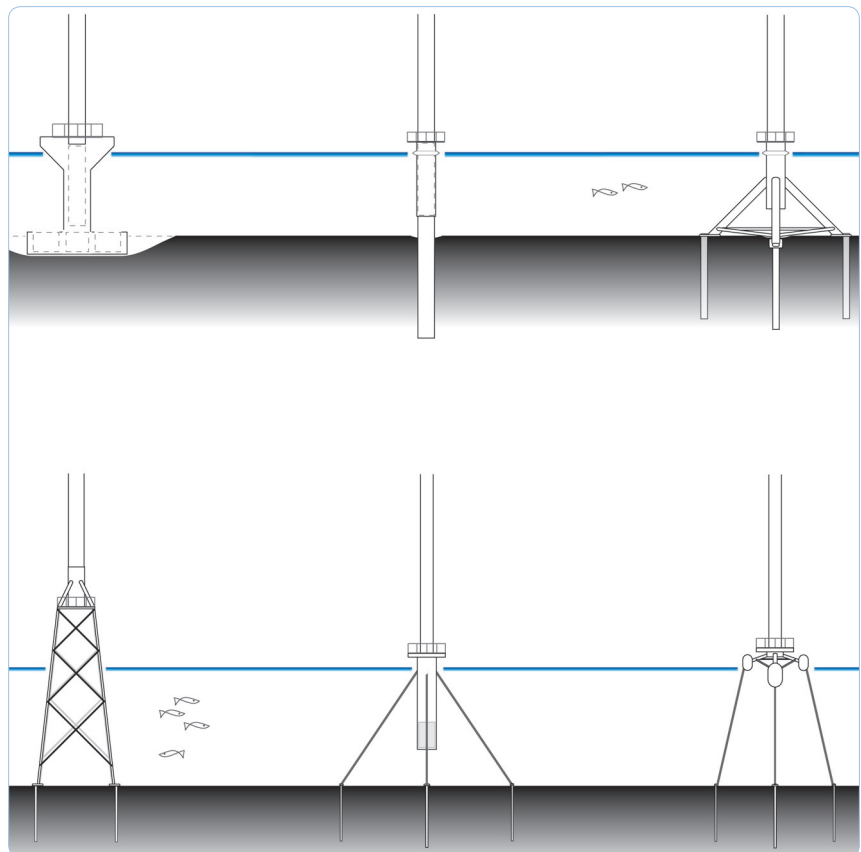


Miljömässig optimering av fundament för havsbaserad vindkraft

RAPPORT 5828 • MAJ 2008



Miljömässig optimering av fundament för havsbaserad vindkraft

Linus Hammar Sandra Andersson Rutger Rosenberg

NATURVÅRDSVERKET

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

Postadress: CM-Gruppen, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/bokhandeln

Naturvårdsverket

Tel: 08-698 10 00, fax: 08-20 29 25

E-post: natur@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-5828-9.pdf

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2008

Elektronisk publikation

Tryck: CM Gruppen AB

Omslagsbild: Skiss: Linus Hammar, Lilla bilden: Vattenfall

Förord

Behovet av kunskap om vindkraftverkens påverkan på den marina miljön, på växter och djur och på människor och landskap är stort. I tidigare studier av vindkraftanläggningars miljöpåverkan har det saknats en helhetsbild av effekterna och av människors upplevelser vilket har orsakat problem i miljökonsekvensbeskrivningar och vid tillståndsprövning.

Målet med kunskapsprogrammet Vindval är att bidra till ökad användning av vindkraft. Resultaten från forskning inom Vindval ska underlätta en ökad vindkraftutbyggnad genom att forskningsresultaten kan användas som underlag för miljökonsekvensbeskrivningar och tillståndprocesser. Kunskapen ger en större säkerhet vid bedömning av vindkraftens påverkan på miljön.

Vindval ska även ge underlag för säkrare bedömningar av hur vindkraft påverkar landskapet, störningar för kringboende och människors upplevelser av vindkraft. Tanken är också att bygga upp kunskap om miljöeffekter av vindkraft vid svenska universitet, högskolor, institut och företag samt i kommuner och andra myndigheter.

Vindval drivs av Naturvårdsverket på uppdrag av Energimyndigheten som också finansierar programmet. I programkommittén, som diskuterar prioriteringar och bereder underlag för beslut, ingår representanter från centrala myndigheter, länsstyrelse och vindkraftbranschen.

Den här rapporten har skrivits av Marine Monitoring vid Kristineberg AB genom Linus Hammar, Sandra Andersson och Rutger Rosenberg. Skribenterna svarar för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Vindval i maj 2008

Innehåll

SAMMANFATTNING	8
SUMMARY	10
1 INLEDNING	12
2 FUNDAMENT	15
2.1 Gravitationsfundament [gravity foundation]	16
2.1.1 Allmänt om gravitationsfundament	16
2.1.2 När används gravitationsfundament?	16
2.1.3 Detaljerad beskrivning av gravitationsfundament av betong	17
2.1.4 Beskrivning av gravitationsfundament av stål	18
2.1.5 Anläggning av gravitationsfundament	18
2.1.6 Tillämpad sammanfattning av gravitationsfundament	19
2.2 Monopile-fundament [monopile foundation]	20
2.2.1 Allmänt om monopile-fundament	20
2.2.2 När används monopile-fundament?	21
2.2.3 Detaljerad beskrivning av monopile-fundament	21
2.2.4 Anläggning av monopile-fundament	22
2.2.4 Tillämpad sammanfattning av monopile-fundament	23
2.3 Tripod-fundament [tripod foundation]	24
2.3.1 Allmänt om tripod-fundament	24
2.3.2 När används tripod-fundament?	25
2.3.3 Tillämpad sammanfattning av tripod-fundament	25
2.4 Fackverksfundament [jacket foundation]	26
2.4.1 Allmänt om fackverksfundament	26
2.4.2 När används fackverksfundament?	27
2.4.3 Tillämpad sammanfattning av fackverksfundament	27
2.5 Övriga fundament	28
2.6 Erosionsskydd	30
3 KÄLLOR TILL PÅVERKAN	33
3.1 Påväxt och rev-effekt	34
3.1.1 Bakgrund	34

3.1.2	Skillnader mellan havsområden	38
3.1.3	Skillnader mellan olika fundament	39
3.1.4	Anpassningar för att minimera eller optimera påverkan	40
3.2	Ljud under driftsskedet	45
3.2.1	Bakgrund	45
3.2.2	Skillnader mellan havsområden	48
3.2.3	Skillnader mellan olika fundament	49
3.2.4	Anpassningar för att minimera negativ påverkan	50
3.3	Hydrografiska förändringar	52
3.3.1	Bakgrund	52
3.3.2	Skillnader mellan havsområden	53
3.3.3	Skillnader mellan olika fundament	54
3.3.4	Anpassningar för att minimera negativ påverkan	55
3.4	Konstruktionsbuller	55
3.4.1	Bakgrund	55
3.4.2	Skillnader mellan havsområden	59
3.4.3	Skillnader mellan olika fundament	59
3.4.4	Anpassningar för att minimera negativ påverkan	60
3.5	Sedimentspridning under anläggning	62
3.5.1	Bakgrund	62
3.5.2	Direkteffekter av konstruktionsarbete vid Lillgrund vindpark	63
3.5.3	Skillnader mellan havsområden	64
3.5.4	Skillnader mellan olika fundament	65
3.5.5	Anpassningar för att minimera negativ påverkan	65
4	OPTIMERING AV FUNDAMENT	66
4.1	Sammandrag – gravitationsfundament	66
4.2	Sammandrag – monopile-fundament	67
4.3	Sammandrag – tripod-fundament	68
4.4	Sammandrag – fackverksfundament	69
4.5	Sammandrag – övriga fundament	70
4.6	Andra källor till påverkan	70
4.7	Relativ grad av inflytande på miljöpåverkan	71
4.8	Rekommendationer vid val av fundament	72
	Egen granskning	76
	Granskning genom Vindval	76
	Tack till	76

REFERENSER	77
Personlig kommunikation	85
Elektroniska källor	85
BILAGA 1	86

Sammanfattning

Studien syftar till att utgöra ett underlag för att beakta de miljömässiga skillnaderna mellan olika fundament i samband med planering av havsbaserad vindkraft. Detta avser påverkan på den marina miljön, dock inte sjöfågel, och baseras på kunskapsläget år 2007.

Fyra olika principer för fundament (fundamentmodeller) behandlas särskilt; gravitations-, monopile-, tripod- samt fackverksfundament. Fundamentens egenskaper redovisas och diskuteras utifrån dess miljöpåverkan inom fem områden; 1) påväxt och rev-effekt, 2) ljud under driftskedet, 3) hydrografiska förändringar, 4) konstruktionsbuller, 5) sedimentspridning under anläggningsfasen.

Beträffande påväxt konkluderas att fundamentets ytstruktur (stål, betong) är av mindre betydelse i ett längre perspektiv eftersom den initiala strukturen efter en tid blir överväxt av organismer som bildar en mer heterogen, lättbeväxt yta. Istället för fundamentet är det snarare salthalt, exponeringsgrad, djup, avstånd till land och ljusstillgång som avgör vilka organismer som kommer att dominera när det biologiska samhället stabiliserats efter några år. Generellt sett kan påväxten vid alla fundament för havsbaserad vindkraft förväntas bli dominerat av filtrerande djur, exempelvis blåmusslor. Ett undantag är silikonbaserad ytbehandling av betong, där större organismer kan ha svårigheter att etableras. Sådan ytbehandling har inte använts inom vindkraft men däremot vid motsvarande brofundament.

Förutsättningarna för en påtaglig rev-effekt (lokalt ökad förekomst av rörliga djur såsom fisk och kräftdjur) ökar med fundamentens strukturella komplexitet. Detta innebär att tripod- och fackverksfundament har större förutsättningar än monopile- och gravitationsfundament att bidra till påtagliga rev-effekter. Rev-effekt, och även påväxt, kan betraktas som negativt på skyddsvärda botten av sand eller lera där närhet till naturlig hårbotten (berg, sten) saknas, där nya arter kan introduceras och förändra de naturliga ekologiska förhållandena. I områden där en ökad biologisk mångfald och en ökad förekomst av fisk är önskvärd, kan rev-effekt och påväxt däremot betraktas som gynnsamma förändringar. För att förstärka rev-effekten kan erosionsskydd utformas särskilt för att skapa fler livsmiljöer.

Huruvida undervattensljud som avges från vindkraftverk under driftskedet kan innebära någon betydande miljöpåverkan under naturliga förhållanden är ännu inte helt klarlagt. Ljudet har initialt visat sig kunna påverka vissa organismer (musslor, fisk) under experimentella studier, samtidigt har tillvänjning påvisats under experiment och djurlivet kring befintliga vindkraftverk har visats vara rikligt. Mätvärden från befintlig havsbaserad vindkraft visar på särskilt höga ljudnivåer (frekvenstoppar) omkring 100 – 200 Hz, vilket är samma frekvenser som har visat initial påverkan genom experiment. Till sammanhanget hör även att samma ljudstyrka och samma frekvenser uppstår både naturligt under hård vind och från avlägsna lastfartyg. Fram tills dess att mer kunskap finns att tillgå kan det av försiktighetsprincip finnas anledning att tekniskt minimera ljudet från dessa frekvenser i områden med särskilda marinbiologiska värden, såsom förekomst av hotade

störningskänsliga djurarter. Det finns emellertid inget som tyder på att eventuell påverkan från driftljud är påtaglig bortom fundamentens närhet.

Utifrån ett begränsat underlag av mätdata tycks gravitationsfundament och monopile-fundament avge lågfrekvent ljud av liknande styrka, men med vissa skillnader i frekvensintervall. Monopile-fundament tycks avge högre ljudnivåer vid frekvenser över c:a 100 Hz. Det saknas mätdata från fackverksfundament men teoretiskt sett torde dessa avge ljud av lägre styrka, åtminstone inom de lägsta frekvenserna. Det är inte känt huruvida framtida turbiner och fundament kommer att avge en lägre eller högre ljudstyrka under driftskedet; en minskning av ljudstyrkan torde dock vara tekniskt möjlig att utföra om ambitionen föreligger.

Bottenförhållandena i havet är av stor betydelse för ljudets räckvidd, där grunt vatten och hårt bottenstrat medför att ljudet fortplantas längre. Även bakgrundsljudet är av betydelse och i tysta havsområden är en eventuell risk för miljöpåverkan större än i fartygstrafikerade områden. De språngskikt som bildas mellan vattenmassor av olika salinitet eller temperatur skiljer sig åt mellan olika havsområden och kan påverka spridning av högfrekvent ljud. Språngskiktens inverkan på ljudspridningen är emellertid marginell för *låga* frekvenser, såsom t ex vindkraft; detta eftersom våglängderna hos lågfrekvent ljud är stora i förhållande till djupet.

De hydrografiska förändringar som uppstår omkring ett fundament är små och kan endast förväntas vara av betydelse där etablering planeras i mycket smala vattenpassager. Gravitationsfundament är sannolikt den fundamentmodell som inverkar mest på den lokala hydrografen, några direkta jämförelser mellan olika fundament har dock inte gjorts.

Under anläggningsarbetet uppstår extrema ljudnivåer framförallt under pålning vilket krävs för de flesta fundamentmodeller – dock inte gravitationsfundament. Hur kraftiga ljudnivåer som uppnås beror av diametern hos de fundament som ska förankras, vilket medför att monopile-fundament generellt avger betydligt högre ljudnivåer än t ex fackverksfundament. Eftersom de extrema ljudnivåerna från pålning över stora avstånd kan vara skadliga för fisk och marina däggdjur är det av vikt att minimera störningen. Detta kan göras genom val av fundament, förebyggande skyddsåtgärder eller anpassade pålningsmetoder. Det är essentiellt att pålning inte företas under skyddsvärda fiskarters lekperioder.

Vid anläggning av gravitationsfundament krävs inte pålning men däremot muddring vilket medför spridning av sediment i vattnet. Kraftig sedimentspridning kan orsaka störning eller skada på känsliga marina organismer, såsom fiskyngel; störst risk för negativ miljöpåverkan uppstår vid muddring av kalkrika sediment, i stillastående vatten, samt där sedimentet innehåller miljögifter. Störningar från sedimentspridning kan minimeras genom försiktighetsåtgärder och god planering. I samband med vindkraft är omfattningen av muddring och sedimentspridning emellertid liten och kortvarig i förhållande till andra stora muddringsprojekt.

Studiens resultat ska vid varje specifik etablering appliceras på lokala förhållanden (hydrografi, bottenstrat och ekologiska samband) för att ge en indikation på vilken fundamentmodell som är att föredra ur miljösynpunkt, samt vilka tekniska och planeringsmässiga anpassningar som bör göras. Resultatet sammanfattas översiktligt i Tabell 6 och förslag på tillämpning ges i avsnitt 4.8.

Summary

The aim of this study is to provide an environmental perspective regarding the choice of foundations for offshore wind power, suggesting that differences in environmental impact should be involved in decision-making and development concerning future offshore wind power foundations. The study concerns only the marine environment, excluding seabirds, and is based on the level of knowledge available in 2007.

The study focuses on three different types of foundations; gravity- monopile- and jacket foundations. Also tripod- bucket- and floating foundations are mentioned. The different characteristics of the foundations are discussed based on their environmental impact in five different areas; 1) epifouling and reef-effects, 2) operational noise, 3) changes in hydrographical conditions, 4) noise during construction, and 5) dissolved sediment during construction.

Regarding epifouling, it is noted that the surface texture of the foundation (i.e. steel, concrete) is of less importance in the long run since the initial substrate soon will be covered with organisms, creating a rugged surface for later colonising organisms. It is rather the level of salinity, distance to shore, exposure, depth and turbidity of the water that decide which organisms that will dominate the different foundations after a few years. Generally all foundations for offshore wind power are expected to be dominated by filtering animals, such as blue mussels. A possible exception is if concrete is coated with a silicone product that limits larger organisms to establish on the foundations. This kind of surface treatment has not yet been used by the wind power industry but occurs on other submarine concrete constructions.

The potential for an evident reef-effect (local increased occurrence of mobile animals such as fish and crustaceans) increases with the complexity of the foundation structure. Hence, tripod and especially jacket foundations have better possibility to contribute to the reef-effect than monopile- and gravity foundations.

Reef-effect, as well as epifouling, may be considered negative in some marine environments, such as possible valuable areas without any natural occurrence of hard substratum. In such areas new species may be introduced, changing the local ecological conditions. However, in many areas an increased level of biological diversity is viewed as a positive change, and here reef-effect and epifouling may be considered favourable. To amplify the reef-effect, scour protection devices may be designed to create more habitats.

Operational noise from offshore wind farms has been shown to initially affect some organisms (mussels, fish) during experimental studies in small containers. Whether corresponding operational noise in field and during natural circumstances can cause any environmental impacts is not yet fully understood. Available information indicates that there is a common sound level peak from wind turbines at frequencies of 100 – 200 Hz. In the same frequency range cargo ships emit higher sound than wind power even over several kilometres distance. Based on the present lack of certainty, it can be motivated to minimize the sound at these frequencies in

areas with special biological values, such as endangered organisms sensitive to stress. However, there are no indications that operational noise may significantly effect the environment beyond the vicinity of each foundation.

Based on a limited number of measurements it seems as if gravity and mono-pile foundations emit noise of similar amplitude, but the frequency range of the gravity foundation is generally lower. There are no measurements of jacket foundation but theoretically these should emit less noise, at least within the lower frequency range. Even if little is known about future turbines and foundations, it should be technically possible to decrease the emitted noise level.

The local conditions of the seabed have a large impact on the propagation of the noise, where shallow water and hard substratum allow the sound to propagate longer distances. The background noise is also of importance and in quiet areas there is theoretically a higher risk of environmental impacts than in areas with heavy ship traffic.

Changes in the hydrographical conditions around a foundation are small and are expected to be of importance only in very narrow water passages. The gravity foundation probably has the largest impact on the local hydrography. However, no direct comparisons between the different foundations have been made.

During the construction period extreme noise levels may occur, especially during pile-driving which is needed for most foundations except for gravity foundations. The noise level depends on the diameter of the piles that are driven into the sediment as well as the piling method. This means that the monopile foundation generally emits higher construction noise levels than jackets, while gravity foundations emit the least construction noise.

Since the extreme noise levels from pile-driving, covering large areas, can be harmful to fish and marine mammals it is very important to minimize this disturbance. This can be done by the choice of foundation, by precautionary measures and by adapted methods of pile-driving. It is of great importance not to perform pile-driving during spawning periods of commercially valuable fish species.

Gravity foundations need no pile-driving but require dredging, which disperses dissolved sediment in the water. High concentration of dispersed sediment can disturb or harm sensitive marine organisms such as juvenile fish. The highest risk of negative impact on the environment is dredging calcareous sediments, dredging in stagnant water and where the sediment contains toxic substances. The impact on the environment from dredging can be minimized by precautionary measures and good planning. However, the impact of dredging and sediment transport related to offshore wind power is small compared to other large dredging projects that have been carried out in Sweden without any documented any sustained environmental impacts.

The result of this study is to be applied on local conditions (e.g. hydrography, bottom substrate and ecological circumstances) at every specific site, hereby indicating what type of foundation to prefer from an environmental point of view, and also to state what technical as well as planning adaptations that ought to be applied.

1 Inledning

En omfattande utbyggnad av havsbaserad vindkraft i norra Europa kan förväntas inom den närmaste framtiden. Idag (2007) är 25 havsbaserade vindparker tagna i drift medan mer än 30 vindparker är planerade eller tillståndsgivna, se Tabell 1. Projektering av havsbaserad vindkraft inbegriper i regel en omfattande miljöprövning, där bland annat förväntade effekter på marina växt- och djurarter behandlas. De miljökonsekvensbeskrivningar som tagits fram inom svensk projektering har i många fall behandlat den marina miljön ingående, men har inte i detalj behandlat vindkraftverkens fundament. Det råder stora tekniska skillnader mellan olika fundament, där olika modeller har sina speciella fördelar beroende på rådande omgivningsförhållanden. Det råder dessutom betydande skillnader beträffande olika fundament miljöpåverkan, vilket inte på ett tydligt sätt involverats i miljöprövningarna.

Att val av fundament skett först efter tillståndsgivning har framförallt sina orsaker i att den geotekniska undersökning av botten som krävs är kostsam samt att den snabba teknikutvecklingen gynnar ett senare ställningstagande i frågan. Val och utformning av fundament har hittills skett uteslutande på tekniska och ekonomiska grunder. Syftet med denna studie är att även marinbiologiska och ekologiska miljöaspekter på fundament ska kunna vägas in tidigt i planeringen – därigenom ökande precisionen hos framtida miljökonsekvensbeskrivningar och främjande en optimerad planering av havsbaserad vindkraft.

Studien avser att jämföra fundamentens förhållande till varje påverkanskälla (såsom rev-effekt, ljud, förändring av hydrografi) – oberoende om denna påverkanskälla sedan innebär en betydande miljöpåverkan eller inte.

Läsanvisningar

Denna Vindval-studie vänder sig särskilt till vindkraftsprojektörer under arbete med miljökonsekvensbeskrivning och planering, samt till handläggare och beslutsfattare som är verksamma inom tillståndprocessen. Kapitel 2 ger en teknisk översikt av olika fundamentmodeller och kapitel 3 behandlar hur de olika fundamenten förhåller sig till miljöpåverkan. I kapitel 4 sammanfattas resultaten med förslag till användning. Det är av stor vikt att denna Vindval-studie *betraktas i sin helhet vid användning*; att inte kapitel 4 och Tabell 6 används utan förtrogenhet med det övriga innehållet. Slutsatserna gällande vilka fundament som medför mer respektive mindre miljöpåverkan ska tolkas utifrån vetskapen att *hela* denna ”mer-eller-mindre skala” i vissa fall kan ligga inom vad som bedöms vara en ringa miljöpåverkan.

Studien avser inte att återge hela kunskapsläget beträffande de potentiella påverkanskällorna (kapitel 3) och studien är baserad på nuvarande (2007) teknik och användningsområden. Uppgifter och rekommendationer bör därför korrigeras i takt med ett ökat kunskapsläge och teknisk utveckling.

Tabell 1a. Förteckning över installerad (2007) havsbaserad vindkraft i Nordeuropa.

VINDPARK i drift / installerade	OMRÅDE	ANTAL VERK	FUNDAMENT	BOTTENSUBSTRAT	DJUP (m)	AVSTÅND FRÅN LAND (km)
Breilting	Bälthavet	1			2	0,5
Nysted	Bälthavet	72	gravitationsfund. med erosionsskydd	sand m skal & grus	5 - 9,5	10
Sams ø	Bälthavet	10	monopile	mjuk botten	20	3,5
Tune knob	Bälthavet	10	monopile		20	3,5
Vindeby	Bälthavet	11	gravitationsfundament		3 - 5	1,5
Arklow Bank	Irländska sjön	7	monopile		2 - 5	10
Barrow	Irländska sjön	30	monopile	mjuk botten	21 - 23	7
Burbo Bank	Irländska sjön	25	monopile	hård botten	3,7 - 7,5	6,4
North Hoyle	Irländska sjön	30	monopile	sand	c.a 10	6
Blyth Offshore	Nordsjön	2	monopile		6 - 11	0,8
Egmond aan Zee	Nordsjön	36	monopile		19 - 22	10
Ems-Emden	Nordsjön	1			3	0,04
Horns rev	Nordsjön	80	monopile med erosionsskydd	sand	6,5 - 13,5	14 - 20
Irene Vorrink (Jisselmeer)	Nordsjön	28			5	0,02
Kentish Flats	Nordsjön	30	monopile med kraftigt erosionsskydd	mjuk lera	6 - 8	8,5
Lely (Jisselmeer)	Nordsjön	4	monopile		5 - 10	0,75
Roeland	Nordsjön	8			grunt	nära land
Scroby Sands	Nordsjön	30	monopile med nedsänkt erosionsskydd	lera	4 - 8	2,3
Beatrice	Nordsjön (skotska östkusten)	2	fackverksfundament	sand	45	5,5 - 9,5
Fredrikshavn	Norra Kattegatt	4	bucket-fundament			
Lillgrund	Öresund	48	gravitationsfund. med erosionsskydd	sand & kalksten		7
Middelgrunden	Öresund	20	gravitationsfund. med erosionsskydd	sand & sten	3 - 6	3
Bockstigen	Östersjön (Gotland)	5	monopile		6	3
Utgrunden I	Östersjön (Kalmarsund)	7	monopile	rullstensblandad botten	7 - 10	8
Yttre Stengrund	Östersjön (Kalmarsund)	5	monopile	rullstensblandad botten	6 - 10	5
Svanne I (nedmonterat)	Östersjön (Nogersund)	1	tripod i betong		6	0,3

Tabell 1b. Förteckning över en del av de havsbaserade vindparker som är under planering, tillståndsgivna eller under konstruktion i Nordeuropa (2007).

VINDPARK	OMRÅDE	ANTAL VERK	FUNDAMENT	BOTTENSUBSTRAT	DJUP (m)	AVSTÅND FRÅN LAND (km)
Under planering / konstruktion						
Finngrund	Bottnhavet	100 - 200		sten & sand	ned till 20	
Storgundet	Bottnhavet	c.a 50		sten & sand	ned till 20	
Klockläman	Bottnvikens	c.a 100		sand & grus		
Mecklenburg - Vorpommern	Bälthavet		gravitationsfundament	hard lera	5 - 12	
Rødsand II	Bälthavet					
Sky 2000	Bälthavet					
Rhyl Flats	Irländska sjön	25	monopile			8
Robin Rigg	Irländska sjön	60	monopile		3 - 21	9
Skottarevet	Kattegatt	30		lera & mindre sten	20 - 30	7.5
Stora Middelgrund	Kattegatt	108		grus & sten	12 - 30	30
Alpha Ventus	Nordsjön	12	tripod & fackverksfundament		30	43 - 50
Borkum Rifgrund	Nordsjön	157				34
Breedt/Mardyck Bench	Nordsjön					
Butendiek	Nordsjön	80			20	34
Cromer	Nordsjön	30				7
Gunfleet Sands	Nordsjön	22	monopile med erosionsskydd	sand		7
Horns rev II	Nordsjön	95	monopile			
Jade	Nordsjön	1			5	0,6
Lynn/Inner Doweing	Nordsjön	54	monopile		6 - 13	5
Q7	Nordsjön	60			20 - 24	23
Solway Firth	Nordsjön					
Thornton Bank	Nordsjön	60	gravitationsfundament			27
Vlaakte van Raan	Nordsjön					
Taggen/Handbukten Offshore	Östersjön	60-83		sand & sten	10 - 35	12
Trolleboda	Östersjön	50				
Klasätern	Östersjön (Gotland)	14	gravitationsfund. eller monopile			
Utgrund II	Östersjön (Kalmarsund)	24	monopile	rullstensblandad botten		
Kriegers flak	Östersjön utsjö	128			15 - 42	

2 Fundament

I detta kapitel ges en beskrivning av olika fundament för förankring av havsbaserade vindkraftverk. Beskrivningen fördelas på modellerna gravitationsfundament, monopile-fundament, tripod, fackverksfundament samt övriga fundament. En återkoppling till ekologisk påverkan ges i kapitel 3.

Beskrivningarna baseras på information från expertis inom offshore-branschen samt tekniska utvärderingar, detaljbeskrivningar och konstruktionsmanualer. Specifik teknisk information har erhållits från Vattenfall och E.ON, omfattande framförallt de i dagsläget (2007) vanligaste fundamentmodellerna gravitationsfundament och monopile-fundament. Mått och annan detaljerad information ska endast ses som exempel eftersom fundamentens utformning och dimensioner varierar från fall till fall utifrån rådande förhållanden och belastning. Trenden mot allt högre installerad effekt (MW) medför att framtida fundament kan förväntas bli generellt större än de fundament som används idag (2007).

I avsnitt 2.6 ges en allmän beskrivning av erosionsskydd [score protection], vilket särskilt används för gravitationsfundament men i vissa fall även för andra fundamentmodeller. Information om anoder, vilka används i samband med korrosionsskydd [cathodic protection], återfinns i Faktabox 1.

Faktabox 1. Korrosionsskyddande anoder

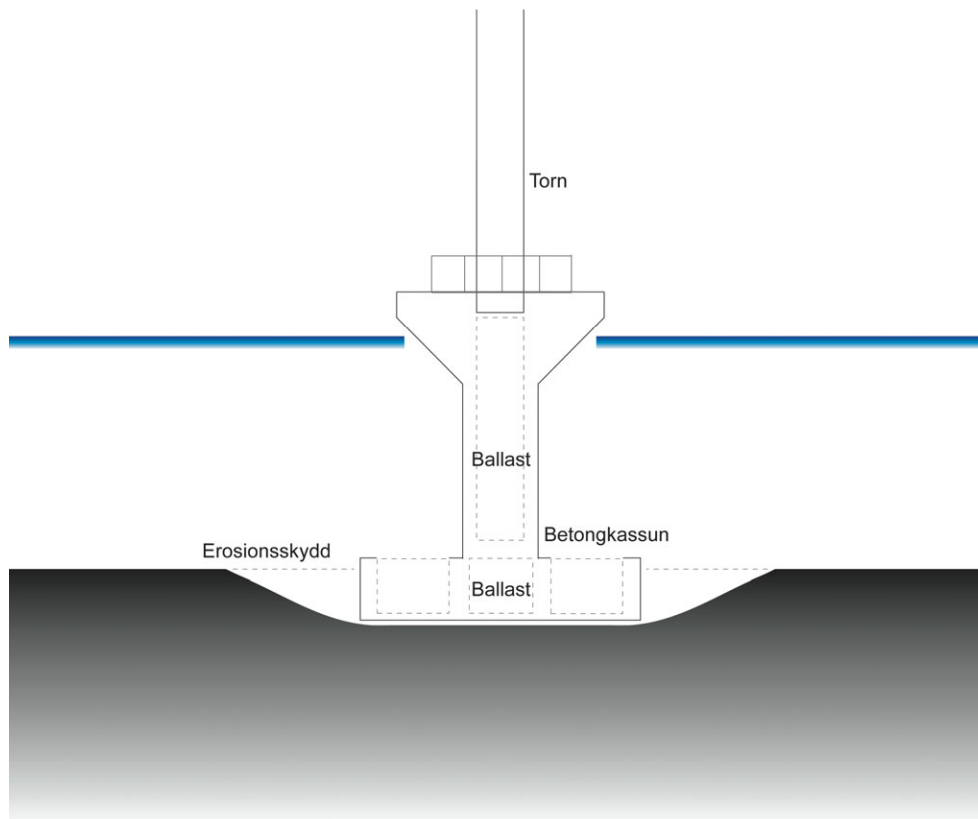
För att förhindra oxidering och korrosion av metaller används ofta katodiskt skyddande anoder. Anoderna utgörs av metallstavar som fästes utanpå fundamenten och som står i kontakt med de metalliska delar av fundamentet som ska skyddas (t ex pile och transition piece beträffande pålade fundament respektive armeringsjärn beträffande gravitationsfundament av betong). De anoder som används vid Lillgrund vindpark (gravitationsfundament) består av 1,5 m långa stavar om 64 kg anodisk metallörening, innehållande framförallt zink (Zn) och till liten del Indium (In), koppar (Cu), kadmium (Cd), kisel (Si), järn (Fe) samt aluminium (Al) (Grahns pers. komm.).

Anoderna förbrukas och ersätts med ett tidsintervall av storleksordningen 10 år. Flera av de verksamma ämnena är toxiska; utsläppen är dock relativt små per tidsenhet. Korrosionsskyddande anoder är inte specifika för vindkraft utan används allmänt vid skydd av stålkonstruktioner i marin miljö.

Definitioner

SGS	Societe Generale de Surveillance SA
DWIA	Danish Wind Energy Association
WPD	Wind Power Development
EWEA	European Wind Energy Association
OES	Offshore Environmental Solutions
ØDS	Ødegaard & Danneskiold-Samsøe A/S

2.1 Gravitationsfundament [gravity foundation]



Figur 1. Schematisk skiss över gravitationsfundament av betong. Skalan är ej proportionerlig; för detaljer och dimensioner se avsnitt 2.1.3.

2.1.1 Allmänt om gravitationsfundament

Som ges av namnet fungerar ett gravitationsfundament genom att med sin tyngd hålla vindkraftverket i upprätt position. En bas bestående av en betongkassun eller stålbehållare försänks i botten varpå ballast av sten, betong eller annat material av hög densitet fylls på upp till och över nivån för den omgivande havsbotten. Gravitationsfundament kräver i stort sett alltid någon form av erosionsskydd för att hindra att vattenrörelser underminerar förankringen (SGS 2005). För att skydda fundamentet mot skador från packis under kalla vintrar är gravitationsfundamenten ofta timglasformade så att den övre vinkeln kan bryta bort is.

2.1.2 När används gravitationsfundament?

Gravitationsfundament av betong har en relativt stor bas vilket medför en hög belastning i sidled från vattenrörelser och för traditionella gravitationsfundament stiger kostnaden (tillverkning och installation) exponentiellt med djupet. Således är gravitationsfundament av betong (Figur 1) huvudsakligen ett alternativ för grundare bottenar. Ekonomiskt sett är de hittills (2007) beprövade versionerna av gravitationsfundament av betong lämpliga ned till c:a 10 m (DWIA 2003; WPD 2005). Tekniskt sett är dock djupare installationer möjliga (SGS 2005) och det

finns prototyper anpassade för 20 – 30 m, vilka planeras för ett belgiskt vindkraftsprojekt på Thornton Bank i Nordsjön (EWEA 2007). För att effektivisera djupgåendet har även gravitationsfundament av stål tagits fram (Figur 2; se avsnitt 2.1.3) (DWIA 2003).

Gravitationsfundament kan anpassas till flera olika bottenstrukturer genom justering av basens diameter och eftersom att fundamentet inte kräver någon djupare försänkning. Detta medför att gravitationsfundament är väl anpassat för såväl stenbotten och blockrik terräng som stabilt (välpackat) sediment. Vid bottnar av genomgående löst sediment såsom lera är gravitationsfundament däremot inte lämpligt. (SGS 2005)

Gravitationsfundament nyttjas vid exempelvis vindparkerna Nysted (Bälthavet), Middelgrunden (Öresund), Vindeby (Bälthavet), Tunø Knob (Bälthavet) och Lillgrund (Öresund).

