



efterklang:

PART OF AFRY

NAJADERNA OFFSHORE AB
UTREDNING AV UNDERVATTENSBULLER –
NAJADERNA VINDKRAFTPARK

D0122774

Projektnummer: D0122774
Revision: 06
Dokumenttyp: Rapport
Datum: 2023-11-28

Kund: Najaderna Offshore AB
Kontaktperson: Måns Larsson

Uppdrags- och
Kvalitetsansvarig: Gunnar Ågren, T: +46 10 505 24 19, gunnar.agren@efterklang.org
Handläggare: Penka Dinkova, T: +46 10 505 63 47, penka.dinkova@efterklang.org

Datum	Rev	Beskrivning	UPPRÄTTAD	QA
2023-07-01	01	Rapport	PAD	GÅN
2023-09-07	02	Rapport	PAD	GÅN
2023-09-20	03	Rapport	PAD	GÅN
2023-10-31	04	Rapport	PAD	GÅN
2023-11-21	05	Rapport	PAD	GÅN
2023-11-28	06	Rapport	PAD	GÅN

Sammanfattning:

Najaderna Offshore AB, ett dotterbolag till Eolus Vind AB, utreder förutsättningarna för en havsbaserad vindkraftpark i södra Bottenhavet i svenskt territorialvatten och svensk ekonomisk zon cirka 17 km utanför Tierps kommun, Uppsala län. Vindkraftparken är kallad Najaderna vindkraftpark och projektområdet utgör en yta av ca 350 km². Inom detta område planeras för maximalt 67 vindkraftverk med en total effekt av ca 1000 MW. På uppdrag av Najaderna Offshore AB har Efterklang utfört en utredning av förväntade nivåer av undervattensbuller vid anläggningsfasen och driftsfasen av vindkraftparken.

Under anläggningsfasen bedöms pålning vara den klart dominerande bullerkällan. Därför har utredningen av bullerspridningen under anläggningsfasen fokuserat på buller från pålning. Utredda fundamenttyper där pålning kan vara aktuellt är monopilefundament och fackverksfundament. Beräknade bullernivåer jämförs mot bedömningsgrunder från den danska Energistyrelsen, Vindval, det amerikanska vetenskapliga organet National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) och Standardkommittén S3/SC1. Urvalet av bedömningsgrunder har gjorts med utgångspunkt att använda de mest nyligen uppdaterade bedömningsgrunderna och att använda vid liknande utredningar vanligen förekommande bedömningsgrunder. Beräkningarna av bullerspridningen är utförda i en platsspecifik beräkningsmodell upprättad i beräkningsprogrammet dBSea 2.3. Beräkningarna tar hänsyn till batymetrin, typ av botten, hastighetsprofil, salinitet mm. Då skillnaden i hastighetsprofil är som störst mellan tidig vår och slutet av sommaren har beräkningarna av undervattensbuller utförts för ett vår- och ett sommarscenario, där vårscenariot utgör ett ur bullerspridningssynpunkt värsta fall.

Beräkningarna visar att det föreligger ett ljuddämpningsbehov av pålningen för att inte överskrida de av den danska Energistyrelsen angivna tröskelvärdena för ljudexponering under 24 timmar. Beräkningsmässigt är den uppmätta ljuddämpningen från kombinationen av teknikerna Hydro Sound Damper (HSD) och Double Big Bubble Curtain (DBBC) tillräcklig för att bullret från pålningen inte ska överskrida tröskelvärdena angivna för permanent hörselskada (PTS) hos säl. För tröskelvärdet för tillfällig hörselskada (TTS) hos säl beräknas som mest ett överskridande av 1 dB. Överskridandet gäller pålning av monopilefundament i den östra och västra pålningspositionen under både vår- och sommarscenariot. Överskridandet är litet och gäller för en tänkt mottagare som vid pålningsstart börjar avlägsna sig bort från en position 200 m från pålningen. Beräkningsmässigt är ett avstånd av 700 m vid pålnings (och avlägsnandets) start tillräckligt för att tröskelvärdet för TTS hos säl inte ska överskridas.

Avseende momentana bullertoppar skulle den uppmätta ljuddämpningen från HSD+DBBC medföra att TTS hos säl skulle riskeras vid som mest ett avstånd om ca 50 m vid pålning av monopilefundament och ett fåtal meter från pålning av fackverksfundament. Gällande påverkan på fisk beräknas mortalitet och skada kunna uppstå vid som mest 400 m från pålning av monopilefundament och ca 50 m från pålning av fackverksfundament.

Vid vissa delar av Najaderna vindkraftparks område är bottendjupen något större än de bottendjup där bullerreduktionen av HSD och DBBC uppmättes. Andra metoder för att minska beräknade exponeringsnivåer är exempelvis förlängd upprampningssekvens eller minimerad slagenergi vid påslagen.

Gällande skillnader i beräknade ljudnivåer mellan vår- och sommarscenarierna beräknas dessa till mindre än 1 dB, där alltså vinterscenariot är det mest bullrande.

Driften av en havsbaserad vindkraftpark genererar betydligt lägre nivåer av undervattensbuller än anläggningsfasen. För att tröskelvärdena för TTS beräkningsmässigt ska överskridas skulle en stationär mottagare under 24 timmar behöva befinna sig inom ett fåtal meter från vindkraftverken, vilket bedöms vara helt osannolikt. Inom Najadernas projektområde beräknas det kontinuerliga driftsbullret, filtrerat med vägningsfiltret för sälars hörsel (filter kallat PCW, Phocid Carnivores in Water), att variera från ca 100 dB SPL_{PCW} (Sound Pressure Level) vid områdesgräns till ca 139 dB SPL_{PCW} invid varje vindkraftverk. Sett till exponering över 24 timmar i stationära punkter motsvarar det ett spann mellan ca 150 dB till 188 dB för SEL_{24h,PCW} (Sound Exposure Level) inom Najadernas projektområde.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING:

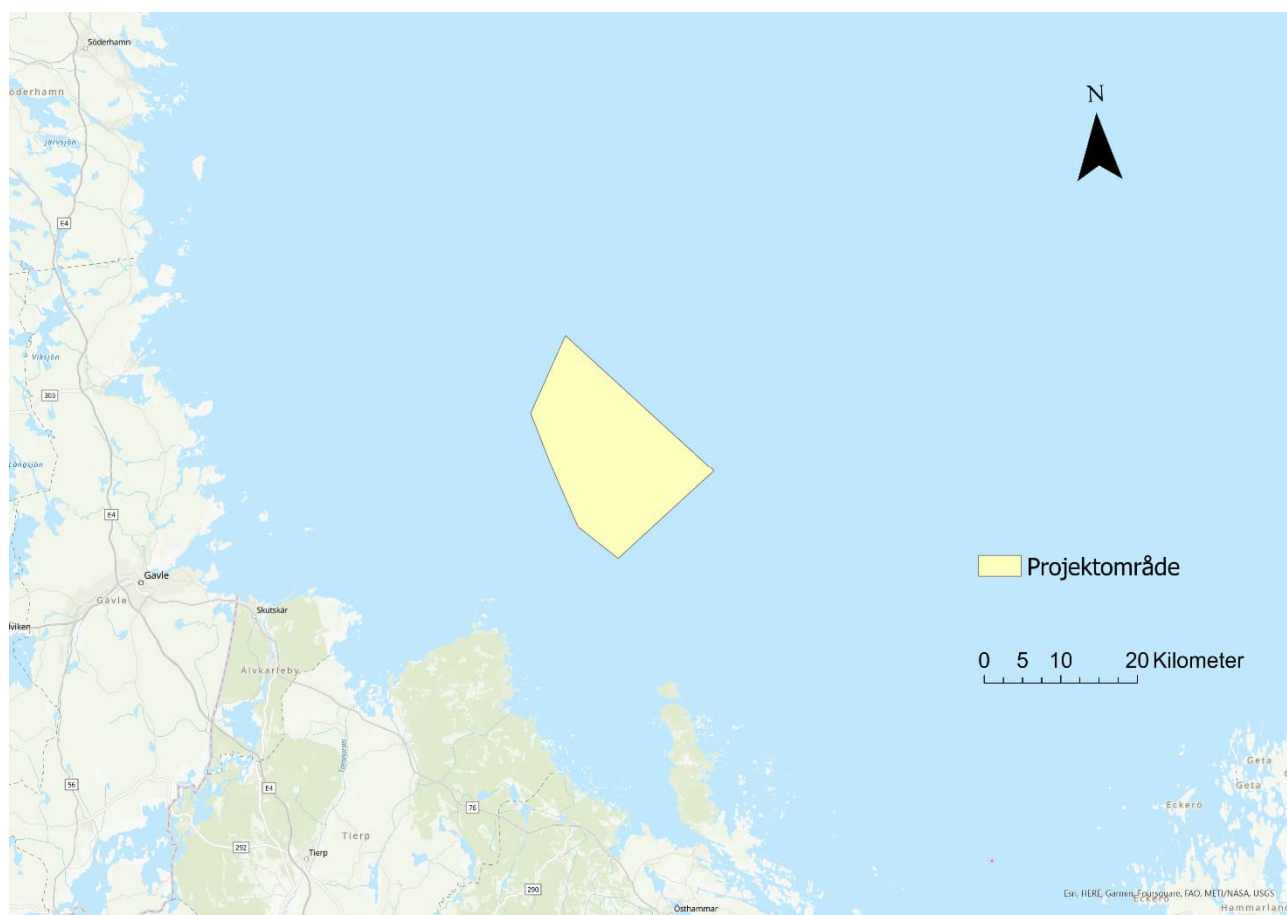
1	INLEDNING:	5
2	LJUD UNDER VATTEN:	5
2.1	AKUSTISKA BEGREPP – UNDERVATTENSBULLER:	5
2.2	HÖRSELN HOS MARINA DÄGGDJUR OCH FISK:	6
2.3	VÄGNINGSFILTER:	8
3	BEDÖMNINGSGRUNDER:	8
3.1	DANSKA ENERGISTYRELSENS VÄGLEDNING:	8
3.2	VINDVALS FÖRSLAG TILL SKADLIGA LJUDNIVÅER VID PÅLNINGSBULLER:	9
3.3	NOAA:S VÄGLEDNING:	9
3.4	ANSI-ACKREDITERAD STANDARDKOMMITTÉ S3/SC1:	10
3.5	SAMMANFATTNING BEDÖMNINGSGRUNDER:	10
4	BERÄKNINGAR:	11
4.1	ALLMÄNT OM UTFÖRDA BERÄKNINGAR:	11
4.2	PÅLNINGSVERKSAMHET – BESKRIVNING AV BULLERKÄLLAN:	11
4.3	UNDERVATTENSBULLER UNDER DRIFT:	14
4.4	DRIFTFAS – BESKRIVNING AV BULLERKÄLLAN:	14
4.5	DRIFTFAS – BERÄKNINGSPUNKTER:	16
4.6	BERÄKNINGSMETOD:	17
4.7	HAVSBOTTEN:	18
4.8	HASTIGHETSPROFIL:	18
4.9	BERÄKNINGSFALL:	18
5	BERÄKNINGSRESULTAT:	19
5.1	LJUDEXPONERINGSNIVÅER:	19
5.2	MOMENTANA LJUDNIVÅER:	20
5.3	BULLER UNDER DRIFTFAS:	21
6	BULLERDÄMPANDE ÅTGÄRDER VID PÅLNING:	22
7	BERÄKNINGSRESULTAT BULLERDÄMPAD PÅLNING:	24
7.1	LJUDEXPONERINGSNIVÅER:	24
7.2	MOMENTANA LJUDNIVÅER:	25
7.3	BERÄKNADE AVSTÅND TILL TTS HOS STRÖMMING:	26
8	KOMMENTAR KRING BULLERDÄMPANDE ÅTGÄRDER:	26
9	SLUTSATS:	27
10	REFERENSER:	28

BILAGA 1–4	AVSTÅND TILL TANGERING AV TRÖSKELVÄRDET FÖR TTS HOS STRÖMMING VID BULLERDÄMPAD PÅLNING AV MONOPILEFUNDAMENT	
------------	---	--

1 INLEDNING:

Najaderna Offshore AB, ett dotterbolag till Eolus Vind AB, utreder förutsättningarna för en havsbaserad vindkraftpark i södra Bottenhavet i svenskt territorialvatten och svensk ekonomisk zon cirka 17 km utanför Tierps kommun, Uppsala län. Vindkraftparken är kallad Najaderna vindkraftpark och projektområdet utgör en yta av ca 350 km². Inom detta område planeras för maximalt 67 vindkraftverk med en total installerad effekt av ca 1000 MW. I Figur 1 ses en översikt av projektområdet.

På uppdrag av Najaderna Offshore AB har Efterklang utfört en utredning av förväntade nivåer av undervattensbuller vid anläggningsfasen och driftsfasen av Najaderna vindkraftpark. Buller alstrat under avvecklingsfasen av vindkraftparken förväntas ge upphov till mindre påverkan än bulleralstringen under anläggningsfasen. Vidare blir avvecklingsfasen av vindkraftparken aktuell först flera decennier framåt i tiden. Vilka metoder för avveckling som kan komma att tillämpas då är svårt att uttala sig om i dagsläget. Buller under avvecklingsfasen tas därför inte upp vidare i denna utredning.



Figur 1: Översiktskarta av Najaderna vindkraftpark (markerad i gult). Bakgrundskartan från Esri (Esri, HERE, Garmin, USGS, NGA).

2 LJUD UNDER VATTEN:

I de bedömningsgrunder som varit utgångspunkt i denna utredning används olika mått på ljudnivå och deras inverkan på vattenlevande djur. Under rubrikerna nedan sammanfattas och definieras några centrala begrepp.

2.1 AKUSTISKA BEGREPP – UNDERVATTENSBULLER:

För ljud i luft anges vanligtvis ljudtrycksnivån i dBA relativt 20 µPa medan ljudtrycksnivån i vatten vanligtvis anges i dB relativt 1 µPa. Vid redovisning av ljudnivåer i luft används vanligen ett så kallat A-vägningsfilter för att återspegla

människans uppfattning om ljud. Vid redovisning av ljudnivåer i vatten används både linjära ljudnivåer (utan vägningsfilter) samt ljudnivåer vägda med artspecifika vägningsfilter. Detta innebär att ljudnivåerna i luft och vatten inte enkelt går att jämföra med varandra, dels på grund av olika referensnivåer, dels på grund av vägningsfilter.

Ljudtrycksnivån kan anges med olika mått beroende på hur tryckvariationerna har medelvärdesbildats. Riktvärden för undervattensbuller anges normalt utifrån följande mått:

- $SPL_{(topp)}$ – (Sound Pressure Level). Det maximala absoluta värdet för övertrycket eller undertrycket. Nivån anges i dB relativt $1 \mu Pa$.
- SEL – (Sound Exposure Level) Ljudexponeringsnivå. Nivån beräknas från den totala ljudenergin under en viss tid. Ljudexponering under 24 timmar betecknas SEL_{24h} . Nivån anges i dB relativt $1 \mu Pa^2s$. SEL är den enhet som visats vara bäst relaterad till hörselskador. [1]
- $SEL_{(enkel)}$ – Denna beteckning används för att ange ljudexponeringsnivån över en ljudtopp (exempelvis ett påslag).

