

Måling på
DANmark 25 150 kW
Lavvindsmølle med trævinger

Af
Jørgen Lakkenborg
og
Bjarne Jensen

ISBN 87 88660 99 0

FC-tryk

November 1990

INDHOLD

	Side
Symboliste	
1. Indledning	1
2. Data for møllen	2
3. Placering af mølle og meteorologimast	4
3.1 Geografisk placering	4
3.2 Lokale forhold	5
4. Instrumentering	6
4.1 Sensorer	6
4.2 Dataopsamlingsudstyr	7
4.3 Software	7
5. Måleforløb	9
5.1 Opsamlede data	9
5.2 Målingens forløb	9
5.3 Måleserier	10
6. Resultater fra effektmålingen	11
6.1 Behandling af effektdata	11
6.2 Effektkurve	12
6.3 Virkningsgrad	14
6.4 Beregnet årsenergiproduktion	17
7. Meteorologiske data for målingen	18
7.1 Vindhastighedsfordeling for måleperioden	18
8. Konklusion	19
Referencer	20
Appendix:	
A. Kalibreringsattest for kopanemometer 1.	21
B. Kalibreringsattest for kopanemometer 2.	24
C. Tidsspor fra datafilerne	27

Symbolliste

A_r	Overstrøget rotorareal ($=R^2\pi$)	$[m^2]$
B	Lufttryk	$[hPa]$
C_e	Elektrisk virkningsgrad	$[-]$
C_p	Mekanisk virkningsgrad	$[-]$
I	Turbulensintensitet	$[-]$
P_I	Energiflux gennem rotorarealet	$[kW]$
P_S	Nettomiddeleffekt ved standardbet.	$[kW]$
P_T	Aktuel nettomiddeleffekt	$[kW]$
ρ_S	Luftens standardmassefylde	$[kg/m^3]$
ρ_T	Luftens aktuelle massefylde	$[kg/m^3]$
s	Spredning på vindhastighed	$[m/s]$
T	Absolut lufttemperatur	$[K]$
v	Samplet vindhastighed	$[m/s]$
\bar{v}	Middelvindhastighed i en midlingsperiode	$[m/s]$
\bar{v}_H	Vindhastighed i navhøjde	$[m/s]$
\bar{v}_A	Vindhastighed i anemometerhøjde	$[m/s]$
Z_H	Navhøjde	$[m]$
Z_A	Anemometerhøjde	$[m]$

1. Indledning

Nordvestjysk FOLKECENTER for Vedvarende Energi (FC) har siden 1984 arbejdet med udvikling af en serie el-producerende vindmøller i et bredt størrelsesspekter - DANmark-serien.

Til dato består serien af fem grundtyper: DANmark 11, 17, 19, 22 og 25, hvor nummeret angiver (en tilnærmet) rotordiameter. Hver mølletype kan sammensættes ud fra et bredt komponentsortiment, således at mølleserien rækker fra effektkapacitet på 20 kW op til 270 kW for den største DANmark 25 mølle.

Hver grundtype bliver testet efter gældende retningslinier og derpå typegodkendt. Møllerne er beskrevet i byggehåndbøger, som kan rekvireres på FC. Byggehåndbogen indeholder alle oplysninger, der er nødvendige for at producere den pågældende mølle. FC fordrer en samarbejdsaftale før produktion kan finde sted.

Nærværende testrapport beskriver målinger på FC's DANmark 25 lavvindsmølle med 13 m massive trævinger fra ingeniør og tømrermester Viggo Øhlenschläger. Målingerne er udført som en del af et projekt, hvis formål er, at undersøge om det er teknisk og økonomisk forsvarligt at fremstille vinger i træ i en udførelse til lavvindsbrug og med en nyudviklet fastgørelsesmetode, som er udformet specielt med hensyn til kombinationen træ/stål. Projektet er støttet af Teknologirådets Styregruppe for Vedvarende Energi.

Målingerne er udført på møllen 500 m fra FC og efter IEA-rekommendationens (ref. [1]) anbefalinger i så vid udstrækning som muligt. Hvor der er afvigelser, er de anført i rapporten.

Der er i perioden 28/6-1990 til 19/9-1990 udført effektmålinger på møllen i 682 timer. Måledata fra 338 timer opfylder de forskellige krav til brugbarhed (vindretning OK mv.). Bestemmelsen af effekt- og Ce-kurve kan således baseres på 2029 målepunkter á 10-min. middelværdi, hvilket er lidt under IEA-rekommendationens krav på minimum 3000 målepunkter i alt.

Luftbremsernes effektivitet er ikke afprøvet i dette måleprojekt.

2. Hoveddata for den målte mølle

Beskrivelse

Vindmøllen er en DANmark 25 konstruktion i en modificeret udgave som lavvinds-forsøgsmølle. Møllen er udviklet og bygget af Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi.

Gearkassen er en kompakt integreret Valmet planetgearkasse, der er stillet til rådighed for forsøgsprojektet af Valmet OY, Finland.

Vingerne er massive limtræsvinger med cylindrisk rod og indlimede centrale trækbolte. Vingerne fastholdes i det svejste/boltede nav i hver sit cylindriske rør med hydrauliske cylindre og fæstning af de indlimede trækbolte.

Rotor

Antal rotorblade	3
Opgivet rotordiameter	26.0 m
Overstrøget rotorareal	530.9 m ²
Opgivet rotoromdrejningstal	30.6 RPM (synkront)
Opgivet tipvinkel	0°
Rotoromdrejningsretning	Mod uret set fra luv vindside
Hældning af rotoraksel (tilt)	6°
Koning	0°
Navhøjde	31.5 m

Rotorblade

Type	Fræst trævinge (Dansk Trævinge Industri)
Profil	Inderst: LS(1). Yderst: NACA 63-2
Længde af rotorblad	12.5 m
Korde ved rod	1.680 m
Korde ved tip	0.900 m
Bladvridning	20°
Luftbremse	Kassespoiler

Gear

Type	Valmet planetgear S2PG-670WU
Udveksling	32.7
Diameter af hovedaksel	Ø 240 mm

Generator

Type	Brook C 315 MD
Nominel effekt	150 kW
Netspænding	3 faset 380 V
Synkront omdrejningstal	1000 RPM

Krøjesystem

Type	Indvendigt fortandet friktionsdrejkrans
Krøjemotorer	2 stk. elektriske m/snekketræk
Krøjhastighed	ca. 0.6°/sek

Bremsesystem

Type	Mekanisk skivebremse med to kalipre monteret på generatorakslen.
Aktivering	Negativ, dvs. bremsen aktiveres, når hydrauliktrykket fjernes.

Kontrolsystem

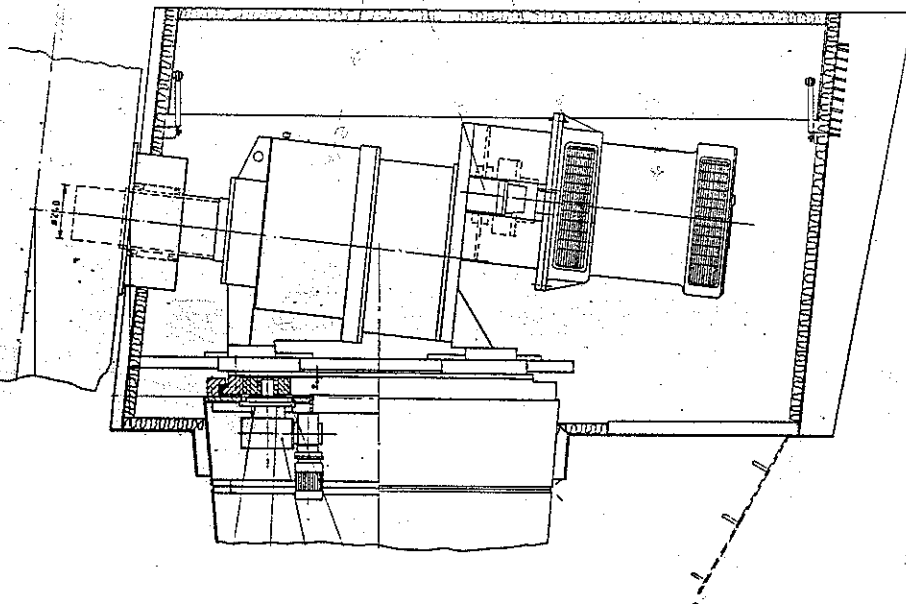
Type	HEMI/Orbital mikroprocessorbaseret styresystem med thyristorindkobling af generator.
------	--

Tårn

Type	Konisk rørtårn
Antal tårnsektioner	3

Vægte

Vægt af én vinge	1100 kg
Vægt af nav	3500 kg (?)
Vægt af tårn	14.5 tons
Vægt af generator	1170 kg