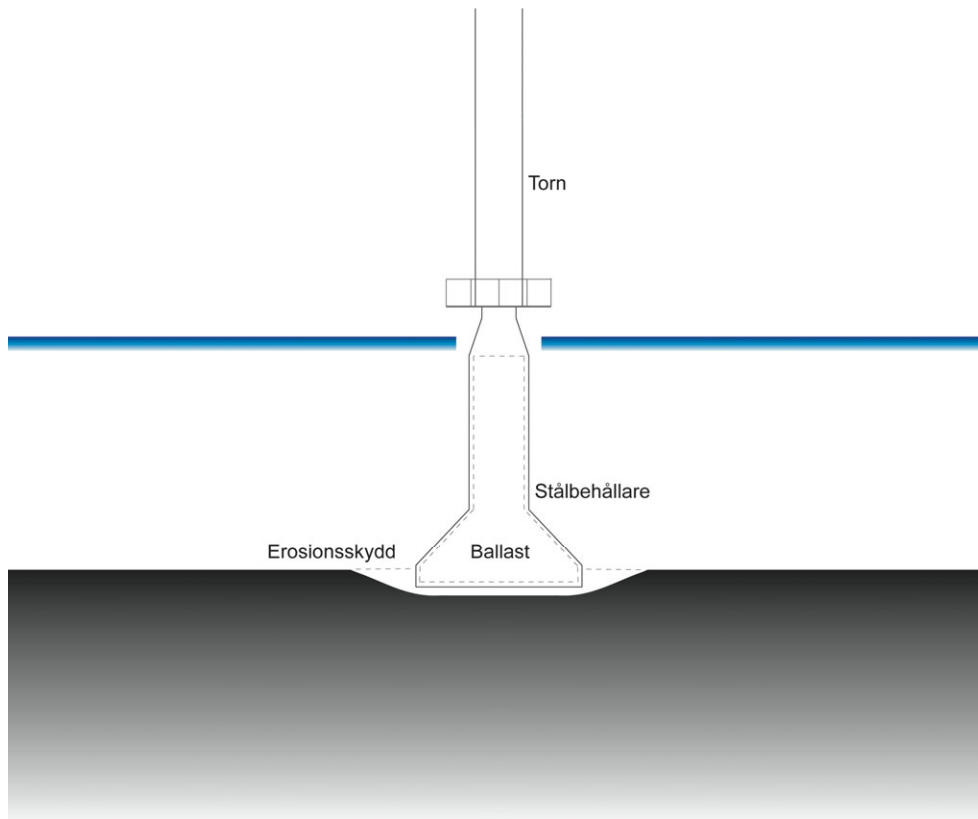
2.1.3 Detaljerad beskrivning av gravitationsfundament av betong

Beroende av vattendjup, exponering (vågor och strömmar), drivis samt tornets storlek varierar proportionerna för varje enskilt gravitationsfundament. Fundamenten vid Middelgrundens och Lillgrundens vindparker står inom djupintervallet 4 – 9 m i det strömsatta Öresund och har betongkassuner med diametern 16,7 – 17,6 respektive 16,5 – 19,0 meter (Grahn pers. komm.; Sørensen m.fl. 2002). Vid Middelgrunden är fundamentens vikt 1 800 ton inklusive ballast (Sørensen m.fl. 2002). Ballasten som används vid gravitationsfundament kan till exempel bestå av sand, sten, betong eller järnmalm (SGS 2005).

Vid Lillgrund är den hexagonala betongkassunen försänkt 2,5 m och sticker upp 0,6 m från botten. Kassunen vilar på en stenbädd och är i sin tur fylld med ett underliggande lager av grus ($\varnothing = 35 - 350$ mm) samt ett överliggande lager av större stenblock (200 – 1 200 kg per sten). Upp från kassunen reser sig fundamentet genom en ballastfylld betongpelare med c:a 5 m diameter som mot ytan vidgas koniskt (55° vinkel) till en plattform på 10 m i diameter. Den armerade betongen är slät (gjuten i stål/träform) och ej målad. (Grahn pers. komm.)

För att motverka korrosion används anoder av huvudsakligen zink, de ledande metallerna fördröjer rostangrepp på armeringen inne i betongen. Anoderna förbrukas med tiden och byts ut i storleksordningen vart 10:e år (Grahn pers. komm.).

Erosionsskyddet vid Lillgrund sträcker sig 6 – 8 m ut från den försänkta betongkassunen vilket medför en total diameter på upp till 35 m. Ytterst utgörs erosionsskyddet av grus ($\varnothing = 35 - 350$ mm) och längre in mot pelaren används stenblock (30 – 350 kg per sten). (Grahn pers. komm.).



Figur 2. Schematisk skiss över gravitationsfundament av stål. Skalan är ej proportionerlig; för detaljer och dimensioner se avsnitt 2.1.4.

2.1.4 Beskrivning av gravitationsfundament av stål

Ett alternativ till gravitationsfundament med kassun av betong är gravitationsfundament med en mindre och lättare bas bestående av en stålbehållare. Stålbehållaren, som är av storleksordningen $\varnothing = 15$ m för 4 – 10 m vattendjup, fylls av material med särskilt hög densitet såsom exempelvis olivin (magnesium-järnsilikat) (DWIA 2003). Fundamentet anläggs på en förbehandlad bädd av grus och behöver i regel skyddas genom erosionsskydd.

De stora fördelarna med gravitationsfundament av stål jämfört med betongkassuner är den lättare hanteringsvikten samt att kostnaden för tillverkning och installation inte behöver stiga exponentiellt med djupet (DWIA 2003). Fundamentet kan således vara attraktivt vid större djup och där installationskostnaderna annars är höga.

2.1.5 Anläggning av gravitationsfundament

Vid anläggning av gravitationsfundament förbehandlas botten i flera steg; 1) muddring, 2) stenläggning, 3) infästning av fundament, samt 4) fyllning av ballast.

Muddringsarbetet innebär att en fördjupning av precisa mått grävs ut i sjöbotten via muddringsfartyg. Vid förekomst av stora block kan dessa krossas genom sprängning. I detta fall kan en mindre försprängning tillämpas för att skrämja bort fisk (Peter Madsen Rederi 2006). Vid Lillgrund företogs muddringen med

grävskopa från fartyg och utfördes i två separata steg – grovmuddring ned till 0,5 m över beräknat djup och sedan precisionsmuddring (Peter Madsen Rederi 2006). Vid Lillgrund muddrades och avlägsnades omkring 1 500 – 2 000 ton sediment per fundament, fördelat på ett varierande antal dagar beroende av lokala bottenförhållanden och väderlek. De muddrade massorna deponerades på land.

Efter avslutad muddring anläggs en bädd av stenkross för fundamentet att vila på. Stenen sprids över det muddrade området med hjälp av en bom manövrerad från fartyg, resulterande i en plan stenkross som vid Lillgrund var c:a 0,3 m tjock och innehöll c:a 130 m³ stenkross per fundament.

Då stenkrossen är fullbordad förs gravitationsfundamentet på plats med hjälp av fartyg med kran, varpå ballasten (se 2.1.2) därefter kan fyllas på. För att dämpa stötarna vid ballastfyllningen kan känsliga delar av fundamentet skyddas med träplank (Grahn pers. komm.).

Under hela anläggningsarbetet hålls fartygen på position genom antingen ben [spud legs], datorstyrda propellrar eller datorstyrda ankarlinor. Efter varje avklarad moment utförs inspektioner med dykare.

2.1.6 Tillämpad sammanfattning av gravitationsfundament

Gravitationsfundament innebär ett anspråkstagande av en större bottenyta än andra fundament, den naturliga botten förstörs och ersätts av ett artificiellt substrat bildande nya förutsättningar för biologiska organismer. Under anläggningsarbetet utförs sedimentspridande verksamhet vilket kan medföra en lokal störning. Nedan följer en punktvis sammanfattad redogörelse för biologiskt relevanta uppgifter angående gravitationsfundament. Informationen utgår till stor del från förhållandena vid Lillgrund, men då närmast identiska fundament används vid både Nysted och Middelgrunden kan även detaljförhållandena från Lillgrund betraktas som av generellt intresse.

Struktur (per fundament)

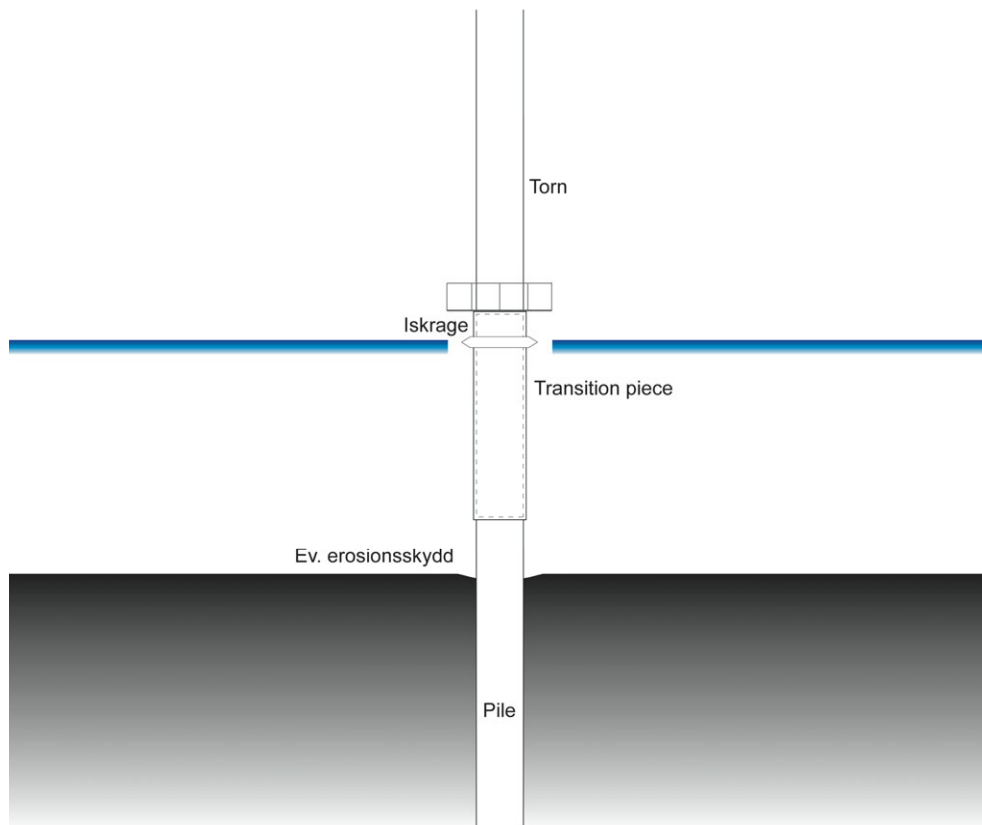
- Fundamentpelare: skapar en artificiell vertikal bottenyta av slät betong
- Konisk plattform: skapar ett artificiellt överhäng
- Eventuell betongkassun: skapar en artificiell horisontell bottenyta (omkring 250 m²) av stor sten, upphöjt 0,5 – 1 m över botten
- Eventuell stålbehållare: skapar en artificiell bottenyta av ytbehandlat stål, eventuellt täckt av horisontellt erosionsskydd (sten)
- Erosionsskydd: skapar en artificiell horisontell bottenyta (omkring 650 m²) av sten och grus
- Anoder: utvändiga stavar innehållande framförallt zink, vilka avsöndras och byts ut med tiden (se Faktabox 1)

Konstruktionsarbeten (per fundament)

- Muddring av storleksordningen 1 500 – 2 000 ton muddermassor: spridning av sediment, pågående under flera arbetsdagar
- Eventuell sprängning och borrarbete: höga ljudnivåer

- Spridning och utjämning av stenkross: buller, pågående en till ett par arbetsdagar
- Fyllning av ballast: buller
- Fartygsaktivitet inklusive förankring: buller och lokal störning av botten

2.2 Monopile-fundament [monopile foundation]



Figur 3. Schematisk skiss över monopile-fundament. Skalan är ej proportionerlig; för detaljer och dimensioner se avsnitt 2.2.3.

2.2.1 Allmänt om monopile-fundament

Monopile-fundament (Figur 3) består av ett enkelt stålrör (pile) som försänks djupt ned i botten genom pålning eller borrhning. Fundamentets diameter och förankringsdjup kan anpassas efter belastningen. Tekniken är relativt enkel och kräver i regel inte någon förbehandling av botten, däremot krävs pålningsredskap med stor lyftkapacitet under anläggandet. Även om vattenrörelser kan gräva ut sedimentet invid botten är monopile-fundament inte lika beroende av erosionsskydd som gravitationsfundament. Detta eftersom eventuell erosion kan kompenseras för genom att vid anläggandet förankra fundamentet lika mycket djupare ned i botten som kan beräknas grävas ut genom erosionen (Dahlén pers. komm.).

2.2.2 När används monopile-fundament?

Monopile-fundament kan användas vid bottensubstrat såsom stenblandad botten, sand eller lera med fast underliggande skikt. Tekniken är dock mindre lämplig vid hög förekomst av block, vid berghäll eller där mjuk lera förhärskar i alla skikt (SGS 2005). Vid stenig botten eller enstaka block används borrar för att möjliggöra fortsatt pålning. Monopile-fundament har hittills uppgetts vara ett ekonomiskt alternativ ned till djup på 20 – 25 m (SGS 2005; WPD 2005); skillnader föreligger dock mellan olika havsområden och bottenförhållanden. I Västerhavet grundas konstruktionens dimensioner för ett givet djup på belastning från havsrörelser, såsom vågor, medan istället det kraftiga trycket från packis reglerar dimensionerna för monopile-fundament i Östersjön (DWIA 2003). Detta medför att kostnadsökningen per djup stiger brantare i Östersjön än i Västerhavet och andra isfria havsområden.

I områden med rörelser i sedimentet, såsom drivande sandbottnar, har monopile-fundament särskilda fördelar eftersom fundamentet försänks djupt (10 – 40 m) ned i bottenmaterialet (SGS 2005).

Exempel på vindparker med monopile-fundament är Horns rev (Nordsjön), Utgrunden I (Östersjön), Arklow Bank (Irländska sjön), Scroby Sands (Nordsjön), Kentish Flats (Nordsjön).

2.2.3 Detaljerad beskrivning av monopile-fundament

Utformningen av monopile-fundament är relativt enkel i jämförelse med andra fundament. Monopile-fundamentet består av en lång ihålig stålcyllinder (pile) som förs ned i botten varpå en liknande stålcyllinder (transition piece) fästs som en hylsa vilken når upp c:a 10 m över vattenytan (Dahlén pers. komm.). Kopplingen mellan pile och transition piece förstärks med cementblandning (grout protection).

Förankringsdjupet, fundamentets diameter och stålets tjocklek bestäms av bottensubstrat, djup, turbinens vikt, tornets höjd samt belastningen från strömmar, vågor och is. Vid de första etableringarna av storskalig havsbaserad vindkraft har monopile-fundamentens diameter varit omkring 3 – 4 m (DWIA 2003), den tekniska utvecklingen mot ökad storlek på turbinerna driver dock upp kraven på fundamenten och diametern ökar. För de 3 MW vindkraftverk som planerades på c:a 20 m djup vid Utgrunden II (Östersjön) har det beräknats att eventuella monopile-fundament kräver en diameter på 5,4 m och ett förankringsdjup på 23 m ned i bottensedimentet (Dahlén pers. komm.), vilket genererar en vikt på 490 ton stål per fundament. Motsvarande har det för monopile-fundamenten vid tyska Borkum Riffgrund (Nordsjön) beräknats att en diameter på 6 m krävs för 4,5 MW vindkraftverk i 30 m djupt vatten, medförande en vikt av 700 ton stål per fundament (WPD 2005). För den senaste versionen havsbaserade vindkraftverk kan det antas att monopile-fundamenten kommer att vara av en diameter på omkring 6 m (EWEA 2007).

Det stål som används för monopile-fundament är i omkring 50 – 100 mm tjockt och kan liknas vid fartygsstål. För att förhindra korrosion används anoder (se Faktabox 1) och hela eller delar av fundamentet målas med korrosionsskyddande epoxi och täckfärg utan påväxthämmande komponenter (anti-fouling) (Dahlén

pers. komm.). Vid exempelvis Kentish Flats behandlas endast den övre delen av fundamentet (transition piece) med korrosionsskydd och färg, medan stålroret (pile) är obehandlat och skyddas genom anoder (EWEA 2007). Tekniken med monopile-fundament är väl beprövad inom offshore-branschen (t ex broar, hamnar och oljeplattformar) och livslängden för konstruktionerna beräknas generellt till åtminstone 50 år (DWIA 2003).

Den strömförande kabeln från generatorm ledas inuti fundamentet ned till övergången mellan pile och transition piece, varpå kabeln leds ut och vidare till havsbotten genom ett hölje utanpå fundamentet. Vanligen används 33 kV trefaskablar växelström (AC), vilka vid hög belastning potentiellt kan avge ett mindre magnetiskt fält samt ett inducerat elektriskt fält (Gill m.fl. 2005).

För att skydda fundamentet mot påfrestningar från eventuell packis kan en iskrage monteras vid vattenlinjen. För Utgrunden II föreslogs en konformad iskrage av rostfritt stål; c:a 45° vinkel.

2.2.4 Anläggning av monopile-fundament

Anläggning av monopile-fundament kräver i allmänhet inte någon förbehandling av bottenytan (DWIA 2003), däremot krävs mycket kraftiga pålningsredskap.

Anläggandet påbörjas genom att ett fartyg eller pråm placerar sig ovanför infästningspunkten och hålls vid position, exempelvis via datorstyrda ankarlinor. Därefter sänks fundamentets pile till position via kranar och en hydraulisk hammare (pile-driver) förs på plats. Pålningen sker genom tunga slag där styrka och slagfrekvens anpassas efter rådande förhållanden tills dess att fundamentet nått önskat djup ned i sedimentet. Vid förekomst av block eller annat ogenomträngligt substrat avbryts pålningen och ett borrhuvud sänks ned i den ihåliga cylindern för att ta sig igenom materialet, varpå pålningen kan återupptas. Antalet slag, slagens styrka och behovet av borrar eller sprängning är starkt beroende av botten-substrat, förankringsdjup samt fundamentets diameter och kan således variera stort både mellan olika vindparker och mellan enskilda fundament. Efter avslutad pålning förs monopile-fundamentets övre del (transition piece) på plats och anläggningsarbetet kan därefter avslutas. (Dahlén pers. komm.).

Under anläggandet av monopile-fundament ($\varnothing = 3$ m) vid Utgrunden I (år 2000) tog pålningen av de enskilda fundamenten 1 – 4 timmar. Vid ett av fundamenten utfördes mätningar vilka visade att slagfrekvensen skedde upptrappande och uppmättes till 2 – 30 slag per minut; totalt 1320 slag. Genom hydrofoner som placerats 30, 320, 490 respektive 760 meter från ett fundament under pålning uppmättes ett ljudspektrum med förhöjd ljudnivå mellan frekvenserna 4 och 20 000 Hz. Högst ljudnivå uppmättes vid 300 Hz där ljudnivån SEL (Sound Exposure Level) var 184 dB re 1 μ Pa vid 30 m avstånd. Den högsta uppmätta sammanlagda ljudnivån (Peak Pressure) var 203 dB re 1 μ Pa vid 30 m avstånd, vilket hade avtagit till 183 dB re 1 μ Pa vid 320 m avstånd. (ØDS 2000).

Vid anläggandet av monopile-fundamenten ($\varnothing = 4$ m) vid North Hoyle vindpark (Irländska sjön; djup 7 m) uppmättes ljudnivåer som beräknats härröra från ett källjud (Source Level) på upp till 262 dB re 1 μ Pa vid 1 m. Frekvensintervallet var

c:a 40 – 1 000 Hz. Motsvarande ljudnivåer (Source Level) vid Horns rev vindpark (Nordsjön; djup 9 m) var på 215 dB re 1 μ Pa vid 1 m. (Nedwell & Howell 2004)

2.2.4 Tillämpad sammanfattning av monopile-fundament

Monopile-fundament innebär endast ett litet anspråkstagande av den naturliga bottenmiljön, i synnerhet där erosionsskydd inte behövs. Den enkla strukturen (en cylinder av stål) innebär jämfört med andra fundament en minimal strukturell komplexitet för marina organismer. Däremot medför anläggningsarbetet mycket kraftiga ljudnivåer vilka kan vara direkt skadliga för marina organismer i omgivningen. Nedan ges en punktvis sammanfattad redogörelse för biologiskt relevanta uppgifter angående monopile-fundament. Uppgifterna är ett sammandrag från flera olika källor avseende både etablerade och planerade vindkraftverk, detaljer och dimensioner ska därför endast ses som exempel.

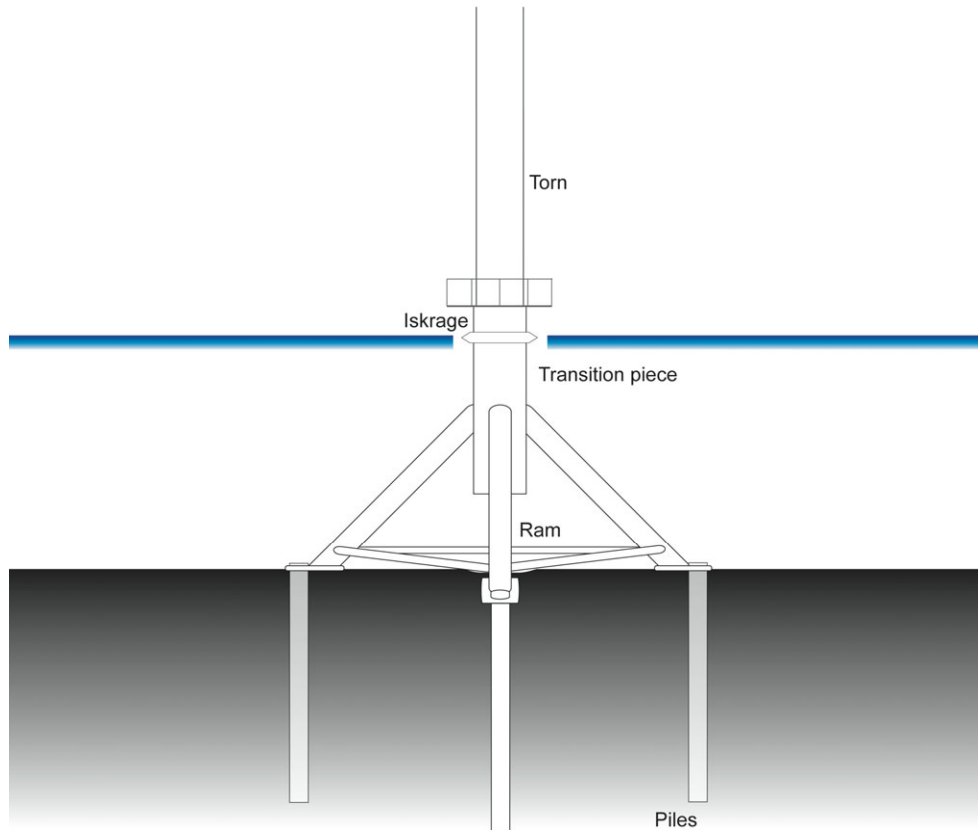
Struktur (per fundament)

- Fundamentpelare: skapar en artificiell vertikal bottenyta av stål målad med täckfärg (utan påväxthämmande komponenter)
- Iskrage: skapar ett artificiellt överhäng vid vattenytan
- Eventuellt erosionsskydd: skapar en artificiell horisontell bottenyta av sten och grus
- Utvändig kabel i hölje: kan innebära ett mindre magnetiskt fält och ett inducerat elektriskt fält längs med kabeln utanpå fundamentet
- Anoder: utvändiga stavar innehållande framförallt zink, vilka avsöndras och byts ut med tiden (se Faktabox 1)

Konstruktionsarbeten (per fundament)

- Pålning: mycket höga ljudnivåer i pulser, pågående 1+ timmar
- Eventuell borring: lokal sedimentspridning samt höga ljudnivåer
- Fartygsaktivitet inklusive förankring: buller och lokal störning av botten

2.3 Tripod-fundament [tripod foundation]



Figur 4. Schematisk skiss över tripod-fundament av stål. Skalan är ej proportionerlig; för detaljer och dimensioner se avsnitt 2.3.

2.3.1 Allmänt om tripod-fundament

Tripod-fundament (Figur 4) kan beskrivas som en monopile som leder ned i vatten, eventuellt ända ned till botten, och övergår till en triangulär ram av stålbeams (transition piece) vilken i sin tur är fäst i sedimentet genom piles av mindre diameter än ett enkelt monopile-fundament. Ramen medför att belastningen kan fördelas över flera infästningspunkter och en större bottenyta jämfört med monopile-fundament. Övergången kan också vara placerad över ytan så att tre enkla piles går ned genom vatten till sina fästen.

Den tekniska designen för ett tripod-fundament kan skilja sig avsevärt mellan tillverkare och efter rådande förhållanden såsom djup, belastning och bottenstrukt. En viktuppskattning som gjorts för en tripod (3 MW turbin) i 20 m djupt vatten och bottenstrukt av medelfast sand beräknar ett behov av 535 ton stål (SGS 2005); en annan viktuppskattning gällande 40 m djupt vatten och ej specificerat substrat pekar mot omkring 1500 ton stål för endast fundamentet, exklusive piles för förankring (WPD 2005).

Tripod-fundament förankras genom pålning och de mindre dimensionerna på piles medför att pålningsarbetet kan genomföras med lättare utrustning (pile-driver) än vad som krävs för monopile-fundament. Dimensionerna på piles beror av djup, substrat och belastning men är generellt i storleksordningen 3 – 4 m i diameter (Achmus & Abdel-Rahman 2006; EWEA 2007). Stora piles kan också ersättas av flera mindre piles (c:a 1 m diameter) (DWIA 2003). Anläggningsarbetet vid tripod kräver flera steg och kan ta avsevärt längre tid än förankring av monopile-fundament.

Erosionsskydd kan behövas vid lokaliseringar med påtagliga vattenrörelser invid botten (WPD 2005).

2.3.2 När används tripod-fundament?

Tripod-fundament kan anpassas till de flesta bottenstrukturer, men lämpar sig bäst vid genomgående stadigt sediment (Dahlén pers. komm.; SGS 2005). På grund av pålningen är tripod inget lämpligt alternativ i blockrika bottnar (DWIA 2003). Den kanske största fördelen med tripod är dess lämplighet vid större djup jämfört med gravitationsfundament och monopile-fundament, därtill krävs generellt ingen förbehandling av botten (WPD 2005).

Tripod-fundament kan vara tekniskt och ekonomiskt fördelaktiga inom ett djupintervall omkring 20 – 40 m (SGS 2005; WPD 2005). Liksom beträffande monopile-fundament avgörs fundamentets dimensioner per givet djup av vågrörelser i Västerhavet och av packis i Östersjön, medförande en kraftigare kostnadsökning per djup i Östersjön (DWIA 2003; WPD 2005).

Tekniken för tripod är beprövad inom offshore-branschen (DWIA 2003) men utöver Nordersunds mindre tripod-fundament av betong har tekniken hittills (2007) inte applicerats inom vindkraftsindustrin. Tripod-fundament är dock under byggnation inom Alpha Ventus vindpark (Nordersjön) och tripod ges stort utrymme i de utredningar som erhållits från vindkraft under projektering. Med trenden mot havsbaserad vindkraft i djupare vatten kan det förväntas att tripod-fundament kommer att vara ett alternativ framöver.

2.3.3 Tillämpad sammanfattning av tripod-fundament

Tripod-fundament innebär en artificiell struktur av högre komplexitet än gravitationsfundament och monopile-fundament, vilket är av betydelse för marina organismer. Generellt kräver anläggningsarbetet ingen sedimentspridande verksamhet, däremot sker pålningsarbete vilket medför kraftiga och potentiellt skadliga ljudnivåer. Nedan ges en punktvis sammanfattad redogörelse för biologiskt relevanta uppgifter, eftersom utformningen av individuella tripod-fundament kan variera stort ska givna dimensioner endast ses som exempel.

Struktur (per fundament)

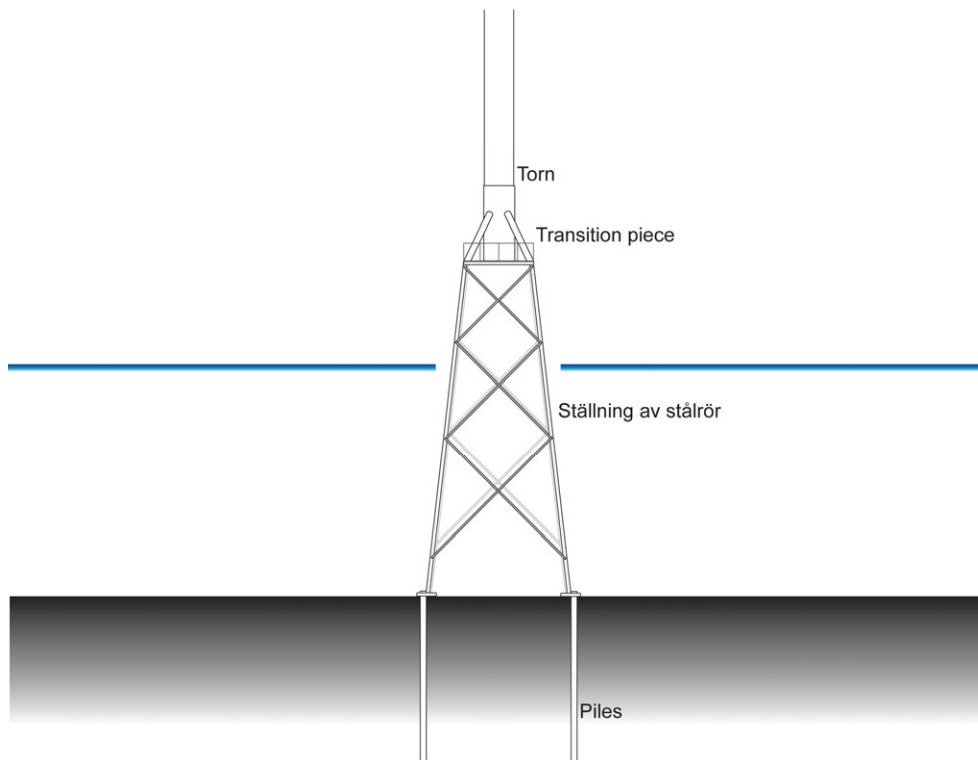
- Triangulär ram med tvärgående ribbor: skapar en komplex artificiell bottenyta av stålbalkar målade med täckfärg (utan påväxthämmande komponenter) och epoxi korrosionsskydd
- Eventuell iskrage: skapar ett artificiellt överhäng vid vattenytan

- Eventuellt erosionsskydd: skapar en artificiell horisontell bottenyta av sten och grus
- Eventuell utvändig kabel i hölje: kan innebära ett mindre magnetiskt fält och ett inducerat elektriskt fält längs med kabeln utanpå fundamentet
- Anoder: utvändiga stavar innehållande framförallt zink, vilka avsöndras och byts ut med tiden (se Faktabox 1)

Konstruktionsarbeten (per fundament)

- Flera pålningar: medförande mycket höga ljudnivåer i pulser
- Fartygsaktivitet inklusive förankring: buller och lokal störning av botten

2.4 Fackverksfundament [jacket foundation]



Figur 5. Schematisk skiss över fackverksfundament. Skalan är ej proportionerlig; för detaljer och dimensioner se avsnitt 2.4

2.4.1 Allmänt om fackverksfundament

Fackverksfundament (Figur 5) är en kvadratisk nätverkskonstruktion av stålror/balkar, vilken förankras i botten genom pålning. Tekniken härrör från oljeplattformar och är anpassad till stora djup. Stålrören i nätverket fixeras i varandra antingen genom svetsning eller med hjälp av gjutna hylsor. Korrosionsskydd erhålls genom anoder, epoxi och/eller försinking under täckfärgen. Infästningen av

ett fackverksfundament sker genom att 3 – 4 rotfästen pålas fast i bottensedimentet varefter hela stålkonstruktionen kan monteras i ett stycke. Mellan fundamentet och tornet placeras en transition piece för att fördela belastningen. (Dahlén pers. komm.).

I samband med Utgrunden II (Östersjön) har fackverksfundament tagits fram anpassat för 3 MW turbiner och 20 m djupt vatten. Diametern på stålrören beräknades här till 0,7 och 0,5 m för de yttre respektive tvärgående ribborna (Dahlén pers. komm.). De piles som används för förankring beräknades samtidigt till en diameter på 1,5 m.

År 2006 installerades demonstrations- och forskningsprojektet Beatrice (Talisman Energy) på 48 m djup i Nordsjön, omfattande två 5 MW vindkraftverk förankrade på fackverksfundament. Varje fundament är 62 m högt och mäter 20 x 20 m vid basen, mellan de 4 hörnbalkarna löper ett nätverk av tvärgående (45°) mindre balkar. Varje fundament väger omkring 750 ton (därtill transition piece 150 ton) och är skyddat mot korrosion genom epoxi samt 72 st. mindre anoder (totalt 240 kg). I skvalpzonen (vattenytan) täcks allt stål av sprayat aluminium. Varje fundament är förankrat genom 4 st. 44 meter långa piles med en diameter av 1,8 m (60 mm tjockt stål). (Talisman 2006; EWEA 2007).

Vid de preliminära beräkningarna för Kriegers Flak vindpark (Östersjön) uppskattades en vikt av 700 ton stål för fackverksfundament på 40 m djup. Liksom för fundamenten vid Beatrice kräver fackverksfundament alltså en relativt låg vikt, vilket är ekonomiskt fördelaktigt jämfört med andra fundament.

2.4.2 När används fackverksfundament?

Fackverksfundament är kostnadseffektiva vid stora djup (från 20 m) eftersom de då kräver mindre stål än exempelvis monopile-fundament och tripod (WPD 2005). I grunt vatten blir fackverksfundament generellt dyrare än andra fundament (Dahlén pers. komm.). En fördel med fackverksfundament är att förankringen inte kräver ett lika tungt pålningsarbete som monopile-fundament.

Vid projektet Beatrice (Nordsjön; 48 m djup) konstaterades det efter omfattande utredningar och jämförelser med tripod-fundament att fackverksfundament var ett mindre kostsamt alternativ än övriga fundament (Talisman 2006). I övrigt används fackverksfundament i stor utsträckning och i olika utformning inom andra sektorer av offshore-industrin. Det är sannolikt att fackverksfundament kommer att vara ett dominerande alternativ vid framtida vindkraftsetablering i djupt vatten (Dahlén pers. komm.).

2.4.3 Tillämpad sammanfattning av fackverksfundament

Fackverksfundament medför ett litet anspråkstagande av den naturliga bottenmiljön, i stort begränsat till de 3 – 4 förankringspunkterna. Den strukturella komplexitet som skapas av den mångformiga konstruktionen upp genom vattenmassan innebär däremot ett betydande tillskott av livsmiljö för många marina organismer, således en förändring av den naturliga miljön. Attraktion av fisk kan även komma att innebära en viss sekundär påverkan på närliggande bottnar. Under

anläggningsarbetet medför pålningen kraftiga ljudnivåer som kan vara skadliga för organismer i omgivningen.

Nedan ges en punktvis sammanfattad redogörelse för biologiskt relevanta uppgifter angående fackverksfundament. Dimensionerna ska ses som generella eftersom fundamentens utformning kan variera stort.

