

Overvågning af lavfrekvent undervandsstøj i danske farvande

Statusrapport til Miljøstyrelsen 2023

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 17. juni 2024 | 36



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Rådgivningsnotat

Titel: Overvågning af lavfrekvent undervandsstøj i danske farvande
Undertitel: Statusrapport til Miljøstyrelsen 2023

Forfattere: Jakob Tougaard, Michael Ladegaard, Emily T. Griffiths

Institution: Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

Faglig kommentering: Simone Videsen
Kvalitetssikring, DCE: Jesper Fredshavn

Ekstern kommentering: Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her:
https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2024/KommentarerN/N2024_36_komm.pdf

Rekvirent: Miljøstyrelsen

Bedes citeret: Tougaard, J., Ladegaard, M., Griffith, E.T. 2024. Overvågning af lavfrekvent undervandsstøj i danske farvande. Statusrapport til Miljøstyrelsen 2023. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 31 s. – Fagligt notat nr. 2024|36

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Foto forside: Wikimedia.org/W. Bulach

Sideantal: 31

Indhold

Resumé	4
1 Baggrund	5
1.1 Havstrategidirektivets kriterium D11C2	5
1.2 Introduktion til skibsstøj	7
2 Metoder	11
2.1 Målestationer	11
2.2 Udstyr	12
2.3 Dataanalyse	14
3 Indsamlede data	15
4 Resultater	16
4.1 Målinger	16
4.2 Modelleret støj	21
5 Diskussion/konklusion	28
6 Referencer	29

Resumé

Overvågning af vedvarende lavfrekvent undervandsstøj (skibsstøj) er blevet gennemført i danske farvande siden 2016. I de første år på fire stationer i indre farvande, men fra 2019 også på to stationer i Nordsøen/Skagerrak. Der roteres mellem målestationerne, således at der hvert år måles fra tre stationer. Målingerne er vedvarende optagelser af undervandsstøj i området 20 Hz - 20 kHz og karakteriseres ved månedlige medianer og percentiler i tredjedels-oktav frekvensbåndene centreret om 63 Hz, 125 Hz og 2 kHz, i henhold til guidelines for HELCOMs overvågningsprogram.

Målingerne viser variation fra måned til måned, men mindre variation fra år til år. Sammen med modellerede kort over støjudbredelsen i samtlige danske farvande dokumenterer overvågningen at der er betydelige bidrag af skibsstøj i danske farvande. Støjen er kraftigst og mest udbredt i Nordsøen, hvorimod den i indre farvande er koncentreret omkring de store skibsruter gennem Kattegat og Bælterne. Det er ikke usædvanligt at se baggrundsstøjen hævet med en faktor 10 (svarende til 20 dB) eller mere i forhold til den naturlige baggrundsstøj.

Den øgede baggrundsstøj på grund af skibstrafik er størst ved de lave frekvenser, der er af størst relevans for fisk, mens den er mindre ved de højere frekvenser, der især er af betydning for havpattedyrene.

1 Baggrund

Dette notat beskriver status for overvågningen af vedvarende lavfrekvent undervandsstøj i indre danske farvande og Nordsøen frem til sommeren 2023 som led i Miljøstyrelsens overvågning. Denne overvågning foregår som en del af opfyldelsen af Danmarks forpligtigelser i henhold til EU's Havstrategidirektiv (EU Kommissionen, 2008; 2017, kriterium D11C2) og de regionale havkonventioners overvågningsprogrammer: HELCOMs *pre-CORE indicator* af kontinuerlig undervandsstøj og OSPARs *candidate common indicator* for baggrundsstøj.

Havstrategidirektivet (EU Kommissionen, 2008) pålægger medlemslandene at opnå og fastholde god miljøtilstand i EU's havområder. For at kunne nå dette mål stiller direktivet en række krav til medlemslandene, fordelt på 11 forskellige deskriptorer, med dertilhørende kriterier for god miljøtilstand. Deskriptor 11 omhandler *indførelsen af energi* til havmiljøet, herunder menneskeskabt vedvarende lavfrekvent lyd.

Denne rapport er alene en afrapportering af de indsamlede data efter en basal dataanalyse i henhold til anbefalinger fra EU (TG-Noise; Dekeling et al., 2014) og HELCOM (EN-Noise/Pressure; HELCOM, 2018) og indeholder derfor ingen tilbundsående analyse eller syntese af målingerne. En samlet gennemgang af de indsamlede data frem til og med 2022 findes i baggrundsrapporten til basisanalysen vedrørende vurderingen af god miljøtilstand i de danske farvande, der er udkommet sommeren 2023 (Tougaard et al., 2023b). Ligeledes findes samlede fremstillinger af støjforholdene i hhv. Nordsøen og HELCOM-området i Basan et al. (2024) og HELCOM (2023a), stammende fra de to EU-projekter JOMOPANS og BLUES. Begge projekter har modelleret undervandsstøjen fra skibsfart for kalenderåret 2018. Disse modeller har dannet baggrund for vurdering af vedvarende lavfrekvent undervandsstøj i forbindelse med OSPARs og HELCOMs tilbagevendende vurderinger af miljøtilstanden (hhv. QSR24 og HOLAS3)¹ og er også anvendt i vurderingen af kriterium D11C2 under havstrategidirektivet i forbindelse med den danske basisanalyse for indrapporteringsperioden 2015-2019 (Tougaard et al., 2023b). Denne rapport indeholder en kort gennemgang af resultaterne af støjmodellerne, særligt med henblik på at sammenholde dem med målingerne fra Miljøstyrelsens stationer, men uden vurderinger af miljøtilstanden. Disse vurderinger kan findes i baggrundsrapporten til basisanalysen (Tougaard et al., 2023b).

1.1 Havstrategidirektivets kriterium D11C2

Direktivets deskriptor 11 omhandler tilførsel af energi, inklusive undervandsstøj til havmiljøet. Under deskriptor 11 er beskrevet to kriterier (EU Kommissionen 2017, Dekeling et al. 2014), der skal bruges i vurderingen af miljøtilstanden. Denne rapport omhandler kriterium D11C2: Lavfrekvent, vedvarende støj.

Den lavfrekvente, vedvarende støj bliver som udgangspunkt kvantificeret og vurderet vha. gennemsnitlige lydniveauer (dB re 1 μ Pa, Root Mean Square

¹OSPAR Quality Status Report og HELCOM Holistic Assessment

(rms)) i specificerede tredjedelsoktavbånd. I henhold til HELCOMs overvågningsmanual overvåges støjen i frekvensområdet fra 20 Hz til 20 kHz. Tredjedelsoktavbåndene, hhv. 63 Hz og 125 Hz, er specifikt nævnt i direktivet (EU Kommissionen, 2008) og efterfølgende præcisering (EU Kommissionen, 2017). Baggrunden for valget af 63 Hz og 125 Hz båndene er primært baseret på de akustiske forhold. På dybt vand (over 50-100 meters dybde) er forskellen mellem den naturlige baggrundsstøj og skibsstøjen maksimal i dette frekvensområde, hvilket gør at skibene kan høres over meget lange afstande. Desuden er frekvensområdet direkte relevant for fisk,

Derudover kvantificeres støjen også i tredjedelsoktavbåndet 2 kHz, for at leve op til kravene i HELCOMs anbefalinger for overvågning af den fælles (pre-CORE) indikator "Continuous noise" (HELCOM, 2018). Dette bånd er vurderet til at have større relevans end de to øvrige for havpattedyr. Særligt for marsvin (*Phocoena phocoena*), der som det eneste havpattedyr i Østersøen findes på Habitatdirektivets bilag IV, der omfatter de dyr, der er under streng beskyttelse (EU Kommissionen, 1992).

Målinger er velegnede til at få detaljerede informationer om de faktiske støjforhold på bestemte lokaliteter (stationer) og med meget høj tidsopløsning (absolut nøjagtighed på et minut eller bedre) men byder på vanskeligheder i tolkningen, da det i praksis kan være meget vanskeligt at identificere kilderne til den støj der optages. Det er heller ikke muligt at interpolere mellem målingerne medmindre der er et meget stort antal målestationer. Det fornødne antal afhænger af kompleksiteten af det farvand man ønsker at overvåge og de danske bæltter og indre farvande hører til i den meget komplicerede ende med meget stor variation i vanddybde, bundforhold og hydrografi. Hydrografien er særligt problematisk da den er variabel, ofte på meget lille tidsskala (timer eller mindre). Der er derfor almindelig konsensus om at modellering af støjen i større havområder er den bedste måde at opnå fornøden tidlig og rumlig dækning til at kunne lave retvisende vurderinger af miljøtilstanden (se f.eks. Sigraay et al., 2021). En forudsætning for disse modellers brugbarhed er imidlertid at de er validerede mod kalibrerede målinger i havmiljøet (se f.eks. Putland et al., 2022). Miljøstyrelsens målinger af undervandsstøj i danske farvande tjener således en meget væsentlig funktion som validering af de modeller, der i sidste ende har været anvendt i de seneste vurderinger af D11C2 (HOLAS 3 og QSR24).

1.1.1 Tærskelværdier for undervandsstøj

EU har i 2022 vedtaget fælles tærskelværdier for vedvarende undervandsstøj (TG-Noise, 2022). For HELCOM-området er tærskelværdierne konkretiseret af BLUES-projektet i forbindelse med HOLAS 3 vurderingen (HELCOM, 2023b), gennemgået i baggrundsrapporten for basisanalysen (Tougaard et al., 2023b). Vurderingen af vedvarende undervandsstøj for Nordsøen, som en del af OSPARs QSR24 (Kinneking and Tougaard, 2021), blev færdiggjort inden tærskelværdierne var fastsatte og disse har derfor endnu ikke været anvendt i Nordsøen, men de er tilpasset og anvendt på den danske del af Nordsøen i forbindelse med basisanalysen (Tougaard et al., 2023b). Det forventes imidlertid at disse vurderinger vil ændre sig, i takt med det arbejde, der er igangsat regionalt (dvs. i regi af HELCOM og OSPAR) med at definere indikatorarter og fastsætte arts- eller artsgruppe-specifikke niveauer (de såkaldt LOBE-værdier, TG-Noise, 2022). Der savnes desuden konkret vejledning om metoder til at anvende tærskelværdierne på data fra punktmålinger som i det danske

overvågningsprogram. Dette arbejde er igangsat på EU niveau (TG-Noise) og forventes ikke at resultere i konkrete anbefalinger før tidligst 2025.

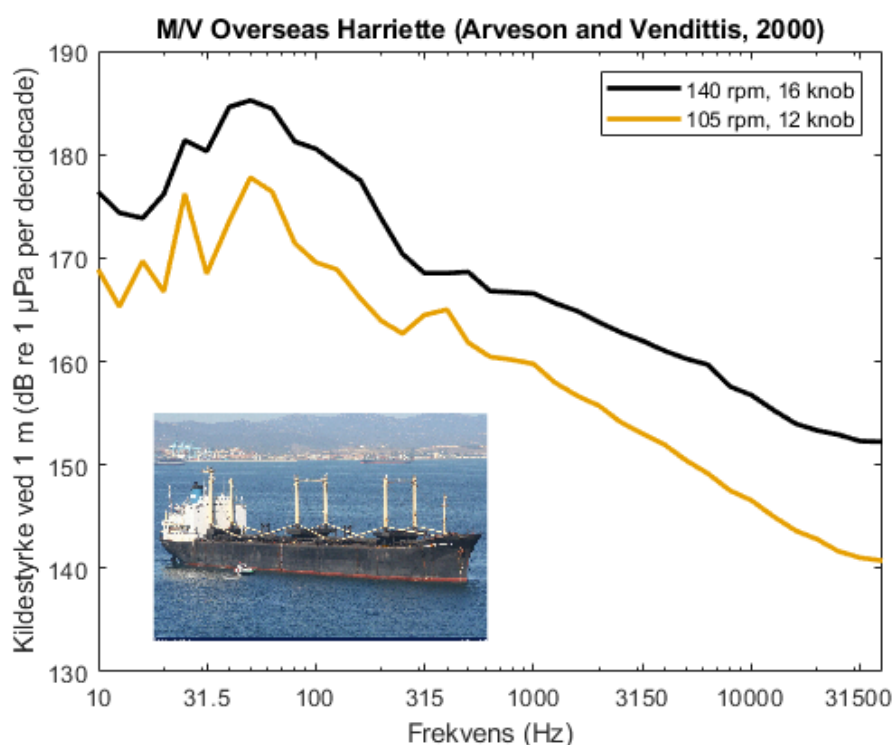
1.2 Introduktion til skibsstøj

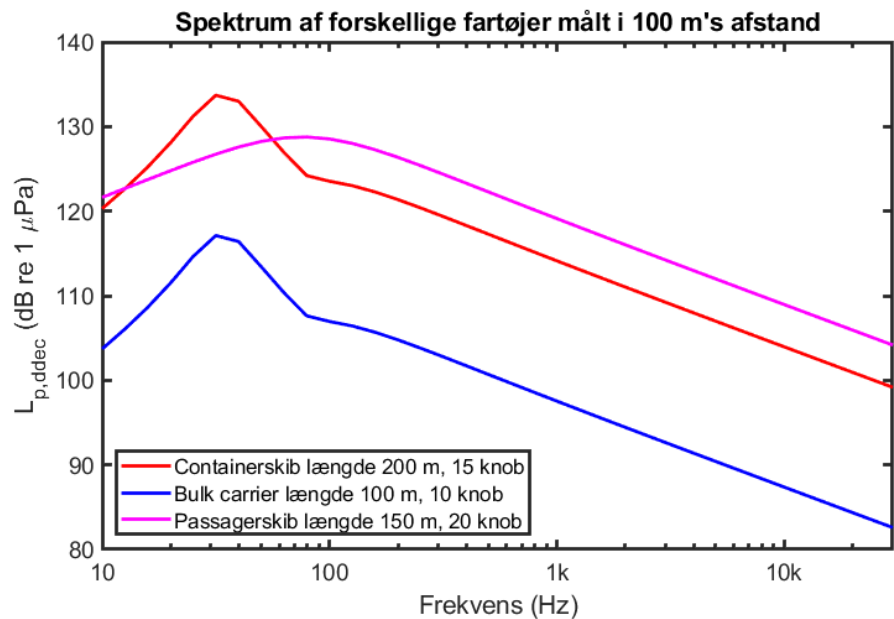
Det ligger udenfor dette notats rammer at redegøre generelt for kilder til skibsstøj og dennes udbredelse i havmiljøet. Herunder følger dog en kort introduktion til væsentlige begreber, nyttige for forståelsen af de efterfølgende kapitler.