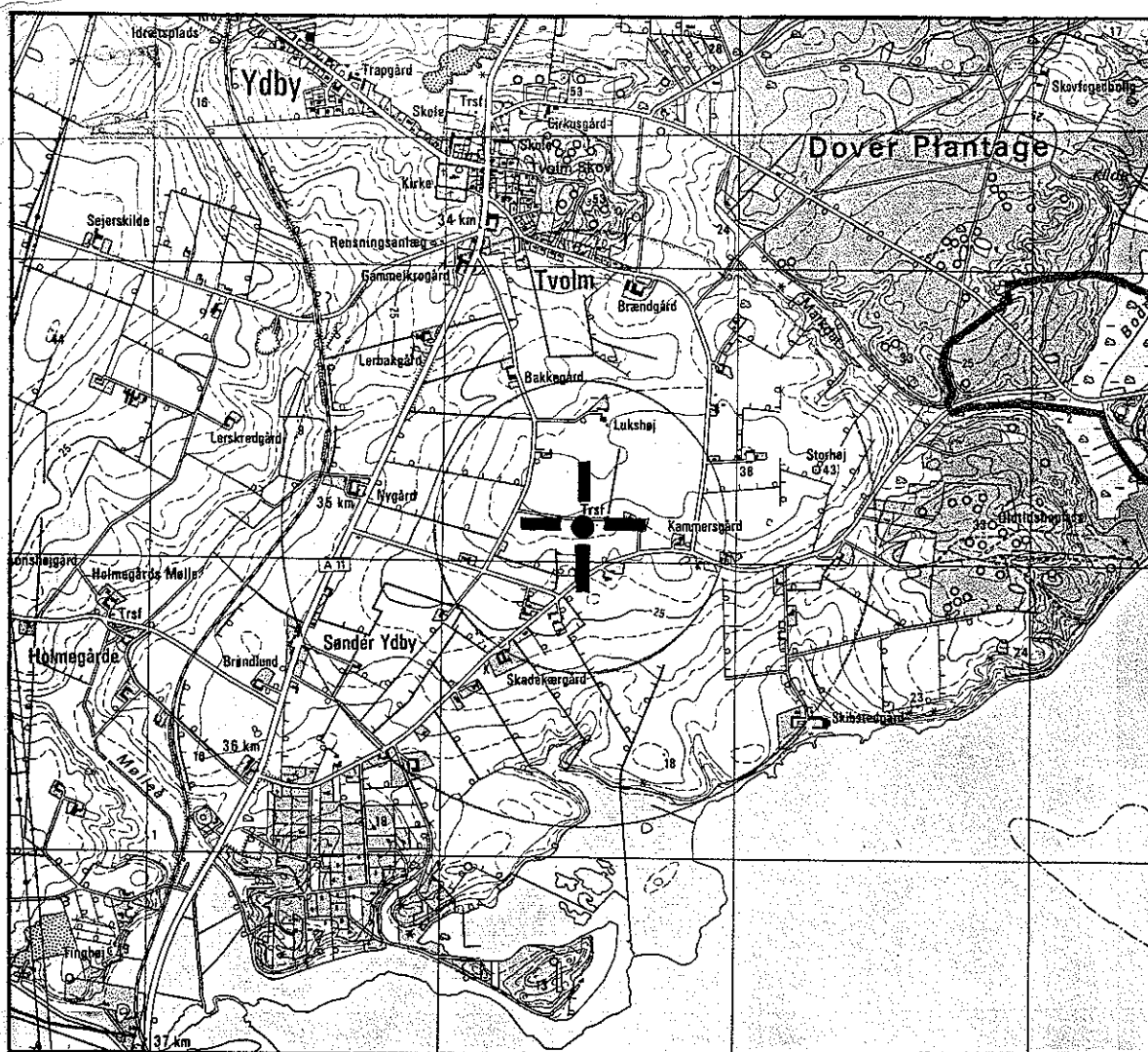
Figur 2.1 DANmark 25 150 kW lavvindsmølle med trævinger

3. Placering af mølle og meteorologimast

3.1 Geografisk placering

Den målte mølle er placeret tæt ved Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi (FC), Kammergårdsvej 16, Sdr. Ydby, 7760 Hurup Thy. Fra FC er der ca. 500 m til møllen i nordøstlig retning jvf. figur 3.1.

Møllen ejes af FC og er opført som forsøgsmølle i forbindelse med et trævingeprojekt, kapitel 1.



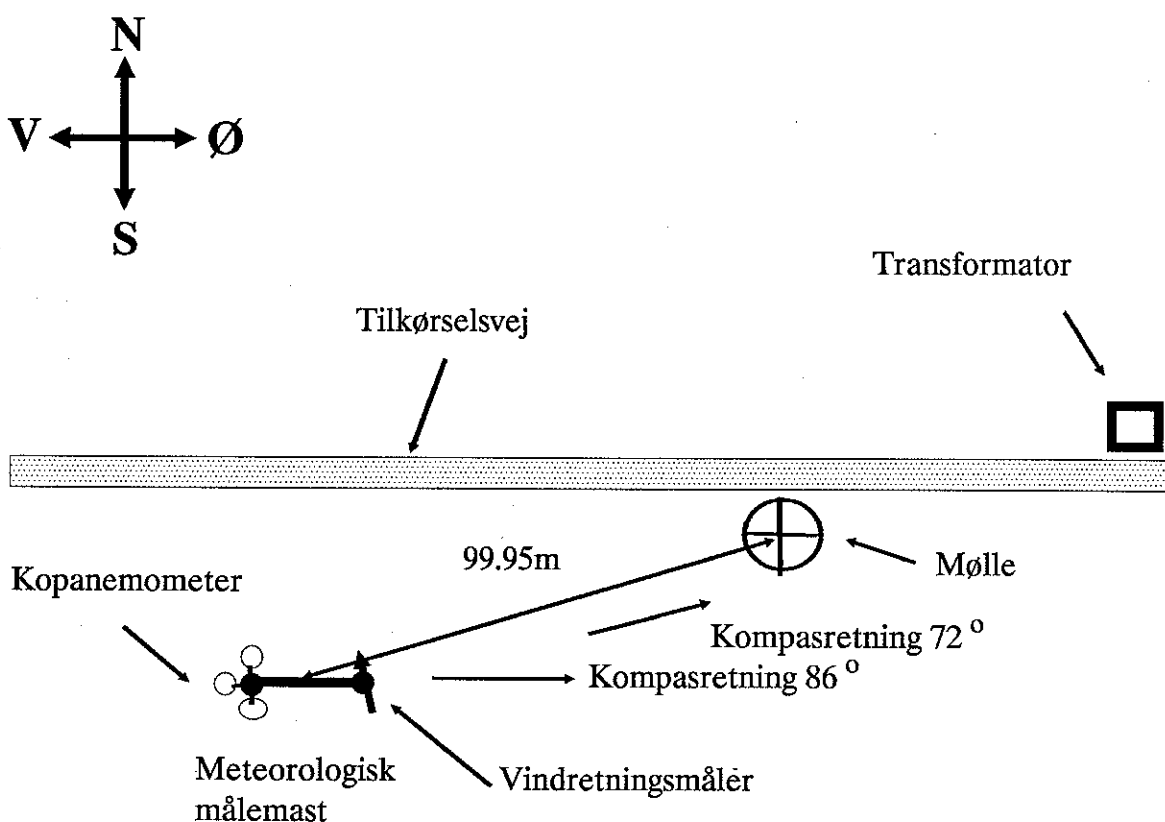
Figur 3.1 Møllens geografiske placering

3.2 Lokale forhold

På nedenstående skitse er forholdene omkring mølle og meteorologisk målemast vist. Målemasten er en 31 m høj bardunafstivet aluminiumsmast, som er placeret 99.95 m fra møllens centrum i den anførte kompasretning på figur 3.2. Denne placering er i overensstemmelse end IEA-rekommendationens (ref. [1]) anbefaling, idet den anfører at masten bør placeres mellem 2 og 8 rotordiametre fra møllens yderste omkreds.

Møllens navcentrum befinder sig 32.3 m over terrænen (referenceplanet). Målebommens højde over møllens referenceplan er 30.7 m.

Målinger udført med vindretningen i den vestlige sektor 180-360° kan benyttes, idet vindmøllen her er frit anstrømt under alle forhold.



Figur 3.2 Skitse af lokale forhold omkring møllen

4. Instrumentering

Nedenfor beskrives kort det benyttede målesystem. Et principdiagram over systemet er vist på figur 4.1

4.1 Sensorer

Vindhastighed

Vindhastigheden måles i navhøjde på den meteorologiske målemast. Kopanemometret er anbragt på den ene ende af en 1.50 m lang målebom af 30x30 kvadratisk Al-profilrør. Målebommens kompasretning i toppen af målemasten er vist på figur 3.2.

Der er i måleperioden benyttet to forskellige kopanemometre, da det første havarede efter knapt 2 mdr's målinger.

Kopanemometer 1 er et Helleskov kopanemometer, som afgiver 6 optoelektrisk registrerede impulser pr. rotation. Kopanemometret blev før målingen kalibreret hos Skibsteknisk Laboratorium den 24/1-1989. (Sporbart kalibreringscertifikat nr. 1251.89025.00, Appendix A).

Kopanemometer 2 er af Risø-typen fra ED-Service. Denne type afgiver for hver omdrejning 2 impulser, som detekteres af en reed-switch. Kopanemometer 2 er ligeledes kalibreret hos Skibsteknisk Laboratorium den 24/1-1989. (Sporbart kalibreringscertifikat nr. 1251.89025.00, Appendix B).

Kalibreret måleområde, anemometer 1: 2.8 til 20.3 m/s (9.6-69.5 Hz).
Standardafvigelse på kalibrering på do.: 0.0841 m/s.

Kalibreret måleområde, anemometer 2: 2.8 til 20.3 m/s (4.2-32.9 Hz).
Standardafvigelse på kalibrering på do.: 0.0424 m/s.

Vindretning

Vindretningsgiveren er anbragt på målebommen i den modsatte ende af kopanemometret i den meteorologiske målemast. Der benyttes en vindretningsgiver baseret på et hall-effekt resolverprincip, hvor sensoren afgiver to spændinger proportional med hhv. cosinus og sinus til vindretningen. Vindretningsgiveren er kalibreret *in situ* ved hjælp af dataopsamlingsystemet.