Struktur (per fundament)

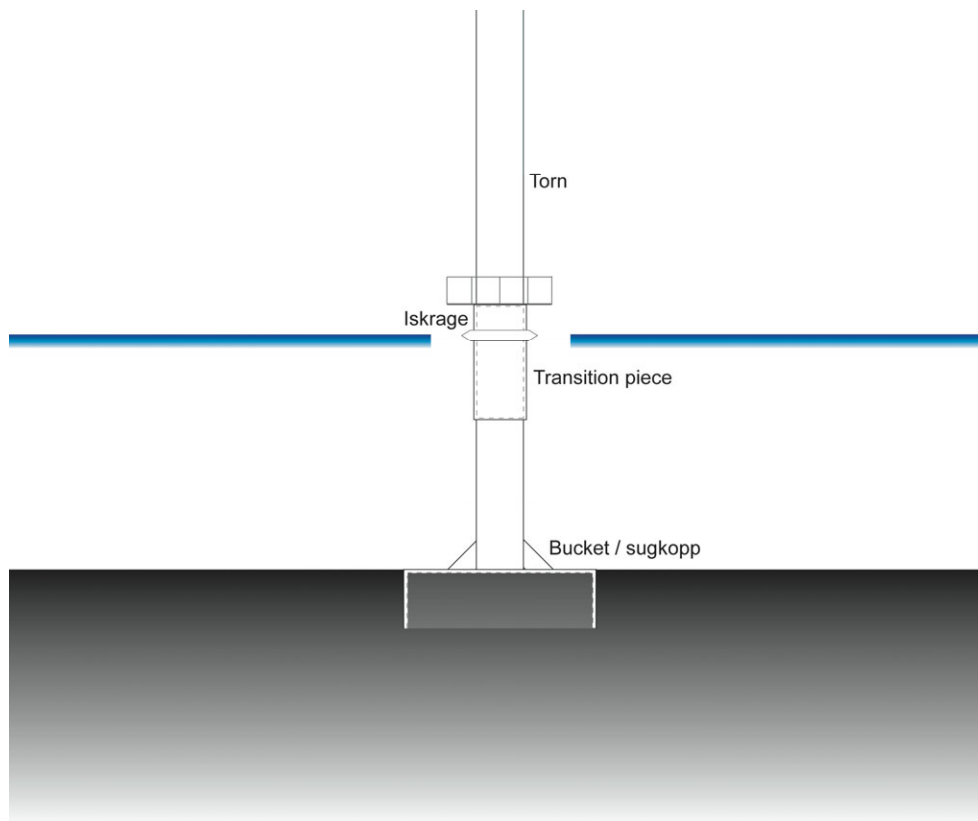
- Stålkonstruktion: skapar ett mångformigt nätverk av artificiell bottenyta bestående av stålrör (Ø 0,5 – 1 m), förzinkade och/eller målade med täckfärg eller korrosionsskydd (t ex glass flake epoxi)
- Utvändig kabel i hölje: kan innebära ett mindre magnetiskt fält och ett inducerat elektriskt fält längs med kabeln utanpå fundamentet
- Anoder: utvändiga stavar innehållande framförallt zink, vilka avsöndras och byts ut med tiden (se Faktabox 1)

Konstruktionsarbeten (per fundament)

- Pålning: mycket höga ljudnivåer i pulser
- Fartygsaktivitet inklusive förankring: buller och eventuellt lokal störning av botten

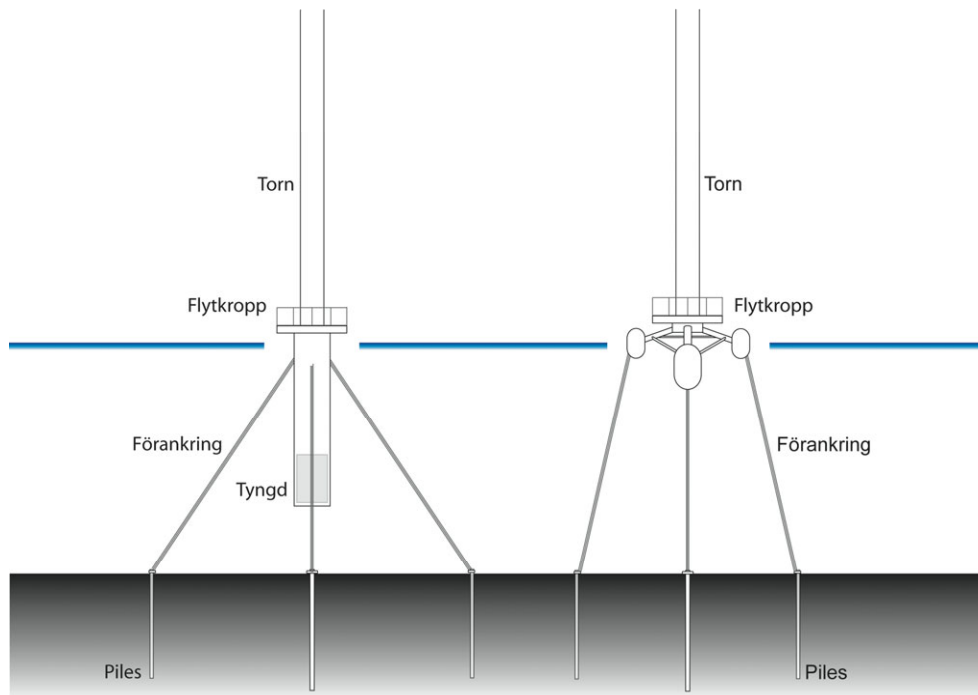
2.5 Övriga fundament

Utöver de fyra grundmodellerna gravitations-, monopile-, tripod- och fackverksfundament har det tagits fram förslag på fundament som baseras på en kombination av flera av dessa tekniker. Gravitation/pile, fackverk/monopile och tripod/monopile är exempel på sådana kombinationer (SGS 2005). Teknisk utformning, konstruktionsförfarande och marinbiologiskt relevanta detaljer kan skattas utifrån de fyra grundmodellerna som beskrivits i föregående avsnitt.



Figur 6. Schematisk skiss över bucket-fundament. Skalan är ej proportionerlig; för närmare beskrivning, se avsnitt 2.5.

Ytterligare två modeller, bucket-fundament (Figur 6) och flytande fundament (Figur 7) är under utveckling men har hittills inte kommit till användning. Bucket-fundament innebär att fundamentet, som är ihåligt och kan liknas vid en sugkopp, försänks i botten och hålls på plats genom att ett undertryck skapas. Detta koncept har hittills testats utan framgång (Dahlén pers. komm.) men kan eventuellt komma att bli aktuellt i framtiden då forskning fortgår inom området. För 10 m djup har en bucket-diameter på 12 m beräknats vara lämplig (EWEA 2007). Ur marinbiologiskt perspektiv kan bucket-fundament närmast liknas vid ett gravitationsfundament (se avsnitt 2.1).



Figur 7. Schematisk skiss över flytande fundament, två olika versioner. Skalan är ej proportionerlig; för närmare beskrivning, se avsnitt 2.5.

Förslagen på flytande fundament, vilka utgörs av en stålkonstruktion som hålls i position genom vajrar ankrade till botten, avser framtida etableringar i djupa vatten och har hittills beräknats vara alltför kostsamma för att vara ett alternativ inom kommersiellt bruk (WPD 2005). Att flytande fundament kan komma att användas i framtiden är dock inte att utesluta. Ett koncept med enkla flytande fundament för 150 – 800 m djup utvecklas av norska StatoilHydro, undervattensparten utgörs här av 100 m djupa tyngder av betong. Även ett annat koncept, med tre vindkraftverk per flytande konstruktion, är under utveckling genom FORCE Technology (EWEA 2007).

Från ett marinbiologiskt perspektiv kan flytande fundament komma att likna antingen monopile-fundament (se avsnitt 2.2) eller fackverksfundament (se avsnitt 2.4), med den betydande skillnaden att bottenkontakt endast sker genom vajrar förankrade i botten på djupt vatten.

2.6 Erosionsskydd

Erosionsskydd kan anläggas för att förhindra att de lokala hydrografiska förändringar som uppstår kring ett fundament gräver ut botten och underminerar förankringen. För pålade fundament beräknas att en strömhastighet på 0,5 – 1 m/s orsakar en erosion på 1,3 gånger pile-diametern om vågrörelser når ned till botten. Utan vågor beräknas motsvarande erosion istället bli 0,5 – 1 gånger pile-diametern. Vid

ett bottensubstrat av sand kan denna erosion ske inom ett par timmar medan samma erosion kan ta hundratals år i ett bottensubstrat av lera. (Nielsen pers. komm.).

De erosionsskydd som hittills använts inom havsbaserad vindkraft består i regel av ett undre lager av grus och ett övre lager av sten av blandad storlek, placerade från fundamentets förankringspunkt ut till lämpligt avstånd (storleksordningen 5 – 10 m). Hur stort område som måste täckas av erosionsskydd beror av hydrodynamiska förhållanden såsom undervattensströmmar och vågor. Som exempel har erosionsskydd på 5 – 10 m ut från fundamenten anlagts vid vindparken Kentish Flats (Nordsjön) vilket har visat sig fungera väl (OES 2007). Vid Horns rev (Nordsjön) har emellertid en betydande erosion uppstått trots användande av liknande erosionsskydd; anledningarna till detta är under utredning (Nielsen pers. komm.).

För gravitationsfundament krävs alltid erosionsskydd eftersom även en mindre underminering av botten skulle innebära betydande instabilitet. Pålade fundament (monopile- tripod- och fackverksfundament) kan dock anpassas till erosion och behöver således inte vara i behov av erosionsskydd. Anpassningen görs genom att varje pile förlängs med samma antal meter som erosionen beräknas gräva ut (EWEA 2007).



Figur 8. Artificiellt erosionsskydd, GRIP, anpassat för att genom rev-effekt öka antalet livsmiljöer för fisk och bottenlevande djur associerade till hårt bottensubstrat. Varje modul består av ett perforerat betongrör beklätt med utstickande ihåliga plaströr.

Utöver erosionsskydd av grus och sten har särskilt designade erosionsskydd tillverkats. Ett exempel är ”GRIP” av Reef Systems, en kombination av erosionsskydd och artificiellt rev (se Figur 8). Konceptet GRIP består av betongmoduler försedda

med utstickande plaströr. Dess kapacitet som erosionsskydd är ännu inte utvärderad (Reef Systems 2007).

Erosionsskydd inverkar på den marina miljön genom att skapa ett omfattande heterogent hårt bottensubstrat med många håligheter. Strukturen skapar möjligheter för etablering av organismer associerade till hårt bottensubstrat och skyddande strukturer (se avsnitt 3.1).

3 Källor till påverkan

Havsbaserad vindkraft är en expanderande nyttjandeform av marina resurser och från flera håll görs betydande ansatser för att insamla erfarenheter och kunskap om dess miljöpåverkan. Detta sker dels genom kontrollprogram/miljöövervakning och dels genom experimentella studier. Omfattande kontrollprogram har genomförts vid de danska vindparkerna Nysted och Horns rev. Inom Sverige studeras miljöeffekter bl.a. vid vindparken Lillgrund (Öresund) och nya kontrollprogram planeras vid de havsbaserade vindparker som projekteras. Riktade forskningsprogram med experimentella studier och litteratursynteser pågår från flera håll; bl.a. Sverige (Vindval), Storbritannien (COWRIE) och USA. Även ett stort antal litteratursammanställningar har tagits fram angående miljöpåverkan från havsbaserad vindkraft; detta sker genom myndigheter (Fiskeriverket 2007; Jonasson 2002; Petersson 2000), genom vetenskapliga tidsskrifter (Gill 2005; Petersen & Malm 2006), genom forskningsprogram (Michel m.fl. 2007; Nedwell m.fl. 2003; Nedwell & Howell 2004; Gill m.fl. 2005; Thomsen m.fl. 2006) samt genom de olika vindkraftsprojektens miljökonsekvensbeskrivningar.

Kunskapsläget utökas således fortlöpande och istället för att återigen prediktera miljöpåverkan, fokuserar denna studie på att *jämföra hur de olika fundamentmodellerna* förhåller sig till miljöpåverkan; att beskriva vilka tekniska faktorer som kan öka respektive minska olika källor till påverkan. Oberoende av vilka av de diskuterade påverkanskällorna som i framtiden betraktas som betydelsefulla, så framställs här hur de skiljer sig mellan olika fundamentmodeller.

Följande avsnitt behandlar respektive påverkanskälla genom 1) en kortfattad redogörelse för mekanismen, 2) skillnader mellan havsområden, 3) skillnad mellan olika fundament, samt 4) vilka eventuella anpassningar som kan iakttas för att minimera negativ påverkan. Nedanstående påverkanskällor diskuteras:

- Påväxt och rev-effekt (3.1)
- Ljud under driftsskedet (3.2)
- Hydrografiska förändringar (3.3)
- Konstruktionsbuller (3.4)
- Sedimentspridning under anläggning (3.5)

3.1 Påväxt och rev-effekt

3.1.1 Bakgrund

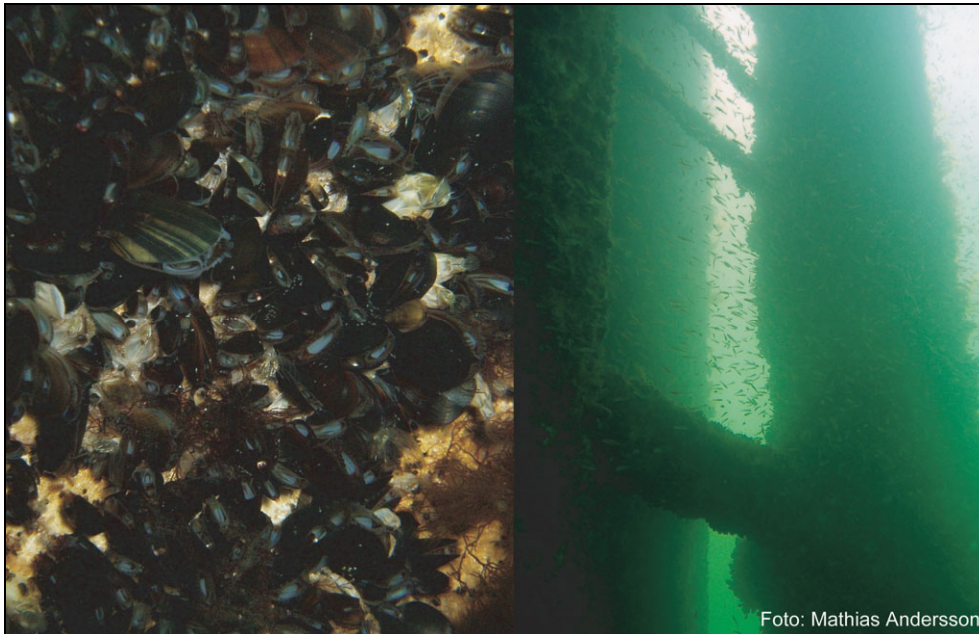
Vid etableringen av en havsbaserad vindpark förväntas fundamenten och erosions-skydden utgöra nya livsmiljöer (habitat) åt hårbottenlevande alger och djur och öka den biologiska mångfalden i området. Konstgjorda hårbottenmiljöer som fyller funktioner som liknar en naturlig hårbotten kallas artificiella rev, vilka har visat sig utgöra substrat åt fastsittande alger och djur (Anderson & Underwood 1994; Conell & Glasby 1999; Jensen m.fl. 2000; Glasby & Conell 2001; Svane & Petersen 2001; Bacchocchi & Airoidi 2003; Knott m.fl. 2004; Perkol-Finkel & Benayahu 2005; Boaventura m.fl. 2006). Påväxt på reven innebär nya habitat och ökad födotillgång för fisk och övrig mobil (rörlig) fauna. Det nya habitatet ökar inte bara födotillgången utan skapar även skydd mot starka strömmar och predatorer (rovlevande djur) vilket ökar koncentration av mobil fauna såsom fisk intill reven, en s. k. rev-effekt uppstår.

Rev-effekter på artificiella rev finns dokumenterat både från södra och norra Europa (Jensen m.fl. 2000) samt i andra delar av världen och utnyttjas bl.a. i Japan och i USA för att öka fångsten i det kommersiella fisket (Buckley 1982; Grove m.fl. 1989; Milon 1989). Vad som orsakar den ökade fiskförekomsten har diskuterats. Det är svårt att avgöra om det endast är en aggregering eller en ökad produktion av fisk (Bohnsack 1989; Pickering & Whitmarsh 1997; Svane & Petersen 2001) men verkligheten återspeglar sannolikt en syntes av de båda teorierna. Orsaken till en ökad fiskförekomst kan dessutom skilja sig mellan olika arter.

Utvecklingen av ett hårbottensamhälle sker successivt då djur och växter etablerar sig ("settlar") vid olika tidpunkter på året och är mer eller mindre konkurrenskraftiga (Gaines m.fl. 1985; Underwood & Anderson 1994; Qvarfordt 2006). På ett nyetablerat substrat bildas inledningsvis en s.k. biofilm av mikroorganismer som kan underlätta etableringen av större organismer (Wieczorek & Todd 1998; Unabia & Hadfield 1999). Den första tiden koloniserar generellt opportunistiska arter, som karaktäriseras av snabb reproduktion, snabb tillväxt samt stor geografisk utbredning. De opportunistiska arterna är emellertid dåliga på att konkurrera om plats och med tiden lyckas fleråriga mer konkurrenskraftiga arter etablera sig. Detta innebär att artsammansättningen byts ut och förändras under tiden, tills ett stabilt tillstånd infinner sig (Dean & Hurd 1980; Wennberg 1992; Qvarfordt 2006). Det kan ta flera år innan en stabilisering av ett hårbottensamhälle sker, vilket bör beaktas innan slutsatser tas om diversitet (mångfald), individtäthet och biomassa på ett nyetablerat substrat.

Definitioner

Påväxt, d.v.s. en produktion av fastsittande växter och djur, separeras här från rev-effekt som definieras som en ökad förekomst av rörliga djur, ett resultat av antingen en aggregering eller en ökad produktion. Se Figur 9.



Figur 9. Påväxt (t v) och rev-effekt (t h) vid Utgrunden I monopile-fundament. Strukturen till höger i bild är angöringsstegen på fundamentets *transition piece*. Fotografierna är tagna på 5 - 6 meters djup under augusti månad och visar en riklig påväxt av blåmussla samt en hög förekomst av sjustrålig smörbult.

Den huvudsakliga skillnaden mellan ett vindkraftverks fundament och många andra artificiella rev är den vertikala strukturen som förekommer i hela vattenmassan från ytan till botten. Detta skapar förutsättningar för en djuprelaterad zonerings, där både djuplevande och ljusberoende arter kan etablera sig. Andra artificiella rev som påminner om vindkraftfundament är bropelare, pirar, oljeplattformar och fyrar.

En vindparks placering är ofta exponerad och strukturen som är vertikal mot strömmen gör att passerande planktoniska larver och sporer som transporteras med vattnet lättare fångas upp och kan kolonisera de fria ytorna. Ett exponerat vertikalt substrat utgör främst goda förhållanden för filtrerande djur, då strömmen bidrar med planktonisk föda. Strömmen är således en viktig faktor i uppbyggandet av ett biologiskt hårbottensamhälle.

Utformningen av fundament och tillhörande erosionskydd (vertikala, sluttande och horisontella ytor) samt ytans struktur (slät eller skrovlig) är av betydelse för vilka arter som etablerar sig, åtminstone initialt.

Sluttande och horisontella ytor skapar andra förutsättningar än en vertikal yta, framförallt för ljusberoende alger. Fleråriga makroalger som är vanligt förekommande på grunda hårbottnar är begränsade om substratet har en kraftig lutning. Studier i Östersjön har visat att alger dominerar när lutningen är mindre än 60°. Mellan 60° och 90° lutning förändras organismsamhället gradvis och domineras då av filtrerande djur. En del arter utesluts redan i etableringsstadiet, exempelvis den viktiga blåstången som har mindre än 1 % lyckad settling (etablering) då lutningen är brantare än 60° (Qvarfordt 2006). Avståndet till botten har också betydelse för förekomsten av en del makroalger då de tunga förökningskropparna lätt

faller till botten i lugnt vatten efter att de lämnat den vuxna plantan. Ett resultat av detta kan man även se på stora stenblock där det förekommer mindre rekrytering av blåstång (Qvarfordt 2006). En del makroalger är därtill begränsade av en hög exponering i form av vågor och strömmar (Kautsky & van der Maarel 1990; Kautsky m.fl. 1992; Nielsen 2001).

Erosionsskyddens struktur kan bidra med små och stora håligheter, vilket ökar förutsättningarna för fisk och kräftdjur runt fundamenten. Varierande håligheter kan utnyttjas av både olika arter och olika livsstadier (storlekar) av samma art. Till exempel så kan hummer och krabbor utnyttja både små och stora håligheter beroende på vilket livsstadium de befinner sig i.

Ytstrukturen på ett fundament skiljer sig från naturliga hårdbottnar och saknar ursprungligen sådana mikrohabitat som fördjupningar, skrevor, sprickor och upphöjningar vilka utgör habitat för många arter och skapar skydd mot predatorer (Mc Guinness & Underwood 1986; Chapman 2003). Stål och behandlad betong ger fundamentet en slät yta som är svårare för många djur och växter att få fäste på medan obehandlad betong, som har en grövre och mer heterogen yta, påminner mer om en naturlig hårdbotten och är därmed en attraktivare livsmiljö för många organismer (Harlin & Lindbergh 1977; Lubchenco 1983). Därtill kan betong läcka kalciumhydroxid, vilket har visat sig gynna etableringen av en del organismer (Anderson 1996). Trots att den biologiska samhällsutvecklingen kan gå fortare på ett grövre substrat i början kommer ytans struktur, och därmed artsammansättningen att utjämnas med tiden då arter börjar växa över varandra. Vissa arter som havstulpaner (vilka producerar ett lim som fäster dem på substratet) och kalkmaskar har lättare än andra organismer att etablera sig direkt på en slät homogen yta och därmed skapa en grövre struktur. Dessa organismer kan sedan bli överväxta av andra arter (Öhman & Wilhelmsson 2005). Skillnaderna i början kan således förklaras av olika ytstrukturer men om skillnaderna kvarstår efter en längre tidsperiod har andra fysiologiska och biologiska faktorer troligtvis betydelse.

Koloniseringen av arter på och intill vindparkens fundament är beroende av vindparkens placering, d.v.s. ost- eller västkust, exponerat eller skyddat, rådande bottensubstrat, djupet samt närheten till naturliga hårdbottnar.

Vid jämförelser mellan vindparker i Sverige är det viktigt att beakta salthalten som skiljer sig markant mellan ost- och västkust och som har en betydande roll för havets organismer och därmed kolonisationen av flora och fauna. Huruvida fundamenten placeras i öppet vatten eller i ett sund kan också ha betydelse, då vissa arter gynnas av strömt vatten, några av hög exponering och andra av höga närsaltshalter vilket påträffas närmare land. Jämförande studier i Kalmarsund, Öresund samt vid Gotland och Öland visade att filtrerande djur dominerade i områden med stark ström samt att fintrådiga alger, som gynnas av övergödning, var vanligare närmare land (Naturvårdsverket 2006a).

Om en havsbaserad vindpark anläggs på en mjukbotten (lera, sand, grus) blir de ekologiska förändringarna mer påtagliga än om vindparken anläggs på en redan existerande hårdbotten. Det nya habitatet på en mjukbotten attraherar för området nya arter vilket förändrar de ekologiska förhållandena (Jensen m.fl. 2000; Bulleri 2005). Det tar dock flera år innan ett nytt hårdbottensamhälle stabiliserats. Här har

även avståndet till en naturlig hårbotten betydelse för hur snabbt hårbottensamhället utvecklas.

Planktoniska förökningskroppar från växter och djur har olika livslängd i den fria vattenmassan beroende på art och sprids till nya områden med strömmar. Detta gör att nya hårbottenssubstrat i en mjukbottenmiljö kan fungera som språngbräden och underlätta för arter att ta sig över mjukbotten- samt djupområden för att sedan etablera sig på nya hårbottnar som nu kan ligga inom räckhåll (Glasby & Connell 1999). Detta kan få både positiva och negativa effekter beroende på art och område. Exempelvis är detta ett sätt för främmande (introducerade) arter att spridas till nya områden och där påverka den lokala ekologin. Hur väl en art lyckas etablera sig beror på antalet individer som lyckas överleva planktonfasen innan de når den fria ytan samt deras förmåga att etablera sig på substratet och i området. Ett exempel på en introducerad art är märkräftan *Jassa marmorata* som invaderade fundamenten vid Horns rev på danska västkusten, där djuret tidigare varit okänt (Leonhard & Birklund 2006). Denna märkräfta är beroende av hårt bottenssubstrat, vilket är naturligt sparsamt förekommande längs den jylländska västkusten.

Rev-effekter i form av ökad fisk har konstaterats vid fundamenten vid Utgrunden I och Yttre Stengrund i Östersjön. Intill fundamenten ökade koncentrationen av vissa arter, främst då mindre fiskarter, vilket även observerades vid Öresundsbron (Öhman & Wilhelmsson 2005). Vid undersökningar intill fundamenten i Horns rev och Nysted observerades större fisk, bl.a. torsk, runt fundamenten (Leonhard & Birklund 2006). Andra studier har utförts i en större skala, då förekomsten av fisk inte studerats direkt intill fundamenten utan istället inom parken mellan fundamenten. Resultaten från motsvarande undersökningar vid Horns rev och Nysted har hittills inte påvisat några tydliga effekter och ökad täthet eller artrikedom hos fisk har alltså inte konstaterats mellan fundamenten i dessa vindparker (Klaustrup 2006). Resultaten från kontrollprogrammet vid Kentish Flats (Nordsjön) indikerar en generellt ökad förekomst av fisk inom parken. Detta har dock inte analyserats statistiskt och några studier direkta intill fundamenten har inte utförts (Emu 2006). Sammantaget är det svårt att utifrån dagens kunskapsläge (2007) uttala sig om i vilken utsträckning rev-effekter uppstår i en vindpark. Att fisk ökar vid artificiella konstruktioner i havet är emellertid en vanlig företeelse och är att förvänta även i vindparker.

I Faktabox 2 ges en utförligare presentation av studier som utförts på fundament, bropelare, oljerigggar samt andra artificiella rev, vilka ger en indikation på hur organismsamhällen kan utvecklas i olika områden och på olika typer av fundament.

Slutsatserna i nedanstående avsnitt om skillnader mellan havsområden och fundament baseras till stor del på den information och de referenser som presenterats ovan och i Faktabox 2.



Figur 10. I salt vatten är mjukkorallen dödmanshand (t v) en vanlig påväxt djupare ned på fundament eller erosionsskydd. Rörbyggande märkräfter från familjen Jassidae (t h) bildar ofta täta mattor på exponerade fundament.

3.1.2 Skillnader mellan havsområden

Då en vindparks placering är exponerad kommer de olika fundamenten och erosionsskydden, oavsett ost- eller västkust, domineras av konkurrenskraftiga filtrerande djurgrupper. Den lägre salthalten i Egentliga Östersjön gör emellertid att färre filtrerande arter förekommer samt att avsaknaden av vissa predatorer gör att en monokultur av vanlig blåmussla är att förvänta med tiden. Vid en hög förekomst av sjöfågel, som kan konsumera stora mängder av blåmussla, kan emellertid blåmusslans utbredning begränsas och andra arter kan etablera sig. I Bottenhavet och främst Bottenviken, där blåmusslan begränsas av den låga salthalten, förväntas fintrådiga alger istället dominera fundamenten. På västkusten begränsas blåmusslan djupleds av ett högre predationstryck varpå ett artrikare hårbottensamhälle och en djupzonering kan infinna sig. Potentiella filtrerare på västkusten och i Nordsjön är bl.a. blåmusslor, havstulpaner, sjöpungrar, kalkmaskar, svampdjur, mossdjur, hydroider och olika koralldjur. I Nordsjön har även rörbyggande märkräfter visat sig vara konkurrenskraftiga på exponerade fundament vilket överensstämmer med författarnas personliga observationer vid vågkraftverk vid Islandsberg i Skagerrak, där rörbyggande märkräfter (*Jassa pusilla* och *J. falcata*) dominerade påväxten på de lodräta plastbeklädda vajrarna (se Figur 10). Blåmusslan har visat sig förekomma på de översta metrarna av fundamenten vilket förmodligen är ett resultat av att predatorer som sjöstjärna och krabba inte klarar den höga exponeringen samt att predationstrycket från sjöfågel är låg.

Alger som tål exponering kan också förekomma, både i Östersjön och på västkusten, med en varierande artsammansättning beroende på närsaltsbelastning och exponeringsgrad. Där ljuset når djupare, exempelvis på utsjöbankar, och om erosionsskydden inte utsätts för en hög exponering, kan även större alger som blåstång och andra tångarter komma att etablera sig. Rev-effekter, d.v.s. en ökad

koncentration av mobila djur runt fundamenten, förväntas uppstå oavsett havs-område, med en högre artrikedom i Västerhavet som ett resultat av den högre salt-halten.

Om en vindpark placeras i stillastående vatten eller på ett djup där fundamenten hamnar under språngskiktet kan ett ökat nedfall av organiskt material resultera i syrefattig botten och svavelvätebildning vid fundamentets bas, vilket kan få en negativ effekt på den lokala bottenlevande faunan. Sannolikheten för att syrefattig botten ska uppstå runt fundamenten är således beroende av de lokala förhållandena, såsom djup och exponeringsgrad.

3.1.3 Skillnader mellan olika fundament

Oavsett om ytstrukturen utgörs av betong eller stål har studier visat att olika fastsittande organismer kan etablera sig på de vertikala fundamenten. Gravitationsfundament av betong vid Nysted har visat sig utgöra ett utmärkt substrat för filtrerande djurgrupper, vilket även konstaterats på monopiles av stål vid bl.a. Utgrunden I, Yttre Stengrund, Horns rev och vid vindparken North Hoyle utanför Englands västkust. Fintrådiga alger har också lyckas etablera sig närmast ytan på de olika fundamenten.

Inledningsvis kan olikheter uppkomma mellan olika ytstrukturer, vilket bestäms av tillgången på larver samt deras förmåga att etablera sig ("setla") på olika substrat. Med tiden som ett biologiskt samhälle byggs upp förändras dock artsammansättningen och mer konkurrenskraftiga arter växer över andra tills ett relativt stabilt tillstånd slutligen infinner sig. Detta innebär att efter ett antal år förväntas den fastsittande floran och faunan på de olika fundamenten i områden med samma exponeringsgrad och salthalt likna varandra oavsett den initiala ytstrukturen på fundamentet.

De olika fundamentens form med både vertikala och mer horisontella ytor skulle kunna resultera i varierande utveckling av det biologiska samhället; detta beror främst på att alger har lättare att etablera sig på en mer sluttande yta där ljusstillgången är större.

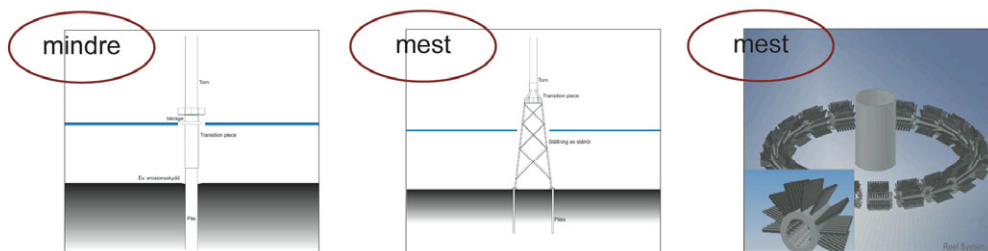
Framförallt fackverksfundament och till viss del tripods har en mer komplex struktur med fler sluttande ytor för ljusberoende alger. Vid det fackverksfundament som hittills studerats, forskarplattformen FINO 1, har det emellertid noterats att på grund av det exponerade läget utkonkurrerades de alger som potentiellt skulle kunna etablera sig på fundamentet av fastsittande filtrerare och rörbyggande kräftdjur. I områden där strömmen är svagare, och förhållandena för filtrerare sämre, kan däremot andra arter etablera sig. Alger kan här, om ljusstillgången är tillräcklig, förväntas etablera sig på fundamentens sluttande- och erosionskyddens horisontella ytor.

De översta metrarna på ett gravitationsfundament utgörs av det som kallas ett överhäng. Då ljuset är begränsat vid ett överhäng samt att exponeringsgraden blir hög missgynnas alger, och istället skapas en attraktiv plats för filtrerare. Beträffande gravitationsfundament görs en nedsänkning av havsbotten vilket kan resultera i att delar av erosionskydden täcks av sand. Vid Nysted missgynnade detta den annars dominerande blåmusslan, således gynnas andra arter.

Kontentan blir att vilka fastsittande organismer (påväxt) som dominerar på ett fundament i första hand avgörs av salthalten, exponeringsgraden, djupet, avståndet till land samt ljusstillgången vid den etablerade vindparken. Först *i andra hand* kan fundamentets form och ytstruktur inverka; generellt gynnas filtrerande djur men exempelvis grunda horisontella strukturer och låg exponeringsgrad kan främja makroalger.

Ju mer komplext ett habitat är desto mer attraktivt blir det för den mobila faunan som fisk och olika kräftdjur, då det finns rikligt med gömställen och bo-platser. Således innebär fackverks- och tripod-fundament ett mer attraktivt rev än en kompaktare, mer homogen struktur såsom monopile-fundament. Rikliga rev-effekter har konstaterats på oljeriggarna runt om i världen vilka har former liknande fackverksfundament. Fackverk- och tripod-fundament planeras därtill på större djup, vilket gör att mer djuplevande arter kan komma att utnyttja revets födotillgång och olika livsmiljöer.

Tillhörande erosionsskydd kan utformas för att gynna rev-effekter, vilket vid monopiles och gravitationsfundament kan kompensera för den plana strukturen. Ett mångformigt erosionsskydd med både små och stora håligheter skapar livsmiljöer åt fler arter samt åt olika livsstadier inom samma art vilket kan skapa gynnsamma förhållanden för bl.a. kräftdjur och fisk.



Utdrag från Tabell 6. Sammanfattning av olika fundaments relativa inflytande på eventuell rev-effekt. Kunskapsunderlag: måttligt

3.1.4 Anpassningar för att minimera eller optimera påverkan

Utifrån perspektivet att bevara naturligt rådande miljö kan påväxt och rev-effekter betraktas som en negativ miljöpåverkan i områden som saknar förekomst av eller närhet till naturlig hårbotten (på grund av risken för introduktion av främmande arter som kan förändra de ekologiska förhållandena). En ökad produktion och mångfald av fisk och ryggradslösa djur kan emellertid i de flesta fall betraktas som en positiv miljöpåverkan, särskilt om hårt bottensubstrat med dess associerade organismer redan återfinns naturligt i området. Vindkraftverken kan då komma att utgöra en skyddad miljö för i synnerhet stationära arter av fisk och kräftdjur eftersom effektivt fiske sannolikt kommer att avlysas invid fundamenten.

Det är inte möjligt att undvika *påväxt* oavsett vilken fundamentmodell som används. Silikonbaserad ytbehandling av fundamentet, vilket ibland används på betongkonstruktioner såsom bropelare, kan dock missgynna etableringen av en del

organismer vilka får svårt att sitta kvar på den glatta ytan. Beträffande *rev-effekt* kan den komplexa strukturen hos fackverksfundament förväntas generera livsmiljöer för fler arter (av t ex fisk) än mer homogena fundamentmodeller såsom monopile. För ökad rev-effekt kan alltså fackverksfundament förespråkas.

För att ytterligare förstärka en önskad rev-effekt kan erosions skyddet utformas för att gynna en ökad mångfald. Genom att anlägga strukturer av hög heterogenitet ökar antalet livsmiljöer och utrymme skapas för fler arter och fler livsstadier. En möjlighet är att använda erosions skydd av block av blandad storlek. Det finns även artificiella erosions skydd som särskilt tagits fram för ändamålet, ett sådant exempel är GRIP av Reef Systems a/s (se Figur 8). Motsvarande artificiella strukturer kan också användas som skydd för nedgrävda kablar, vilket ytterligare förstärker möjligheterna för en uttalad rev-effekt. Lämpliga konstruktioner kan därtill komma att utgöra rekryteringsbaser för spridning av hårdbottenassocierade larver och fiskyngel till omgivande havsområden.

Faktabox 2. Studier och erfarenheter av påväxt och rev-effekter

Den låga salthalten i Östersjön minskar många arters utbredning vilket resulterar i minskat predationstryck, framförallt på vanlig blåmussla (*Mytilus edulis*) (Saier 2001; Enderlein & Wahl 2004), vilket är en anledning till att de dominerar de vertikala ytorna i Östersjön. Blåmusslan konkurrerar om föda och plats och är som filtrerare mycket konkurrenskraftiga då vattenströmningen är hög (Kautsky 1982; Littorin & Gilek 1999; Westerbom m.fl. 2002; Qvarfordt 2006). En annan vanligt förekommande filtrerare i Östersjön är havstulpanen (*Balanus improvisus*). Havstulpaner kan vara snabba kolonisationsörer i ett tidigt skede, framförallt på släta strukturer där blåmusslan inte kan få fäste. De är dock dåliga konkurrenter och kan lätt bli överväxta av blåmusslor. (Dean & Hurd 1980; Öhman & Wilhelmsson 2005; Zettler och Pollehne 2006)

På Östersjöns grunda hårdbottnar dominerar blåstången (*Fucus vesiculosus*) där lutningen och exponeringsgraden inte är för hög. Vid hög exponering domineras alg-samhället istället av fintrådiga alger (Kautsky 1989; Kautsky m.fl. 1992). Fintrådiga grönalger påträffas ofta vid strandlinjen då de kräver mycket ljus medan rödalger, vilka inte är lika ljuskrävande kan etablera sig djupare. Fintrådiga alger kan dessutom, till skillnad från tångarter, etablera sig på mer homogena strukturer (Lubchenco 1983).

