



Pilotstudie Kriegers flak

**Helma Lindow, Sture Lindahl, Ekaterini Kriezi, Signild Nerheim,
Ola Nordblom, Kjell Wickström**

Pärmbild.

Bilden föreställer vindkraftanläggningar på Utgrunden ©Peter Menzel



Rapport

Författare:

H. Lindow, S. Lindahl, E. Kriezi,
S. Nerheim, O. Nordblom,
K. Wickström

Uppdragsgivare:

Vattenfall AB

Rapportnr:

2007-22

Granskare:

A. Karlsson

Granskningsdatum:

Dnr:

2006/1059/204

Version:

1.0

Pilotstudie Kriegers flak

Uppdragstagare SMHI 601 76 Norrköping	Projektansvarig Helma Lindow 011-495 80 12, 011-495 82 50 helma.lindow@smhi.se
Uppdragsgivare Vattenfall AB Jämtlandsgatan 99 162 87, Stockholm	Kontaktperson Tomas Stalin 08-739 62 47, 08-739 72 45 thomas.stalin@vattenfall.com
Distribution Vattenfall AB, Thomas Stalin	
Klassificering () Allmän (x) Affärssekretess	
Nyckelord Vindkraft, Blandning, Kriegers flak	
Övrigt	

Denna sida är avsiktligt blank

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
2	ARKONAHAVETS HYDROGRAFI	1
3	KONSTGJORDA STRUKTURERS MÖJLIGA PÅVERKAN	4
3.1	Uppblandning av näringsämnen genom språngskiktet.....	5
3.2	Bottenström	5
3.3	Salthaltsskiktning.....	6
4	AKTUELL FORSKNING	6
4.1	I havet	6
4.1.1	I Arkonahavet och på Kriegers flak.....	6
4.1.2	Påverkan av konstgjorda strukturer.....	8
4.1.3	Instrument som mäter blandning	9
4.2	I teorin.....	10
4.2.1	Blandningsprocesser i laboratoriet	10
4.2.2	Blandningsprocesser, numeriska modeller	11
4.2.3	Blandningsprocesser, analytiska funderingar	13
5	FRAMTIDA UTVECKLING, FÖRSLAG	16
6	SLUTSATSER	17
7	REFERENSER.....	18

Denna sida är avsiktligt blank

Sammanfattning

Kommer i slutversionen.

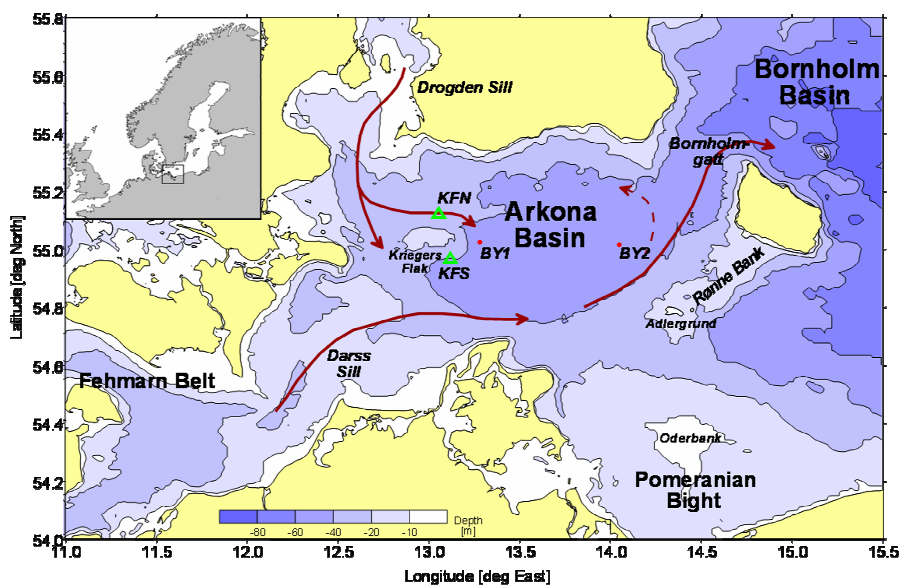
1 Bakgrund

Vattenfall AB är inne i en projekteringsfas för att utreda frågan om en eventuell etablering av vindkraftpark på Kriegers Flak, ett grundområde vid den nordvästra gränsen av Arkonahavet. När det gäller de fysiska effekterna har den dominerande frågeställningen varit hurvida en sådan park kan tänkas öka blandningen mellan sötare ytvatten och saltare, från Kattegatt inströmmande bottenvatten. SMHI har fått i uppdrag att belysa frågan om etableringen kommer att påverka blandningen och skiktningen i närområdet samt om tillförseln av salt, syrerikt vatten till de centrala delarna av Östersjön kan komma att påverkas.

SMHI har tidigare inlämnat en ansökan till STEM för att belysa denna frågeställning. Vattenfall har nu tagit över ansvaret för detta pilotprojekt och för att optimera samverkan mellan detta och övriga frågeställningar som kan uppkomma.

2 Arkonahavets hydrografi

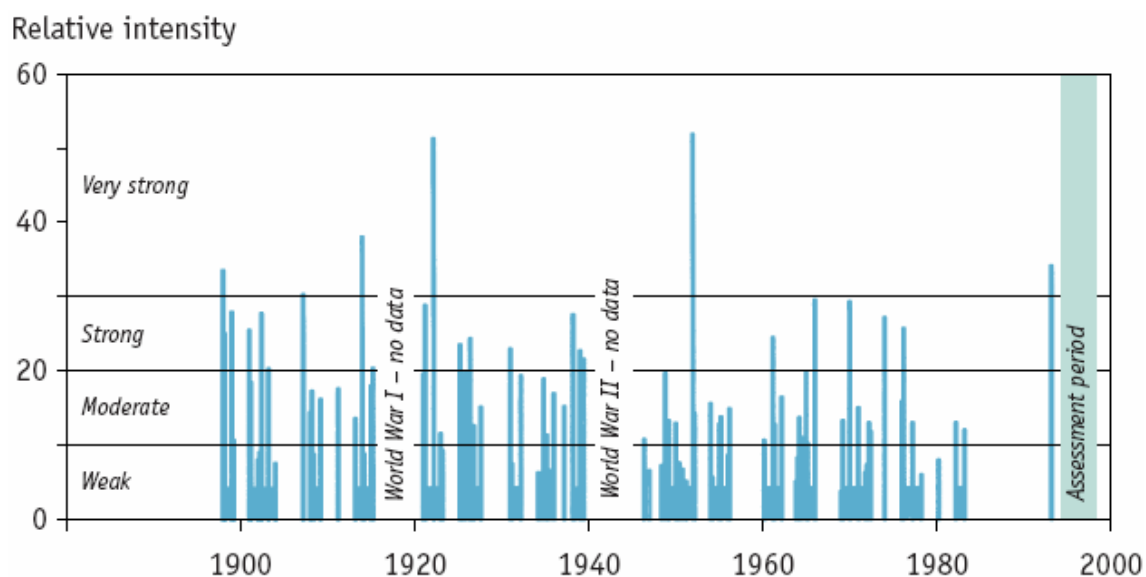
Arkonahavet (Figur 1) har en storlek på ungefär 40 gånger 60 nautiska mil (en nautisk mil motsvarar 1,852 km). Det maximala djupet är 45 m. Förbindelsen mellan Kattegatt och Arkonahavet består av Stora Bält (Darss, tröskeldjup 8m) och Öresund (Drogden, tröskeldjup 18 m). Arkonahavets förbindelse med Östersjön, närmare bestämt Bornholmshavet, utgörs främst av Bornholms gatt (utan utpräglad tröskel). I öster bildar Rønne bank ett hinder för det salta djupvattnet. Kriegers flak är ett grundområde i västra delen av Arkonahavet med ett djup på ungefär 20 m.