1.2.1 Kilder til vedvarende undervandsstøj

Det altoverskyggende bidrag til menneskeskabt vedvarende undervandsstøj kommer fra skibe, nærmere bestemt skibsskruer. For de fleste typer af skibe er det den såkaldte kavitation – dannelsen af luftbobler omkring en roterende skrue – der er hovedkilden til skibsstøjen (Ross, 1976; Wittekind, 2014) og der er en generel sammenhæng mellem størrelsen på skibet og dets fart og intensiteten af den udstrålede støj (Findlay et al., 2023; MacGillivray and de Jong, 2021). De større skibe udsender støj, der har nogle generelle fællestræk. Det ses bl.a. i Figur 1.1, hvor decidekade-spektre af tre forskellige typer af skibe er illustreret. Fælles for støjspektrene af de større skibe er at størstedelen af energien findes ved lave frekvenser, under et par hundrede Hz og at støjen aftager meget regelmæssigt med frekvens over denne grænse, med 10 dB per dekad, svarende til 3 dB per oktav. Den største forskel mellem skibstyperne ligger i formen på toppen ved de lave frekvenser, jf. forskellen på figuren mellem hhv. bulk carrier/containerskib og passagerskib.

Figur 1.1. Øverst: målinger fra en ældre bulk carrier (173 m lang) ved to hastigheder. Bemærk at en sænkning af hastigheden med 25% resulterer i en betydelig reduktion i den udsendte støj (ca. 10 dB), men at formen på spektret generelt er uændret. Data fra Arveson and Vendittis (2000). Nederst: Eksempler på modellerede støjkurver (decidekade-spektre) for tre forskellige skibstyper, alle i en afstand af 100 m. Kurver fra MacGillivray and de Jong (2021).





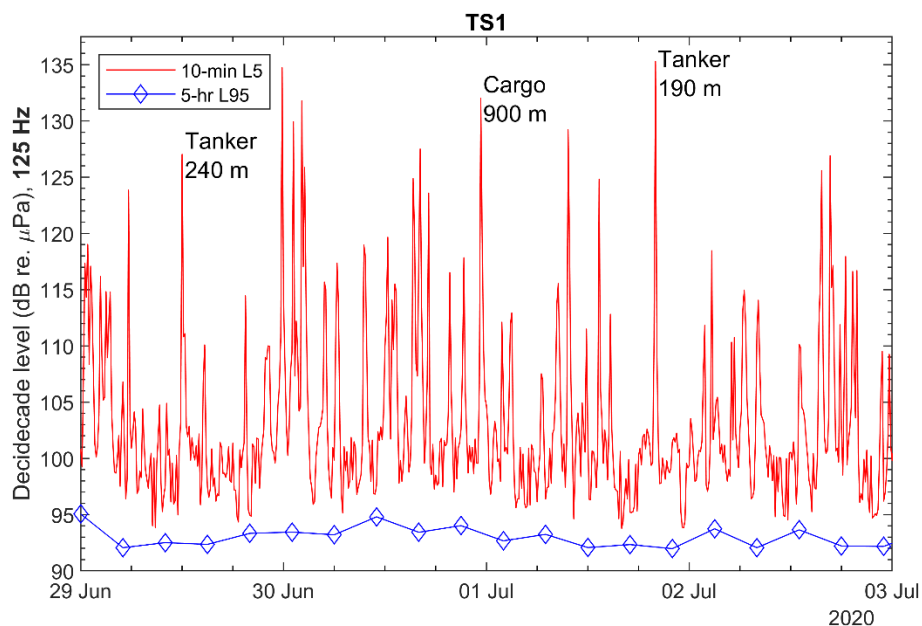
Modeller for skibsstøj, som dem angivet i Figur 1.1, er baseret på et stort antal målinger (MacGillivray and de Jong, 2021) gennemført på skibe af forskellig størrelse og hastighed. Modellerne repræsenterer statistiske gennemsnit, men er ikke velegnede til at forudsige de faktiske støjniveauer udsendt af et bestemt skib. Disse kan variere betydeligt (10-20 dB) i forhold til middellkurverne (MacGillivray and de Jong, 2021). Modellerne er imidlertid meget velegnede som input til de statistiske modeller der anvendes til at generere støj-kortene, der anvendes i vurdering af miljøtilstanden.

1.2.2 Måling af skibsstøj

Skibsstøj kan måles fra faste stationer monteret på bunden, sådan som beskrevet i kapitel 2, hvorved kontinuerlige tidsrækker af undervandsstøj, inklusiv skibsstøj, kan optages. Optagelserne kan analyseres på forskellig vis. Til analyse af skibsstøj anvendes typisk en opdeling i decidekade frekvensbånd² og en tidsopløsning på mellem 1 og 10 sekunder. De laveste frekvensbånd, såsom 125 Hz, er velegnede til at identificere skibsstøjen, jf. toppen i spektrene i Figur 1.1. Det er formålstjenstligt at lave en yderligere analyse over to forskellige tidsvinduer (Figur 1.2). I den ene analyse beregnes den øverste 5. percentil af 1-sekundintervallerne (betegnet L_5 , svarende til det lydniveau, der overskrides 5% af tiden) over 10 minutter. Denne størrelse fanger de kraftigste dele af støjen i hvert 10-minuttersinterval og er dermed velegnede til at identificere de enkelte skibspassager. Den anden analyse er tilsvarende, bortset fra at det er den nederste 5. percentil (L_{95} , overskredet 95% af tiden), udregnet over 5 timer. Dette niveau fanger de mest stille perioder i hvert 5-timers interval og er et godt mål for baggrundsstøjen.

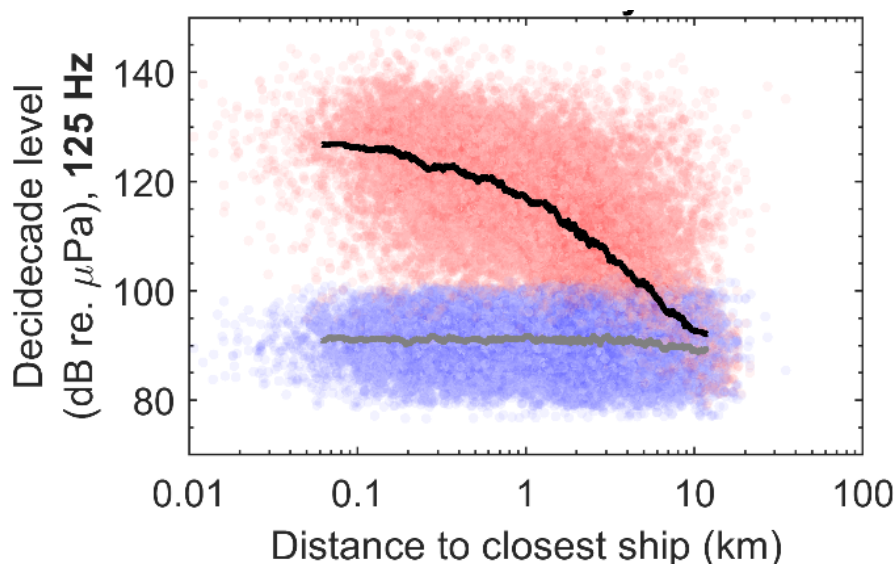
² Decidekadebånd, også omtalt som tredjedels-oktavbånd, har en båndbredde på 1/10 dekode, hvilket svarer til 23% af centerfrekvensen af båndet. Disse bånd er karakteriseret ved at blive bredere med stigende frekvens, men forholdet mellem båndbredde og centerfrekvens er konstant.

Figur 1.2. Adskillelse af skibsstøjen (rødt) fra baggrundsstøjen (blåt) ved hjælp af to forskellige percentiler (L_{95} og L_5) udregnet over to forskellige intervaller (hvh. 5 timer og 10 minutter). Tre eksempler på passager af skibe af kendt type og i kendt afstand (fra AIS-data) er angivet ved de tilhørende toppe. Fra Tougaard et al. (2023a).



Med et stort antal af disse målinger kan man analysere hvor langt væk man kan identificere skibsstøjen over baggrundsstøjen, hvilket er gjort for en station i det nordlige Kattegat i Figur 1.3. Her er skibsstøjen (L_5 over 10 minutter) og baggrundsstøjen (L_{95} over 5 timer) plottet mod afstanden til det nærmeste skib (bestemt ud fra AIS-data). Der er betydelig spredning i data, hvilket skyldes at der ikke er taget højde for skibenes størrelse eller fart, samt den iboende variation fra skib til skib. Betragtes imidlertid medianniveauet for skibsstøjen (øverste sorte linje) kan man se at den ligger over baggrundsstøjen ud til en afstand af 10 km. Dette betyder at de enkelte skibe hæver baggrundsstøjen i dette tilfælde ud i en afstand af mindst 10 km omkring skibet. Det er væsentligt at bemærke at dette resultat er lokalt for det pågældende område i Kattegat, under de hydrografiske forhold der herskede i perioden. I andre områder eller under andre forhold kan lydudbredelsen være både meget mindre og meget større.

Figur 1.3. Estimer af baggrundsstøjen (blå prikker, L_{95} over 5-timers intervaller) og skibsstøjen (røde prikker, L_5 af støjen målt over 10-minutters intervaller), begge målt i 125 Hz decidekadebåndet. Målt tæt ved sejlruten (T-ruten) i nord-østlige Kattegat. Fra Tougaard et al. (2023a).



1.2.3 Modellering af støjkort

Det ligger udenfor denne rapport at gøre rede for detaljerne i de modeller, der anvendes til at fremstille de støjkort, der ligger til grund for vurderingerne af

miljøtilstanden. En helt grundlæggende introduktion gives nedenfor. I øvrigt henvises til Folegot et al. (2016) og Jong et al. (2021).

Udgangspunktet for støjmodellerne anvendt i QSR24 og HOLAS3 er en model for naturlig baggrundsstøj og en model for skibsstøj. Den naturlige baggrundsstøj afhænger i væsentligste grad af størrelsen på bølgerne på overfladen, der igen hænger sammen med vindhastigheden på åbent hav. Denne sammenhæng beskrives gennem såkaldte Knudsen- eller Wenz-kurver. Disse bestemmes empirisk ud fra målinger i de havområder man ønsker at modellere. Se for eksempel Mustonen et al. (2020) for empiriske modeller for Østersøen. Skibsstøjmodellerne kan være af typen som illustreret ovenfor i Figur 1.1. Informationer om skibene skaffes fra AIS systemet, der giver løbende information om alle større skibes position og fart, samt oplysninger om størrelse og skibstype (alt sammen input til skibsstøjmodellen).

Selve modelleringen forgår ved en såkaldt 'snapshot'-metode, hvor der tages et øjebliksbillede af hele modelområdet f.eks. en gang hver time. I det enkelte snapshot har man således information om alle skibes position, type, længde og fart og kan derved modellere hvor meget støj de enkelte skibe udsender i det øjeblik. Disse hundredvis, i nogle tilfælde tusindvis af lydkilder, bliver derefter bredt ud i de omgivende vandmasser, hvis akustiske egenskaber man får fra en hydrografisk model, der også leverer øjebliksbilleder. Selve lydudbredelsen modelleres med standardmodeller: parabolic equations (PE) for lave frekvenser og Bellhop for høje frekvenser (se f.eks. Hodges, 2010 for en kort introduktion til modellerne). Bidragene fra alle skibe lægges sammen i hvert modelpunkt i modellen. Hertil kan lægges den naturlige baggrundsstøj, der modelleres ud fra de lokale Wenz-kurver, med den øjeblikkelige vindhastighed som input.