Vid en inventering på utsjöbankar i Egentliga Östersjön dominerade blåmusslan på alla djup. Exponeringen på utsjöbankar är hög och andra arter har svårt att etablera sig eller konkurreras ut av blåmusslan. En mindre utbredning av blåmusslan påträffades på en av stationerna vilket kan kopplas till predation från sjöfågel (alfågel), vilket gynnade en större förekomst av ettåriga fintrådiga alger och fleråriga rödalger. I Bottenhavet och Bottenviken, där blåmusslan begränsas av den lägre salthalten, dominerar utsjöbankar främst av fintrådiga alger. I Bottenhavet förekommer även flerårig blåstång och smaltång (*Fucus radicans*) på utsjöbankarna, som på en av stationerna bildade välutvecklade bälten och påträffades djupare än vid kusten. Detta är ett resultat av mindre partiklar i vattnet som gör att ljuset går djupare samt att exponeringsgraden minskar med djupet. (Naturvårdsverket 2006b)

Studier på befintliga vindkraftverk i Östersjön som Utgrunden I och Yttre Stengrund i Kalmarsund (Öhman & Wilhelmsson 2005) samt Nysted utanför Danmark (Leonhard & Birklund 2006) visade en tydlig dominans av blåmusslor. Detta har även observerats på bropelare vid Öresundsbron (Öresundsbro konsortiet 2004), Ölandsbron (Qvarfordt m.fl. 2006) och på vertikala stålkonstruktioner utplacerade i forsknings-

syfte i Tyskland (Zettler & Pollehne 2006). De algsamhällen som påträffades i de studerade områdena är artfattiga och domineras av fintrådiga alger.

På Öresundsbrons betongpelare uppskattades tätheten av den dominerande blåmusslan till 40 000 ind./m². Blåmusslorna förekom dock inte på den översta metern där fintrådiga grönalger istället koloniserat den fria ytan. Rödalger förekom något djupare mellan och på musslorna. Övrig fauna på bropelarna var bl.a. havstulpaner och små kräftdjur. (Öresundsbro konsortiet 2004)

På Ölandsbrons pelare dominerade havstulpaner och blåmusslor som var mindre än på omgivande botten. Algförekomsten var sparsam och dominerades av ettåriga fintrådiga alger. Den silikonbehandlade betongen resulterade i en mycket slät yta vilket förmodligen var en anledning till att större musslor inte lyckats etablera sig (Qvarfordt m.fl. 2006). Silikonbaserad ytbehandling förekommer på betongkonstruktioner som placeras i vattnet för att undvika inträngning av vatten och salt och kan ha en begränsande effekt på etablerande organismer (Petersen & Malm 2006). Denna effekt kan bli mer påtaglig i Östersjön där den lägre salthalten försämrar blåmusslans förmåga att bilda byssustrådar som fäster dem vid ytan (Young 1985).

Studier på fundamenten vid vindparkerna Utgrunden I och Yttre Stengrund konstaterade att fundamenten var täckta av två lager. Det undre lagret bestod av havstulpaner som var överväxta av blåmusslor. De dominerande blåmusslorna var dessutom både fler och större än i referensområdena, vilket tolkas som ett resultat av de goda strömförhållandena vid fundamenten. Det noterades även att musslor, äldre än vindparken, hade lyckats förflyttat sig till fundamenten från omgivningen. Fintrådiga alger observerades också, främst på de översta metrarna, men tätheterna var mindre på själva fundamenten än i omgivningarna. (Öhman & Wilhelmsson 2005)

På fundamenten vid Nysted vindpark utvecklades i det närmaste en monokultur av blåmusslor med en högre biomassa på fundamenten jämfört med erosionsskydden. Den lägre rekryteringen av blåmusslor på erosionsskydden kopplades till att sediment täckte delar av stenblocken vilket är en följd av den nedsänkning av havsbotten som gjordes i samband med etableringen av gravitationsfundamentet. Detta minskar blåmusslans förmåga att filtrera och resulterade i att andra arter som rörbyggande kräftdjur och fintrådiga alger kunde etablera sig. Havstulpaner påträffades vid vattenlinjen. Strandkrabba, som är en potentiell predator på blåmussla, påträffades också i området. Predationstrycket var emellertid inte tillräckligt för att begränsa blåmusslans utbredning. (Leonhard & Birklund 2006)

Utanför Tyskland i västra Östersjön placerades en stålcylinder, som skulle efterlikna ett fundament, ut på 20 meters djup i forskningssyftet att utreda dess påverkan på miljön. Salthalten på dessa djup i denna del av Östersjön är tillräckligt hög för att bottenlevande sjöstjärnor och krabbor ska förekomma. I samma studie placerades stålplattor ut på olika djup i den öppna vattenmassan från 3 till 20 meters djup. På stålcylindern, som var i kontakt med botten, dominerade havstulpaner och havsborstmaskar och på stålplattorna, i den öppna vattenmassan, dominerade blåmusslor. Skillnaden mellan de två konstruktionerna ansågs vara deras olika placering, då cylindern var i kontakt med botten där sjöstjärnor och krabbor begränsade blåmusslans utbredning. Under denna studie observerades även syrebrist och svavelvätebildning på botten under plattorna och stålcylindern, vilket antas vara ett resultat av nedfallande organiskt material till följd av den ökade produktionen. I samband med svavelvätebildning minskade ansamlingen av mobila djur runt konstruktionerna. (Zettler & Pollehne 2006). Vid en för hög belastning av organiskt material konsumeras allt syre vid nedbrytningsprocesser vilket kan leda till svavelvätebildning som är skadligt för växter och djur.

Den högre salthalten på västkusten och i Nordsjön resulterar i ett artrikt hårdbottensamhälle där djuputbredningen för de flesta alger och fastsittande djur är tydligt zonerad. Zoneringen styrs av ljuset, salthalten, temperatur, exponeringsgrad, konkurrens om plats, betning och predation. Potentiell fastsittande fauna i exponerade

områden är olika fastsittande filtrerande djur som blåmusslor, havstulpaner, sjöpongar, kalkmaskar, svampdjur, mossdjur, hydroider och koralldjur (Öhman & Wilhelmsson 2005; Naturvårdsverket 2006b; Svensson 2007; Länsstyrelsen 2007). I särskilt exponerade områden tycks små rörbyggande och filtrerande kräftdjur (t ex familjen Jassidae) vara mycket konkurrenskraftiga och vid vindkraftsfundament på västkusten kan en kolonisering av dessa djur komma att bli omfattande. Algernas utbredning på hårdbottnar följer samma mönster på västkusten som i Östersjön, med större fleråriga arter av tång (*Fucus*) och bladtång (*Laminaria*) i mer skyddade områden och främst rödalger där exponeringsgraden är högre.

På västkusten begränsas blåmusslans utbredning djupleds av predatorer såsom krabbor och sjöstjärnor vilka kräver en högre salthalt. På artificiella konstruktioner som placerats på botten och inte når upp till ytan förekommer endast sparsamt med blåmusslor. Däremot förekommer blåmusslor i höga tätheter på de översta metrarna på konstruktioner som skär genom hela vattenmassan, som i Nordsjön på vindparken Horns rev utanför Danmark samt forskarplattformen FINO 1 utanför Tyskland.

På Horns rev skedde en massiv kolonisation av blåmussla efter etableringen av vindparken. Med tiden kontrollerades emellertid blåmusslans utbredning av vanlig sjöstjärna (*Asterias rubens*), vilket resulterade i att vuxna blåmusslor endast påträffades på den övre delen av fundamenten och en djupzonering infann sig. Vid skvalpzonen påträffades olika arter av grön- brun och rödalger. Själva fundamentet dominerades av det rörbyggande kräftjuret *Jassa marmorata* (med en täthet upp till 1 miljon individer per m²), sannolikt utgörande en god födotillgång för t ex fisk. Nere vid erosionsskydden ökade istället utbredningen av havsanemoner och mjukkoraller såsom havsnejlika (*Metridium senile*) och "död mans hand" (*Alcyonium digitatum*). (Leonhard & Birklund 2006)

Forskarplattformen FINO 1 utanför Tyskland liknar ett fackverksfundament placerad på 28 meters djup på sandbotten. Ett år efter etableringen täcktes de första fem metrarna av blåmusslor. I likhet med Horns rev begränsades djuputbredningen av predationstrycket från krabbor och sjöstjärnor. Inledningsvis, innan blåmusslor koloniserat fackverksfundamentet, dominerade hydroider (*Ectopleura larynx*). Hydroider har lätt för att anpassa sig till olika typer av substrat samt har en snabb livscykel (Gili & Hughes 1995), varpå de är en djurgrupp som kan etableras i ett tidigt skede. Hydroiderna minskade med tiden då predationstrycket från nakensnäckor ökade och istället invaderades fundamentet av rörbyggande kräftdjur (*Jassa herdmani*) som bildade täta, tjocka mattor under blåmusselbältet efter ett år. Mellan rören förekom även inslag av hydroider och havsanemoner (*Metridium senile* och *Sagartiogeton undatus*). Den totala biomassan minskade med djupet, ett resultat av den täta mattan av blåmusslor. (Schröder m.fl. 2006)

Vid inventeringen av utsjöbankar i Kattegatt förekom artrika algsamhällen med bl.a. välutvecklade bladtångskogar (*Laminaria*), kalkinkrusterande alger och andra bladformade rödalger. Stenblock var ofta täckta av alger på djup grundare än 15 meter och där ljuset blev sämre ersattes algerna med havsnejlika (*Metridium senile*), läderkorallen "död mans hand" (*Alcyonium digitatum*) och hydroider. Den mobila faunan var också artrik med bl.a. olika kräftdjur, sjöstjärnor och fiskarter. På Persgrunden, en vågexponerad utsjöbank i Skagerrak, påträffades också stora bladtångskogar och mängder av havsnejlika och läderkoraller. (Naturvårdsverket 2006b)

På utplacerade artificiella vertikala och horisontella substrat på den Svenska västkusten har arter som havstulpaner, kalkmaskar, hydroider och tarmsjöpongar etablerat sig i ett tidigt stadium (Wilhelmsson m.fl. 2006b; Svensson m.fl. 2007). Den biologiska samhällsutvecklingen (successionen) har dock inte studerats under en längre tid varpå ett stabilt samhälle inte hunnit infinna sig.

På ett mer horisontellt artificiellt rev bestående av sprängsten utanför Göteborg har successionen studerats under en femårsperiod (Länsstyrelsen 2007). Även dessa koloniserades inledningsvis av kalkmaskar, havstulpaner, hydroider, tarmsjöpongar samt olika mossdjur. Två år efter utplaceringen förekom även koralldjur som havs-

nejlika och "död mans hand". Makroalger koloniserade också de artificiella reven med tiden. Successionen förväntas pågå några år till innan samhället har stabiliserats.

Introduktion av ett hårbottenssubstrat med koloniserande flora och fauna kan öka koncentrationen av både bottenlevande och pelagisk fisk i omgivningen. De flesta studier som finns gjorda idag i samband med havsbaserade vindkraftverk och ökad fisktillgång är baserade på korttidsstudier; men tillsammans med studier utförda på konstruktioner som liknar fundamenten som oljeriggar kan man ändå få en indikation på om fundamenten kommer att öka förekomsten av fisk och övrig mobil fauna, d.v.s. om en rev-effekt kommer att infinna sig.

I Östersjön har rev-effekter, i form av ökad förekomst av fisk, observerats vid Utgrunden I, Yttre Stengrund, Svante 1 utanför Nordersund och vid Öresundsbron. Vid Utgrunden I och Yttre Stengrund (Wilhelmsson m.fl. 2006a) var tätheten av vuxen fisk (sjustrålig och svart smörbult samt sandstubb) dubbelt så hög invid fundamenten (ut till 5 m avstånd) än vad den var på ett avstånd av 20 m och i referensområden. Med juvenil sjustrålig smörbult (*Gobiusculus flavescens*) inkluderad var tätheten fisk istället 100 gånger större invid fundamenten. Fundamenten verkade gynna vissa arter då biomassan ökade men inte artrikedomen. I samband med studien på Utgrunden I och Yttre stengrund gjordes en jämförande studie vid Öresundsbron (Öhman & Wilhelmsson 2005). Även där noterades en högre koncentration av fisk kring bropelarna än på omgivande bottnar. Fiskförekomsten vid det solitära vindkraftverket Svante 1 studerades genom provfiske med olika avstånd till verket. Resultaten visade att det fanns en attraktion av fisk till områden närmare än 400 m från kraftverket som var tydligast när verket var avstängt (Westerberg 1994).

I Västerhavet och Nordsjön har rev-effekter observerats på utplacerade, vertikala strukturer av olika höjd utanför Tjörn i Skagerrak, forskarplattformen Fino 1 utanför Tyskland i Nordsjön, på den mer horisontella artificiella sprängsten som deponerats utanför Göteborg inom det så kallade hummerprojektet samt i vindparken Kentish Flats utanför Englands ostkust. Vid Tjörn konstaterades att de vertikala konstruktionerna hade en positiv effekt på tätheten av fisk, oberoende av konstruktionernas höjd, och verkade gynna vissa arter (Wilhelmsson m.fl. 2006b). Vid forskarplattformen Fino 1 observerades en aggregering av taggmakrill (*Trachurus trachurus*) samt att sjöstjärnor och olika livsstadier av krabbor ökade runt plattformen (Schröder m.fl. 2006). Detta var dock endast observationer. Främst förekomst av hummer har studerats vid den utplacerade sprängstenen utanför Göteborg vilka har ökat med åren. Vid reven uppehåller sig även signifikant fler och större fisk (Länsstyrelsen 2007). Vid Horns rev och Nysted har det endast noterats att fisk uppehåller sig runt fundamenten men man har ännu inte kunnat fastställa någon ökad täthet eller artrikedom av fisk i vindparkerna (Leonhard & Birklund 2006, Klastrup 2006). Kontrollprogrammet (Emu 2006) för vindparken Kentish Flats (Nordsjön) visade på en i många fall högre förekomst av fisk inom vindparken jämfört med de undersökta referensområdena, bl.a. för arterna tunga (*Solea solea*), sandskädda (*Limanda limanda*), rödspätta (*Pleuronectes platessa*) knaggrocka (*Raja clavata*) och hundhaj (*Mustelus asterias*). De naturliga variationerna var dock höga och några statistiska analyser genomfördes aldrig, vilket resulterade i att någon egentlig rev-effekt inom vindparken varken kunde styrkas eller avfärdas. Det bör noteras att detta kontrollprogram inte studerade fiskförekomsten invid fundamenten utan i de förhållandevis stora områdena mellan fundamenten.

Rev-effekter har även konstaterats på oljeplattformar, vars komplexa struktur liknar fackverksfundament. Att oljeriggar ökar koncentrationen av fisk har bl.a. dokumenterats i Mexikanska golfen (Stanley och Wilson 1996; Lindquist m.fl. 2005), Adriatiska havet (Fabi m.fl. 2004) och i Nordsjön (Bell & Smith 1999; Løkkeborg m.fl. 2002; Soldal m.fl. 2002). En långtidsstudie utanför Kaliforniens kust har även konstaterat att oljeplattformar utgör substrat åt en mängd olika ryggradslösa djur (Love m.fl. 2003).

3.2 Ljud under driftsskedet

3.2.1 Bakgrund

I drift avger havsbaserade vindkraftverk ett lågfrekvent buller, vilket huvudsakligen uppstår i växellådan och av allt att döma överförs till vattenmassan via fundamentet (Ingemansson 2002). Fältmätningar av undervattensljud från vindkraftverk har gjorts vid bl.a. Nordersund (Östersjön), Vindeby (Bälthavet), Bockstigen (Östersjön) och Utgrunden I (Östersjön), varav alla är förhållandevis små vindkraftverk (effekt upp till 1,5 MW). Ljudmätningarna har legat till grund för ett flertal beräkningar där olika organismers hörsel förmåga satts i relation till ljud från vindkraftverk; särskilt märks Wahlberg & Westerberg (2005) och Thomsen m.fl. (2006).

En beskrivning av använda enheter och ljudets fysiska egenskaper ges i Faktabox 3 nedan.

Den generella ljudbilden (under vattnet) från havsbaserade vindkraftverk omfattar ett frekvensintervall om 1 – 1000 Hz med särskilt höga ljudnivåer (toppar) vid vissa frekvenser, skiftande mellan olika vindkraftverk. De högsta topparna har hittills visat sig ligga vid frekvensintervallen 15 – 30 Hz och 100 – 200 Hz, här med ökning av ljudnivån upp till 60 dB över bakgrundsljudet (ambient noise) vid 1 m avstånd (Ingemansson 2005; Betke 2006; ÅF-Ingemansson 2007). I frågan om biologisk påverkan från lågfrekvent ljud från vindkraftverk är ljudets egenskaper som *partikelrörelser* i många fall viktigare än ljudnivån (dB). Vid avstånd överstigande c:a 10 – 100 m står partikelrörelserna i direkt relation till ljudnivån och kan beräknas utifrån detta, men inom kortare avstånd är det inte möjligt att beräkna partikelrörelserna vilket innebär att eventuell påverkan på organismer i fundamentens direkta närhet kan vara svåra att skatta utan platsspecifika mätningar i fält.

Havet är en livsmiljö rik på bakgrundsljud från vind, vattenrörelser, djur och inte minst antropogena källor. Särskilt i kustnära vatten kan dygnsvariationerna av lågfrekvent ljud vara mycket höga till följd av fartygstrafik (Westerberg 1996; Nedwell m.fl. 2003). Fartyg såsom färjor, ro-ro fartyg och trålare avger undervattensljud inom samma frekvensintervall och av högre ljudnivåer än vindkraftverk (Ingemansson 2002; Ingemansson 2003; Madsen m.fl. 2006; Thomsen m.fl. 2006). Även broar med järnvägstrafik avger motsvarande buller inom samma frekvenser som vindkraft (Westerberg 1996). Skillnaden består i att vindkraftverk kan avge ett mer varaktigt ljud än passerande fartyg och järnväg, åtminstone i mindre trafikerade havsområden.

Exempelvis avger moderna lastfartyg lågfrekvent ljud (30 – 300 Hz) med en ljudstyrka av 175 dB re 1 μ Pa (RMS) vid källan, vilket är 30 dB (30 gånger) mer än det högsta ljud som utifrån mätvärden beräknats vid vindkraftverk (Madsen m.fl. 2006). Fartygen överröstar således vindkraftverk över stora avstånd och frågan om långväga störning från vindkraftverk är bara teoretiskt relevant i havsområden med liten fartygstrafik (Madsen m.fl. 2006).

Trots att havets organismer lever i ett högt bakgrunds ljud kan det inte uteslutas att det ljud som uppstår av havsbaserad vindkraft i särskilda fall kan vara av betydelse inom korta avstånd från fundamenten.

Många marina djurarter använder sig av ljud för kommunikation, orientering, födosök eller detektion av annalkande fara. Fisk hör särskilt bra vid låga frekvenser, där fisken kan uppfatta ljudets partikelrörelser (Westerberg 1996). Fiskar uppfattar partikelrörelser genom innerörat, upp till frekvenser omkring 150 Hz. Dessutom har fiskar även ett sidolinjeorgan som registrerar små, lågfrekventa (<150 Hz) tryckförändringar utmed kroppen. Sidolinjeorganet används över mycket korta avstånd för att detektera vattenrörelser relativt fiskkroppen, exempelvis för att orientera sig i vattenmassan eller inom ett stim. Sidolinjeorganet detekterar endast ljud över extremt korta avstånd från källan.

Vid högre frekvenser utgörs det hörbara ljudet av tryckvågor och förmågan att uppfatta dessa skiljer sig stort mellan olika arter. Dessa ljudvågor uppfattas enbart av fiskar med simblåsa, och för arter där simblåsan står i kontakt med innerörat är hörsel förmågan särskilt utvecklad. Generellt sett antas fiskarnas hörselorgan vara känsliga vid frekvenser från under 1 Hz upp till ett par hundra Hz för fisk utan simblåsa, upp till ca 500 Hz för fisk med simblåsa och upp till ett par kHz för hörselspecialister. Även ryggradslösa djur kan uppfatta och i vissa fall kommunicera genom lågfrekvent ljud (Popper m.fl. 2001). Marina däggdjur, såsom valar, delfiner och sälar, har en mycket välutvecklad hörsel, men denna är särskilt anpassad för höga frekvenser (långt över 1000 Hz) (Nedwell m.fl. 2007). Genom en omfattande litteratursyntes av Madsen m.fl. (2006) har det bedömts att havsbaserad vindkraft inte utgör någon risk för hörselstörningar på marina däggdjur.

Tabell 2. Skattade effekter på fisk vid olika ljudnivåer över fiskens artspecifika hörseltröskel dB_{ht} för en given frekvens.

LJUDNIVÅ dB ht*	EFFEKT PÅ FISK (Nedwell et al. 2007)
0 - 50	Mild reaktion hos en minoritet av individerna; sannolikt övergående
50 - 90	Tydlig eventuellt övergående reaktion hos en majoritet av individerna
90 +	Starkt undflyende reaktion hos nästan alla individer
130 +	Möjliga skador även från enskilda ljudpulser

* dB_{ht} avser antalet dB överskridande varje enskild fiskarts hörseltröskel vid aktuell frekvens

Påverkan hos fisk

Hur fisk reagerar på ljud från vindkraftverk i drift är ännu (2007) inte klarlagt. Experimentella studier där fisk utsatts för stress genom ljud har visat olika resultat, både undvikande beteende och acceptans. Vid ett pilotförsök inom Vindval (Wikström & Granmo 2008) påvisades en ökad andningsfrekvens hos juvenil rödspotta vid exponering för 178 Hz omkring 100 dB re 1 µPa. Någon eventuell tillvänjning till störningen kunde inte fastställas på grund av pilotprojektets korta exponeringstid på 15 min (i samma studie visade påverkade musslor en tillvänjning efter något dygn). Resultaten ska tolkas med försiktighet eftersom experimenten utförts i små tankar där ljudets egenskap av partikelhastighet visade sig motsvara ett betydligt närmare avstånd från vindkraftverken än vad ljudets uppmätta

egenskap som ljudtryck angav (vilket betyder att i själva verket var det ett högre ljud än motsvarande 100 dB re 1 μ Pa som testades).

I fält har förekomst och aggregering av fiskarter konstaterats invid vindkraftsfundament (se avsnitt 3.1). Inom kontrollprogrammet för vindparken Kentish Flats studerades förekomsten av fisk i parkområdet mellan fundamenten. Trots bristfällig uppställning och avsaknad av statistiska analyser visar dessa studier på en lika stor eller högre förekomst av fisk inom vindparken jämfört med kontrollområdena utanför vindparken. De flesta av de redovisade fiskarterna förekom i ett högre antal inom vindparken, däribland sandskädda, rödspotta och knaggrocka (Emu 2006).

I allmänhet är fiskars tillvänjning för ljud snabb, emellertid kan känsligheten för mycket lågfrekvent ljud (partikelrörelser) vara hög med en mycket långsam tillvänjning (Westerberg 1996). Att fiskar kan störas av särskilt högt ljud inom dess hörbara frekvensområde torde vara givet; vilka ljudnivåer som krävs för störning är emellertid inte klarlagt från art till art.

Nedwell m.fl. (2007) har undersökt ett system för att identifiera riktlinjer för ljudstörning på fisk, se Tabell 2. Enligt dessa resultat krävs ljudnivåer på 50 dB re 1 μ Pa över den enskilda fiskartens hörseltröskel (50 dB_{ht}) för att orsaka en "tydlig eventuellt övergående reaktion" respektive en ljudnivå på 90 dB re 1 μ Pa över hörseltröskeln (90 dB_{ht}) för att orsaka en "kraftigt undflyende reaktion". Hörseltröskeln varierar över olika frekvenser, vilket följaktligen även ljudkänsligheten gör. För de fiskarter som undersöktes av Nedwell m.fl. (2007) konstaterades en lägsta hörseltröskel på 97 – 101 dB re 1 μ Pa vid 200 Hz. För den förstnämnda nivån av störning skulle således en ljudnivå på omkring 150 dB re 1 μ Pa vid 200 Hz krävas beträffande dessa fiskarter. Någon sådan hög ljudnivå har inte uppnåtts intill vindkraftverken i någon av de studerade vindparkerna Nordersund (vid 6 m/s), Vindeby (vid 13 m/s), Bockstigen (vid 8 m/s), Lelystad (vid 7 m/s), Middelgrunden (vid 6 och 13 m/s), Utgrunden I (vid 14 m/s), Horns rev (vid 16 m/s), samt Nysted. Uppmätta ljudnivåer från ovanstående vindparker omräknades här till 1 m avstånd från fundamentet antagande en ljudförlust på 4 dB per avståndsdubbling, grundat på mätningar av Ingemansson (2003) vid Utgrunden I i Östersjön.

Ovanstående resonemang beträffande stressrelaterade ljudnivåer ovan hörseltröskeln (dB_{ht}) grundas på ett system (Nedwell m.fl. 2007) för ljudstörning som tagits fram utifrån den ännu begränsade kunskapen om enskilda arters hörsel och störningsbeteende. Alla riktvärden och bedömningar som görs grundat på detta ska därför betraktas med stor försiktighet.

Sammantaget förefaller det högst antagbart att eventuella störningar av fisk begränsas till höga vindstyrkor och korta avstånd (meterskala) från fundamentet. Förekomst av fisk har påvisats omkring och invid vindkraftverk under drift, men eftersom indikationer på stressymptom har påvisats i experimentella studier kan det emellertid inte uteslutas att ljudet utgör en störningskälla för särskilda arter eller livsstadier.

Påverkan hos ryggradslösa djur

Beträffande ryggradslösa djur har laboratorieexperiment utförts av Marine Monitoring vid Kristineberg AB inom kunskapsprogrammet Vindval (Vindval¹)

2008). De experimentella försöken, som varade 4 dygn, påvisade en initial ökning av grävande aktivitet hos arten limfjordsmussla (*Abra nitida*) vid exponering för lågfrekvent ljud (178 Hz) omkring 100 dB re 1 μ Pa (RMS). Effekten avtog därefter och efter 4 dygn fanns inga tecken på skillnader i grävaktivitet mellan de musslor som utsattes för ljud och de musslor som verkade som kontroller. Samma experiment visade inga motsvarande effekter på beteendet hos ormstjärna (*Amphiura filiformis*) eller på födointaget hos sandråka (*Crangon crangon*). Den testade ljudnivån motsvarar teoretiskt ett avstånd av flera hundra meter från Utgrunden I vid 14 m/s (Vindval¹ 2008).

Ovanstående resultaten ska tolkas med försiktighet då experimenten utförts i små tankar där ljudets partikelhastighet visade sig motsvara ett närmare avstånd från vindkraftverket än vad ljudtrycksnivån (100 dB) angav (vilket betyder att i själva verket var det ett högre ljud än motsvarande 100 dB re 1 μ Pa som testades). I sammanhanget bör även nämnas att vid vindhastigheter på 13 m/s har själva *bakgrundsljudet* både vid Vindeby och Middelgrunden vindparker visat sig överstiga 100 dB re 1 μ Pa för samma frekvensområde som under ovanstående experiment (178 Hz) (ÅF-Ingemansson 2007). Detta innebär att ljudtryck av samma styrka uppstår även från naturliga källor under blåst.

En tidigare studie av Donskoy & Ludyanskiy (1995) har visat att etablering (settlement) av zebromussla (*Dreissena polymorpha*) kan förhindras vid en kombination av vibrationer och lågfrekvent (<200 Hz) ljud. Samma lågfrekventa ljud gav däremot inte upphov till några effekter på redan etablerade zebromusslor eller några andra av de organismer som testades; cyanobakterier, planktoniska kräftdjur (*Daphnia galeata merzdoteae*, *D. pulicuria*), juvenil gul abborre (*Perca flavescens*).

Det finns följaktligen indikationer på att vissa arter kan påverkas av partikelrörelser från högt ljud vid särskilda ljudfrekvenser inom det intervall som uppmätts från vindkraft. Experimentellt har tillvänjning visats och utifrån det faktum att en riklig fauna av ryggradslösa djur konstaterats vid alla undersökta befintliga vindkraftsfundament, och att några signifikanta förändringar av faunan i de omgivande bottarna inte kunnat skönjas (Leonhard & Birklund 2006; OES 2007; se även avsnitt 3.1), är det antagbart att de flesta ryggradslösa djur tillvänjes. I enlighet med försiktighetsprincipen kan ändå ett hänsynstagande tills vidare motiveras vid val och utformning av fundament i särskilt känsliga etableringsområden.

3.2.2 Skillnader mellan havsområden

Hur långt bort från källan ljudet från ett vindkraftverk kan uppfattas av en organism beror delvis av havets bakgrundsljud, vilket i sin tur kan skilja sig stort mellan olika havsområden. Generellt är bakgrundsljudet betydligt högre i Nordsjön än i Östersjön (Thomsen m.fl. 2006). I tätt trafikerade passager såsom Öresund och Bälthavet torde bakgrundsljudet vara närmast konstant högt, eftersom buller av låga frekvenser har mycket lång räckvidd. I havsområden med lågt bakgrundsljud kan ljud från vindkraftverk i drift således komma att innebära en större förändring av den rådande ljudbilden – och därmed en större potentiell störning.

Hur effektivt ljudet färdas genom vattenmassan påverkas av fysiska egenskaper såsom djup och bottensubstrat. I grunt vatten (<30 m) och vid hårt bottensubstrat

fortplantas ljudvågorna längre än vid mjuk botten (lerbotten) och djupt vatten (Ingemansson 2005). De språngskikt som bildas mellan vattenmassor av olika salinitet eller temperatur skiljer sig åt mellan olika havsområden och kan påverka spridningen av ljud med hög frekvens. På djupt vatten kan ett minimum i ljudhastighetsprofilen ge en god ljudutbredning över mycket stora avstånd. Språngskiktens påverkan är emellertid marginell för låga frekvenser, såsom från vindkraft, eftersom dess våglängder är stora i förhållande till djupet (Almgren pers. komm.).

3.2.3 Skillnader mellan olika fundament

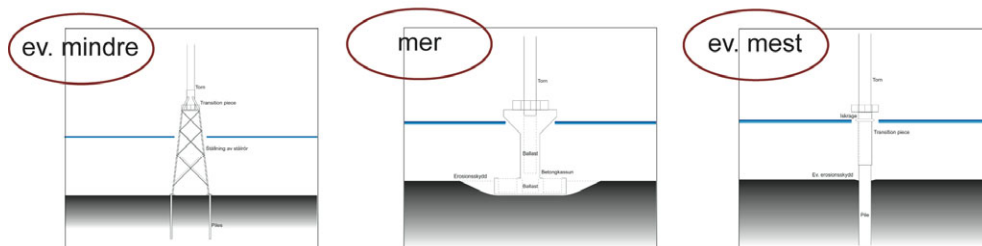
Valet av fundament har betydelse för ljudutstrålningen – d v s hur effektivt stombjudet från växellådan överförs till den omgivande havsmiljön (Ingemansson 2002). Fundamentets massa och ljudöverförande yta spelar stor roll, där en högre massa verkar dämpande medan en stor ljudöverförbar yta medför en effektivare ljudutstrålning. Föremål som är större i förhållande till ljudets våglängd innebär också en effektivare ljudutstrålning (strålningseffektivitet) än mindre föremål (ÅF-Ingemansson 2007). Exempelvis är piles för monopile-fundament större än piles för fackverksfundament och kan därför antas avge ljud mer effektivt. Även materialet har betydelse, där låga frekvenser teoretiskt sett strålar ut mer effektivt i stora fundament av betong än i fundament av stål. Detta medför att gravitationsfundament förväntas avge ljud inom ett lägre frekvensintervall än monopile (Ingemansson 2002), vilket överensstämmer med den jämförelse mellan Nysteds gravitationsfundament och Horns revs monopile-fundament som gjorts av Betke (2006). Utifrån Ingemansson (2003), Betke (2006) och ÅF-Ingemansson (2007) tycks likväl både gravitations- och monopile-fundament ha sin högsta topp av ljudnivå inom frekvensområdet 100 – 200 Hz. En betydande faktor för ljudöverföringen är svets skarvar och fogar vilka verkar dämpande och torde framförallt innebära en ljudreducering hos fackverksfundament (ÅF-Ingemansson 2007).

ÅF-Ingemansson (2007) har teoretiskt jämfört gravitations-, monopile- samt fackverksfundament avseende driftljud, förutsatt samma djup och bottenförhållanden. Då flera motstående faktorer spelar in samtidigt som tillgången till mätdata är liten har inga allmängiltiga slutsatser kunnat fastställas. Jämförelsen indikerar att gravitations- och monopile-fundament avger ljud av samma storleksordning, med skillnaden att gravitationsfundament avger ljud inom ett lägre frekvensintervall än monopile. Fackverksfundament är med sin komplexa struktur svårt att jämföra med de övriga eftersom mätdata ännu saknas. Det förefaller likväl sannolikt att fackverksfundament åtminstone avger ett högre frekvensintervall än båda de andra. Se Bilaga 1 (ÅF-Ingemansson 2007).

Ovanstående resonemang kan ge en fingervisning beträffande ljud under driftskedet, men ska betraktas med försiktighet fram till dess att mätdata finns att jämföra mellan ett större antal olika vindkraftsfundament.

Beträffande storleken på havsbaserade vindkraftverk härrör hittills alla mätdata av undervattensljud från relativt små vindkraftverk (upp till 1,5 MW). Eftersom ett större vindkraftverk innebär att större massor sätts i rörelse kan utgångsljudet förväntas öka – samtidigt medför ett tyngre fundament en effektivare dämpning. Beräkningar där ljudet från två 500 kW turbiner på gravitations- respektive monopile-

fundament skalats upp till 2 MW (med hjälp av data från ett landbaserat 2MW verk) indikerar att stora gravitationsfundament kan komma att avge högre ljud än motsvarande stora monopile-fundament (Ingemansson 2002). Inom vindkraftsindustrin är det allmänt accepterat att turbiner anpassade för offshore-förhållanden avger mer ljud än turbiner på land. Inom vindkraftsbranschen antas det samtidigt att teknikutvecklingen framöver kommer att medföra tystare vindkraftsturbiner (EWEA 2007). Det mesta av ljudet härleds till växellådan, men det finns även turbinfabrikörer som tillverkar direktdrivna generatorer utan växellåda. Några sådana turbiner har ännu inte använts vid havsbaserade anläggningar. Sammantaget är det idag inte möjligt att förutsäga om framtida havsbaserade vindkraftverk kommer att avge mindre eller mer ljud än de nuvarande (2007).



Utdrag från Tabell 6. Sammanfattning av olika fundamentals relativa inflytande på eventuell miljöpåverkan från ljudöverföring. Kunskapsunderlag: måttligt / svagt

3.2.4 Anpassningar för att minimera negativ påverkan

I denna studie framhävs skillnaderna mellan olika fundamentmodeller avseende ljud från driftfasen, kunskapsläget är dock begränsat både vad avser vilka ljud som uppstår och huruvida ljuden kan påverka organismer. Frekvensområdet 100 – 200 Hz har visats vara särskilt framträdande i ljudspektran från både gravitations- och monopile-fundament (ljudspektrat från fackverksfundament är ej undersökt genom mätningar).

Under *särskilda omständigheter* där risker för biologisk påverkan från ljud bedöms föreligga kan det bli motiverat att förespråka en mindre bullrande fundamentmodell eller turbin, vilket lämpligen bör föregås av en platsspecifik ljudteknisk utredning. Teoretiskt sett är det sannolikt att fackverksfundament är den fundamentmodell som avger minst lågfrekvent ljud, detta bör dock utvärderas genom ljudupptagningar i fält.