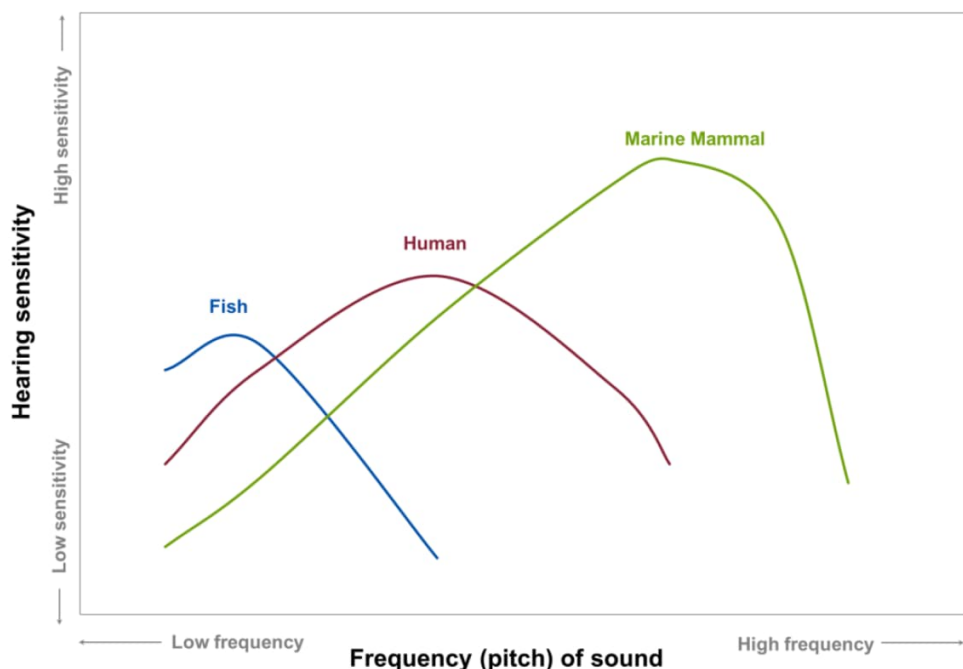
Den fysiologiska påverkan på vattenlevande djur delas vanligen upp i två undergrupper:

- TTS (Temporary Threshold Shift) – Tillfällig hörselskada
- PTS (Permanent Threshold Shift) – Permanent hörselskada

Som framgår av termerna är TTS övergående medan PTS inte är det. TTS kan dock övergå till PTS. Risken för att detta sker ökar med ökande ljudtrycks- och ljudexponeringsnivåer, exponeringens varaktighet, samt hur många gånger exponeringen upprepas. [2]

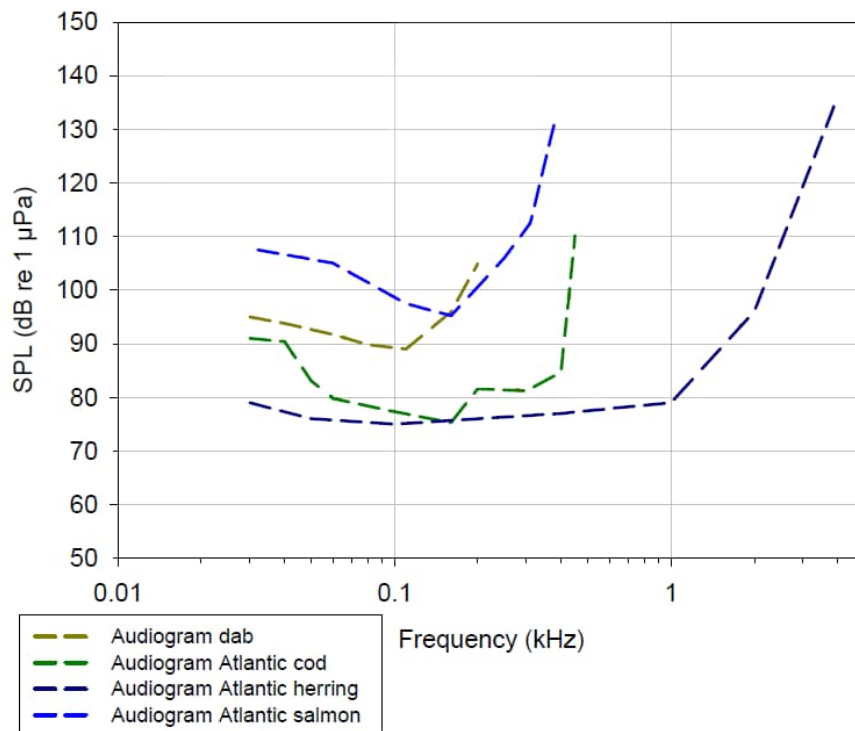
2.2 HÖRSELN HOS MARINA DÄGGDJUR OCH FISK:

Vid bedömning av miljöpåverkan från undervattensbuller är det viktigt att bullerkällans frekvensinnehåll tas i beaktande. I Figur 2 redovisas en schematisk bild över ljudkänslighet hos vattenlevande djur. Figur 2 visar att fiskar generellt är mer känsliga för buller i det lägre frekvensområdet medan marina däggdjur generellt är mer känsliga i det högre frekvensområdet. [3]

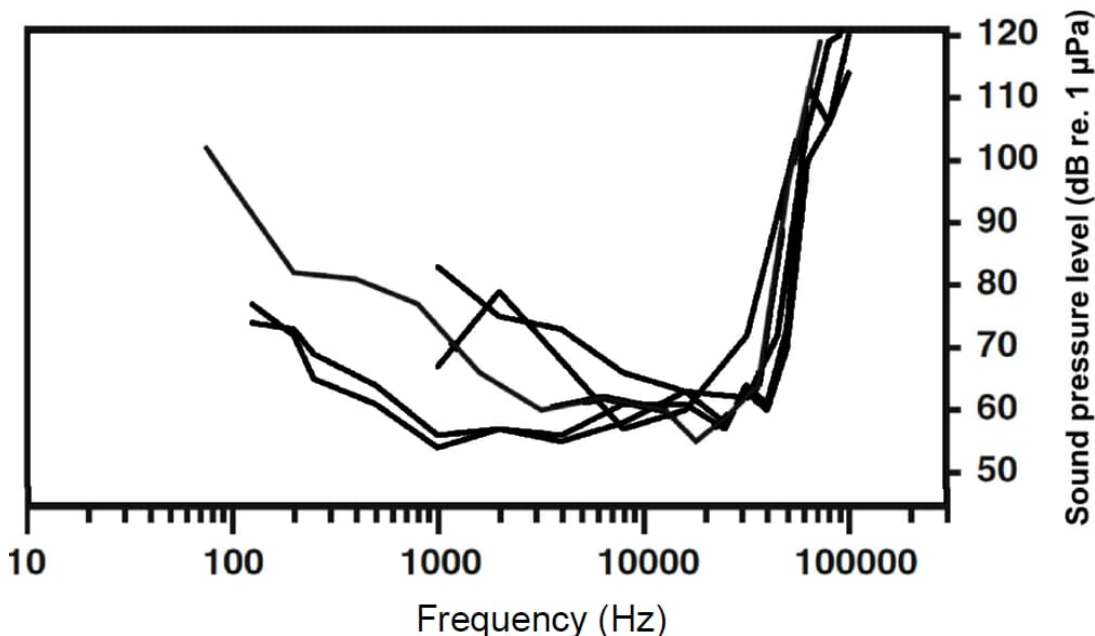


Figur 2: Schematisk bild över hörselns känslighet. Figuren är hämtad från [3].

Känsligheten hos fiskar och marina däggdjurs hörsel är också starkt artberoende. Exempelvis är fiskar med simblåsa mer känsliga för höga ljudtryck än fiskar utan simblåsa [1]. I Figur 3 presenteras kurvor för hörtröskeln hos några vanliga fiskarter. Hörtröskeln anger lägsta uppfattbara ljudtrycksnivå vid respektive frekvens. I Figur 4 redovisas motsvarande kurva för knubbsäl. I brist på data över hörtröskel för gråsäl antas likvärdig hörtröskel som för knubbsäl, likt i [5].



Figur 3: Hörtröskel för sandskädda (dab) och atlantisk torsk (cod), sill (herring) och lax (salmon). Figuren motsvarar graf i [4].



Figur 4: Vid olika studier uppmätt hörtröskel för knubbsäl. Figuren motsvarar graf i [5].

2.3 VÄGNINGSFILTER:

Vissa av de tröskelvärden som har använts i denna utredning för bedömning av påverkan på vattenlevande djur avser bullernivåer som har filterats med vägningsfilter. För att ta hänsyn till olika arters känslighet för buller inom olika frekvensområden har vägningsfilter tagits fram för olika grupper av vattenlevande däggdjur. Vägningsfiltret $W(f)$ är konstruerat med ekvationen nedan. Beroende på val av konstanterna a , b , c , f_1 och f_2 justeras filtret till olika grupper av vattenlevande djur. I Tabell 1 redovisas konstanternas värden för anpassning till säl.

$$W(f) = c + 10 \log_{10} \left(\frac{(f/f_1)^{2a}}{(1 + (f/f_2))^a (1 + (f/f_2))^b} \right) \text{ dB}$$

Tabell 1: Konstanter för anpassning av vägningsfiltret $W(f)$ till PCW, *Phocid Carnivores in Water* (används för säl).

Vägningsfilter	a	b	c	f_1	f_2
PCW	1	2	0,75 dB	1,9 kHz	30 kHz

Vägningsfiltrets beteckning PCW är hämtad från *Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects* [6] och är den beteckning som används i den danska Energistyrelsens vägledning [7] (se avsnitt 3.1).

De i denna rapport använda bedömningsgrunderna för påverkan på fisk avser linjär ljudnivå utan tillämpning av vägningsfilter.

3 BEDÖMNINGSGRUNDER:

I Sverige saknas i dagsläget begränsnings- eller riktvärden som anger vilka nivåer av undervattensbuller som kan tillåtas för bullrande aktiviteter och som inte får överskridas [1]. För att kunna relatera de i denna utredning beräknade nivåerna av undervattensbuller till påverkan på vattenlevande djur har ett urval av bedömningsgrunder gjorts. Urvalet har gjorts med utgångspunkt i att använda de mest nyligen uppdaterade bedömningsgrunderna och att använda vanligen förekommande bedömningsgrunder vid liknande utredningar. Urvalet har också gjorts med avsikt att möjliggöra bedömning av påverkan på de olika arter av vattenlevande djur som kan förekomma i området kring vindkraftparken Najaderna. Valet av bedömningsgrunder har också gjorts i syfte att kunna beskriva både påverkan av enskilda ljudtoppar samt påverkan på grund av bullerexponering över ett helt dygn. Nedan presenteras de riktvärden och vägledningar som legat till grund för bedömningen i denna utredning.

3.1 DANSKA ENERGISTYRELSENS VÄGLEDNING:

Den danska Energistyrelsen utkom i maj 2022 med vägledningen *Guideline for underwater noise – Installation of impact or vibratory driven piles* [7]. I vägledningen anges tröskelvärden för när PTS och TTS kan uppkomma hos olika grupper av vattenlevande däggdjur. I vägledningen görs en uppdelning med olika tröskelvärden beroende på ljudets karaktär. Uppdelningen gäller impulsartat buller ("I-type sounds") och övrigt buller ("other sounds"). Tröskelvärdena gällande övrigt buller är generellt något högre. I Tabell 2 presenteras de tröskelvärden som anges för gråsäl avseende buller av impulskaraktär. I Tabell 3 presenteras de tröskelvärden som anges för gråsäl avseende övrigt buller. I denna utredning används värdena i Tabell 3 för bedömning av det kontinuerliga bullret under driftsfasen.

Tabell 2: Tröskelvärden angivna av den danska Energistyrelsen. Tröskelvärdena för PTS och TTS är frekvensvägda utifrån djurtyp och avser buller med impulskaraktär ("I-type sounds"). [7]

Djurtyp	Vägningsfilter	Ljudexponeringsnivå SEL _{24h} dB rel. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	
		PTS	TTS
Gråsäl	PCW	185	170

Tabell 3: Tröskelvärden angivna av den danska Energistyrelsen. Tröskelvärdena för PTS och TTS är frekvensvägda utifrån djurtyp och avser buller benämnt "other sounds". [7]

Djurtyp	Vägningsfilter	Ljudexponeringsnivå SEL _{24h} dB rel. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$	
		PTS	TTS
Gråsäl	PCW	201	181

3.2 VINDVALS FÖRSLAG TILL SKADLIGA LJUDNIVÅER VID PÅLNINGSBULLER:

I Vindvals rapport 6723 *Underlag för reglering av undervattensljud vid pålning* [1] ges förslag på ljudnivåer vilka är ämnade att ligga till grund för framtagande av begränsningsvärden för reglering av undervattensbuller. I Tabell 4 sammanfattas de i rapport 6723 angivna ljudnivåerna för SPL_(topp) och SEL_(enkel) för mortalitet och skador på inre organ hos fisk, ägg och larver.

Tabell 4: I Vindvals rapport 6723 angivna ljudnivåer för SPL_(topp) och SEL_(enkel) för mortalitet och skador på inre organ hos fisk, ägg och larver. [1]

Djurtyp	Mortalitet och skador på inre organ	
	Ljudtrycksnivå SPL _(topp) dB rel. 1 μPa (utan vägningsfilter)	Ljudexponeringsnivå SEL _(enkel) dB rel. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (utan vägningsfilter)
Fisk	207	174
Ägg och larver	217	187

Rapport 6723 [1] föreslår inga ljudnivåer för undervattensbuller när det gäller flyktbeteende eller tillfällig hörselskada (temporary threshold shift, TTS) hos fisk. I rapporten anges följande:

"I dagsläget föreslås inga ljudnivåer för flyktbeteende eller en tillfällig hörselskada (Temporary Threshold Shift, TTS) hos fisk. Anledningen är att till skillnad från fysiologiska skador på inre organ är både flyktbeteende och hörselskada kopplad till artens specifika känslighet för frekvens och ljudets intensitet. Det går dessutom inte utifrån befintlig litteratur bedöma om ett flyktbeteende påverkar arten negativt på populationsnivå eller om effekten av påverkan är relaterad till område och tidsperiod."

3.3 NOAA:S VÄGLEDNING:

De av den danska Energistyrelsen redovisade tröskelvärden för PTS och TTS är i linje med tröskelvärden redovisade av det amerikanska vetenskapliga organet NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). I NOAA:s rapport *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0)* [8] redovisas också tröskelvärden för SPL_(topp) (utan vägningsfilter) för uppkomst av PTS och TTS hos säl. Dessa tröskelvärden redovisas i Tabell 5.

Tabell 5: Av NOAA angivna tröskelvärden för $SPL_{(topp)}$ gällande PTS och TTS hos säl. [8]

Djurtyp	Ljudtrycksnivå $SPL_{(topp)}$ dB rel. 1 μ Pa (utan vägningsfilter)	
	PTS	TTS
Säl	218	212

3.4 ANSI-ACKREDITERAD STANDARDKOMMITTÉ S3/SC1:

Standardkommittén S3/SC1 har tagit fram rapporten *Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*. [9] Rapporten utgör vägledning för bedömning av olika typer av buller, exempelvis buller från pålning, explosioner samt fartyg. För buller från pålning anges att för fiskar där simblåsan är involverad i hörandet riskeras TTS vid en kumulativ ljudexponeringsnivå $SEL_{(kum)}$ 186 dB relativt 1 μPa^2s . Fiskar utan simblåsa är generellt mindre känsliga för höga ljudtryck [1].

Det specificeras inte vilken tidsram som avses för den kumulativa ljudexponeringen eller hur många påslag som avses. I denna utredning har tidsramen antagits vara 24 timmar för att täcka in hela pålningsförloppet och linjera med den danska Energistyrelsens väglednings tröskelvärden för kumulativa ljudexponeringsnivåer för buller med impulskaraktär (Tabell 2). I denna utredning har nivån SEL_{24h} 186 dB relativt 1 μPa^2s använts för att relatera beräkningsresultaten till påverkan på strömming.

3.5 SAMMANFATTNING BEDÖMNINGSGRUNDER:

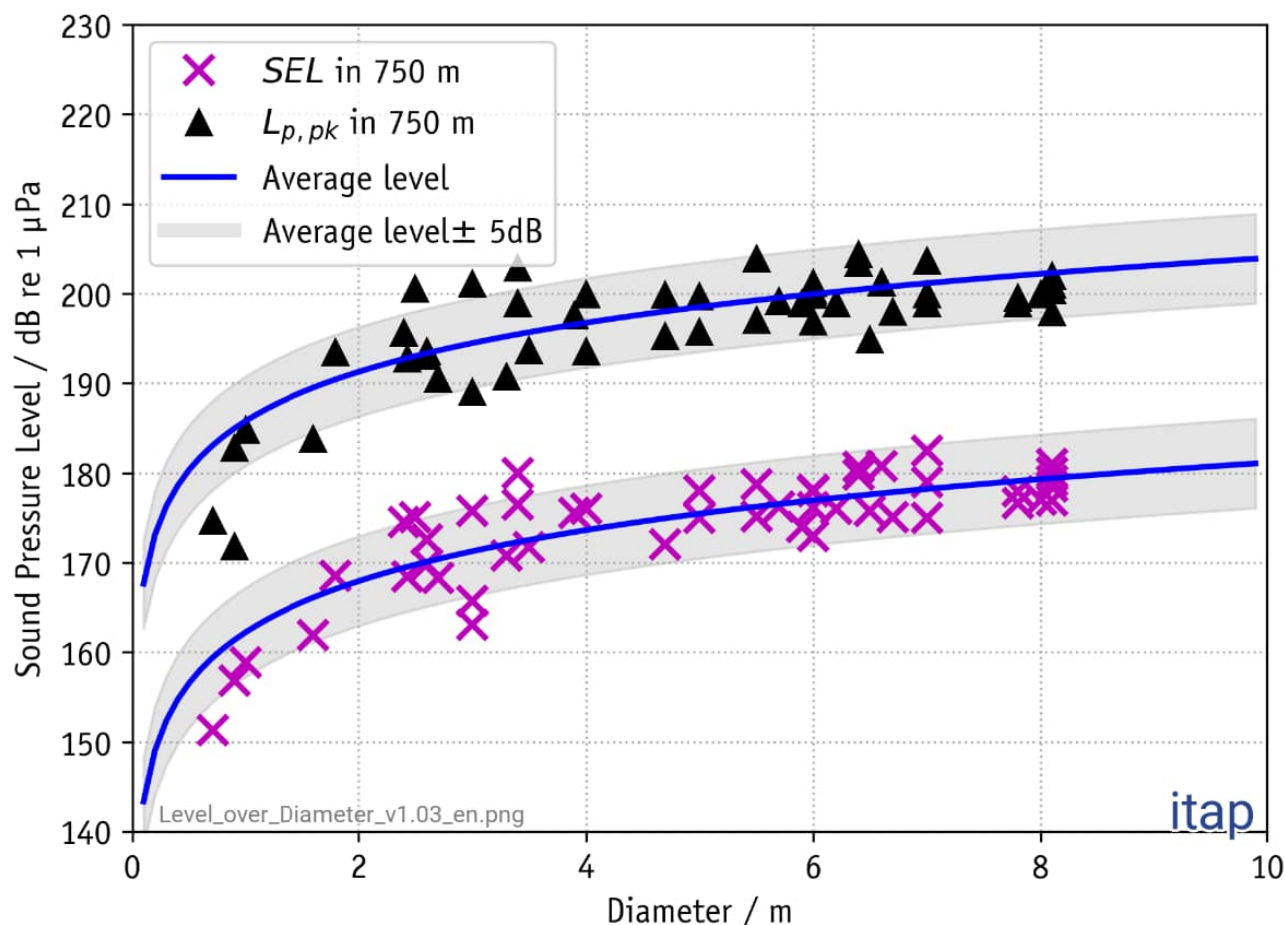
I Tabell 6 sammanfattas de tröskelvärden som beskrivits i avsnitten 3.1–3.4 och som beräkningsresultaten jämförs mot när det gäller pålning. Beräkningsresultat för undervattensbuller under driftfasen jämförs mot de av den danska Energistyrelsen angivna tröskelvärdena för "other sounds" (se Tabell 3).