Lufttemperatur

Lufttemperaturen måles i navhøjde på den meteorologiske målemast med en PT100 sensor placeret i skygge. Signalet føres til en transmitter via et 3-leder kabel, hvor den tredje leder benyttes til kompensation for kabelmodstanden mellem sensor og transmitter. Temperaturmålekæden er kalibreret *in situ* under anvendelse af termometer, dataopsamlingsystem og (is)vand.

FC-kalibreret måleområde: -5 til 35 °C.

Klasse: 0.5

Luftryk

Luftrykket måles med en anaeroid tryktransmitter, der er anbragt sammen med dataopsamlingsudstyret nederst i mølletårnet. Trykket reduceres efter standardatmosfæren til navhøjde (ca. 0.12 mbar/m i den nederste del af atmosfæren).

Fabriksjusteret måleområdet: 800 - 1200 hPa

Klasse: 0.5

Effektmålesystem

Den aktive effekt måles med en integreret effekttransmitter, der strømforsynes af målesignalet. Strømmene i de tre faser aftastes via strømtransformatorer med et omsætningsforhold på 600/5.

Fabriksjusteret måleområde: 180 kW.

Klasse for strømper: 0.5

Klasse for effekttransmitter: 0.5

Rotoromdrejningstal

Rotoromdrejningstallet aftastes på generatorakslen med en hall-sensor, der aftaster på én magnet pr. generatoraksel-omdrejning. Signalet udtages fra møllens styring.

Omsætningsforhold gennem møllegear: 16.67 Hz svarer til 30.6 rotor-RPM.

4.2 Dataopsamlingssystem

Der benyttes et PC-baseret dataopsamlingssystem. En standard IBM-kompatibel PC-XT er udvidet med et I/O-kort med 8 analoge kanaler og 2 tællerkanaler.

De analoge indgange benyttes i området 0-5 V med en effektiv opløsning på 11 bit svarende til 2.44 mV. Strømsignaler fra transmitterne omsættes i indgangene på I/O-kortet til spændingssignaler over præcisionsresistorer på 249.0 ohm.

A/D-converteren benytter successiv approksimationsprincippet med en omsætningstid på 25-35 mikrosekunder pr. kanal.

Impulser (fra kopanemometer og RPM-sensor) optælles periodevis i to 16-bit tællere på I/O-kortet.

PC'eren har to disketter med hver en kapacitet på 360 kB. Styresystem og dataopsamlingssoftware findes på den ene diskette og data lagres på den anden diskette.

Dataopsamlingscomputeren er placeret beskyttet i en kasse i mølletårnet sammen med tryktransmitter, ekstern strømforsyning og forbindelsesfelt til sensorer.

Systemet er forbundet til sensorerne på den meteorologiske målebom med et 100 m langt, skærmet 8-leder kabel og til effekttransmitteren, der er anbragt i møllens styreskab, med et kort 2-leder kabel.

4.3 Software

Dataopsamlingen styres af et brugervenligt program i Turbo-Pascal, udviklet på Nordvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi.

Systemopsætningen indlæses i fire hoveddele:

- 1) Hardware opsætning for I/O-kort og -komponenter.
- 2) Signalopsætning, kalibreringslinier mv. for signalerne.
- 3) Funktioner af de opsamlede signaler (spredning etc.).
- 4) Samplingsfrekvenser og midlingstider.

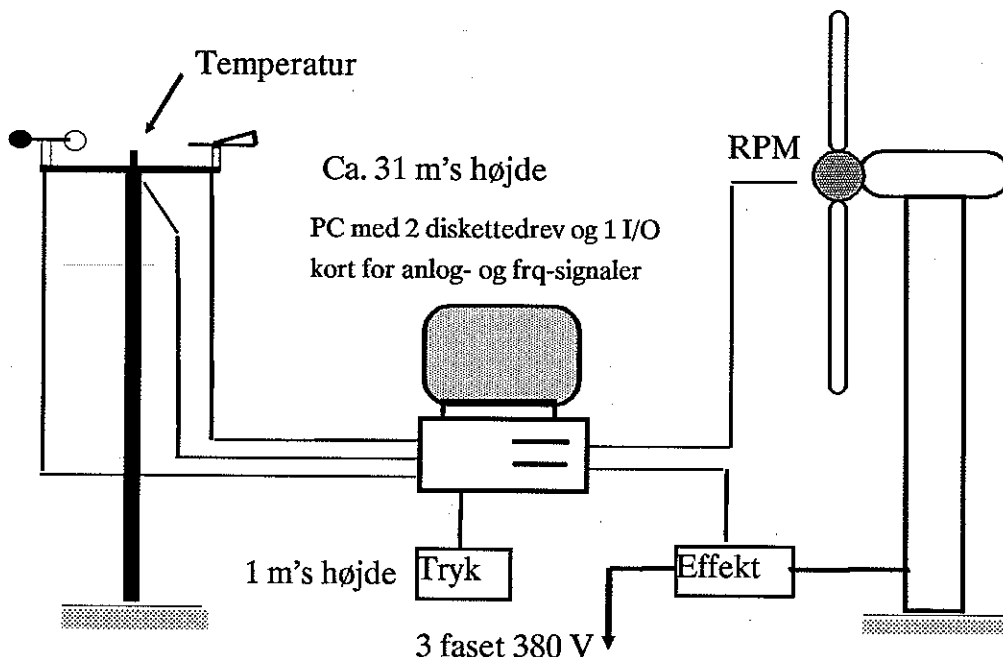
Ved starten af hvert nyt måleforløb lagres en fil med systemopsætningen.

Ved slutningen af hver midlingsperiode lagres først en dato- og tidkode, som hentes fra PC'ens batteriunderstøttede ur, i en datafil. Dernæst lagres middelværdierne, som for de analoge signalers vedkommende udregnes fra de samlede værdier og for frekvenssignalernes vedkommende udregnes efter optælling af impulser i hele midlingsperioden.

Til sidst opdateres en statistikfil over måleperioden.

I tilfælde af en periode med strømsvigt til dataopsamlingsystemet, genstarter dataopsamlingen automatisk efter retablering af strømforsyningen.

Data hjemtages på diskette til videre databehandling. (Ved anvendelse af modem og baggrundskommunikationssoftware, kan data evt. hjemtages over telefonnettet.) Databehandlingen foregår enten i ét af to specielle, FC-udviklede måledatabehandlingsprogrammer, som er afpasset til dataopsamlingsprogrammet, eller konverteres til tekstformat og behandles i et regnearksprogram.



Figur 4.1 Principdiagram af målesystemet

5. Måleforløb

5.1 Opsamlede data

I måleperioden er følgende data opsamlet:

Signal	Type	Måleområde	Nøjagtighed
Nettoeffekt, ukorr.	Analog 4 - 20 mA	0 - 180 kW	1 % FS
Cosinus, vindretning	Analog 0 - 5 V	-1 - 1	0.5 % FS
Sinus, vindretning	Analog 0 - 5 V	-1 - 1	0.5 % FS
Lufttemperatur	Analog 4 - 20 mA	-5 - 35 °C	1 % FS
Luftryk	Analog 0 - 20 mA	80 - 120 kPa	1 % FS
Vindhastighed ¹⁾	Frq 9.6 - 69.5 Hz	2.8 - 20.3 m/s	0.16 m/s
Vindhastighed ²⁾	Frq 4.2 - 32.9 Hz	2.8 - 20.3 m/s	0.08 m/s
Rotor-RPM	Frq 0 - 100 Hz	0 - 183.6 RPM	0.003 RPM

1) I perioden 28/6-90 til 24/8-90.

2) I perioden 24/8-90 til 19/9-90.

For de analoge værdier benyttes en samplingsfrekvens på 1.01 Hz. Impulser optælles i hele midlingsperioden (frq-signaler). Midlingsperioden for både analoge signaler og frekvenssignaler er 600.1 sec.

5.2 Målingens forløb

Møllen - populært kaldet "Den Gule Enke" (pga. tårnfarven) - er rejst som forsøgsmølle af FC i august-september 1988. Efter indkøring og ændringer var møllen klar til måling i foråret 1990.

Målingerne er startet den 28. juni 1990 med et døgn's målinger i god vind med kort midlingstid (30 sek.) for at få et overblik over møllens produktionsevne.

Første måleserie med 10-min. middelværdi er startet den 29. juni og sluttet den 17. juli. Måleserie nr. 2 er startet samme dag.

Den 21. juli ophører vindhastighedssignalet pga. et defekt kopanemometer.

Målemasten lægges ned og det defekte kopanemometer udskiftes med et andet, kalibreret kopanemometer. Den tredje måleserie startes den 24. august og slutter den 31. august.

Der optages yderligere en måleserie frem til den 19. september, som ikke benyttes i databehandlingen, da møllen har haft problemer med krøjegearet. Krøjegearet blev skiftet den 18. september.

Den 4. måleserie optages fra den 19. september til den 20. september. Serien indeholder de højeste vindhastigheder, der når op til 20 m/s.

5.3 Måleserier

Nedenfor findes en oversigt over de 4 benyttede måleserier.

I tabellen betegner:

- MP1: Total antal målepunkter á 10-min. middelværdi i den anvendte tidsperiode i datafilen.
- MP2: Antal målepunkter i vindretningsinterval 180-360^o, effektinterval 1-200 kW og omdrejningstalsinterval 29-32 RPM.

Nr	Filnavn	kB	Start	Slut	MP1	MP2
1	GE290690	219	29/06 kl 18:30	17/07 kl 10:35	2543	1737
2	GE170790	175	17/07 kl 10:49	31/07 kl 15:27	589	466
3	GE240890	83	24/08 kl 18:29	31/08 kl 11:11	963	189
4	GE190990	283	19/09 kl 14:07	20/09 kl 17:13	104	103

6. Resultater fra effektkurvemålingen

6.1 Behandling af effektdata

De målte data benyttes til at bestemme hhv. en effektkurve for møllen og en kurve over den totale virkningsgrad som funktion af vindhastigheden.

