

Slutrapport

Lättvindsturbin för småskalig elproduktion Projekt Wintree

Försök med enbladig, horisontalaxlad vindturbin med
pendlande arbetssätt.
Analys av aerodynamisk princip.

Av Lars Östholm

Forskningsprojekt genomfört av Wintree AB inom programmet
Vindforsk 2003.

Projektet har utförts med stöd från Energimyndigheten.

Sammanfattning

Wintree AB har under 2003 genomfört ett samfinansierat forskningsprojekt inom programmet Vindforsk. Projektets syfte var att inhämta kunskap för utveckling av en ny sorts vindturbin, enligt en patenterad uppfinning. PCT WO 2004/005710. Turbinen är enbladig, horisontalaxlad och har ett pendlande arbetssätt med rörelsecentrum i marknivå, se bild 1. Mast och vinge utgör en kombinerad aktiv enhet i form av ett långt cirkulärt rör. Mastens rörelse åstadkoms genom att Circulation Control (cirkulationsstyrning) manipulerar luftströmmarna runt masten. Karaktäristiskt för aerodynamiska profiler med Circulation Control "CC" är deras förmåga att producera extremt höga lyftkraftskoefficienter vid låg hastighet¹. Lyftkraftskoefficienter på 6-7 är typiska.

I projektet har en försöksmaskin konstruerats och uppförts. Maskinens principiella grundbultar har verifierats och väsentliga landvinningar gjorts, men ingen nettoproduktion av energi ur vind har uppnåtts. Projektet har efter färdigställandet av försöksmaskinen därför fokuserat på orsaker till att masten inte ger lyftkrafter i paritet med den forskning som finns tillgänglig.

Angreppssättet som valts, att gå direkt på en enkel försöksmaskin har därmed visat sig framgångsrikt. De antaganden och tillverkningstekniska hänsyn som framtvingades vid konstruktionsarbetet har provats och levererat kunskap.

Tillverkningen av försöksmaskinen har gett underlag till kostnadskalkyl för en färdig produkt.

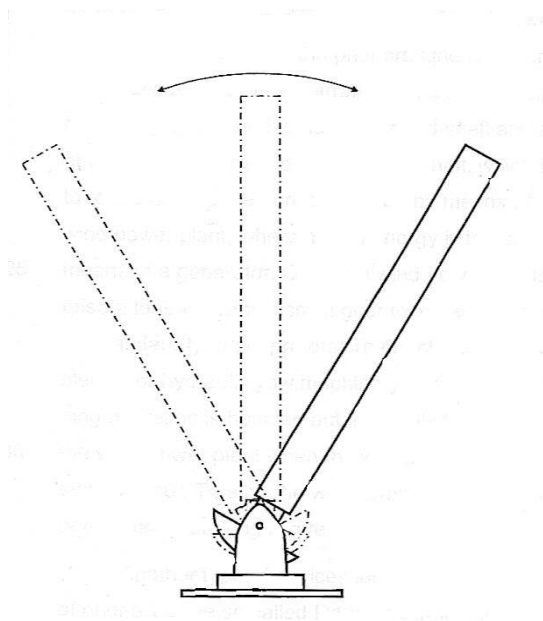


Bild 1. Vind vinkelrätt mot pappret.

En fördjupad teoretisk studie direkt riktad mot sambandet mellan mekanisk och verklig impulscoefficient har initierats inom projektet och resulterat i riktlinjer² för utformning av en ny mast. En ny mast monteras på försöksmaskinen april 2004.

Abstract

Wintree AB has conducted a co financed project within the wind energy research programme Vindforsk. The purpose was to collect information for the development of a new wind turbine as proposed in patent PCT WO 2004/005710.

The turbine has one wing (mast), horizontal shaft and a pivoting working principle with pivoting centre at ground level according to Fig 1. An elongated circular body unifies mast and wing in one component. By applying circulation control (CC) to this circular body, a lifting force perpendicular to the free stream is generated. CC airfoils are characterized by their ability to produce extremely high lift coefficients at low speed¹. Lift coefficients of 6 or 7 are typical.

A prototype has been built and its concept has been verified. Net energy output has not been accomplished due to poor performance of the CC airfoil. The main focus of this project after finalising the prototype has therefore been on the CC function.

A direct approach was selected in this project, building a fully functional prototype, based on wind tunnel tests and virtual machine model. Assumptions and detail designs has been tested and given a broad base of knowledge to further research and development.

When building the prototype, prices and quotations where collected to provide a cost estimate for serial production.

A theoretical study with emphasis on the relation between mechanical jet momentum and CC jet momentum has been initiated. Publications with relevance were found.