Det endelige støjkort fremkommer som statistiske mål for støjen i de enkelte snapshots, beregnet over længere perioder, f.eks. en måned eller et år. Kortene er derfor statistiske repræsentationer af støjen i den pågældende periode. Ofte er det nødvendigt at betragte adskillige kort, hver med forskellige statistiske mål, for at få et fuldstændigt billede af hvordan støjen var i den pågældende periode.

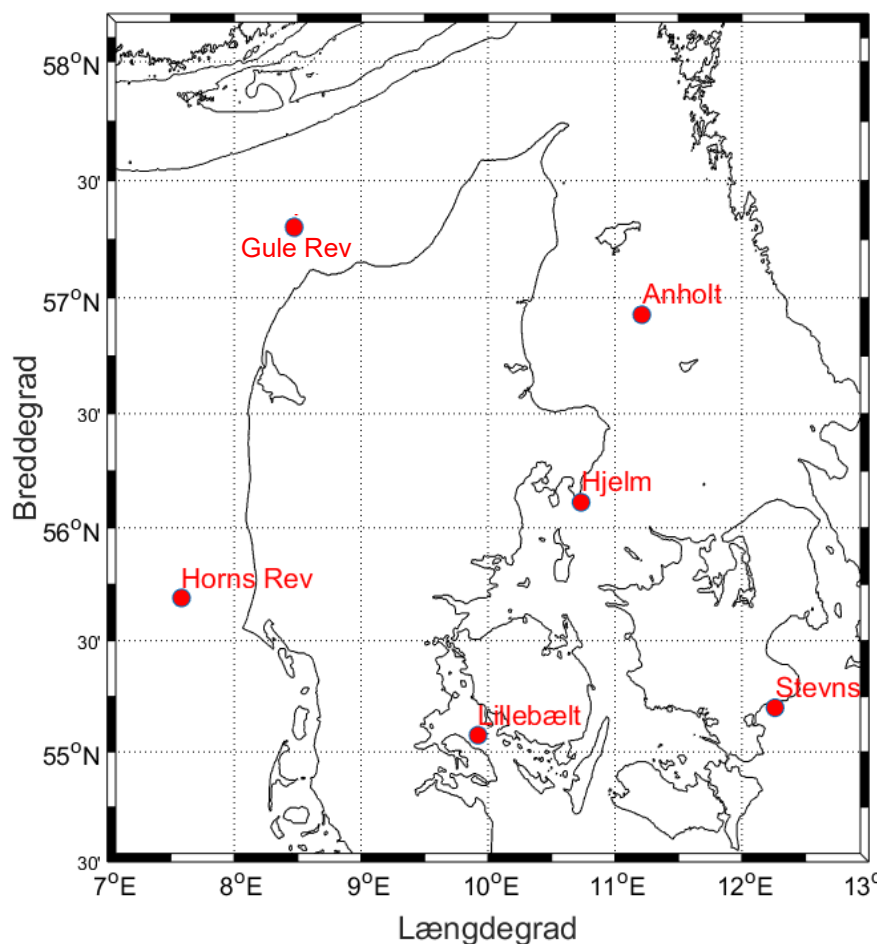
2 Metoder

De anvendte måle- og analysemetoder følger anbefalingerne fra HELCOM (HELCOM, 2019) og den tekniske anvisning for kontinuerlig undervandsstøj (Tougaard, 2019).

2.1 Målestationer

Overvågningsprogrammet i Danmark foregår på seks målestationer, hvor der alterneres mellem stationerne, sådan at der er data fra mindst tre stationer hvert år. To stationer er i Kattegat, hhv. ved Anholt (station 104) og Hjelm (Station 103), to stationer i den sydlige del af de indre danske farvande, hhv. i Lillebælt (Station 35) og ved Stevns (Station 38), og to stationer i Nordsøen ved Horns Rev 3 (Station 201), og Gule Rev (Station 202). De seks målestationer fremgår af Figur 2.1, med positioner angivet i Tabel 2.1.

Figur 2.1. Oversigtskort med angivelse af de seks faste stationer i danske farvande. Farvandet omkring Bornholm dækkes af målestationer i de svenske, tyske og polske måleprogrammer.



Tabel 2.1. Detaljer om målestationerne anvendt siden 2019. Koordinatsystem: WGS 1984.

Rotation	Nummer	Navn	Længdegrad	Breddegrad	Dybde (m)
A	35	Lillebælt	9° 55,28' Ø	55° 4,53' N	25
B	38	Stevns	12° 15,66' Ø	55° 11,97' N	11
B	103	Hjelm	10° 43,95' Ø	56° 6,78' N	10
B	104	Anholt	11° 12,13' Ø	56° 55,57' N	12
C	201	Horns Rev	7° 35,1' Ø	55° 41,4' N	15
C	202	Gule Rev	8° 24,1' Ø	57° 18,7' N	35

Stationerne roteres mellem overvågningsår efter mønsteret: A) overvågning hvert år, B) på skift hvert tredje år, C) på skift hvert andet år. Stationsnumre under 100 stammer fra BIAS projektet (Mustonen et al., 2019) og er fastholdt. Øvrige stationsnumre er unikke for støjovervågningen: 1xx Kattegat, 2xx Nordsøen/Skagerrak.

2.2 Udstyr

Tre forskellige typer dataloggere er blevet anvendt i måleprogrammet: SM2M (Wildlife Acoustics, Boston), ST500HF og ST600HF (begge Ocean Instruments, New Zealand). Dataloggerne er forskellige i opbygning, men fungerer grundlæggende ens og leverer alle målinger, der lever op til standarderne (HELCOM, 2018; Tougaard, 2019). De væsentligste forskelle mellem dataloggerne består i hukommelseskapacitet (stigende fra SM2M - ST500HF - ST600HF) og batterilevetid (stigende fra SM2M til ST500/600HF). Begge dele betyder at driftscyklus er sat gradvist op fra 50 % (30 minutters optagelse hver time) til næsten 100 % (59 minutter hver time) og båndbredden er øget fra 20 kHz til 40 kHz eller højere.

Ved udlægning af dataloggerne, blev disse anbragt så hydrofonen vendte opad i vandsøjlen og var ca. 3 meter over havbunden. Udstyret blev fastgjort til et anker i form af to jutesække fyldt med granitskærver. Mellem anker og datalogger var anbragt en akustisk betjent udløsermekanisme (Sonardyne LRT, U.K eller SubSeaSonic Release system), der ved en kodet lydkommando fra overfladen kan bringes til at frigøre loggeren fra stensækkene. Sække (jute) og reb (hamp) efterlades på bunden og er bionedbrydelige. Ved opsætninger med SM2M loggeren, blev en trawlkugle placeret mellem den akustiske udløser og dataloggeren som ekstra opdrift. Ved opsætninger med ST500/ST600 loggeren, var trawlkuglen placeret over loggeren, og loggeren var ydermere placeret inde i et bøjeblåd af flamingo for at sikre yderligere opdrift. Se Figur 2.2.

2.2.1 SM2M dataloggeren

SM2M dataloggeren er udstyret med en hydrofon (HTI96min) med en følsomhed på -164 dB re 1V/μPa. Dataloggeren optager lyden digitalt (16 bit, sample rate 32 ksamples/s) og gemmer optagelserne som ukomprimerede wav-filer på SD hukommelseskort (128 GB/SD kort, 1-4 SD kort per datalogger). SM2M dataloggeren optog med en driftscyklus på 50 %, dvs. 30 minutters optagelse for hver hele time. På baggrund af disse indstillinger har denne type logger en optagetid på omkring 3 måneder, begrænset af batterilevetiden. SM2M dataloggeren anvendes ikke længere i det danske overvågningsprogram, da batteri- og hukommelseskapaciteten er større i de nyere typer (Soundtraps ST500/600).

2.2.2 ST500 dataloggeren

ST500 dataloggeren har en hydrofon med en følsomhed på -158 dB re $1\text{V}/\mu\text{Pa}$. Dataloggeren optager lyden digitalt (16 bit, sample rate 96 ksamples/s) og gemmer optagelserne som komprimerede datafiler, i intern hukommelse, på op til 3 ekstra mikro-SD hukommelseskort (i alt op til 1 TB komprimeret data). ST500/600 loggerne optog kontinuerligt. Ved de beskrevne indstillinger kan denne type logger optage data i omkring 4 måneder ifølge producentens oplysninger, begrænset af batterilevetiden.

ST500 dataloggerne indkøbt til overvågningsprojektet har været plaget af tekniske problemer, herunder skader på den eksterne hydrofon og fejl i elektronikken, der har medført et betydeligt tab af data. De er derfor udfaset af overvågningsprogrammet (og er ikke længere tilgængelige fra producenten) og erstattet af den nyere og forbedrede model, ST600. En enkelt ST500 datalogger, der har fungeret upåklageligt indgår stadig som reserveudstyr.

Figur 2.2. Eksempel på opsætningen af de to typer af målestationer. Venstre: Opsætning med ST500 dataloggeren. Højre: Opsætning med SM2M dataloggeren.



2.2.1 ST600 dataloggeren

ST600 dataloggeren har grundlæggende samme opbygning som ST500, men har en indbygget hydrofon og en mere robust udformning. Desuden er fejl i firmware, der har voldt problemer og forårsaget tab af data i ST500-udlæggerne blevet rettet i ST600. Dataloggeren optager lyden digitalt (16 bit,

sample rate 96 ksamples/s) og gemmer optagelserne som komprimerede datafiler på op til 4 mikro-SD hukommelseskort (i alt op til 2 TB komprimeret data). ST600 loggerne optager kontinuerligt. Ved de beskrevne indstillinger kan denne type logger optage data i omkring 6 måneder ifølge producentens oplysninger, begrænset af batterilevetiden. ST600 dataloggeren er den foretrukne datalogger for overvågningen og de øvrige typer anvendes kun undtagelsesvist hvis der ikke er en funktionsdygtig ST600 tilgængelig på udlægningstidspunktet.

2.3 Dataanalyse

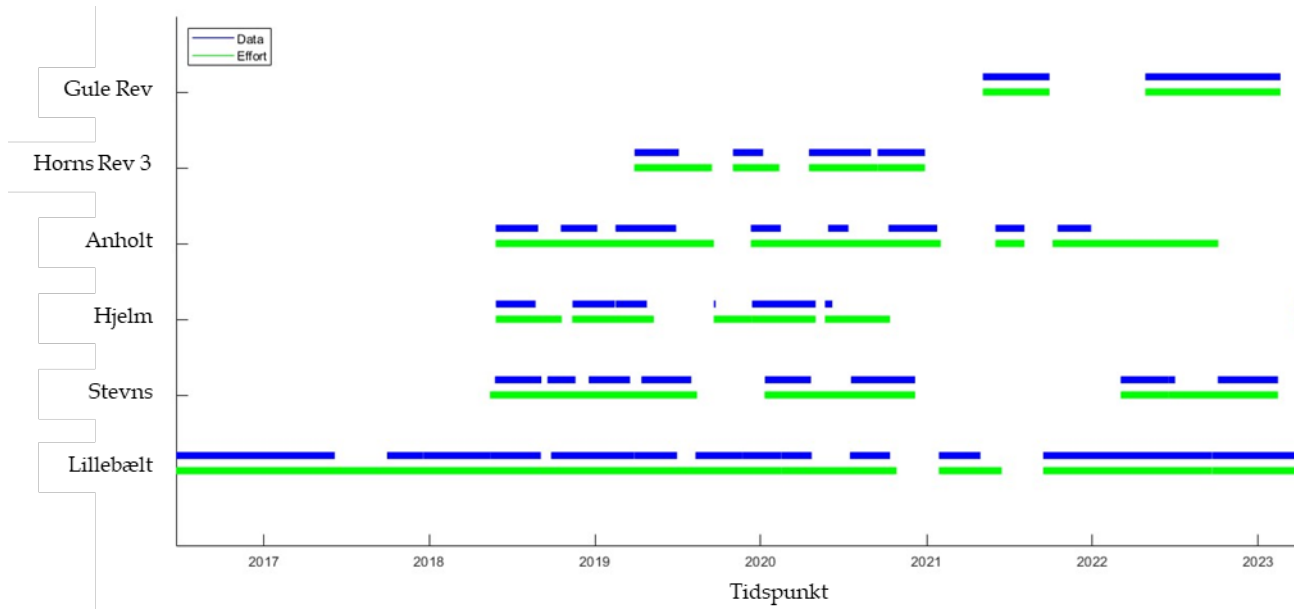
Optagelserne blev analyseret vha. en Matlab rutine (R2017b, Mathworks), udviklet i henhold til specifikationerne angivet af HELCOM (HELCOM, 2019) og den tekniske anvisning hertil (Tougaard, 2019). For at sikre kvaliteten af den nyudviklede rutine blev den kalibreret mod en Matlab rutine udviklet af FOI, Stockholm, som en del af BIAS-projektet (Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape). Se BIAS-standarden i Betke et al. (2015). Hver datafil (af mellem 30 og 59 minutters varighed) blev opdelt i 1-sekunds blokke. For hver af disse blokke blev det totale lydtryk (L_{eq} , rms-gennemsnittet over 1 sekund) og lydtrykket i tredjedelsoktav-båndene med centerfrekvens 63 Hz, 125 Hz og 2000 Hz ($L_{63,1s}$, $L_{125,1s}$ og $L_{2000,1s}$) beregnet. $L_{63,1s}$, $L_{125,1s}$ og $L_{2000,1s}$ blev udregnet som summen af effekttæthedsspektret (med fast Fourier transform (FFT) algoritme, Hann-vægtet, 32000 eller 96000 punkter for hhv. SM2M og ST500/ST600). Fra 1-sekunds perioderne blev der derefter genereret 20-sekunders gennemsnit, svarende til L_{eq} (rms-gennemsnittet) over 20 sekunder.