Tabell 6: Sammanfattning av de tröskelvärden som nivåerna av undervattensbuller från pålning jämförs mot. Tröskelvärdena för SEL gäller dB relativt 1 μPa^2s , tröskelvärdena för SPL gäller dB relativt 1 μPa .

Djurtyp	Påverkan	Mått	Tröskelvärde, dB	Källa
Säl	PTS	$SEL_{24h,PCW}$	185	Danska Energistyrelsens vägledning
		$SPL_{(topp)}$	218	NOAA:s vägledning
	TTS	$SEL_{24h,PCW}$	170	Danska Energistyrelsens vägledning
		$SPL_{(topp)}$	212	NOAA:s vägledning
Fisk	Mortalitet och skador på inre organ	$SPL_{(topp)}$	207	Vindval rapport 6723
		$SEL_{(enkel)}$	174	Vindval rapport 6723
Ägg och larver	Mortalitet och skador på inre organ	$SPL_{(topp)}$	217	Vindval rapport 6723
		$SEL_{(enkel)}$	187	Vindval rapport 6723
Strömming	TTS	SEL_{24h}^*	186	Standardkommitté S3/SC1

*I [9] specificeras inte vilken tidsram som avses för den kumulativa ljudexponeringen. I denna utredning har tidsramen antagits vara 24 timmar för att täcka in hela pålningsförloppet och linjera med den danska Energistyrelsens väglednings tröskelvärden för kumulativa ljudexponeringsnivåer för buller med impulskaraktär.

Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values [10] använts. Studien är baserad på ett stort antal ljudmätningar av pålningsarbeten. I studien presenteras en sammanfattande graf över hur ljudnivån förändras med avseende på påldiameter (Figur 7). Ljudnivåerna i Figur 7 har normaliserats till avståndet 750 m från pålningen. För att beräkna källstyrkan har en förenklad ljudutbredningsmodell använts där ljudnivån antas avta med 4,5 dB per avståndsfördubbling [11]. Detta medför en skillnad av 43 dB mellan ljudnivån vid 750 m och ljudnivån vid 1 m från bullerkällan. De största påldiametererna som redovisas i Figur 7 är 8 m. I Najaderna vindkraftpark planeras för användande av påldiameter upp till 15 m för fundamenten av typ monopile och 3,5 m för fackverksfundamenten. Mätningarna redovisade i Figur 6 visar på en ungefärlig ökning av 6 dB per fördubbling av påldiameteren.



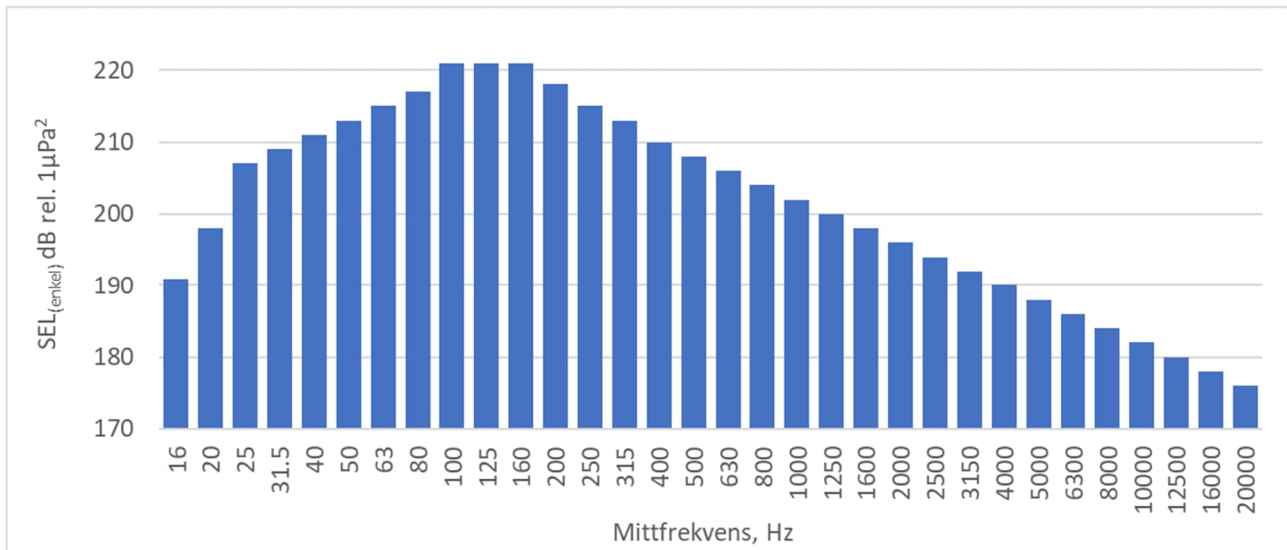
Figur 6: Nivåer av undervattensbuller vid pålning med olika påldiameterar. Nivåerna är normaliserade till avståndet 750 m från pålningen. SEL i figuren avser $SEL_{(enkel)}$, $L_{p,pk}$ är samma mått som i denna rapport benämns $SPL_{(topp)}$. Figuren är hämtad från [10].

I Tabell 7 sammanfattas de i beräkningarna använda källstyrkorna. Källstyrkorna är beräknade från de avlästa medelvärdena i Figur 7 (de blå linjerna) och ovan angivna samband.

Tabell 7: I beräkningarna använda källstyrkor.

Mått	Källstyrka pålning monopilefundament (diameter 15 m)	Källstyrka pålning fackverksfundament (diameter 3,5 m)
$SEL_{(enkel)}$	228 dB rel. 1 μPa^2s	216 dB rel. 1 μPa^2s
$SPL_{(topp)}$	250 dB rel. 1 μPa	238 dB rel. 1 μPa

I mätunderlaget i [10] redovisas utöver totala ljudnivåer (Figur 6) också ljudnivåer i tersband för det uppmätta undervattensbullret från pålningarna. Medelvärde av de i [10] redovisade tersbandsnivåerna har använts som underlag i denna utredning. Tersbandsnivåerna har sedan anpassats till aktuella källstyrkor. I Figur 7 visas tersbandsnivåer anpassade till källstyrkan $SEL_{(enkel)}$ 228 dB.



Figur 7: Tersbandsnivåer för undervattensbuller vid pålning. Nivåerna har anpassats till källstyrkan $SEL_{(enkel)}$ 228 dB. Det relativa tersbandsnivåerna är hämtat från [10].

Pålningens arbeten utförs normalt med en så kallad upprampningssekvens där styrkan i påslagen successivt ökar till full källstyrka. Detta för att djur som befinner sig i närområdet kring pålningen ska ha möjlighet att avlägsna sig till större avstånd innan påslagen nått full källstyrka. De i Tabell 7 angivna källstyrkorna avser bulleralstringen vid full källstyrka, det vill säga efter att upprampningssekvensen utförts.

I [5] ges ett exempel på en generisk upprampningssekvens som pågår i 30 minuter och därefter sker pålning med full källstyrka i 5 timmar och 30 minuter. I beräkningarna för Najaderna vindkraftpark har förloppet med full källstyrka förlängts till 11 timmar och 30 minuter för att erhålla en total pålningstid av 12 timmar per dygn (Tabell 8).

I [5] föreslås antagandet att utstrålat buller är direkt proportionellt mot andelen slagenergi. Halverad slagenergi ger alltså upphov till en halvering av utstrålat buller, det vill säga en minskning med 3 dB.

Tabell 8: I beräkningarna använt pålningsförlopp med upprampningssekvens. Total tid för hela förloppet är 12 timmar.

Andel av total slagenergi	Antal slag	Antal slag per minut
10 %	150	15
20 %	75	15
40 %	75	15
60 %	75	15
80 %	75	15
100 %	20 700	30

4.3 UNDERVATTENSBULLER UNDER DRIFT:

I maj 2022 utkom forskningsprogrammet Vindval, med rapporten *Effekter av havsbaserad vindkraft på marint liv - En syntesrapport om kunskapsläget 2021* [12]. I rapporten anges bland annat att:

"Ljud från vindkraftverk är inte kraftiga nog till att ge temporära eller permanenta hörselskador på marina däggdjur ens om djuren uppehåller sig på mycket nära håll under lång tid.

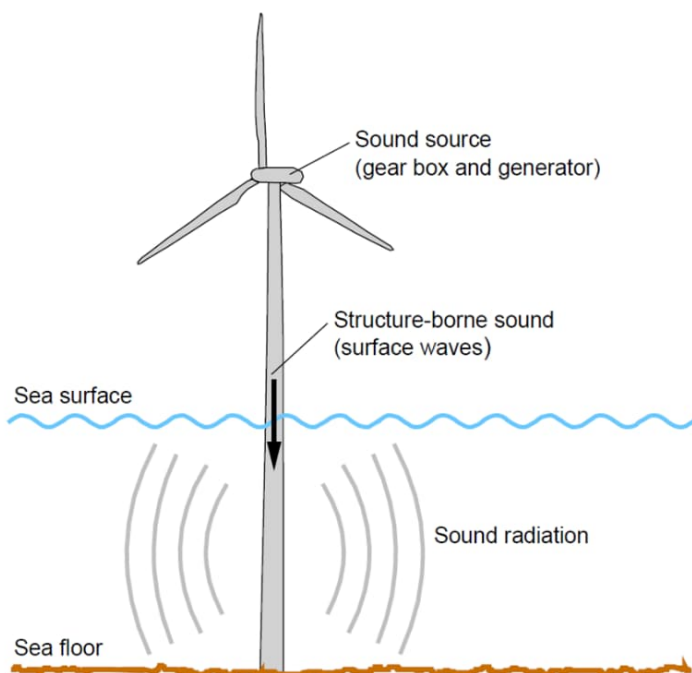
De undervattensljud som genereras vid driftsfasen verkar inte skrämra vare sig sälar eller tumlare, även när dessa uppehåller sig nära fundamenten"

Vidare anges att:

"Ljudnivåerna varierar med belastningen, det vill säga vindhastigheten, men ligger avsevärt under de som avges under anläggningsfasen och seismiska undersökningar, och också under de nivåer som större fartyg normalt genererar"

I förhållande till anläggningsfasen av vindkraftverk förväntas således driftsfasen att ge upphov till betydligt lägre bulleralstring.

Buller från drift av vindkraftverken alstras på två olika sätt, dels vid vattenytan genom tryckfluktuationer som uppstår vid rotorbladens passage, dels via vibrationer genom torn och fundament. Det är främst vibrationer alstrade i vindkraftverkets torn som påverkar undervattensljudet. Vibrationerna från tornet kommer från växellådans kuggingrepp och generatoren. Detta ljud består främst av toner under 1000 Hz. Det luftburna ljudet från rotorerna reflekteras i stor utsträckning i vattenytan och har därmed mindre betydelse för undervattensbullret [13]. I Figur 8 ses en schematisk bild över hur vibrationerna fortplantar sig i tornet och strålar ut som undervattensbuller.

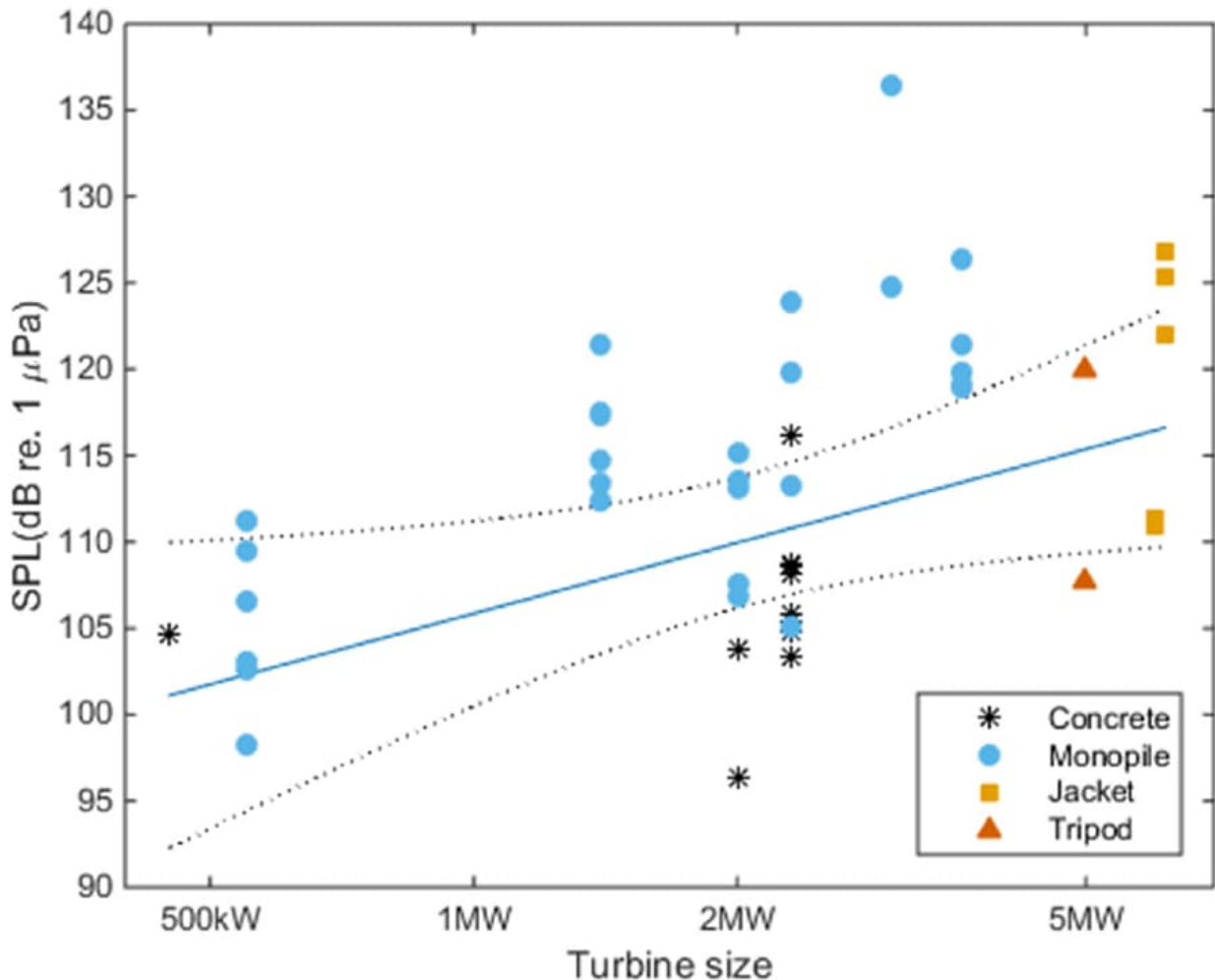


Figur 8: Principskiss över utstrålningen av undervattensbuller från ett vindkraftverk. Figuren är hämtad från [14].