Til disse målinger medtages kun data fra den vestlige vindsektor 180-360°, hvor den meteorologiske målemast med kopanemometret ikke er i skygge af møllen og hvor møllen er frit anstrømt. Endvidere fjernes målte effekter med en 10-min. middelværdi på under 1 kW, således at målepunkter, hvor møllen er stoppet, ikke medtages. Det sikres, at de anvendte middelværdier er målt under stabil produktion ved kun at acceptere data opnået med et rotoromdrejningstal mellem 29 og 32 RPM i middel.

Den målte effekt korrigeres til atmosfæriske standardbetingelser, lufttemperatur 15° C og lufttryk 1013.25 hPa, hvor luftens massefylde er $\rho_S = 1.225 \text{ kg/m}^3$ (tør luft).

Der beregnes en korrektion for hver 10-min. middelværdi baseret på faktoren:

$$\rho_S/\rho_T = (T/288.15) \cdot (1013.25/B) \quad (6.1)$$

hvor ρ_S = luftens standardmassefylde [kg/m^3]
 ρ_T = luftens massefylde under målingen [kg/m^3]
 T = lufttemperatur [K]
 B = lufttryk [hPa]

Heraf fås den korrigerede nettoeffekt:

$$P_S = P_T \cdot (\rho_S/\rho_T) \quad (6.2)$$

hvor P_S = nettoeffekt korrigeret til standardbetingelser
 P_T = ukorrigeret nettoeffekt

Da vindhastigheden ikke er målt i navhøjde, korrigeres 10-min. midelværdierne for vindhastigheden efter formel (6.3):

$$\bar{v}_H = \bar{v}_A \cdot (Z_H/Z_A)^{1/7} \quad (6.3)$$

hvor \bar{v}_H = vindhastighed i navhøjde [m/s]
 \bar{v}_A = vindhastighed i anemometerhøjde [m/s]
 Z_H = navhøjde = 32.3 m
 Z_A = anemometerhøjde = 30.7 m

Under dataopsamlingen beregnes spredningen på de samlede vindhastigheder i 10 mi-

nutters perioden:

$$s = \sqrt{((v-\bar{v})^2)} \quad (6.4)$$

hvor s = spredning på samplet vindhastighed i 10 minutter [m/s]

v = samplingsværdi af vindhastighed [m/s]

\bar{v} = 10-min. middelværdi af vindhastighed [m/s]

Der beregnes en middelværdi af turbulensintensiteten, I :

$$I = s/\bar{v} \quad (6.5)$$

I den nedre del af atmosfæren vil I typisk være af størrelsesordenen 0.2.

Under standardbetingelser, vil en tabsfri, ideel vindmølle udnytte hele vindeffekten gennem rotorarealet:

$$P_I = 0.5 \cdot \rho S \cdot \overline{(v^3)} A_r \quad (6.6)$$

hvor P_I = effekt gennem rotorarealet (energiflux)

v = samlede vindhastighed [m/s]

A_r = rotorareal [m^2]

Det fremgår af formel (6.6), at der er en ikke-lineær sammenhæng mellem effekt og vindhastighed. Hvis således kun $(\bar{v})^3$ kan bestemmes og ikke $\overline{(v^3)}$, må der beregnes en korrektionsfaktor (jvf. [3], side 2-3):

$$\overline{v^3} = (\bar{v})^3 \cdot (1 + 3 \cdot I^2) \quad (6.7)$$

Efter korrektion af vindhastigheden til navhøjde, kan der nu beregnes en virkningsgrad for møllen:

$$C_e = P_s/P_I \quad (6.8)$$

Det er vist teoretisk af aerodynamikeren Betz, at C_p højst kan blive 16/27, dvs. ca. 59%.

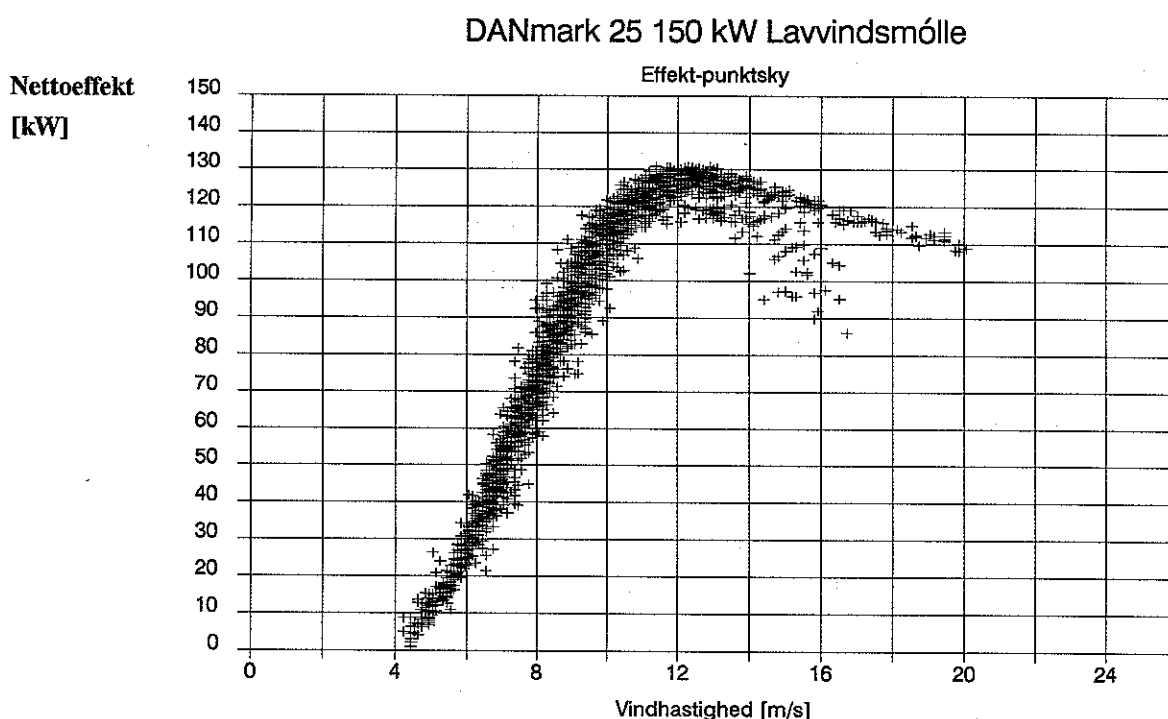
6.2 Effektkurve

Ved at benytte målepunkter fra alle 4 måleserier til effektkurven fås effekt-punktskyen vist i figur 6.1. Der ses her et dobbelt-forløb i stall området, hvor det ene område giver et kraftigt stall med stor spredning, mens det andet område viser en let faldende ret linie op til 20 m/s.

I figur 6.2 er effekt-punktskyen vist beregnet vha. måleserierne 1, 3 og 4. Det ses, at det ene forløb med kraftigt stall og stor spredning i stall-området er forsvundet. Måleserie 2 indeholder således en produktionsperiode med et kraftigt stall, som i den senere måleperiode 4 ikke indtræffer.

Tidsspor for de anvendte tidsperioder for de 4 måleserier er vist i appendix C. Heraf fremgår det, at turbulensintensiteten for måleserie 2 og måleserie 4 ligger på samme niveau, cirka 0.15. Derfor kan det kraftige stall ikke umiddelbart tilskrives en højere turbulensintensitet. Det fremgår endvidere at vindretningen for måleserie 2 har været nordvestlig, mens vindretningen for måleserie 4 er vestlig. Da målemasten står vest for møllen vil den målte vindhastighed og turbulensintensitet for måleserie 4 være den samme, som møllen oplever. For nordvestlig vindretning i måleserie 2 er terrænet i anstrømningsretningen fra mølle og fra målemast næsten ens bortset fra, at der ca. 250m opstrøms fra møllen ligger en lille landejendom. Denne landejendom kan muligvis skabe øget turbulens ved rotorplanet, der kan bevirke det kraftigere stall.

En anden mulighed er at regnvejr, som er en parameter, der ikke detekteres ved effektkurvemåling, kan have bevirket det kraftigere stall. Thiesen og Seifert [4] rapporterer at effekt tabet kan være op til 30 % i kraftig regn.



Figur 6.1 Punktsky med punkter fra alle fire datafiler

Til bestemmelse af effektkurven benyttes målepunkter fra de tre måleserier 1, 3 og 4. De tre måleserier indeholder tilsammen 3610 10 minutters middelværdier. Måledata, der ikke opfylder betingelserne for vindretning, effekt og rotoromdrejningstal (afsnit 6.1) fjernes og de resterende 2029 målepunkter er plottet i punktskyen i figur 6.2. Målepunkterne reduceres efter "Method of Bins" (MOB), [1], til effektkurven i figur 6.3. Ved beregning af MOB-kurven er der benyttet vindhastighedsintervaller på 1 m/s. Fordelingen af målepunkter i vindhastighedsintervallerne og de beregnede koordinater til effektkurven findes i tabel 6.1.

Af kurven aflæses en maksimal elektrisk effekt under standardbetingelser på 128 kW ved en vindhastighed på 12.5 m/s.