På baggrund af værdierne for hver 20 sekunders vindue blev de øvre percentiler L_5 , L_{25} , L_{50} (median), L_{75} og L_{95} beregnet. L_5 angiver det lydniveau, som kun overskrides 5 % af tiden og er derved et mål for de kraftigste lyde i måleperioden. L_{95} er derimod det niveau som overskrides 95 % af tiden og er derfor et mål for det laveste støjniveau på målestationen.

Dataanalysen i overvågningsprogrammet er udvidet i henhold til vejledning fra Interreg-projektet JOMOPANS (Ward et al., 2021) og omfatter nu alle deca-dekade-bånd mellem 20 Hz og 20 kHz. Ændringerne indføres for at smidiggøre processen med kvalitetskontrol af data, upload af analyserede data til HELCOMs database for vedvarende støj (hos ICES) og ekstraktion af data til videre analyse. Dette arbejde involverer harmonisering af retningslinjer for dataindrapportering mellem OSPAR og HELCOM til den fælles database hos ICES, hvilket løbende pågår.

3 Indsamlede data

Perioder, hvor udstyr har været udlagt og data indsamlet frem til sommeren 2023 fremgår af Figur 3.1.



Figur 3.1. Oversigt over perioder med udlagt måleudstyr og indhentede data. Grønne linjer indikerer at udstyr var udlagt på målestationen, blå linjer at udlægningen resulterede i brugbare data.

Der var betydelige problemer med indsamlingen af data på Horns Rev, hvor stationen gentagne gange rev sig løs fra ballastsækken og kom til overfladen i utide. Dette opdages øjeblikkeligt da stationen er udstyret med en GPS med tilhørende satellitsender (Iridium-netværket). Når enheden er i overfladen, sender den regelmæssigt positionen, der modtages via e-mail. I et tilfælde lykkedes det at bjærge udstyret fra stranden; i et andet tilfælde var det kun satellitsenderen, der blev bjærget i overfladen, selve dataloggeren var gået tabt og i et tredje tilfælde tillod vejret i en længere periode ikke at eftersøge udstyret, der drev nordpå og måtte afskrives som tabt da den sidste position inden batteriet døde blev modtaget fra en position ud for Norges sydkyst. Udlægning af udstyr på Horns Rev i 2025 vil ske med et forbedret design af forankring, enten med bedre (tungere) ballast, eller med anden form for forankring.

4 Resultater

4.1 Målinger

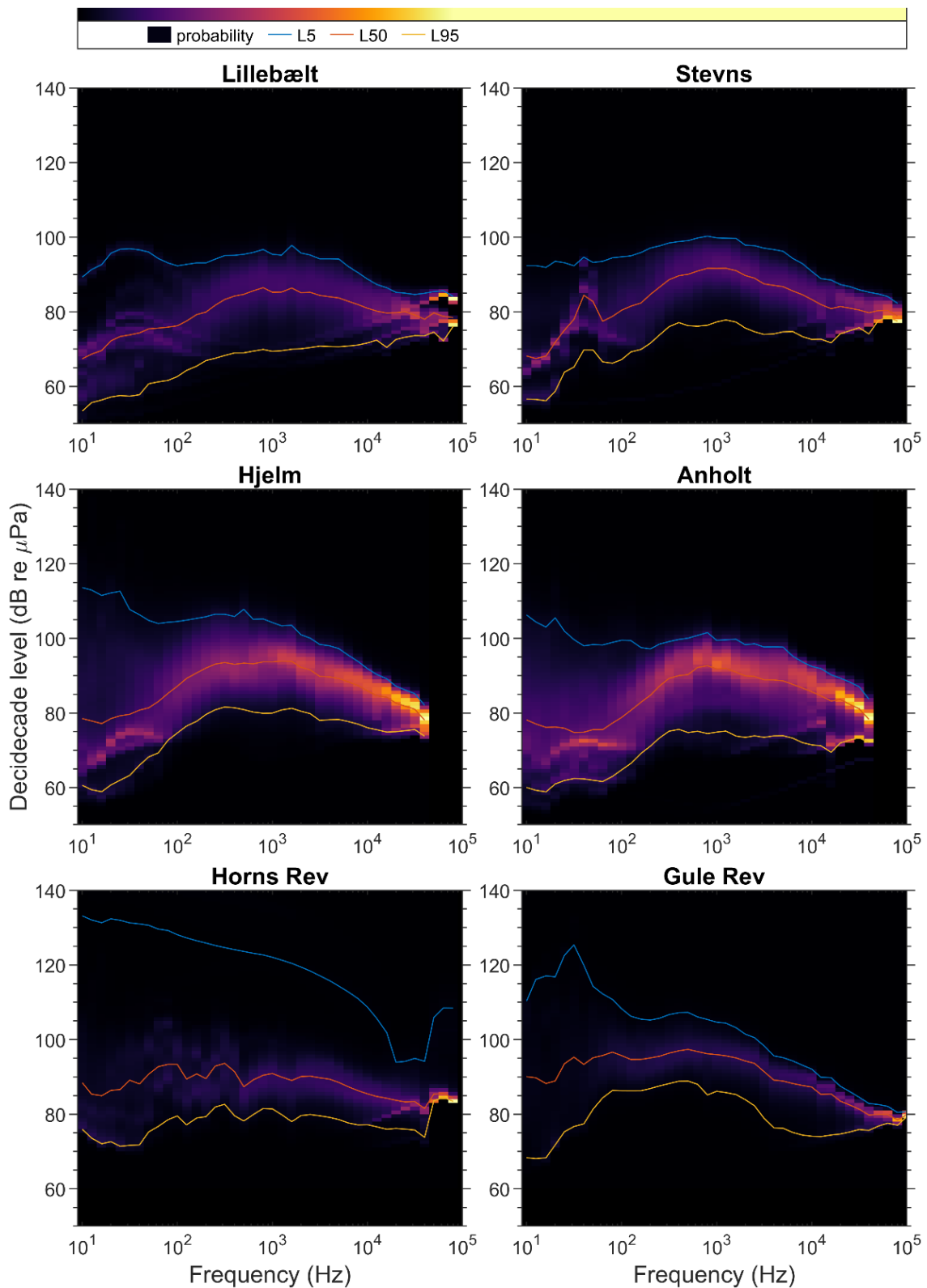
Analyser af målingerne indsamlet til og med medio 2023 er angivet nedenfor i Figur 4.1 til Figur 4.4.

Figur 4.1 viser frekvensspektre for alle seks stationer. Farveskalaen angiver hyppigheden hvormed det pågældende lydtryksniveau optræder for de enkelte frekvensbånd (tæthedsfunktionen). De skal læses sådan at jo lysere farverne er, jo mere stabil er intensiteten over tid i det pågældende frekvensbånd, typisk på grund af vedvarende støjkluder, såsom skibstrafik. Mest interessant er medianen (L_{50} , rød linje) og den øverste 5. percentil (L_5 , blå linje), hvor sidstnævnte udtrykker de højeste lydtryk der optræder i optagelserne (5 % af tiden er lydtrykket på dette niveau eller højere). Her kan man se at stationerne grupperer sig i tre grupper:

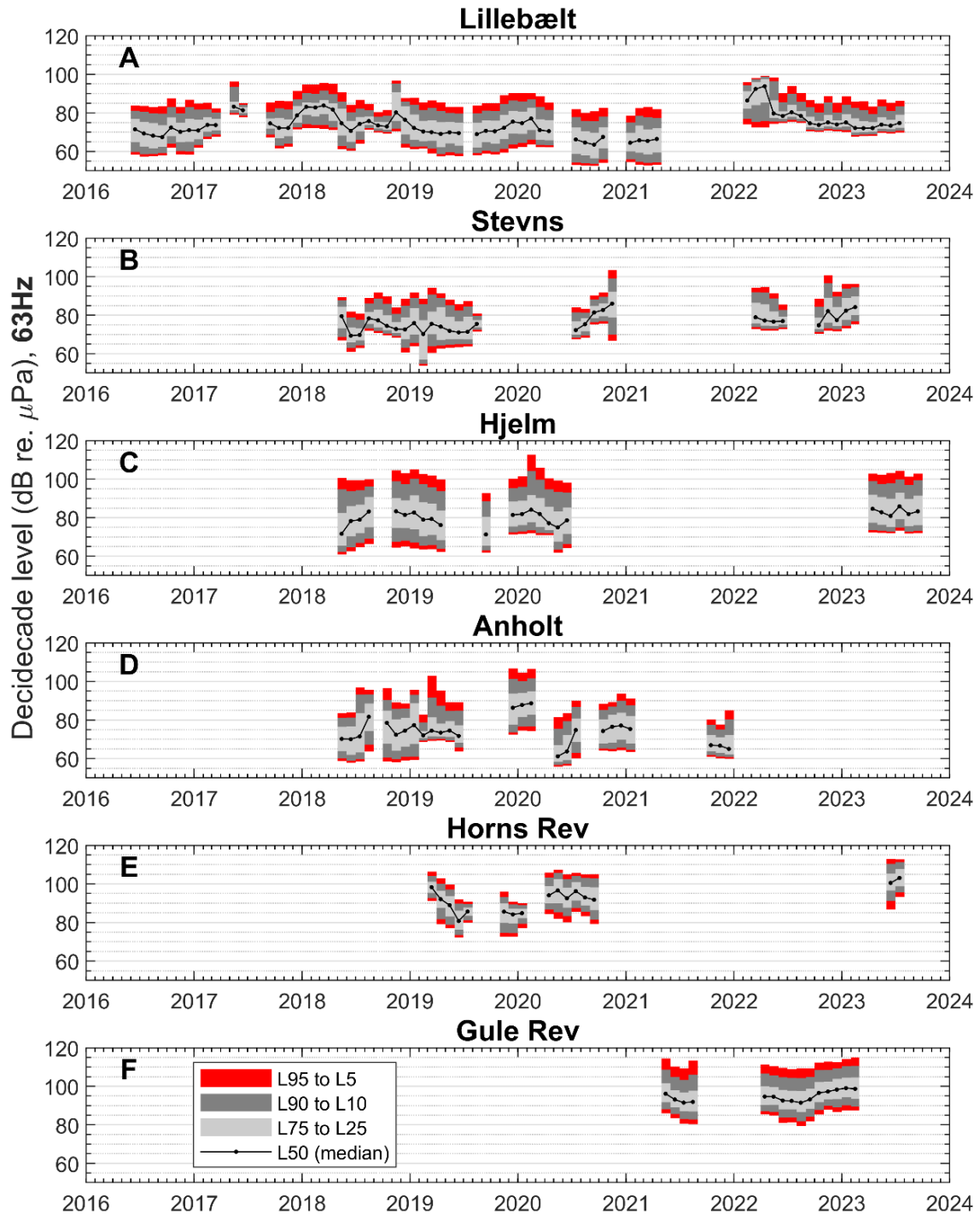
- Lillebælt og Stevns har lavere medianniveauer og L_5 end de andre stationer og er stationer hvor der er relativt lidt skibstrafik.
- Hjelm og Anholt ligger i midten med større variation, hvilket harmonerer med at de er stationer i områder hvor der er nogen skibstrafik, mest længere væk, men af og til skibe, der kommer tæt på målestationerne.
- Gule Rev og Horns rev har de højeste medianniveauer og L_5 og ligger i områder hvor der er betydelig og vedvarende skibstrafik, specielt Gule Rev, som har det højeste medianniveau. Horns Rev har det højeste L_5 niveau af alle stationerne, hvilket sandsynligvis skyldes at stationen ligger inde i en havvindmøllepark og derfor jævnligt passerer på meget tæt hold af serviceskibe.