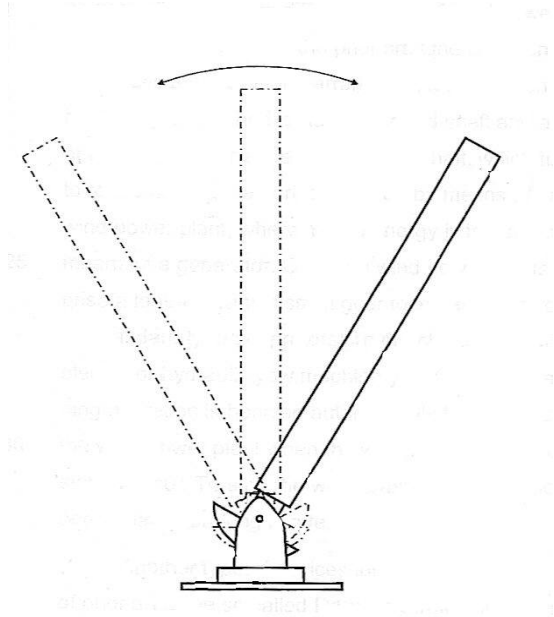


Fig 1. Wind perpendicular to view.

The prototype will serve as platform for further tests after finalising the Vindforsk project. Tests with new mast geometry are planned to April 2004.

Innehåll

Sammanfattning	2
Abstract	3
Innehåll.....	4
Försöksmaskinen	5
Masten.....	5
Maskin och pendel	6
Mastens funktion.....	7
Försök med den färdiga maskinen	8
1. Egensvängning	8
2. Programstyrd drift.	8
3. Givare för vind och vindriktning.	8
4. Girstabilitet	8
5. Girkänslighet	8
7. Normal drift	8
8. Lätt vind och stiltje.....	8
9. Vindhastigheter över märkvind.	8
11. Försök med ökat luftflöde	9
12. Försök med ulltrådar på mantelytan.	9
13. Försök med endast en aktiv spalt per sida.	9
14. Försök med förändrad spaltgeometri.	9
15. Försök med förändrad utväxling.	9
16. Maskinens väderkänslighet.	9
17. Kostnadsbild för serieproduktion.	10
Analys av den aerodynamiska principen.....	10
Mastens geometri, vad bör ändras ?.....	13
Slutsatser	14
Delrapporter	14
Tack till.....	14
Referenser.....	15

Bild 2. Försöksmaskinen.



Försöksmaskinen

Maskinen är uppställd i Buskeröd, Sydost om Höganäs. Bild 2 visar försöksmaskinen på uppställningsplatsen.

Masten är 13.2 meter lång (vita delen) och har en diameter på 1.2 meter.

Pendelcentrum ligger cirka 3 meter över uppställningsplatsen.

Pendeln består av masten och en motvikt. Jämviktsläget vid stiltje är när masten står rakt upp.

Pendeln, pendelns vagga och maskineriet vrids med konventionell girmekanism så att pendelaxeln står parallellt med fri vind.

Ett vanligt missförstånd gäller mastens rörelseplan. Masten pendlar i ett plan vinkelrätt mot vinden, dvs vid drift är pendelaxeln parallell med vinden.

Tanken att få en cirkulär mast att utveckla lyftkraft vinkelrätt mot vinden är helt klart avlägsen för gemene man.

Masten

Masten är utformad som ett cirkulärt rör. En axialfläkt är monterad i mastfoten och matar spalter längs mastens mantelyta med luft för att manipulera vindens flöde runt masten. Ett tvärsnitt av masten syns i bild 3.

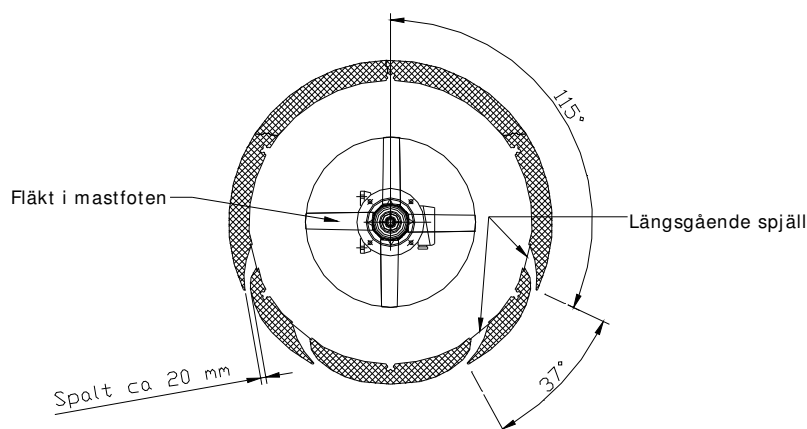


Bild 3. Genomsärning av masten sett uppifrån.

Masten stagas mot pendelns montageplåt med 6 vajrar. Spjällen aktiveras med mekanism på samma montageplåt. Bild 4 visar den färdiga men omonterade mastens insida sett från mastfoten. Spjällen med aktiveringsvajrar syns också.