De studerade vindkraftverkens distinkta frekvenstopp vid 100 – 200 Hz kan sannolikt dämpas genom tekniska modifieringar vid växellådan. Ett alternativ är att utveckla bullerdämpande isolering som fästes utanpå fundamenten.

Faktabox 3. Ljud i havet

I havet rör sig ljudet genom ett tätare medium (vatten) än på land (luft), vilket får konsekvenser för dess egenskaper. I havet sprids ljudenergin över en successivt större area då ljudvägen breder ut sig. I fritt ljudfält sprids den över arean av en sfär. Instängd mellan två skikt sprids den på mantelarean av en cylinder. I praktiken blir ljudutbredningen ofta ett mellanting. I ett djupt öppet hav kan ljudet spridas i alla riktningar – således sfäriskt – och ljudets styrka avtar då med c:a 6 dB per avståndsdubbling. I grunt vatten (<30 m) där ljudet blir instängt mellan botten och ytan begränsas ljudet till två dimensioner – cylindrisk spridning – och ljudets styrka avtar då med c:a 3 dB per avståndsdubbling under ideala förhållanden. Som exempel avtar ett ljud på 100 dB 10 m från källan till 88 dB vid 40 m från källan (två avståndsdubblingar) förutsatt sfärisk spridning medan den blir 94 dB med cylindrisk spridning.

Ljutförlusten med ökat avstånd beror dock även på andra förhållanden, exempelvis havsytagens tillstånd, där t ex brytande vågor ökar ljutförlusten. I grunt vatten är botten substratet av särskild betydelse. En hård slät botten (t ex berghäll) medför små ljutförluster medan mjukt substrat (t ex sand och lera) kan medföra stora ljutförluster. På grunt vatten uppstår stående vågor mellan vattenytan och botten. Ytan upplevs som mjuk av ljudet och ljudtrycket blir mycket svagt vid ytan. Om botten är hård får den stående vågen ljudtrycksmaximum vid botten och ljudtrycksminimum vid ytan. [Den stående vågen med den lägsta frekvensen uppstår då djupet är lika med en fjärdedels våglängd. Vid 20 m bottendjup inträffar detta vid c:a 19 Hz. Högre ordningens stående vågor inträffar då bottendjupet är lika med ett udda antal fjärdedels våglängder. De stående vågorna har betydelse för ljudtrycksnivåns fördelning med djupet.]

Som exempel kan ges skillnaden mellan spridningen av de kraftiga ljudpulser som genererades av pålningsarbetena vid Utgrunden I (Östersjön; monopile $\varnothing = 3$ m) och Burbo Bank (Irländska sjön; monopile $\varnothing = 4,7$ m). Vid Utgrunden I uppmättes en ljutförlust på c:a 4,8 dB per avståndsdubbling (ØDS 2000) medan mätningarna vid Burbo Bank gav en ljutförlust överstigande 6 dB per avståndsdubbling (Parvin & Nedwell 2006). Båda vindparkerna ligger på grunt vatten men botten substratet skiljer sig, med sten på Utgrunden I och sand på Burbo Bank. Även havsytagens skick skiljde sig mellan de båda mätfällena, med relativt lugn sjö (våghöjd <2 m) vid Utgrunden I respektive kraftig vind och brytande vågor vid Burbo Bank (ØDS 2000; Parvin & Nedwell 2006). Skillnader i ljutförlust spelar en stor roll för över vilket avstånd aktiviteter vid en havsbaserad vindpark kan påverka marina organismer.

Ljudets styrka beskrivs vanligen genom deciBel (dB) på en logaritmisk skala, relaterat till hur mycket ljudet överstiger referenstrycket, vilket för undervattensmiljön har bestämts till 1 μPa (för luft är referenstrycket 20 μPa). Den logaritmiska skalan används eftersom spektrat för uppmätt ljud är mycket brett; med logaritmerade värden komprimeras skalan vilket gör den mer lättöverskådlig. Hur djur i havet uppfattar ljudnivåer av detta mått kan inte direkt översättas till hur landlevande djur och människor uppfattar ljud av motsvarande styrka dB (A). Ljuduppfattningen avgörs istället genom olika organismers hörseltröskel, d.v.s. vilken lägsta ljudnivå som kan detekteras vid varje ljudfrekvens.

Det fysikaliska fenomenet ljud karakteriseras både av ljudtryck och av partikelrörelser. I en ljudvåg på avstånd från ljudkällan bestäms kvoten mellan ljudtrycket och partikelhastigheten av vattnets vågimpedans som är lika med vattnets densitet gånger ljudhastigheten, d.v.s c:a $1,5 \times 10^6$ Ns/m^3 . Partikelförskjutningen (partikelrörelsen) är lika med partikelhastigheten genom vinkelfrekvensen. Det innebär att partikelförskjutningen vid samma ljudtryck blir större vid låga frekvenser i en ljudvåg än vid höga. Partikelaccelerationen är lika med partikelhastigheten gånger vinkelfrekvensen. Nära en ljudkälla kan stora partikelhastigheter med lokala tryckfluktuationer ske utan att en ljudvåg sprider ljudenergin bort från källan.

Ljudets egenskaper kan uppmätas och anges i flera olika enheter och utifrån olika antaganden. I denna studie betraktas ljudets egenskaper mycket generellt utifrån nivå angiven i dB re 1 μPa och spektrum i $1/3$ -oktavbandsnivå.

Exempel på olika mått är *peak pressure* (den högsta ljudnivån som uppnås i en puls), SEL (Sound Exposure Level; ljudnivån för ett moment normerat till en sekund) och RMS (ljudnivåns energimedelvärde över hela ljudpulsen).

3.3 Hydrografiska förändringar

3.3.1 Bakgrund

Vid anläggandet av havsbaserad vindkraft kan fundamenten komma att påverka strömmar, vågor samt den vertikala omblandningen av yt- och bottenvatten, vilket kan påverka de hydrodynamiska förhållandena runt det enskilda vindkraftverket och potentiellt i hela parken. En förändring i de hydrodynamiska förhållandena skulle kunna förändra vattenmiljön och sedimentets sammansättning och därigenom skapa andra förutsättningar för den existerande floran och faunan. Det skulle även kunna påverka vågorna och vattnets rörelsemönster nedströms vindparken. Detta kan få betydelse om parken etableras i närheten av sandområden som är under ständig förändring och där vågor och strömmar har betydelse för strandlinjens orientering, vilket kan resultera i erosion och/eller ansamling av material. Det är även viktigt att undvika påverkan på det inflödande syrerika bottenvattnet till Östersjön och andra instängda vattenområden som fjordar och vikar.

Det har gjorts en del modeller och beräkningar på hur ett vindkraftverk kan komma att påverka hydrografen i ett område. Vad som händer när strömmar och vågor träffar ett hinder som beskrivs nedan är hämtat ur SMHI: s rapporter från Skottarevet (Karlsson m.fl. 2006) och Kriegers flak (Johansson 2004; Lindow m.fl. 2007), samt DHI: s (Dansk Hydraulisk Institut) rapporter från Lillgrund (Møller & Edelvang 2001; Edelvang m.fl. 2001; Sloth 2001).

När vattnet passerar en vindpark ökar strömmens hastighet runt fundamenten och det bildas interna vågor och en virvelgata nedströms, med en horisontell utsträckning av två gånger hindrets diameter i bredd och tio gånger hindrets diameter i längd. Om vindkraftverkens fundament står i ett skiktat vatten, orsakat av temperatur- eller salthaltsskillnader (språngskikt), kan den turbulens som bildas resultera i en ökad omblandning av yt- och bottenvatten varpå språngskiktet försvagas och det tunga bottenvattnet blir utsötat. Storleken av blandningen är starkt kopplad till strömmens styrka, då starkare ström ger en ökad omblandning. Det har diskuterats om denna omblandning kan få betydelse för bottenströmmen av syrerikt, tungt saltvatten från Kattegatt in till Östersjöns djupbottnar, samt om den kan resultera i en uppblandning av närsalter från bottenvattnet, vilket skulle kunna öka algbloomningen vid ytan.

SMHI har i samband med ansökan om etablering av vindparken vid Skottarevet, utanför Falkenberg (Kattegatt) undersökt om fundamenten lokalt kan ge en förhöjd vertikal blandning genom språngskiktet (Karlsson m.fl. 2006). Språngskiktet kan variera i olika områden och har utanför Falkenberg visat sig ligga inom intervallet 10-15 meters djup, vilket innebär att vattenmassan är omblandad ner till språngskiktet och därunder mera homogen. Detta betyder att här kan endast ett fundament som placeras djupare än 10 meter påverka en omblandning av yt- och bottenvatten. Resultaten från SMHI:s beräkningar, som baseras på en oskiktad vattenmassa, visar att blandningen av vattnet bakom ett fundament skulle öka med en faktor av 10. Detta skulle innebära att 30 st. monopile-fundament på en yta av 20 km² skulle resultera i en ökad uppblandning på 1 % över bakgrundsvärdet.

Dessa beräkningar kan bedömas som en övre gräns då de inte tar hänsyn till ett befintligt språngskikt samt att de grundar sig på en blandning i horisontalled vilket kräver mindre energi än en vertikal omblandning. En uppblandning på 1 % är lika stor eller mindre än den naturliga variationen av blandningen i kustvattnet i Kattegatt och anses därför vara av liten betydelse.

SMHI har även utfört en överslagsberäkning på hur en vindpark vid Kriegers flak skulle påverka en vertikal nedblandning av sötare vatten i djupvattnet. Resultaten visar att parkens påverkan är mindre än 1 % jämfört med den naturliga medelnedblandningen och kommer inte att påverka djupvattenstransporten från Kattegatt till Östersjön (Johansson 2004).

Inom det europeiska projektet QuantAS har mätningar intill Stora Bältbron utförts vilka har visat att interna vågor och virvlar runt pelarna har resulterat i salt-haltsvariationer som kan spåras upp till en kilometer nedströms bron (Lindow m.fl. 2007). Inom projektet planeras även att utföra laboratorieexperiment på turbulensen i skiktade vatten. Hittills har monopile-fundament testats och preliminära resultat visar att det bildas en bogvåg framför fundamentet och en virvelgata i språngskiktet nedströms. I denna undersökning var effekten begränsad till fundamentets närområde. Man planerar även att undersöka andra typer av fundament.

I samband med tillståndsansökan till Lillgrund har DHI utfört modelleringar som koncentrerats på intransporten av djupvatten i Östersjön som är av stor vikt för syrehalten i Östersjöns botten. Detta var även av stor betydelse vid byggandet av Öresundsbron, då den s. k. nollösningen innebär att Öresundsbrons inverkan på vattenflödet in till Östersjön inte fick överstiga 0,5 % av förhållandena utan förbindelsen. DHI beräknade den blockerande effekten från fundamenten på vattengenomströmningen till 0,0 % ($\pm 0,1$ %), vilket är mindre än den osäkerhet ($\pm 0,18$ %) som bestämdes vid modelleringsarbeten på Öresundsbron där samma modellsystem (MIKE3) användes. Lillgrunds blockerande effekt anses således vara obetydlig i jämförelse med de vattenmassor som strömmar genom Öresund (Møller & Edelvang 2001), vilket även konstaterades vid Öresundsbron (Öresundskonsortiet 2000).

DHI simulerade även hur Lillgrund kan tänkas påverka strömförhållanden lokalt. Resultaten visade att strömningshastigheten inom vindparken reducerades med mindre än 4 %, vilket inte anses påverka strömningshastigheten eller sedimenttransport utanför parken. Även vindparkens påverkan på vågor simulerades. Vågmonstret är beroende av vattendjup, inkommande vågfrekvens, fundamentets utformning samt antalet och placering av fundamenten. DHI:s beräkningar indikerar en betydande förändring på vågmonstret inom 10 meter från varje enskilt fundament vilket resulterar i en reduktion av vågornas energiinnehåll inne i parken med mindre än 5 % (Edelvang m.fl. 2001).

3.3.2 Skillnader mellan havsområden

Vindkraftverk kan eventuellt påverka hydrografen i ett smalt sund, medan en obetydlig påverkan kan förväntas i ett öppet havsområde.

Omblandningen av yt- och bottenvatten är beroende av språngskiktets styrka som bestäms av täthetskillnader mellan de olika vattenmassorna. Detta innebär att skillnader kan uppstå mellan områden med olika hydrografiska förhållanden.

Längs Sveriges kuster rinner en ytström av bräckt vatten från Östersjön genom Kattegatt och Skagerrak och en djupare bottenström i motsatt riktning med saltare vatten från Nordsjön. Det språngskikt som uppstår mellan dessa två vattenmassor kan vara mer eller mindre skarpt samt ligga på olika djup.

I Skagerrak ligger språngskiktet på c:a 15 meters djup och varierar något både i djup och styrka med väderförhållanden då starka vindar påverkar omblandningen och salthalten i ytvattnet. I Kattegatt är skillnaderna i salthalt mellan yt- och bottenvatten större, vilket gör språngskiktet relativt stabilt. Då bottenströmmen passerat Kattegatt och de grunda trösklarna i Öresund och Bälten sprider sig det tunga bottenvattnet in i Östersjön. Salthaltssprångskiktet mellan ytvattnet och bottenvattnet ligger mycket djupare i Östersjön, och i Bottenviken och Bottenhavet är omblandningen och sötvattentillförseln så stor att språngskiktet är mycket svagt.

Djupet i området där vindparken placeras har således betydelse för fundamentens, om än lilla, påverkan på blandningsprocesserna. Detta innebär att en vindpark i Kattegatt kan komma att påverka den vertikala omblandningen redan på 10 meters djup, medan ett vindkraftverk i Arkonabassängen i södra Östersjön måste överstiga 30 meters djup innan språngskiktet försvagas av turbulensen som kan skapas av fundamenten.

Då det sker en ökad produktion av djur och växter på fundamentet kommer nedbrytningsprocesser av dött material att öka på botten nedanför, varpå lokal syrebrist kan uppstå. Där språngskiktet är starkt och omblandningen med syrerikt ytvatten är liten kommer denna påverkan att bli större. Syrebrist förekommer periodvis på botten i både Östersjön, Bälten, Kattegatt och Skagerrak. (Karlson m.fl. 2002) till följd av övergödning och en ökad produktion vid ytan. När syrebrist uppkommer, sker detta vanligtvis under språngskiktet. Dessa områden är extra känsliga för ytterligare belastning av organiskt material.

3.3.3 Skillnader mellan olika fundament

Hydrografiska förändringar orsakade av fundament i en havsbaserad vindpark anses vara försumbara utifrån de beräkningar som har tagits fram. Effekten på strömmar och omblandning är endast lokala inom parken och så pass låga att den knappt överstiger den naturliga variationen. SMHI:s och DHI:s modeller och beräkningar har utförts på pjarlika konstruktioner, varpå ett gravitationsfundaments påverkan blir svår att uppskatta. Man kan däremot konstatera att ett gravitationsfundament vars diameter är större än en monopile bör ha en större påverkan på turbulensen och de interna vågorna. Huruvida ett fackverksfundament ska betraktas som en enda stor monopile som blockerar vattenrörelserna bestäms av hur vattnet rör sig igenom nätverket av stålrör som fackverksfundamenten är uppbyggda av, vilket är svårt att uttala sig om innan några direkta studier utförts. Fackverksfundament är dock, liksom oljeriggjar, konstruerade så att vattenmassor lätt ska kunna passera ostört.



Utdrag från Tabell 6. Sammanfattning av olika fundament relativa inflytande på eventuell miljöpåverkan från hydrografiska förändringar. Kunskapsunderlag: svagt

3.3.4 Anpassningar för att minimera negativ påverkan

De hydrografiska förändringar som uppstår av vindkraftfundament kan endast i undantagsfall, t ex vid etablering i smala sund, komma att medföra en betydande miljöpåverkan. De smärre förändringar som uppstår är begränsade till fundamentets närhet. Det saknas direkta jämförelser mellan olika fundamentmodeller i detta avseende, men ju mindre fundament-diametern är desto mindre blir påverkan.

3.4 Konstruktionsbuller

3.4.1 Bakgrund

Konstruktionsarbeten i samband med havsbaserad vindkraft innebär flera källor till undervattensbuller; däribland fartygstrafik, muddring, stenläggning, pålning och dykeriarbete.

Oavsett vilka fundament som används så innebär anläggningsarbetet en ökad fartygstrafik. Ljudemissionen skiljer sig mellan olika fartyg – som exempel har en 5 m utombordare visats avge 152 dB re 1 μ Pa vid 1 m avstånd och ett 170 m lastfartyg 192 dB re 1 μ Pa vid 1 m (Nedwell & Howell 2004). De fartyg som anlitas i samband med havsbaserad vindkraft kan förväntas avge ljud i storleksordningen 170 dB re 1 μ Pa vid 1 m avstånd (Nedwell & Howell 2004). Generellt omfattar fartygsbuller frekvensområdet 10 – 1000 Hz.

Muddring (utgrävning av botten) vidtas vid beredning av botten, vilket särskilt krävs vid anläggning av gravitationsfundament. Förutom sedimentspridning medför mudderverksamhet buller inom frekvensområdet 20 – 1000 Hz, och ljudnivån har uppmätts till 160 dB re 1 μ Pa (RMS) vid frekvenstoppar på 100 Hz (Madsen m.fl. 2006). Ljudnivåerna skiljer sig mellan individuella mudderverk, men tycks ligga omkring 130 – 140 dB re 1 μ Pa på 200 m avstånd utifrån Nedwell & Howell (2004).

Stenläggning sker vid utplacering av erosionsskydd och vid fyllning av betongkassun (gravitationsfundament). Beträffande buller från stenläggningsarbete i samband med vindkraft saknas mätdata; en mätning har dock gjorts vid stenläggning på 60 m djup för annat ändamål. Någon höjning av ljudnivån relaterad till stenlägg-

ningen kunde inte påvisas – däremot registrerades lågfrekvent buller från fartyget (Nedwell & Howell 2004).

I samband med installation av fundament sker inspektioner och precisionsarbeten med hjälp av apparatdykare. Vissa moment kräver kraftiga redskap såsom svets, borrar och skärverktyg vilka kan medföra mycket höga ljudnivåer (mätningar har konstaterat ljudnivåer upp till 200 dB re 1 μ Pa vid källan). (Nedwell & Howell 2004)

Den mest betydande källan till konstruktionsbuller i samband med havsbaserad vindkraft och många andra verksamheter är pålningsarbeten (Madsen m.fl. 2006). Pålning används för att förankra de flesta fundamentmodeller, dock inte gravitations- eller bucket-fundament. Ljudnivåerna vid pålning beror till stor del på pile-diametern och kan bli mycket höga, särskilt beträffande monopile-fundament.

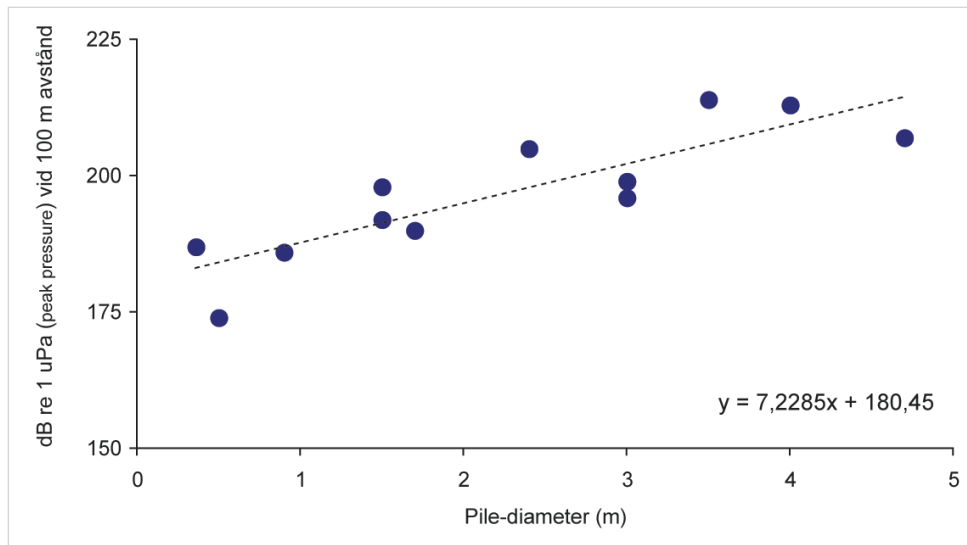
Mindre piles drivs ned med hjälp av en gravitationshammare, där en tyngd hissas upp och släpps ned från ett par meters höjd. För större piles används ofta dieseldrivna hammare och för piles med en diameter av flera meter, eller vid hårt packat bottensubstrat, fordras kraftfulla hydrauliska hammare (Reyff 2004). Under vissa förhållanden är det emellertid möjligt att förankra piles genom vibrationshammare vilket orsakar mindre skadligt ljud.

Pålning orsakar repeterade pulser av högt ljud; slagfrekvens och antal slag varierar efter pile-diameter, bottensubstrat, penetrationsdjup och hammarens effekt. Som en indikation krävdes 1320 slag under 1,5 timmar (frekvens 2 – 28 slag/min) vid pålning av ett enskilt monopile-fundament ($\varnothing = 3$ m) vid Utgrunden I enligt mätningar på plats (ØDS 2000), se vidare i avsnitt 2.2.3.

Ljudnivån från pålning kan anges i flera olika mått, däribland *peak pressure* (den högsta ljudnivån som uppnås i en puls), SEL (Sound Exposure Level; ljudnivån för ett moment normerat till en sekund) och RMS (ljudnivåns energimedelvärde över hela pulsen). Peak pressure bedöms vara det mest adekvata i sammanhang som berör direkta skador på biologiska organ (Reyff 2004). Ljudnivåerna vid källan når i regel långt över 200 dB re 1 μ Pa (både peak pressure och SEL). Hur hög ljudnivå som uppstår beror av flera faktorer, såsom bottensubstrat, hammarens effekt och storleken på de piles som ska föras ned.

Tabell 3. Ljudnivåer (peak pressure) vid pålning av piles med olika diameter, ljudnivån standardiserad till 100 m avstånd från ljudkällan.

DIAMETER (m)	PEAK vid 100 m (dB re 1 μ Pa)	PROJEKT	REFERENS
0,36	187	Brobyggnation*	Reyff 2004
0,5	174	Hamnbyggnation*	Nedwell & Howell 2004
0,9	186	Hamnbyggnation*	Nedwell & Howell 2004
1,5	198	Hamnbyggnation*	Elmer m. fl. 2007
1,5	192	Jacket-fundament*	Betke m. fl. 2005
1,7	190	Brobyggnation*	Reyff 2004
2,4	205	Brobyggnation*	Reyff 2004
3	199	Monopile-fundament*	Elmer m. fl. 2008
3	196	Monopile-fundament*	ØDS 2000
3,5	214	Monopile-fundament*	Elmer m. fl. 2007
4	213	Monopile-fundament**	Nedwell & Howell 2004
4,7	207	Monopile-fundament	Parvin & Nedwell 2006



Figur 11. Uppmätta ljudnivåer (peak pressure) vid 100 m avstånd för pålning av piles med olika diameter. Avstånd och diameter är signifikant ($p < 0,001$) korrelerade till ett R-värde av 0,86. Pearson two-tailed test.

Vid pålning av ett monopile-fundament med 3 m diameter (Utgrunden I) återfanns det mesta av energiinnehållet i varje puls inom frekvensområdet 100 – 2000 Hz, med en topp kring 300 Hz (ØDS 2000). Överlag ger mindre piles upphov till högre frekvenser och en lägre ljudnivå jämfört med stora piles (ÅF-Ingemansson 2007).

I Tabell 3 sammanställs mätdata från pålningsarbeten och i Figur 11 illustreras hur ljudnivån (peak pressure) ökar linjärt med ökad pile-diameter. Av mycket stor betydelse är hur mycket ljudet avtar med avståndet, vilket varierar från plats till plats beroende av framförallt bottensubstrat och djup.

De pulser av extrem ljudnivå som uppstår i samband med pålning kan medföra undflyendereaktioner och fysiska skador för organismer i omgivningen. Hur långt denna påverkan sträcker sig beror av producerad ljudnivå, mottagarens djup i vattenpelaren, havsyttans tillstånd, bottensubstrat samt bottendjup (ljudet avtar snabbare vid mjukt bottensubstrat och i djupt vatten). Fisk med simblåsa tillhör de känsligaste organismerna; för torsk och sill beräknas undflyende kunna ske över många kilometers avstånd vid oskyddad pålning (Parvin & Nedwell 2006). I samband med pålningsarbeten har i flera fall död fisk påträffas, orsakat av ljudpulsens skador på inre organ (Nedwell & Howell 2004; Reyff 2004).

Olika fiskarter är känsliga för ljud inom olika frekvensintervall och tolererar olika ljudnivåer. För att möjliggöra ett fastställande av riktlinjer för konstruktionsbuller har Nedwell m.fl. (2007) använt en metod där toleransnivån för enskilda fiskarter relateras till dess hörseltröskel (dB_{ht}) samt dess hörbara frekvensintervall. Metoden baseras på experimentella studier där det konkluderas att 90 dB_{ht} (alltså 90 dB över djurets hörseltröskel vid den aktuella frekvensen) är en applicerbar toleransnivå utifrån alla de testade fiskarterna. Vid ljudnivåer däröver förväntas en "kraftigt undflyende reaktion". Vid 130 dB_{ht} riskeras skador på hörsel och organ även från enstaka ljudpulser, såsom ett hammarslag vid pålning (se Tabell 2).

Tabell 4. Beräknad räckvidd för undflyende reaktioner (90 dB_{ht}) respektive skadeverkan (130 dB_{ht}) på torsk vid muddring och pålning av olika piles samt med olika skyddsåtgärder vidtagna. Beräkningarna bygger på metod förespråkad av Nedwell m. fl. (2007), det finns emellertid även invändningar mot denna metod och generaliserbarheten ska betraktas med försiktighet. De beräknade avstånden beror också av den platsspecifika ljudförlusten och bör endast betraktas som jämförelsevärden mellan olika fundament och skyddsåtgärder.

LJUDNIVÅ dB vid 100 m	TOPP (Hz)	FUNDAMENTMODELL*	SKYDDSÅTGÄRD	PÅVERKANS RÄCKVIDD FÖR TORSK	
				90 dB (ht)	130 dB (ht)
145	150	Gravitation (muddring)	ingen	2 m	-
210	300	Monopile (>3 m diameter)	ingen	25 km	80 m
			-5 dB	12 km	35 m
			-10 dB	6 km	18 m
195	300**	Fackverk (1,5 m diameter)	ingen	3 km	9 m
			-5 dB	1,5 km	4 m
			-10 dB	0,7 km	2 m

* se Tabell 3

** frekvensintervall saknas för små piles, men en topp inom högre frekvenser kan förväntas

OBS. Avstånden är beräknade efter en antagen ljudförlust på 4,8 dB per avståndsdubbling, utifrån mätningar vid Utgrunden I (ØDS 2000); se Tabell 5 för beräkningar efter den högre ljudförlust som uppmätts vid Burbo Bank vindpark.

Genom att applicera ovanstående metod på de ljudnivåer som har uppmätts vid pålningsarbete (Tabell 3) kan påverkans räckvidd beräknas för enskilda fiskarter. Metoden bygger på ett flertal antaganden och avstånden ska givetvis betraktas som ytterst approximativa; det intressanta i sammanhanget är de relativa skillnaderna mellan olika fundament och skyddsåtgärder.

För en torsk med en hörseltröskel på 82 dB re 1 µPa vid 300 Hz (Nedwell & Howell 2004) motsvarar 90 dB_{ht} ett avstånd omkring 25 km från pålning av ett monopile-fundament (Ø >3 m) respektive 3 km från pålning av ett fackverksfundament med 1,5 pile-diameter. Se Tabell 4. Dessa beräkningar baseras på en ljudförlust på 4,8 dB per avståndsdubbling utifrån mätdata från pålning Utgrunden I i Östersjön (ØDS 2000). Betydligt högre ljudförlust har uppmätts vid pålningsarbetet för Burbo bank i Irländska sjön, genererande avsevärt mindre räckvidd för påverkan (2 km för 90 dB_{ht} torsk) (Parvin & Nedwell 2006). Se Tabell 5 och Tabell 2. Att torskens hörseltröskel vid just 300 Hz använts ovan beror på att det är det frekvensområde där ljudpulsens från pålning visat sig vara som högst för en Ø = 3 m pile (ØDS 2000).

Tabell 5. Parwin & Nedwell (2006):s beräknade räckvidd för undflyende av fisk och däggdjur under pålningsarbete vid Burbo Bank (Irländska sjön) monopile-fundament; uppmätt ljudförlust var omkring 6,5 dB per avståndsdubbling. Pile-diametern var 4,7 m. Avstånden och generaliserbarheten ska betraktas med försiktighet eftersom metoden bygger på flera antaganden samt den platsspecifika ljudförlusten.

DJURART	RÄCKVIDD 90 dB _{ht}
Sill (<i>Clupea harengus</i>)	2 600 m
Torsk (<i>Gadus morhua</i>)	2 000 m
Havsaborre (<i>Dicentrarchus labrax</i>)	500 m
Sandskädda (<i>Limanda limanda</i>)	500 m
Tumlare (<i>Phocoena phocoena</i>)	5 000 m
Öresvin (<i>Tursiops truncatus</i>)	4 000 m
Knubbsäl (<i>Phoca vitulina</i>)	3000 m

Marina däggdjur beräknas kunna uppfatta ljudet från pålningsarbeten på avstånd överstigande 100 km. För att utesluta skador på valar (t ex tumlare) och säl-djur (t ex knobbsäl) har det framförts att ljudnivån ej ska nå över 180 respektive 190 dB re 1 μ Pa (RMS). Detta innebär enligt Madsen m.fl. (2006) ett skyddsavstånd på omkring 2 km vid pålningsarbete motsvarande ett 3 diameters monopile-fundament. Det bör samtidigt framhållas att ovanstående riktvärden (dB) inte kan anses allmängiltiga eftersom eventuell påverkan beror av ett stort antal varierande faktorer (Wahlberg pers. komm.).

Hur marina ryggradslösa djur påverkas av extrema ljudnivåer från pålningsarbeten är inte känt, generellt kan de dock förväntas vara mindre känsliga än fisk och däggdjur eftersom de saknar luftfyllda kroppshåligheter.

Sammantaget innebär pålningsarbeten stora risker för skador på marina organismer, inte minst fisk, och det är av vikt att denna aspekt beaktas vid val av fundament och lämpliga skadeförebyggande åtgärder. De flesta andra konstruktionsrelaterade bullerkällor, såsom fartyg, muddring, stenläggning och dykeriarbete ger lägre ljudnivåer och förväntas medföra undvikandereaktioner snarare än skador även vid små avstånd. Om sprängning måste utföras, innebär detta dock mycket höga ljudtryckstoppar.

3.4.2 Skillnader mellan havsområden

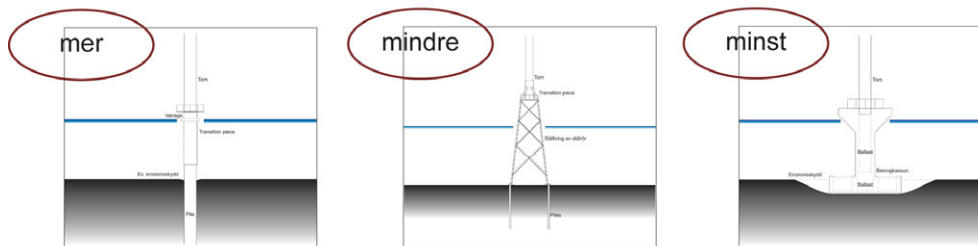
Avseende miljöpåverkan från konstruktionsbuller föreligger inte några generella skillnader mellan Nordsjön och Östersjön. Mycket stora skillnader i ljudets räckvidd uppkommer dock utifrån områdets naturliga ljudförlust, vilken beror av bottenmorfologin. Grunt vatten och hårt bottensubstrat bidrar till att ljudet fortplantas längre och påverkansområdet blir större (Ingemansson 2005).

De uppkomna miljökonsekvenserna beror vidare på områdets ekologiska betydelse, i synnerhet beträffande fortplantnings- eller uppväxtområden för enskilda arter.

3.4.3 Skillnader mellan olika fundament

Utöver buller från en ökad fartygstrafik, vilket uppstår oavsett fundament, innebär gravitationsfundament att buller uppkommer från muddring, stenläggning och dykeriarbeten. Monopile-, tripod- och fackverksfundament kräver ingen muddring men däremot pålning vilket avger extrema och potentiellt skadliga ljudnivåer. Generellt avger pålning av piles med större diameter ett kraftigare ljud och monopile-fundament påverkar därmed ett avsevärt större område, se Tabell 3. Vid tripod- och fackverksfundament används flera mindre piles och påverkan sker då över ett mindre avstånd; flera mindre piles kan dock också innebära en längre installationsperiod.

Att mindre piles genererar ljudnivåer inom ett högre frekvensintervall kan medföra en ytterligare reducering av räckvidden för undflyende hos fiskarter med hörsel inom lägre frekvensintervall. Denna aspekt har dock inte kunnat kvantifieras här på grund av avsaknad av frekvensdiagram från pålning av små piles.



Utdrag från Tabell 6. Sammanfattning av olika fundament relativa inflytande på eventuell miljöpåverkan från konstruktionsbuller. Kunskapsunderlag: måttligt

3.4.4 Anpassningar för att minimera negativ påverkan

För att exemplifiera skillnaderna mellan konstruktionsbuller från olika fundament redogörs för beräknat undflyendeavstånd och skaderäckvidd beträffande torsk i Tabell 4 (se även Tabell 5).

Det framgår av Tabell 4 att det råder stora skillnader mellan olika fundamentmodeller beträffande miljöpåverkan från konstruktionsbuller. Gravitationsfundament ger upphov till ringa störning från ljud, till skillnad från pålade fundament. Eftersom skillnaden mellan grova och mindre piles är stor avseende räckvidd av skadliga ljudnivåer är fackverksfundament här att föredra jämfört med monopilefundament. Tripod-fundament torde befinna sig däremellan.

Det finns flera metoder för att minimera skadeverkan från extrema ljudnivåer vid pålning. Dessa bör appliceras oavsett storlek på piles men i synnerhet vid monopile-fundament. Redan en minskning av 5 – 10 dB har stora betydelser för skadeverkans och störningens räckvidd; minskningar på 20 – 30 dB är följaktligen av ännu större värde. Spridningen av ljudpulserna kan minskas genom skyddsanordningar, utgångsljudet kan minskas genom mindre bullrande metoder, ljudets påverkan på omgivningen kan minskas genom förvarnande åtgärder, och kanske viktigast av allt, kan tiden för pålningsarbeten anpassas efter biologiskt känsliga perioder:

Bubbelskärm

Att avskärma pålningsarbetet genom en tät skärm av luftbubblor [bubble curtain] kan vara en effektiv metod för att minska höga ljudnivåer. Hur stor dämpning som uppnås varierar stort mellan olika tekniska utformningar; mindre ambitiösa bubblöskärmar har visat sig vara i stort sätt verkningslösa (Nedwell m.fl. 2003; Reyff 2004) medan avancerade system kunnat reducera upp till 30 dB (Reyff 2004). I flödande vatten minskas bubblornas effektivitet kraftigt men specialdesignade lösningar har dock tagits fram även för vatten med viss ström (Reyff 2004).

Sammantaget kan bra system av bubbelskärmar förväntas ge en reduktion på åtminstone 10 dB vid pålning i lugnt vatten och 5 dB i strömmande vatten. Med särskilt välanpassad teknik och gynnsamma förhållanden kan ytterligare reduktion uppnås.

Kofferdam

Vid pålning i grunt vatten kan en kofferdam [cofferdam] anläggas runt infästningspunkten. En kofferdam innebär att ett litet område stängs in med t ex en plåtskärm, varpå området torrläggs genom att vattnet pumpas ut. Ljudet från pålningen måste då passera luft eller gå via botten för att nå ut till omgivande vatten. Denna metod har visat sig effektivt reducera ljudnivåerna från pålning (Reyff 2004) och har bland annat använts vid de omfattande pålningsarbeten som företagits under brobyggnationen Bay Bridge East Span, San Francisco.