Figur 4.2 til Figur 4.4 viser den tidlige udvikling i støjen på de seks stationer igennem hele overvågningen, for tre udvalgte frekvensbånd (63 Hz, 125 Hz og 2 kHz, i henhold til HELCOMs retningslinjer). Det kan iagttages at der er betydelig variation fra år til år. Der er endnu ikke samlet data ind over tilstrækkeligt mange år til at det er muligt at lave robuste statistiske analyser af mulig ændring i støjniveauerne over tid (enten stigende eller faldende).

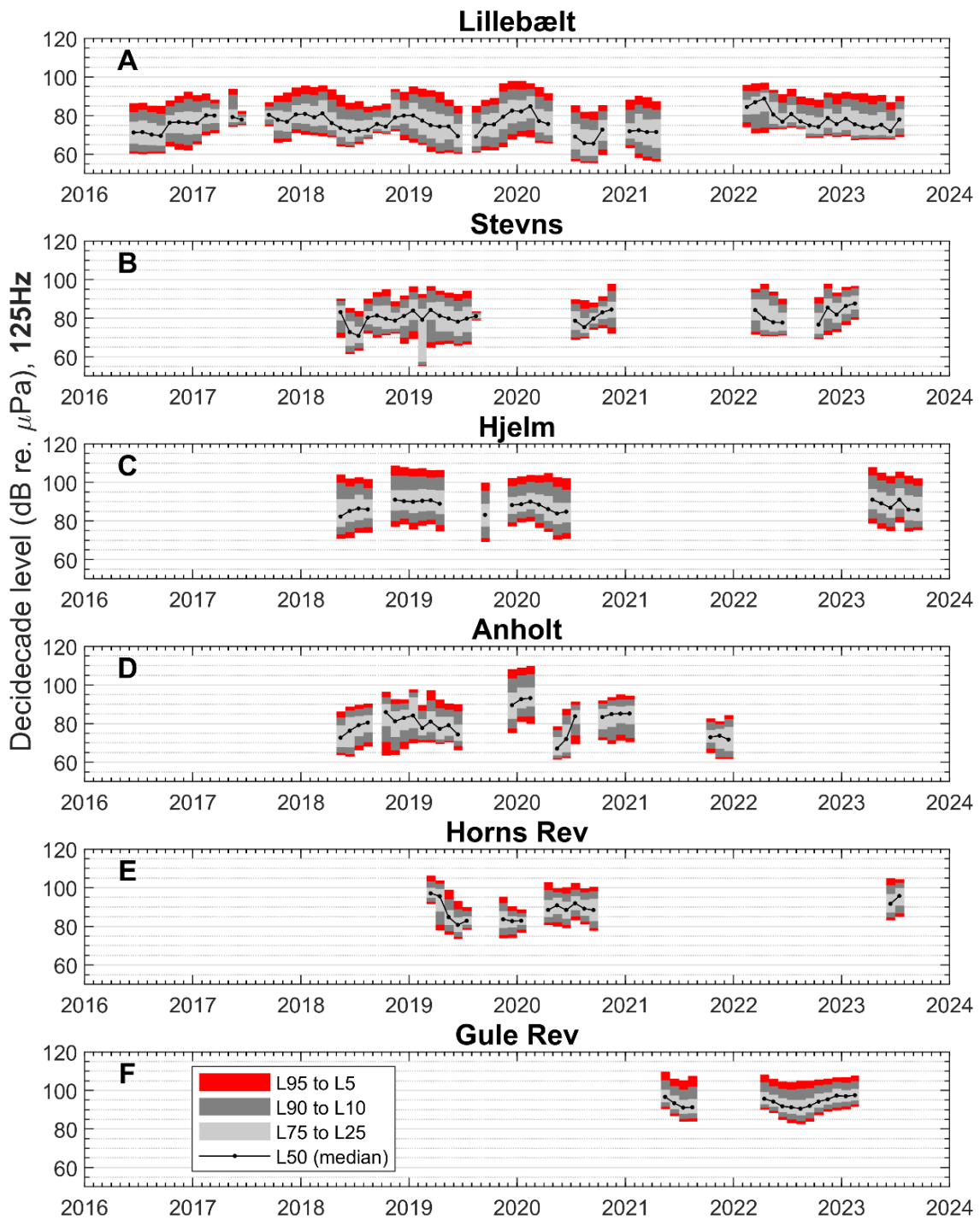
Det samlede billede svarer til det beskrevne ovenfor, med Gule Rev og Horns Rev som de stationer, der konsistent ligger højest, og Lillebælt og Stevns som dem, der generelt ligger lavest.



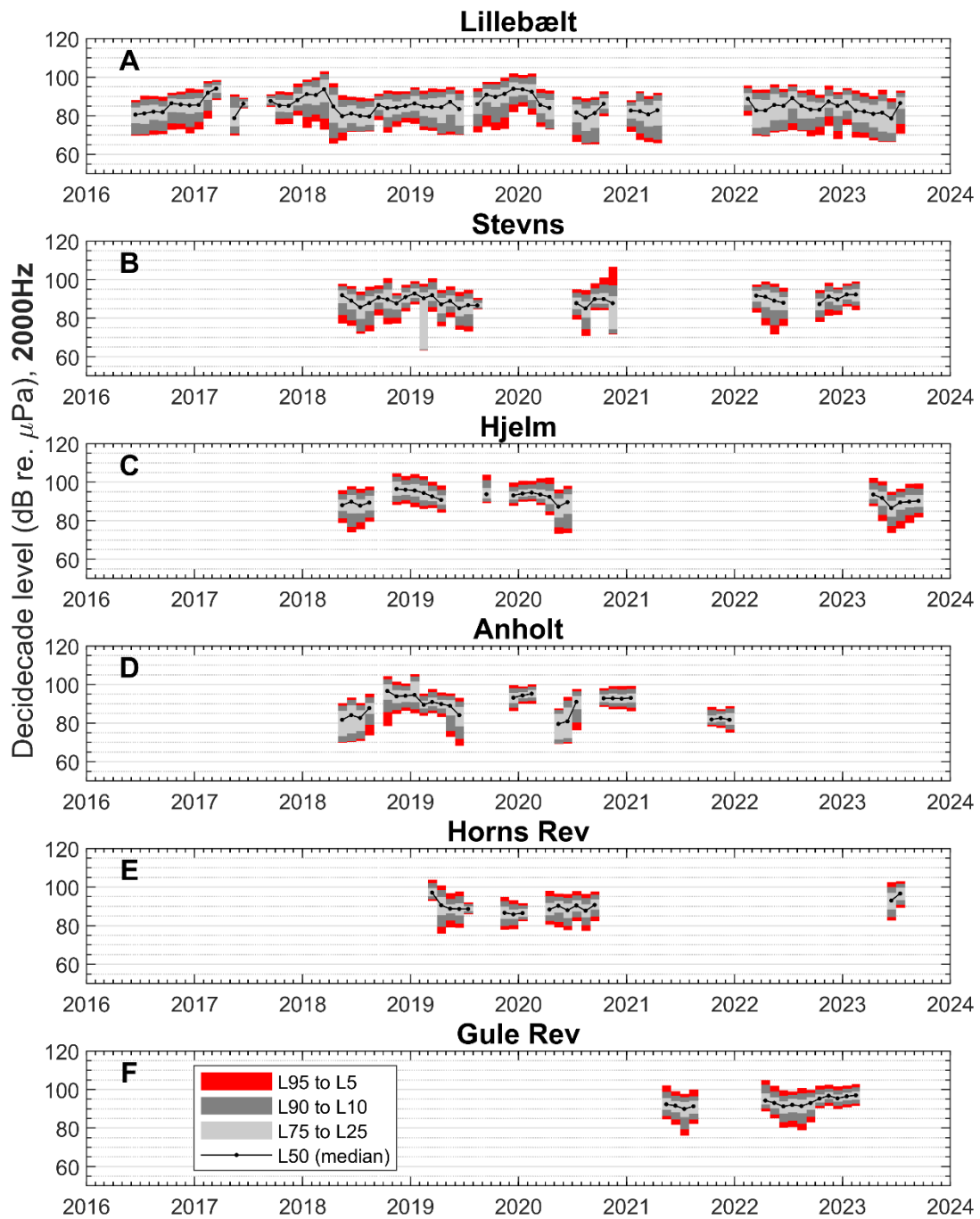
Figur 4.1. Frekvensspektra af støjen på de seks stationer, udregnet efter metoden angivet af Merchant et al. (2015). Farveskalaen angiver fordelingen (tæthedsfunktionen) af energi indenfor de enkelte decidekadebånd. Sort angiver 0 % med stigende sandsynlighed (tæthed) mod den lysere gul. Den røde linje indikerer medianen, mens den blå og den gule linje angiver hhv. den øverste og nederste 5. percentil.



Figur 4.2. Månedlige percentiler for 63 Hz decidekadebåndet på de seks målestationer.



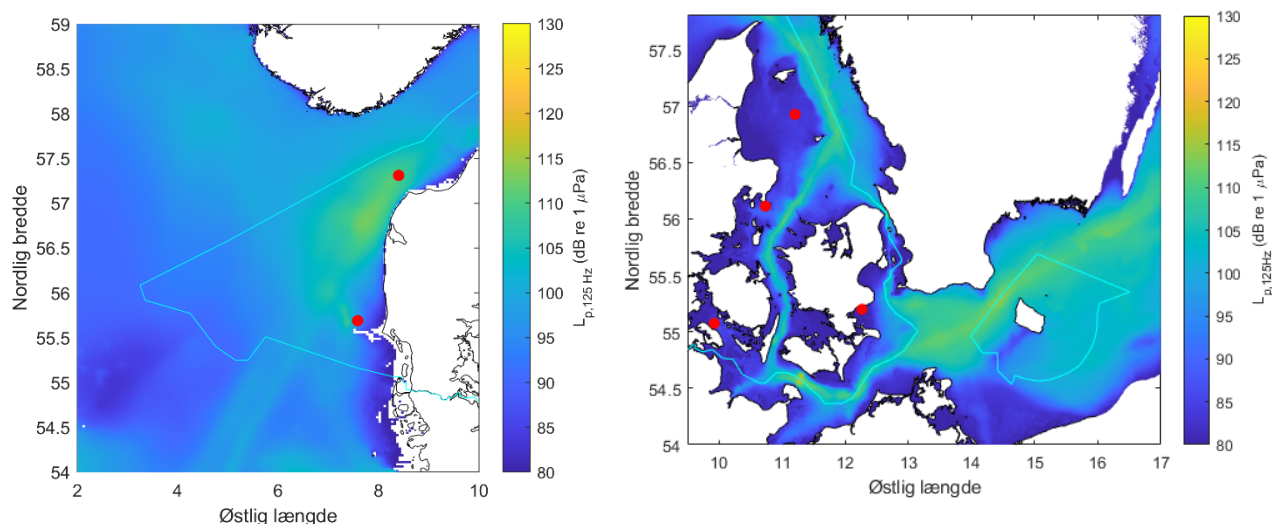
Figur 4.3. Månedlige percentiler for 125 Hz decidekade-båndet på de seks målestationer



Figur 4.4. Månedlige percentiler for 2 kHz decidecade-båndet på de seks målestationer.

4.2 Modelleret støj

Undervandsstøjen i danske farvande, modelleret for Nordsøen i JOMOPANS-projektet og i indre farvande i BLUES projektet, er ikke fuldstændigt sammenlignelige. Begge projekter har dog modelleret det samlede lydtryk fra naturlige kilder (vind og bølger) og skibe i 125 Hz decidekade-båndet. Fælles for de to projekter er at de har modelleret støjen i hhv. Nordsøen og Østersøen i 2018, med henblik på at indgå i de nyligt afsluttede regionale vurderinger af miljøtilstanden (hhv. QSR24 og HOLAS 3). Det er således de nyeste modelresultater tilgængelige og betragtes som værende repræsentative for støjforholdene i den 6-års rapporteringsperiode, der dækkes af vurderingerne (2016-2021). To eksempler, fra juni måned, er vist i Figur 4.5.



Figur 4.5. Den totale støj (vindstøj + skibsstøj) i 125 Hz decidekade-båndet modelleret for Nordsøen i JOMOPANS-projektet (venstre) og Indre Farvande i BLUES-projektet (højre) for juni 2018. Kortene viser i begge tilfælde medianværdier for de enkelte modelblokke. De enkelte blokke er ca. 200 m x 200 m. Placeringen af Miljøstyrelsens målestationer er angivet med røde cirkler.

Støjkortene for 125 Hz båndet viser betydelige forskelle mellem Nordsøen og indre farvande. I Nordsøen er medianstøjniveauet generelt højt og i den danske del med maksimum i farvandet ud for Jyllands vestkyst, mellem Thyborøn og Hanstholm, sammenfaldende med den vigtigste rute for fragtskibe mellem Den engelske Kanal, rundt om Skagen og ind i Østersøen. I indre farvande er støjen koncentreret omkring skibsruterne gennem Storebælt, Øresund og Femern Bælt. Denne koncentration skyldes sammenfaldet mellem skibsruterne og de dybe render i danske farvande. Udenfor sejlruterne er der generelt lavvandet, hvilket giver en højpas-filtrering af skibsstøjen. De lave frekvenser, under nogle få hundrede Hz, er ikke fysisk i stand til at propagere gennem de lavvandede områder. Det er således tydeligt at skibsstøjen er mere udbredt i Arkonabækkenet og farvandet omkring Bornholm, hvor der er dybere.