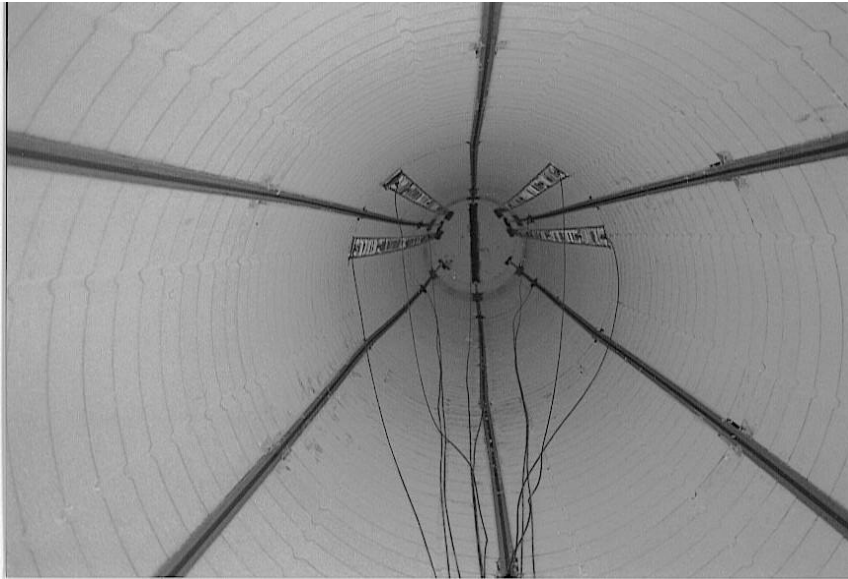


Bild 4. Mastens insida. (Innan montage, med löst hängande vajrar)

Maskin och pendel

Maskinens generator tjänstgör även som fläktmotor vid start. Fläkten sitter direkt på generatoraxeln och generatorn sitter därför väl kyld i luftflödet till masten. Fläkten är inte optimerad avseende ljudnivå eller verkningsgrad. Generatorn drivs av en hydraulmotor. Hydraulmotorn matas från två pumpcylindrar vilka aktiveras av pendelns rörelse. Vid pendelns vändlägen kommer matningen från en hydraulackumulator.

Efter motorn går hydrauloljan via filter till en tank innan återcirkulering.



Bild 5. Pendel, generator, fläkt och hydraulik.

Bilden visar pendeln innan masten monterats. Generatorn med fläkten i nedre änden och hydraulmotorn överst är monterad på den tvärgående plåten mellan pendellagringarna. Matningsslang, returslang samt elkablage till generatorn framgår, liksom hydraulcylinder och hydraulackumulator.

Vid drift leder en konisk kanal luften från fläkten till det cirkulära hålet i montageplåten. (Kanalen innesluter alltså generator och hydraulmotor). På bilden syns också pendelns motvikt, det betongfyllda tråget under fläkten, samt montageplåten (överst) där masten och spjällmekanismen sitter.

Mastens funktion

Maskinens arbetssätt simuleras och optimeras i ett för ändamålet skapat program, en virtuell maskinmodell.

Data från vindtunnelförsök enligt Lockwood³ har omvandlats till polynom och bildar underlag för momentana 2-dimensionella beräkningar enligt bladelementmodell, där jämvikt råder mellan aerodynamisk last, acceleration och utfört arbete. Den aerodynamiska konsekvensen av att rotationshastigheten varierar är inte behandlad i modellen. Bladelementets acceleration leder till en relativ rotation mellan elementet och friströmmen. Resulterande kraft borde kunna förutsägas enligt principen för magnuskraft och blir i så fall motriktad accelerationen. Effekten för systemet blir ökad tröghet eftersom även mastens retardationscykel motverkas. Beloppet på Magnuskraften är lågt vid de aktuella relativa rotationerna, och har utelämnats.

Lyftkraften och luftmotståndet för en ensam spalt varierar med anfallsvinkel och impulscoefficient. Mastens dimeter anpassades så att Reynolds tal vid normalvind skulle motsvara vindtunnelförsöken. I Lockwoods försök användes emellertid väldigt tunna spalter, $h/d=0,001$, vilket ger dåligt energiutbyte. Ur energisynvinkel är det gynnsamt att åstadkomma luftstrålen vid lägsta möjliga hastighet, maximal spalthöjd. CFD-analys gjordes med aktuell spalthöjd och cylinderdiameter. Baserat på dessa och tillverkningstekniska ställningstaganden valdes spalthöjden 20 mm, $h/d=0,017$. Stor möda lades vid utformning av kanalen fram till spalten, med kvalificerad spjällgeometri och rejäl radie i övergången till mantelytan.

Spaltkonfiguration valdes med MD Helicopters NOTAR-system som förebild. Två spalter ger fördelen att den lokala spalthöjden halveras för en given total impuls, samt att respektive spalt skall upprätthålla en betydligt kortare aktiv yta, vilket begränsar konsekvensen av störningar nedströms från spalterna. Första spalten räknat nedströms från stagnationspunkten placerades efter simulering i den virtuella maskinmodellen och med hänsyn till risken för stall vid vändlägena. Andra spalten placerades så långt nedströms som möjligt med hänsyn till symmetri och spalterna på motsatt sida.

Masten byggdes av numeriskt tillskurna cellplastbitar (EPS) som laminades med tunn aluminiumplåt och armerades i längsled med aluminiumstänger. Metoden gav stor formfrihet, mycket låg vikt och enkel sammanfogning. Svaga delar som det tunna godset vid spalterna förstärktes med epoxy och väv. Övriga ytan lämnades obehandlad. EPS bryts ned i solljus, men livslängden bedömdes tillräcklig för de inledande försöken. Ytan är förhållandevis grov.

Masten slutgiltiga vikt blev större än beräknat, detta korrigerades vid montaget med en viktökning även i motvikten.

Luftflödet till spalterna verifierades genom mätning av statiskt tryck i masten och jämförelse med relevanta fläktkurvor.