4.4 DRIFTFAS – BESKRIVNING AV BULLERKÄLLAN:

Undervattensbuller från driften av vindkraftverken varierar beroende av vindkraftverkens storlek och de rådande vindförhållandena. I [15] redovisas en sammanställning av en mängd mätningar av undervattensbuller från vindkraftverk. De uppmätta vindkraftverkens effekter varierar mellan 0,2 MW och 6,15 MW. Utifrån uppmätta

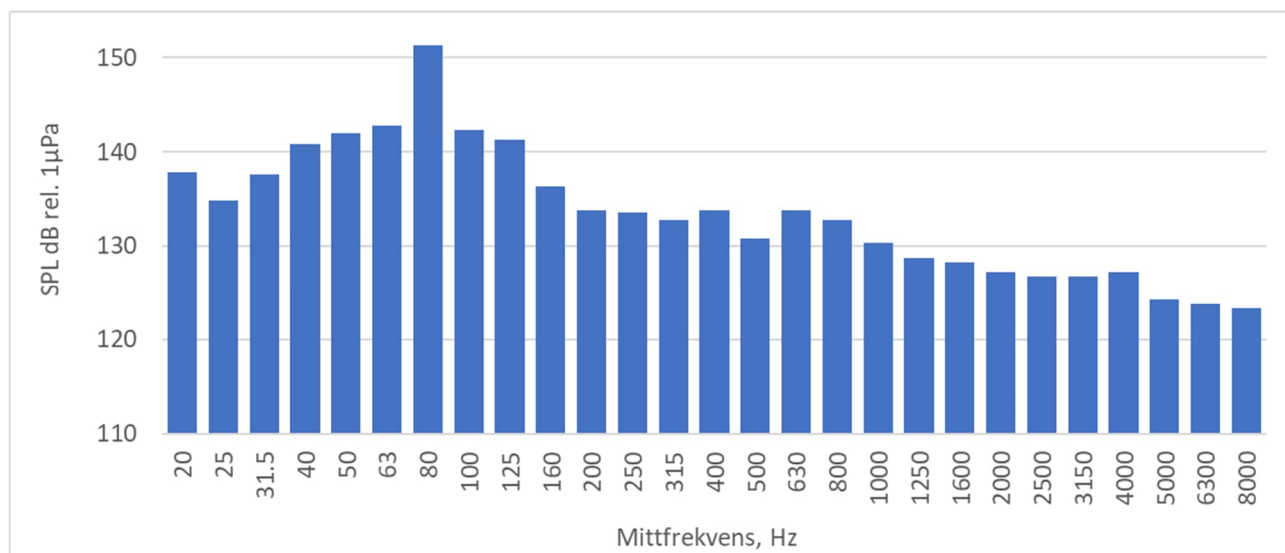
Ljudnivåer konstateras i [15] att det finns ett signifikant samband mellan vindkraftverkens effekt och utstrålat buller men spridningen i resultatet är stort. I Figur 9 presenteras en sammanställning av mätunderlaget normaliserat till avståndet 100 m och vindhastigheten 10 m/s. Vindkraftverk med fundamenttyperna monopile-, tripod-, fackverks- (Jacket) och gravitationsfundament (Concrete) är representerade i mätunderlaget.



Figur 9: Uppmätta nivåer av undervattensbuller från ett antal vindkraftverk. Ljudnivåerna är normaliserade till avståndet 100 m och vindhastigheten 10 m/s. Den blå linjen avser bästa linjära kurvanpassning. Figuren är hämtad från [15].

Med den till mätunderlaget i [15] bäst anpassade räta linjen (blå linje i Figur 9) ses att utstrålat buller ökar med 13,6 dB för en tiofaldig ökning av turbinens effekt. [15] Med denna ökning erhålls en ljudnivå av 124 dB relativt 1 μ Pa på avstånd 100 m från en turbin med effekten 20 MW (planerad effekt för vindkraftverken i Najaderna vindkraftpark). Omräknat med en förenklad ljudutbredningsmodell där ljudnivån antas avta med 4,5 dB per avståndsfördubbling [11] ger detta en källstyrka av 154 dB relativt 1 μ Pa på avstånd 1 m. I Figur 10 redovisas de i beräkningarna använda tersbandsnivåerna.

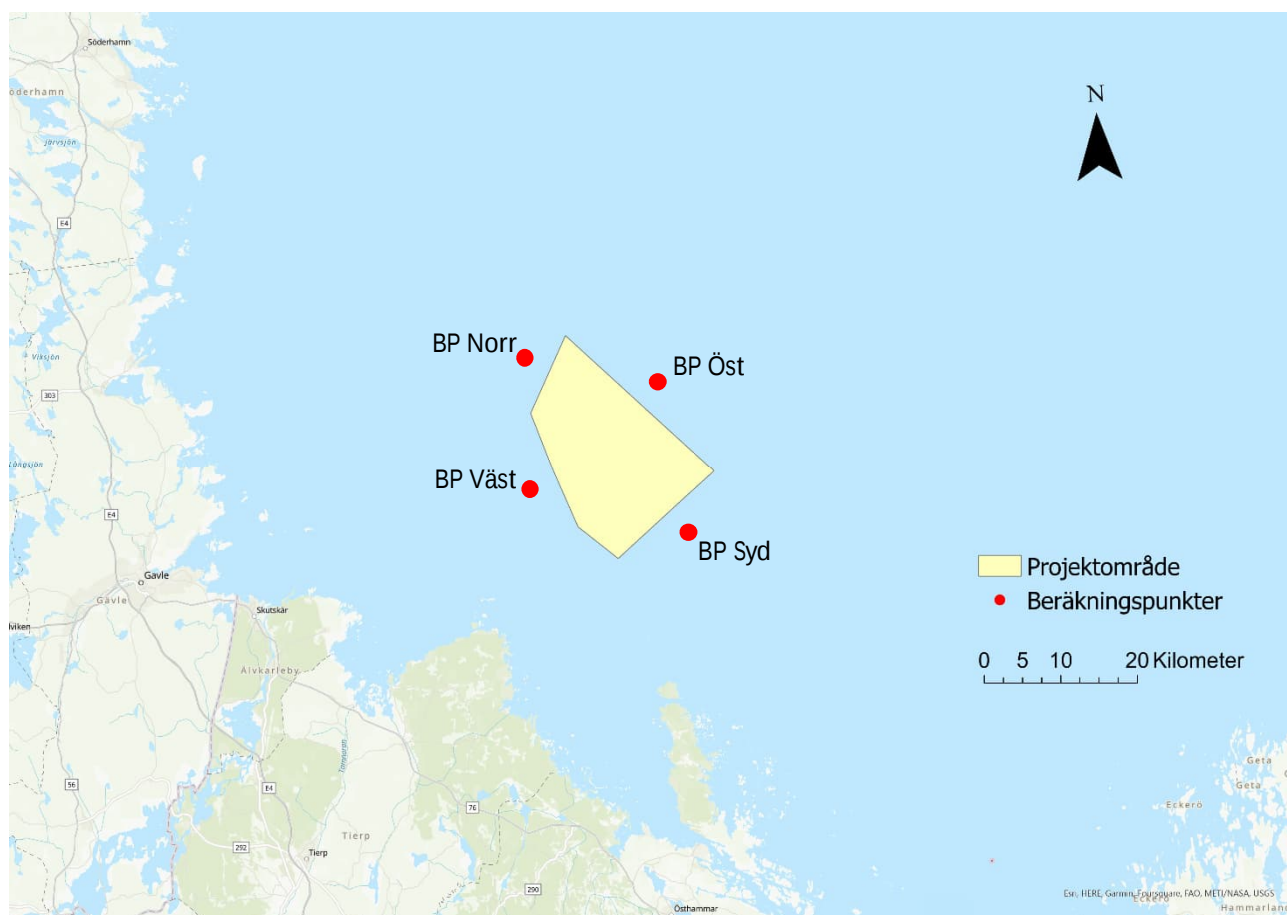
I jämförelse med fartygsbuller är den beräknade källstyrkan av 154 dB relativt 1 μ Pa på avstånd 1 m lägre än vad som normalt förekommer från kommersiella fartyg. Medelstora till stora kommersiella fartyg har typiskt sett en källstyrka mellan 165 och 185 dB relativt 1 μ Pa på avstånd 1 m, men även högre bulleralstring förekommer. [16]



Figur 10: Tersbandsnivåer för undervattensbuller från drift av vindkraftverk. Nivåerna har anpassats till källstyrkan SPL 154 dB relativt 1 μPa. Det relativa tersbandsnivåerna är hämtat från [17].

4.5 DRIFTSFAS – BERÄKNINGSPUNKTER:

Eftersom bottendjupet varierar inom och utanför Najaderna vindkraftparks projektområde kommer bullerspridningen att se olika ut i olika riktningar kring området. För att visa på dessa skillnader har bullerberäkningar utförts för nordlig, västlig, sydlig och östlig riktning kring området (vinkelrätt områdesgräns). I Figur 11 ses de yttersta beräkningpunkternas lägen (3 km från områdesgräns).



Figur 11: Beräkningpunkter markerade med röda punkter 3 km från projektområdesgräns. Bakgrundskartan från Esri (Esri, HERE, Garmin, USGS, NSA).

4.6 BERÄKNINGSMETOD:

Beräkningarna av bullerspridningen är utförda i beräkningsprogrammet dBSea 2.3. I programmet finns olika algoritmer implementerade för beräkning av bullerspridning. Algoritmerna fungerar olika väl vid olika förhållanden. De begränsande faktorerna är framför allt frekvensområde och bottendjup [18]. Med underlag av information i [18] har i beräkningarna algoritmerna Normal modes (NM) och Ray Tracing (RT) valts. RT är en robust algoritm som generellt ger god samstämmighet med uppmätta värden [18]. RT har dock begränsningar i framför allt låga frekvenser. NM har därför använts i beräkningarna för de lägre tersbanden (20–500 Hz) medan RT har använts för tersbanden 630 Hz – 20 kHz.

Beräkningsgången kan kort beskrivas enligt följande:

- Digital batymetri används som grunddata för att bygga upp en 3D-modell i beräkningsprogrammet. Batymetrin har hämtats från GEBCO, download.gebco.net
- Aktuella positioner för bullerkällorna placeras in i 3D-modellens koordinatsystem.
- Bullerkällorna har modellerats med källstyrka och tersbandsspektrum.
- Parametrar så som typ av botten, hastighetsprofil, salinitet och vägningsfilter specificeras (se avsnitten 4.7, 4.8 och 2.3).
- Val av algoritmer och aktuella frekvensområden ställs in.

För jämförelse mot de av den danska Energistyrelsen angivna tröskelvärdena för SEL_{24h} [7] behöver flyktbeteendet hos en tänkt mottagare av bullret tas i beaktande. I den danska Energistyrelsens vägledning [7] föreslås en enkel modell där flykten sker från en startposition 200 m från bullerkällan. Flykten modelleras med en konstant hastighet av 1,5 m/s i en rät linje bort från bullerkällan.

Med underlag av beräknad bullerspridning, beräknat flyktbeteende, pålningsens uppramningssekvens och antagandet att utstrålat buller är direkt proportionellt mot andelen slagenergi i påslagen kan ett värde för SEL_{24h} beräknas. Beräkningen utförs genom att, för en tänkt rörlig mottagare, summera $SEL_{(enkel\ i)}$ för samtliga påslag i som förekommer under en och samma tidsperiod av 24 timmar. Summeringen utförs enligt ekvationen nedan, där xx avser aktuellt vägningsfilter (exempelvis PCW för säl), N totalt antal påslag och r_i den sträcka mottagaren har tillryggalagt vid påslag i .

$$SEL_{24h,xx} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{SEL_{(enkel\ i),xx}(r_i)}{10}} \text{ dB}.$$

Om nivåer överskridande tröskelvärdena för PTS beräknas då en startposition av 200 m från bullerkällan antas behöver åtgärder vidtas. Antingen genom att dämpa bullerkällan eller genom användande av akustiska system för att skrämman bort djur från området. Enligt [7] bör akustiska system för att skrämman bort djur från området endast användas vid förekomst av bullernivåer överskridande tröskelvärdena för PTS. Då dessa system i sig innebär en miljöpåverkan med hänseende till undervattensbuller är det inte motiverat att använda systemen vid moment som alstrar lägre bullernivåer.

Samma förfarande har använts för att beräkna nivåerna av SEL_{24h} för strömming, men då aktuell bedömningsgrund från Standardkommittén S3/SC1 (SEL_{24h} 186 dB relativt 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$) [9] gäller linjära ljudnivåer har inget vägningsfilter använts. Strömmingens flykthastighet har antagits till 1,04 m/s.

Gällande buller under driftsfasen så har beräkningarna inte inkluderat ett flyktbeteende hos mottagaren. Beräkningarna av buller under driftsfasen har utförts i stationära punkter eftersom undervattensljud som genereras vid driftsfasen inte verkar skrämman sälar [12].

4.7 HAVSBOTTEN:

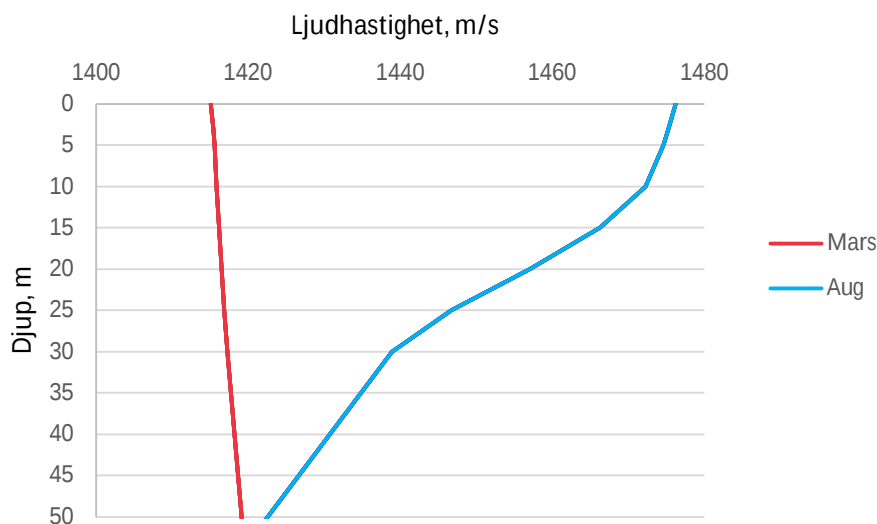
Havsbotten i området kring Najaderna vindkraftpark består till stor del av morän med varierande andel av avlagringar av postglacial lera. I beräkningsmodellen har botten konservativt antagits vara morän i hela det utredda området. Detta är tänkt att visa ett beräkningsmässigt värsta fall eftersom mer ljudabsorberande leriga bottensediment inte inkluderats i beräkningsmodellen.

4.8 HASTIGHETSPROFIL:

På större avstånd från pålningen kan variationer i ljudutbredningens hastighetsprofil ha betydelse för alstrade ljudtrycksnivåer. Variationerna i hastighetsprofil är säsongsmässiga. För området kring Najaderna vindkraftpark ses störst skillnad i hastighetsprofil mellan vår och sommar. Beräkningarna av bullerspridningen från pålningen vid grundläggningsarbetena för Najaderna vindkraftpark har därför delats upp i ett tidig vår- och ett sommarscenario.

Från mätdata av temperatur och salinitet på olika bottendjup har ljudhastighetsprofiler beräknats med Coppers ekvation [19]. För beräkningarna har medelvärden från mätningar mellan 2010 och 2022 för salinitet och temperatur använts. I Figur 12 redovisas beräknade ljudhastighetsprofiler.

Anledningen till de olika nivåerna av undervattensbuller för vår- och sommarscenariot är att hastighetsprofilen för våren böjer ljudvågorna upp mot ytan där ljudet reflekteras med en stor andel energi bibehållen. Hastighetsprofilen för sommar böjer däremot ned ljudvågorna mot havsbotten. Vid ljudreflexen i havsbotten absorberas en större del av ljudets energi jämfört med reflexen i vattenytan. [1]



Figur 12: Ljudhastighetsprofil för mars (röd linje) använd för vårsценарier och augusti (blå linje) använd för sommarsценарier.

4.9 BERÄKNINGSFALL:

Beräkningarna av bullerspridningen har delats upp i 5 beräkningsfall. Beräkningsfall 1–4 gäller pålning och beräkningsfall 5 gäller buller under driftsfasen. Beräkningarna av pålning har utförts både avseende monopilefundament och fackverksfundament för ett vår- och ett sommarscenario. Pålningpositionernas lägen redovisas i Figur 5.

1. Pålning i väst
2. Pålning i öst
3. Pålning i norr
4. Pålning i syd
5. Buller under driftsfas

5 BERÄKNINGSRESULTAT:

5.1 LJUDEXPONERINGSNIVÅER:

I Tabell 9 och Tabell 10 redovisas beräknade ljudexponeringsnivåer för säl ($SEL_{24h,PCW}$) för de olika beräkningsfallen avseende pålning. Tabell 9 avser pålning för monopilefundament och Tabell 10 avser pålning för fackverksfundament. För beräkningsresultat avseende strömming se avsnitt 7.3 och Bilaga 1–4.