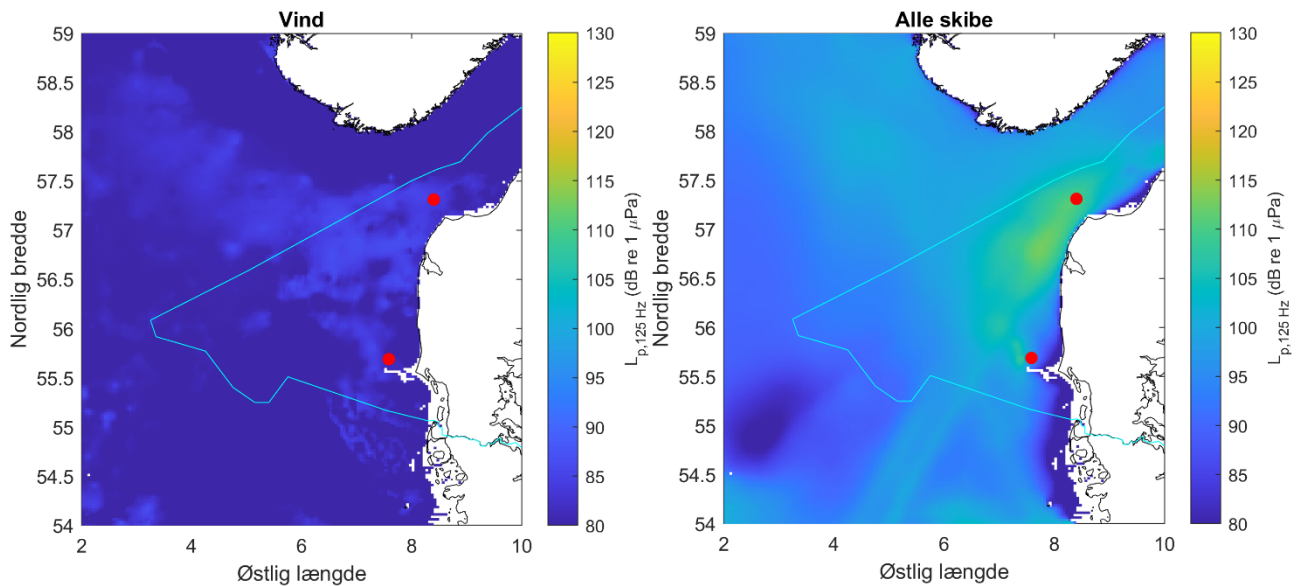
Forskelle i modelleringstilgangen mellem de to projekter gør det vanskeligt at lave direkte sammenligninger mellem områderne, men til gengæld er det muligt at gå i detaljer på forskellige områder for hhv. Nordsøen og Indre Farvande.

4.2.1 Nordsøen (JOMOPANS-projektet)

Modellen for Nordsøen giver mulighed for at undersøge bidraget fra forskellige skibstyper, bidragene i forskellige frekvensbånd og sæsonvariation.

Bidrag fra forskellige kilder

Først og fremmest kan støjen opdeles i den del, der kan henføres til naturlige kilder (vind og bølger) og skibenes bidrag. Disse er angivet i Figur 4.6. Det er tydeligt at skibenes bidrag er betydeligt større end den naturlige baggrundsstøj i hele den danske del af Nordsøen, på nær de helt kystnære og lavvandede områder. Det er også værd at bemærke at der findes et område i den centrale Nordsø, omkring Dogger Banke, hvor skibenes bidrag til undervandsstøjen er sammenligneligt med den naturlige baggrundsstøj. Dette skyldes en kombination af relativt få skibe i området og det lave vand, der gør at støjen fra de omliggende områder ikke propageres ind over den lavvandede Dogger Banke.

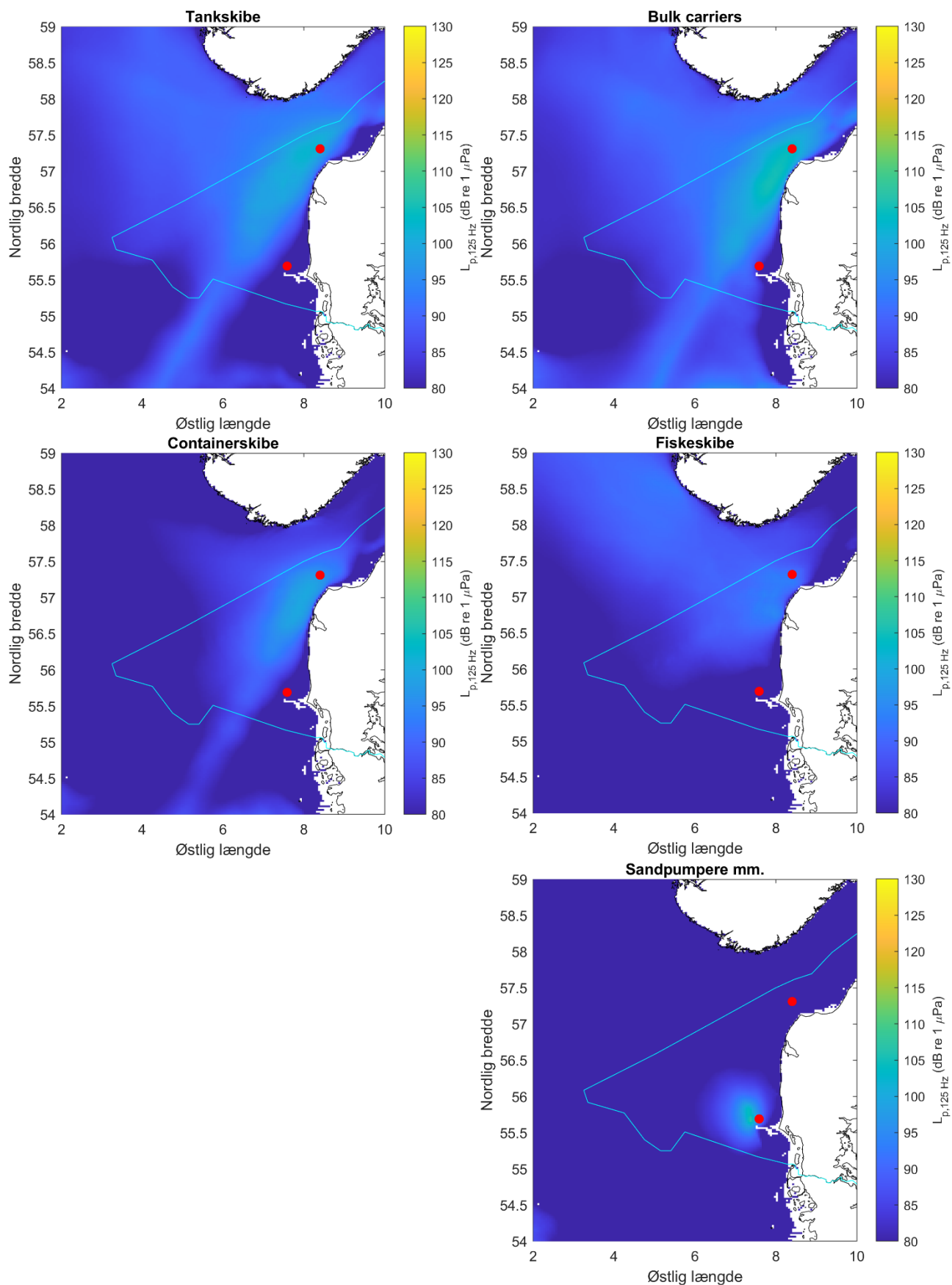


Figur 4.6. Medianniveauer af undervandsstøj i Nordsøen for juni måned 2018 i 125 Hz dekadebåndet, opdelt som naturlig baggrundsstøj (vindgenereret støj) til venstre og skibe med AIS sendere til højre. Røde cirkler angiver målestationerne Gule Rev og Horns Rev.

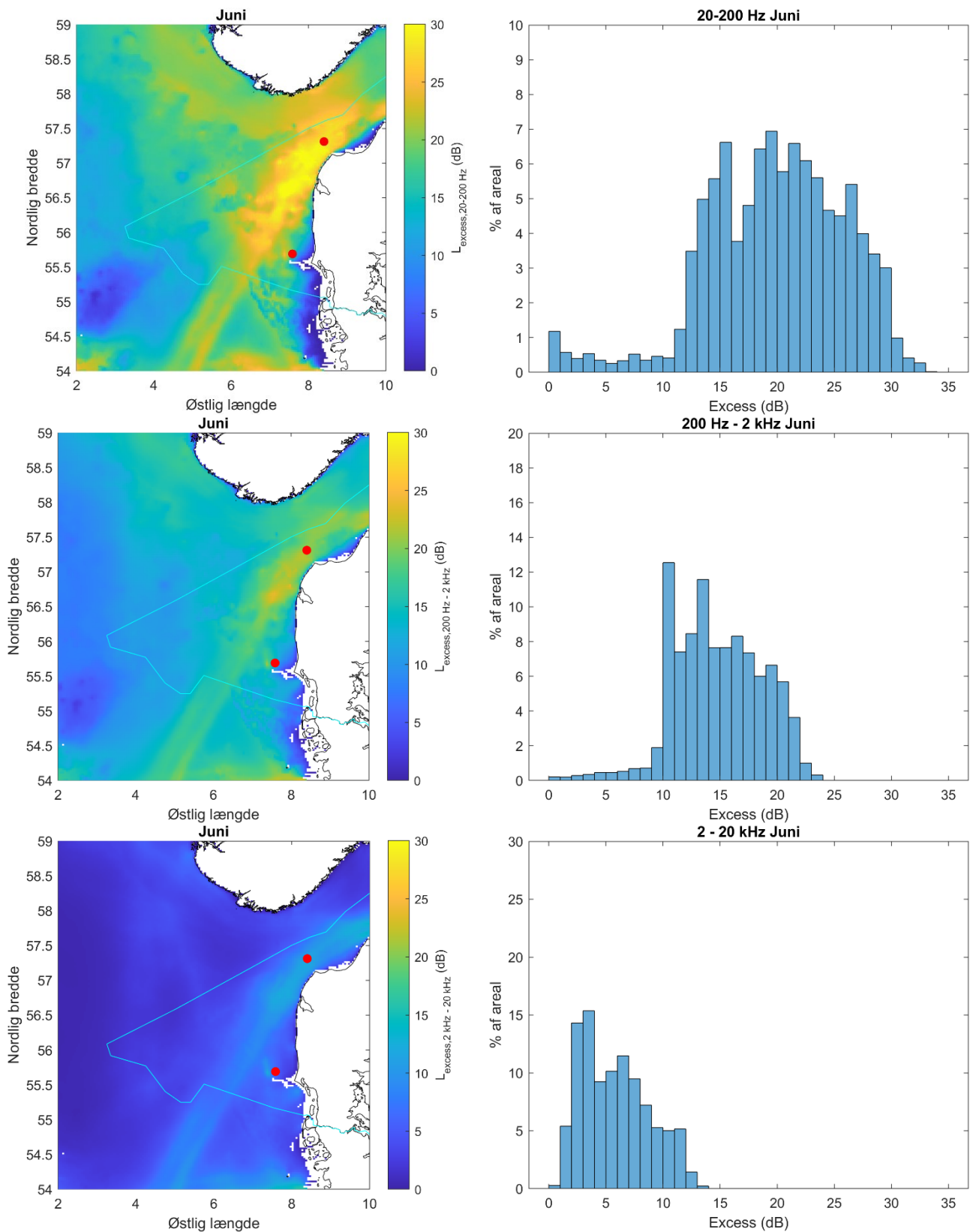
Enkeltbidragene til støjen i 125 Hz båndet er også opdelt på de mest almindelige skibstyper, identificeret ud fra deres AIS signaler. Disse bidrag er angivet som individuelle kort i Figur 4.7. Det er tydeligt at tankskibe, bulk carriers og containerskibe er de største bidragsydere til støjen. Fiskeskibe har størst bidrag i den nordlige del af Nordsøen, mens der er et stort, isoleret bidrag fra skibe klassificeret som sandpumpere mm. i området nord for Horns Rev. Dette bidrag stammer efter al sandsynlighed fra en række specialskibe anvendt i forbindelse med byggeriet af Horns Rev 3 havmøllepark, der foregik i 2018 (parken indviet august 2019).