Figur 1. Karta över området. BY1 och BY2 är svenska monitoringstationer, KFN och KFS är stationer som har upprättats i samband med ett EU projekt under tysk ledning (se längre ned). Pilarna visar saltvattnets möjliga vägar genom Arkonahavet. (efter V. Mohrholz, Baltic Sea Research Institute Warnemünde)

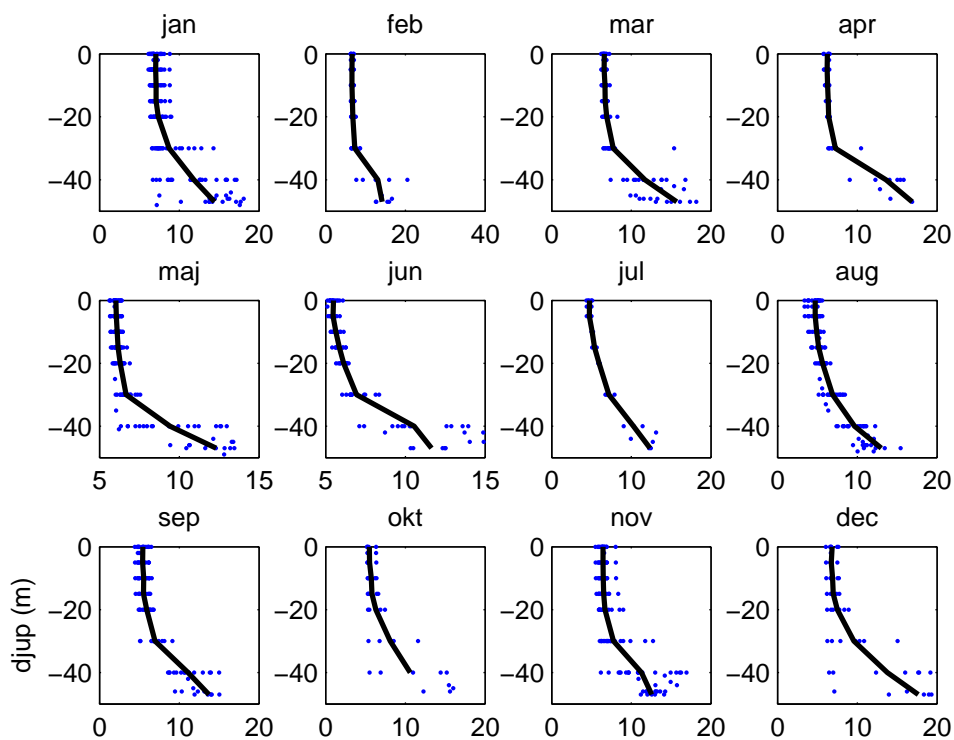
Vattnet i Arkonahavet består av två skikt. Ytskiktet består av brackvatten med en salthalt på omkring 8 psu¹. Bottenskiktet består av vatten med en salthalt på omkring 15 psu. Språngskiktet (gränsen mellan dessa två vattenmassor) ligger i medel på omkring 35 m djup om vintern. Detta djup kan dock variera mycket beroende på saltvatteninflöde från Kattegatt och vindinducerad blandning. Både att språngskiktet ligger på 20 m djup och att det inte finns något språngskikt alls har observerats under vintermånaderna. Storleken på saltvattenpoolen i centrala Arkonahavet beror på antalet saltvatteninflöden över både Darss- och Drogdentröskeln samt utflödet genom Bornholmsgattet. Saltvatteninflöden genom Öresund är både mer frekventa, pågår längre och har större salthalt än inflöden genom Store Bält. Figur 2 visar när stora inflöden av saltvatten har skett. Omsättning av vattenmassorna i Arkonahavet har en övre gräns på cirka tre månader (Lass et al. 2005).

Djupvattnet i Östersjön utgörs av saltvatten som på sin väg in genom de olika bassängerna blir utspädd genom blandning med ytvatten. Arkonahavet är ett av tre områden där blandningen är starkast. Saltvattnets volym ökar i medel med 53 % på vägen genom bassängen (Köuts och Omstedt 1993). Blandning av saltvattnet med det omgivande vattnet sker på olika sätt. Både inflöden av vatten med olika salthalt och starkt varierande vindar orsakar vertikal blandning och leder till ett tjockare gränsskikt mellan bottenvatten och ytvatten. Hur stor salthaltsvariationen på större djup kan vara visar de mätningar som redovisas i Figur 3 och Figur 4.

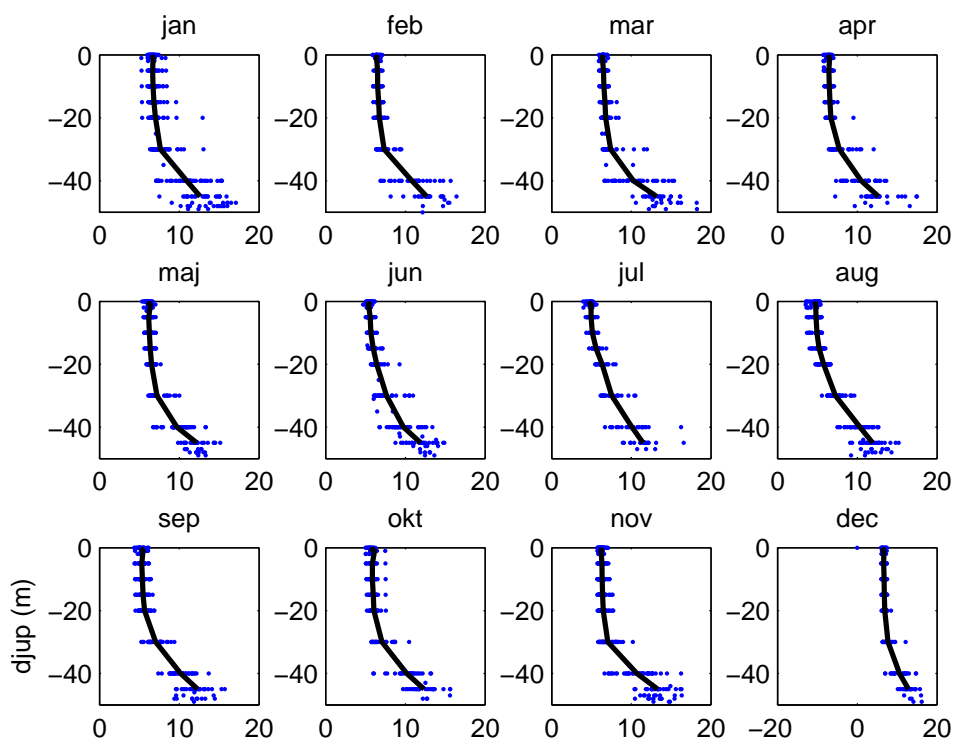


Figur 2. Stora inflöden av salt- och syrerikt vatten i Östersjön under förra århundret. Den relativa intensiteten av inflödet bestäms ur inflödets varaktighet och salthalt. Salthalten av det inflödande vattnet måste vara lika med eller större än 17 psu för att inflödet skall noteras. (ur Helcom rapport 82b, 2002).