Försök med den färdiga maskinen

1. Egensvängning

Omedelbart efter montage parkerades masten i vertikal position genom blockering av hydraulcylindrarna.

Masten uppvisar klassisk skorstenssvängning som kan väntas med Reynolds tal på $3.3 \cdot 10^5$ vid vindhastigheten 5 m/s. Strohaultalet enligt diagram blir cirka 0,2 ($f_d/U_\infty \approx 0,2$) vilket ger frekvensen 1.2 Hz på virvelavlösningarna. Mastens svängningar påvisade behovet av parkeringsfunktionen och masten parkeras alltid med fri lutning undan vind mellan försöken.

2. Programstyrd drift.

Systemen för girautomatik, parkeringsautomatik och vindstyrd inkoppling/urkoppling har provats men inte verifierats i drift. Ytterligare programmering krävs.

3. Givare för vind och vindriktning.

Givare för vind och vindriktning är placerad över girlagringen på maskinens högsta ej pendlande punkt 3,5 m över marken. Erfarenheterna visar att givaren måste placeras högre.

4. Girstabilitet

Maskinen har en stark tendens att gira undan vind när masten lutar maximalt. Girmaskineriet är inte självhämmande, istället används en konventionell motorbroms för att hålla maskinen i rätt position. Bromsen är nödvändig för drift vid vindhastigheter över cirka 6 m/s. Vid parkering kopplas motorbromsen bort och masten kan därmed driva till den position som ger lägst luftmotstånd.

5. Girkänslighet

Masten är förhållandevis okänslig för vindriktningen, på det viset att det är enkelt att utifrån vindgivare ställa maskinen rätt. Med rätt menas att masten vid visuell kontroll pendlar lika fort åt båda hållen.

6. Fläktkonfiguration

Fläkten som matar spalterna kan kopplas in 6-poligt, 4-poligt eller via frekvensomriktare, fast då inte med generatorfunktion.

6-polsdriften visade sig ge för lågt luftflöde och kopplades bort.

7. Normal drift

Med fläkten på normal effekt pendlar masten en cykel på 16-18 sekunder vid vindhastigheter runt 5 m/s. Ökat fläktvarvtal ger kortare cykeltid.

Under delar av arbetsslaget ökar hydraultrycket tillräckligt för att fläktens varvtal skall öka vilket påvisar att effekt återmatas till fläkten. Fläktljudets frekvens ökar tydligt. Uteffekt från masten har inte kunnat mätas.

8. Lätt vind och stiltje

Maskinen går jämnt så länge vinden har en bestämd riktning och inte är byig.

Vid absolut stiltje rör sig pendeln mycket sakta, vilket sätts i samband med reaktionskraften från luftflödet i spalterna.

9. Vindhastigheter över märkvind.

Vid försök i vidhastigheter 8-10 m/s gick masten långsammare än vid lättare vind, 4,5-5 m/s. Vid dessa högre vindhastigheter arbetade masten ungefär som när fläkten kördes i 6-polsdrift vid lätta vindar.

Iakttagelserna stämmer med konstruktionsprincipen att vindturbins effekt skall kunna styras med fläkteffekten.

10. Nettoproduktion

Maskinens transmissionslösning har en lägsta effekt, under vilken effektmätningar inte kan utföras. Pendlingens cykeltid är avsevärt högre än tänkt med en effekt avsevärt under transmissionens lägsta effekt. Projektets inriktning har efter drifttagningen blivit att lösa frågetecknen runt den aerodynamiska funktionen.

11. Försök med ökat luftflöde

Försök med ökat luftflöde till spalterna har utförts genom att öka antalet fläktblad från fyra till åtta. Flödet ökar med cirka 50%. Cykeltiden för pendlingen sjunker.

12. Försök med ulltrådar på mantelytan.

Trådarna indikerar oordnat flöde redan efter första spalten, vilket står i strid med konstruktionsprincipen.

13. Försök med endast en aktiv spalt per sida.

Försök har utförts med såväl första som andra spalterna övertejpade. Med andra spalterna övertejpade går masten snabbare vid ändlägena, med första spalterna övertejpade går masten klart sämre.

14. Försök med förändrad spaltgeometri.

En tunn aluminiumplåt monterades så att spalthöjden halverades och väggen mellan spalt och mantelyta blev tunn.

Märkbar sänkning av pendelfrekvensen. Svårigheter med att fästa plåtarna och få dem att sitta kvar på den flexibla masten gjorde att försöket ej kunde fullföljas.

15. Försök med förändrad utväxling.

Ett fåtal försök har utförts med hydraulkretsen kopplad mot en fristående generator med ett annat varvtal än fläktens. Syftet är att mäta mastens utförda arbete separat. Även vid lägre hastigheter levererar masten för lågt moment.

16. Maskinens väderkänslighet.

Maskinen har främst provats i uppehållsväder.

I maskinens pendelfrekvens påverkas inte märkbart av regn. Om maskinen är parkerad när det regnar, tenderar masten att luta mer än normalt.

Masten kan luta mer än 90 grader från vertikallinjen. Det finns därmed möjlighet för vattenansamling i masttoppen när masten ligger helt horisontellt vid hård vind och regn.