Vibrationshammare

Istället för tunga långsamma slag kan pålning av mindre och mellanstora piles ske med vibrationshammare som genererar snabba lättare slag [vibro piling]. Metoden, som begränsas till pålning av mindre och mellanstora piles, kan medföra en viss reduktion av ljudnivåerna (Nedwell m.fl. 2003; Reyff 2004). Det har dock visats att ljudnivåerna i vissa fall kan bli högre med vibrationshammare (pile $\varnothing = 0,7$ m: 200 dB peak pressure vid 10 m); metoden bör därför betraktas med försiktighet (Reyff 2004).

Isolering

Vid pålning kan ett rör av plastskum med stålplåt på utsidan sänkas ned över den piles som ska pålas, varpå ljudet dämpas. Metoden har visats ge en betydande dämpning vid höga frekvenser (omkring 10 dB reduktion >1000 Hz) och en viss dämpning (0 – 10 dB) vid lägre frekvenser (ÅF-Ingemansson 2007).

Varningsmetoder / Ramp-up

En enkel metod för att minska fysiska skador på fisk och andra rörliga djur i vattnet är att starta upp varje pålningsförfarande med lätta hammerslag för att sedan öka i styrka allt eftersom djuren undflyr området. Denna metod har använts både vid brobyggen och vid installation av monopile-fundament för vindkraft (Reyff 2004; EWEA 2007). Däggdjur och fisk kan även skrämmas bort genom framkallade akustiska signaler med extrem ljudnivå (t ex sälskrämmor) (Nedwell m.fl. 2003). Förvarnande metoder minskar risken för fysiska skador och mortalitet hos fisk och däggdjur – störning och undflyende reaktioner sker dock med bibehållen räckvidd.

Icke-tekniska metoder

För att minska risken för skador på marina däggdjur kan observatörer anlitas, vilka från c:a 2 timmar innan pålning visuellt av söker omgivande vatten för att garantera att inga valar, delfiner eller sälar befinner sig inom skadligt avstånd (Nedwell m.fl. 2003). Metoden är givetvis långt ifrån tillförlitlig och fungerar endast i dagsljus. En effektiviserad metod är att använda akustiska redskap för att detektera valar, delfiner och i viss mån fiskstim (Nedwell m.fl. 2003). Dessa metoder medför en minskad flexibilitet för entreprenören som då inte kan förutsäga om anläggning kan utföras för ett specifikt fundament vid en specifik tidpunkt.

Biologiska skyddsperioder

För att undvika bestående eller långvariga skador på framförallt fiskbestånd bör inget pålningsarbete, ej heller med ovanstående skyddsåtgärder, utföras under perioder då hotade eller för området viktiga arter aggregerats för lek (tidpunkten för lek varierar mellan olika arter). Likaså bör pålningsarbeten med höga bullernivåer undvikas i särskilda föryngringsområden under vår och försommar då många arter kan vara särskilt känsliga.

3.5 Sedimentspridning under anläggning

3.5.1 Bakgrund

Uppslamning och spridning av finkornigt sediment sker under den beredning av botten (muddring) som krävs vid anläggning av gravitationsfundament. Även vid pålningsarbete kan uppslamning och sedimentspridning ske där borring behövs för att driva ned piles i botten. Sedimentspridning i samband med konstruktionsarbete och muddring/deponering är ett allmänt förekommande ingrepp i den marina miljön och dess effekter är relativt väl kända. Höga halter av suspenderat sediment kan innebära negativa miljöeffekter inom framförallt följande områden:

- Minskad produktion/utbredning av bottenvegetation såsom sjögräsängar (Onuf 1994) och algbälten (Lyngby & Mortensen 1994); effekterna uppkommer genom att de lösta partiklarna minskar ljusinsläppet
- Ökad dödlighet hos ägg och larver (Auld & Schubel 1978; Westerberg m.fl. 1996); effekterna uppstår då sedimentpartiklar fäster till och tynger ned ägg eller blockerar gälarna på larver
- Undvikande hos fisk (Westerberg m.fl. 1996; Fiskeriverket 2007); effekterna uppstår sannolikt av att sedimentpartiklar fäster till gälarna och minskar syreupptaget, samt av den reducerade sikten

Kraftig sedimentspridning kan även orsaka störning av filtrerande djur eller spridning av eventuella miljögifter bundet till sedimentpartiklarna. Sammantaget utgör sedimentspridning framförallt en risk för unga livsstadier av fisk (ägg, larver och yngel) (Fiskeriverket 2007).

Undvikandereaktioner hos fisk har konstaterats ned till sedimentkoncentrationer på 3 mg/l och skadliga effekter har registrerats från c:a 100 mg/l och uppåt. Känsligheten för suspenderat sediment skiljer sig dock mellan olika arter (Auld & Schubel 1978) och mellan olika bottensubstrat. Särskilt kalkrikt sediment förefaller vara mer skadeverkande för fisk och yngel än sediment av något större kornstorlek såsom lera och silt (se Auld & Schubel 1978; Kiørboe m.fl. 1981; Westerberg m.fl. 1996).

Följaktligen kan höga halter av sediment medföra skador på den marina miljön. Det har dock visats att påverkan kan hållas lokal och övergående även under mycket omfattande sedimentspridande verksamheter förutsatt tydlig reglering och

förebyggande åtgärder. Exempel på detta är konstruktionen av Öresunds-förbindelsen (muddring av 8 000 000 m³ kalksten/lera) åren 1995 – 1998 samt muddringsprojektet Säkrare Farleder i Göteborgs hamninlopp (muddring av 11 800 000 m³ lera) år 2003 – 2004. Inom båda projekten gjordes ansträngningar för att minimera spridningen av löst sediment vilket resulterade i att några bestående miljöeffekter ej kunde registreras utifrån omfattande kontrollprogram (Valeur & Jensen 2001; Anon. 2001; Eriksson m.fl. 2004). Vid infästning av ett gravitationsfundament (betongkassun) på 5 – 10 m djup muddras i storleksordningen 1000 m³ (se avsnitt 2.1.3).

Under muddringen för gravitationsfundament vid Lillgrund vindpark (Öresund) beräknades ett sedimentspill på 4,8 % av de muddrade massorna utifrån en uppmätt sedimentkoncentration i vattnet på <10 mg/l (med sällsynta undantag) vid ett avstånd av 200 m. Kornstorleken uppmättes till 4,2 µm (median) (DHI 2006).

Långtidsverkande miljöförändringar av bottenmiljön efter muddring har studerats för gravitationsfundament vid Middelgrunden (Öresund). Utbredningen av blåmussla minskade signifikant medan utbredning av ålgräs ökade (Hedeselskabet 2004). Samma förändring skedde dock både vid vindparken och det närbelägna referensområdet (c:a 200 – 1000 m från muddrat område); huruvida förändringen är en effekt av den sedimentspridande verksamheten kan inte bedömas, däremot kan det konstateras att någon minskning av ålgräs inte ägt rum.

3.5.2 Direkteffekter av konstruktionsarbete vid Lillgrund vindpark

För att studera direkta effekter på fisk vid anläggandet av gravitationsfundament gjordes år 2006 en delstudie under konstruktionsarbetet vid Lillgrund vindpark. Småfisk (unga och småväxta arter) fångades med bottensläpande trål invid konstruktionsarbetet respektive i ett avlägset kontrollområde med i övrigt liknande förhållanden. Delstudien utfördes enligt den statistiska modellen BACI (Before/After Control/Impact) och de olika provtagningarna företogs 60 – 200 m från pågående eller nyligen avslutat konstruktionsarbete. Syftet var framförallt att studera och avståndsbestämma eventuella direkteffekter (såsom temporärt undflyende av småfisk). Följande moment studerades, vid enskilda fundament; A) effekter 1 månad efter muddring, B) effekter 24 h efter muddring samt C) effekter under stenläggningsarbete [stone bedding]. Den höga variansen i fångsterna försvårade tolkningen av resultatet, men följande slutsatser kunde dras:

- Det kunde inte påvisas att konstruktionsarbeten vid enskilda fundament medförde någon minskning av antalet arter av fisk (småfisk) under något av arbetsmomenten
- Vid provtagningen 1 månad efter muddring kunde inga effekter av konstruktionsarbetet upptäckas
- En signifikant större ökning av antal och biomassa av småfisk kunde konstateras 150 m från muddringsplatsen vid Lillgrund vid provtagning 24 h efter muddring. Skillnaden utgjordes framförallt av adult (vuxen) sjustrålig smörbult. Det kunde inte med säkerhet avgöras om denna högre förekomst av småfisk var kopplad till det nyss avslutade muddringsarbetet eller om andra,

okända, faktorer förorsakat skillnaden mot referensområdet. Om skillnaden var en konsekvens av muddringsarbetet skulle detta kunna förklaras genom att fisk undflytt den direkta muddringsplatsen och därför återfinns i högre tätheter på ett avstånd av, i detta fall, 150 m. En alternativ förklaring är att vissa fiskarter lockats mot muddringsplatsen av den ökade mängden potentiella födo-partiklar i vattnet

- Vid provtagningen under stenläggningsarbetet fanns att ökningen av antal och biomassa sedan förra provtagningen var signifikant högre i kontrollområdet än vid Lillgrund. Antal och biomassa av småfisk hade emellertid ökat även vid Lillgrund och några skillnader fanns inte mellan avstånden 60 respektive 200 m från stenläggningsarbetet, vilket tyder på att skillnaderna inte var relaterade till stenläggningsarbetet. Det kan dock inte uteslutas att aktiviteten vid Lillgrund som helhet medfört en jämfört med kontrollområdet minskning av småfisk; detta skulle i så fall kunna förklaras av sedimentspridning, buller eller förlust av ålgräs i området

Sammanfattningsvis tyder delstudien vid Lillgrund (gravitationsfundament) på att konstruktionsarbetets enskilda arbetsmoment orsakat små eller inga negativa effekter på förekomst och antal arter av småfisk, på avstånd större än storleksordningen 100 m. Resultatet ska jämföras med konstruktionsarbeten innefattande pålning, där temporära direkteffekter på fisk är betydande (Reyff 2004; Thomsen m.fl. 2006). Delstudiens resultat redovisas i sin helhet genom Vindval-publikationen ”Studier på småfisk vid Lillgrund vindpark – Effektstudier under konstruktionsarbeten och anläggning av gravitationsfundament” (Vindval² 2008).

3.5.3 Skillnader mellan havsområden

Miljöeffekter av muddring i samband med infästning av fundament kan förväntas variera mellan olika havsområden. Områdets exponeringsgrad har stor betydelse för spridning (och spädning) av upprört sediment. På naturligt exponerade mjukbottnar (lera/sand) kan sedimentspridning förväntas orsaka mindre miljöeffekter än i ett skyddat område med stillastående vatten. Detta eftersom spädningen sker snabbt i ett exponerat område samtidigt som en exponerad botten hyser en mer störningstolerant flora och fauna.

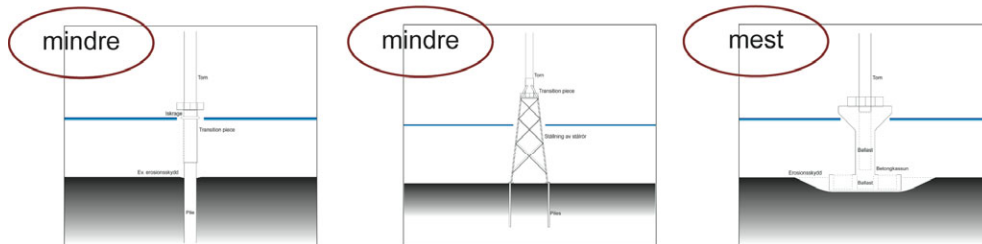
Avseende skadeverkan från sedimentspridning utgör botten substratet en viktig skillnad mellan olika områden. Ett finkornigt sediment såsom kalksten (pulver) och fin lera kan orsaka mer skada på fisk, larver och ägg jämfört med silt och sand, eftersom små partiklar lättare fäster till biologiska membran.

I områden med förorenade sedimentlager, t ex hamnar, innebär sedimentspridning att miljögifter förs upp i vattenmassan där de tillgängliggörs för organismer som kan komma att absorbera ämnena via gälarna eller genom födointaget.

Exponeringsgrad, substrat och föroreningsgrad varierar på regional och lokal skala; några generella skillnader mellan Östersjön och Västerhavet föreligger dock inte.

3.5.4 Skillnader mellan olika fundament

Gravitationsfundament innebär ett större behov av muddring och medför generellt en större sedimentspridning än andra fundament. I bottensubstrat innehållande både lera och block kan även monopile-fundament innebära sedimentspridning i de fall botten bearbetas genom borrhning.



Utdrag från Tabell 6. Sammanfattning av olika fundamenters relativa inflytande på eventuell miljöpåverkan från sedimentspridning. Kunskapsunderlag: tillräckligt

3.5.5 Anpassningar för att minimera negativ påverkan

I områden känsliga för sedimentspridande verksamhet, exempelvis särskilda förnygringsplatser för skyddsvärda fiskarter, bör eventuell sedimentspridning beaktas vid planering och utformning av vindkraftsfundament. I synnerhet bör detta ske där biologiskt känsliga områden sammanfaller med faktorer såsom finkornigt botten-substrat och liten naturlig exponeringsgrad; framförallt är det då viktigt att sedimentspridande verksamhet anpassas efter lämpliga biologiska perioder (t ex undvikande av lek och förnygringsstadier).

För att minimera skadeverkan från sedimentspridning i särskilt känsliga områden kan pålade fundament förespråkas framför gravitationsfundament. Även beträffande gravitationsfundament är dock de muddrade massorna små i jämförelse med andra anläggningsarbeten, där det visats att bestående skador kan undvikas med hjälp av anpassade konstruktionsperioder och reglering av tillåtna vattenhalter av sediment.

4 Optimering av fundament

I kapitel 2 och 3 beskrivs hur olika fundament för havsbaserad vindkraft skiljer sig beträffande dess påverkan av den marina miljön. I relation till vindkraftens miljövinster som utsläppsfri förnyelsebar energikälla kan en eventuell negativ påverkan av den lokala marina miljön komma att betraktas som liten eller obetydlig. I en hårt belastad havsmiljö kan likväl mindre förändringar få betydande konsekvenser – och havsbaserad vindkraft förväntas expandera framöver. Modern, havsbaserad vindkraft innebär storskaliga etableringar på upp till flera hundra individuella vindkraftverk. Därmed skalas miljöpåverkan upp från enskilda verk till en stor sammanhållen anläggning. I dessa fall utökas även anläggningsperioden till flera år. Genom att ta hänsyn till de olika fundamentens miljöpåverkan under både projekttering och anläggning, kan negativa miljöeffekter emellertid minskas.

4.1 Sammandrag – gravitationsfundament

Gravitationsfundament kan användas vid etablering i grunt vatten, idag (2007) ned till c:a 10 m och framöver möjligen ned till 20 – 30 m djup. Anpassning kan ske till de flesta bottensubstrat utom lera och ostadig sand. Anläggandet medför muddring och ett erosionsskydd krävs för stabilitet. Se Figur 1 och 2.

Fördelar

Den största miljömässiga fördelen med gravitationsfundament är att något pålningsarbete inte krävs vid anläggandet. Därutöver kan erosionsskyddet utformas för att gynna rev-effekt och således större förutsättningar för koloniserande organismer, vilket kan betraktas som positivt förutsatt att en ökad förekomst av fisk och bottenfauna associerad till hårt bottensubstrat är önskvärt.

Potentiella nackdelar

De negativa miljökonsekvenserna vid anläggandet begränsas i stort till muddringens spridning av sediment. Muddringens volymen är dock av mindre skala och sedimentspridningen kan begränsas. Störst risk för negativa effekter uppstår i områden med kalkrika sediment och liten vattencirkulation. En begränsad temporär störning av fisk kan också ske genom bullrande verksamhet under anläggningsarbetena, vilka sker under flera icke sammanhängande perioder av ett par dagar, per fundament.

Gravitationsfundament med erosionsskydd upptar en större yta än andra fundament och upptar således mer av den naturliga botten. Detta kan vara av betydelse om etablering sker i särskilt skyddsvärda habitat, exempelvis ålgräsängar. Fundamentets förhållandevis större diameter jämfört med andra fundament kan i undantagsfall – såsom vid etablering i trånga passager – minska det naturliga vattenflödet.

Under drifttiden innebär gravitationsfundament sannolikt en högre spridning av lågfrekvent ljud än fackverks-fundament. Det kan inte uteslutas att ljudet i någon

mån kan inverka på vissa marina organismer vilket tills vidare bör betraktas som en potentiell, om än mycket begränsad, miljöpåverkan beträffande framtida större vindkraftverk på gravitationsfundament.

Gravitationsfundament kan optimeras miljömässigt genom exempelvis följande åtgärder:

- Muddringsarbete kan företas under biologiskt mindre känsliga perioder; vilka främst bör relateras till reproduktionsperioder för viktiga djurarter i området samt tillväxtperioder för skyddsvärda växtarter
- *Eventuellt önskvärd* rev-effekt kan utökas genom särskilt utformat erosions-skydd (heterogena strukturer med håligheter av varierande storlek).
- Tekniska anpassningar kan eventuellt minska emissionen av lågfrekvent ljud under drift

4.2 Sammandrag – monopile-fundament

Monopile-fundament är ett väl beprövat fundament som kan användas från grunt vatten ned till ett djup av 20 – 25 m i botten av sand, stabil lera eller stenblandat substrat. Även andra substrat kan dock penetreras genom borrhning. Anläggandet sker genom pålning vilket orsakar kraftiga ljudpulser; i många fall behövs erosionsskydd vid botten, men detta kan även ersättas av en djupare penetrering. Se Figur 3.

Fördelar

En fördel med monopile-fundament är att anläggningsarbetet kan företas mycket snabbt, med ett pålningsförfarande på mindre än 1 timme. Monopile-fundament tar dessutom en minimal bottenyta i anspråk och skapar minsta möjliga förutsättningar för rev-effekt, förutsatt att erosionsskydd inte används. Således medför monopile-fundament utan erosionsskydd en mindre förändring av den naturliga botten än andra konstruktioner.

Potentiella nackdelar

Under anläggningsarbetet används i regel pålning med hammare (pile-driver) vilket medför mycket kraftiga ljudpulser som är skadliga för framförallt fisk och marina däggdjur över avstånd i storleksordningen 100 m och kan medföra störningar över mycket stora avstånd (storleksordningen 10-tals kilometer). Det är här av stor vikt att anläggningsarbete inte sker inom biologiskt känsliga perioder.

Då vindkraftverket är i drift innebär monopile-fundament sannolikt en högre spridning av lågfrekvent ljud än fackverksfundament. Det kan inte uteslutas att ljudet kan inverka något på vissa marina organismer och tills vidare bör detta betraktas som en potentiell, om än mycket begränsad, miljöpåverkan från framtida större vindkraftverk. Det är emellertid ännu inte känt huruvida större versioner av monopile-fundament kommer att avge högre eller lägre ljudnivåer.

Monopile-fundament kan optimeras miljömässigt genom exempelvis följande åtgärder:

- Stor ansträngning bör läggas vid att ta fram välanpassade åtgärder för att minska ljudnivåerna vid pålning; se avsnitt 3.4.4
- Pålningsarbete bör ej ske under biologiskt känsliga perioder såsom reproduktionsperioder för viktiga djurarter, allmänt högproduktiva perioder samt perioder då fisk och däggdjur företar vandring genom havsområdet
- Pålningsarbete vid en större vindpark bör i möjlig mån koncentreras till ett mindre antal högintensiva perioder för att undvika en utdragen påverkansperiod
- *Eventuell önskvärd* rev-effekt kan utökas genom särskilt utformat erosionskydd (heterogena strukturer med håligheter av varierande storlek)
- *Ej önskvärd* rev-effekt kan minimeras genom att utesluta erosionskydd och kompensera genom att försänka fundamentet ytterligare; se avsnitt 2.6
- Tekniska anpassningar kan eventuellt minska emissionen av lågfrekvent ljud under drifttiden

4.3 Sammandrag – tripod-fundament

Tripod-fundament är utvecklade för ett bottendjup på 20 – 40 m där förankring sker genom pålning av flera mellanstora piles, således med liknande krav på bottensubstrat som monopile. Erosionsskydd kan behövas, eller ersättas av djupare förankring. Se Figur 4.

Fördelar

Jämfört med monopile-fundament för motsvarande djup är fördelen med tripod-fundament den mindre diametern på piles för förankring, vilket generellt sett medför lägre ljudpulser vid pålningen. Vidare kan den ökade strukturen hos tripod-fundament medföra en kraftigare rev-effekt vilket kan betraktas positivt såvida ökade förutsättningar för fisk associerad till hårt bottensubstrat är önskvärd i området.

Potentiella nackdelar

Liksom beträffande monopile-fundament utgörs den mest betydande negativa påverkan under anläggandet av pålningsarbetet, vilket innebär mycket kraftiga ljudpulser som är skadliga för framförallt fisk och marina däggdjur. Även om de piles som används vid tripod-fundament är mindre än vad som skulle behövas för ett monopile vid samma djup, är dimensionerna i samma storleksordning som vid nuvarande monopile ($\varnothing = 3 - 4$ m), följaktligen är det av stor vikt att anläggningsarbete inte sker inom biologiskt känsliga perioder. Av betydelse är också att flera (3) pålningsarbeten per fundament generellt torde innebära en längre påverkansperiod.

Tripod kan användas på ett större djup och upptar en större total bottenyta än monopile-fundament, vilket innebär en större förändring av den naturliga botten. Det är möjligt att de organismer (t ex musslor, sjöpungar) som koloniserar strukturerna senare kan komma att ansamlas på botten under fundamentet, där nedbrytning kan orsaka syrefattiga förhållanden vid låg vattenomsättning, vilket är vanligare på större djup.

Beträffande ljudemissioner är det inte känt vilka frekvenser som avges av ett tripod-fundament; eftersom dimensionerna på stålrören emellertid är stora kan det antas ha likheter med små monopile-fundament. Det kan inte uteslutas att ljudet kan inverka något på vissa marina organismer vilket tills vidare bör betraktas som en potentiell, om än mycket begränsad, miljöpåverkan från framtida större vindkraftsverk.

Tripod-fundament kan optimeras miljömässigt genom exempelvis följande åtgärder:

- Stor ansträngning bör läggas vid att ta fram välanpassade åtgärder för att minska ljudnivåerna vid pålning; se avsnitt 3.4.4
- Pålningsarbete bör ej ske under biologiskt känsliga perioder såsom reproduktionsperioder för viktiga djurarter, allmänt högproduktiva perioder samt perioder då fisk och däggdjur företar vandring genom havsområdet
- Pålningsarbete vid en större vindpark bör i möjlig mån koncentreras till ett mindre antal högintensiva perioder för att undvika en utdragen påverkansperiod
- Tekniska anpassningar kan eventuellt minska emissionen av lågfrekvent ljud under drifttiden

4.4 Sammandrag – fackverksfundament

Fackverksfundament är framförallt ett alternativ för djupare vatten ned till över 50 m djup. Fackverksfundament förankras genom pålning av flera mindre piles i lera, sand eller stenblandat substrat. Se Figur 5.

Fördelar

Under anläggningsarbetet sker pålning av mindre piles än för monopile-fundament, vilket generellt innebär betydligt lägre ljudnivåer och är följaktligen en fördel. Det är också troligt att fackverksfundament jämfört med andra fundament avger mindre lågfrekvent ljud (<200 Hz) under drifttiden. Vidare utgör den komplexa strukturen hos fackverksfundament större möjligheter för rev-effekt vilket kan betraktas som positivt såvida en ökad livsmiljö för rev-associerad fisk är önskvärd för området.

Potentiella nackdelar

De höga ljudpulser som uppstår i samband med pålningen kan utgöra en betydande störning på marina organismer över stora avstånd och det är av vikt att skyddsåtgärder vidtas för att minimera åverkan.

Jämfört med monopile-fundament upptar (överskuggar) fackverksfundament en större bottenyta och kan användas på större djup, där nedfallna organismer kan orsaka lokal syrebrist om vattenomsättningen är låg vid botten (såsom under språngskiktet). Även rev-effekten kan betraktas som negativ om vindparken etableras i ett område där fauna associerad till hårt bottensubstrat inte är önskvärt – vilket kan vara fallet vid t ex skyddsvärda sand- eller lerbottenar.

Så länge det inte är känt vilka frekvenser av ljud som ett fackverksfundament avger under drift, och så länge det inte är helt klarlagt huruvida ett sådant ljud kan ha en negativ miljöpåverkan, bör ljudet betraktas som en potentiell, om än begränsad, störningskälla även för fackverksfundament i särskilt skyddsvärda områden.

Fackverksfundament kan optimeras miljömässigt genom exempelvis följande åtgärder:

- Pålning bör utföras med väl applicerade metoder för att minska ljudnivåerna; se avsnitt 3.4.4
- Pålningsarbete bör ej ske under biologiskt känsliga perioder såsom reproduktionsperioder för hotade eller av annan anledning viktiga fiskarter
- Tekniska anpassningar kan eventuellt minska emissionen av lågfrekvent ljud under drifttiden

4.5 Sammandrag – övriga fundament

Eftersom den tekniska utformningen av övriga fundamentmodeller, såsom hybrider, bucket- och flytande fundament (se Figur 6 och 7), kan komma att variera bör dessa lösningar utvärderas utifrån de 4 fundamentmodeller som beskrivits ovan.

Exempelvis kan ett flytande fundament bestå antingen av en flytande fackverkskonstruktion eller en djup pendel av betong; beträffande påverkanskällorna *påväxt* och *rev-effekter* kan de två varianterna liknas vid fackverks- respektive monopile-fundament.

Många kombinationer (hybridfundament) innefattar förankring genom pålning och storleken på piles avgör då hur omfattande konstruktionsbuller som kan förväntas.

4.6 Andra källor till påverkan

Det finns även andra upptänkliga påverkanskällor där några påtagliga skillnader mellan olika fundament inte föreligger. Däribland elektromagnetiska fält från kablar, utsläpp av maskinolja samt metallutsöndring från korrosionsskyddande anoder.

4.7 Relativ grad av inflytande på miljöpåverkan

I Tabell 6 är graden av fundamentens inflytande på respektive påverkanskälla klassificerad från 1 till 3 för olika fundamentmodeller, utifrån studiens resultat. Klassificeringen ska betraktas som ett skattat *relativt* mått. Klassificeringen ska endast jämföras mellan olika fundament vid samma plats och under samma belastning (bottendjup och installerad effekt). Erosionsskydd är inte inkluderat i klassificeringen av fundamentmodeller utan redovisas i en separat kolumn för att kunna beaktas i de fall anläggande av ett erosionsskydd är aktuellt. En viktig aspekt är kolumnen *Kunskapsunderlag*, där det återges var särskilda osäkerheter föreligger. Återigen – Tabell 6 anger inte hur betydande eller hur negativ varje påverkanskälla kan vara (detta måste från fall till fall avgöras av platsspecifika förhållanden och revidering av kunskapsunderlaget). Däremot skattar Tabell 6 hur mycket varje fundamentmodell bidrar till att förstärka respektive påverkanskälla.

Tabell 6. Relativ klassificering av till vilken grad varje fundamentmodell inverkar på respektive källa till miljöpåverkan. Innan tabellen beaktas bör kapitel 3 och Faktabox 4 läsas. Tabellen bör endast användas i enlighet med vad som beskrivs i avsnitt 4.8.

PÅVERKANSKÄLLA	FUNDAMENTMODELL						Erosionsskydd	Kunskapsunderlag
	Gravitation (betong)	Monopile	Tripod	Fackverk	Bucket	Flytande		
DRIFTSKEDE								
Påväxt*	2	2	2	2	2	2	2	måttligt
Rev-effekt*	2	1	2	3	1	1-3	2-3	måttligt
Ljudöverföring	2	3	2	1-2	2	RS	-	måttligt/svagt
Hydrografiska förändringar	2	1	RS	RS	1	RS	1	svagt
Exploatering av bottenyta	3	1	2	3	2	1	3	tillräckligt
ANLÄGGNING (temporärt)								
Konstruktionsbuller	1	3	2	2	1	2	1	måttligt
Sedimentspridning	3	1-2	1	1	RS	1	1	tillräckligt

FÖRKLARINGAR

1 = mindre

2 = mer

3 = mest

RS = referenser saknas

* Påväxt, d.v.s. en produktion av fastsittande alger och djur, vilket här separeras från *rev-effekt* som definieras som en ökad förekomst av mobila djur, ett resultat av antingen en aggregering eller en ökad produktion.

Faktabox 4. Premisser för användning av Tabell 6

Tabellen är avsedd att användas genom den metod som beskrivs i avsnitt 4.8. Vid användning av tabellen är det viktigt att notera att tabellen inte tar hänsyn till *hur betydande* miljöpåverkan är, eller om miljöpåverkan är negativ eller positiv (se t ex rev-effekter och påväxt som i många fall är att betrakta som positivt; avsnitt 3.1.3). Tabellen beskriver endast hur olika fundament förhåller sig till de olika påverkanskällorna, bedömningar av varje påverkanskällas betydelse bör göras utifrån platsspecifika förhållanden, texten i kapitel 3 och genom en kompletterande uppdatering av kunskapsläget (se flödesschema nedan). Som exempel är konstruktionsbullen i regel att betrakta som en allvarligare negativ miljöpåverkan än hydrografiska förändringar, varpå en klass 3 för hydrografiska förändringar kan vara mindre negativt än t ex en klass 2 för konstruktionsbullen. Det kan också vara så att någon betydande miljöpåverkan inte förutsätts från någon del av intervallet 1-3. Eftersom miljöpåverkan från havsbaserad vindkraft för nuvarande inte är klarlagd i detalj, och eftersom miljöpåverkan är platsspecifik, bedöms en flexibel klassificering enligt Tabell 6 emellertid vara värdefull i arbetet med att förebygga negativ miljöpåverkan under framtida etableringar.

4.8 Rekommendationer vid val av fundament

Hur mycket de olika fundamentmodellerna inverkar på de olika påverkanskällorna (kapitel 3) sammanfattas i Tabell 6. Betydelsen av varje enskild påverkanskälla är emellertid beroende av de rådande förhållandena vid etableringsplatsen. För att kunna värdera vilka påverkanskällor som är mest beaktansvärda för en specifik plats krävs därför viss kännedom om områdets hydrografi, bottensubstrat och ekologiska samband. Efter att de viktigaste påverkanskällorna identifierats kan välmotiverade avvägningar göras med hjälp av sammanfattningen i Tabell 6 samt övrigt innehåll, för att föreslå det miljömässigt lämpligaste fundamentet samt förslag på skyddande åtgärder eller särskilda utformningar. Ovanstående förslag på tillvägagångssätt beskrivs i följande flödesschema:

Orientering av områdesfaktorer

Inventering av lokala förhållanden, såsom t ex

- bottensubstrat
- förekommande biologiska livsmiljöer
- ekologiska samband (t ex lekogränder)
- hydrografi



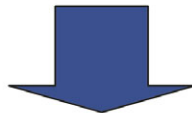
Prioritering mellan påverkanskällorna

Bestäm vilka påverkanskällor som väger tyngst utifrån områdesfaktorerna, se nedan *Exempel på prioritering utifrån lokala förhållanden*



Rangordning av fundamenten

Vilken fundament-modell är att föredra ur miljömässigt perspektiv? Är några fundament-modeller särskilt olämpliga? Se särskilt Tabell 6 och kapitel 3, gör även en uppdatering av kunskapsläget.



Koppling till teknik och ekonomi

Vilka fundament-modeller är tekniskt möjliga att använda? Hur stora är kostnadsskillnaderna mellan relevanta fundament?



Val av fundament
och
Utformande av adekvata
skyddsåtgärder

Exempel på prioritering utifrån lokala förhållanden

Nedan ges exempel på hur olika påverkanskällor kan prioriteras utifrån lokala förhållanden:

Specifikt lek område för hotade eller viktiga arter:

- Höga bullernivåer kan störa leken – KONSTRUKTIONSBULLER får ökad betydelse under vissa perioder
- Löst sediment kan störa utvecklingen av ägg och larver – SEDIMENTSPRIDNING får ökad betydelse under vissa perioder

Vandringsväg för fisk eller marina däggdjur:

- Höga bullernivåer kan eventuellt störa vandrande djur – KONSTRUKTIONSBULLER får ökad betydelse under vissa perioder

Förekomst av skyddsvärd vegetation:

- Ökad känslighet för grumling – SEDIMENTSPRIDNING får ökad betydelse
- Stort värde av bottenyta (speciellt habitat) – EXPLOATERING AV BOTTENYTA får ökad betydelse

Närhet till skärgård eller våtmark:

- Höga bullernivåer kan störa häckande fågel – KONSTRUKTIONSBULLER får ökad betydelse under vissa perioder

Bottensubstrat innehållande kalk:

- Ökad känslighet för fisk – SEDIMENTSPRIDNING får ökad betydelse

Miljögifter i bottensubstratet:

- Muddring kan frigöra skadliga ämnen som sprids med sedimentet – SEDIMENTSPRIDNING får ökad betydelse

Särskilt värdefulla sand- eller lerbotten utan närhet till naturlig hårbotten:

- Risk för ökad invandring av nya hårbottenassocierade arter vilka (sekundärt) kan störa befintligt ekosystem – PÅVÅXT och REV-EFFEKT får ökad (negativ) betydelse

Önskad lokal ökning av fisk och andra organismer associerad till hårbotten:

- Tillskott av artificiella strukturer kan öka livsutrymmet för många arter – PÅVÅXT och REV-EFFEKT får ökad (positiv) betydelse

Specifik förekomst av skyddsvärda känsliga djurarter:

- Ej klarlagt om vissa arter kan störas av lågfrekvent buller – LJUDÖVERFÖRING får ökad betydelse

Etablering i smalt sund:

- Vattenflödet särskilt viktigt – HYDROGRAFISKA FÖRÄNDRINGAR

Det bör i sammanhanget beaktas att konstruktionsbuller och sedimentspridning utgör temporära påverkanskällor jämfört med påverkanskällor under vindparkens driftskede. Storskaliga etableringar kan dock innebära anläggningsarbeten utspridda över många år. Vidare är det viktigt att betrakta *hela vindparken* som ett påverkansområde under driftskedet. Även om de enskilda fundamenten placeras med stora inbördes avstånd (500 – 1500 m) är det inte känt i vilken utsträckning

eventuella interaktioner av miljöpåverkan kan uppstå. Därutöver ska det understrykas att denna studie inte omfattar påverkan på sjöfågel, fladdermöss eller kulturvärden.

Denna studie baserar sig på kunskapsläget år 2007, för att hålla innehållet tidsenligt och användarvänligt är det en fördel om uppdatering sker i takt med utveckling av ny teknik och tillkommande kunskap beträffande miljöpåverkan.

Ökad kunskap och framtidsutsikt

Under sammanställningen (2007) av denna studie identifierades särskilt ett behov av ökad kunskap beträffande lågfrekvent ljud; dels dess effekter och tillvänjning för olika djurgrupper, och dels skillnader i emission mellan olika fundamentmodeller, avseende både ljudstyrka och frekvensintervall. Vidare saknas specifik kunskap beträffande olika fundamentmodellers inverkan på hydrografi (lokala vattenrörelser), och det är inte känt i detalj hur artificiella erosionsskydd gynnar olika koloniserande djurarter.