¹ PSU = practical salinity unit

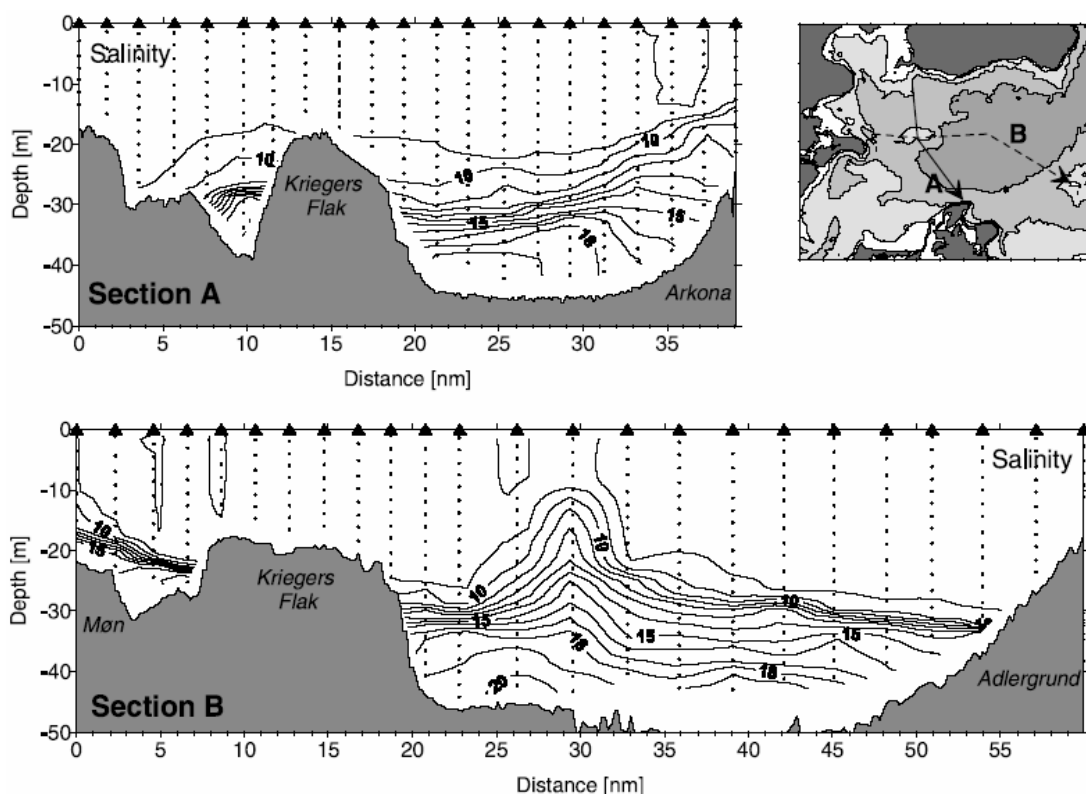


Figur 3. Månadsvisa medeltäthetsprofiler ($\sigma-\rho-1000$) från station BY1 öster om Kriegers flak (se Figur 1). Blå punkter är mätningar, svarta linjer visar månadsmedel.



Figur 4. Samma som Figur 3 fast för station BY2 i centrala delen av Arkonabassängen.

Den klassiska bilden av inströmmande saltvatten i en bottenström som förflyttar sig cyklonisk längs kanterna i Arkonabassängen har de sista åren förändrats efter att både modeller och observationer pekar på att den största delen av inflöden tar sin väg genom kanalen vid norra flanken av Kriegers flak (Reissmann opublicerat). Vattnet som strömmar in genom Stora Bält strömmar längs bassängens södra rand. Även i en situation med inströmmande vatten från Öresund tar delar av vattenmassan vägen söderut men den större delen av vattnet strömmar längs norra sidan av Kriegers flak. Medelströmhastigheterna vid en inströmssituation är i vanliga fall bara några cm per sekund men i enstaka fall har hastigheter på några decimeter per sekund uppmätts (Piechura 2003). När vattnet strömmar omkring topografiska hinder uppstår det både virvlar och interna vågor som kan leda till blandning. I Figur 5 snitt B syns tecken på en virvel där isolinjerna bildar en upphöjning. Ett exempel på interna vågor ser man i Figur 8 längre ner.



Figur 5. Salthalt (i psu) längs två snitt genom Arkonahavet. Mätningarna genomfördes november 1999 (Lass och Mohrholz 2003).

3 Konstgjorda strukturers möjliga påverkan

Traditionellt handlar forskning som belyser frågor kring vågor, strömmar och konstgjorda hinder, som till exempel broplattor eller oljeplattformar, oftast inte om strukturens påverkan på omgivningen utan om omgivningens påverkan på strukturen. Frågeställningar har handlat om strukturens dimensionering eller livslängd. Inom meteorologin har det sedan länge funnits forskning som behandlar utveckling av virvelgator i lä av enstaka öar eller ögrupper i till exempel Stilla havet (se http://daac.gsfc.nasa.gov/oceanolor/scifocus/oceanColor/vonKarman_vortices.shtml). Det finns också modeller som beskriver hur luftströmmar förändras i tätbebyggda höghusområden och hur man med hjälp av förändringar i husens läge relativt till

varandra kan påverka vindhastigheten i området (t.ex. Blocken och Carmeliet 2004, Eliasson m.fl. 2006). Denna forskning kan ge ledtrådar när man betraktar påverkan av en vindkraftpark på strömningen.

Alla dessa frågeställningar liknar i viss mån de som man kan tänka sig uppstår vid bygget av en vindkraftpark.

Mätningar i havet och laboratorieexperiment har visat att en struktur som står vertikalt i strömmande vatten ger virvelbildning bakom ett hinder (Cramer 2005; Lass m.fl. opublicerat). När kvoten mellan objektets diameter och vattendjupet är liten kommer en så kallad koherent virvelgata att uppstå bakom objektet. Virvlarna är primärt horisontella och ger inte upphov till storskaliga tredimensionella virvlar. Den småskaliga turbulensen är isotrop (riktningsoberoende). Virvlarna kan antagligen transportera turbulensen bort från strukturen, frågan är huruvida det sker mer eller mindre effektivt än vad grundströmmen själv gör.

Följande naturliga processer är av betydelse i Kriegers flak-området och skulle möjligen kunna påverkas av en vindkraftpark:

- Strömhastighet och riktning av främst bottenströmmen;
- Vågor och virvlar både i språngskiktet och vid ytan;
- Blandningsprocesser i horisontal eller vertikal led.

Alla dessa processer påverkar salthaltens och näringsämnenas fördelning i vattenskolumnen lokalt eller på en större skala.

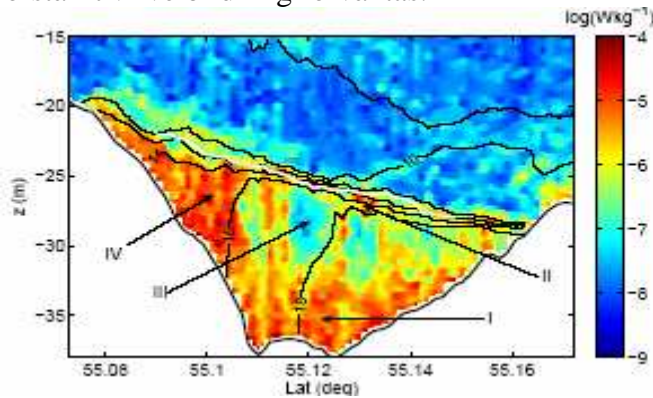
3.1 Uppblandning av näringsämnen genom språngskiktet

Genom förstärkt isotrop turbulens kan näringsämnen ur djupvattnet hamna i ytvattnet. Där kan de på våren och sommaren leda till kraftigare algbloomningar. När det gäller transporten av näringsämnen genom salthaltssprångskiktet så sker den framförallt under vintern, där den vertikala omblandningen genom språngskiktet är starkast (Reissmann m.fl. opublicerat). Uppvärmning av vattnet på våren leder till ett temperatursprångskikt inom de översta 10 m. Algbloomningar förbrukar oftast bara näringsämnen ovan detta språngskikt eftersom vindarna är svaga och därmed även ytströmmen så att förhållanden som kan leda till turbulens inte uppstår. Reissmann m.fl. (opublicerat) påpekar också att det är osäkert hur stora mängder av näringsämnen som transporteras genom salthaltssprångskiktet eller hur transporten av fosfat genom sommarens temperatursprångskikt i detalj försiggår.

3.2 Bottenström

När det gäller bottenkiktet är frågan vad som händer när en tung bottenström möter ett hinder och det uppstår en växelverkan mellan dem. Bottenströmmens hastighet kan uppskattas från baroklina tryckgradienter och befintlig kunskap om hydrografi. Bottenströmmen längs norra sidan av Kriegers flak transporterar saltvattnet från Kattegatt in i Arkonabassängen. Hastigheten av det inströmmande vatten kan lokalt vara upp till 40–50 cm/s (se t.ex. Arneborg m.fl. opublicerat). Ett exempel på bottenströmmens struktur ges av Umlauf m.fl. (opublicerat) som beskriver mikrostrukturmätningar (se även avsnitt 4.1.3 längre ner) längs ett tvärsnitt av ca 10 km längd genom bottenströmmen i november 2005. Figur 6 visar förhöjda dissipations-

hastigheter i närheten av botten (region I i figuren) pga. bottenfriktion. Bottenströmmens centrum kännetecknas av låga dissipationshastigheter (region III i figuren) medan dissipationshastigheten är förhöjd inom språngskikten (region II i figuren). Det är i det här området turbulensen leder till en inblandning av vatten med lägre salthalt i bottenströmmen. Där bottenströmmen lutar sig mot Kriegers flaks norra sida är det genomgående höga dissipationshastigheter mellan botten och språngskikt (region IV i figuren). När bottenströmmen träffar på ett hinder kan en förstärkt virvelbildning förväntas.



