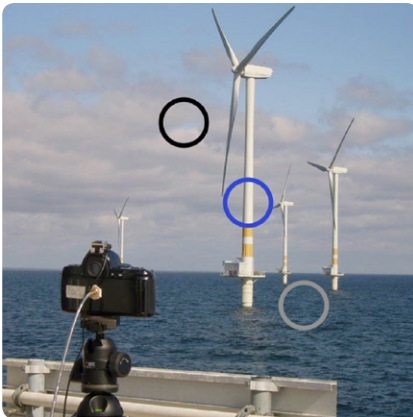


Havsbaserad vindenergi ur ett fågelperspektiv

- kraftverkens synlighet för fågelögat

RAPPORT 5764 • DECEMBER 2007



Havsbaserad vindenergi ur ett fågelperspektiv - kraftverkens synlighet för fågelögat

Anders Ödeen
Olle Håstad

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 978-91-620-5764-0.pdf

ISSN 0282-7298

Elektronisk publikation

© Naturvårdsverket 2007

Tryck: CM Gruppen AB

Omslagsfoton: Björn Hillarp, Dagmar Jonsson

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 ett ökat vindbruk, vilket ska åstadkommas genom att underlätta en ökad vindkraftutbyggnad genom bättre underlag för miljökonsekvensbeskrivningar och tillståndsprocesser samt att minska osäkerheten 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 Energimyndigheten, Naturvårdsverket, Fiskeriverket, Boverket, Riksantikvarieämbetet, länsstyrelserna och vindkraftbranschen.

Den här rapporten har skrivits av Anders Ödeen vid Uppsala universitet och Olle Håstad vid University of Bristol. Skribenterna svarar för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Vindval i december 2007

Innehåll

FÖRORD	3
1 SAMMANFATTNING	6
2 SUMMARY	7
3 BAKGRUND	8
4 PROJEKTETS MÅL	11
4.1 Projektledning och medverkande	11
4.2 Metoder och undersökningsområden	11
5 RESULTAT	15
5.1 Spektral reflektans från mätytorna	15
5.2 Kraftverkens synlighet över dygnet	16
5.3 Synlighet vid skilda avstånd	19
5.4 Modellering av alternativ färgsättning	23
6 DISKUSSION	26
7 SLUTSATS	28
8 REFERENSER	29

1 Sammanfattning

I decennier har det funnits en utbredd oro för att en utbyggnad av vindenergin skulle kunna leda till en icke önskvärd förhöjd dödlighet hos fåglar orsakad av kollisioner. Ett flertal studier av fåglars rörelsemönster i närheten av vindparker och försöksplattformer till havs har företagits under senare år. Den generella bilden baserad på dessa studier visar dock att den förhöjda dödligheten varit begränsad. I enstaka fall och under exceptionella väderförhållanden kan emellertid dödligheten bli markant högre och även drabba särskilt skyddsvärda arter. Det finns också farhågor att en massiv framtida utbyggnad av vindenergin kan orsaka barriäreffekter när sträckande fåglar störs bort från sina naturliga flyttvägar. Det är därför värdefullt att studera hur fåglar reagerar på utbyggnaden av vindkraftverk och vilka arter som är mest känsliga.

Denna studie är den första som har undersökt synligheten av havsbaserade vindkraftsanläggningar med utgångspunkt från fåglarnas synfysiologi. Metoden vi arbetat med är telespektrofotometri. Studierna har skett vid kraftverken vid Utgrunden I i Kalmarsund och två fyrar som har fått fungera som simulerade vindkraftverk: en i Kalmarsund utanför Bergkvara samt en vid nuvarande Lillgrunds vindkraftpark i Öresund. Huvudfrågan har varit om strukturerna syns bättre eller sämre för fåglar än människor med avseende på färgkontrasterna som uppstår gentemot den naturliga bakgrunden. Vi har studerat såväl de korta avstånd där fåglarna riskerar att kollidera med strukturerna som de betydligt längre avstånd från kustlinjen där synliga kraftverk kan utgöra en estetisk olägenhet. Vi har även studerat de medelstora avstånd där barriäreffekter kan antas kunna uppstå när sträckande fåglar väljer att vika av och ta vägen runt vindparkerna. Kunskapen är motiverad för att exempelvis lägga grunden till en fågelanpassad färgsättning av framtida vindparker som ändå inte verkar störande för en mänsklig betraktare.

Våra resultat visar att de faktiska vindkraftverken vid Utgrunden, liksom de simulerade i Kalmarsund och vid Lillgrund, syns bättre för fåglar än för människor, särskilt på korta avstånd. Skillnaden är större mellan de så kallade ultraviolettkänsliga fågelarterna (UVS) och människor än mellan människor och så kallat violettekänsliga fåglar (VS), vilka utgör den helt dominerande gruppen bland sträckande fåglar i Kalmarsund. Men generellt sett så följs de tre synsystemen väl åt. Trots att synligheten varierar kraftigt med väder, tid på dagen, årstid, väderstreck och avstånd, verkar vindkraftverkens färgsättning vara rätt väl anpassad för att såväl möta estetiska krav från mänskliga betraktare som att minimera kollisionen för vilda fåglar.

2 Summary

There has been a widespread concern that the accelerated establishment of wind farms will lead to more wild bird fatalities through collisions. In recent years, a number of studies have been conducted on the behaviour of migrating birds around wind farms and research platforms. Thanks to these studies, we have learned that offshore wind power contributes very little to the total human induced mortality in wild birds. However, there has been a significant rise in mortality for some vulnerable bird species, and there is some unease over the risk that a dense establishment of offshore wind farms in the near future may form barriers to migrating bird populations as these are forced out of their preferred routes. It is therefore important to investigate how wind turbines at sea are perceived by those bird species that are at risk of being negatively affected by the wind energy establishments.

The present study is the first of its kind in investigating the visibility of offshore wind power plants to birds while taking the visual physiology of birds into account. We have used telespectrophotometry to calculate an estimate of the perceived contrast between off-shore wind turbines and their background during diverse weather conditions and at different times at the wind farm Utgrunden I in Kalmarsund, Sweden. We have also simulated the reflective properties of the Utgrunden turbines on lighthouses in Kalmarsund and in Öresund between Sweden and Denmark, close to the Lillgrund wind farm, presently under construction. Perceived contrasts against the background could then be estimated where there were no real wind turbines to test. We have studied the visibility of the structures both to birds and humans and at close distances, where high contrasts to birds are preferable to avoid collisions, long distances, from the coast, from where turbines at the horizon may disturb human observers and intermediate distances at which migrating birds tend to peel off when avoiding wind farms along a migratory route. The knowledge that comes from such a study may facilitate the development of bird-adapted paint schemes for wind turbines that do not increase their visibility to human observers.

Our results show that the wind turbines at Utgrunden I, as well as the simulated wind turbines in Kalmarsund and by Lillgrund, are more visible to birds than to humans, especially at close range. The difference is more pronounced between humans and the so called “ultraviolet sensitive” birds (UVS) than between humans and the “violet sensitive” bird species (VS). The latter group is represented by a large majority of the species that migrate through Kalmarsund in the spring and fall. Generally speaking, however, the three vision systems are largely similar in how discriminability of the turbines versus their backgrounds varies with weather, season, time of day, angle of view and distance. It appears that the paint scheme of the turbines at Utgrunden I is fairly well adapted both to reduce the risk of bird collisions and to preserve aesthetical values for human observers.

3 Bakgrund

Ett flertal vindparker är planerade eller under uppförande i svenska vatten och i närheten av våra kuster, samtidigt som vi fortfarande har stora luckor i vår kunskap om havsbaserad vindkrafts miljöpåverkan på fågelfaunan. Detta beror delvis på att befintliga studier av kollisionsrisker för fåglar och vindkraftverk mestadels har utförts på landbaserade anläggningar. Analyser av miljöpåverkan från vindkraftverk ute till havs är visserligen dyrare än på land men bör ändå göras (Desholm & Kalhert 2005).

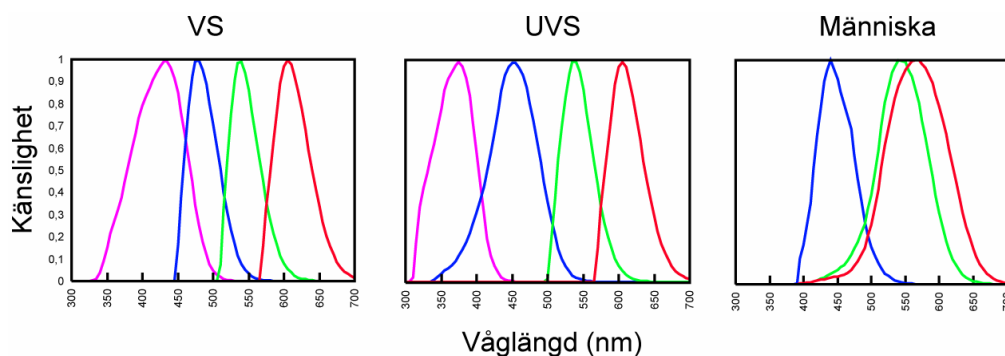
Det har sedan länge funnits en utbredd oro för att en utbyggnad av vindenergin leder till förhöjd dödlighet av fåglar genom kollisioner (t. ex. Medsker 1982), men efter att ett flertal studier har företagits har oron kunnat stillas en aning. De vindkraftverk och vindkraftsparker som har studerats har visat sig bidra med endast en liten ökning av dödligheten; betydligt fler fåglar förolyckas i kollisioner med kraftledningarna och höga master, fordon och dylikt (Erickson *m. fl.* 2001). Dock har i enskilda fall en markant dödlighet noterats för vissa skyddsvärda arter som exempelvis rovfåglar och gamar (se Erickson *m. fl.* 2001, Barrios & Rodrigues 2004, Kjetil Bevanger *muntl.*).