Tabell 9: Beräknade ljudexponeringsnivåer SEL_{24h} anpassade med vägningsfilter för säl. Nivåerna avser pålning för monopilefundament.

Nr	Beräkningsfall	Beräknad ljudexponeringsnivå för säl $SEL_{24h,PCW}$ dB rel. 1 μPa^2s
1	Monopile Väst Vår	197
1	Monopile Väst Sommar	197
2	Monopile Öst Vår	197
2	Monopile Öst Sommar	197
3	Monopile Norr Vår	195
3	Monopile Norr Sommar	195
4	Monopile Syd Vår	196
4	Monopile Syd Sommar	196

Tabell 10: Beräknade ljudexponeringsnivåer SEL_{24h} anpassade med vägningsfilter för säl. Nivåerna avser pålning för fackverksfundament.

Nr	Beräkningsfall	Beräknad ljudexponeringsnivå för säl $SEL_{24h,PCW}$ dB rel. 1 μPa^2s
1	Fackverk Väst Vår	185
1	Fackverk Väst Sommar	185
2	Fackverk Öst Vår	185
2	Fackverk Öst Sommar	185
3	Fackverk Norr Vår	183
3	Fackverk Norr Sommar	183
4	Fackverk Syd Vår	184
4	Fackverk Syd Sommar	184

Beräkningsmässigt föreligger ljuddämpningsbehov för att innehålla tröskelvärdena angivna av den danska Energi-styrelsen ($SEL_{24h,PCW}$ 170 dB för TTS och 185 dB för PTS). För pålning av monopilefundament beräknas ljuddämpningsbehovet att vara som mest 12 dB för undvikande av PTS och 27 dB för undvikande av TTS hos säl. För pålning av fackverksfundament beräknas ljuddämpningsbehovet att vara som mest 16 dB för undvikande av TTS hos säl. Tröskelvärdet för PTS hos säl överskrids inte. I avsnitt 6 redovisas förslag på bullerdämpande åtgärder som kan vidtas för att begränsa bullerspridningen.

Skillnaderna i bullerspridning mellan de olika pålningspositionerna är generellt små. Gällande skillnader i beräknade ljudnivåer mellan vår- och sommarscenarierna beräknas dessa till mindre än 1 dB.

5.2 MOMENTANA LJUDNIVÅER:

I Tabell 11 och Tabell 12 redovisas beräknade maximala avstånd till tangering av de tröskelvärden som avser momentana ljudnivåer ($SPL_{(topp)}$ och $SEL_{(enkel)}$). Tabell 11 avser pålning för monopilefundament och Tabell 12 avser pålning för fackverksfundament. Tabellerna gäller för jämförelse mot tröskelvärden angivna av Vindval [1] och NOAA [8].

Tabell 11: Maximala avstånd till tangering av de tröskelvärden som avser momentana ljudnivåer ($SPL_{(topp)}$, $SEL_{(enkel)}$). Avstånden gäller för pålning med full källstyrka utan upprampning. Nivåerna avser pålning för monopilefundament.

Pålningsposition	Säl		Fisk	Ägg och larver
	PTS	TTS	Mortalitet/skada	Mortalitet/skada
Monopile Väst Vår	350 m	950 m	11 km	1,5 km
Monopile Väst Sommar	350 m	850 m	10 km	1,5 km
Monopile Öst Vår	400 m	1,0 km	12 km	1,5 km
Monopile Öst Sommar	300 m	900 m	11 km	1,5 km
Monopile Norr Vår	300 m	900 m	11 km	1,2 km
Monopile Norr Sommar	300 m	850 m	10 km	1,1 km
Monopile Syd Vår	300 m	700 m	10 km	1,0 km
Monopile Syd Sommar	300 m	700 m	10 km	1,0 km

Tabell 12: Maximala avstånd till tangering av de tröskelvärden som avser momentana ljudnivåer ($SPL_{(topp)}$, $SEL_{(enkel)}$). Avstånden gäller för pålning med full källstyrka utan upprampning. Nivåerna avser pålning för fackverksfundament.

Pålningsposition	Säl		Fisk	Ägg och larver
	PTS	TTS	Mortalitet/skada	Mortalitet/skada
Fackverk Väst Vår	ca 50 m	150 m	1,8 km	250 m
Fackverk Väst Sommar	ca 50 m	150 m	1,5 km	250 m
Fackverk Öst Vår	ca 50 m	150 m	1,9 km	200 m
Fackverk Öst Sommar	ca 50 m	150 m	1,8 km	200 m
Fackverk Norr Vår	ca 50 m	150 m	1,9 km	200 m
Fackverk Norr Sommar	ca 50 m	150 m	1,5 km	200 m
Fackverk Syd Vår	ca 50 m	150 m	2,0 km	200 m
Fackverk Syd Sommar	ca 50 m	150 m	2,0 km	200 m

För fisk, ägg och larver relateras beräknade ljudnivåer både till tröskelvärden för $SPL_{(topp)}$ och $SEL_{(enkel)}$. De redovisade avstånden i Tabell 11 och Tabell 12 avser maximalt avstånd till att något av tröskelvärdena tangeras. Tröskelvärdena för $SEL_{(enkel)}$ är genomgående dimensionerande. För PTS och TTS hos säl föreligger enbart ett tröskelvärde för $SPL_{(topp)}$.

Skillnaderna i bullerspridning mellan vår- och sommarscenariot blir mer påtagliga vid större avstånd från pålningen. För tröskelvärden som tangeras inom några hundra meter är den säsongsmissiga effekten inte lika påtaglig och skillnaderna är därför små mellan de olika beräkningsfallen.

För säl beräknas avstånden till tangering av tröskelvärdena för PTS och TTS vara som mest 400 m respektive 1 km vid pålning av monopilefundament. Vid pålning av fackverksfundament beräknas motsvarande avstånd till ca 50 m respektive 150 m.

Tröskelvärdena avseende mortalitet/skada hos fisk tangeras vid som mest 11 km för pålning av monopilefundament och 2 km vid pålning av fackverksfundament. Tröskelvärdena avseende mortalitet/skada hos ägg och larver tangeras vid som mest 1,5 km för pålning av monopilefundament och 250 m vid pålning av fackverksfundament.

Observera att redovisade avstånd i Tabell 11 och Tabell 12 avser pålning med full källstyrka för att visa ett värsta fall. Under första delen av upprampningssekvensen (10 % av full slagenergi) beräknas utstrålat buller vara 10 dB lägre jämfört med full källstyrka.

5.3 BULLER UNDER DRIFTSFAS:

I Tabell 15 redovisas beräknade ljudexponeringsnivåer SEL_{24h} under driftsfasen av Najaderna vindkraftpark. Tabell 15 avser ljudtrycksnivåer anpassade med vägningsfilter för säl (PCW). Resultaten redovisas för stationära mottagare på några olika avstånd från områdesgräns. Avstånden utgår från områdesgräns fram till de fyra utvalda beräkningspunkterna

(Figur 11). Beräknade bullernivåer gäller det totala bullret från en utformning med 67 vindkraftverk, där varje vindkraftverk har en källstyrka av 154 dB relativt 1 μPa på avstånd av 1 m. Då generellt något högre nivåer av undervattensbuller beräknas för vårsenariot redovisas enbart dessa nivåer.

Tabell 15: Beräknade ljudexponeringsnivåer $SEL_{24h,PCW}$ på olika avstånd från projektområdets gräns. Nivåerna är anpassade med vägningsfilter för säl. Beräkningarna avser ett vårsenario.

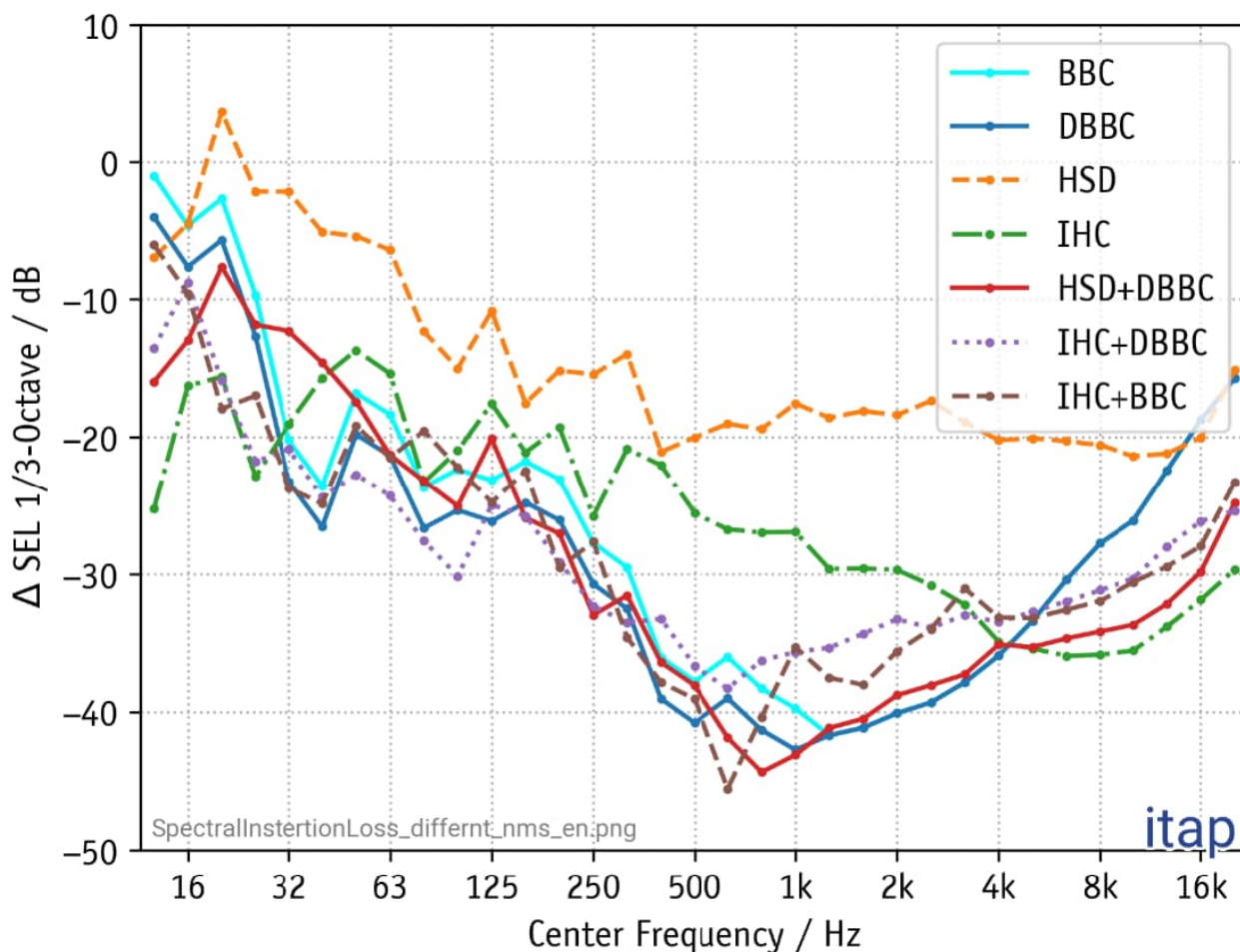
Avstånd, m	Beräknad ljudexponeringsnivå för säl, $SEL_{24h,PCW}$ dB rel. 1 μPa^2s , på olika avstånd från projektområdets gräns i riktningarna			
	Norr	Öster	Söder	Väster
200	145	150	146	150
500	145	149	146	150
1000	144	149	145	149
2000	143	148	144	148
3000	143	147	143	147

Beräkningarna visar på god marginal till tröskelvärdena angivna av den danska Energistyrelsen avseende buller av kontinuerlig karaktär ($SEL_{24h,PCW}$ 181 dB för TTS och 201 dB PTS, se Tabell 3). Marginalen till tröskelvärde för TTS hos säl beräknas till som minst 31 dB för en stationär mottagare som under 24 timmar befinner sig 200 m från områdesgränsen. För att tröskelvärde för TTS hos säl beräkningsmässigt ska överskridas skulle en säl under 24 timmar behöva befinna sig inom ett fåtal meter från vindkraftverken. På såpass korta avstånd kommer bullret att domineras helt av det närbelägna vindkraftverket. Ljudbidraget från andra turbiner kommer att vara marginellt.

Inom Najadernas projektområde beräknas det kontinuerliga driftsbullret, filtrerat med vägningsfiltret PCW för säl, att variera från ca 100 dB SPL_{PCW} vid områdesgräns till ca 139 dB SPL_{PCW} invid varje vindkraftverk. Sett till exponering över 24 timmar i stationära punkter motsvarar det ett spann mellan ca 150 dB till 188 dB för $SEL_{24h,PCW}$ inom Najadernas projektområde.

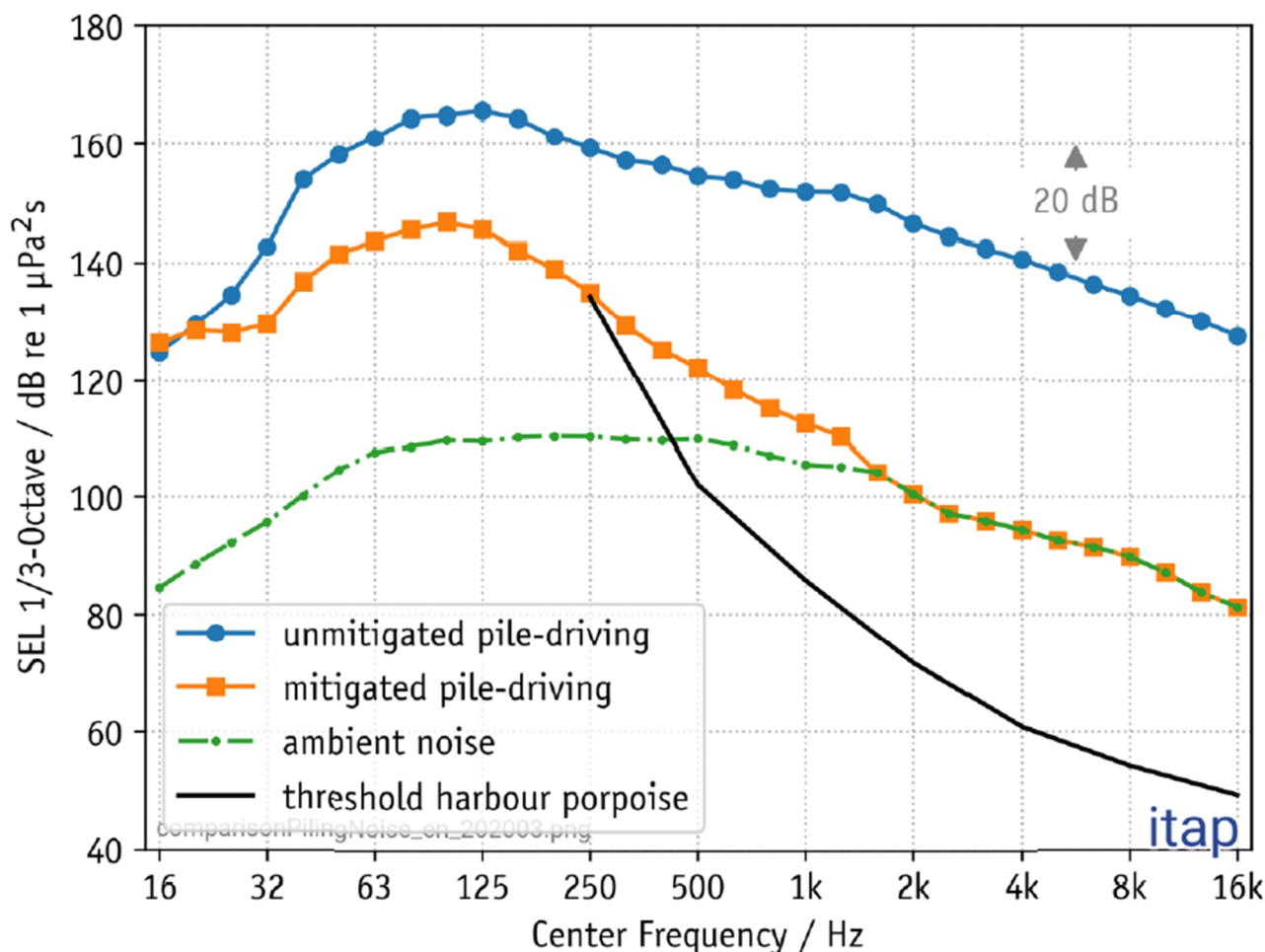
6 BULLERDÄMPANDE ÅTGÄRDER VID PÅLNING:

För att begränsa pålningens bullerspridning kan diverse bullerdämpande åtgärder vidtas. I Figur 13 redovisas uppmätt ljudreduktion i tersband för olika tekniker av bullerdämpning. Figuren är hämtad från [10].