Bidrag i forskellige frekvensbånd

JOMOPANS modellen analyserede støjen i et meget bredt frekvensområde, fra 20 Hz til 20 kHz, opdelt i tre dekadebånd (Figur 4.8). Kortene i figuren viser median excessniveauer for de tre frekvensbånd og histogrammerne angiver fordelingen af median-excess i den danske del af Nordsøen. Det er tydeligt at der er betydeligt mere skibsstøj i forhold til baggrundsstøj ved de lave frekvenser end ved de høje. Dette skyldes primært at der genereres mere støj fra skibene ved de lave frekvenser (Figur 1.1).



Figur 4.7. Undervandsstøjen i Nordsøen modelleret for juni 2018 i 125 Hz decadebåndet og opdelt på enkeltbidrag fra de største kilder. Røde cirkler angiver målestationerne Gule Rev og Horns Rev.



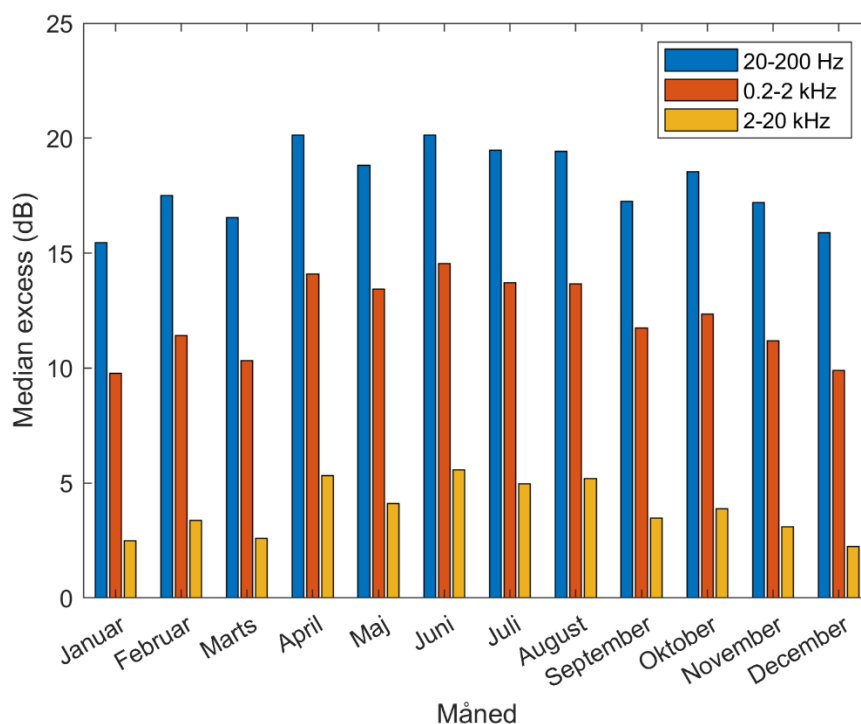
Figur 4.8. Skibsstøjens bidrag i forhold til naturlig baggrundsstøj (excess level) i tre frekvensbånd, hver med en båndbredde på en dekade. Histogrammerne viser fordelingen af median excess i alle modelceller i den danske del af Nordsøen. Alle data fra juni 2018. Røde cirkler angiver målestationerne Gule Rev og Horns Rev.

Sæsonvariation

Ud fra histogrammerne i Figur 4.8 kan der beregnes månedlige medianværdier for hele området. Disse medianværdier er et udtryk for den samlede fordeling af excess-niveauer i hele den danske Nordsø, i hele måneden. Disse total-medianer er angivet for de tre frekvensbånd for alle måneder i 2018 i Figur 4.9. Her ses det, at der er en mindre sæsonvariation i skibsstøjens bidrag til den totale støj, men at niveauerne generelt ligger meget høje, især for de lave frekvenser. For de laveste bånd (20 Hz - 200 Hz) er median-excess således 15-20 dB (Figur 4.9), hvilket svarer til at lydtrykket fra skibene er op til 10 gange kraftigere end den naturlige baggrundsstøj.³

Excess-niveauet stiger om sommeren, hvilket tilskrives at den naturlige baggrundsstøj er lavere om sommeren, på grund af lavere vindhastigheder. Skibstrafikken vurderes at være stort set den samme året rundt, hvorfor støjen også vil være konstant, men hvis baggrundsstøjen går ned om sommeren, så vil skibenes relative bidrag til totalstøjen gå op.

Figur 4.9. Skibsstøjens bidrag i forhold til den naturlige baggrundsstøj (excess level), udregnet som median over rum (danske del af Nordsøen) og tid (månedsvis for 2018). Median excess level er angivet for de tre forskellige frekvensbånd, der samlet dækker området fra 20 Hz til 20 kHz.



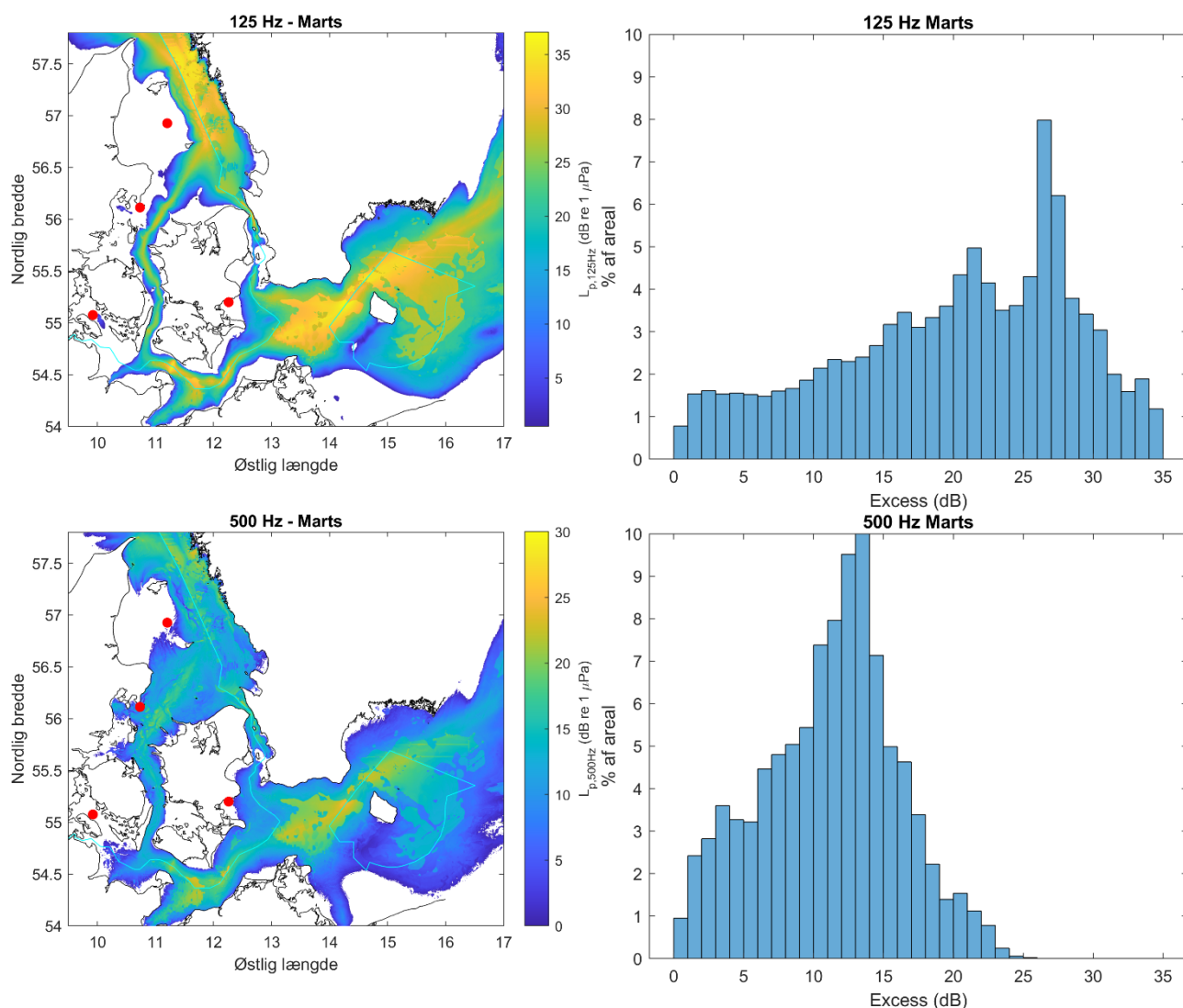
4.2.2 Indre farvande (BLUES-projektet)

Modellerne brugt i BLUES-projektet dækker kun tre decadekade-bånd, hhv. 63 Hz, 125 Hz og 500 Hz, hvorfor det ikke er muligt at sammenligne direkte med Nordsø-modellen. Der er imidlertid andre forhold, der er interessante i modellen for indre farvande. Det er især interessant at sammenligne årstidsvariationen i indre farvande med Nordsøen.

Figur 4.10 og Figur 4.11 viser excess-niveauet for 125 Hz og 500 Hz for de to måneder hvor støjdbredelsen var hhv. størst og mindst (marts og august). Den samlede månedsvise median for hvert af de to frekvensbånd er vist i

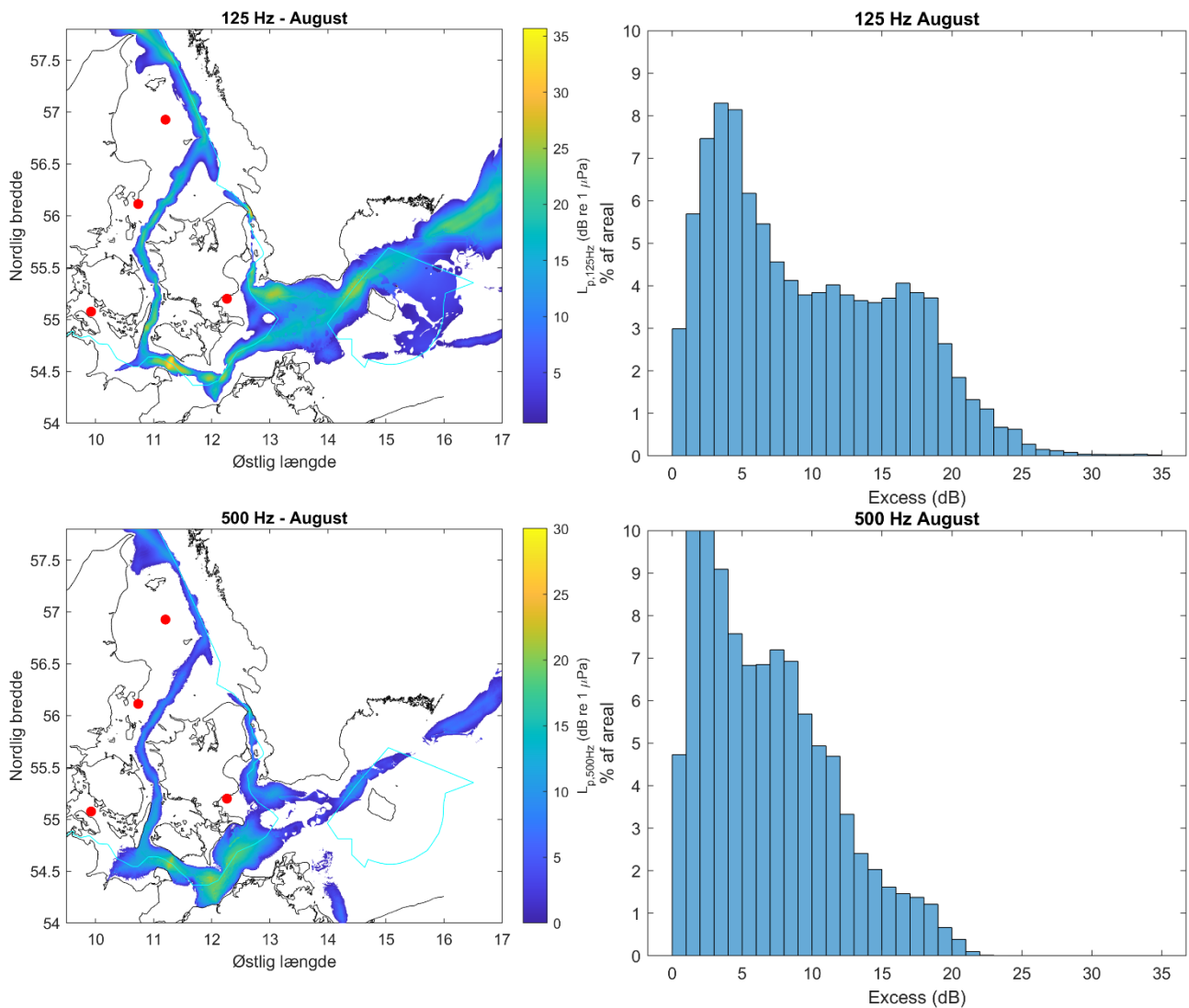
³ Faktoren 10 fremkommer fordi dB-skalaen er logaritmisk og forskellen i dB mellem to lydtryk, p_1 og p_2 , udregnes som $20 \log_{20} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$.