Erfarenheterna hittills antyder att vattenansamling i masten inte är något problem.

Inga provkörningar har utförts i snöfall. Vid snöfall fäster snö på mastens yta och förändrar mastens jämvikt. Masten går till parkeringsläge i horisontell position.

Som mest har ett decimetertjockt snötäcke legat på masten. På mastsektionens högsta punkt låg vid observationstillfället ungefär lika mycket snö som genomsnittligt snödjup på marken. Snötäcket på masten tunnades av på båda håll i tangentiell led och var borta vid 45-graderslinjerna på respektive sida.

Masten bör konstrueras så att lutningen vid parkeringsläge alltid är större än 0 grader. Mastens projicerade yta och tillhörande belastning vid storm kan utgöra beräkningsunderlag för mekaniskt stopp vid en viss vinkel. Om denna vinkel är tillräckligt stor, förebyggs snöbeläggning i viss utsträckning.

Pendelns motvikt har vid försöken haft en överskottsmoment runt pendelaxeln på ca 10%.

Ett ökat överskott i motvikten gör att masten mindre i parkeringsläget och därmed samlar mindre nederbörd på mantelytan.

17. Kostnadsbild för serieproduktion.

En kopia av prototypen skulle färdiguppställd kosta cirka 300 000 SEK exkl. Moms. Baserat på erfarenhetsvärden, borde en serie om 10 maskiner ge ett slutkundspris på 250 000 SEK inkl. Moms.

Analys av den aerodynamiska principen

Det har länge varit känt att en kropps lyftkraft i en luftström kan förändras genom att förändra gränsskiktet. År 1904 producerade Prandtl lyftkraft på en cirkulär cylinder genom att suga bort gränsskiktet på övre ytan. I praktiken är det lämpligare att ge gränsskiktet ny fart genom att blåsa eftersom smuts och föremål har en tendens att täppa till sugande munstycken. Kontroll av gränsskikt genom att blåsa luft genom en tunn tangentiell spalt introducerades 1921.

Luftstrålen fortsätter längs ytan med oförändrad hastighet till dess den börjar blandas upp med omgivande luft. Omgivande luftström bildar gränsskikt mot luftstrålen och de nya hastighets- och tryckfördelningarna gör att omgivande flöde följer luftstrålen till dess luftstrålen lämnar sin yta.

Om ytan är krökt som på en cylinder, tillkommer den så kallade Coanda-effekten. För såväl stillastående som rörlig omgivande luft gäller att om luftstrålen skulle försöka separera från sin yta, bildas en liten luftvirvel mellan strålens inre gränsskikt och ytan varvid det statiska trycket sjunker lokalt och återför luftstrålen till ytan. För en luftstråle i jämvikt som strömmar i tangentiell led längs en krökt yta, balanseras den radiella tryckskillnaden med centrifugalkraften⁴.

Bild 6 och 7 (ref 4) visar de relevanta parametrarna vid analys av strömning ur en spalt.

Allmänt gäller för cylindrar att vid Reynolds tal under cirka 200 000 råder laminär strömning till separationspunkten och vid tal över cirka 400 000 separerar det laminära gränsskiktet tidigt och övergår i ett turbulent gränsskikt som separerar mycket senare⁵. I mellanliggande värden kan ytjämnhet och turbulens i friströmmen ha stor inverkan.

Fjorton olika vindtunnelförsök med analyser har identifierats, Lockwood inkluderad. De flesta är utförda under 60-talet, ett 1972 (NASA CR2114)⁴ och det senaste av Zandieh och Leishman⁶ 1993, med fokus på cykliskt varierande luftström. Heric⁷ gjorde även försök men cykliskt varierande friström.

Merparten av försöken är utförda i spannet $195000 < RE < 415000$. Zandieh och Leishman hanterade detta faktum utförligare än övriga artiklar i underlaget. Man noterar att $RE = 220000$ baserat på cylinderdiametern och att man vid inledande försök har laminär strömning vid eller nära spalten.

När den laminära strömningen separerar skapas ett tjockt gränsskikt som sedan tunnas ut i det följande turbulenta gränsskiktet. Alla omständigheter som ökar gränsskiktets tjocklek reducerar nyttan av spaltens luftström¹. Av detta skäl placerades band (150-grade grit) i området med laminärströmning för att skapa en kontrollerad övergång till turbulent flöde långt uppströms från spalten.