Figur 6. Dissipationshastighet $\log(\epsilon)$ (i färg) och täthet (linjerna). Kriegers flak på vänstra sidan av tvärsnittet.

3.3 Salthaltsskiktning

Salthaltsskiktningens utformning i Arkonahavet beror på inflödena av vatten med högre salthalt från Kattegatt (se även avsnittet om Arkonahavets hydrografi). Stora inflöden ($S \geq 17$, volym kring 100 km^3) skedde fram till 70-talet i snitt ungefär en gång om året, främst på vintern. Sedan dess har de blivit mycket sällsynta och haft mindre volym än tidigare (Figur 2). Inströmmandet av mindre mängder av saltvatten sker några gånger om året. Blandningen som påverkar gränsskiktens tjocklek är enligt litteraturen främst vindinducerad. Brytning av interna vågor pga. ett hinder kan förstärka blandningen och därmed i värsta fall leda till att språngskiktet bryts upp.

4 Aktuell forskning

4.1 I havet

4.1.1 I Arkonahavet och på Kriegers flak

I det uppdrag som SMHI har för Vattenfall AB Vindkraft ingår oceanografiska undersökningar. I en första fas som startade 21 september 2006 etablerades fyra stycken Akustiska Doppler Strömmätare, ADCP, med Akustisk ytvattenregistreringsfunktion AST (Acoustic Surface Tracking). Kring årsskiftet har en av stationerna kompletterats med en kedja bestående av sju stycken temperatur- och salthaltsgivare.

De instrument som används är Norteks ADCP typ AWAC AST 600 KHz. Instrumenten registrerar strömmen strax ovan botten till några meter under ytan. Strömmen medelvärdesbildas under tre minuter varje halvtimme. Vågorna mäts på tre stationer under 1024 sekunder var tredje timme. På den fjärde stationen mäts

vågorna under 1200 sekunder varje timme. Mätfrekvensen för AST:n är 2Hz och trycket, liksom orbitalhastigheten, mäts varje sekund.

Position	Djup (m)	Antal celler	Ström	Vågor
55°04'0"N, 13°04'3"E (A1)	20	20	3 min/halvtim	17min/3 tim
55°05'0"N, 13°05'0"E (A2)	32	16	3 min/halvtim	17 min/3 tim
55°06'0"N, 13°04'7"E (A3)	40	20	3 min/halvtim	17 min/3 tim
55°01'5"N, 13°09'0"E (D)	20	20	3 min/halvtim	20 min/timme

Samtliga instrument är monterade i rostfria stativ och kardanskt upphängda. Stationerna är i ytan utmärkta med en lysboj och en gul prick inhyrda från Sjöfartsverket. Instrumenten har lagts ut med svepliner och är inte förbundna med ytmärkningarna.



Figur 7. Bojar, instrument och mättrigg (©B. Juhlin, SMHI).

Ett europeiskt forskningsprojekt, QuantAS, som leds av tyska Baltic Sea Research Institute, undersöker blandning av djupvatten (med höga salthalter och oftast även höga halter av syre och näringsämnen) med ytvattnet (låga salthalter) främst i Arkonahavet. Projektets deltagare är en blandning av mindre företag inom områdena mätteknik och marin konsultverksamhet samt forskningsinstitutioner i Tyskland, Danmark, Sverige och Polen. Projektet består av två delprojekt.

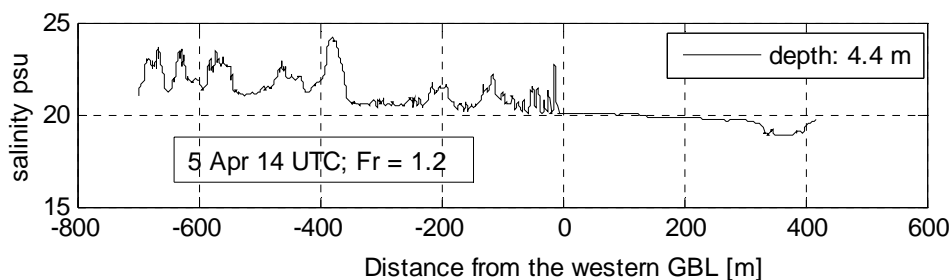
I delprojektet QuantAS–Nat handlar det om storleken på den naturliga blandningen som mest pågår under vintern. Det är välkänt att det pågår en intensiv turbulent blandning av det syrerika bottenvattnet med vatten ur högre skikt i Arkonabassängen. En kvantifiering av dessa omvandlingsprocesser är viktig för att förstå känsligheten hos Östersjöns ekologi när det gäller klimatändringar och mänsklig inflytande genom t.ex. vindkraftanläggningar i havet. Projektet underhåller två mätstationer på Kriegers flak (se gröna trianglar i Figur 1) där temperatur, salthalt och strömhastighet mäts kontinuerligt. Under kortare perioder, främst under vinterhalvåret, genomfördes forskningsresor där blandningsintensiteten mättes med hjälp av en så kallad mikrostruktursond.

Mätningarna pågår sedan november 2005 och planeras att fortsätta under hela 2007. Målsättningen har varit att beskriva ström- och turbulensförhållanden som ett underlag för teoretiska studier av bland annat naturliga blandningsförhållanden.

4.1.2 Påverkan av konstgjorda strukturer

Den turbulens som bildas på grund av strömmarnas växelverkan med en pelare kan ge ett extra bidrag till blandningen och således leda till en försvagning eller nedbrytning av skiktningen. Frågor som då måste beaktas är hur mycket extra turbulens som bildas samt hur långt turbulensen kan transporteras bakom pelaren? Vanliga turbulensnivåer i havet vid moderata till starka vindar ger en dissipationshastighet (ϵ) på ca 1.5×10^{-7} W/kg. Dissipation betecknar den förlust av kinetisk energi som över tiden uppstår genom till exempel friktion. Dissipationshastigheten är ett mått på hur mycket turbulens som finns i området.

I de fall då man förväntar sig höga strömmar på grund av starka vindar har man i allmänhet stor turbulent produktion även utan hinder. Dock kan man i vissa lägen få höga strömshastigheter även vid låga vindhastigheter på grund av vattenståndsvariationer. Om då turbulensen som bildas vid ett hinder är småskalig kommer den att verka mest nära hindret.



Figur 8. Effekt av en bropelare. Vattnet strömmar från höger till vänster. Nollinjen betecknar pelarens position (Lass m.fl., 2006).

I det europeiska projektet QuantAS:s delprojektet QuantAS-Off ska effekten av fundament för vindkraftanläggningar på strömmar av syrerikt vatten längs botten in i Östersjön undersökas. Man har genomfört mätningar intill bropelare (vid Stora Bält bron) och Figur 8 visar salthalten för ett snitt tvärs bron. När vattnet strömmar förbi pelaren uppstår interna vågor och virvlar som leder till salthaltsvariationer.

Mätningarna (Lass m.fl., opublicerat) visar att effekter av pelaren kan spåras upp till en kilometer bakom denna. Det uppstår en förstärkt vertikal blandning nedströms pelaren som leder till förhöjda salthalter i ytan medan salthalten nära botten minskar. Det är dock fortfarande oklart hur stor blandningseffekten pga.