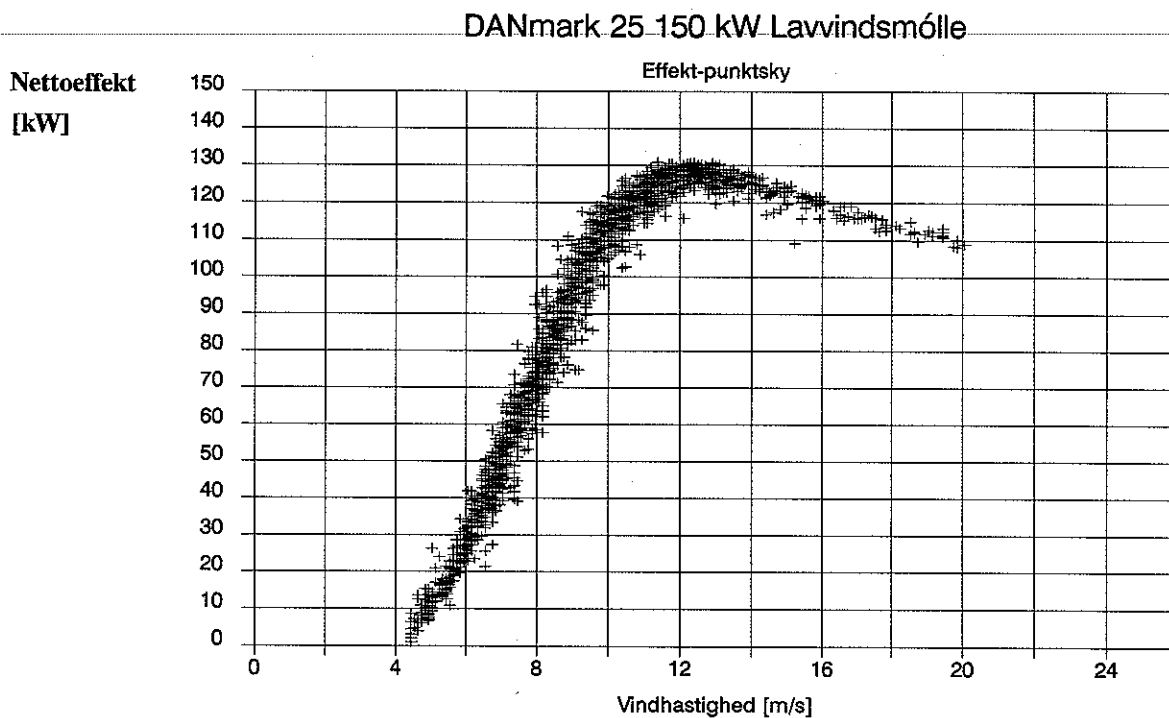
6.3 Virkningsgrad

Møllens totalvirkningsgrad er beregnet efter formel (6.8) med samme datasæt, som benyttet til effektkurven, og plottet som funktion af vindhastigheden i en punktsky i figur 6.4. Disse punkter reduceres efter MOB til virkningsgradskurven (C_e -kurven) på figur 6.5 med koordinaterne i tabel 6.1.

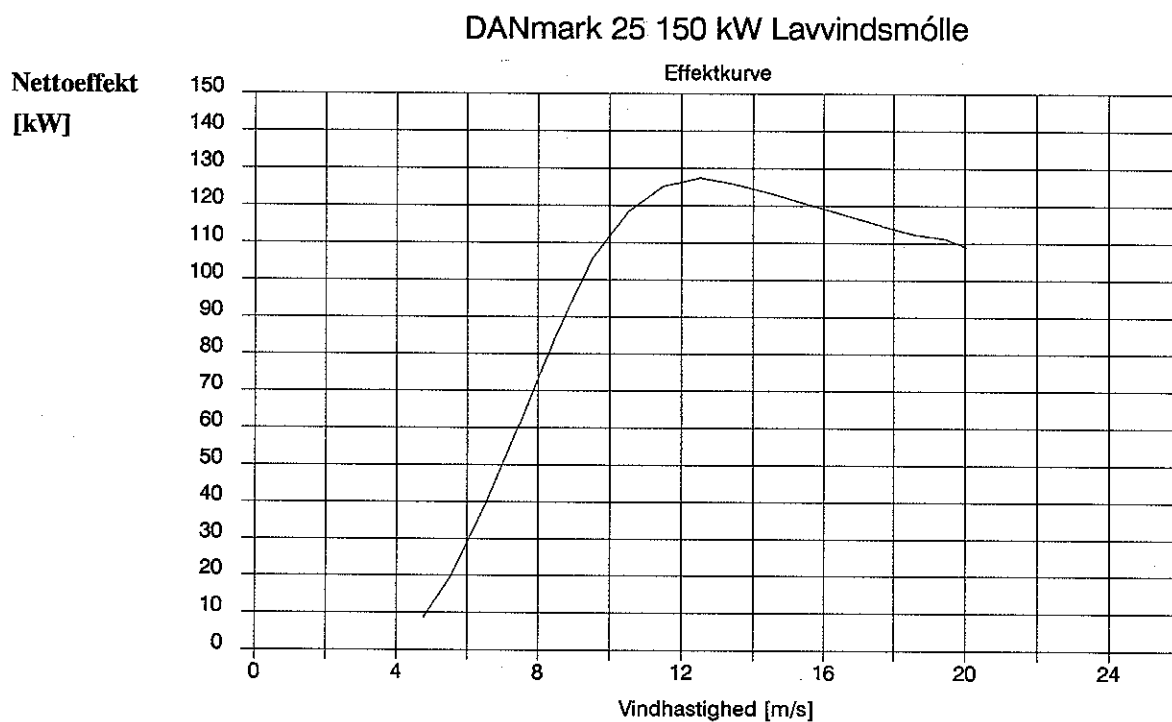
Maksimal totalvirkningsgrad aflæses til 43% ved en vindhastighed på 7.5 m/s.

Nr.	Vindhastighed [m/s]	El. effekt [kW]	C_e	Antal BIN-pkt.
1	4.75	8.62	0.230	39
2	5.53	19.72	0.333	104
3	6.57	40.15	0.414	233
4	7.51	61.72	0.426	260
5	8.48	84.71	0.406	275
6	9.52	105.72	0.359	230
7	10.51	118.55	0.300	237
8	11.50	125.18	0.242	260
9	12.51	127.54	0.192	202
10	13.45	125.98	0.153	89
11	14.44	123.44	0.121	34
12	15.50	120.52	0.095	25
13	16.53	117.71	0.077	11
14	17.43	115.45	0.064	15
15	18.55	112.50	0.051	8
16	19.45	111.11	0.045	10
17	20.05	109.00	0.040	1

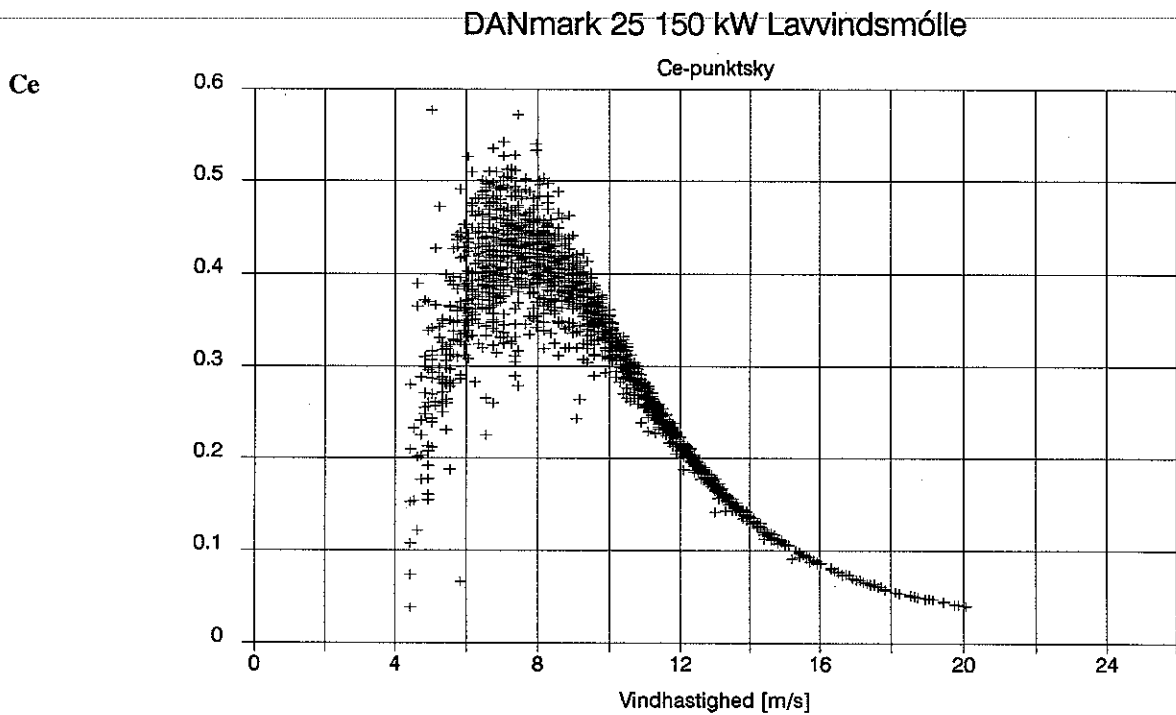
Tabel 6.1 Målt effekt- og C_e -kurve for DANmark 25 150 kW