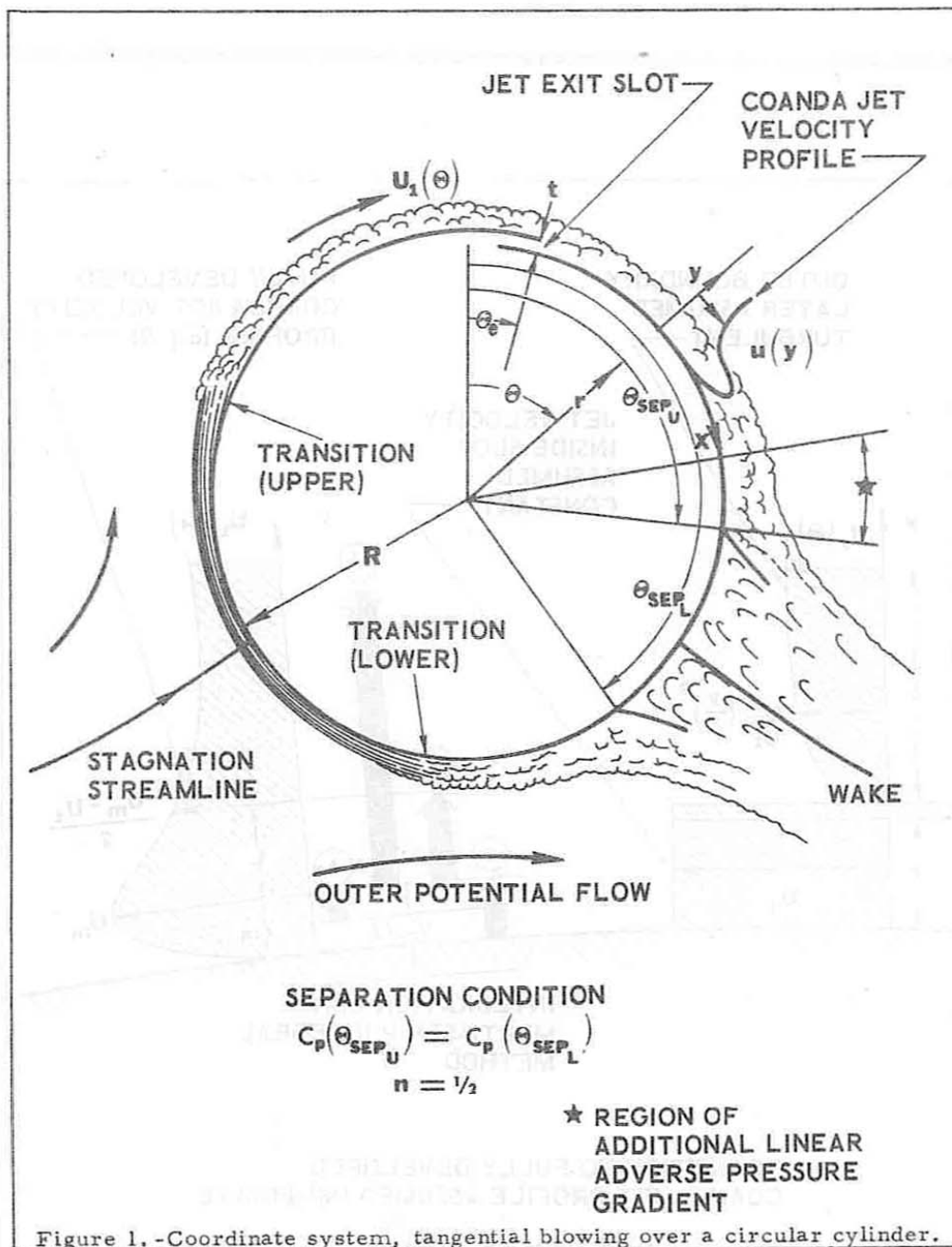


Bild 6 strömning runt cylinder med cirkulationsstyrning.

Levinsky och Yeh⁴ hanterar i sin modell inkommande gränsskikt genom att relatera luftstrålens maxhastighet efter mötet med mantelytans gränsskikt till luftstrålens hastighet inne i spalten, se bild 7.

Keshavan⁸ visar att vinkeln mellan spalten och vinkeln där luftströmmen separerar endast beror på spaltens position och luftstrålens impulscoefficient. Verifierat genom jämförelse av mätningar enligt Herric vid $Re=294000$ och 450000 .