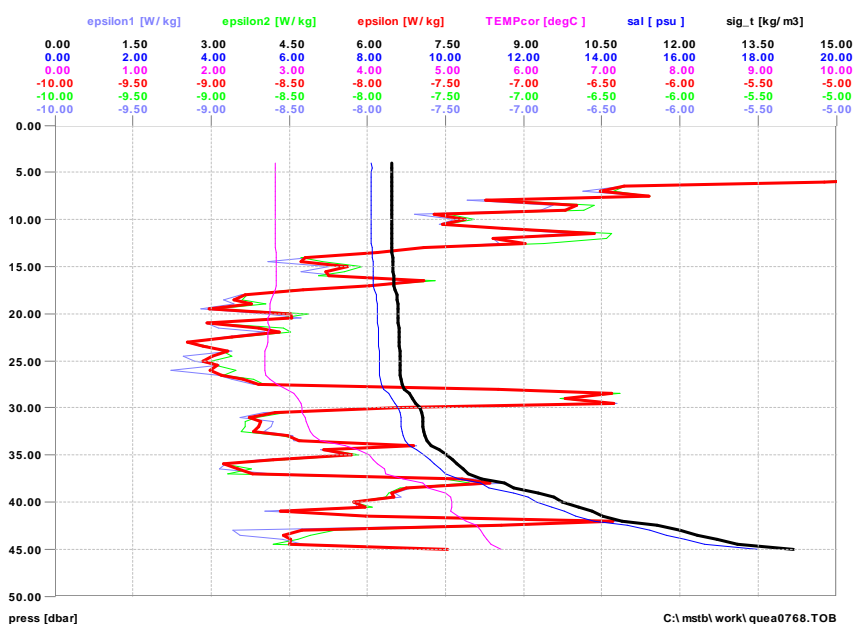
fundamenten kan vara. Storleken av blandningen är starkt kopplad till strömstyrkan. Vid kraftigt strömmande vatten är effekten stor. Ett gränsvärde för övergången mellan nästan ingen blandning och stor blandning ges av det så kallade Froude talet

(Fr). När man betraktar skiktat vatten definieras $Fr = U / \sqrt{g' L}$, där U är ett

karakteristiskt värde för strömshastigheten, g' är den reducerade tyngdaccelerationen och L är en typisk vertikal längdskala. Ett vedertaget gränsvärde är $Fr \approx 0,7$. Blir Fr större så är blandningen stor, blir Fr mindre så är blandningen svag (Lass m.fl., opublicerat).

4.1.3 Instrument som mäter blandning

Inom QuantAS-projektet användes bland annat en mikrostruktursond, som på liten skala mäter temperatur och hastighetsskillnader samt temperatur, salthalt och turbiditet (grumlighet). Ur dessa data kan sedan andra parameter som beskriver turbulensen respektive blandningen beräknas. Ett exempel på en sådan parameter är den turbulenta kinetiska energins dissipationshastighet ϵ . Ett typiskt fall visas i Figur 9 nedan.

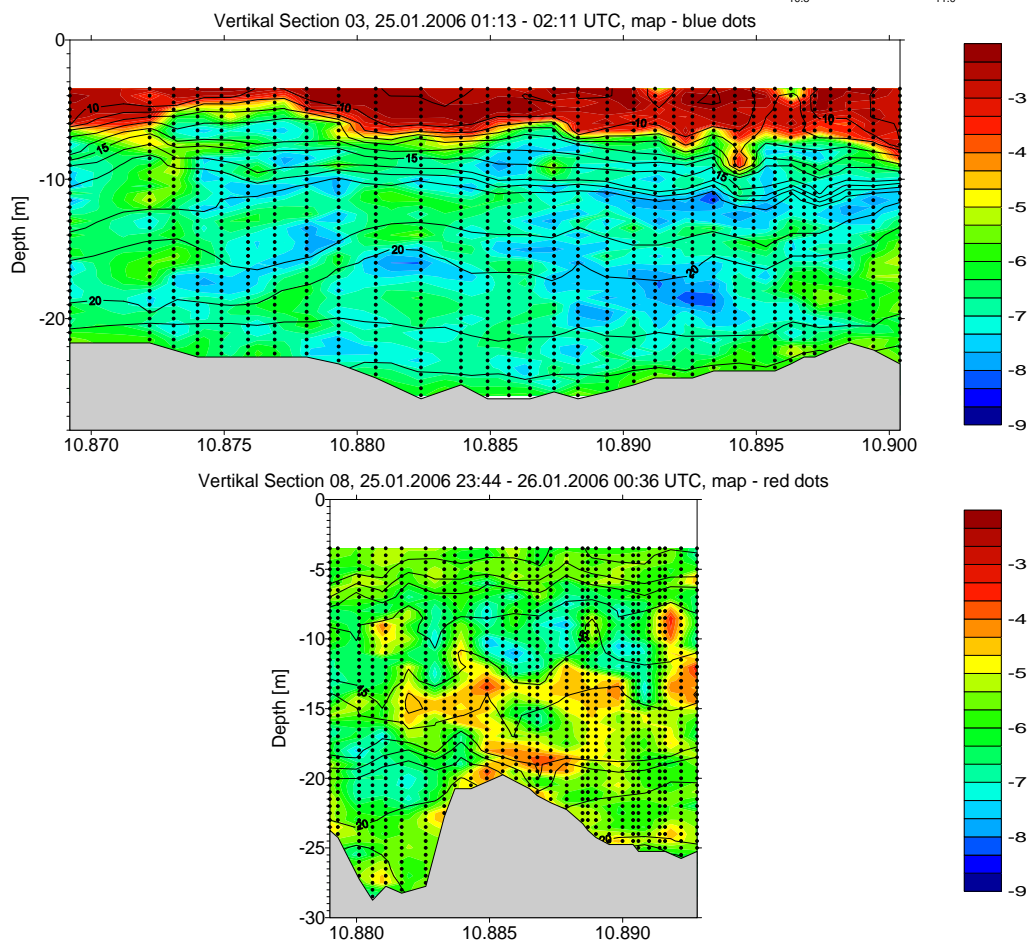
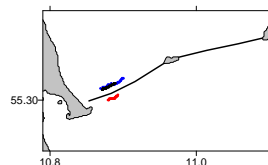


Figur 9. Kvalitet av turbulensmätningen, överensstämmelse av sensorerna. Epsilon (ϵ) är den turbulenta kinetiska energins dissipationshastighet. Diagrammet visar $\log(\epsilon)$ för tre olika sensorer (röd, grön och ljusblå linje), temperatur (magenta), salthalt (blå) och täthet (svart). Prandke, 2006.

Mätningar med en frifallande mikrostruktursond som genomfördes januari 2004 (Figur 10) visar uppströms på höga dissipationshastigheter i ytskiktet som kan hänföras till vindinducerad blandning. Dissipationshastigheten i språngskiktet är liten medan den stiger en aning strax intill botten pga. bottenströmmen. Nerströms finns det inte en lika distinkt uppdelning. Här finns, fördelat över hela vattenkolumnen, fläckar med hög dissipationshastighet. Dissipationen här orsakas av en kombination av brytande interna vågor (både naturliga pga. topografin och sådana som orsakas av pelarens effekt på strömningen) samt turbulens orsakad av den virvelgata som uppstår bakom pelaren. Att det inte finns några tecken på vindinducerad blandning kan bero på läffekten pga. bron eller på det faktum att det ligger nästan 24 timmar mellan mätningarna.

Quantas 2006 / 01

MSS 90, Vertikal Section
log Epsilon [W/kg] (color) - Sigma-t [kg/m³] (contour)



Figur 10. Vertikalfördelning på den turbulenta kinetiska energins dissiperingshastighet (i färg) och täthet (konturer) uppströms (övre diagram) och nerströms (nedre diagram) av Stora Bält bron (Bilderna visar $\log(\epsilon)$ som blir mer negativ ju mindre ϵ blir).

4.2 I teorin

4.2.1 Blandningsprocesser i laboratoriet

I samband med QuantAS-projektet har bland annat en laborietank byggts och testats (Figur 11). Anläggningen möjliggör undersökningar av turbulens i skiktade vatten där det tunga bottenkiktet strömmar med en viss hastighet. Inledande försök har gjorts med ett fundament av monopile-typ, men även tripoider eller andra fundamenttyper i skala 1:100 skall kunna analyseras. Preliminära resultat visar att det bildas en bogvåg framför pelaren och en virvelgata bakom pelaren i språngskiktet.



Figur 11. Tank för undersökning av effekten av fundamenten i strömmande skiktat vatten med en modell av en vindkraftanläggning (för land) från Nordex (©P. Menzel, Strömungsmechanisches Institut, Universität Rostock).

Hästscoliknande virvlar finns även vid botten och i ytan. Effekten är dock inskränkt till pelarens närområde. Småskalig turbulens i språngskiktet finns även utan pelare och det finns ännu inga kvantitativa uppskattningar av hur mycket turbulensen förstärks genom pelarna eller om pelarnas design påverkar turbulensen. Även övergången från effekten av enstaka pelare till effekten av en hel vindpark är ännu outforskad.