Tack vare de senaste årens detaljerade studier av fågelflockars beteende i närheten av vindkraftparker och försöksplattformar till havs (t. ex. Desholm & Kalhert 2005, Pettersson 2005, 2006, Desholm 2006 och Hüppop *m. fl.* 2006) vet vi idag bland annat att en stor majoritet av sträckande fåglar viker av långt innan de riskerar att kollidera med kraftverken (hundratalet meter till flera kilometer innan de skulle ha passerat: Pettersson 2005 samt se referenser i Drewitt & Langston 2006). Emellertid, om planerna på en större utbyggnad av vindenergin till havs realiseras, kan vindparkerna komma att orsaka barriäreffekter för flyttfåglar (se t.ex. Drewitt & Langston 2006). Detta kan leda till ett ökat antal kollisioner om fler fåglar av energibesparingsskäl väljer att försöka flyga genom vindkraftparkerna istället för att runda dem (Widemo 2007). Särskilt i samband med dålig sikt och motvind sträcker fåglar ofta på låga höjder (under 200 m) vilket också ökar risken för att kollidera med kraftverken (Hüppop 2006). Det är därför viktigt att studera hur havsbaserade vindkraftverk uppfattas av de fågelarter som löper störst risk att kollidera, och sådana studier bör utgå från ögonfysiologin hos de aktuella fågelarterna. Med den kunskap som följer blir det möjligt att optimera vindkraftsanläggningarnas utseende för fåglar så att kollisionsriskerna minimeras.

Vi saknar idag kunskap om hur väl vindkraftverken kontrasterar mot bakgrunden för fåglar. Utförda studier har utgått från det mänskliga ögat, vilket skiljer sig från fågelns på flera avgörande punkter. Människans färgseende är av en sällsynt typ som vi annars bara finner hos våra närmaste släktingar bland aporna. Därför är det svårt för oss att förstå hur färgsignaler uppfattas av andra djur, inte minst fåglar, vilka sannolikt har det mest sofistikerade synsystemet av alla ryggradsdjur (Bowmaker *m.fl.* 1997). Till exempel ser alla dagaktiva fåglar färg med hjälp av fyra tappar (Hart 2001) medan vi använder tre. Den extra tappen ger fågelseendet en teoretisk möjlighet att sätta samman dubbelt så många färger som vi människor

kan uppfatta. Man skulle kunna säga att vi är ”färgblinda” jämfört med fåglarna. Det är också viktigt att notera att känslighetstopparna hos fåglarnas tappar ligger på andra våglängder än hos människor. Fåglarnas tappar är känsliga i ultraviolett (UV), blått och ungefär vid gult och ungefär vid rött – en mänsklig tapp registrerar blått, grönt eller rött. Skillnaderna i färgseende mellan människor och fåglar är så stora att det blir omöjligt för oss att illustrera hur färger i naturen ser ut genom fåglarnas ögon. Men med hjälp av fysiologiska modeller av hur näthinnor fungerar kan vi beräkna hur pass synliga olika objekt i olika miljöer bör vara för en fågel.

Känslighetstopparna i tapparna skiljer sig dessutom mellan två ögonfysiologiska huvudgrupper av fåglar, UVS och VS. Den första gruppens UV- och blåttappar är känsligare för kortare våglängder än den andra gruppens (Hart 2001) (figur 1). Rovfåglar och flertalet sjöfåglar, till exempel ejder, som passerar eller sträcker genom Kalmarsund (se Pettersson 2005), tillhör den så kallade VS-gruppen medan småfåglar (passerida tättingar) och måsfåglar tillhör UVS-gruppen (Ödeen & Håstad 2003, Håstad *m. fl.* 2005).



Figur 1. Tappkänsligheter hos fåglar (VS och UVS) och människa (normaliserade till en maxkänslighet på 1)

Fågelpassade färgsättningar och/eller belysningar kan få fåglar att lättare upptäcka vindkraftverk i tid utan att anläggningarna nödvändigtvis behöver synas tydligare för människor. Det är generellt sett billigare att anlägga och driva vindkraftverk nära kusten och på ringa djup än längre ut till havs. Men eftersom de anläggs inom synhåll kommer kustnära vindparker ofta i konflikt med boende och friluftsliv. Det kan dock vara möjligt att välja speciella färger, exempelvis på rotorbladen, som kontrasterar väl mot himlen för fåglar på korta avstånd utan att verka störande för människor och därmed påverka det estetiska intrycket och områdets naturvärden.

På korta avstånd från vindkraftverk minskar rotorbladens synlighet på grund av att rörelsehastigheten över näthinnan orsakar så kallad ”motion smear”. Människors och fåglars ögon har nämligen svårt att uppfatta föremål som rör sig snabbt över synfältet. Ett sätt att illustrera fenomenet är att vifta med ett finger framför sig med utsträckt arm. Redan vid ganska låga hastigheter blir fingret suddigt och svårt att uppfatta. Dessutom är den hastighet där fingret går att följa lägre ju närmare

ögat fingret är. Då spets hastigheten hos ett vindkraftverk kan ligga kring 70 m/s är det lätt att förstå att rotorbladen kan vara svåra att uppfatta för fåglar i kraftverkets omedelbara närhet. Detta oönskade fenomen kan motverkas genom att bladen målas i kontrasterande färger. Den effektivaste färgsättningen har visat sig vara ett rotorblad målat svart och de övriga vita (Hodos 2003). Med en sådan färgsättning ökar rotorns synlighet inte bara för fåglar utan också för människor. Möjligen kan också ”motion smear”-dämpande färger väljas så att de är i det närmaste identiska för det mänskliga ögat – och alltså inte mer utmärkande än nuvarande färgsättningar – men med bibehållet god kontrasterande effekt för fågelögat.

Färgsättningen och belysningen av vindkraftverk bör samtidigt utformas så att de inte attraherar fåglar som annars inte skulle se anläggningarna. Dels för att inte förstärka eventuella barriäreffekter och dels för att det natttid, då det relativa in-slaget av UV är förhöjt efter skymningen och före gryningen, finns en risk att kollisioner orsakas av att fåglar dras till UV-reflekterande ytor.

4 Projektets mål

Vår avsikt har varit att undersöka synligheten av havsbaserade vindkraftsanläggningar vid olika väderförhållanden, tider på dagen, årstider, platser, väderstreck och avstånd samt beräkna vilka färger som kan användas för att öka kraftverkens upptäckbarhet för fåglarna utan att märkbart ändra upplevelsen för en mänsklig betraktare. Syftet med denna undersökning är att lägga grunden för en färgsättning av vindkraftverk där risken för kollisioner för fåglar minskar. Då människors och fåglars synsystem skiljer sig åt finns det goda möjligheter att färger uppfattas olika av oss och fåglar. Det innebär att det är teoretiskt möjligt att skapa färgkombinationer som för fåglar starkt kontrasterar mot varandra eller mot bakgrunden, men som inte gör det för människor.

4.1 Projektledning och medverkande

I projektet har följande personer medverkat:

Anders Ödeen, Fil. dr. , zoökolog. Avd. f. Zooekologi, Uppsala universitet.

Projektledare. E-mail: anders.odeen@ebc.uu.se

Olle Håstad, Fil. dr. , zoökolog. University of Bristol. Projektledare. E-mail:

olle.hastad@bristol.ac.uk

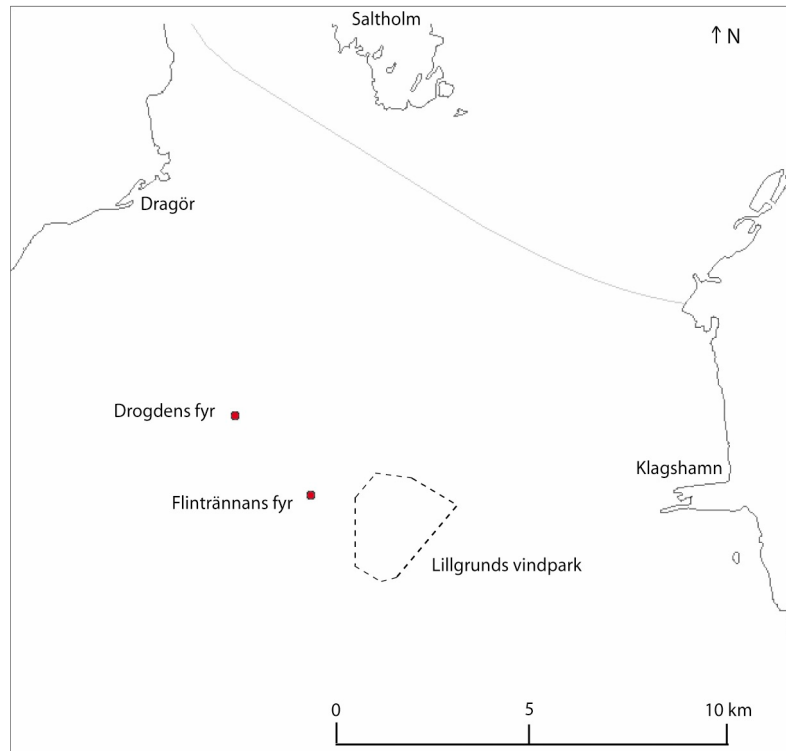
Cecilia Leitet, Fil. lic., marinbiolog, Kalmar. Tekniker.

Dagmar Jonsson, Fil. mag., zoökolog, Sandviken. Tekniker.