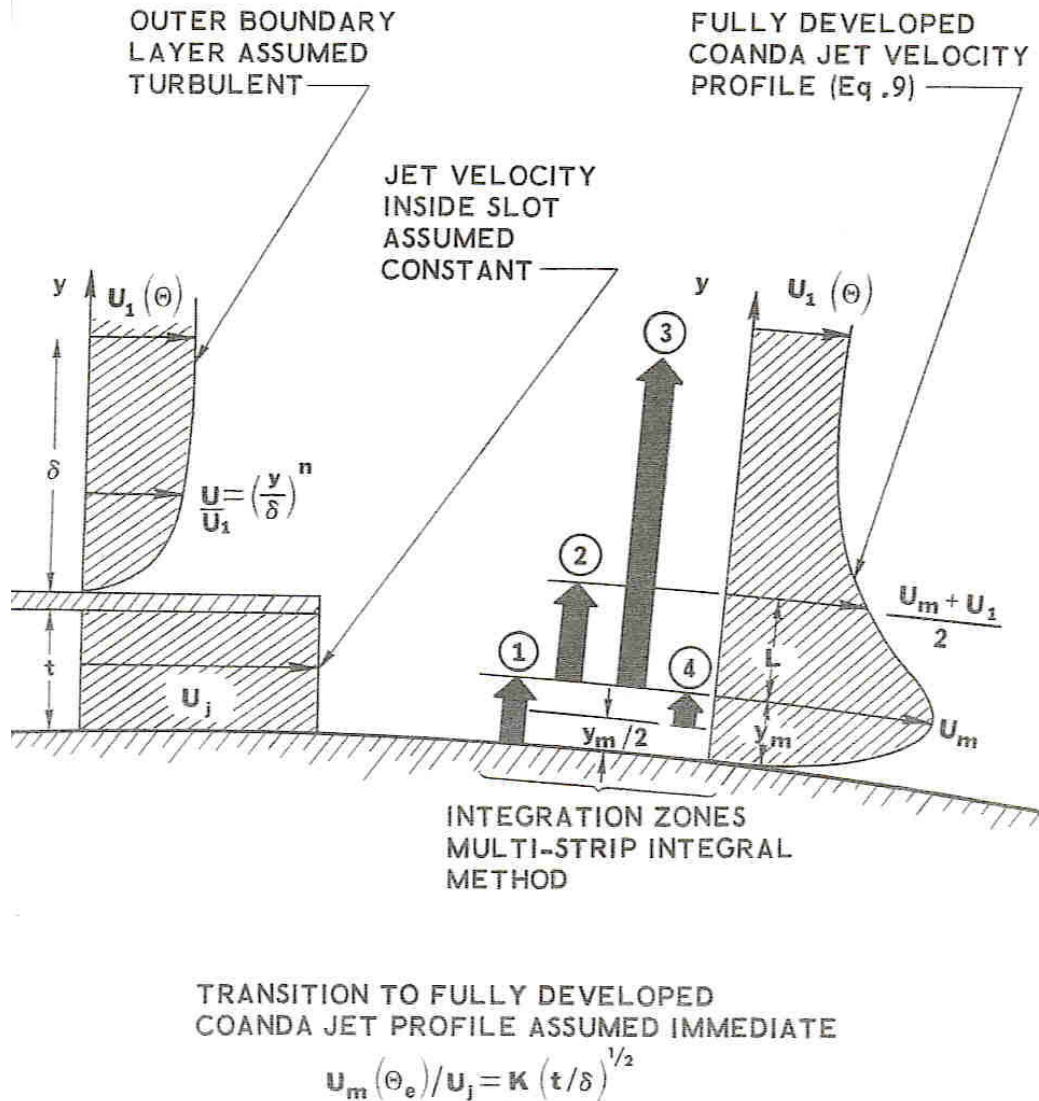


Figure 2. -Multi-strip integration zones for Coanda jet profiles.

Bild 7 Översikt och uppställning av parametrar för övergång till Coandaströmning

Dunham² har jämfört och vägt ihop elva försök och utformat enkla riktlinjer för dimensionering. För att underlätta beräkningar enligt bladelementmodell, gjordes en empirisk korrelation av alla tillgängliga experiment i ekvationsform. Dessa underlag användes sedermera till försök med en lyftande rotor⁹. Dunham utgick från parametern impulscoefficient C_i som traditionellt används.

Vid jämförelser mellan olika försök med CC-cylindrar fann han emellertid denna beskrivning av impulscoefficienten oriktig.

En modifierad impulscoefficiënt stämmer bättre med försöksdata:

$$C_j' = 0,006 * C_j / (\delta + 9E-6 / \delta) \quad (\text{Dunham})$$

$$C_j = T / q * S \quad (\text{Traditionell})$$

$$\delta = h/d$$

Där

T = Statisk reaktionskraft (N)

q = Friströmmens dynamiska tryck (Pa)

S = Projicerad yta hos cylindern (m^2)

h = Spalthöjd (m)

d = Cylinderdiameter (m)

Dunham gör följande resonemang:

En parameter som kan förmodas påverka effektiviteten hos en luftstråle i detta sammanhang är hastighetsförhållandet, dvs. luftstrålens hastighet/lokal strömningshastighet vid spalten.

Detta förhållande är ungefär proportionellt mot $\sqrt{C_j / \delta}$.

Ett brett optimum finns vid $\delta = 0,003$, här har impulscoefficiënten primär inverkan.

Över detta värde förefaller hastigheten i spalten ha en dominerande effekt och vid $\delta < 0,003$ har massflödet dominerande inverkan.

Mastens geometri, vad bör ändras ?

Dunham anger optimal spalthöjd till $0,003 * d$ med avseende på aerodynamisk verkningsgrad respektive $0,0052 * d$ med avseende på energieffektivitet.

Den valda spalthöjden $0,017 * d$ ger 66% lägre verksamt impulscoefficiënt för givet massflöde i luftstrålen än motsvarande spalt med höjden $0,003 * d$.

För att andra spalten skall göra nytta, måste första spaltens luftstråle följa mantelytan utan separation hela vägen fram till och förbi andra spalten, där gränsskiktet återigen får ny fart² av impulsen från andra spaltens luftstråle.

Baserat på diagram enligt Keshavan⁸ skall spalt ett leverera en verklig impulscoefficiënt på minst 0,083 för att nå 37° nedströms från sin utgångspunkt på 115° se bild 3.

Tidigare har vi sett att vald spalthöjd ger 66% lägre utbyte än optimal design.

Impulscoefficiënten baserad på fläktflödet skall alltså med spalthöjden 20 mm aldrig vara lägre än 0,24.

Försöksmaskinens spaltkonfiguration gör att andra spalten knappast levererar något utbyte alls och att halva fläkteffekten därmed går till spillo, se även iakttagelserna vid försök med ulltråd på mantelytan och försöken med övertejpade spalter.