Laboratorieexperiment i strömmande, oskiktat vatten (Carmer 2005) indikerar att det område som påverkas av virvlar bakom en struktur sträcker sig ca 2 objektdiametrar tvärs strömriktningen och ungefär 10 objektdiameter nerströms.

4.2.2 Blandningsprocesser, numeriska modeller

I samband med planeringen för ett vindkraftverk på tyska sidan av Kriegers flak utkom en rapport (Duwe m.fl. 2003) som kan liknas vid de undersökningar som krävs för en miljökonsekvensbeskrivning. Rapporten behandlar påverkan av vindkraftparken på strömning och blandning med hjälp av en högupplöst tredimensionell numerisk modell. Modellens resultat visar på ökade vertikala hastigheter och att blandningen höjs med någon procent jämfört med den naturliga blandningen. Den tyska undersökningen pekar på att effekten av en vindkraftanläggning på både strömning och blandning kan vara stor i närområdet men att störningen avtar snabbt på en längdskala som oftast är mindre än avståndet mellan två fundament. De små mängder vatten som pga. förhöjd lokal blandning har mindre salthalt än sin omgivning anpassar sig på kort tid till det omgivande vattnet när det når den centrala delen av Arkonahavet, främst genom horisontell inblandning av saltare vatten.

4.2.2.1 Modellering av en pelare i skiktat vatten

Vi vill här beskriva olika möjliga angreppssätt när det gäller numerisk modellering av blandningen orsakad av vindkraftfundamenten på Kriegers flak. Tyngdpunkten i

beskrivningen ligger på modeller för närområdet, d.v.s. modeller som beskriver blandningen i vaken nedströms fundamenten. Vi betraktar problemet som ett flöde runt en vertikal cylinder (pelare) även om utformningen på vindkraftfundamenten på Kriegers flak kan variera beroende på djup och bottenförhållanden.

Den centrala frågan som en modell ska hjälpa oss att besvara är hur stor påverkan pelaren kan få på blandningen och skiktningen i olika situationer. Det mest kritiska fallet med avseende på risken för påverkan på Östersjöns djupvattenförsörjning är då vindkraftfundamentet når under språngskiktets nivå. När det gäller vindkraftparken vid Kriegers flak berör detta i första hand vindkraftverk som står på djup större än 35 m (Johansson 2004). Förutom att pelaren kan öka den vertikala blandningen och därmed försvaga skiktningen kan den även ha en viss bromsande effekt på tunga bottenströmmar som uppstår i samband med saltvatteninflöden till Östersjön (Lass et al. 2006). Önskemålet är att en modell över vakområdet ska kunna användas för att kvantifiera pelarens ökning av den vertikala blandningen både i situationer med och utan en tung bottenström.

Det aktuella strömningsproblemet kan karaktäriseras som ett turbulent skiktat flöde runt en vertikal cylinder. Problemet tillhör klassen ”Grunda vakflöden” (Carmer 2005) eftersom botten och den stabila skiktningen begränsar storleken på de största vertikala skalor som kan förekomma. De horisontella skalor utgörs av vakområdets och virvlarnas horisontella utsträckning, det vill säga ungefär en till tio gånger cylinderns diameter. Enligt den strikta definitionen av ”Grunda vakflöden” ska de största vertikala skalorna vara mycket mindre än de horisontella. I vårt fall kan de vara av samma storleksordning. Gemensamt med grunda vakflöden är dock förekomsten av storskaliga tvådimensionella koherenta strukturer (d.v.s. storskaliga identifierbara virvelrörelser), samt inverkan av turbulens genererad vid botten.

4.2.2.2 Olika modeller för olika detaljnivå

Turbulent strömning kan simuleras på olika detaljnivå beroende på vilka skalor man väljer att lösa upp respektive att modellera. På den lägsta detaljnivån har vi de klassiska kvasistationära RANS-modellerna (RANS = Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) där tidsmedelvärdesbildade egenskaper hos strömningen löses medan alla skalor i den turbulenta rörelsen modelleras. RANS-modeller är billiga ur beräkningssynpunkt men anses inte kunna beskriva den komplexa dynamiken hos de koherenta virvlarna i grunda flöden (Van Prooijen 2004). På den högsta detaljnivån har vi LES-modeller (LES = Large Eddy Simulation) där de största, icke-stationära och starkt geometriberoende virvlarna löses upp medan endast den småskaliga turbulensen modelleras. LES-modeller har kapacitet att beskriva dynamiken hos de energirika storskaliga virvlarna i ett turbulent vakflöde men är beräkningsmässigt mycket krävande och är därför i praktiken ännu inte ett alternativ för geofysiska tillämpningar (Van Prooijen, 2004).

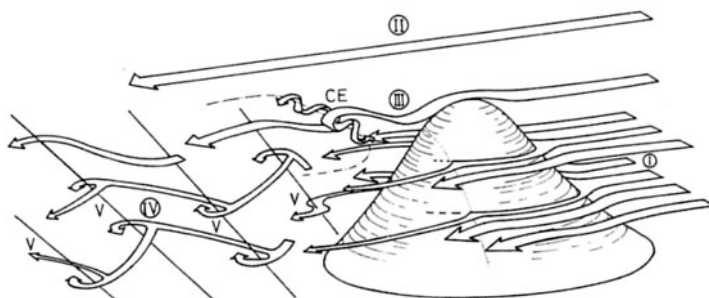
På en detaljnivå mellan RANS och LES finns ett antal modeller av varierande komplexitet. Ett exempel är DES-modellen (DES=Detached Eddy Simulation) (Spalart 2000) som använder en RANS-modell i väggränsskiktet och en LES-modell långt från väggarna. Vinsten ligger i att den dyra LES-modellen bara används för att lösa upp de stora skalorna, t.ex. virvlarna i en vak där flödet har separerat från väggen. I Oakley et al. (2005) ges ett exempel på användning av DES på ett skiktat vakflöde från en off-shore plattform. Ett annan billigare variant av LES är HLES-modellen där

enbart storskaliga tvådimensionella skalor i turbulensen löses upp. Detta innebär att ett grövre beräkningsnät kan användas jämfört med tredimensionell LES. En större andel av den turbulenta rörelsen måste dock modelleras i HLES-modeller, vilket ställer större krav på turbulensmodellen. Ett exempel på en specialanpassad s.k. subgrid-turbulensmodell för HLES ges i Kernkamp & Uittenbogaard (2001). En annan utvecklingslinje som bygger vidare på RANS-modellerna och som också har tillämpats på grunda flöden med koherenta strukturer är de s.k. URANS och TRANS-modellerna (Van Prooijen 2004).

4.2.2.3 Modellering av förhållanden på Kriegers flak

Bland de nämnda modellansatserna bedöms HLES och URANS (TRANS) modellerna vara mest intressanta för modellering av cylindervakar under de förhållanden som är aktuella på Kriegers flak. Båda typerna kan antas ha kapacitet att simulera virvelgatan i vaken och gränsskiktet mot botten. Eventuellt kan även någon RANS-modell som tar hänsyn till turbulensens anisotropi (riktningsberoende) bli aktuell. Det är dock inte känt hur bra modellerna hanterar den vertikala blandningen i ett stabilt skiktat flöde. Tillgång till mätdata för kalibrering och validering är därför helt avgörande för hur långt man kan komma när det gäller att kvantifiera fundamentens effekt på blandningen med hjälp av numeriska modeller. QuantAS-projektet kommer så småningom att komma fram med intressanta data.

4.2.3 Blandningsprocesser, analytiska funderingar



Figur 12. Skiss på de viktigaste processer kring ett hinder i strömmande, skiktade vatten (ur Brighton 1978) (Linjerna visar virvlarnas rotationsaxel).

Framför hindret (Figur 12, region I) är strömningen ostörd och horisontell. När strömningen löser sig från hindrets sidor uppstår virvel (Figur 12, V) i vaken (Figur 12, region IV). Fjärrområdet (Figur 12, region II) påverkas inte. Är vattendjupet större än hindrets vertikala utsträckning uppstår olika typer av virvel som inte behandlas i denna rapport (Figur 12, region III). Längre bort nedströms fortplantar sig virvlarnas effekt uppåt i vattenkolumnen (Brighton 1978). Virvlarna i vaken betecknas som von Karmans virvelgata och är ett välkänt fenomen inom meteorologin och oceanografin.