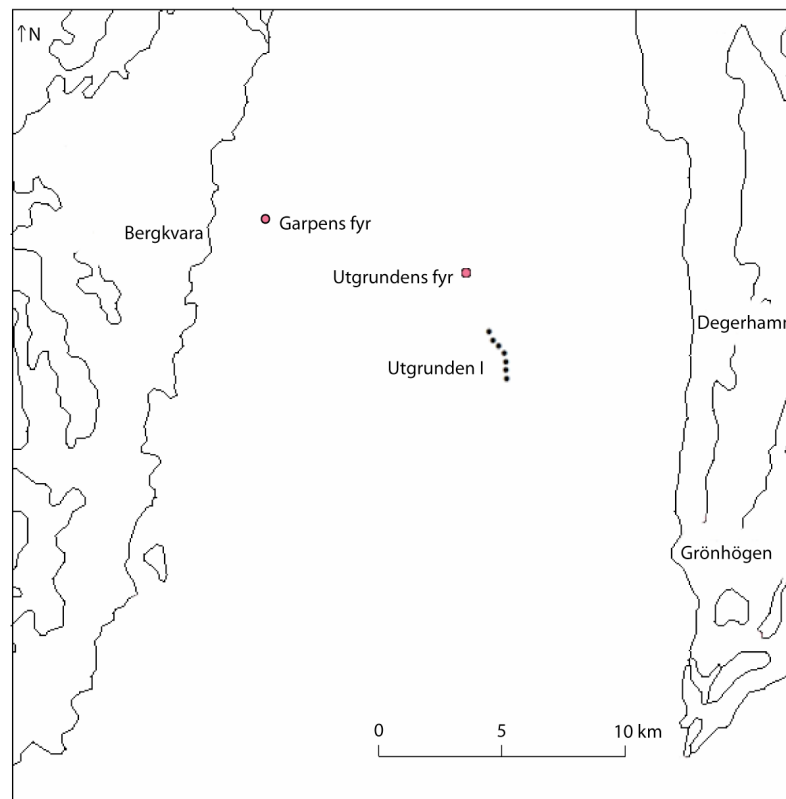
Niklas Vallin, Fil. mag., Avd. f. Zooekologi, Uppsala universitet. Tekniker.

4.2 Metoder och undersökningsområden

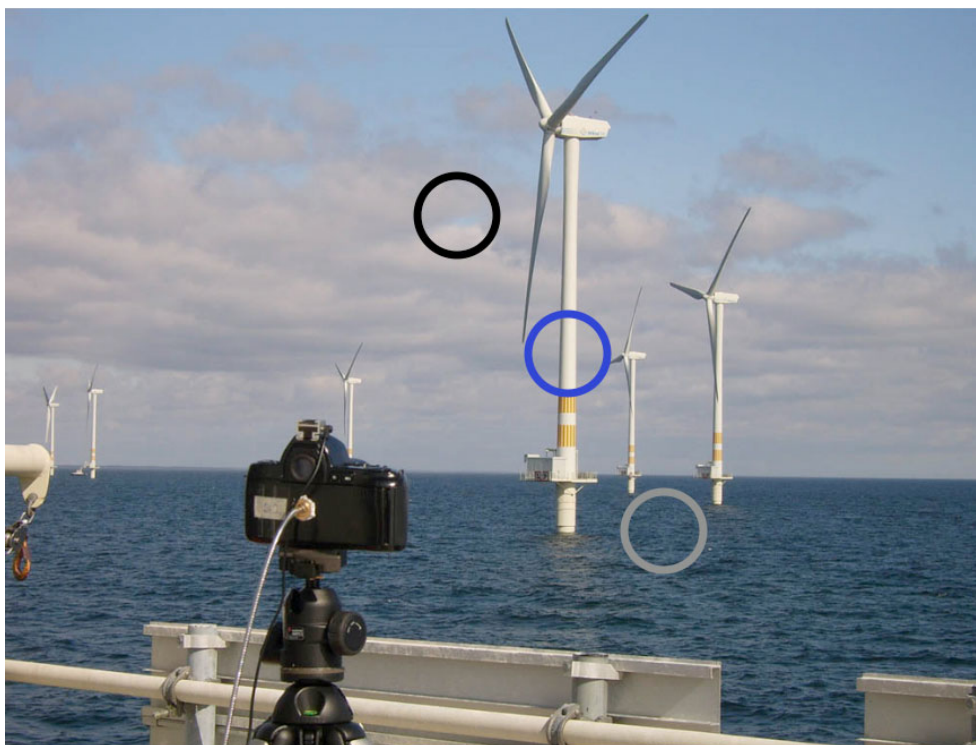
Vi genomförde mätserier under sammanlagt tio fältarbetstillfällen 2006 vid en planerad och en befintlig vindenergiplats: Lillgrund i Öresund (figur 2) och Utgrunden i Kalmarsund (figur 3). Bakgrundsljuset, ljusreflektionerna från bakgrunden, och ljusreflektionerna från befintliga aggregat samt fyror med liknande reflektionsegenskaper mättes med en UV-känslig telespektrofotometer (figur 4). En spektrofotometer (Avantes AvaSpec-2048FT-SPU eller Ocean Optics S2000) var kopplad via en 200 eller 400 μm bred fiberoptisk kabel till ett lins- eller spegelsystem (UV-Nikkor 105 mm 1:4.5, Novoflex 400 1:5.6 och Bresser 1200x150 mm Newtonteleskop: figurerna 5 och 6) vilket möjliggjorde ljusmätningar av relativt små ytor från långa avstånd (ned till c:a $2,5 \text{ m}^2$ på 7 500 m med 1 200 mm brännvidd). Mätningarna täckte det våglängdsband, 320-700 nm, som dagaktiva fåglar är känsliga för (människor kan se ljus i våglängder mellan 400 och 700 nm).



Figur 2. Undersökningsområdet i Öresund (det streckade området markerar endast platsen för Lillgrunds vindkraftspark, som inte var byggd vid tidpunkten för studien)



Figur 3. Undersökningsområdet i Kalmarsund



Figur 4. Telespektrofotometri mot vindkraftverk vid Utgrunden I samt bakgrunden av himmel och vattenyta. Foto: D. Jonsson



Figur 5. Telespektrofotometri med 105 mm UV-Nikkorobjektiv.
Foto: C. Leitet

Figur 6. Telespektrofotometri med 1200 mm teleskop.
Foto: D. Jonsson

Upplevelsen av en färg är starkt beroende av det instrålade ljuset, väder och atmosfäriska förhållanden. För att ta hänsyn till detta samlade vi in spektrofotometriska data vid skilda tidpunkter på dygnet under migrationsperioderna för sjöfågel, april-maj och september-oktober (Jan Pettersson *muntl.*). Mätningar togs från någon meters avstånd upp till 10 km, från byggnaderna, fartyg till sjöss och de närbelägna

Utgrundens och Drogdens fyrar samt från land. Vita fält på fyrarna fick fungera som ett slags reflektionsreferenser, med vilka vi simulerade reflektionen från vindkraftverk. Under fältarbetet fanns inga vindkraftverk uppmonterade vid Lillgrund i Öresund. Dessutom var det svårt att erhålla långa mätserier mot sydsidan av kraftverken på Utgrunden. Det saknas nämligen fasta strukturer i havet söder om Utgrundens kraftverk – andra än kraftverken själva, vilka endast besöktes under de timmar då teknisk personal från Energi E2 (numera Vattenfall) bedrev underhållsarbete vid kraftparken och kunde sörja för transport och säkerhetsarrangemang.

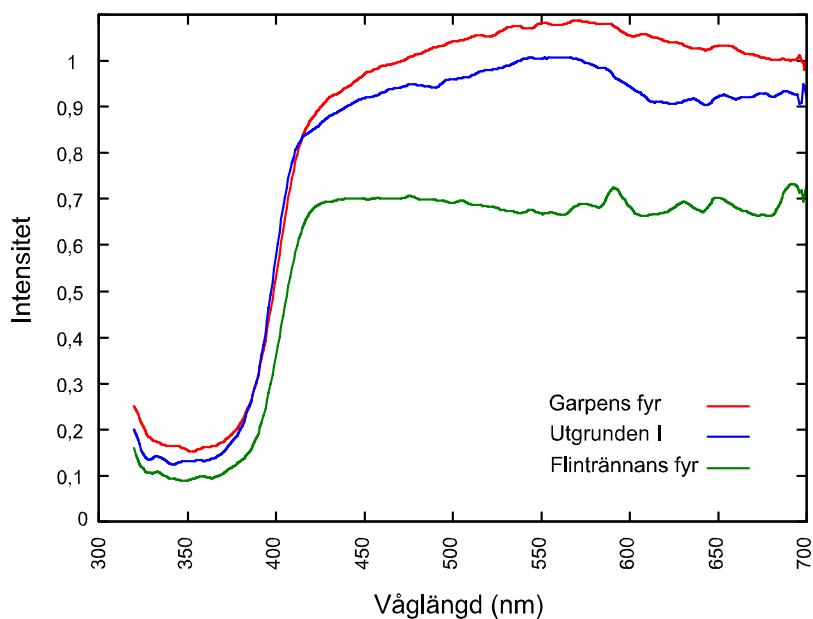
Utifrån vunna data och kända tappkänsligheter i näthinnan hos ett femtiotal fågelarter (Ödeen & Håstad 2003 samt Håstad *m. fl.* 2005) beräknade vi färgkontraster mellan objekt och bakgrund för UVS- och VS-fåglar samt för människa med hjälp av en beprövad synfysiologisk modell (Vorobyev & Osorio 1998). Denna modell mäter färgkontrast i enheten minsta märkbara skillnad eller ”just noticeable difference” (jnd), där värden mindre än 1 inte är urskiljbara med färgseendet, medan värden över 1 uppfattas ha olika färg. Ögat kan även urskilja föremål med hjälp av så kallad akromatisk kontrast, det vill säga skillnad i ljusstyrka mellan föremål eller ytor. Den akromatiska känsligheten hos fåglar antas vara kontrollerad av fåglarnas dubbeltappar, vilka är känsligast för grönt ljus. Vi kan anta att den akromatiska kontrasten bör vara mycket lika för alla aktuella betraktare utom i mycket speciella ljusförhållanden. Det finns idag ingen bra metod att kombinera dessa två kontrastmått till en total urskiljbarhet för både människor och fåglar. Vi har därför valt att bara undersöka färgkontrasten eftersom det är där den största skillnaden mellan människor och de olika fågelgrupperna bör finnas.