Väggen mellan inkommande mantelyta och spalt är 6 mm tjock eller 0,3 spalthöjder.

De flesta bilder som är tillgängliga på andra cylindrar visar tunna vassa kanter.

Hela mastens mantelyta är grov, vilket med säkerhet ger turbulent strömning vid vindhastigheter över 4 m/s, $RE = 267000$. Gränsskiktet är troligen tjockt i jämförelse med Ref 6, som använde grova remsor på en i övrigt slät yta. Rörelsemängden i gränsskiktet nedströms från spalten är mindre än summan av rörelsemängderna (luftstråle + gränsskikt mot friström) innan spalten. Ett tjockt gränsskikt innehåller mer massa än ett tunt och hastighetshöjningen i gränsskiktet blir därmed lägre vid bibehållen rörelsemängd.

Slutsatser

Projektets första mål var att samla in erfarenheter från provdrift.

De erfarenheter som gjorts stöder turbinens funktionsprincip.

Maskinens aerodynamiska utförande gett betydligt lägre verkningsgrad än tänkt och därför har försök som är beroende av positivt energiutbyte inte genomförts.

Som andra mål skulle projektet etablera en projektportfölj med framtida FoU-projekt.

Kunskapsnivån beträffande mastens aerodynamiska utförande har höjts avsevärt.

Flera nya parametrar med inverkan på maskinens verkningsgrad har tillkommit.

Projektet har resulterat i ett stort antal förslag på alternativa detaljutföranden och förbättringar.

Tredje målet var att verifiera tänkt styr och reglerprocess.

Ett tydligt samband mellan impulscoefficient och pendlingshastighet har observerats.

Masten växlar rotationsriktning med hjälp av en enkel spjällmekanism. Växling av pendlingsriktning står i rimlig proportion till den totala cykeltiden. Riktningsväxlingen vid fullpresterande aerodynamik har inte kunnat verifieras eftersom processen är beroende av att masten belastas av energiuttag. Enligt Herric⁷ sker aktiveringen av en yta på bråkdelar av en sekund, vilket borde gälla även för masten.

Fjärde målet var att etablera en plattform av mjuk kunskap om installationen.

Projektet har fått enbart positiva reaktioner.

Fläkten måste byggas i ett tystare utförande än på prototypen för att inte vara störande i längden.

Projektets femte mål var att på ett säkert sätt kunna köra oövervakade försök.

Inga oövervakade försök har utförts.

Projektet syftade till att inhämta kunskap för utveckling av en ny sorts vindturbin.

Den valda metoden att uppföra en enkel försöksmaskin har gett en bred bild av turbinens egenskaper. Flera viktiga frågor är fortfarande efter projektet obesvarade, främst maskinens verkningsgrad. Dessa kommer förhoppningsvis att få sina svar i och med bygget av nästa mast, då försöksanläggningen i enighet med projektets intention kommer att tjänstgöra som plattform för vidare experiment och utvärderingar.

Delrapporter

Två delrapporter har avlämnats.

Rapport 1 Juni 2003

Rapport 2 Oktober/November 2003.

Tack till

Projektet stöddes av Vindforsk och kunde därmed tidvis drivas på heltid.

Projektledaren vill rikta ett tack till Magnus och Kjell-Arne Frick för upplåtande av verkstad och uppställningsplats, institutionen för strömningsmekanik vid LTH för vänligt bemötande och rådgivning, till Johan Hansson för programmeringshjälp, till Jan Rydén på GSM industrier för hjälp med maskiner och bearbetning samt övriga leverantörer stora som små.

Den 11 mars 2004

Lars Östholm

Projektledare Wintree AB

Referenser

-
- ¹ Wood and Nielsen "Circulation control airfoils as applied to Rotary wing aircraft" Journal of Aircraft, Vol 23 No 3, 1986 pp 865-875
- ² Dunham. J. "Experiments towards a circulation-controlled lifting rotor Part 1" The aeronautical journal, jan 1970 pp 91-103
- ³ Lockwood V.E. "Lift on a circular cylinder by tangential blowing from surface slots" NASA TN D-244 May 1960
- ⁴ Levinsky and Yeh. "Analytical and experimental investigation of circulation control by means of a turbulent coanda jet" NASA CR-2114 September 1972
- ⁵ Dunham. J. "A theory of circulation control by slot blowing, applied to a circular cylinder" J. Fluid Mech. (1968), vol. 33, part 3 pp 495-514.
- ⁶ Zandieh and Leishman "Boundary layer and pressure measurements on a circular cylinder with unsteady circulation control" AIAA Journal Vol. 31, No. 10 pp1769-1776, October 1993
- ⁷ Herric, G.E. "Wind tunnel tests on Circulation controlled circular cylinders in steady and heaving motion." Ph.D. thesis, Univ. of Southampton, England 1972.
- ⁸ Keshavan N.R. "Separation of turbulent boundary layer on a lifting cylinder" AIAA Journal vol 13 No 2 1975 pp252-253.
- ⁹ Dunham. J. "Experiments towards a circulation-controlled lifting rotor Part 2" The aeronautical journal, feb 1970 pp 175-186

WINTREE

SMÅ VINDKRAFTVERK