Figur 13: Uppmätt bullerdämpning för vidtagande av olika bullerdämpande tekniker. BBC – Big Bubble Curtain, DBBC – Double Big Bubble Curtain, HSD – Hydro Sound Damper, IHC – Noise mitigation screen. Figuren är hämtad från [10].

Pålningbullret domineras av frekvenser mellan ca 100 Hz och 200 Hz (se Figur 8). För att nå en viss dämpning av de totala bullernivåerna behöver metoder för bullerdämpning vara effektiv inom dessa frekvensband. De bullerdämpande åtgärderna, redovisade i Figur 13, som ger en dämpning kring 20 dB av ljudtrycket inom frekvensbanden 100 Hz till 200 Hz ger upphov till betydligt mer dämpning vid högre frekvenser. För de högsta frekvensbanden avtar dock dämpningen något. Detta kan bero på begränsningar i mätmetoden [10]. I mätningarna gav det mer högfrekventa bullret från pålningen sällan upphov till högre nivåer än bakgrundsbullret i mätpunkterna (se Figur 14). Detta gör att det inte går att detektera en större dämpning även om en sådan finns. Dämpningen för de högsta frekvenserna skulle således kunna vara större än bullerdämpningen redovisad i Figur 13.



Figur 14: Jämförelse mellan uppmätt bullernivå 750 m från pålningen vid odämpad respektive dämpad pålning (blå respektive orange kurva). Den gröna kurvan visar bakgrundsbullret då ingen pålning pågick. Som referens anges också hörtröskeln för tumlare. Figuren är hämtad från [10].

Eftersom de bullerdämpande åtgärderna, redovisade i Figur 13, dämpar de höga frekvenserna mer än låga frekvenser kommer en större bullerdämpning att erhållas för de frekvensvägda bullernivåerna för säl jämfört med för de linjära nivåerna (utan vägningsfilter). I Tabell 16 redovisas ett exempel på hur bullerdämpning av den i beräkningarna använda källstyrkan skiljer sig åt för totala linjära respektive frekvensvägda bullernivåer. Som ett exempel har uppmätt dämpning med tekniken HSD+DBBC använts.

Tabell 16: Erhållen dämpning av pålningens källstyrka, med och utan vägningsfilter säl. Som exempel visas källstyrkorna för monopilefundament.

Vägningsfilter	Källstyrka pålning monopilefundament, $SEL_{(Enkel)}$ dB rel. $1 \mu Pa^2 s$ på avstånd 1 m	
	Odämpat	Dämpning med HSD+DBBC
Utan vägningsfilter	228	206
PCW (säl)	209	182

I Tabell 16 ses att den linjära källstyrkan dämpas med 22 dB av åtgärden HSD+DBBC medan de frekvensvägda källstyrkorna minskar med 27 dB för säl.

7 BERÄKNINGSRESULTAT BULLERDÄMPAD PÅLNING:

7.1 LJUDEXPONERINGSNIVÅER:

I Tabell 17 och Tabell 18 redovisas beräknade ljudexponeringsnivåer SEL_{24h} för de olika beräkningsfallen avseende pålning då bullerdämpning har vidtagits (se tabell 16). Tabell 17 avser pålning för monopilefundament och Tabell 18 avser pålning för fackverksfundament.

Tabell 17: Beräknade ljudexponeringsnivåer SEL_{24h} anpassade med vägningsfilter för säl. Nivåerna avser pålning för monopilefundament där bullerdämpning med teknikerna HSD och DBBC har vidtagits.

Nr	Beräkningsfall	Beräknad ljudexponeringsnivå för säl $SEL_{24h,PCW}$ dB rel. $1 \mu Pa^2s$
1	Monopile Väst Vår	171
1	Monopile Väst Sommar	171
2	Monopile Öst Vår	171
2	Monopile Öst Sommar	171
3	Monopile Norr Vår	169
3	Monopile Norr Sommar	169
4	Monopile Syd Vår	170
4	Monopile Syd Sommar	169

Tabell 18: Beräknade ljudexponeringsnivåer SEL_{24h} anpassade med vägningsfilter för säl. Nivåerna avser pålning för fackverksfundament där bullerdämpning med tekniken HSD och DBBC har vidtagits.

Nr	Beräkningsfall	Beräknad ljudexponeringsnivå för säl $SEL_{24h,PCW}$ dB rel. $1 \mu Pa^2s$
1	Fackverk Väst Vår	158
1	Fackverk Väst Sommar	158
2	Fackverk Öst Vår	158
2	Fackverk Öst Sommar	158
3	Fackverk Norr Vår	156
3	Fackverk Norr Sommar	156
4	Fackverk Syd Vår	157
4	Fackverk Syd Sommar	156

Redovisade nivåer i Tabell 17 visar att för pålningen av monopilefundament där åtgärden HSD+DBBC vidtagits innehålls beräkningsmässigt den danska Energistyrelsens tröskelvärden för PTS hos säl ($SEL_{24h,PCW}$ 185 dB). För tröskelvärdet för TTS hos säl ($SEL_{24h,PCW}$ 170 dB) beräknas som mest ett överskridande av 1 dB. Överskridandet gäller pålning av monopilefundament i den östra och västra pålningspositionen under både vår- och sommarscenariot. Överskridandet är litet och gäller för en tänkt mottagare som vid pålningens start börjar avlägsna sig bort från en position 200 m från

pålningen. Beräkningsmässigt är ett avstånd av 700 m vid pålningens (och avlägsnandets) start tillräckligt för att tröskelvärde för TTS hos säl inte ska överskridas.

För bullerdämpad pålning av fackverksfundamenten (Tabell 18) erhålls god marginal till tröskelvärdena, som minst 12 dB till tröskelvärde för TTS hos säl.

7.2 MOMENTANA LJUDNIVÅER:

I Tabell 19 och 20 redovisas beräknade maximala avstånd till tangering av de tröskelvärden som avser momentana ljudnivåer ($SPL_{(topp)}$, $SEL_{(enkel)}$). Tabell 19 avser bullerdämpad pålning (se Tabell 16) för monopilefundament och Tabell 20 avser bullerdämpad pålning för fackverksfundament. Tabell 19 och 20 gäller för jämförelse mot tröskelvärden angivna av Vindval [1] och NOAA [8].

Tabell 19: Maximala avstånd till tangering av de tröskelvärden som avser momentana ljudnivåer ($SPL_{(topp)}$, $SEL_{(enkel)}$ och $SPL_{(rms, 125\ ms)}$). Avstånden gäller för pålning med full källstyrka utan upprampning men med vidtagande av bullerdämpning med teknikerna HSD och DBBC. Nivåerna avser pålning för monopilefundament.

Pålningensposition	Säl		Fisk	Ägg och larver
	PTS	TTS	Mortalitet/skada	Mortalitet/skada
Monopile Väst Vår	ca 10 m	ca 50 m	400 m	ca 70 m
Monopile Väst Sommar	ca 10 m	ca 50 m	300 m	ca 70 m
Monopile Öst Vår	ca 10 m	ca 50 m	400 m	ca 70 m
Monopile Öst Sommar	ca 10 m	ca 50 m	300 m	ca 70 m
Monopile Norr Vår	ca 10 m	ca 50 m	400 m	ca 70 m
Monopile Norr Sommar	ca 10 m	ca 50 m	300 m	ca 70 m
Monopile Syd Vår	ca 10 m	ca 50 m	350 m	ca 70 m
Monopile Syd Sommar	ca 10 m	ca 50 m	250 m	ca 70 m

Tabell 20: Maximala avstånd till tangering av de tröskelvärden som avser momentana ljudnivåer ($SPL_{(topp)}$, $SEL_{(enkel)}$ och $SPL_{(rms, 125\ ms)}$). Avstånden gäller för pålning med full källstyrka utan upprampning men med vidtagande av bullerdämpning med teknikerna HSD och DBBC. Nivåerna avser pålning för fackverksfundament.

Pålningensposition	Säl		Fisk	Ägg och larver
	PTS	TTS	Mortalitet/skada	Mortalitet/skada
Fackverk Väst Vår	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Väst Sommar	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Öst Vår	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Öst Sommar	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Norr Vår	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Norr Sommar	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Syd Vår	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m
Fackverk Syd Sommar	Överskrids ej	ca 10 m	ca 50 m	ca 10 m

För säl beräknas avståndet till tangering av tröskelvärde för TTS att minska från 1 km till ca 50 m vid bullerdämpad pålning av monopilefundament. För PTS hos säl är motsvarande avståndsminskning från 400 m till ca 10 m. Vid bullerdämpad pålning av fackverksfundament är avståndsminskningen för TTS hos säl från 150 m till ca 10 m. Tröskelvärde för PTS hos säl beräknas inte att överskridas vid bullerdämpad pålning av fackverksfundament.

Tangering av tröskelvärdena avseende mortalitet/skada hos fisk minskar från som mest 11 km till 400 m för bullerdämpad pålning av monopilefundament. För bullerdämpad pålning av fackverksfundament är motsvarande avståndsminskning 2 km till ca 50 m.

Tangering av tröskelvärdena avseende mortalitet/skada hos ägg och larver minskar från som mest 1,5 km till ca 70 m för bullerdämpad pålning av monopilefundament. För bullerdämpad pålning av fackverksfundament är motsvarande avståndsminskning 250 m till ca 10 m.

I beräkningarna har pålningen modellerats som en punktkälla. Detta är en god approximation på större avstånd från bullerkällan, men om avståndet till mottagaren är mindre än storleken på bullerkällan kan beskrivningen av bullerkällan som en punktkälla vara mer osäker. Översiktligt kan sägas att beräknad bullerspridning på avstånd kortare än 100 m från pålningen är behäftad med viss osäkerhet. De i Tabell 19 och Tabell 20 redovisade avstånden som är kortare än 100 m redovisas därför som "cirka-värden". De redovisade avstånden av ca ett visst antal meter bör inte ses som skarpa gränser utan snarare ungefärliga avstånd till tangering av tröskelvärdena. Tröskelvärdena bör däremot inte komma att överskridas på större avstånd än det angivna "cirka-värdet". Ytterligare en svårighet med så pass korta avstånd är att de riskerar att hamna inom området för eventuella bubbelgardiner eller andra bullerdämpande åtgärder.

7.3 BERÄKNADE AVSTÅND TILL TTS HOS STRÖMMING:

Den använda metoden för beräkning av ljudexponeringsnivåer för rörliga mottagare (se avsnitt 4.6) förutsätter att ett startavstånd ansätts mellan den rörliga mottagaren och pålningen vid pålningens början. Ansatt startavstånd blir avgörande för vilka exponeringsnivåer som beräknas. I Bilaga 1–4 redovisas kartor över beräknade startavstånd där tangering av tröskelvärde för TTS hos strömming (SEL_{24h} 186 dB relativt $1 \mu Pa^2s$) beräknas. Kartorna avser pålning där bullerdämpande åtgärder enligt avsnitt 6 tillämpats för de dimensionerande beräkningsfallen med pålning av monopilefundament.

8 KOMMENTAR KRING BULLERDÄMPANDE ÅTGÄRDER:

De i [10] redovisade luddämpningarna är uppmätta för pålning vid bottendjup på som mest ca 40 m. Vid pålningsarbetena för Najaderna vindkraftpark kan bottendjupen vara något större, som mest ca 60 m. Om tillräcklig dämpning inte skulle vara möjlig att uppnå genom användande av bullerdämpande system, så som bubbelridåer eller dylikt, kan bullerspridningen minskas genom olika former av anpassningar av pålningsförloppet. Exempelvis genom förlängd upprampningssekvens eller genom att minimera använd slagenergi vid varje pålslag. Förkortad total drifttid av pålning per dygn begränsar också bullerpåverkan. Utifrån använd upprampningssekvens och avlägsnandemodell för säl bestäms dock exponeringsnivåerna över 24 timmar (SEL_{24h}) till stor del av de första tre timmarna av pålningen. Därefter beräknas mottagarna ha tillryggalagt tillräckligt stor sträcka för att ljudexponeringsnivåerna endast ska öka någon dB under de resterande nio timmarna av pålningsförloppet. För nivån SEL_{24h} har det beräkningsmässigt således ingen större betydelse om pålning pågår i exempelvis 6 eller 12 timmar.

9 SLUTSATS:

Beräkningarna visar att det föreligger ett ljuddämpningsbehov av pålningen för att inte överskrida de av den danska Energistyrelsen angivna tröskelvärdena för ljudexponering under 24 timmar (SEL_{24h}). Beräkningsmässigt är den uppmätta ljuddämpningen från kombinationen av teknikerna Hydro Sound Damper (HSD) och Double Big Bubble Curtain (DBBC) tillräcklig för att bullret från pålningen inte ska överskrida tröskelvärdena angivna för PTS hos säl. För tröskelvärdet för TTS hos säl beräknas som mest ett överskridande med 1 dB. Överskridandet gäller pålning av monopilefundament i den östra och västra pålningspositionen under både vår- och sommarscenariot. Överskridandet är litet och gäller för en tänkt mottagare som vid pålnings start börjar avlägsna sig bort från en position 200 m från pålningen. Beräkningsmässigt är ett avstånd av 700 m vid pålnings (och avlägsnandets) start tillräckligt för att tröskelvärdet för TTS hos säl inte ska överskridas.

Avseende momentana bullertoppar skulle den uppmätta ljuddämpningen från HSD+DBBC medföra att TTS hos säl skulle riskeras vid som mest avstånd ca 50 m vid pålning av monopilefundament och ett fåtal meter från pålning av fackverksfundament. Gällande påverkan på fisk beräknas mortalitet och skada kunna uppstå vid som mest 400 m från pålning av monopilefundament och ca 50 m från pålning av fackverksfundament.

Vid vissa delar av Najaderna vindkraftparks projektområde är bottendjupen något större än de bottendjup där bullerreduktionen av HSD och DBBC uppmättes. Andra metoder för att minska beräknade exponeringsnivåer är exempelvis förlängd upprampningssekvens eller minimerad slagenergi vid varje påslag.

Gällande skillnader i beräknade ljudnivåer mellan vår- och sommarscenarierna beräknas dessa till mindre än 1 dB.

Under driftsfasen förväntas betydligt lägre nivåer av undervattensbuller. Beräkningarna visar på god marginal till tröskelvärdena angivna av den danska Energistyrelsen. Marginalen till tröskelvärde för TTS hos säl beräknas till som minst 31 dB för en stationär mottagare som under 24 timmar befinner sig 200 m från områdesgräns. För att tröskelvärdet för TTS hos säl beräkningsmässigt ska överskridas skulle en säl under 24 timmar behöva befinna sig inom ett fåtal meter från vindkraftverken. Inom Najadernas projektområde beräknas det kontinuerliga driftsbullret, filtererat med vägningsfiltret PCW för säl, att variera från ca 100 dB SPL_{PCW} vid områdesgräns till ca 139 dB SPL_{PCW} invid varje vindkraftverk. Sett till exponering över 24 timmar i stationära punkter motsvarar det ett spann mellan ca 150 dB till 188 dB för $SEL_{24h,PCW}$ inom Najadernas projektområde.