5 Resultat

Fältarbetet pågick under perioderna 30 mars till 1 juni och 11 september till 25 oktober 2006. Sammanlagt togs 5 152 telespektrometriska mätningar: 2 640 på våren och 2 512 på hösten. Vi gjorde 429 mätningar från Drogdens fyr mot Flint-rännans Fyr i nära anslutning till den framtida vindkraftparken Lillgrund i Öresund (figur 2) och 4 723 mot kraftparken Utgrunden I och den närbelägna Garpens fyr i Kalmarsund (figur 3). Garpens fyr mättes från land i Bergkvara cirka 3 mil söder om Kalmar medan Utgrundens kraftpark undersöktes från fartyg i sundet (figur 5), kraftverkens plattformar samt från Degerhamn och Grönhögen på Öland (figur 6). Sedan fältarbetet hade avslutats fann vi dock att det stora avståndet mellan Grönhögen och Utgrundens vindkraftpark (c:a 10 km) inte medgav tillräcklig precision i mätningarna. Risker för oavsiktligt ljusläckage från bakgrunden vid mätningar av kraftverkstornen var för stor. Därför har vi uteslutit de 470 spektrometriska data som vi erhöll från Grönhögen från analysen. Avståndsangivelserna för mätningar från fartyg är ungefärliga eftersom fartyget drev något under mätserien. Resultaten presenteras i grafisk form med förklaringar nedan.

5.1 Spektral reflektans från mätytorna

Baserat på mätningar utförda på någon meters avstånd kunde vi konstatera att reflektionen från pylonerna på vindkraftverken vid Utgrunden I (mätningen utfördes på det sydligaste kraftverket) i hög grad liknade reflektionerna från vitmålade fält på Garpens fyr i Kalmarsund och Flintrännans fyr nära den planerade vindkraftparken Lillgrund i Öresund (figur 7). Under normala ljusförhållanden är ytorna inte märkbart olika, varken för fåglar eller människor. Eftersom reflektions-egenskaperna var så lika kunde vi använda oss av data från de två fyrarna för att simulera synlighet av vindkraftverk där sådana ännu inte har uppförts. Detta var särskilt värdefullt för projektets Öresundsdel eftersom det vid tiden för undersökningarna ännu inte fanns kraftverk att samla reflektionsdata ifrån vid Lillgrund.

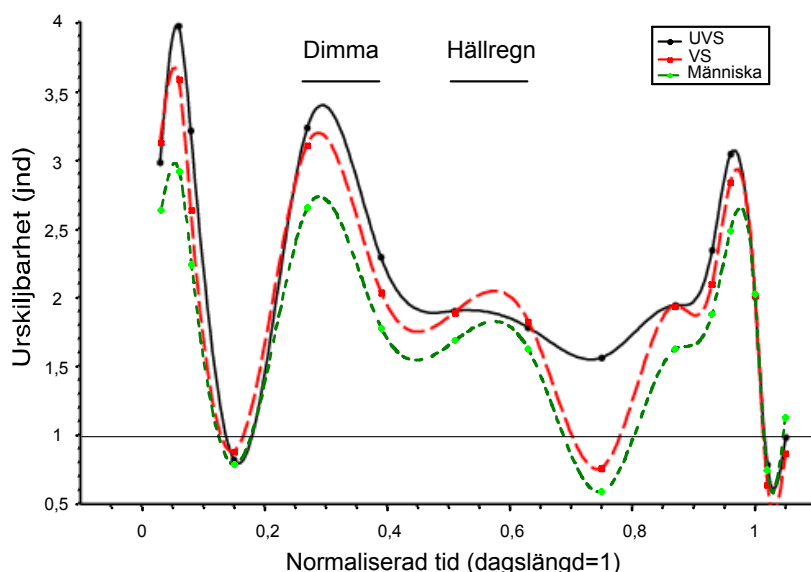


Figur 7. Reflektionsintensitet (jmf. med en vitreferens) över det spektrum som är synligt för dagaktiva fåglar. Intensiteter visas för vita ytor hos vindkraftverk vid Utgrunden I och Garpens fyr i Kalmarsund samt Flintrännans fyr i Öresund. Intensiteter över 1 har orsakats av en något högre spektral reflektans (blänk) än hos den vita referensytan.

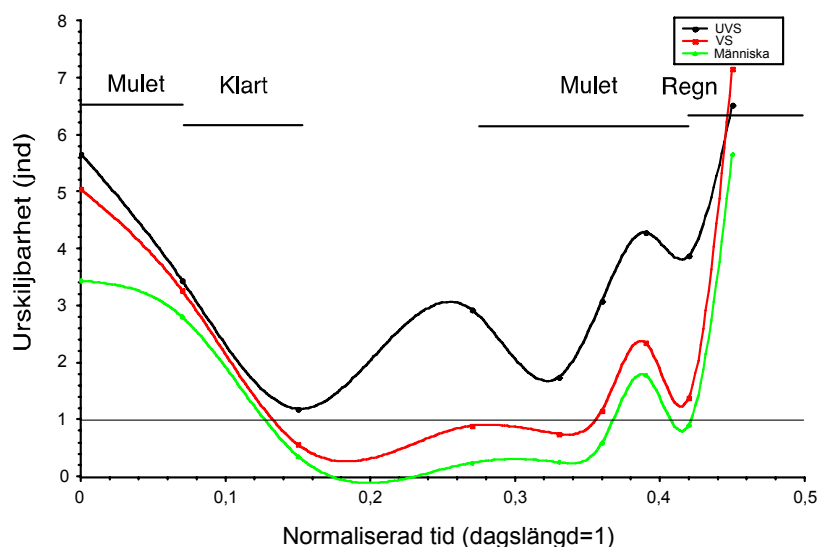
Man kan notera att Utgrundens vindkraftverk, liksom de två fyrarna, reflekterar mycket bra och relativt konstant i det för människor synliga våglängdsbandet, 400-700 nm., medan den ultravioletta reflektionen mellan 320 och 400 nm., där människor är ”blinda” men dagaktiva fåglar kan se, är avsevärt lägre (figur 7). Alla tre reflektionskurvorna beskriver en skarp övergång (s.k. ”cutoff”) från kraftig absorption till stark reflektion vid ungefär samma del av spektrum, cirka 400 nm. Reflektion av detta slag uppfattar människor akromatiskt, som en vit eller gråvit, ofärgad yta. Dagaktiva fåglar, däremot, uppfattar en ljuskontrast mellan den UV-känsliga SWS1-tappen, som knappt retas alls, och de tre mer långvågkänsliga tapparna, som utsätts för mycket starkare retning (jmf. figur 1). Resultatet blir för fåglarna en tydlig färg, enligt samma princip som när vi människor ser gult i ytor som reflekterar väl över hela spektrum förutom där den blåkänsliga tappen är mottaglig. Skillnaderna i upplevd färgkontrast mellan fåglar och människor kommer antagligen att bli ännu starkare i den naturliga miljön, eftersom himlen och vattenytan, i vilken himmelsljuset återkastas, är rika på ultraviolet, kortvågig strålning och i normala fall utgör bakgrund mot havsbaserade vindkraftverk.

5.2 Kraftverkens synlighet över dygnet

Under snart sagt samtliga mättillfällen genererade vindkraftverken, riktiga som simulerade, starkare färgkontraster mot den naturliga bakgrunden för fåglar än för människor (figurerna 8–11). Särskilt starka färgkontraster uppstod i det mer ultraviolettkänsliga, UVS-systemet hos fåglarna. Med sällsynta undantag, som i regn (figur 8 och 9) syns alltså de verkliga och de simulerade vindkraftverken tydligare för UVS-fåglar än för VS-fåglar och för fåglar i gemen än för människor. Skillnaden i synlighet uppstod både i Kalmarsund och i Öresund, på våren såväl som på hösten, vid alla dygnets ljusa timmar och från skilda väderstreck.

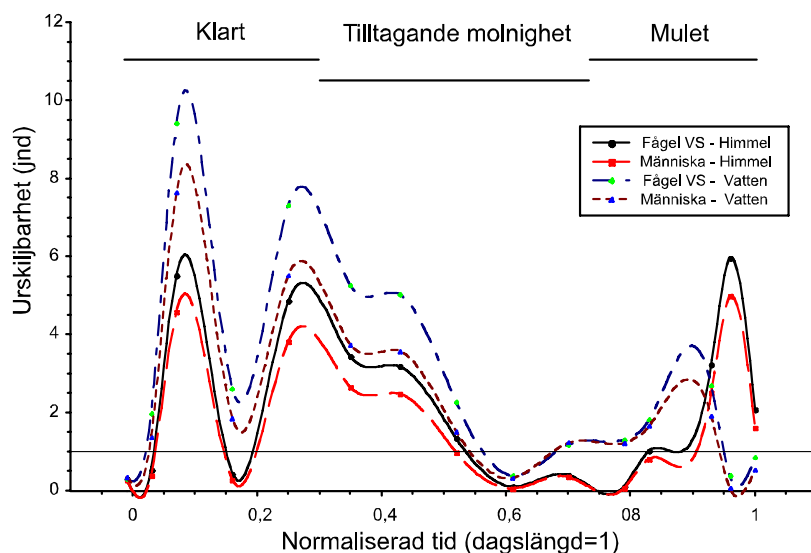


Figur 8. Urskiljbarhet av ett simulerat vindkraftverk vid Lillgrund, Öresund: färgkontrast mot himmelsbakgrund, mätt i antal "just noticeable differences" (jnd) som funktion av tid på dygnet. Grafen visar förhållandena i mulet väder vid Flintrännans fyr den 16 maj 2006 sett 2800 m från nordväst (Drogdens fyr). Tiden har normaliserats så att 0 = soluppgången (04:37) och 1 = solnedgången (21:07). Reflektionen från ett vitmålat fält på Flintrännans fyr har justerats i uträkningarna för att motsvara reflektionen från ett kraftverkspylon vid Utgrunden I i Kalmarsund.