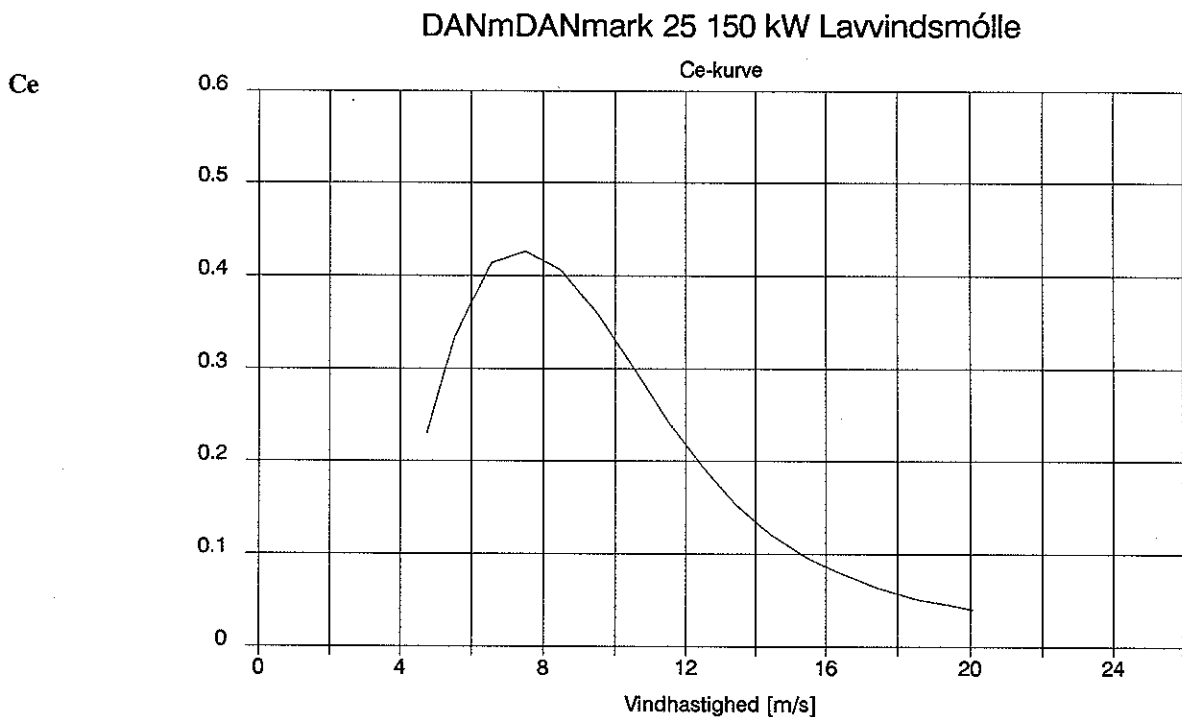
Figur 6.2 Punktsky til effektkurve



Figur 6.3 Effektkurve for DANmark 25 150 kW Lavvindsmølle



Figur 6.4 Punktsky til Ce-kurve



Figur 6.5 Ce-kurve for DANmark 25 150 kW Lavvindsmølle

6.4 Beregnet årsenergiproduktion

Tabel 6.2 viser den beregnede årsenergiproduktion efter vindatlasmetoden, [2], for møllen i fire rene ruhedsklasser, dvs. møllen er tænkt anbragt, så der er samme ruhed kompasset rundt og ingen enkeltstående forhindringer.

Ruhedsklasse	Årsenergiproduktion	
0	529.000	kWh/år
1	416.000	kWh/år
2	342.000	kWh/år
3	228.000	kWh/år

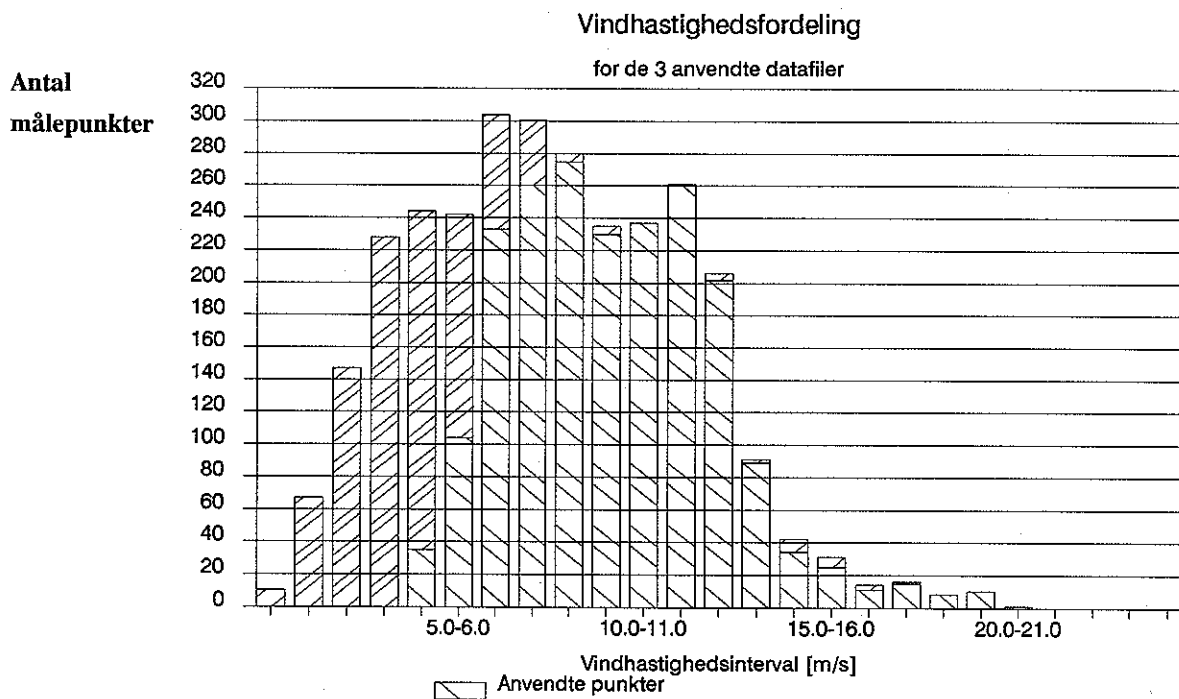
Tabel 6.2 Beregnede årsenergiprodukt. for DANmark 25 150 kW

7. Meteorologiske data for målingen

7.1 Vindhastighedsfordeling for måleperioden

Vindhastighedsfordelingen for de anvendte tidsperioder for de tre måleserier 1, 3 og 4 er vist på figur 7.1. En given søjles højde er proportional med totalantallet af 10-min. middelværdier i vindhastighedsintervallet. Måleserierne indeholder tilsammen 3610 middelværdier svarende til godt 601 timer.

Vindhastighedsfordelingen for de måledata, der anvendes til bestemmelse af effektkurven er vist skravet i figur 7.1. I alt anvendes 2029 målepunkter til effekt- og Ce-kurven svarende til 338 timer.



Figur 7.1 Vindhastighedsfordeling for måleserie 1, 3 og 4

8. Konklusion

Der er udført ydelsesmålinger i knapt tre måneder, juni - september 1990, som dokumentation for lavvindsmøllen konstrueret og opført af Norvestjysk Folkecenter for Vedvarende Energi (FC) og med trævinger produceret af Dansk Trævingeindustri i et projekt støttet af Energistyrelsens Styregruppe for Vedvarende Energi.

En effektkurve og en kurve for den elektriske virkningsgrad (Ce-kurve) er bestemt for møllen. Hertil er anvendt data fra 338 timers målinger fra tre måleforløb, hvilket tilsammen giver 2029 målepunkter á 10 minutters middelværdi - lidt under IEA-rekommendationens krav på 3000 målepunkter. I øvrigt er IEA-rekommendationen, [1], opfyldt for målingerne på alle andre punkter.

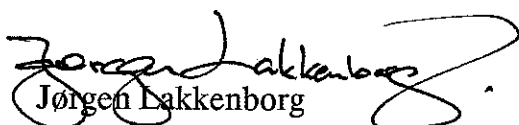
Kurverne er bestemt i vindhastighedsområdet 4.75 m/s til 20.05 m/s. I det høje vindhastighedsområde (> 17 m/s) er kurverne dog baseret på relativt få målepunkter.

Den maksimale elektriske effekt er målt til 128 kW ved en vindhastighed på 12.5 m/s. Målingerne viser således, at den valgte tipvinkel på prototypemøllen må forøges lidt for at opnå den nominelle effekt på 150 kW.

Maksimalvirkningsgraden på 43 % ved 7.5 m/s er tilfredsstillende.

Det har vist sig, at målinger fra forskellige tidspunkter har givet to forskellige stallforløb af ikke klarlagte årsager. Ved databehandlingen er der kun benyttet data fra de måleforløb, der udviser det mindst udprægede stall.

Ydby den 10. december 1990


Jørgen Lækkenborg


Bjarne Jensen

Referencer

- [1] Steen Frandsen, Andrew R. Trenka og B. Maribo Pedersen:
"Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation. 1. Power Performance Testing"
IEA, 1982.

- [2] Erik Lundtang Petersen, Ib Troen og Steen Frandsen:
"Vindatlas for Danmark"
RISØ, August 1980.

- [3] "Fluid Dynamic Aspect of Wind Energy Conversion"
AGARDograph no. 243
Advisory Group for Aerospace Research & Development, NATO

- [4] R. Thiesen og H. Seifert:
"Result and experiences of measurements on the DFVLR test site *Ulrik Hutter*"
Paper presented at European Community Wind Energy Conference, 1988,
Herning, Denmark.

Appendix A: Kalibreringsattest for kopanemometer 1.

- 1 -

Kalibrering af Cupanemometer

Udført for : NORDVESTJYSK FOLKECENTER
Sag nr. : 1251.89025.00
Dato/Sign. : 24.01.89 /UL
Fabrikat : HELLESKOV
Type : 6 IMPULS/OMD
Nr. : 4

Kalibreringsresultat

Baseret på kalibreringsdata på følgende side er kalibreringsudtryk og standardafvigelse fundet. (jvf. Appendix A)

$$V(\text{m/s}) = 0.29208 * F(\text{HZ}) + 0.007$$

$$S_y(\text{m/s}) = 0.0841$$

Som gælder i vindhastighedsområdet : $2.8 < V(\text{m/s}) < 20.3$

Appendix A: Kalibreringsattest for kopanemometer 1.