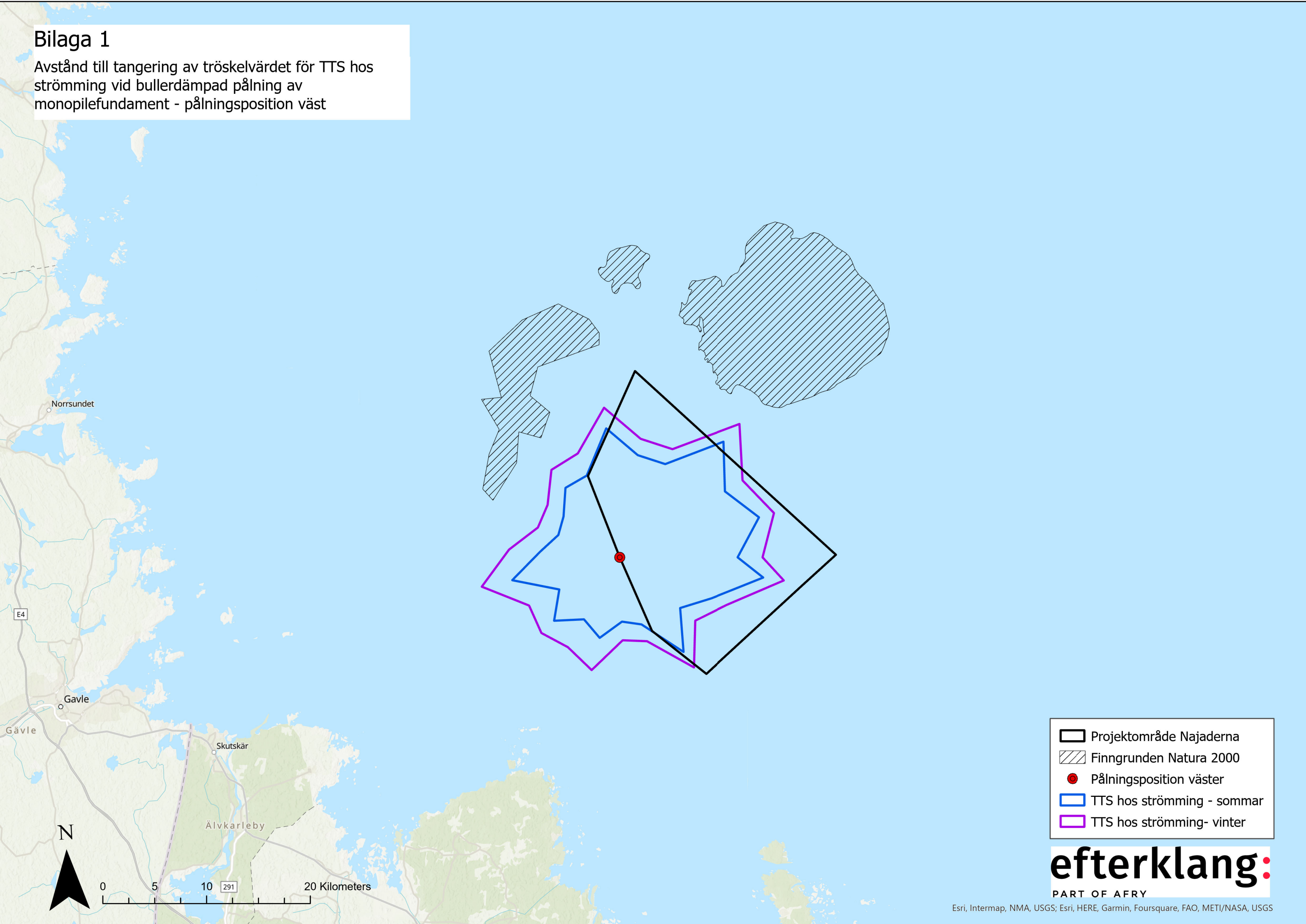
10 REFERENSER:

- [1] Andersson, M.H., Andersson, S., Ahlsén, J., Andersson, B.L., Hammar, J., Persson, L.K.G., Pihl, J., Sigray, P., Wikström, A. (2016). Underlag för reglering av undervattensljud vid pålning, Vindval RAPPORT 6723, AUGUSTI 2016.
- [2] Carlström, J. och Carlén, I. (2016). Skyddsvärda områden för Tumlare, AquaBiota Water Research Report 2016:04, 2016.
- [3] Brims Underwater Noise Assessment (2015). Underwater Noise Assessment Report SSE Renewables Developments (UK) Ltd, Assignment Number: L100183-S00 Document Number: L-100183-S00-REPT-001, 22/07/15.
- [4] Thomsen, F., Lüdemann, K., Kafemann, K., Piper, W. (2006). *Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish* COWRIE Ltd.
- [5] Kyhn, L.A., Tougaard, J., Mikaelson, M.A. (2021). Kattegatt Syd Offshore Wind Farm. Effects of pile driving, gravity foundations and sediment spill on marine mammals. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 167 pp. Scientific Report No. 447 <http://dce2.au.dk/pub/SR447.pdf>.
- [6] Southall, B.L., Finneran, J.J., Reichmuth, C., Nachtigall, P.E., Ketten, D.R., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Nowacek, D.P., Tyack, P.L. (2019). Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquat. Mamm.* 45:125-232.
- [7] Danish Energy Agency (2022). Guideline for underwater noise - Installation of impact or vibratory driven piles.
- [8] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2018) Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0) - Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.
- [9] Popper et al. (2014). ASA S3/SC1.4 TR-2014, Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI.
- [10] Bellmann, M. A. et al. (2020). Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values, Oldenburg, Germany: ITAP.
- [11] Thiele, R. (2002). Propagation loss values for the North Sea. Handout Fachgespräch: Offshore-Windmills sound emissions and marine mammals.
- [12] Bergström, L., Öhman, M.C., Berkström, C., Isæus, M., Kautsky L., Koehler B., Nyström Sandman, A., Ohlsson H., Ottvall, R., Schack H., Wahlberg M. (2022). Effekter av havsbaserad vindkraft på marint liv - En syntesrapport om kunskapsläget 2021. Vindval RAPPORT 7049, MAJ 2022.
- [13] Båmstedt, U., Larsson, S., Stenman, Å., Magnhagen, C., Sigray, P. (2009). Effekter av undervattensljud från havsbaserade vindkraftverk på fisk från Bottniska viken, Vindval RAPPORT 5924, MARS 2009.
- [14] Betke, K., Schultz-von Glahn, M., Matuschek, R. (2005). Underwater noise emissions of offshore wind turbines. ITAP – Institut für technische und angewandte Physik GmbH.
- [15] Jakob Tougaard, J., Hermannsen, L., Madsen, P.T., (2020). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines?
- [16] Jiménez-Arranz, G., Banda, N., Cook, S., Wyatt, R. (2020). Review on existing data on underwater sounds produced by the oil and gas industry.
- [17] Betke, K. (2014). Underwater construction and operational noise at alpha ventus. Ecological Research at the Offshore Windfarm alpha ventus.

- [18] Pedersen, R. S., Keane, M. (2016). Validation of dBSea, underwater noise prediction software. Pile driving focus. Journal of Shipping and Ocean Engineering.
- [19] Coppens A. B. (1981). Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters J. Acoust. Soc. Am. 69(3), pp 862-863.

Bilaga 1

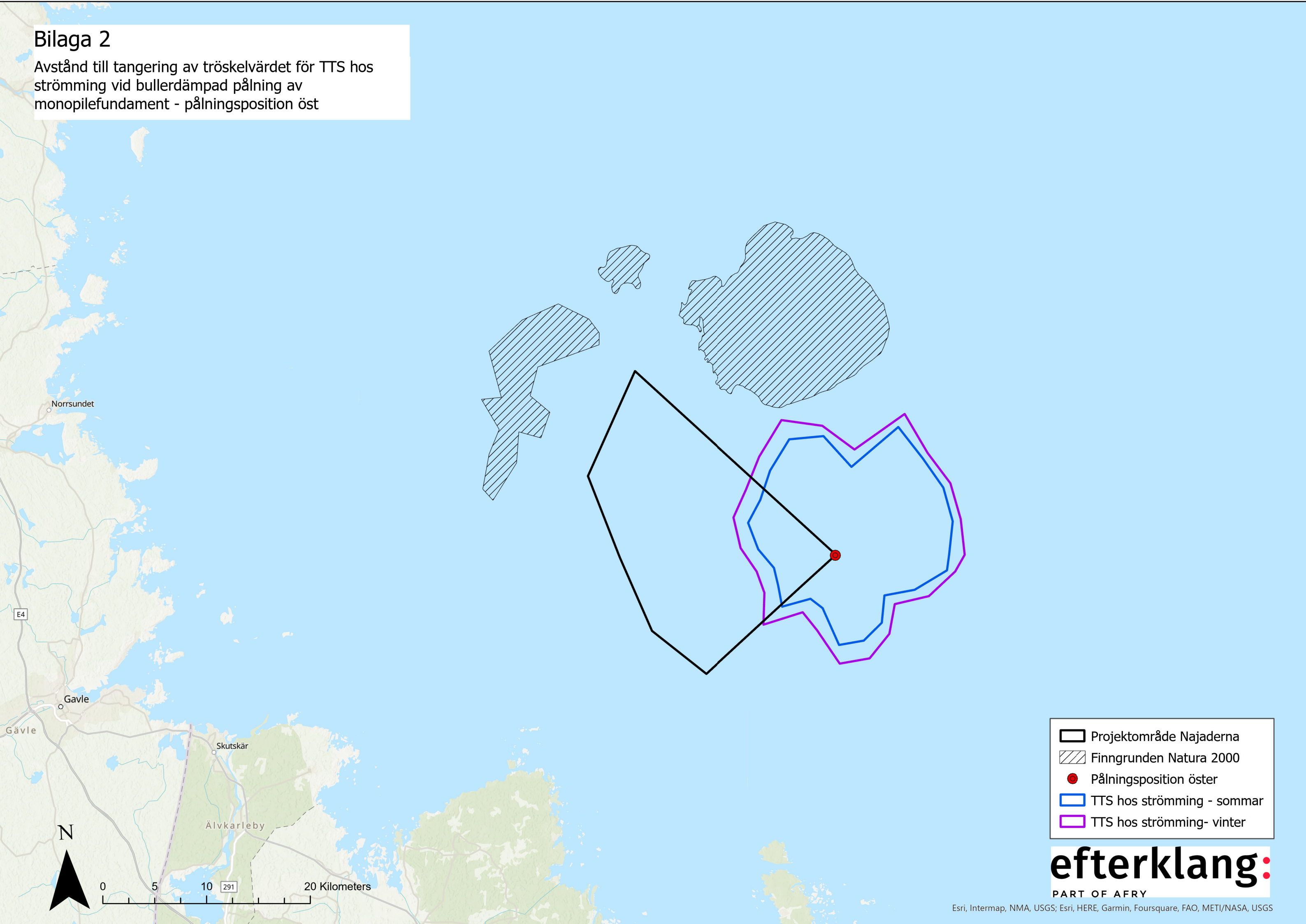
Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition väst



- Projektområde Najaderna
- Finngrunden Natura 2000
- Pålningssposition väster
- TTS hos strömning - sommar
- TTS hos strömning- vinter

Bilaga 2

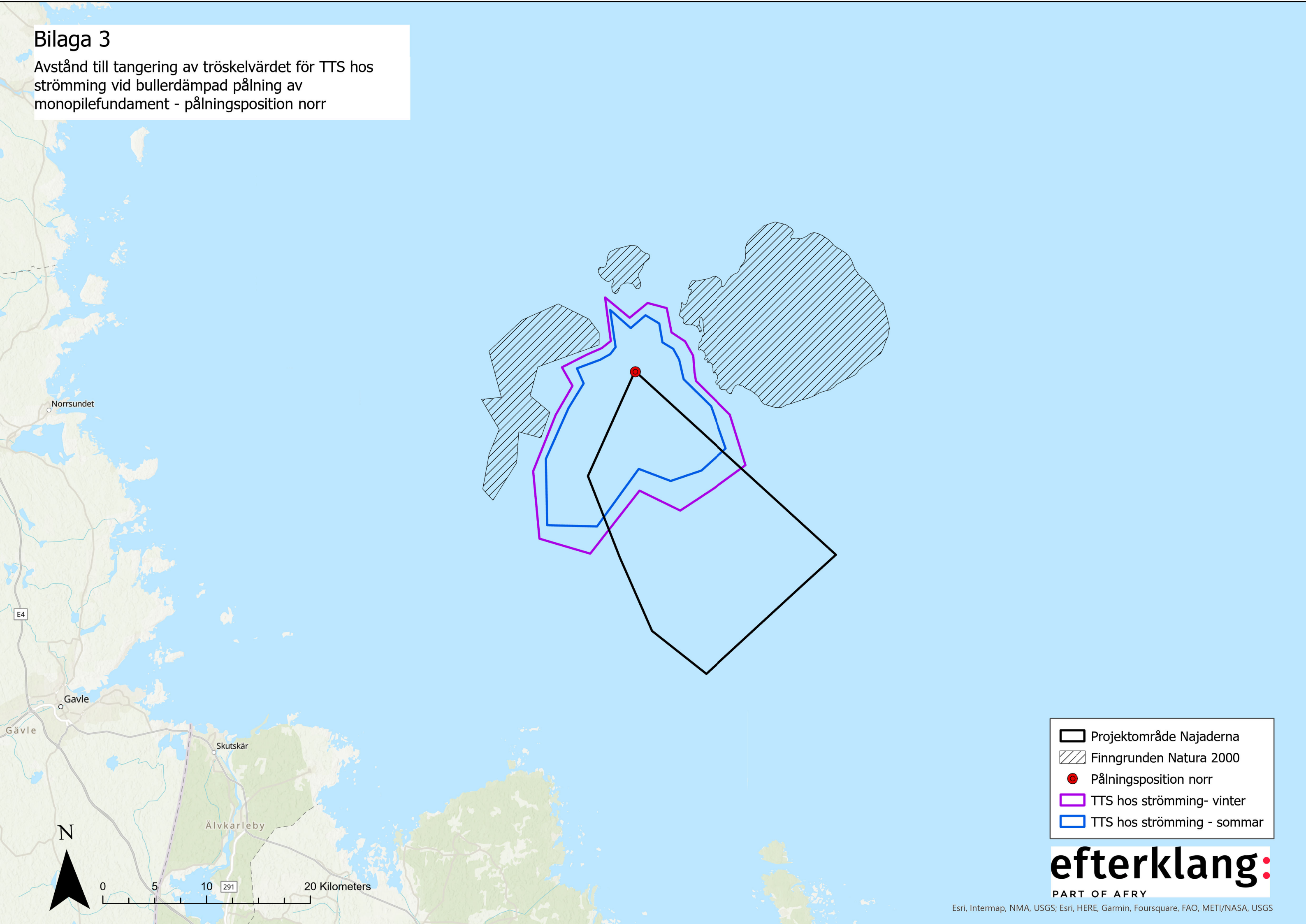
Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition öst



- Projektområde Najaderna
- Finngrunden Natura 2000
- Pålningssposition öster
- TTS hos strömning - sommar
- TTS hos strömning- vinter

Bilaga 3

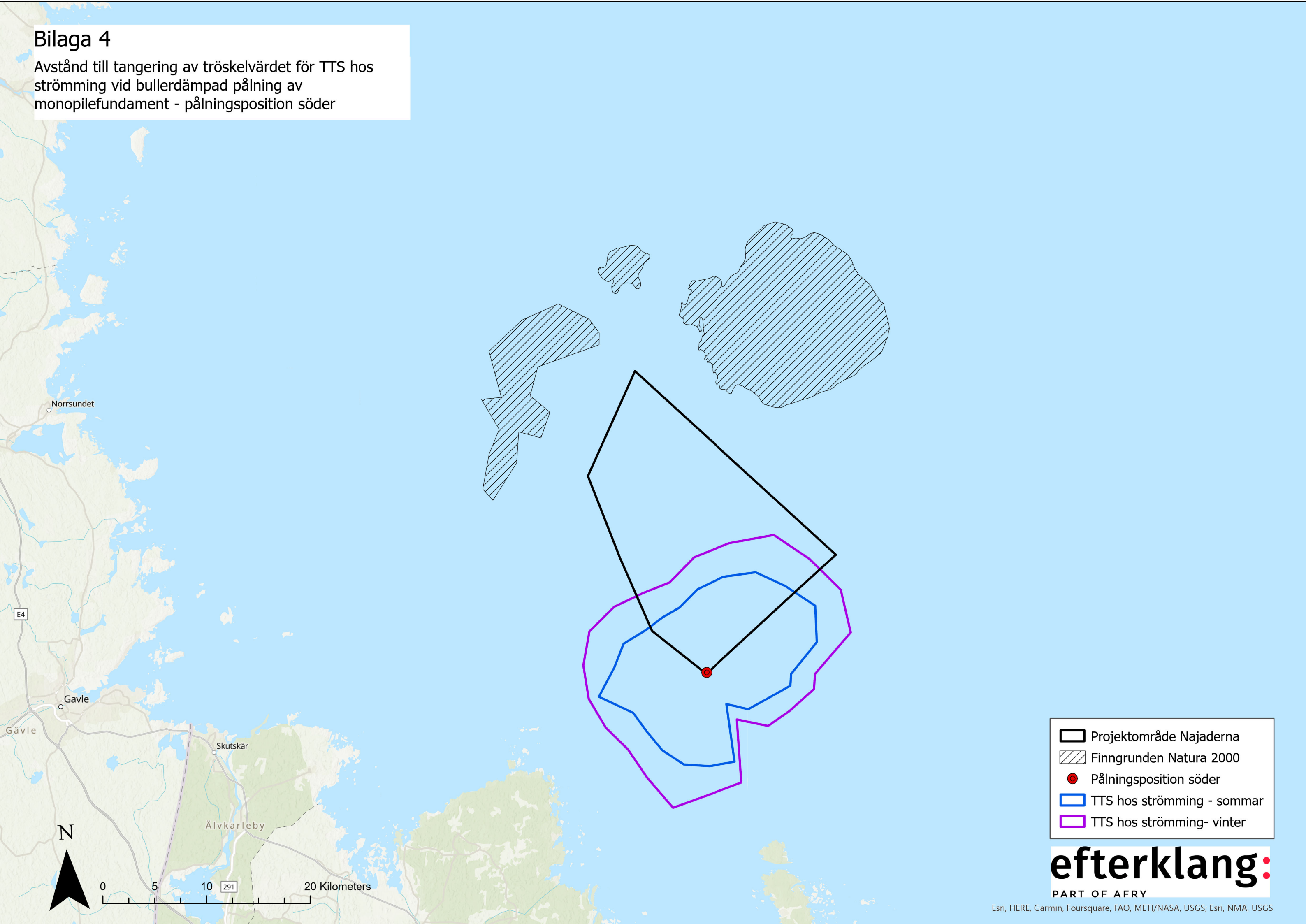
Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition norr