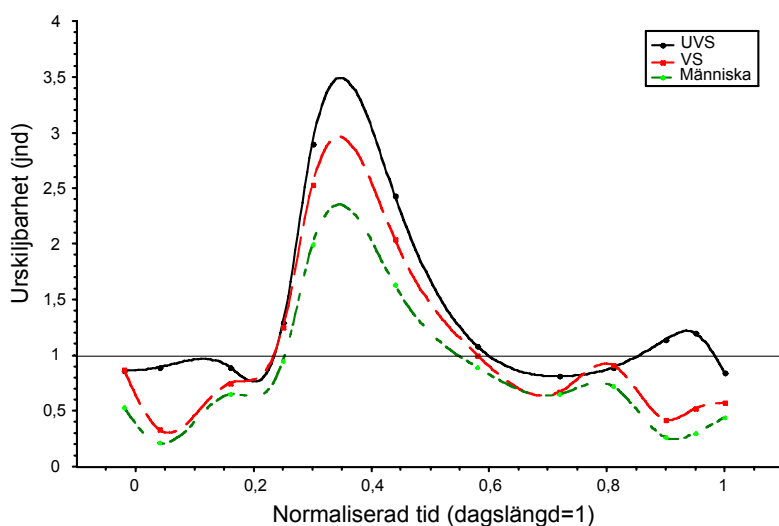


Figur 9. Urskiljbarhet av ett simulerat vindkraftverk i Kalmarsund utanför Bergkvara: färgkontrast mot himmelsbakgrund, mätt i antal "just noticeable differences" (jnd) som funktion av tid på dygnet. Grafen visar förhållandena i varierande väderlek vid Garpens fyr den 23 maj 2006 sett från västsydväst på 2400 m:s håll (Bergkvara). Tiden har normaliserats så att 0 = soluppgången (04:24) och 1 = solnedgången (21:19). Reflektionsdata från ett vitmålat fält på fyren har justerats för att motsvara reflektionen från en kraftverkspylon vid Utgrunden I i Kalmarsund.

Både fåglar (VS-typen) och människor verkar uppleva starkare färgkontraster mellan vindkraftverken och en bakgrund av himmeln än av havsytan. Ett undantag märktes vid solnedgången på hösten vid Utgrunden I (figur 10), då kraftverkens synlighet mot himlen sjönk under gränsen för det skönjbara (under 1 jnd).



Figur 10. Urskiljbarhet av vindkraftverk vid Utgrunden I, Kalmarsund: färgkontrast mot himmelsbakgrund, mätt i antal "just noticeable differences" (jnd) som funktion av tid på dygnet. Grafen visar förhållandena på hösten i varierande väderlek 5 oktober 2006 från 7500 m österifrån (Degerhamn på Öland). Tiden har normaliserats så att 0 = soluppgången (07:06) och 1 = solnedgången (20:03).

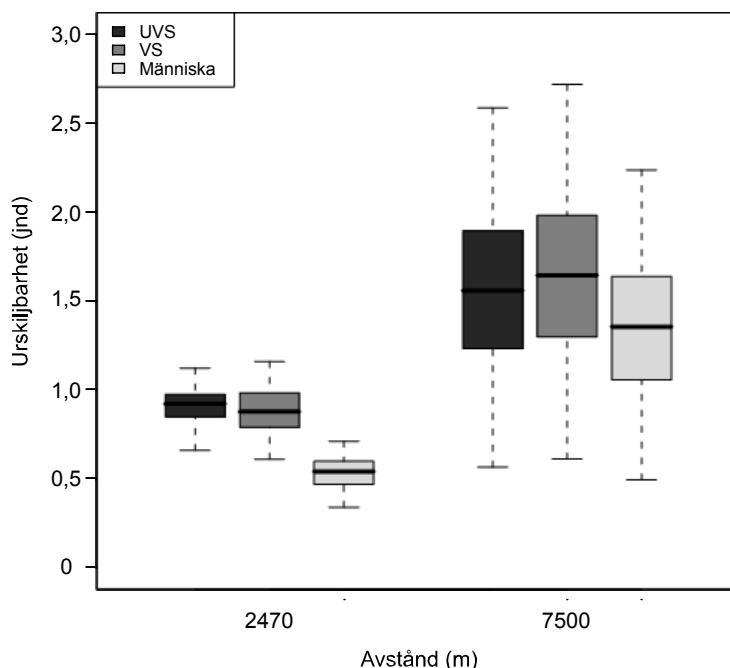


Figur 11. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund: färgkontrast mot himmelsbakgrund, mätt i antal "just noticeable differences" (jnd) som funktion av tid på dygnet (0 = soluppgången 07:20, 1 = solnedgången 18:04). Grafen visar förhållandena på hösten i dimma den 11 (10:30–18:05) och 12 (07:05–10:00) oktober 2006 sett norrifrån på 2470 m:s håll (Utgrundens fyr).

Färgkontrasterna var relativt höga under dagen (figurerna 8–10). Strax efter soluppgången och strax före solnedgången kunde urskiljbarheterna nå kritiskt låga nivåer (under 1 jnd). I figur 1, som visar förhållandena i dimma på hösten från 2 470 m, är kraftverken inte urskiljbara mot himlen under sammanlagt hälften av dygnets ljusa timmar, särskilt för VS-fåglar och människor. Drygt två timmar före solnedgången letade sig färgkontrasten för en UVS-fågel över gränsen till det skönjbara. I sådana ljusförhållanden kan man förmoda att kraftverken blir mycket svåra att se och därmed att kollisionsrisken ökar betydligt, särskilt för den VS-tillhöriga majoritet av de fågelarter som passerar nära havsbaserade vindparker.

5.3 Synlighet vid skilda avstånd

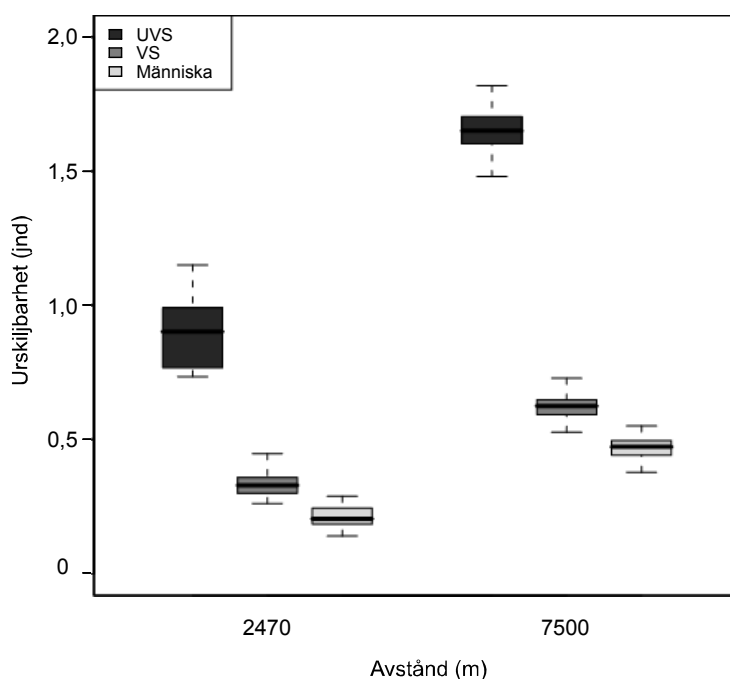
Liksom figurerna över dygnsvariation (8–11) visade, uppnår de verkliga och simulerade vindkraftverken större kontrastverkan mot bakgrunden i ögonen hos en UVS- än en VS-fågel och även hos fåglarna i stort jämfört med människa (figurerna 13–18). De enda undantagen syns i figur 12, som visar färgkontrasterna i dimma på morgonen från 2 470 och 7 500 m:s håll.



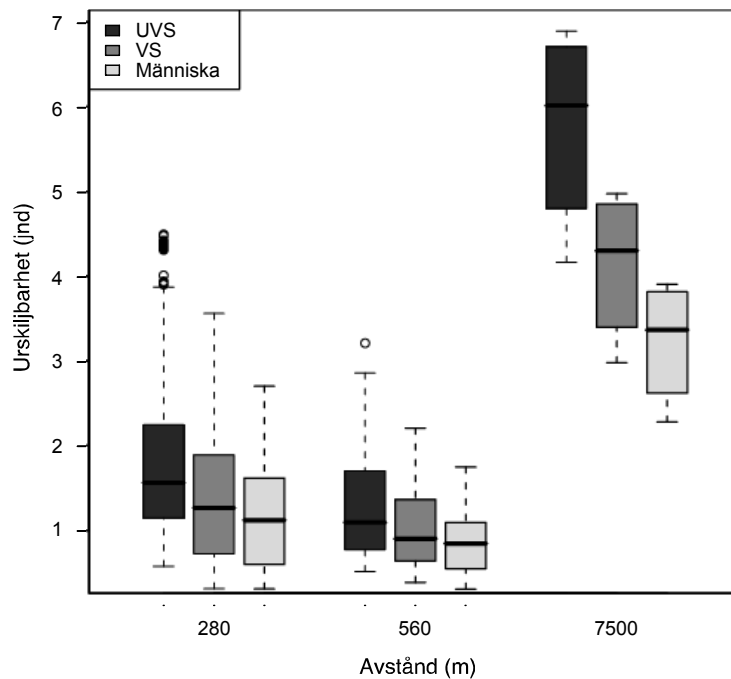
Figur 12. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förhållandena på hösten i dimma c:a 15 min före soluppgången sett norrifrån från 2 470 m (Utgrundens fyr) den 12 oktober och österifrån från 7 500 m (Degerhamn på Öland) den 12 september 2006.