- 2 -

Kalibrering af Cupanemometer

Udført for : NORDVESTJYSK FOLKECENTER
Sag nr. : 1251.89025.00
Dato/Sign. : 24.01.89 /UL

Kalibreringsmetode

Vindtunnel : CIRKULATION
Manometer : FURNESS 510.101 VT
Termometer : KM 2012
Barometer : LAMBRECHT 610/480185
Output instr.: HP TIMER COUNTER 5302

Cupanemometer

Fabrikat : HELLESKOV
Type : 6 IMPULS/OMD
Nr. : 4
Output : F(HZ)

Kalibreringsdata

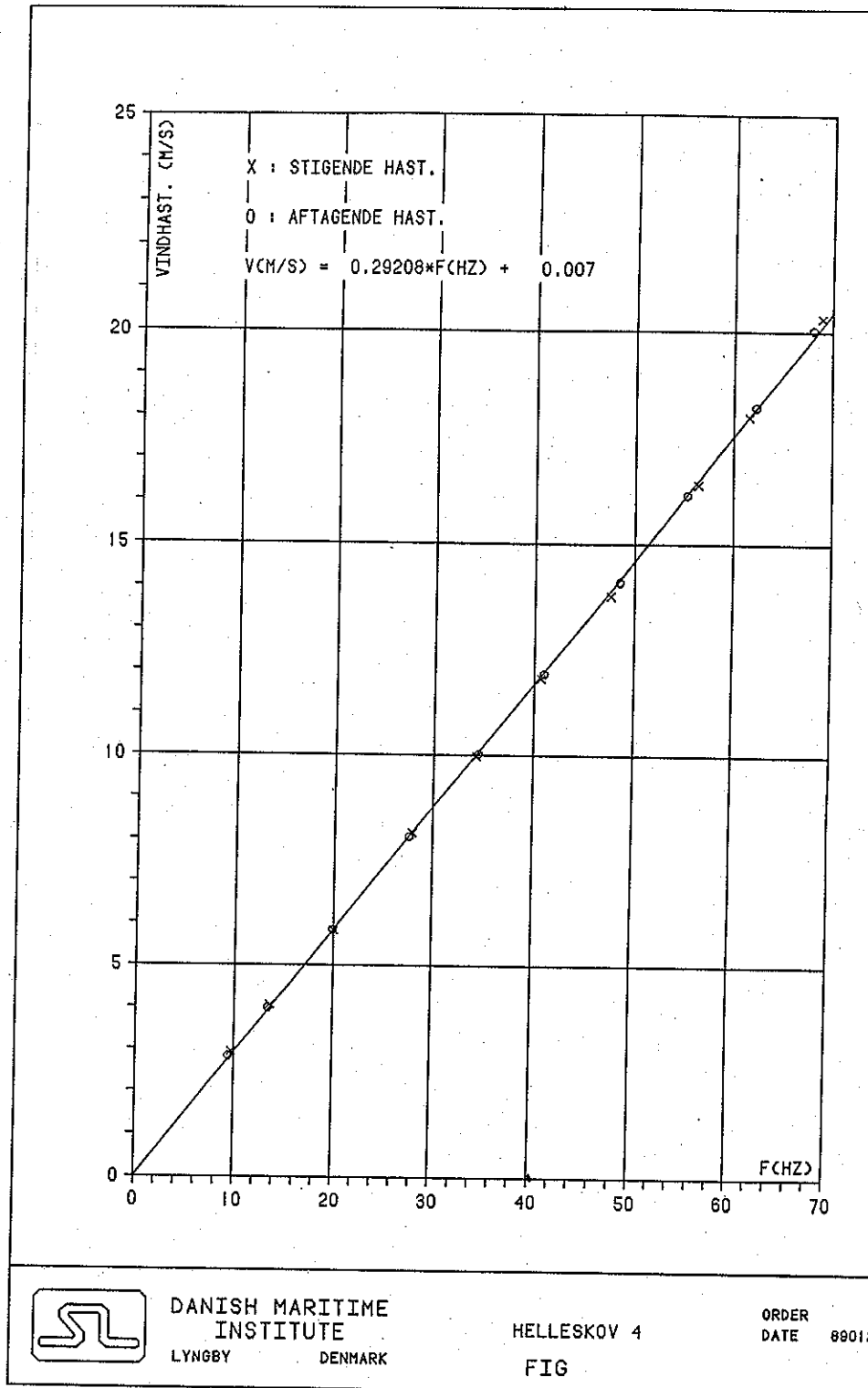
Barometerstand (mmHg) : 768.8

Pdyn mmVS	Temp gr. K	Hast m/s	Out X F(HZ)	Afv. *) m/s
0.53	294.0	2.93	9.70	0.09
1.01	293.9	4.04	13.60	0.06
2.10	293.9	5.82	20.00	-0.03
4.10	293.9	8.14	27.90	-0.02
6.15	293.9	9.97	34.30	-0.06
8.65	293.9	11.82	40.70	-0.08
11.75	294.0	13.78	47.60	-0.13
16.60	294.1	16.38	56.40	-0.10
20.00	294.4	17.98	61.60	-0.02
25.50	294.4	20.31	68.90	0.18
24.80	294.6	20.04	68.00	0.17
20.50	294.6	18.22	62.30	0.01
16.10	294.6	16.14	55.30	-0.02
12.30	294.6	14.11	48.50	-0.06
8.80	294.5	11.93	41.00	-0.05
6.22	294.5	10.03	34.50	-0.05
4.00	294.5	8.05	27.60	-0.02
2.10	294.5	5.83	19.90	0.01
0.98	294.5	3.98	13.40	0.06
0.49	294.5	2.82	9.40	0.06

Vedrørende opstilling i vindtunnel : se side 4.

Vedr. bestemmelse af vindhastighed og ubestemthed
på denne : se App. A.

*) Afv. = Afvigelse mellem målte hastigheder og regressionslinje.



Appendix B: Kalibreringsattest for kopanemometer 2.

- 1 -

Kalibrering af Cupanemometer

Udført for : NORDVESTJYSK FOLKECENTER
Sag nr. : 1251.89025.00
Dato/Sign. : 24.01.89 /UL
Fabrikat : ED
Type : RISØ
Nr. : 101

Kalibreringsresultat

Baseret på kalibreringsdata på følgende side er kalibreringsudtryk og standardafvigelse fundet. (jvf. Appendix A)

$$V(\text{m/s}) = 0.61146 * F(\text{HZ}) + 0.197$$

$$S_y(\text{m/s}) = 0.0424$$

Som gælder i vindhastighedsområdet : $2.8 < V(\text{m/s}) < 20.3$

- 2 -

Kalibrering af Cupanemometer

Udført for : NORDVESTJYSK FOLKECENTER
 Sag nr. : 1251.89025.00
 Dato/Sign. : 24.01.89 /UL

Kalibreringsmetode

Vindtunnel : CIRKULATION
 Manometer : FURNESS 510.101 VT
 Termometer : KM 2012
 Barometer : LAMBRECHT 610/480185
 Output instr.: HP TIMER COUNTER 5302

Cupanemometer

Fabrikat : ED
 Type : RISØ
 Nr. : 101
 Output : F(HZ)

