and adopt an Underwater Noise Mitigation and Management plan (UNMMP), which incorporates a range of noise reduction/mitigation options and best practices/operating procedures for both acute and chronic noise generating activities including construction and shipping. <u>Note:</u> See Annex 6-A
<b>AND fulfill one of the following 2 criteria:</b>
3.3. As part of the UNMMP, establish an ambient underwater noise monitoring program, analyze and archive the data to understand local ambient underwater noise conditions. <u>Note:</u> The program, that is developed in collaboration with a bioacoustician or a specialized firm, would specify the objectives, method, location, and frequencies for monitoring. If the port is planning construction or operational changes, additional noise measurements (using the same protocols) should be done to measure trends in ambient noise.
<b>OR</b>
3.4. Offer a recognition program to ship owners for vessel noise reductions. <u>Note:</u> For example, ship owners could be recognized for hull and propeller maintenance.

#### LEVEL 4

4.1. Implement all applicable criteria listed at Level 3.

4.2. Develop and incorporate targets for underwater noise reduction into the UNMMP in port waters and to the extent possible. These targets should be developed with the help of information obtained from the noise monitoring program.

Note: This strategy would include a methodology to measure progress achieved in order to reduce underwater noise generated by the port and set realistic targets for noise reduction.

**AND fulfill one of the following 3 criteria:**

4.3. Develop an incentive program for ship owners who implement vessel noise mitigation measures.

Note: For example, this program could offer a discount / berthing fee reduction to vessels that have a notation for underwater radiated noise from a recognized classification society.

**OR**

4.4. Establish an in-situ acoustic monitoring system to collect relative source level of individual ships. This data should be shared with ship owners.

Note: A specific protocol will have to be developed in order to collect valuable data. This criterion is linked with criterion #4.2 from the underwater noise indicator for ship owners.

**OR**

4.5. Support/collaborate on scientific research that includes the measurement of underwater radiated noise.

Note: Projects done within the past 5 years can be considered to fulfill this criterion.

#### LEVEL 5

5.1. Implement 4 of the 5 applicable criteria listed at Level 4.

5.2. Meet reduction targets on underwater noise.

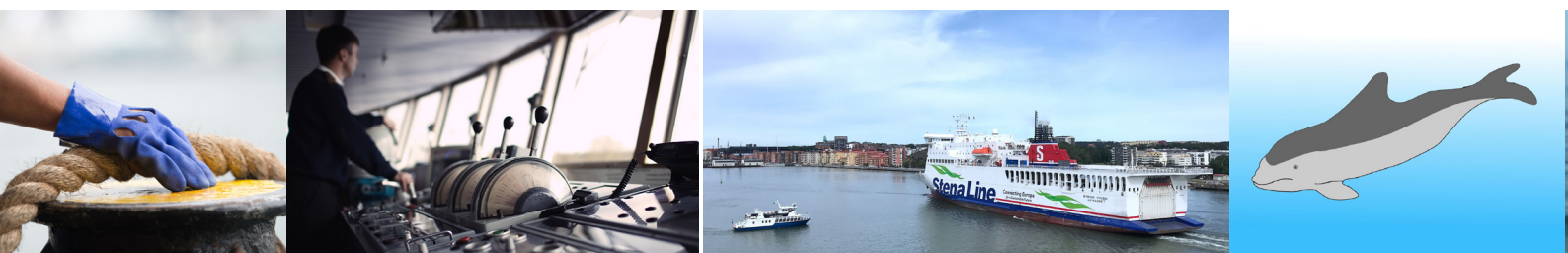
5.3. Demonstrate continual improvement in implementing the Underwater Noise Mitigation and Management plan to utilize noise reduction solutions and technologies that reduce underwater noise.





Lighthouse samlar industri, samhälle, akademi och institut i triple helix-samverkan för att stärka Sveriges maritima konkurrenskraft genom forskning, utveckling och innovation. Som en del i arbetet för en hållbar maritim sektor initierar och koordinerar Lighthouse relevant forskning och innovation som utgår från industrin och samhällets behov.

**Lighthouse – för en konkurrenskraftig, hållbar och säker maritim sektor med god arbetsmiljö**



LIGHTHOUSE PARTNERS



LIGHTHOUSE ASSOCIATE MEMBERS