Kraftverken verkar ofta synas bättre för alla tre synsystemen på långa avstånd än korta (figurerna 12–15), men denna skillnad är antagligen en artefakt av skillnader i mätriktning. Det gick inte att utföra spektrofotometri från fartyg på större avstånd än drygt 350 m, eftersom fartyget rörde sig för mycket i vattnet. Vi var därför

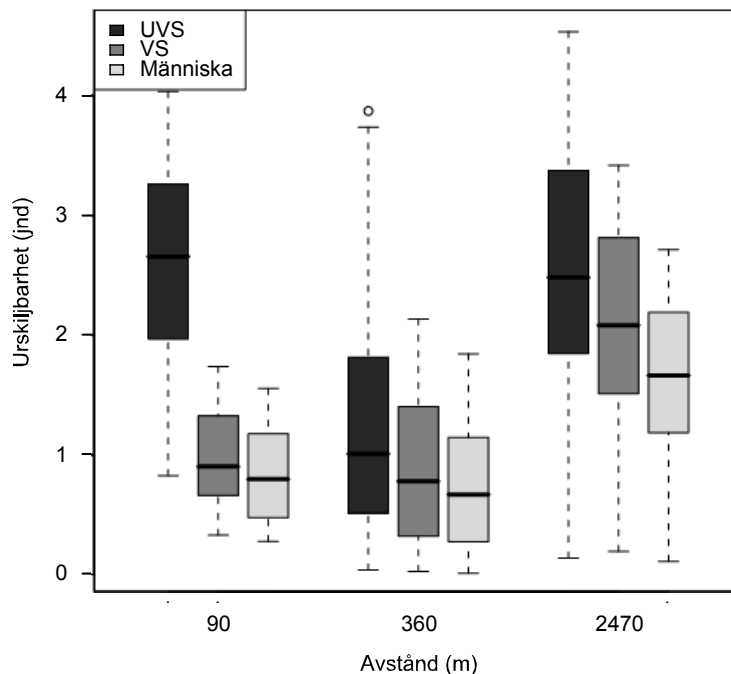
hänvisade till fasta strukturer, fastlandet och Öland för mätningar på längre avstånd. Därför utfördes 7 500 m-mätningarna österifrån istället för i nord-sydlig riktning, som är mer relevant för fågelrörelserna i området. Mätningarna från Öland är dock relevanta för att jämföra urskiljbarheten med påverkan på de estetiska värdena för de boende i närheten. I figurerna 16–18 avtar däremot synligheten med avståndet för alla tre synsystemen. På de längsta avstånden överstiger färgkontrasten det skönjbara endast för UVS-fåglar. I dimma vid gryning och skymning blir vindkraftverken osynliga för VS-fåglarnas färgseende redan på 200 meters håll, eller strax över (figurerna 17 och 18: söderifrån under tidig vår) och för alla färgsynsystemen på 2 470 m (figurerna 12 och 13: norrifrån runt gryningen på hösten).



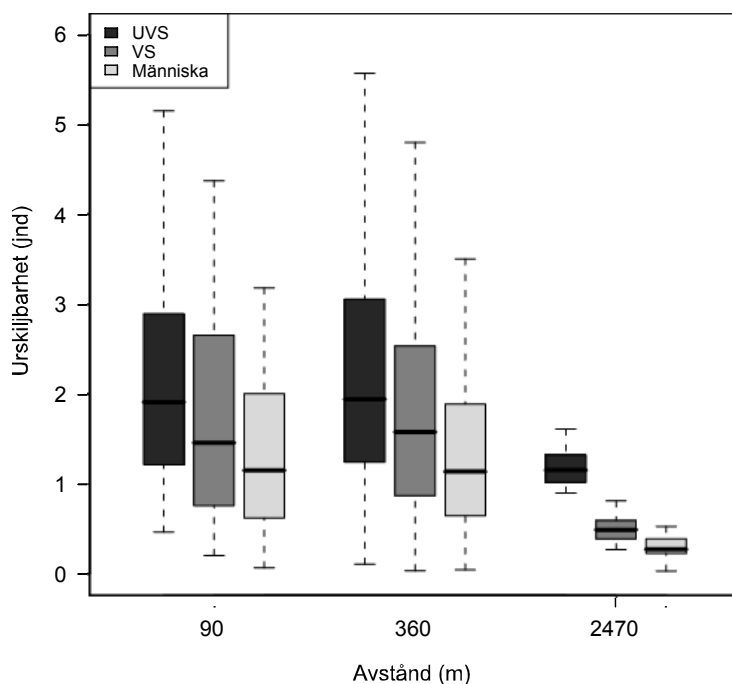
Figur 13. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förhållandena på hösten i dimma c:a 15 min efter soluppgången sett norrifrån från 2 470 m (Utgrundens fyr) den 12 oktober och österifrån från 7 500 m (Degerhamn på Öland) den 12 september 2006.



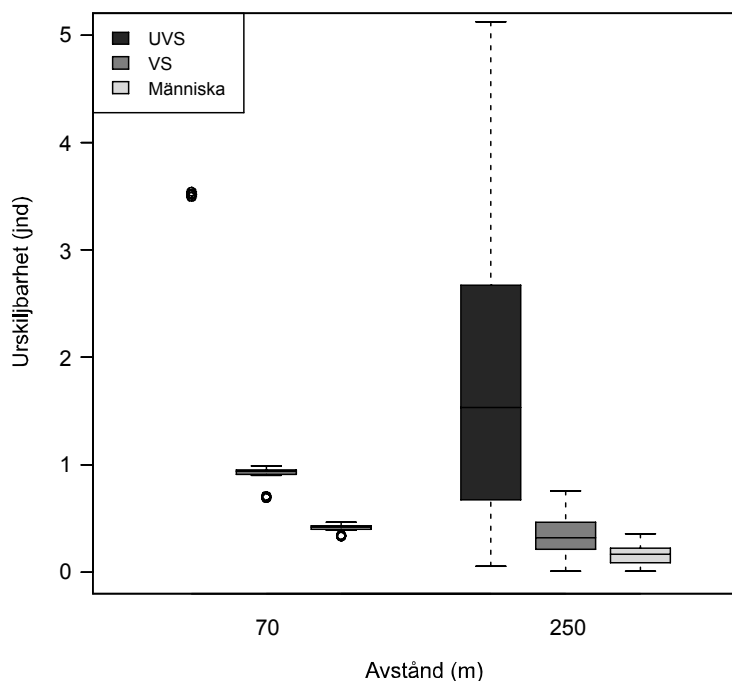
Figur 14. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förmiddagsförhållanden i klart väder på hösten, sett norrifrån på 280 och 560 m:s håll (från det nordligaste kraftverket) den 25 oktober och österifrån på 7 500 m:s håll (Degerhamn på Öland) den 5 oktober 2006.



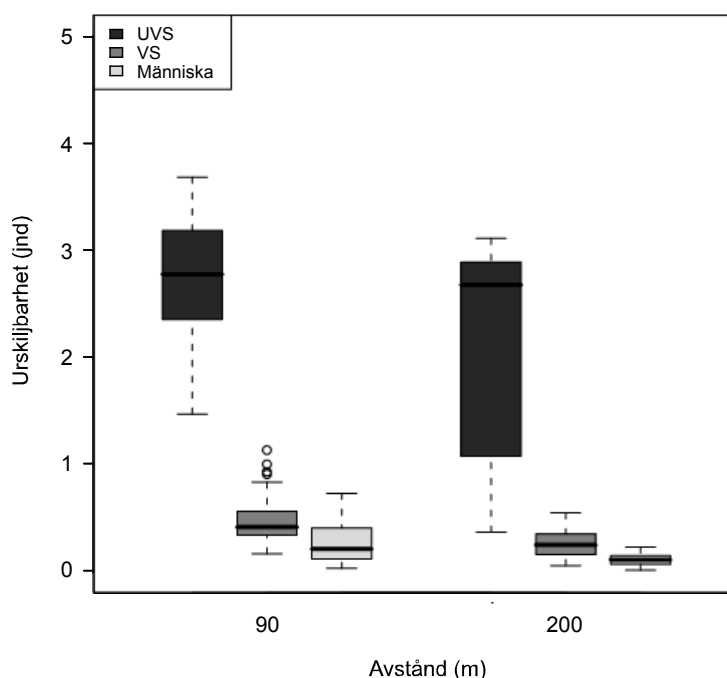
Figur 15. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förhållanden mitt på dagen på hösten i dimma, sett norrifrån på ungefär 90 m och 360 m (från fartyg) den 12 oktober och 2 470 m (Utgrundens fyr) den 13 september och 11 oktober 2006.



Figur 16. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förhållanden i dimma på hösten 1 h – 30 min före solnedgång, sett norrifrån den 13 september (c:a 90 och 360 m från fartyg) och 11 oktober (2 470 m från Utgrundens fyr) 2006.