Kalibreringsdata

Barometerstand (mmHg) : 768.1

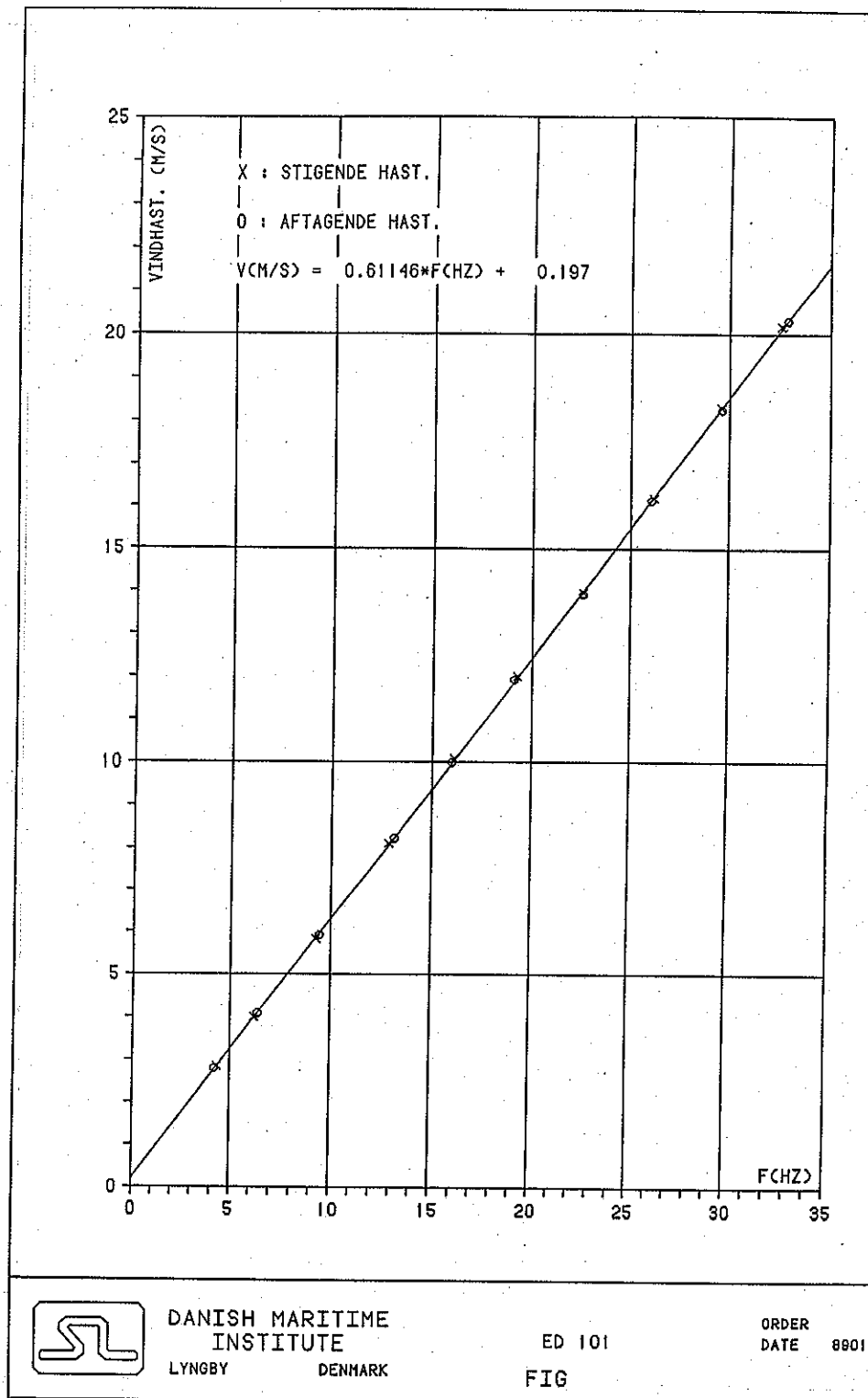
Pdyn mmVS	Temp gr. K	Hast m/s	Out X F(HZ)	Afv. *) m/s
0.50	292.8	2.84	4.34	-0.01
0.99	292.9	3.99	6.20	0.00
2.10	292.9	5.82	9.26	-0.04
4.08	293.0	8.11	12.86	0.05
6.30	293.0	10.08	16.08	0.05
8.95	293.1	12.01	19.25	0.04
12.10	293.3	13.97	22.58	-0.04
16.25	293.4	16.19	26.21	-0.03
20.75	293.5	18.30	29.59	0.01
25.20	293.9	20.18	32.57	0.07
25.51	293.9	20.31	32.89	0.00
20.60	293.9	18.25	29.63	-0.07
16.10	294.0	16.13	26.08	-0.01
12.00	293.9	13.93	22.57	-0.07
8.80	293.9	11.93	19.10	0.05
6.18	293.9	9.99	15.96	0.04
4.19	293.9	8.23	13.13	0.00
2.16	293.9	5.91	9.43	-0.05
1.03	293.9	4.08	6.37	-0.01
0.48	293.9	2.79	4.20	0.02

Vedrørende opstilling i vindtunnel : se side 4.

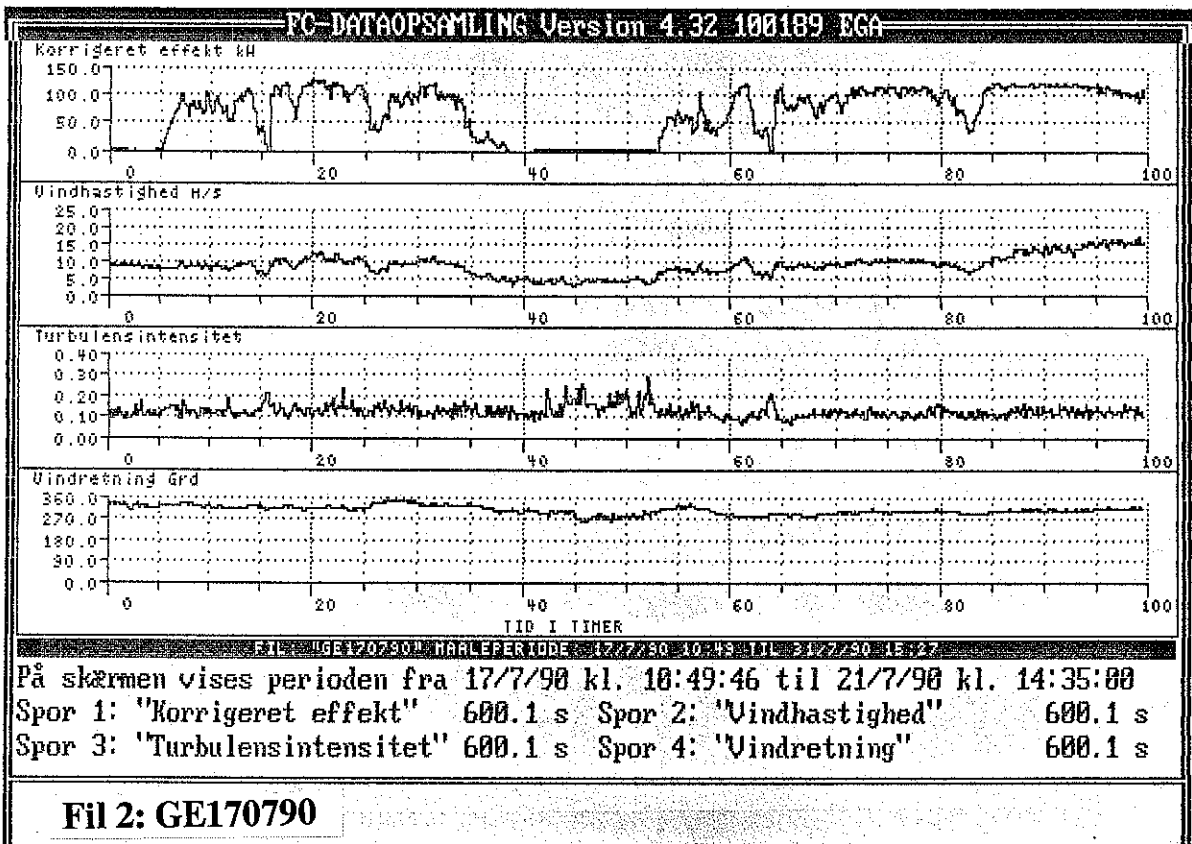
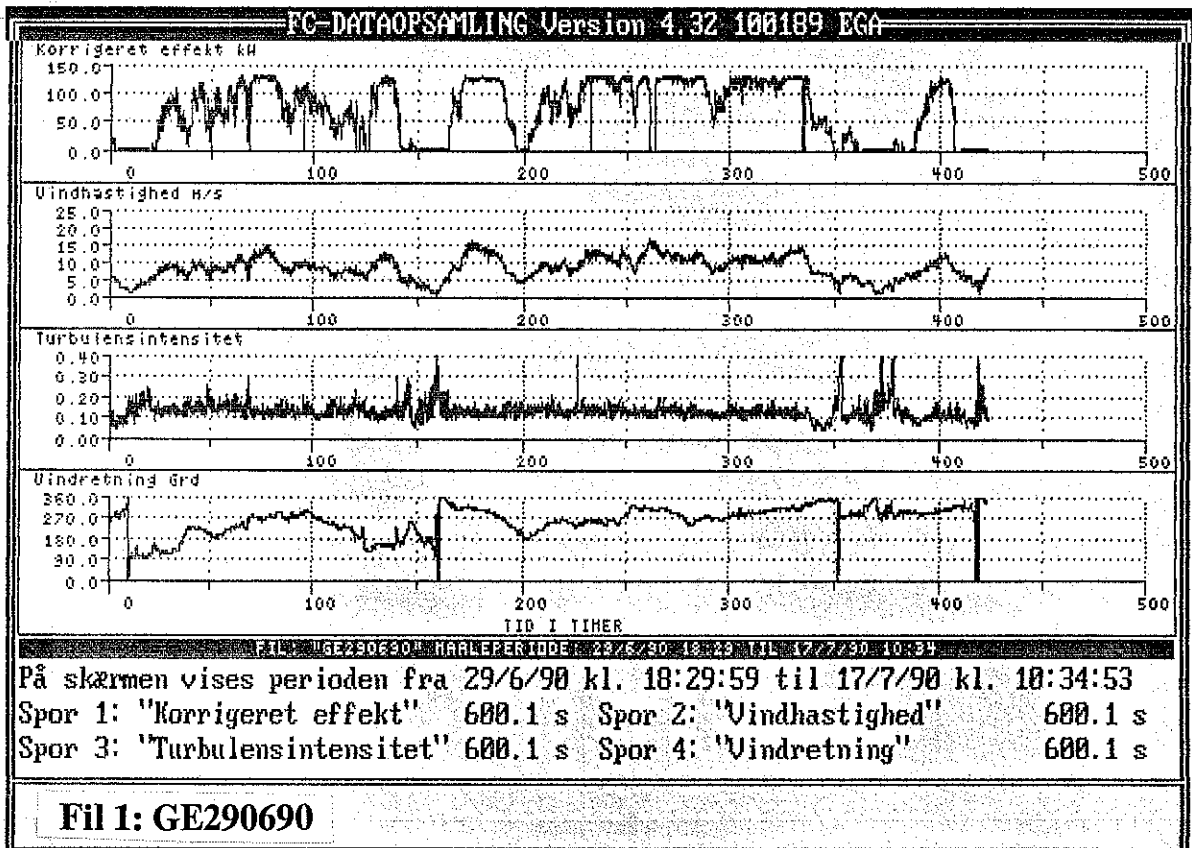
Vedr. bestemmelse af vindhastighed og ubestemthed på denne : se App. A.

*) Afv. = Afvigelse mellem målte hastigheder og regressionslinie.

Appendix B: Kalibreringsattest for kopanemometer 2.



Appendix C: Tidspor fra datafilerne



Appendix C: Tidspor fra datafilerne