Den koherenta virvelgatan som uppstår bakom ett hinder är primärt tvådimensionell och följer inte lagarna för isotrop turbulens, däremot går virvlarna mot större skalor över tiden. Om småskalig turbulens transporteras med den koherenta virvelgatan är det viktigt att ha kunskap om dimensionerna för denna. Carmers mätningar (2005) ger en fingervisning, de tyder på att virvelgatan är ca två gånger hindrets diameter i bredden och sträcker sig ungefär 10 gånger diametern bakom hindret. En annan

viktigt aspekt är att horisontella virvlar som växelverkar kan skapa tredimensionell turbulens. Det är dock inte troligt att vindkraftverken kommer att byggas så nära varandra att detta blir ett problem i en vindkraftpark.

Ofta när vi talar om övergångar från laminär till turbulent ström inträffar dessa vid något gränsvärde. För frågeställningen som presenteras här är det lämpligt att titta på Reynoldstalet, det lokala Reynoldstalet och Strouhallet.

Reynoldstalet, $Re=UD/v$, där U är strömhastighet, D är dimensionen – djupet eller storleken på hindret, och v är viskositeten, bestämmer om en ström kan bli turbulent eller inte. Tumregeln är att en ström kan bli turbulent ungefär för $Re > 2000$.

Strouhallet (St) är ett dimensionslöst tal som representerar relationen mellan strömmens medelhastighet och fluktuationer bakom ett cylindriskt objekt, dvs. relationen mellan virvlarna och strömfältet.

$St=fD/U$ där f är virvlarnas frekvens, D är dimensionen och U är medelhastigheten. St är nära konstant = 0.2 för Reynoldstal inom $100 < Re < 100\,000$, och för sådana förhållanden kan virvelfrekvensen beräknas.

Reynoldstalet kan i vårt fall kalkyleras för dimensionerna i området (här är D vattendjupet);

$$Re = UD/v \approx \frac{0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 35 \text{ m}}{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 3\,500\,000$$

– här är dimension och hastighet godtyckligt vald. När hastigheten ökar, ökar också strömmens benägenhet att vara turbulent.

Vi kan också beräkna ett lokalt Reynoldstal för själva vindkraftverkets pelare (D ges nu av pelarens diameter).

$$Re = UD/v \approx \frac{0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 10 \text{ m}}{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1\,000\,000$$

Vi befinner oss alltså över gränsen där $St = 0.2$. För $Re > 10^6$ ligger St mellan 0.2 och 0.3 (White, 1986).

Perioden som virvlarna kan tänkas sättas av bakom pelarna beskrivs av

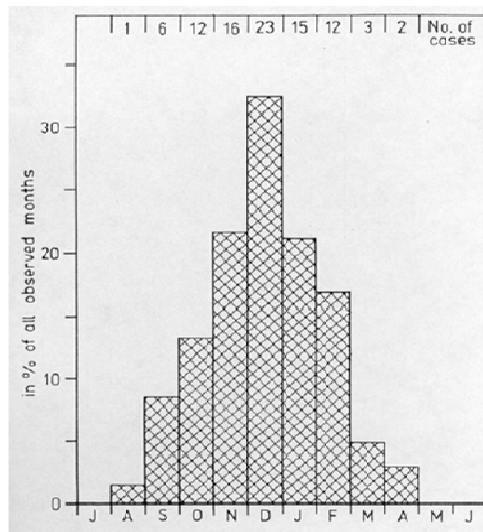
$$P = \frac{1}{f} = \frac{2\pi \cdot D}{St \cdot U}$$

Tabell 1 visar tänkbara perioder för $St = 0.2$ och $St = 0.3$, och för olika strömhastigheter.

Tabell 1. Perioder för virvelavlösning vid olika strömhastigheter (U) för Strouhhaltenen 0.2 och 0.3 respektive. D är pelarens diameter.

	$U=0.01$ m/s	$U=0.05$ m/s	$U=0.1$ m/s	$U=0.2$ m/s	$U=0.5$ m/s	$U=1$ m/s	
$D = 7$	6 timmar	1,2 timmar	37 min	18 min	7 min	4 min	St = 0.2
$D = 17$	14,8 timmar	3,0 timmar	89 min	44 min	18 min	9 min	
$D = 7$	4,1 timmar	0,8 timmar	24 min	12 min	5 min	2 min	St = 0.3
$D = 17$	9,9 timmar	2 timmar	59 min	30 min	12 min	6 min	

Turbulent blandning av vatten genom språngskiktet beror på skiktningens styrka och turbulensens intensitet. Turbulent rörelseenergi uppstår bland annat genom vind, bottenfriktion och genom interna vågor som till exempel uppstår där strömmande vatten träffar på topografiska hinder. Vindinducerad turbulens är starkt beroende av vindhastigheten, vilken i sin tur skiftar med årstiderna och i medel är störst under vinterhalvåret. Bottenfriktionen beror på det salta bottenvattnets hastighet längs botten. Bottenströmmens hastighet varierar mellan någon cm och grovt skattat en halv meter per sekund vid större saltvattenintrång. Eftersom saltvattenintrången styrs av vindförhållanden så har även de sitt maximum under vintern (Figur 13).



Figur 13. Fördelning av saltvattenintrång till Östersjön under året (Franck m.fl. 1987).

En ekvation som oftast används för beräkandet av vertikal blandning är Kato och Philips entrainmentformel (se t.ex. Stigebrandt 1990)

$$w_e = 2m_0 \frac{u_*^3 \rho}{g \Delta \rho h} \quad (1)$$

Här står w_e för den vertikala blandningen av vatten per ytenhet (dimensionellt är den en hastighet), m_0 är en konstant, ρ och $\Delta \rho$ är vattnets täthet respektive

täthetskillnaden över språngskiktet. Tyngdaccelerationen ges av g och h är ytskiktets tjocklek. Vidare är u_* den så kallade friktionshastigheten, som beror på skjuvspänningen över språngskiktet. Friktionshastigheten kan beskrivas med följande approximation

$$u_*^2 = c_D \Delta u^2 \quad (2)$$

där c_D kallas för drag-koefficient och Δu är hastighetsskillnaden mellan det tunga, salta bottenvattnet och det lätta sötare ytvattnet. Med hjälp av dessa formler, värden för de olika konstanterna ur litteraturen och antaganden för hastighets- och densitetsskillnader över språngskiktet kan en säker övre gräns för blandningen skattas. Ökningen av blandning som orsakas av en pelare i strömmande vatten kan även denna skattas och adderas upp för ett antal fundament som står på större djup än språngskiktets läge. Denna ökning kan slutligen jämföras med den naturliga blandningen. Kōuts och Omstedt (1993) uppger den genomsnittliga vertikala blandningen i Arkonahavet under en 20-årsperiod till 8900 m³/s.

I en rapport som gjordes av SMHI på uppdrag av Sweden Offshore Wind AB (Johansson 2004) kommer man fram till att en försiktig skattning av den teoretiskt sett maximala ökningen av den vertikala blandningen utgör ca 10 % av den naturliga blandningen genom språngskiktet. Beräkningarna i denna rapport är dock överslagsmässiga med avsikt att få fram en övre maximal gräns för vertikal blandning och det bör poängteras att verkliga blandningen kan vara en till flera 10-potenser mindre.

5 Framtida utveckling, förslag

Kunskaperna om turbulensnivåerna i ytan är generellt goda. Blandning på grund av turbulens är väl beskriven av pyknoklinmodeller, till exempel Stigebrandt (1985). Kunskaperna om den turbulenta produktionen nära en pelare och om hur den fortplantar sig bakom pelaren är mindre god. Resultaten från QuantAS-projektets undersökning vid Stora Bält bron ger en första fingervisning, men direkta mätningar av turbulenta hastigheter bakom en vindkraftpelare eller liknande kommer att ge en ännu bättre uppskattning då dimensionerna av bropelaren är större än pelaren av en vindkraftanläggning. Även skiktningen och strömningen skiljer sig ju en hel del åt mellan Kattegatt och Arkonahavet vilket påverkar uppskattningen.