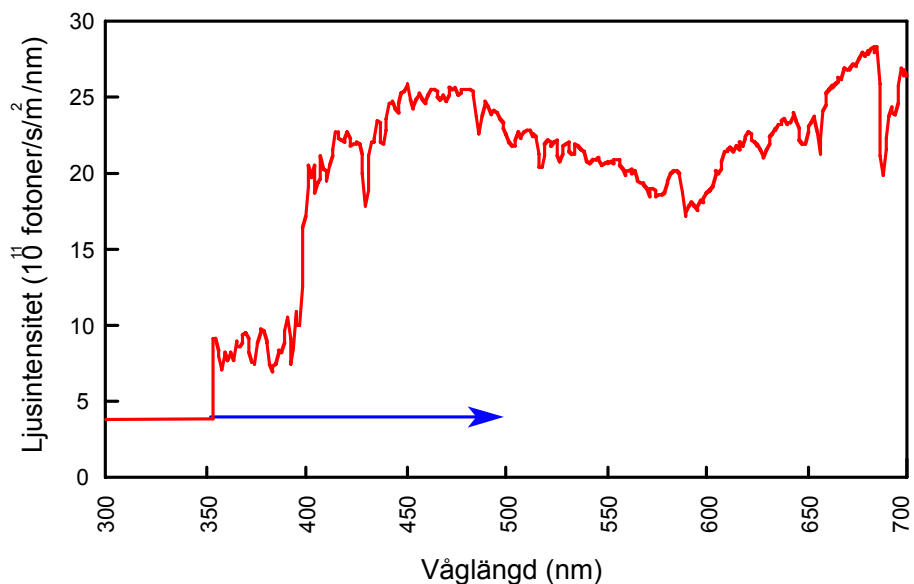
Figur 17. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förhållanden i dimma på våren c:a 1 h före solnedgång, sett söderifrån den 30 mars 2006. Mätningarna gjordes söder om kraftverken från ett fartyg.



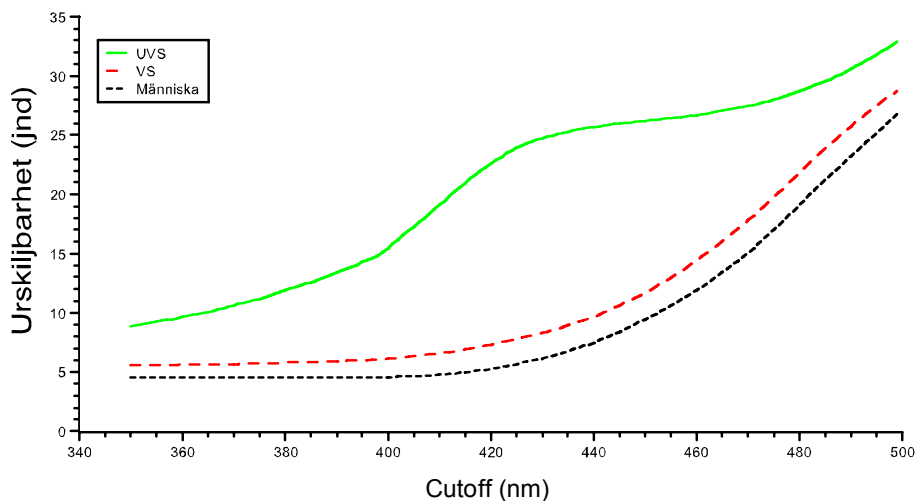
Figur 18. Urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund från skilda avstånd: färgkontrast mot himmelsbakgrund mätt i medelantal och 1,5 interkvartiler av "just noticeable differences" (jnd). Grafen visar förhållanden i dimma på våren c:a 2 h efter soluppgång, sett söderifrån på ett fartyg den 31 mars 2006.

5.4 Modellering av alternativ färgsättning

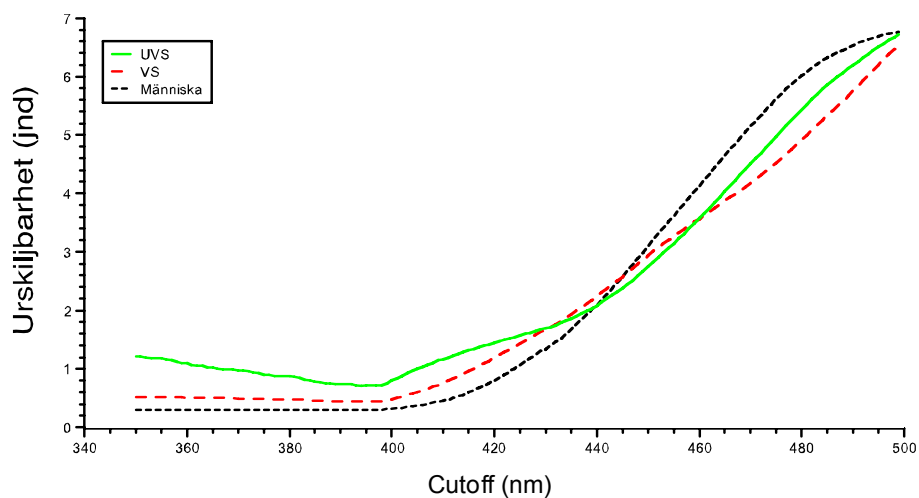
Den vita färgen som används på Utgrunden I är högre reflekterande inom hela det för människor synliga spektret men absorberar nästan allt UV-ljus (figur 7). Eftersom i stort sett alla fåglar i någon grad är känsliga för UV kontrasterar kraftverken väl mot den kortvågrika (UV) bakgrunden medan de skapar en lägre kontrast för det mänskliga ögat. Under väderlekar såsom regn eller dimma blir dock spridningen av kortvågigt ljus (Rayleigh- & Miespridning) i siktlinjen så stor att denna effekt reduceras eller försvinner. För att se om det gick att förbättra färgsättningen beräknade vi kontrasten mellan himmelsbakgrunden och ett kraftverk där vi utökade den absorberande delen från 350 till 500 nm (figur 19). Man skulle kunna förvänta sig att kontrasten mot bakgrunden skulle öka kraftigt i ordningen UVS-fåglar, VS-fåglar och människa. Det visade sig dock att kontrastökningen för människa och VS-fåglar följdes åt, antagligen på grund av den höga totala ljusnivån orsakad av atmosfärisk spridning (figurerna 20 och 21). Under de undersökta förhållandena kunde ingen signifikant förbättring av urskiljbarheten göras för både UVS- och VS-känsliga fåglar utan att påverka synligheten för människor. I det modellerade exemplet från Bergkvara (figur 20) framgår dock att det skulle vara möjligt att ändra färgkontrasten för UVS-känsliga fåglar utan att ändra synligheten för människor.



Figur 19. Exempel på ett modifierat spektrum. Ljusstyrkan under 350 nm har här reducerats till den lägsta nivå som förekom i det modifierade spekrat. Absorptionsgränsen flyttades stegvis fram till 500 nm (blå pil).



Figur 20. Modellerad urskiljbarhet av ett simulerat vindkraftverk i Kalmarsund utanför Bergkvara den 23 maj 2006 sett från västsydväst på 2400 m:s håll: färgkontrast mot himmelsbakgrund, mätt i antal "just noticeable differences" (jnd) som funktion av gränsen mellan reflekterande och absorberande del av kraftverksfärgen. Under dessa förhållanden ökar synligheten kraftigt för UVS-fåglar med en modifierad färgsättning utan att märkbart förändras för människor eller VS-fåglar.



Figur 21. Modellerad urskiljbarhet av vindkraftverk från Utgrunden I, Kalmarsund: färgkontrast mot himmelsbakgrund, mätt i antal "just noticeable differences" (jnd) som funktion av gränsen mellan reflekterande och absorberande del av kraftverksfärgen. Grafen visar förhållandena på hösten i dimma den 12 oktober 2006 sett norrifrån på 2470 m:s håll (Utgrundens fyr).

6 Diskussion

Spektral reflektans från mätytorna

Under normala ljusförhållanden var de studerade ytorna (figur 7) inte märkbart olika, varken för fåglar eller för människor. I vår analys av mätdata valde vi att ändå kompensera för de små men mätbara skillnader som fanns. I och med denna kompensation kunde vi behandla Drogdens fyr och Garpens fyr som om de vore verkliga vindkraftverk.

Förändring av synlighet över dygnet

Synligheten av kraftverken, både för fåglar och människor, följer förväntade parametrar, såsom ljusnivå, väderlek, tid på året och tid på dygnet. Detta kan förklaras med att urskiljbarheten för fåglar av mätytorna, mot den naturliga bakgrunden, korrelerade kraftigt med synligheten för ett mänskligt öga. Som förväntat, med tanke på de mindre överlappen i tappkänslighet jämfört med VS-känsliga fåglar (Hart 2001), var synligheten som störst för UVS-känsliga fåglar. Ytorna var också mer synliga för VS-känsliga fåglar än för människor. Den absoluta merparten av de arter som bedöms vara särskilt känsliga för etablering av vindkraftverk (se Widemo 2007) tillhör just VS-gruppen (Ödeen & Håstad 2003, Håstad *m. fl.* 2005).

Man kan från våra grafer notera några enstaka tillfällen då provytornas synlighet sjunker under den urskiljbara (< 1 jnd) för människa och för majoriteten av de sträckande fågelarterna i undersökningsområdena (VS-fåglar), medan ytorna förblir synliga för småfåglar och andra UVS-fåglar. Effekten syns till exempel i mätserien från Öresund (figur 8) mot slutet av dagen och vid Garpens fyr i Kalmar-sund (figur 9) under en mulen förmiddag. Generellt sett följs dock synsystemen väl åt med avseende på variationerna i färgkontrast.