- Effekter och tillvänjning av ljud bör framöver utforskas både genom fortsatta kontrollerade experiment och genom detaljerade kontrollprogram vid etablerad vindkraft
- Beträffande skillnader i ljudemission från olika fundamentmodeller föreslås att samstämda ljudmätningar företas vid ett flertal vindparker av varje fundamentmodell. Teoretiskt sett kan fackverksfundament komma att avge mindre lågfrekvent ljud än andra fundament, hypotesen bör dock studeras under egentliga förhållanden i fält
- Utvecklingen av större vindkraftturbiner nödvändiggör fortlöpande mätningar av ljud, både från drifttiden och från konstruktionsarbeten
- Vetenskapliga undersökningar bör företas i fält för att kvantitativt bestämma i vilken utsträckning olika arter av fisk och bottenfauna gynnas av artificiellt utformade erosionsskydd

Egen granskning

Niklas Grahn, Vattenfall Power Consultant – Teknik (kapitel 2)

Martin Almgren, ÅF-Ingemansson AB – Ljud (kapitel 2 och 3)

Jan-Åke Jacobsson, Favonius AB – Avnämareperspektiv

Emelie Johansson, Triventus Consulting AB – Avnämareperspektiv

Granskning genom Vindval

Prof. Lena Kautsky, Stockholms Marina Forskningscentrum och Botaniska institutionen, Stockholms universitet

Ph. D. Magnus Wahlberg, Fjord & Bælt, Kerteminde (ljud)

Tack till

Vattenfall AB; E.ON Sverige; Peter Madsen Rederi A/S; Mathias Andersson, Stockholms Universitet

Referenser

- Achmus M., Abdel-Rahman K. 2006. Modelling Soil-Structure-Interaction for Offshore Wind Energy Plant (VII), Institute of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Waterpower Engineering, University of Hanover.
- Anderson M.J., Underwood A.J. 1994. Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 184:217-236.
- Anderson M.J. 1996. A chemical cue induces settlement of Sydney rock oysters, *Saccostrea commercialis*, in the laboratory and in the field. *Biol. Bull.* 190: 350-358
- Anon. 2001. Slutrapport om miljön och den fasta förbindelsen över Öresund (sammanfattning av miljöpåverkan av anläggningsarbetet), Miljö- og Energi-ministeriet, Trafikministeriet samt Kontroll- och styrgruppen för Öresunds-förbindelsen.
- Auld A.H., Schubel J.R. 1978. Effects of suspended sediment on fish eggs and larvae: A laboratory assessment. *Estuar. Coast Mar. Sci* 6: 153-164.
- Bacchiocchi F., Airoidi L. 2003. Distribution and dynamics of epibiota on hard structures for coastal protection. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56: 1157-1166.
- Bell N., Smith J. 1999. Coral growing on North Sea oil rigs. *Nature* vol. 402.
- Betke K., Elmer K.-H., Gabriel J., Gerasch W.-J., Matuschek R., Neumann T. 2005. Underwater noise emissions of offshore wind turbines First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control, Berlin.
- Betke K. 2006. Measurement of underwater noise emitted by offshore wind turbines at Horns Rev and Nysted. Report ITAP – Institut für technische und angewandte Physik GmbH, Oldenburg.
- Boaventura D., Moura A., Leitão F., Carvalho S., Cúrida J., Pereira P., Fonseca L.C., Santos M.N., Monteiro, C.C. 2006. Macrobenthic colonisation of artificial reefs on southern coast of Portugal (Ancão, Algarve). *Hydrobiologia* 555: 335-343.
- Bohnsack J.A. 1989. Are high densities of fishes at artificial reefs the result of habitat limitation or behavioural preference? *Bull Mar Sci* 44: 631-645.
- Buckley R.M. 1982. Marine habitat enhancement and urban recreational fishing in Washington. *Mar. Fish. Rev.* 44: 28-37.

- Bulleri F. 2005. The introduction of artificial structures on marine soft- and hard-bottoms: ecological implications of epibiota. *Environmental Conservation* 32 (2): 101-102.
- Chapman M.G. 2003. Paucity of mobile species on constructed seawalls: effects of urbanization on biodiversity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 264: 21-29.
- Conell S.D., Glasby T.M. 1999. Do urban structures influence local abundance and diversity of subtidal epibiota? A case study from Sydney harbour, Australia. *Marine Environmental Research* 47: 373-387.
- Dean T.A., Hurd L.E. 1980. Development in an estuarine fouling community: the influence of early colonists on later arrivals. *Oecologia* 46: 295-301.
- DHI. 2006. Spill Monitoring at Lillgrund, DHI Water & Environment, Horsholm.
- Donskoy D., Ludyanskiy M.L. 1995. Low frequency sound as a control measure for zebra mussel fouling. pp. 103-108. Proceedings of The Fifth International Zebra Mussel and Other Aquatic Nuisance Organisms Conference, Toronto.
- DWIA. 2003. www.windpower.org, Danish Wind Industry Association.
- Edelvang K., Møller A.L., Hansen E.A. 2001. DHI. Lillgrund Vindkraftpark, Environmental impact assessment of hydrography and sediment spill. Final Report.
- Elmer K.-H. 2007. Measurement and Reduction of Offshore Wind Turbine Construction Noise DEWI Magazin.
- Emu Ltd. 2006. Kentish Flats Fisheries Comparative Study, Final. Report No. 06/J/I/03/0672/0610. pp. 36. Emu Ltd., Southampton.
- Enderlein P., Wahl M. 2004 Dominance of Blue mussels versus consumer-mediated enhancement of benthic diversity. *J. Sea Res.* 51: 145-155.
- Eriksson K., Henriksson A., Kevan E., Edvardsson T., Tholander G., Wollinder C., Nilsson O. 2004. Projekt Säkrare Farleder till Göteborg - Slutrapport. pp. 78, Säkrare Farleder, Göteborg.
- EWEA. 2007. Offshore Wind 2007 Conference & Exhibition, European Wind Energy Association, Berlin.
- Fabi G., Grati F., Puletti M., Scarcella G. 2004. Effects on fish community induced by installation of two gas platforms in the Adriatic Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 273: 187-197.
- Fiskeriverket. 2007. Revidering av kunskapsläget för vindkraftens effekter på fisket och fiskbestånden, Fiskeriverket.
- Gaines S., Brown S., Roughgarden J. 1985. Spatial variation in larval concentrations as a cause of spatial variation in settlement for the barnacle, *Balanus glandula*. *Oecologia* 67: 267-272.

- Gill A. 2005. Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of Applied Ecology* 42: 605-615.
- Gill A.B., Gloyne-Philips I., Neal K.J., Kimber J.A. 2005. Electromagnetic fields review - the potential effects of electromagnetic fields generated by sub-sea power cables associated with offshore wind farm developments on electrically and magnetically sensitive organisms - a review, Institute of Water and Environment Cranfield University, Silsoe.
- Glasby T.M., Conell S.D. 1999. Urban structures as marine habitats. *Ambio* 28: 595-598.
- Glasby T.M., Conell S.D. 2001. Orientation and position of substrata have large effects on epibiotic assemblage. *Mar Ecol Prog Ser* 214: 127-135.
- Grove R.S., Sonu C.J., Nakamura M. 1989. Recent Japanese trends in fishing reef design and planning. *Bull Mar Sci* 44: 984-996.
- Harlin M.M., Lindebergh J.M. 1977. Selection of substrata by seaweeds: optimal surface relief. *Mar. Biol.* 40: 33-40.
- Hedeselskabet. 2004. Middelgrunden Biologisk undersøgelse ved vindmølleparken på Middelgrunden ved København, efterår 2003, Hedeselskabet Miljø- og Energi AS, København.
- Ingemansson. 2002. Vindkraftpark på Fladengrund, Ingemansson Technology AB, Göteborg.
- Ingemansson. 2003. Utgrunden off-shore wind farm - Measurements of underwater noise, Ingemansson Technology AB, Göteborg.
- Ingemansson. 2005. Skottarevet, Falkenberg havsbaserad vindkraftpark, Ingemansson Technology AB, Göteborg.
- Jensen A.C., Collins K.J., Lockwood A.P.M. 2000. Artificial reefs in European seas. Kluwer Academic Publishers: London. 508 pp.
- Johansson L. 2004. SMHI. Påverkan på djupvattnet i Arkona av fundament på Kriegers Flak – enkel överslagsberäkning. Rapport 2004-37.
- Jonasson K. 2002. Ljud i havet - påverkan på marina djur. 12 pp. Göteborg Energi, Stockholm.
- Karlson K., Rosenberg R., Bonsdorff E. 2002. Temporal and spatial large-scale effects of eutrophication and oxygen deficiency on benthic fauna in Scandinavian and Baltic Waters – a review. *Oceanography and Marine Biology* 40: 427-489.
- Karlsson A., Liungman O., Lindow H. 2006. Överslagsberäkning av vertikal blandning vid Skottarevet vindkraftpark. SMHI, Rapport 2006-52.
- Kautsky N. 1982. Growth and size structure in a Baltic *Mytilus edulis* population. *Mar. Biol.* 68(2): 117-133.

- Kautsky H. 1989. Quantitative distribution of plant and animal communities of the phytobenthic zone in the Baltic Sea. Askö contributions 35: 1-80.
- Kautsky H., Kautsky L., Kautsky N., Kautsky U., Lindblad C. 1992. Studies on the *Fucus vesiculosus* community in the Baltic Sea. Acta Phytogeogr. Suec. 78:33-48
- Kautsky H., Van der Maarel E. 1990. Multivariate approaches to the variation in Phytobenthic communities and environmental vectors in the Baltic Sea. Mar. Ecol. Prog. Ser. 60:169-184.
- Kiorboe T., Frantsen E., Jensen C., Sorensen G. 1981. Effects of suspended sediment on development and hatching of herring (*Clupea harengus*) eggs. Estuarine, Coastal and Shelf Science 13: 107-111.
- Klaustrup M. 2006. Few effects on the fish communities so far. I: Danish offshore wind key Environmental Issues. Published by: DONG energy, Vattenfall, The Danish Energy Authority, The Danish Forest and Nature Agency. 64-79.
- Knott N.A., Underwood A.J., Chapman M.G., Glasby T.M. 2004. Epibiota on vertical and horizontal surfaces on natural reefs and on artificial structures. J. Mar. Biol. Ass. U. K. 84: 1117-1130.
- Leonhard S., Birklund J. 2006. Infauna, Epifauna and Vegetation, change in diversity and higher biomass. I: Danish offshore wind key Environmental Issues. Published by: DONG energy, Vattenfall, The Danish Energy Authority, The Danish Forest and Nature Agency. 44-63.
- Lindow H., Lindahl S., Kriezi E., Nerheim S., Nordblom O., Wickström K. 2007. Strömning, skiktning och blandning över grundområden, Pilotstudie Kriegers flak. SMHI, Rapport 2007-22.
- Lindquist D.C., Shaw R.F., Hernandez F.J. 2005. Distribution patterns of larval and juvenile fishes at offshore petroleum platforms in the north-central Gulf of Mexico. Estuarine, Coastal and Shelf Science 62: 655-665.
- Littorin B., Gilek M. 1999. Vertical patterns in biomass size structure growth and recruitment of *Mytilus edulis* in an archipelago area in the northern Baltic proper. Ophelia. 50(2): 93-112
- Løkkeborg S., Humbortad O-B., Jørgensen T., Soldal A.V. 2002. Spatio-temporal variation in gillnet catch rates in the vicinity of North Sea oil platforms. ICES J Mar Sci 59: 294-299.
- Love M.S., Schroeder D.M., Nishimoto M.M. 2003. The ecological role of oil and gas production platforms and natural outcrops on fishes in southern and central California: a synthesis of information. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Biological Resources Division, Seattle, Washington, 98104, OCS study MMS 2003-032. (www.id.ucsb.edu/lovelab).

- Lubchenco J. 1983. *Littorina* and *Fucus*: Effects of herbivores, substratum, heterogeneity and plant escape during succession. *Ecology* 64: 1116-1123.
- Lyngby J.E., Mortensen S.M. 1994. Effects of dredging activities on growth of *Laminaria saccharina* 29. European Marine Biology Symposium, Vienna.
- Länsstyrelsen västra Götalands län 2007. Hummerrevsprojektet, Slutrapport. Rapport 2007:40
- Mc Guinness K.A., Underwood A.J. 1986. Habitat structure and the nature of communities on intertidal boulders. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 104: 97-123
- Madsen P.T., Wahlberg M., Tougaard J., Lucke K., Tyack P. 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series* 309: 279-295.
- Michel J., Dunagan H., Boring C., Healy E., Evans W., Dean J.M., McGillis A., Hain J. 2007. Worldwide Synthesis and Analyses of Existing Information Regarding Environmental Effects of Alternative Energy Uses on the Outer Continental Shelf, MMS U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, Columbia.
- Milon J.W. 1989. Artificial marine habitat characteristics and participation behaviour by sport anglers and divers. *Bull. Mar. Sci.* 44: 853-862.
- Møller A.L., Edelvang K. 2001. DHI. Lillgrund vindkraftpark, Assessment of effects to the zero solution in Öresund. Final Report.
- Naturvårdsverket 2006a. Hur vindkraft påverkar livet på botten. – en studie före etablering. Vindval Rapport 5570.
- Naturvårdsverket 2006b. Inventering av marina naturtyper på utsjöbankar. Rapport 5576.
- Nielsen K.J. 2001. Bottom-up and top-down forces in tide pools: Test of a food change model in an intertidal community. *Ecol. Monogr.* 71(2): 187-217.
- Nedwell J., Langworthy J., Howell D. 2003. Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise, Subacoustech, Southampton.
- Nedwell J., Howell D. 2004. A review of offshore windfarm related underwater noise sources, Subacoustech, Southampton.
- Nedwell J.R., Turnpenny A.W.H., Lovell J., Parvin S.J., Workman R., Spinks J.A.L., Howell D. 2007. A validation of the dBht as a measure of the behavioral and auditory effects of underwater noise, Subacoustech Ltd, Bishop's Waltham.
- OES. 2007. Kentish Flats Offshore Wind Farm FEPA Monitoring Summary Report. pp. 66. Offshore Environmental Solutions Ltd. Fredericia.

- Onuf C. 2002. Seagrasses, Dredging and Light in Laguna Madre, Texas, U.S.A. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 39: 75-91.
- Parvin S.J., Nedwell J.R. 2006. Underwater noise survey during impact piling to construct the Burbo Bank Offshore Wind Farm, Subacoustech Ltd. / COWRIE.
- Perkol-Finkel S., Benayahu Y. 2005. Recruitment of benthic organism onto a planned artificial reef: shifts in community structure one decade post-deployment. *Mar. Environ. Res.* 59: 79-99.
- Peter Madsen Rederi. 2006. Method Statements: Foundation and seabed preparation, Peter Madsen Rederi A/S, Report to Vattenfall.
- Petersen J.K., Malm T. 2006. Offshore Windmills Farms: Threats to or Possibilities for the Marine Environment. *Ambio* 35 (2):75-80.
- Petersson M. 2000. Vindkraft till havs - en litteraturstudie av påverkan på djur och växter, Naturvårdsverket 55 pp.
- Pickering H., Whitmarsh D. 1997. Artificial reefs and fisheries exploitation: a review of the attraction versus production debate, the influence of design and its significance for policy. *Fisheries Research* 31: 39-59.
- Popper A.N., Salmon M., Horch K.W. 2001. Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. *Journal of Comparative Physiology* 187: 83-89.
- Qvarfordt S. 2006. Phytobenthic communities in the Baltic Sea –seasonal patterns in settlement and succession. Doctoral thesis, Department of Systems Ecology, Stockholms Universitet.
- Qvarfordt S., Kautsky H., Malm T. 2006. Development of fouling communities on vertical structures in the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67: 618-628.
- Reyff J. 2004. Underwater Sound Levels Associated with Marine Pile Driving - Assessment of Impacts and Evaluation of Control Measures Noise-Con, Baltimore.
- Saier B. 2001. Direct and indirect effects of seastars *Asterias rubens* on mussel beds (*Mytilus edulis*) in the Wadden Sea. *J. Sea Res.* 46: 29-42.
- Schröder A., Orejas C., Joschko T. 2006. Benthos in the Vicinity of Piles: FINO 1 (North Sea). I: Köller J., Köppel J., Peters W. Offshore Wind Energy Research on Environmental Impacts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 185-200.
- SGS. 2005. Support Structure Concepts. pp. 13, SGS Group, Report to Vattenfall.
- Sloth P. 2001. DHI. Hydrographic Conditions for Örestad Vindkraftpark, Sweden. Final Report.
- Soldal A.V., Svellingen I., Jørgensen T., Løkkeborg S. 2002. Rigs-to-reefs in the North Sea: hydroacoustic quantification of fish in the vicinity of a "semi-cold" platform. *ICES Journal of Marine Science* 59: 281-287.

- Sorensen H.C., Hansen L.K., Molgaard-Larsen J.H. 2002. Middelgrunden 40 MW Offshore Wind Farm Denmark - Lessons Learned, Realities of Offshore Wind Technologies, Case: Middelgrunden, Orkney.
- Stanley D.R., Wilson C.A. 1996. Abundance of fishes associated with a petroleum platform as measured with dual-beam hydroacoustics. ICES J. Mar Sci 53: 473-475.
- Svane I., Petersen J.K. 2001. On the Problems of Epibioses, Fouling and Artificial Reefs, a Review. Mar. Ecol. 22(3): 169-188.
- Svensson J.R., Lindegarth M., Siccha M., Lenz M., Molis M., Wahl M., Pavia H. 2007. Maximum species richness at intermediate frequencies of disturbance: consistency among levels of productivity. Ecology 88(4): 830-838.
- Talisman. 2006. Beatrice Wind Farm Demonstrator Project Environmental Statement, Talisman Energy (UK) Limited, Aberdeen.
- Thomsen, F., K. Ludemann, R. Kafemann & W. Piper. 2006. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, Biola, Hamburg.
- Unabia C.R.C., Hadfield M.G. 1999. Role of bacteria in larval settlement and metamorphosis of the polychaete *Hydroides elegans*. Mar Biol. 133: 55-64.
- Underwood A.J., Anderson M.J. 1994. Seasonal and temporal aspects of recruitment and succession in an intertidal estuarine fouling assemblage. J.Mar.Biol.Ass. U.K. 74:563-584.
- Valeur J.R., Jensen A. 2001. Sedimentological research as a basis for environmental management: The Oresund fixed link. The Science of the Total Environment 266: 281-289.
- Wahlberg M., Westerberg H. 2005. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. Marine Ecology Progress Series 288: 295-309.
- Wennberg T. 1992. Colonization and succession of macroalgae on a breakwater in Laholm bay, a eutrophicated brackish water area (SW Sweden). Acta Phytogeogr. Suec. 78: 65-77.
- Westerbom M., Kilpi M., Mustonen O. 2002. Blue mussels, *Mytilus edulis*, at the edge of the range: population structure, growth and biomass along a salinity gradient in the north-eastern Baltic Sea. Mar. Biol. 140: 991-999.
- Westerberg H. 1994. Fiskeriundersökning vid havsbaserat vindkraftverk 1990-1993. Rapport5 Göteborgsfilialen. Utredningskontoret i Jönköping, 44 pp.
- Westerberg H. 1996. Ljud- och vibrationsmätningar vid broar, Fiskeriverket Kustlaboratoriet, V. Frölunda.
- Westerberg H., Roennbaeck P., Frimansson H. 1996. Effects on suspended sediments on cod egg and larvae and on the behaviour of adult herring and cod. 13 pp.

Counc. Meet. of the Int. Counc. for the Exploration of the sea, ICES, Copenhagen, Denmark, Reykjavik, Iceland.

Wieczorek S.K., Todd C.D. 1998. Inhibition and facilitation of settlement of epifaunal marine invertebrate larvae by microbial biofilm cues. *Biofouling* 12 (3): 81-118

Wilhelmsson D., Malm T., Öhman M.C. 2006a. The influence of offshore wind-power on demersal fish. *ICES J. Mar. Sci.* 63: 775-784.

Wilhelmsson D., Yahya S.A.S., Öhman M.C. 2006b. Effects of high-relief structures on cold temperate fish assemblages: A field experiment. *Marine Biology Research* 2: 136-147.

Vindval¹ 2008. Wikström A., Granmo Å. Effekter och anpassningar av marin mjukbottenfauna till ljudstörningar från havsbaserade vindkraftverk. 44 pp., Marine Monitoring vid Kristineberg AB – Vindval.

Vindval² 2008. Hammar L., Wikström A., Börjesson P., Rosenberg R. Studier på småfisk vid Lillgrund vindpark – Effektstudier under konstruktionsarbeten och anläggning av gravitationsfundament, Marine Monitoring vid Kristineberg AB – Vindval.

WPD. 2005. Preliminary Study on Foundation Concepts in relation to Kriegers Flak II and Pilotprojekt Vindval. pp. 15, WPD Scandinavia AB, Report to Vattenfall.

Young G.A. 1985. Byssus-thread formation by the mussel *Mytilus edulis*: effects of environmental factors. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 24: 261-271.

Zettler M.L., Pollehne F. 2006. The impact of Wind Engine Constructions on Benthic Growth Patterns in the Western Baltic. I: Köller J., Köppel J., Peters W. *Offshore Wind Energy Research on Environmental Impacts*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 201-222.

ÅF -Ingemansson. 2007. Fundamentoptimering PM, ÅF-Ingemansson AB, Göteborg.

Öhman M.C., Wilhelmsson D. 2005. VINDREV - Havsbaserade vindkraftverk som artificiella rev: effekter på fisk. *Vindforsk*, FOI/Energimyndigheten. Rapport. 17 pp.

ØDS. 2000. Offshore Wind-Turbine Construction - Offshore Pile-Driving Underwater and Above-water Noise Measurements and Analysis, Odegaard & Danneskiold-Samsøe A/S, Copenhagen.

Øresundskonsortiet. 2000. Environmental impact of the construction of the Øresund fixed link. Copenhagen 96 pp.

Personlig kommunikation

Almgren, Martin. ÅF-Ingemansson. 2007-11.

Anders, Nielsen. DHI Water Environment Health. 2007-12.

Dahlén, Göran. E.ON. 2007-05.

Grahn, Niklas. Vattenfall Power Consultant. 2006-06.

Wahlberg, Magnus. Fjord & Bælt. 2008-02

Elektroniska källor

Bay Bridge East Span, San Francisco.

<http://biomitigation.org/>

Sea Cult - Reef Systems A/S. 2007.

<http://www.seacult.com/>

Öresundskonsortiet. 2004. Miljööredovisning.

<http://www.oresundsbron.com/library/index.php?menu=116&subject=10>

Bilaga 1

Fundamentoptimering, PM 12-02425-07112700 Vindval fundamentoptimering.
Ljud från fundament vid byggnation och i driftsskedet. ÅF-Ingemansson Technology 2007.

Göteborg 2007-12-12

Fundamentoptimering, PM 12-02425-07112700

Vindval fundamentoptimering. Ljud från fundament vid byggnation och i driftsskedet.

Bakgrund

I samband med Marine Monitorings, MM, uppdrag inom VINDVAL jämför de olika fundamentkonstruktioner avseende dess potentiella inverkan på miljön. Bland annat jämför de hur olika fundament förhåller sig till ljud från pålning och driftljud.

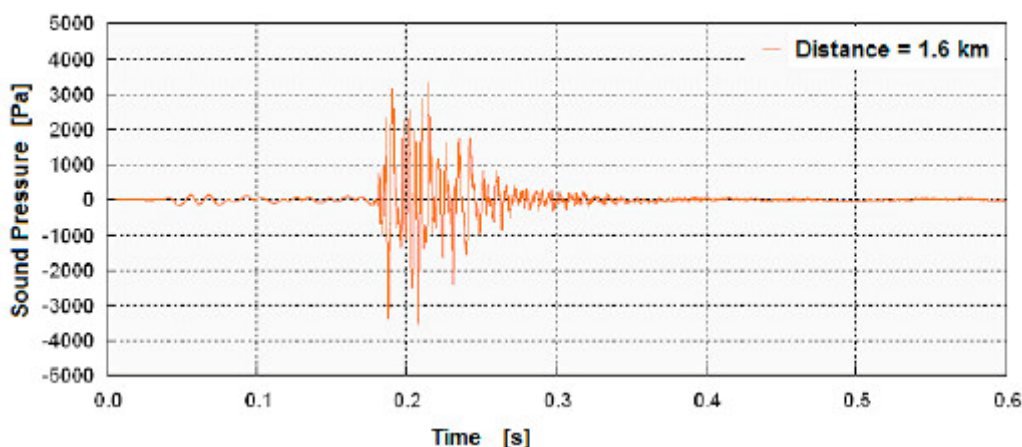
Det viktigaste är att identifiera SKILLNADERNA mellan olika fundament, det är alltså inte relevant att ta fram några exakta siffror. MM vill kunna rangordna de olika fundament-prototyperna efter hur mycket ljud de kan förväntas avge samt om det förekommer några större skillnader i frekvensspektrumet, gällande driftljud respektive pålning av olika diameters stålrör.

MM skulle vilja ha följande

A Ljudtryck (Overall Peak Sound Pressure Level) från pålning av monopiles och skillnader mellan olika storlek

B Ljudnivåer och frekvenstoppar under vindkraftsverk i drift och skillnader mellan
(1) gravitationsfundament (betongkon),
(2) monopile-fundament (stålcylinder),
(3) fackverks-fundament (nätverk av stålcylindrar).

Ljudtryck från pålning av monopiles

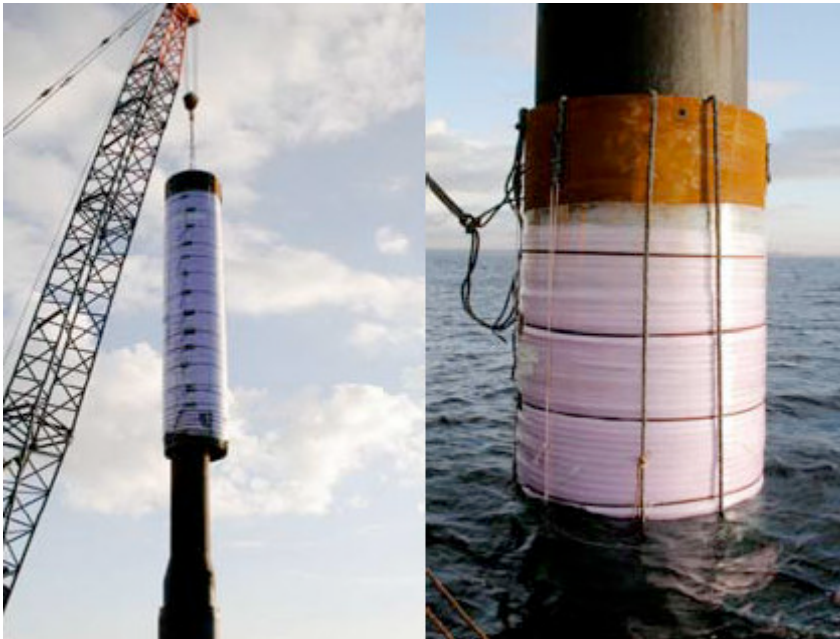


Figur 1 (från referens 1). Uppmätt ljudtryck på 1,6 km avstånd från ett enkelslag vid nedslagning av monopile med en hydraulisk hammare. Kontakttiden är cirka 4 ms. Toppvärdet 3500 Pa motsvarar ljudtrycksnivån $L_{peak} = 191$ dB re $1 \mu\text{Pa}$.

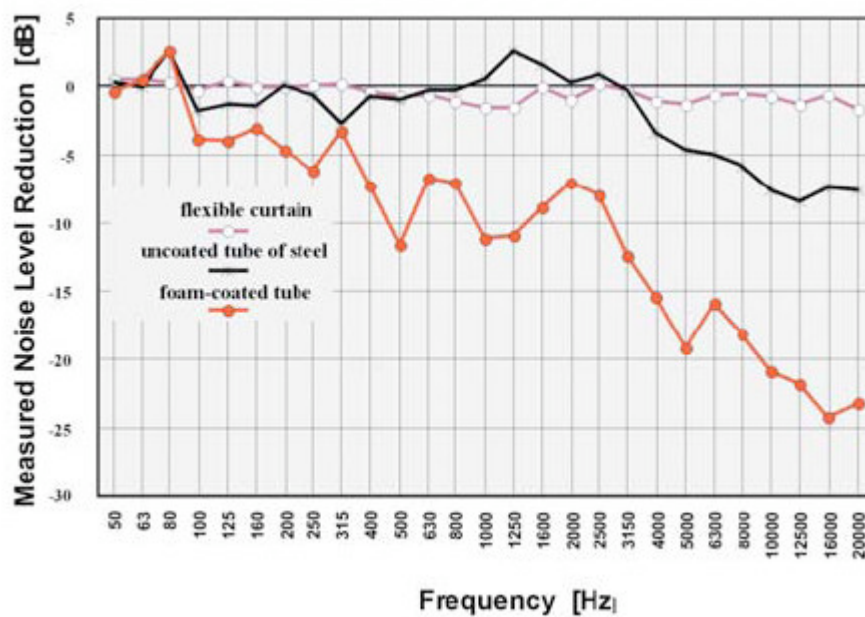
Tabell 1 (från referens 1) Uppmätt högsta ljudtrycksnivå (peak) på 750 m avstånd. Bottendjup och bottenegenskaper är okänt. LE är "single event sound pressure level, SEL".

Measured Noise Emissions:				
Object	Pile diam. [m]	Energy [kJ]	L _{peak} [dB]	LE [dB]
Port construction, coast	1.5	280	184	158
Monopile Sky2000, Baltic S.	3.0	280	185	164
FINO1 (Jacket), North Sea	1.5	280	189	164
Monopile Amrumbank, N.Sea	3.5	800	200	175
5 MW – OWEC (expected)	6.0	600	>205	>178

I referens 1 visas att genom att sätta ett löstagbart plastskumtäcktt stålrör kring pålen som ska bankas ner kan impulsljudet i vattnet reduceras betydligt. Se Figur 2 och Figur 3.

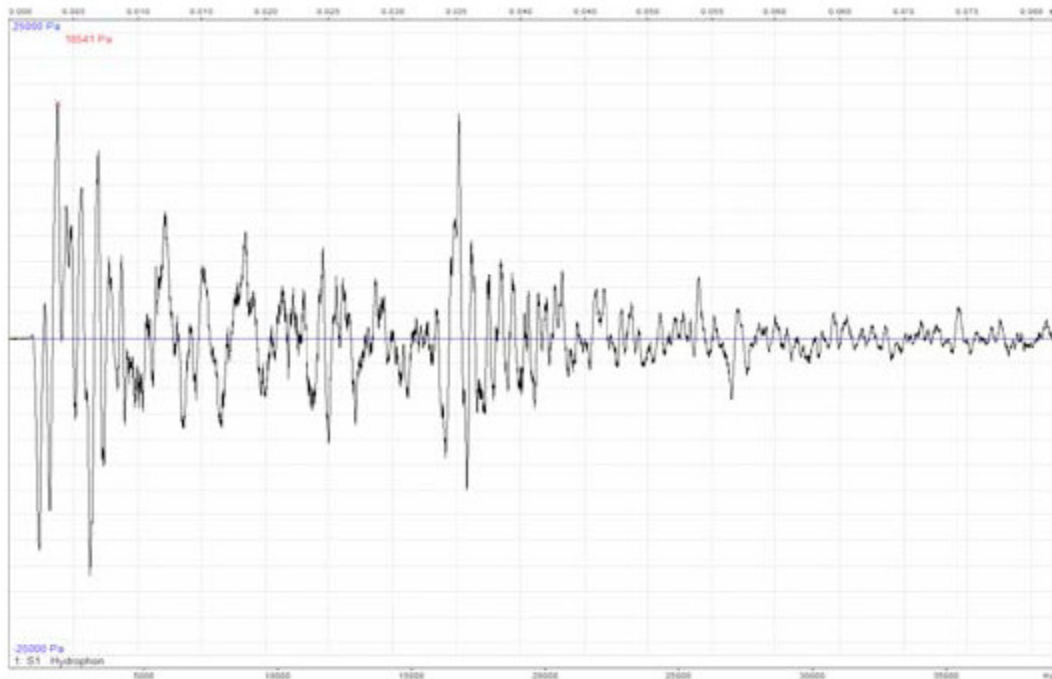


Figur 2 (från referens 1). En påle som ska slås ner i Östersjön förses med ett plastskumtäcktt stålrör.

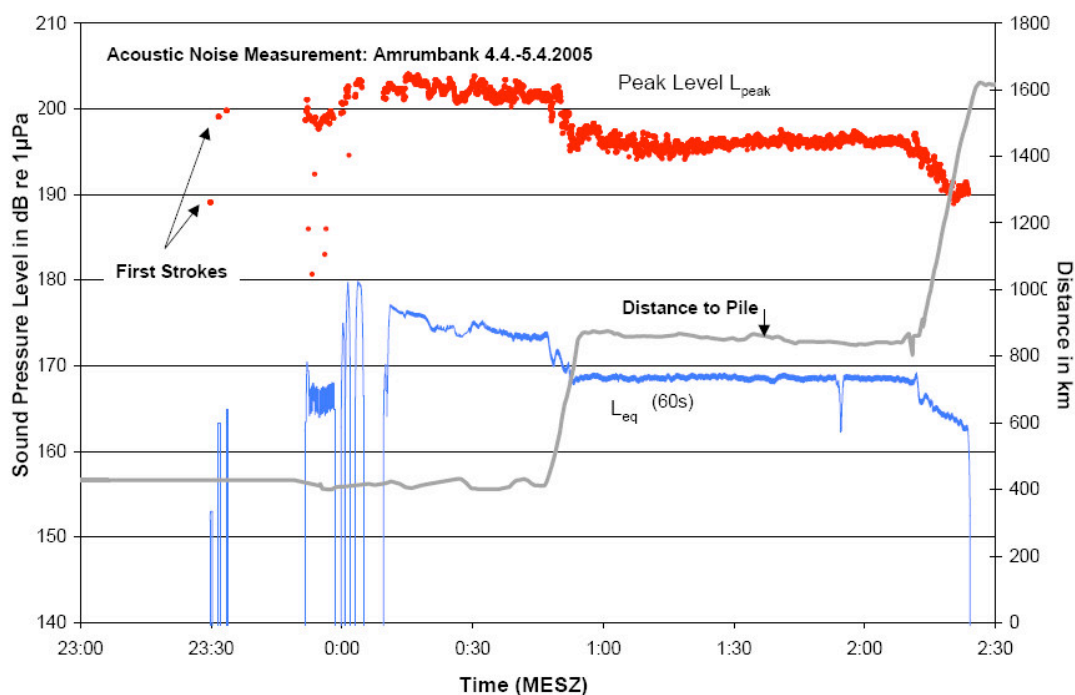


Figur 3 (från referens 1). Frekvensberoende ljudreduktion för det plastskumförsedda stålröret

I Nordsjön har olika forskningsförsök gjorts. I referens 2 beskrivs FINO1 och Amrumbank i Nordsjön. Se Figur 4 och Figur 5.



Figur 4 (från referens 2) Uppmätt ljudtryck på 12 m avstånd från pålning av rör till FINO1 forskningsplattform av typen "jacket". Bottendjupet är 28 m och en hydraulisk hammare av typen IHC 280 har använts. Toppvärdet är 206,8 dB dB re 1 μ Pa (peak).



Figur 5 (från referens 2). Toppvärde (L_{peak}) och ekvivalent ljudnivå under 60 s (L_{eq}) som funktion av tiden jämfört med avståndet vid Amrumbank

Från försöken vid Amrumbank drogs slutsatsen att ljudet i Nordsjön reduceras med 5,5 dB per avståndsdubbling.

Tabell 2 Sammanställning av uppmätt ljud vid pålning i vatten.