- Projektområde Najaderna
- Finngrunden Natura 2000
- Pålningsposition norr
- TTS hos strömning- vinter
- TTS hos strömning - sommar

Bilaga 4

Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition söder



Projektområde Najaderna

Finngrunden Natura 2000

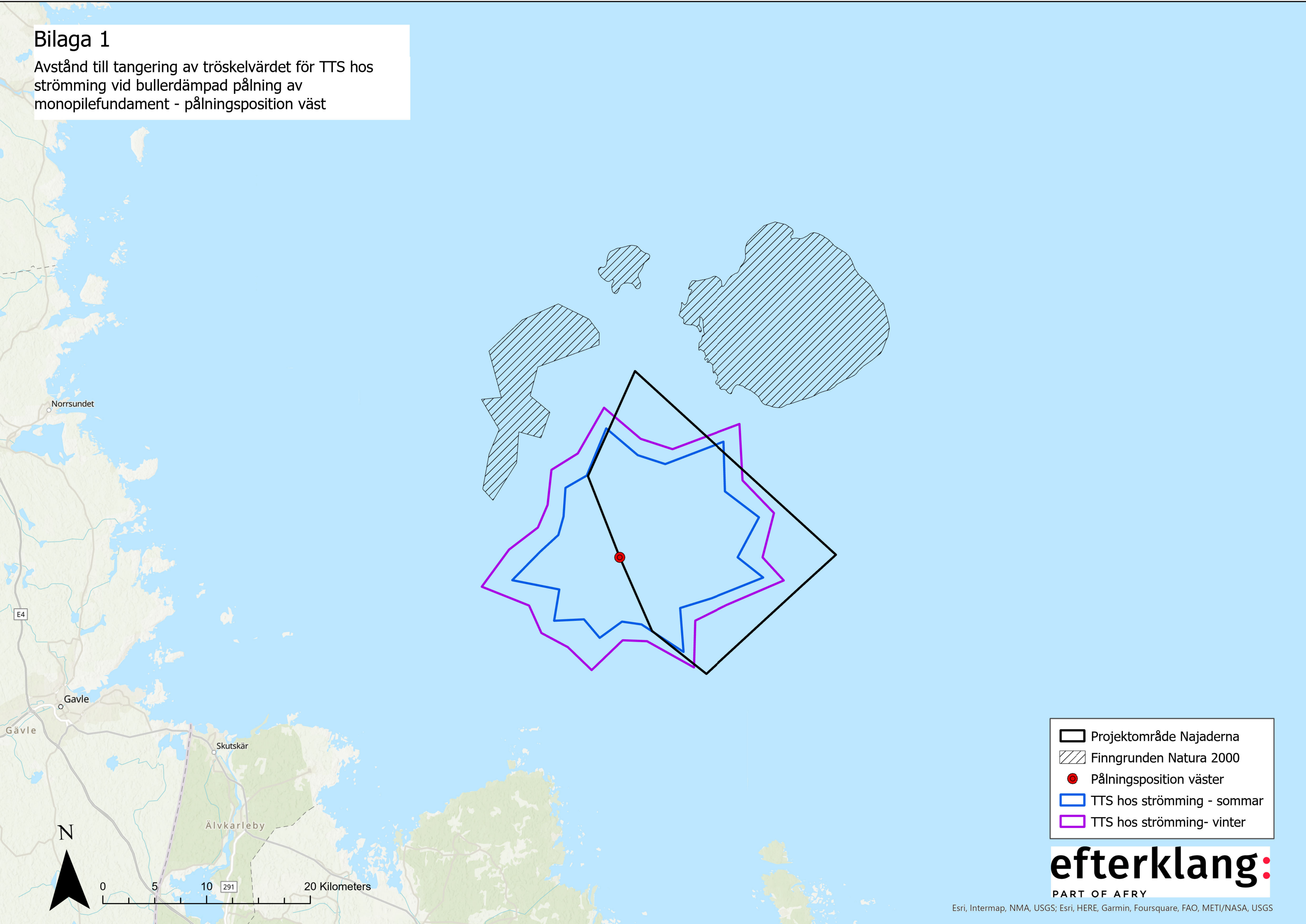
Pålningsposition söder

TTS hos strömning - sommar

TTS hos strömning- vinter

Bilaga 1

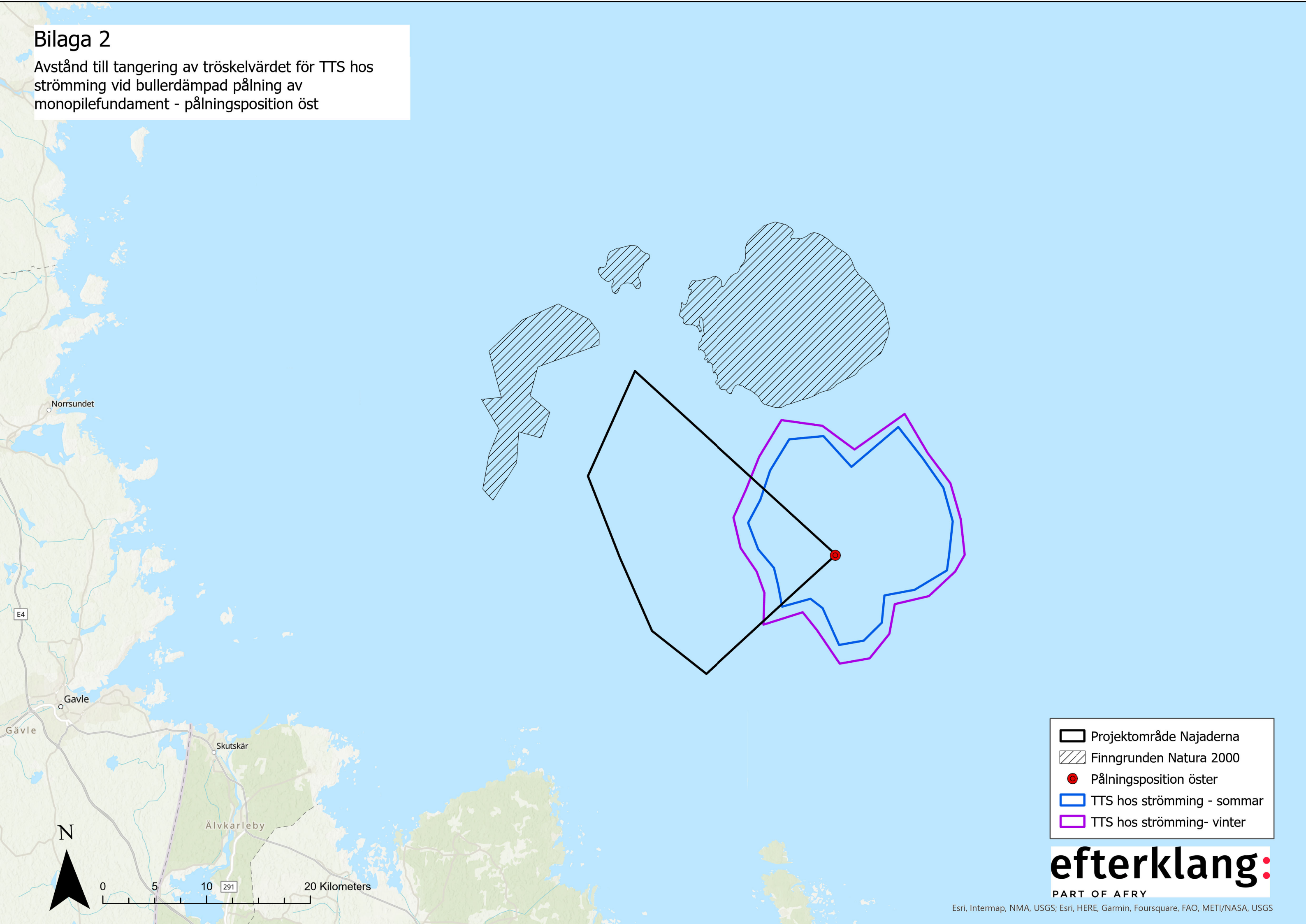
Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition väst



- Projektområde Najaderna
- Finngrunden Natura 2000
- Pålningssposition väster
- TTS hos strömning - sommar
- TTS hos strömning- vinter

Bilaga 2

Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition öst



Projektområde Najaderna

Finngrunden Natura 2000

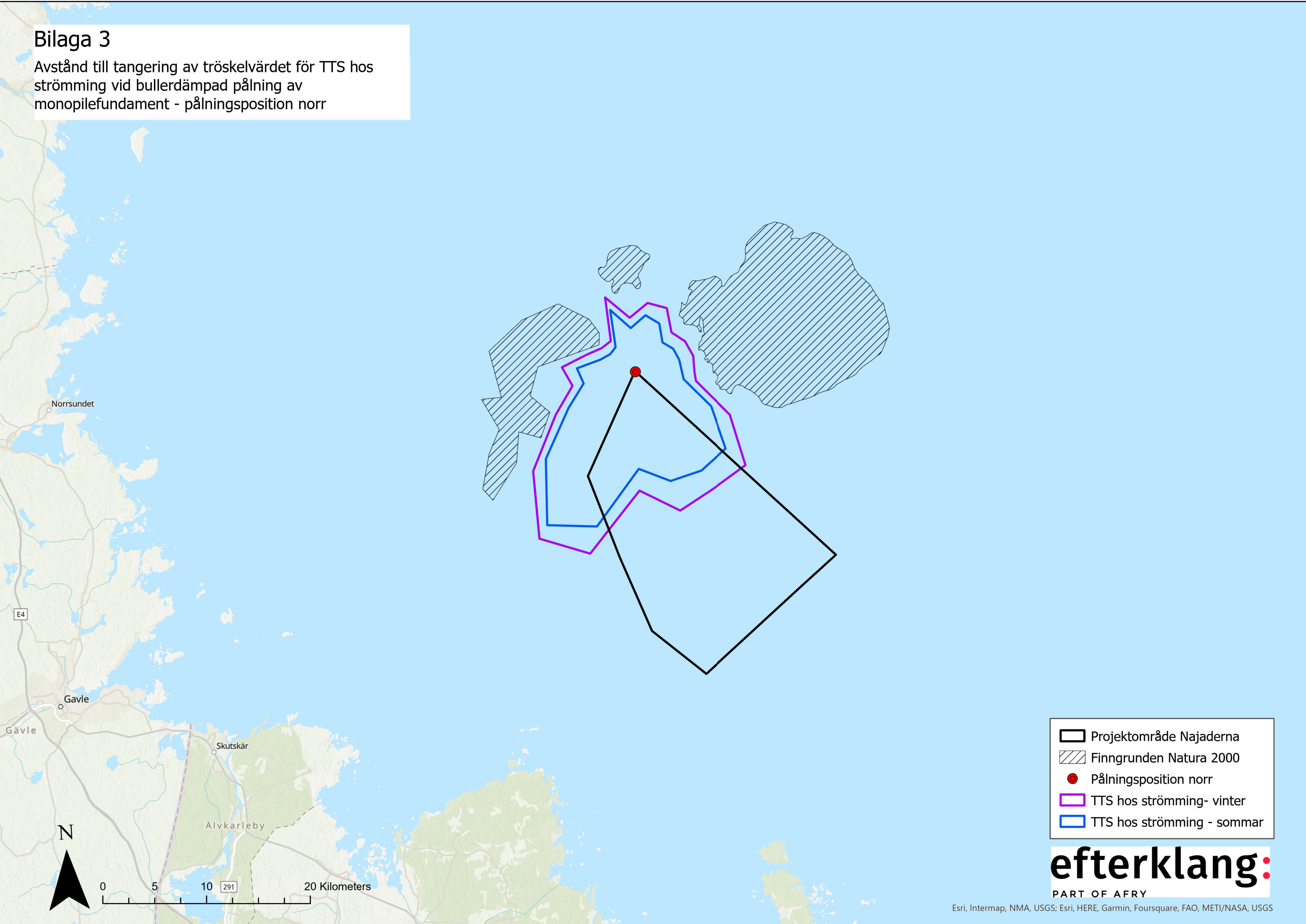
Pålningssposition öster

TTS hos strömning - sommar

TTS hos strömning- vinter

Bilaga 3

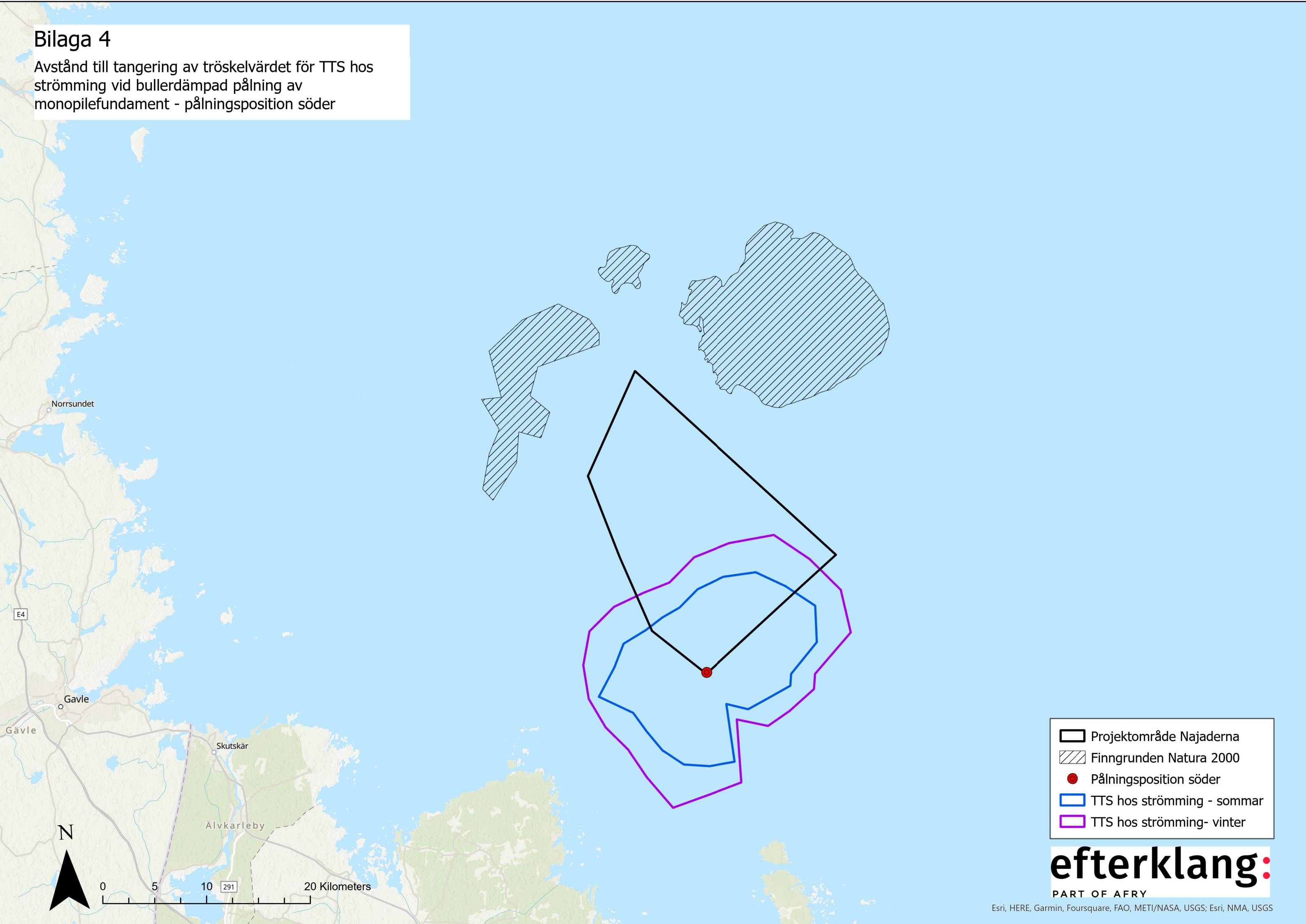
Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition norr



- Projektområde Najaderna
- Finngrunden Natura 2000
- Pålningssposition norr
- TTS hos strömning- vinter
- TTS hos strömning - sommar

Bilaga 4

Avstånd till tangering av tröskelvärdet för TTS hos strömning vid bullerdämpad pålning av monopilefundament - pålningsposition söder



- Projektområde Najaderna
- Finngrunden Natura 2000
- Pålningsposition söder
- TTS hos strömning - sommar
- TTS hos strömning- vinter