Effekten av avstånd

Avståndsgraferna kan vara något svårtolkade då mätriktningen inte kunde bibehållas mellan olika avstånd. Därför förändrades bakgrunden och mätytans belysningsvinkel mellan flera mätserier tagna i liknande väder och vid samma tid på dagen. Tydligast blir detta i mätningar mot Utgrunden I när andra kortare avstånd jämförs med 7 500 m, en distans vars effekt bara kunde mätas från öster i Degerhamn. Kraftverkens synlighet förefaller dock vara märkbart förbättrad från längre avstånd i figurerna 12–14, men i dessa fall beror kontrastökningen sannolikt inte på avståndet utan på mätriktningen.

I de situationer där mätningarna har utförts i samma riktning och vid samma tid på dagen uppträder mönster av avtagande urskiljbarhet med ökande avstånd. Vi kan också se den kraftigaste effekten av skillnaden mellan synsystemen där mätytan betraktas i snett medljus mot en kortvågsrik bakgrund (figurerna 17 och 18). Eftersom mätytorna effektivt absorberar ultraviolett ljus och bakgrunden är rik på detsamma ses det reflekterade ljuset från kraftverket mot sin komplementfärg i det

ultraviolett känsliga synsystemet. Effekten skulle för en mänsklig betraktare kunna liknas vid åsynen av ett klargult vindkraftverk mot en djupblå himmel.

Gränsen för när kraftverken börjar urskiljas mot bakgrunden i dimma verkar ligga kring 2 500 m (figurerna 11–13 och 16). Särskilt gäller detta för VS-känsliga fåglar. Detta ligger helt i linje med observationen att sträckande fåglar vid Utgrunden normalt upptäcker och viker av från vindkraftparken redan på ett par tusen meters håll (Pettersson 2005).

Förbättring av kraftverkens färgsättning?

Även om resultaten från våra modeller indikerar att det går att öka synligheten för UVS-fåglar förblir synligheten för VS-fåglar starkt korrelerad med den för människor. Vi tror att orsaken till detta är att spridningen av det kortvågiga ljuset i atmosfären gör att färgerna bleks ut. Det skulle nog vara möjligt att välja färger som under speciella förhållanden ger de önskade kontrasterna för de olika synsystemen men atmosfäreffekterna försvårar avsevärt en generell lösning på detta problem. Vi anser dock att den nuvarande färgsättningen är en bra kompromiss med avseende på god synlighet för fåglarna utan att verka alltför störande på människor. Man bör dessutom beakta att det inte alltid är önskvärt att göra vindkraftverken väl synliga för fåglar då detta skulle kunna förstärka barriäreffekter mellan närbelägna kraftverksparkar där fåglar annars skulle kunna passera. Om kraftverkens synlighet gör att fågelflockar väjer för tidigt kan detta minska nyttan med eventuella korridorer som lämnats mellan parkerna.

Vi vet idag ganska lite om varför fåglar kolliderar med vindkraftverk. Orsakerna verkar variera beroende på till exempel art, väder och vindkraftverkens placering. Våra resultat antyder att färgkontrasten på långa avstånd har betydelse för när migrerande fåglar väjer för kraftverk. Detta överensstämmer med de fåtal observationer som gjorts av kollisioner i Kalmarsund (Jan Pettersson *munl.*) där majoriteten av fåglarna i flocken väjer för kraftverket men där någon enstaka fågel i ytterkanten kommer för nära och dödas. I andra situationer, som på den norska ön Smöla där ett större antal havsörnar dödats genom kollisioner, kan det vara synligheten på korta avstånd som är den mest avgörande, antagligen begränsat av ”motion smear” (se under Bakgrund ovan). De mekanismer som påverkar ”motion smear” är relativt okända. Den hypotes som dominerar idag är att fåglarnas system för rörelseuppfattning är skilt från färgseendet och använder signaler från de så kallade dubbeltapparna istället för från de färgkänsliga enkeltapparna. Då dubbeltapparnas funktion hos fåglarna ännu är okänd är det utan nya synfysiologiska data svårt att komma med några rekommendationer om hur man bör förbättra synligheten även på korta avstånd. Att öka den akromatiska kontrasten genom att måla enstaka rotorblad svarta antyds kunna ha viss effekt (Hodos 2003) och kan vara en lösning där termik- och glidflygande fåglar ofta rör sig i kraftverkens omedelbara närhet. Det krävs dock ökade kunskaper innan det går att säga att färgsättningen har betydelse för att till exempel minska risken för att örnar ska kollidera med vindkraftverk. Utifrån vad vi vet idag kan vi inte rekommendera kontrastmålade rotoror, med tanke på att dessa samtidigt på ett negativt sätt skulle kunna påverka vindparkernas synlighet för människor.

7 Slutsats

Färgsättningen på vindkraftverken vid Utgrunden I verkar vara väl vald för att kraftverken ska vara lättupptäckta för fåglar, och därmed kunna undvikas, samtidigt som de inte är alltför uppenbara för människor. En liknande färgsättning skulle sannolikt ha samma positiva effekt även för andra havsbaserade kraftparker, till exempel den vindpark som under undersökningens gång var under uppbyggnad vid Lillgrund i Öresund. Möjligen skulle färgsättningen kunna göras något mer synlig för fler fågelarter – de violettekänsliga arter (VS) som majoriteten av de fågelarter som passerar kraftverken tillhör. Men i de flesta väderlekar skulle vindkraftverkens synlighet mot bakgrunden inte kunna förbättras särskilt mycket för fåglar utan att samtidigt förstärkas för människor, vilket kan komma att upplevas som negativt för boende och friluftsliv i närheten av havsbaserade vindparker.

Tack

Författarna vill tacka för den hjälpsamhet Börje Eriksson, Erik Grönroos, Nils Persson, Jan Pettersson, Tommy Ternström, Mats Troberg, Kerstin Ödeen och Drogdens fyrvaktarpersonal har visat, samt rikta ett särskilt tack till Anders Olsson och den övriga personalen på Energi E2 i Bergkvara (nu Vattenfall) för kostnadsfri transport till Utgrunden I.

Bristol och Uppsala den 7 september 2007,
Anders Ödeen och Olle Håstad

8 Referenser

- Barrios, L. & Rodríguez, A. (2004) Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. *Journal of Applied Ecology* **41**, 72–81.
- Bowmaker, J.K., Heath, L.A., Wilkie, S.E. & Hunt, D.M. (1997) Visual pigments and oil droplets from six classes of photoreceptor in the retinas of birds. *Vision Research* **37**, 2183–2194.
- Desholm, M. & Kahlert, J. (2005) Avian collision risk at an offshore wind farm. *Biology Letters* **1**, 296–298.
- Drewitt, A.L. & Langston, R.W. (2006) Assessing the impact of wind farms on birds. *Ibis* **148**, 29–42.
- Erickson, W.P., Johnson, G. D., Strickland, M.D., Young, D.P. Jr., Sernka, K.J. & Good, R.E. (2001) *Avian collisions with wind turbines: a summary of existing studies and comparisons to other sources of avian collision mortality in the United States*. National Wind Coordinating Committee Resource Document.
- Hart, N. S. (2001) The visual ecology of avian photoreceptors. *Progress in Retinal and Eye Research* **20**, 675–703.
- Hodos, W. (2003) *Minimization of motion smear: reducing avian collisions with wind turbines*. Subcontractor report NREL/SR-500-33249. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- Hüppop, O. Dierschke, K.-M. E., Fredrich, E. & Hill, R. (2006) Bird migration studies and potential collisions risk with offshore wind turbines. *Ibis* **148**, 90–109.
- Håstad, O., Ernstdotter, E. & Ödeen, A. (2005) UV vision and foraging in dip and plunge diving birds. *Biology Letters* **1**, 306–309.
- Medsker, L. (1982) *Side effects of renewable energy resources*. National Audubon Society, Environmental Policy Research Department Report No. 15.
- Ödeen, A. & Håstad, O. (2003) Complex distribution of avian color vision systems revealed by sequencing the SWS1 opsin from total DNA. *Molecular Biology and Evolution* **20**, 855–861.
- Pettersson, J. (2005) *Havsbaseerade vindkraftverks inverkan på fågellivet i södra Kalmarsund. En slutrapport baserad på studier 1999-2003*. Statens Energi-myndighet.
- Pettersson, J. (2006) *Flyttande små- och sjöfåglar– en förstudie med lokalradar i Kalmarsund*. Naturvårdsverket Rapport 5568.
- Vorobyev, M. & Osorio, D. (1998) Receptor noise as a determinant of colour thresholds. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B* **265**, 351–358.
- Widemo, F. (2007) *Vindkraftens inverkan på fågelpopulationer – kunskap, kunskapsbehov och förslag till åtgärder*. Sveriges ornitologiska förening.

Havsbaserad vindenergi ur ett fågelperspektiv

RAPPORT 5764

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-5764-0
ISSN 0282-7298

- kraftverkens synlighet för fågelögat

I denna rapport redogörs för synligheten hos havsbaserade vindkraftverk, med utgångspunkt i fåglarnas synfysiologi. Studien baseras på mer än 5000 telespektrofotometriska mätningar som utförts dels vid vindkraftverken i Utgrunden I i Kalmarsund, och dels vid den planerade vindkraftparken Lillgrund i Öresund. Rapporten diskuterar bland annat förändringen av synlighet under dygnet, effekten av avstånd, samt huruvida det går att förbättra verkens färgsättning i syfte att undvika fågelkollisioner.

Arbetet bidrar till att förklara hur sträckande flyttfåglar påverkas av havsbaserade vindkraftanläggningar och kunskapen kan bland annat användas vid planering och tillståndsprövning av vindkraftetableringar.

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 kunskapsmanställningar, synteser kring effekter och upplevelser av vindkraft. Vindval styrs av en programkommitté med representanter från Boverket, Energimyndigheten, Fiskeriverket, länsstyrelserna, Naturvårdsverket, Riksantikvarieämbetet och vindkraftbranschen.