Figur 4.12. Det er tydeligt at variationen er langt større end i Nordsøen, med høje værdier om vinteren og lavere værdier om sommeren. Dette kan



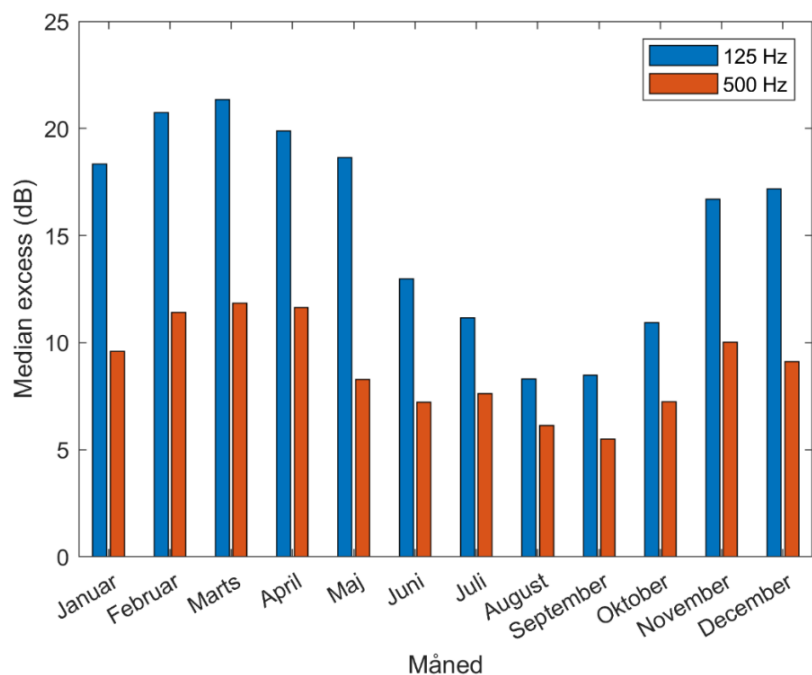
Figur 4.10. BLUES støjmodellen for indre farvande for marts måned 2018 for hhv. 125 Hz og 500Hz decadekader, angivet både som kort over medianniveauet og fordelingen af medianniveauer over den danske del (dansk EEZ).

tilskrives den betydelige variation, der er i de hydrografiske forhold hen over året i indre farvande. Om vinteren og foråret er det typisk at have et koldt og saltholdigt lag i bunden af vandsøjlen, med et overfladelag med lavere saltholdighed og eventuelt også koldere. Begge dele bevirker at lyd hastigheden, der afhænger stærkt af temperatur og salinitet, vil være højest i bundlaget, hvilket giver en såkaldt opad-refrakterende lyd hastighedsprofil, hvor støj fra skibene på overfladen afbøjes (refrakteres) op imod overfladen igen af det tungere vand under springlaget. Herved koncentrerer lyden i laget over springlaget, med meget lange transmissionsafstande til følge. Om sommeren er vandet i overfladen betydeligt varmere end ved bunden, hvilket kan give de modsatte forhold, hvor lyd hastigheden er højest i overfladen, hvorved støjen refrakteres nedad og forsvinder i bunden. Under disse forhold er transmissionsafstandene betydeligt mindre end om vinteren.



Figur 4.11. BLUES støjmodellen for indre farvande for august måned 2018 for hhv. 125 Hz og 500Hz decidekader, angivet både som kort over medianniveauet og fordelingen af medianniveauer over den danske del (dansk EEZ).

Figur 4.12. Skibsstøjens bidrag i forhold til den naturlige baggrundsstøj (excess level), udregnet som median over rum (indre danske farvande) og tid (månedsvis i 2018). Median excess level er angivet for de to frekvensbånd, der blev anvendt i HOLAS 3.



5 Diskussion/konklusion

En egentlig diskussion af resultaterne ligger udenfor dette statusnotat. Der henvises til baggrundsrapporten til basisanalysen (Tougaard et al., 2023b) for den konkrete vurdering af miljøtilstanden.

Der kan dog på baggrund af de indsamlede data og de støjmodeller, der er lavet til vurdering af miljøtilstanden, konkluderes generelt om undervandsstøj i danske farvande:

- Der er betydelige niveauer af menneskeskabt undervandsstøj i de danske farvande, med niveauer der ofte overgår den naturlige baggrundsstøj med en faktor 10 eller mere (svarende til en forøgelse af baggrundsstøjen med 20 dB eller mere)
- Denne forøgelse af baggrundsstøjen er ikke konstant over tid, men svinger op og ned med skibstrafikken.
- Forøgelsen er heller ikke den samme i alle områder. Der er her en betydelig forskel mellem Nordsøen, hvor belastningen er mere jævnt fordelt, og indre farvande, hvor den største forøgelse ses i områderne i og omkring de store sejlruiter gennem Kattegat og Bælterne. Store områder af indre farvande er kun i mindre grad påvirket af skibsstøj.
- Bidraget til støjen er størst ved de lave frekvenser, 20-200 Hz. Dette område er især af betydning for fisk, der bruger lyd i deres kommunikation i dette frekvensområde. Bidraget er mindre ved de højere frekvenser, der især er af betydning for havpattedyr.
- Årstidsvariationen i skibsstøjen i Nordsøen er minimal, hvorimod den er betydelig i indre farvande. I indre farvande varierer støjen betydeligt med de hydrografiske forhold og er mest udbredt i vintermånederne og det tidlige forår.

6 Referencer

Arveson, P.T., Vendittis, D.J., 2000. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *JASA* 107, 118-129.

Basan, F., Fischer, J.G., Putland, R., Brinkkemper, J., de Jong, C.A.F., Binnerts, B., Norro, A., Kühnel, D., Ødegaard, L.A., Andersson, M., Lalander, E., Tougaard, J., Griffiths, E.T., Kosecka, M., Edwards, E., Merchant, N.D., de Jong, K., Robinson, S., Wang, L., Kinneking, N., 2024. The underwater soundscape of the North Sea. *Mar. Poll. Bull.* 198. 10.1016/j.marpolbul.2023.115891.

Betke, K., Folegot, T., Matuchek, R., Pajala, J., Persson, L., Tegowski, J., Tougaard, J., Wahlberg, M., 2015. BIAS standards for signal processing. Aims, processes and recommendations. Amended version, Stockholm,

Dekeling, R.P.A., Tasker, M.L., Van der Graaf, A.J., Ainslie, M.A., Andersson, M.H., André, M., Borsani, J.F., Brensing, K., Castellote, M., Cronin, D., Dalen, J., Folegot, T., Leaper, R., Pajala, J., Redman, P., Robinson, S.P., Sigray, P., Sutton, G., Thomsen, F., Werner, S., Wittekind, D., Young, J.V., 2014. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part II: Monitoring Guidance Specifications, Luxembourg. 10.2788/27158.

EU Kommissionen, 1992. Rådets direktiv 92/43/EØF af 21. maj 1992 om bevaring af naturtyper samt vilde dyr og planter (Habitatdirektivet),

EU Kommissionen, 2008. Europa-parlamentets og Rådets direktiv 2008/56/EF af 17. juni 2008 om fastlæggelse af en ramme for Fællesskabets havmiljøpolitiske foranstaltninger (Havstrategidirektivet),

EU Kommissionen, 2017. Kommissionens afgørelse 2017/848 af 17. maj 2017 om fastlæggelse af kriterier og metodiske standarder for god miljøtilstand i havområder samt specifikationer og standardmetoder for overvågning og vurdering og om ophævelse af afgørelse 2010/477/EU,

Findlay, C.R., Rojano-Donate, L., Tougaard, J., Johnson, M.P., Madsen, P.T., 2023. Small reductions in cargo vessel speed substantially reduce noise impacts to marine mammals. *Sci Adv* 9, eadf2987. 10.1126/sciadv.adf2987.

Folegot, T., Clorennec, D., Chavanne, R., Gallou, R., 2016. Mapping ambient noise for BIAS. Quiet-Oceans technical report QO.20130203.01.RAP.001.01B, Brest, France,

HELCOM, 2018. HELCOM Guidelines for monitoring continuous noise. HELCOM sekretariat, Helsinki, p. 9,

HELCOM, 2023a. Continuous low frequency anthropogenic sound (HELCOM pre-core indicator report), Helsinki,

HELCOM, 2023b. Final summary report: HELCOM biodiversity, litter, underwater noise and effective regional measures for the Baltic Sea. Available at https://blues.helcom.fi/wp-content/uploads/2023/08/HELCOM-BLUES_Final_summary_report.pdf, Helsinki, https://blues.helcom.fi/wp-content/uploads/2023/08/HELCOM-BLUES_Final_summary_report.pdf

- Hodges, R.P., 2010. Underwater acoustics. An analysis, design and performance of sonar. Wiley, Chichester, U.K.,
- Jong, C.d., Binnerts, B., Robinson, S., Wang, L., 2021. Guidelines for modelling ocean ambient noise. Report of the EU INTERREG Joint Monitoring Programme for Ambient Noise North Sea (Jomopans), The Hague, Netherlands,
- Kinneging, N., Tougaard, J., 2021. Assessment North Sea. Report of the EU INTERREG Joint Monitoring Programme for Ambient Noise North Sea (Jomopans). Rijkswaterstaad, The Hague, Netherlands, p. 23,
- MacGillivray, A., 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, 369-10.3390/jmse9040369.
- Merchant, N.D., Fristrup, K.M., Johnson, M.P., Tyack, P.L., Witt, M.J., Blondel, P., Parks, S.E., 2015. Measuring acoustic habitats. *Methods Ecol. Evol.* 6, 257-265. 10.1111/2041-210X.12330.
- Mustonen, M., Klauson, A., Andersson, M., Clorennec, D., Folegot, T., Koza, R., Pajala, J., Persson, L., Tegowski, J., Tougaard, J., Wahlberg, M., Sigray, P., 2019. Spatial and Temporal Variability of Ambient Underwater Sound in the Baltic Sea. *Sci. Rep.* 9, 13237. 10.1038/s41598-019-48891-x.
- Mustonen, M., Klauson, A., Folegot, T., Clorennec, D., 2020. Natural sound estimation in shallow water near shipping lanes. *J Acoust Soc Am* 147, EL177. 10.1121/10.0000749.
- Putland, R.L., de Jong, C.A.F., Binnerts, B., Farcas, A., Merchant, N.D., 2022. Multi-site validation of shipping noise maps using field measurements. *Mar Pollut Bull* 179, 113733. 10.1016/j.marpolbul.2022.113733.
- Ross, D., 1976. *Mechanics of underwater noise*. Pergamon, New York,
- Sigray, P., Borsani, J.F., Le Courtois, F., Andersson, M., Azzellino, A., Castellote, M., Ceyrac, L., Dekeling, R., Haubner, N., Hegarty, M., Hedgeland, D., Juretzek, C., Kinneging, N., Klauson, A., Leaper, R., Liebschner, A., Maglio, A., Mihanović, H., Mueller, A., Novellino, A., Outinen, O., Tougaard, J., Prospathopoulos, A., Weilgart, L., 2021. Assessment Framework for EU Threshold Values for continuous underwater sound. Recommendations from the Technical Group on Underwater Noise (DL3). European Commission, DG Environment, Bruxelles, p. 50,
- TG-Noise, 2022. Setting of EU Threshold Values for continuous underwater sound. Recommendations from the Technical Group on Underwater Noise (DL4),
- Tougaard, J., 2019. Kontinuerlig undervandsstøj. Teknisk anvisning M32. DCE/Aarhus Universitet, Roskilde,
- Tougaard, J., Griffiths, E.T., Ladegaard, M., Findlay, C.R., Cosentino, M., Sveegaard, S., Kyhn, L., Carlström, J., Owen, K., Eriksson, P., 2023a. Effects of rerouting shipping lanes in Kattegat on the underwater soundscape. Report to the Danish Environmental Protection Agency on EMFF project TANGO.

Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 63 pp.
Scientific Report No. 535 <http://dce2.au.dk/pub/SR535.pdf>,
<http://dce2.au.dk/pub/SR535.pdf>

Tougaard, J., Ladegaard, M., Griffiths, E., Marcolin, C., 2023b. Vurdering af tilstanden i de danske havområder for havstrategidirektivets deskriptor 11. Kriterierne D11C1 impulsstøj og D11C2 vedvarende lavfrekvent støj. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 93 s. - Videnskabelig rapport nr. 568, Roskilsw, Denmark,

Ward, J., Wang, L., Robinson, S., Harris, P., 2021. Standard for Data Processing of Measured Data. Report of the EU INTERREG Joint Monitoring Programme for Ambient Noise North Sea (Jomopans). NPL, London,

Wittekind, D.K., 2014. A Simple Model for the Underwater Noise Source Level of Ships. Journal of Ship Production and Design 30, 7-14. 10.5957/jspd.30.1.120052.