Plats	Monopile diameter, m	Avstånd och bottendjup. M	Nivå	Referens
Hamnbyggnation, kust	1,5	750 och ?	Topp 184 dB SEL 158 dB	1
Monopile Sky2000 Östersjön	3,0	750 och?	Topp 185 dB SEL 164 dB	1
FINO1 (jacket) Nordsjön	1,5	750 och ?	Topp 189 dB SEL 164 dB	1
FINO1 (jacket) Nordsjön	1,5	12 och 28	Topp 207 dB	2
Monopile	3,5	750 och ?	Topp 200 dB	1

Plats	Monopile diameter, m	Avstånd och bottendjup. M	Nivå	Referens
Amrumbank, Nordsjön			SEL 175 dB	
Monopile Amrumbank, Nordsjön	3-4 m	400 och ?	Topp 204 dB SEL ?	2
Monopile Amrumbank, Nordsjön	3-4 m	800 och ?	Topp 197 dB SEL ?	2
Monopile Amrumbank, Nordsjön	3-4 m	1600 och ?	Topp 192 dB SEL ?	2
Utgrunden I, Kalmar sund	?	30 m och ?	Topp 203 dB SEL 184 dB	MM ODS 2000
Utgrunden I, Kalmar sund	?	320 m och ?	Topp 183 dB SEL ? dB	MM ODS 2000
North Hoyle, Hoylake, Storbritannien	4,0	1 m och 7 m	262 dB Topp ? SEL ?	?
Horns rev, Nordsjön	?	1 m och 9 m	215 dB Topp ? SEL ?	MM Nedwell & Howell 2004

Ljudnivåer och frekvenstoppar från vindkraftsverk i drift och skillnader mellan fundamenttyper

Val av turbinfundament spelar stor roll för hur mycket ljud som genereras ut i vattnet. Den vanligaste fundamenttypen, monopile, ger mest ljud mellan 50-500 Hz, se referens 3. Gravitationsfundamentet däremot ger mer ljud < 50 Hz, se referens 3.

Från tornet skapas vibrationer i form av böjvågor som exciterar vattnet där ytvågor genererar ljud under vattnet. För monopilefundament, en stålcyllinder som slås ned i botten, är detta den största källan till undervattensljud. Böjvågorna kommer att dämpas när de passerar genom sammanfogningspunkter (svetsningar och kopplingar) i tornet. Generellt ger en sammankoppling 5 dB dämpning, se referens 3. Dämpning beror också på material och frekvens. Höga frekvenser d.v.s. > 10 kHz, kommer att dämpas kraftigt pga. av det höga tornet.

Ett betongfundament har en mycket större yta än en monopile cylinder så därför strålar själva ytan ut mer ljudenergi jämfört ett monopile-fundament.

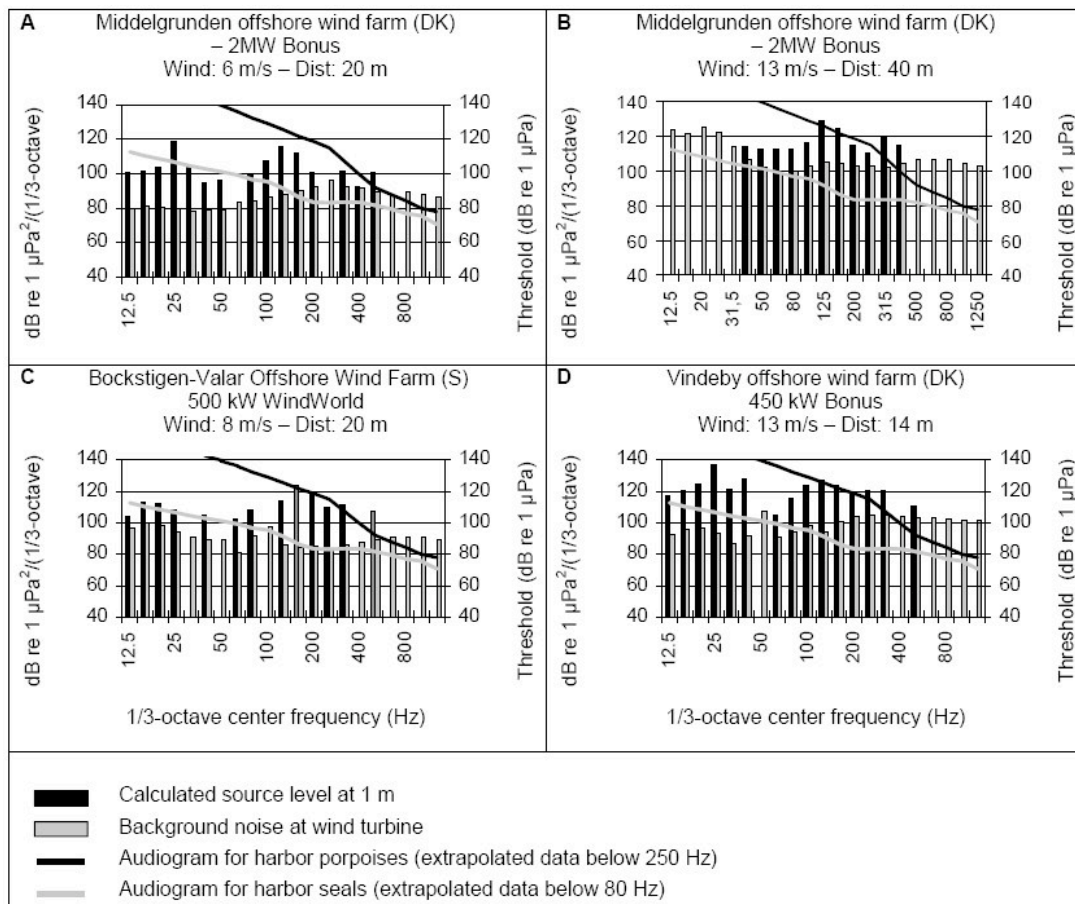
Ett fackverksfundament ger troligen lägre ljudutstrålning i vatten än ett monopilefundament, eftersom diametern är mindre på stålrören och därmed blir den strålande arean och strålningseffektiviteten lägre. Dessutom finns fler svetsfogar och förband mellan olika konstruktionsdelar vilket ökar vibrationsdämpningen i strukturen för de oscillerande krafter som sprider sig från växeln ner i tornet och fundamentet.

Ljudet från vindkraftverken leds ut till en observatör i vattnet t.ex. fisk på tre olika sätt: luften, vattnet och botten. Turbinbladen skapar ljud som når vattnet via luften. Detta är en mycket liten del då det mesta av ljudet reflekteras bort. Huvuddelen av ljudet leds ut via vattnet där tornet ger ifrån sig böjvågor som antingen strålar ut direkt via fundamentet (gravitationsfundament) eller som ytvågor (monopile-fundament).

Den sista inledningsvägen är via botten. Ljudabsorptionen i botten är högre än den i vattnet så denna del bidrar också mycket lite, se referens 4.

Vibrationerna från vindkraftverken kommer att öka med ökande vindhastighet eftersom krafterna på de mekaniska delarna ökar. Likaså ökar vibrationerna med maskinens åldrande pga. av slitage.

I Figur 6 visas beräknat ljudspektrum i tredjedelsoktavband vid drift av tre olika typer av vindkraftverk vid olika vindhastighet och avstånd.



Figur 6 (från referens 5) Audiogram för sälar (harbour seals) och tumlare (harbour porpoises) visat tillsammans med bakgrunds ljud och beräknat ljud från olika vindkraftverk. Beräkningen har gjorts utgående från uppmätt ljud på okänt avstånd och omräknat under antagande av 3 dB dämpning per avståndsdubbling.

Några fall där undervattensljud i driftskedet publicerats visas i Tabell 3

Tabell 3 Havsbaserade vindkraftverk där undervattensljudundersökningar utförts.

Plats	Effekt [MW]	Fundament	Havsdjup [m]	Referens
Nogersund	0.2	tripod	5-15	Westerberg (1994)
Vindeby	0.5	gravitationsfundament	3-5	Degn (2000)
Bockstigen	0.5	monopile	6-17	Degn (2000) Fristedt et al. (2001)
Utgrunden	1.5	monopile	5-10	Ingemansson (2003)
Okänd	1.5	Monopile	10 m	Betke et al (2005)

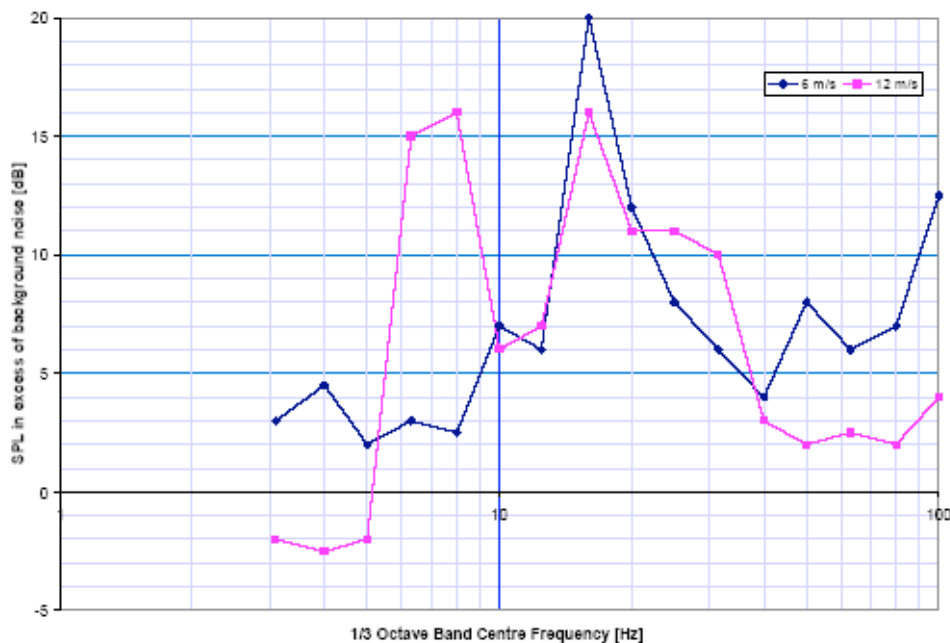
Nogersund i Hanöbukten Svante1

Den första undervattensljudundersökningen av havsbaserade vindkraftverk utfördes i Sverige på turbinen "Svante 1", 220 kW, av Westerberg, referens 6.

Undervattensljudmätningar gjordes i frekvensområdet 1 Hz - 20 kHz. Hydrofonen placerades på 4 m djup och på olika avstånd från turbinen (de olika avstånden är inte angivna i rapporten). Mätningarna gjordes för två olika vindhastigheter 6 och 12 m/s.

Undervattensljudet domineras av harmoniska komponenter från turbinrotorn (mellan 2.08-2.13 Hz). Den högsta ljudtoppen finns vid 16.7 Hz vilket är den 8:e övertonen till bladpassagefrekvensen. Från Figur 7 ses ljudtoppar vid 8 Hz och 16 Hz för 12 m/s vindhastighet men endast vid 16 Hz för 6 m/s vindhastighet. Ljudtoppen vid 16 Hz ligger på samma konstanta nivå över bakgrundsbruset för båda två vindhastigheterna. Absoluta ljudtrycksnivån för ljudtoppen vid 16 Hz blir för 6 m/s vindhastighet 102 dB rel. 1 μ Pa och 113 dB rel. 1 μ Pa vid 12 m/s vindhastighet.

Detta visar att fastän den absoluta nivån av turbinljudet ökar med vindhastigheten så kommer ljudnivån relativt bakgrundsbruset, vilket också är vindberoende, att hålla sig nästan konstant vid 16 Hz.



Figur 7 Ökning av ljudtrycksnivån relativt bakgrundsbruset på grund av kraftverket för två vindhastigheter 6 m/s och 12 m/s

Från dessa mätningar är det möjligt att uppskatta vindturbinens undervattensljudnivå 1 m ifrån turbinen förutsatt cylindrisk dämpning med 3 dB per avståndsfördubbling. Vi gör antagande att hydrofonen var placerad 100 m från tornet. Ljudnivån 1 m från tornet skulle då bli ~ 35-40 dB över bakgrundsbruset. Vid en mycket låg bakgrundsbrusnivå ca ~ 80 dB re 1 μ Pa (lugnt hav) skulle den

absoluta ljudnivån bli ~ 122-133 dB re. 1 μ Pa 1 m, vilket fortfarande är en mycket låg ljudnivå.

Vindeby Danmark

Undervattensmätningarna i Vindeby (referens 3) gjordes i frekvensintervallet 10 Hz - 100 kHz. Hydrofonen placerades 14 m från turbinen och på 2.5 m djup. Vindhastigheten var vid mättillfället 13 m/s.

Mätningarna från Vindeby visar att upp till 400 Hz är ljudet från vindturbinen större än bakgrundsljudet. Högsta toppen finns vid 20 Hz och ligger 33 dB över bakgrundsnivå eller 119 dB re. 1 μ Pa. Det är oklart om toppen vid 20 Hz är en harmonisk komponent till turbinens rotationsfrekvens när det inte är specificerat i rapporten. Antas cylindrisk dämpning, se sektion 1.2, kan ljudnivån 1 m från tornet bestämmas till ~ 44 dB över bakgrundsljudet. Vid en mycket låg bakgrundsljudnivå ca ~ 80 dB re 1 μ Pa (lugnt hav) skulle den absoluta ljudnivån bli ~ 124 dB re. 1 μ Pa 1 m, vilket fortfarande är en mycket låg ljudnivå. Över 400 Hz är det mindre än 3 dB skillnad mellan bakgrundsljudet och ljudet från vindkraftverket. I ultraljudsområdet 20 kHz-100 kHz är skillnaden endast 1-2 dB vilket ligger inom mätosäkerheten.

En viktig slutsats som kom fram från mätningarna var att undervattensljud alstrat från vindkraftverk blir större än bakgrundsljudet för frekvenser mindre än 1 kHz. För frekvenser större än 1 kHz maskeras undervattensljudet från vindkraftverk av bakgrundsljudet.

Bockstigen Näsudden Gotland

Undervattensmätningarna i Bockstigen (referens 3) gjordes i frekvensintervallet 10 Hz - 100 kHz. Hydrofonen placerades 20 m från turbinen och på 4 m djup. Vindhastigheten var vid mättillfället 8 m/s.

Mätningarna från Bockstigen visar att det mesta ljudet genereras mellan 63-630 Hz och är som högst vid 160 Hz. Vid 160 Hz är undervattensljudet 25 dB över bakgrundsnivån. Antas cylindrisk dämpning, se sektion 1.2, kan ljudnivån 1 m från tornet bestämmas till ~ 38 dB över bakgrundsljudet. Vid en mycket låg bakgrundsljudnivå ca ~ 80 dB re 1 μ Pa (lugnt hav) skulle den absoluta ljudnivån bli ~ 118 dB re. 1 μ Pa 1 m, vilket fortfarande är en mycket låg ljudnivå

För frekvenser större än 630 Hz är skillnaden mellan undervattensljud från vindkraftverket och bakgrundsljudet mindre än 3 dB. En mycket liten skillnad som hamnar i mätosäkerheten.

Undervattensljuduppskattning av 2 MW vindkraftverk i Rødsand Danmark

Undervattensljudmätningarna från Vindeby vindkraftverk, 500 kW, och Bockstigen, 550 kW, har använts för att uppskatta undervattensljudet från Rødsands planerade vindkraftverk på 2 MW (referens 3). För att kunna göra denna uppskattning

kompletterades ljudmätningarna med mätningar av tornvibrationer från de båda havsbaserade vindkraftverken samt ett på land stående vindkraftverk på 2 MW. Båda vibrationsmätningarna från Vindeby och Bockstigen korrelerar bra med frekvensinnehållet i undervattensljudmätningarna. Detta bevisar att undervattensljudet från vindkraftverken är strukturburet och kommer ifrån tornet.

Eftersom Vindeby har gravitationsfundament och Bockstigen monopile kunde uppskalningen till 2 MW vindkraftverk göras för de båda fundamenttyperna. Prediktering visar att vindkraftverk med betongfundament alstrar mer ljud för frekvenser under 50 Hz och motsvarande monopile genererar mer ljud mellan 50-500 Hz. Prediktering visar också att för frekvenser under 100 Hz blir ett 2 MW vindkraftverk bullrigare än ett 500 kW vindkraftverk. Samtidigt blir det tystare för frekvenser över 100 Hz.

Utgrunden Kalmar Sund

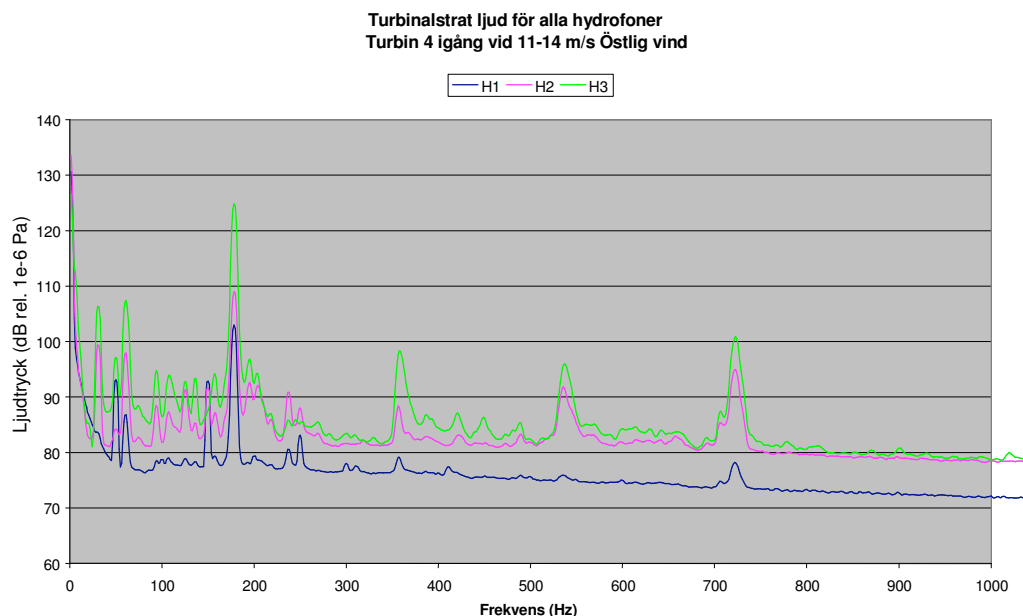
Undervattensmätningarna i Utgrunden (referens 7) gjordes i frekvensintervallet 1 Hz - 2 kHz.

Tre hydrofoner placerades på tre olika avstånd, 463 m 160 m och 83 m, från en av de sju turbinerna för att kunna verifiera hur ljudnivån avtar med ökat avstånd från källan. Dessa hydrofoner placerades på tre olika djup, 18 m 15.2 m och 12.9 m.

För att kunna bedöma hur vindhastigheten påverkar ljudnivån så analyserades ljudmätningarna uppmätta under tre olika vindhastigheter, ca. 4 m/s, 8 m/s och 14 m/s.

Mätningarna från Utgrunden visar att ljudet från vindkraftverken huvudsakligen strålar ut ljud vid vissa få frekvenser mellan 30 - 800 Hz, se Figur 8. Det analyserade smalbandsspektrumet i figur 3 är beräknat med Flattop fönster och en frekvensupplösning på 1 Hz. Den högsta ljudtoppen finns vid 178 Hz och ligger ~ 40 dB över bakgrundsnivån eller 125 dB rel. 1µPa.

För att ta reda på vad som orsakar det ljud som mätts upp så placerades fyra accelerometrar på tornet. De uppmätta vibrationerna jämfördes sedan med det ljud som registrerats av hydrofonen. Slutsatsen är att nästan alla toppar som kan ses i ljudmätningen även finns med i en eller flera av vibrationsmätningarna på tornet. Dessa vibrationer härrör i sin tur från växellådan.



Figur 8 Ljudet från vindkraftverk 4 vid 11-14 m/s östlig vind för de olika hydrofonpositionerna. Konstant bandbredd 1 Hz.

För att korrekt kunna bedöma den verkliga dämpningen av ljudet mättes amplituden vid några tydliga ljudtoppar för alla hydrofoner, se fig. 3. Genom att man vet hydrofonernas avstånd till vindkraftverket så kan den verkliga dämpningen per avståndsdubbling beräknas. Resultatet visar en dämpning på ca. 4 dB för varje avståndsfördubbling och stämmer relativt väl överens med den 3 dB:s försvagning som gäller när man har cylindrisk utbredning, se sektion 1.2, och ingen bottendämpning eller förändring i vattendjup. Att dämpningen överstiger 3 dB för Utgrunden kan bero på absorption i botten.

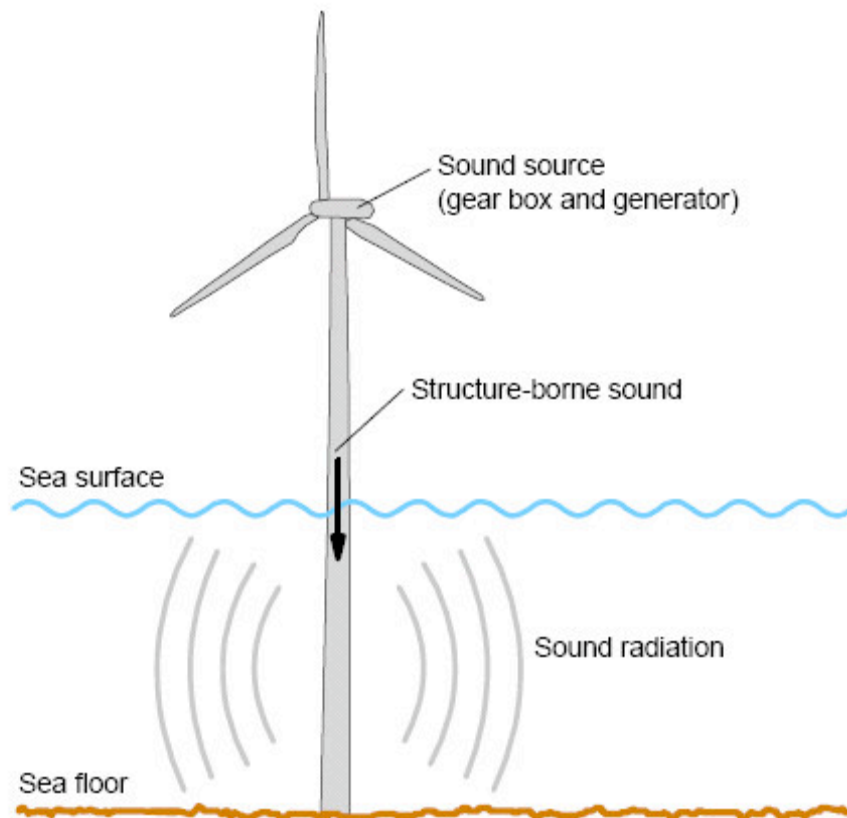
Antas en 4 dB dämpning för varje avståndsfördubbling, kan ljudnivån 1 m från tornet bestämmas till ~ 65 dB över bakgrundsljudet. Vid en mycket låg bakgrundsljudnivå ca ~ 80 dB re 1 μ Pa (lugnt hav) skulle den absoluta ljudnivån bli ~ 145 dB re. 1 μ Pa 1 m, vilket fortfarande är en låg ljudnivå.

Vindhastighetens betydelse för ljudet analyserades också. Generellt ger en ökad vindhastighet en ökad ljudtrycksnivå. En slutsats man kan dra av mätningarna är att den dominerande toppen ändrar frekvens med ändrad vindhastighet. Detta kommer sig av att vindkraftverkets rotationshastighet ändras med vindhastigheten.

Vid analysen av Utgrundens mätningar tittade man även på om ljudet från de totalt sju stycken kraftverken interfererar med varandra. Det upptäcktes inga tecken på att interferens kunde påverka den totala ljudbilden. De troliga orsakerna är de små variationerna i turbinhastighet mellan vindkraftverken samt att hydrofonerna var placerade så att den registrerade nivån dominerades för mycket av det närmaste vindkraftverket.

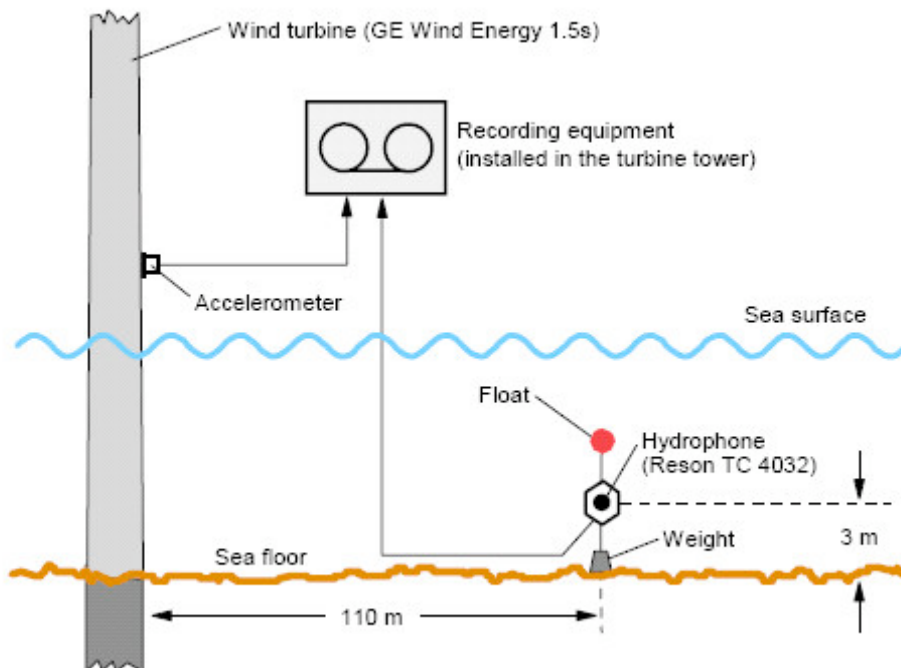
Betke et al

I referens 2 redovisas undervattensljudmätningar gjorda för en vindturbin med monopilefundament stående på ca 10 m djup. Författarna redovisar inte var den är belägen eller när mätningarna gjordes. De anser att ljudet uppstår genom utstrålning av vibrationer i den del av tornröret som är under vatten, vilket också är vår erfarenhet, se Figur 9.



Figur 9 (från referens 2) Mekanismen för ljudutstrålning i vatten från ett havsbaserat vindkraftverk med monopilefundament.

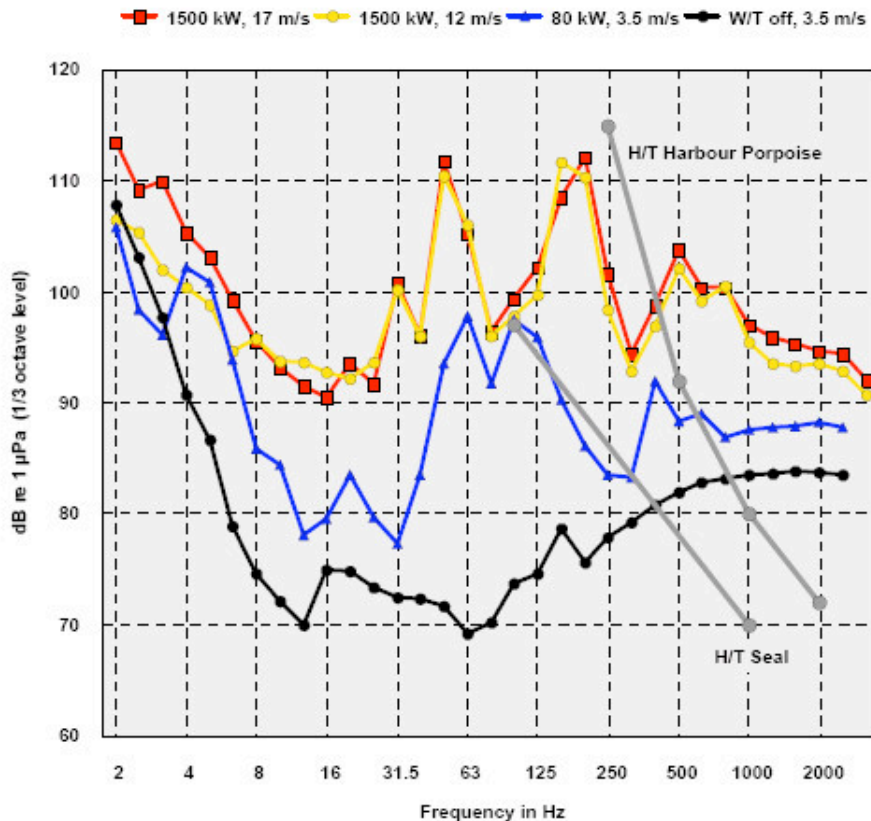
Mätupställningen redovisas i figur 5. Signalerna spelades in på band under en månad och utvärderades i efterhand.



Figur 10 (från referens 17) Mätupställning för övervakning av undervattensljud alstrat av ett havsbaserat vindkraftverk med monopilefundament. Vattendjupet var ungefär 10 m.

Några ljudspektra visas i figur 6. Vid låga vindhastigheter går generatorn med ungefär 1100 varv per minut. Det nominella värdet 1800 varv per minut nås vid 700 kW uteffekt. Turbinens märkeffekt är 1500 kW. Den uppmätta turbinen visar två huvudsakliga spektra ett för låga vindhastigheter och ett för moderat och stark vind. Författarna anger att ljudspektrum orsakas av två uppsättningar kuggingreppsfreverser från växellådan.

Författarna har erfarenhet av turbiner med högre märkeffekt. Mätningar av vibrationer i tornet på turbiner på land med effekten 2 till 2,5 MW har visat på högre nivåer än för den uppmätta 1,5 MW-turbinen. Om sådana turbiner placeras i havet kommer de att ge högre vibrationsnivåer i den strålande delen av tornet under vatten. Å andra sidan har större turbiner oftast lägre varvtal och kuggingreppsfrekvenser. Dessutom minskar normalt ljudutstrålningseffektiviteten av böjvågor i tornskalet vid lägre frekvenser. En tredje omständighet är att marina däggdjurs hörförmåga avtar med minskande frekvens.



Figur 11 (från referens 17) Mätning av undervattensljudtrycksnivå i tersband på 110 m avstånd från vindkraftverk med monopile-fundament. Vindhastigheten hänförs till navhöjd (nacelle anemometer). I figuren visas också lågfrekventa delen av hörtröskeln för säl och tumlare.

Slutsatser

Ju större diameter ett pålen till ett monopilefundament har, desto större blir toppvärdet av ljudtrycket då pålen slås ner i botten.

Mycket talar för att byggnationen av ett fackverksfundament orsakar lägre ljudtryck eftersom pålarna som slås ner i botten är av mindre diameter än för ett monopilefundament.

Ljudet från byggnationen av ett gravitationsfundament orsakar normalt lägre ljudnivåer. Om sprängning måste ske för att jämna av botten, uppstår dock mycket höga ljudnivåer, högre än vid pålning.

Ljudutstrålning till vatten från vindkraftfundament i driftskedet påverkas av flera faktorer. Den utstrålade ljudeffekten är proportionell mot rms-värdet i kvadrat av den oscillerande vibrationshastigheten, arean av den ljudstrålande ytan och strålningseffektiviteten. Vibrationerna härrör i huvudsak från växellådan, elektromotoriska krafter i generatorn och annan utrustning i tornet. De utbreder sig

nedåt genom tornet. Om tornet har flera skarvar, t ex svetsskarvar uppstår förlust av vibrationsenergi varje gång en sådan skarv passeras. Många skarvar kan je lägre vibrationsnivå i fundamentet. Vibrationsenergin når så småningom fundamentet under vattnet. Vibrationshastigheten för fundamentets ljudstrålande ytor beror av fundamentets mottaglighet för vibrationsenergi. Om fundamentet är tungt och styvt, såsom för t ex ett gravitationsfundament, är det troligt att vibrationshastigheten blir låg. Strålningseffektiviteten är låg för föremål som är små i förhållande till ljudets våglängd (ungefär 1500 m/s genom frekvensen i Hz). Det är troligt att strålningseffektiviteten är störst för ett gravitationsfundament, mindre för ett monopilefundament och minst för ett fackverksfundament. Genom att beräkna hur stor arean av undervattensskroppen är för de tre fundamenttyperna kan man rangordna dem med avseende på area.

Tabell 4 Jämförelse av inverkan av de tre parametrarna vibrationshastighet, strålningseffektivitet och area på ljudutstrålning i vatten från vindkraftverkfundament. Fler plustecken indikerar större ljudutstrålning.

Parameter	Gravitationsfundament	Monopilefundament	Fackverksfundament
Vibrationshastighet	+	++	+++ Om fackverket har många skarvar och fogar kan det sänka vibrationshastigheten
Strålningseffektivitet	++	++	+
Area	++ Ca 500 m ²	+ Ca 300 m ²	+ Ca 300 m ²

En hypotes kan formuleras utifrån sammanställningen. Hypotesen är att monopile- och gravitationsfundament avger ljud i samma storleksordning, med skillnaden att gravitationsfundament avger sitt dominerande ljud i ett lägre frekvensintervall än monopilefundament.. Hypotesen säger också att det är sannolikt att fackverksfundament avger sitt ljud i ett högre frekvensintervall än monopile- och gravitationsfundament.

Några vibrationsmätningar i torn och fundament finns redovisade i referens 8. Mätningarna är för få för att dra slutsatser om skillnader mellan fundamenttyper.

Referenser

1. Elmer, K.-H., Neumann, T., Gabriel, J., Betke, K. & Schultz-von Glahn, M. Measurement and reduction of offshore wind turbine construction noise. DEWI Magazin no 30 Februar 2007
2. Betke, K, Elmer, K.-H., Gabriel, J., Gerasch, W.-J., Matuscheck, R. & Neumann, T. "Underwater noise emissions of offshore wind turbines" Wind Turbine Noise, Berlin WTN 2005
3. "Rødsand offshore wind farm EIA Technical Background Report" Underwater Noise, Ødegaard & Danneskiold-Samsøe A/S, december 2000.
4. "A review of offshore windfarm related underwater noise sources" Report No. 544 R 0308 by Dr J. Nedwell & Mr D. Howell, october 2004
5. Damsgaard Henriksen, O., Degn, U., Tougaard, J. & Miller, L. "Low frequency underwater noise from offshore wind turbines: Detection ranges and potential implications for marine mammals" Wind Turbine Noise, Berlin WTN 2005
6. "Fiskeriundersökningar vid vindkraftverk "svante 1", Håkan Westerberg, 1990-1993
7. "Utgrunden – Havsbaserade Vindkraftspark Mätning av undervattensbuller", 11-0032, Ingemansson Technology AB, 2003
8. "Skottarevet. Falkenberg, havsbaserad vindkraftspark. Ljud, undervattensljud, vibrationer och elektromagnetiska fält. MKB-utredning." Ingemansson Technology AB, 2006

ÅF-Ingemansson AB
Göteborg

Martin Almgren

Miljömässig optimering av fundament för havsbaserad vindkraft

RAPPORT 5828

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-5828-9
ISSN 0282-7298

När nya material och ytor introduceras på havets botten påverkas förutsättningarna för det marina livet på platsen. Alla fundament till vindkraftverk har hårda strukturer men effekterna på det marina livet varierar beroende på fundamentens ytbeskaffenhet och installationsmetod. Vilken typ av miljö som fanns före etableringen är också en påverkande faktor.

Denna rapport redogör för vilka typer av förändring i den marina livsmiljön som man kan förvänta sig vid placering av fundament för vindkraftverk i olika typer av bottenmiljöer.

Kunskapen kan användas som underlag vid planering tillståndsgivning och miljökonsekvensbeskrivning för havsbaserade vindkraftparker.

Kunskapsprogrammet Vindval samlar in, bygger upp och sprider fakta om vindkraftens påverkan på den marina miljön, på växter, djur, människor och landskap samt om människors upplevelser av vindkraftanläggningar. Vindval erbjuder medel till forskning inklusive kunskapssammanställningar, synteser kring effekter och upplevelser av vindkraft. Vindval styrs av en programkommitté med representanter från Boverket, Energimyndigheten, Fiskeriverket, länsstyrelserna, Naturvårdsverket, Riksantikvarieämbetet och vindkraftbranschen.