Överföring av pelarinducerad turbulens från när- till fjärrområdet är en väsentlig process som bör studeras i framtiden. Även om den direkta effekten av pelaren kan inskränkas till en areal ca 2×10 gånger pelarens diameter (se avsnitt 4.2.3) så vet man i dagsläget inte hur långt småskalig turbulens kan transporteras bort ur området med hjälp av den koherenta virvelgatan som uppstår bakom pelaren. Genom växelverkan mellan de storskaliga horisontella virvlar, som har en lång livslängd, kan tredimensionell turbulens uppstå i områden långt ifrån virvlarnas ursprung. Även interna vågor som uppstår när vattnet strömmar mot ett hinder kan transportera turbulent energi långa sträckor innan de bryter och isotrop turbulens uppstår.

I detta samband bör det också undersökas hur en eventuell växelverkan mellan vågor och virvlar som uppstår vid en pelare och andra pelare i området ser ut. Även om avståndet mellan pelarna i en vindkraftpark är större än de skalor på vilka pelarna direkt påverkar skiktningen kan möjligen de ovannämnda processerna bidra till en förstärkning av turbulensen.

Efter kalibrering och validering av en modell för närområdet som de som beskrivs i avsnitt 4.2.2 kan denna användas för att studera t.ex. olika utformningar på fundamentet eller olika flöden och skiktningförhållanden. Beräkningarna kan göras med kommersiella ekvationslösare som t.ex. Fluent (Fluent 2007) eller Phoenix (CHAM 2007). HLES-modellen med en subgrid-modell enligt Kernkamp & Uittenbogaard (2001) är implementerad i det kommersiella programpaketet Delft3D. SMHI har tillgång till och erfarenhet av dessa programvaror.

Om det visar sig att påverkan från vindkraftfundamenten inte är försumbar finns det anledning att gå vidare och studera de storskaliga effekterna på inströmningen av djupvatten i Arkonahavet. Dessa studier bör då lämpligast vara del av det framtida kontrollprogrammet. I det fallet kommer man att behöva använda en storskalig modell i vilken blandningen från vindkraftfundamenten parametriseras. På SMHI finns två olika storskaliga modeller som i detta fall kunde komma till användning, där den ena, HIROMB, används för dagliga prognoser av ström, temperatur och salthalt, medan den andra (RCO) används inom klimatforskning. I båda modellerna pågår en kontinuerlig förbättring när det gäller beskrivningen av turbulenta processer pga. deras stora roll för förhållanden i Östersjön.

För att kunna uppskatta växelverkan mellan bottenström och en vindkraftverkspelare behövs förutom en större kunskap om de naturliga förhållanden som det europeiska QuantAS projektet samlar, mätningar av de förhållanden som uppstår efter vindkraftparkens byggande.

6 Slutsatser

En stor mängd av data som beskriver de naturliga förhållanden i Arkonabassängen med tyngdpunkt på förhållanden kring Kriegers flak har samlats och samlas fortfarande in av det europeiska QuantAS projektet och SMHI. Dessa data kommer att utgöra en värdefull bas för framtida undersökningar av vindkraftparkernas inflytande på blandningen.

Mätningar med en så kallad mikrostruktursond längs ett tvärsnitt genom den tunga bottenström som uppstår i samband med inflödet av saltare vatten i Arkonabassängen pekar på att denna teknik kan vara ett värdefullt komplement till de klassiska mätningarna av ström, temperatur och salthalt.

För en kvantifiering av fundamentens effekt på blandning med hjälp av numeriska modeller är tillgång till mätdata för kalibrering och validering helt avgörande.

De flesta undersökningar har hittills kretsat kring blandning pga. hinder i oskiktat strömmande vatten (t.ex. von Carmer 2005). Dessa kan användas för att skatta storleksordning av effekten av en pelare vid olika strömhastigheter.

Påverkan av hinder i skiktat vatten uppmärksammades först i samband med bygget av Stora Bält bron och Öresundsbron där kravet på att flödet av syrerikt saltvatten in i Östersjön inte fick förändras ledde till undersökningar om blandning som uppstår pga. hindren (citerat i Reissmann m.fl. opublicerat). De första mätningarna bakom bropelarna (Lass m.fl. opublicerat) tyder dock på effekter som är större än vad de dåtida modellerna visade.

7 Referenser

Arneborg, L. et al., 2007, Gravity current dynamics and entrainment – a process study based on observations in the Arkona Basin. *Journal of Physical Oceanography*, antagit för publicering

Blocken, B. & Carmeliet, J., 2004, Pedestrian wind environment around buildings: Literature review and practical examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28(2), 107-159, 2004

Brighton P. W. M., 1978, Strongly stratified flow past three-dimensional obstacles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 440, 289-307, 1978

von Carmer, C.-F., 2005, Shallow turbulent wake flows: Momentum and mass transfer due to large-scale coherent vortical structures. *Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe*, vol. 2005/2, 2005

Duwe, K. et al., 2003, Bericht und Fachgutachten zum Einfluss des geplanten Windparks Kriegers flak auf Strömungs- und Transportprozesse. *Hydromod wissenschaftliche Beratung, Rapport P170404-KF/Ber*, 2003

Eliasson, I., 2006, Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmospheric Environment* 40, 1–16, 2006

Franck, H. et al., 1987, Major inflows of saline water into the Baltic Sea during the present century. *Gerlands Beitr. Geophysik*, 96 (6), 1987

Johansson, L., 2004, Påverkan på djupvattnet i Arkona av fundament på Kriegers flak – enkel överslagsberäkning. *SMHI Rapport 2004-37*, 2004

Kernkamp, H.W.J. & Uittenbogaard, R.E., 2001, 2D-LES of a free surface mixing layer. Geurts, B.J., Friedrich, R. & Metais, O. (eds), *Direct and Large-Eddy simulation workshop*, 409-418, 2001

Köuts, T. & Omstedt A., 1993, Deep water exchange in the Baltic Proper. *Tellus*, 45 A (4), 1993

Lass, H. U. & Mohrholz V., 2003, On dynamics and mixing of inflowing saltwater in the Arkona Sea. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C2), 2003

Lass, H. U. et al., 2005, On pathways and residence time of saltwater plumes in the Arkona Sea. *Journal of Geophysical Research*, 110 (C19), 2005

Lass, H. U. et al., 2006, On the impact of a pile on a moving stratified flow. *Continental Shelf Research*, inlämnat för publicering

- Newley, T. M. J. et al., 1991, Stably stratified rotating flow through a group of obstacles. *Geophysical Astrophysical Fluid Dynamics*, 58, 1991
- Oakley, O. H. Jr. et al., 2005, Modelling vortex induced motions of spars in uniform and stratified flows. *Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE2005-67238, 2005
- Piechura, J., 2003, Inflow waters in the deep regions of the southern Baltic Sea – transport and transformations. *Oceanologia*, 45 (4), 2003
- Prandke, H., 2006, Turbulence measurements during the QUANTAS project. Presentation, QuantAS-Off Workshop Warnemünde, Tyskland, 31/8 till 1/9 2006
- van Prooijen, B. C., 2004, Shallow mixing layers. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Report No. 04-1. Dept. Civil Engrg., Delft University of Technology, Delft, 2004.
- Reissmann, J. H. et al., 2007, State-of-the-art review on vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication. *Progress in Oceanography*, inlämnat för publicering.
- Stigebrandt, A., 1985, A model for the seasonal pycnocline in rotating systems with application to the Baltic proper. *J. Phys. Oceanogr.* **15**, 1392-1404, 1985.
- Stigebrandt, A., 1990, Kompendium i marin systemanalys nr. 2: Diapyknisk blandning i havet. *Oceanografiska Institutionen, Göteborg Universitet*, 1990
- Spalart, P. R. (2000). Strategies for turbulence modeling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 252-263.
- Umlauf, L. et al., 2007, The transverse structure of turbulence in a rotating gravity current. *Geophysical research letters*, antagit för publicering.
- White, F. M., 1986, Dimensional analysis and similarity. *Fluid mechanics* 2nd ed. 259-268.

Fluent (2007). <http://www.fluent.se/>

Delft3D (2007). <http://delftsoftware.wldelft.nl/>

CHAM (2007). <http://www.cham.co.uk/>

OBS ! Ingenting får raderas efter denna text, och den skall inte tas bort förrän du är klar !



Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01