



## Kantlister kan kontrollere kantsvingninger

Thirstrup Petersen, J.; Thomsen, K.; Aagaard Madsen, H.

*Publication date:*  
1998

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Thirstrup Petersen, J., Thomsen, K., & Aagaard Madsen, H. (1998). *Kantlister kan kontrollere kantsvingninger*. Resultatblad AED-RB-6 Resultatblad AED-RB Nr. 6

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

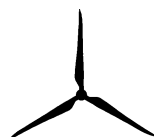
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# KANTLISTER KAN KONTROLLERE KANTSVINGNINGER

af

Jørgen Thirstrup Petersen, Kenneth Thomsen,  
Helge Aagaard Madsen



Aeroelastisk Design  
Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik  
Forskningscenter Risø, Roskilde  
Marts 1998

RISØ

---

Titel og forfatter(e)

Kantlister kan kontrollere kantsvingninger

Jørgen Thirstrup Petersen, Kenneth Thomsen, Helge Aagaard Madsen

---

Review

Flemming Rasmussen

---

Program og afdeling

Dato

Aeroelastisk Design

4. April 1998

Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik

---

Registreringsnummer

Projekt/Kontrakt

AED-RB-6

ENS 1363/96-0001

Engelsk version: AED-RB-6(EN)

JOR3-CT95-0047

---

Klassifikation

Offentlig

---

Bemærkninger

Arbejdet er udført under projekterne *EFP-96 Kantsvingninger i stall* og *JOULE3 Prediction of Dynamic Loads and Induced Vibrations in Stall*.

---

Resumé

Betydningen af kantlister monteret på forkanten af vinger er undersøgt på baggrund af vindkanalmålinger af profilegenskaber og aeroelastiske beregninger på en 600 kW vindmølle. Undersøgelsen viser, at kantlisterne kan modificere profilegenskaberne og dermed den aerodynamiske dæmpning markant. I beregningseksemplet øger en 2 m kantliste den aerodynamiske dæmpning for vingen ca. 2%, hvorved problemet med kantvise svingninger fjernes.

---

Kan rekvireres fra:

Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø

P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde

Telefon 46 77 50 36 · Fax 46 77 50 83

Dette er et resultatblad fra forskningsprogrammet Aeroelastisk Design ved Afdelingen for Vindenergi og Atmosfærefysik, Forskningscenter Risø. Resultatbladets målgruppe er primært den danske vindmølleindustri og dansk vindmølleforskning i øvrigt. Formålet er at formidle opnåede forskningsresultater på en kort og letfordøjelig form, samt at kunne publicere opnåede resultater så tidligt som muligt. Resultaterne kan være foreløbige erkendelser eller sammendrag af udgivne publikationer. Såfremt rapporteringen er foreløbig, vil det fremgå af teksten. Anden og eventuelt senere planlagt rapportering vil fremgå af databladet og evt. litteraturlisten.

## Hovedresultater

På visse stallregulerede vindmøller har det vist sig, at der under bestemte driftsforhold kan opstå problemer med kantvise svingninger. Problemet, der opstår fordi den totale dæmpning af vingerne i kantvis retning bliver negativ, afhænger af en række parametre, bl.a. profilegenskaber, vingerens svingningsretninger og møllens egenfrekvenser. De fleste af disse parametre er vanskelige at ændre på en eksisterende mølle, men særdeles vigtige at overveje ved nydesign. Det er dog muligt med en mindre modifikation af profilerne at ændre markant på vingerens aerodynamiske dæmpning. Ved at påmontere små lister på forkanten (kantlister) på et lille område af vingerne kan profilernes egenskaber ændres væsentligt, og dermed kan problemet med kantvise svingninger fjernes.

Metoden er udviklet af Søren Vinther og Peder Enevoldsen fra Bonus Energy A/S, som også har undersøgt den grundigt eksperimentelt i samarbejde med LM Glasfiber A/S og Risø. LM Glasfiber A/S kan i dag levere vinger med en standardløsning med kantlister baseret på disse erfaringer. I dette resultatblad tager vi udgangspunkt i vindkanalmålinger på profiler med og uden kantlister og benytter herefter disse data i aeroelastiske beregninger. På baggrund af disse målte profilegenskaber har vi modelleret effekterne af kantlister i det aeroelastiske program HAWC for en 600 kW mølle med LM-19.0 vinger (diameter = 41 m). Beregningerne viser, at en 2 m kantliste kan forøge den aerodynamiske dæmpning med ca. 2 % for den modellerede mølle. En sådan forøgelse af den aerodynamiske dæmpning vil for langt de fleste møller være tilstrækkelig til at fjerne problemet med kantvise svingninger. Imidlertid vil kantlister også reducere maksimaleffekten betydeligt, og dette kan der for eksempel kompenseres for ved at montere vortexgeneratorer på den inderste del af vingerne og ved samtidig at justere tipvinklerne.

Det skal understreges, at de absolutte værdier opnået ved beregningerne er behæftet med usikkerhed, mens de relative ændringer er udtryk for klare tendenser.

## Hvor kommer den aerodynamiske dæmpning fra ?

Som udgangspunkt for undersøgelsen er det nødvendigt at betragte den aerodynamiske dæmpning for en vinge. Denne størrelse er central i kantsvingningsproblemet, idet den ændres med driftsbetingelserne. Den totale dæmpning er summen af strukturel dæmpning og aerodynamisk dæmpning. Hvis den aerodynamiske dæmpning er mere negativ end struktureldæmpningen er positiv, er betingelserne for kantvise svingninger tilstede.

For en vingesektion i radius  $r$  kan den aerodynamiske dæmpning i kantretningen forenklet udtrykkes som funktion af opdriften  $C_L$  og modstanden  $C_D$ :

$$c_k(r) = \frac{1}{2}c\varrho \frac{r\Omega}{W} \left[ \left( \frac{2r^2\Omega^2 + V^2}{r\Omega} \right) C_D - V \frac{dC_D}{d\alpha} - VC_L + \frac{V^2}{r\Omega} \frac{dC_L}{d\alpha} \right], \quad (1)$$

hvor  $c$  er kordelængden,  $\varrho$  er luftens massefylde,  $\Omega$  er omdrejningstallet,  $W$  er relativhastigheden og  $V$  er den fri vindhastighed.  $\alpha$  er indfaldsvinkelen, dvs. vinkelen som relativhastigheden danner med profilets korde.  $C_L$  og  $C_D$  afhænger af både radius og indfaldsvinkel. I dette udtryk antages det, at bladet svinger i rotorplanet. I virkeligheden svinger bladet samtidig vinkelret på rotorplanet. Dette giver et lignende bidrag til dæmpningen. I de følgende beregninger er det komplette udtryk benyttet, det vil sige, at bladet svinger i den kantvise modalform, som altså også indeholder en vis flapvis komponent.

Integreres  $c_k$  op over hele vingen findes den totale dæmpning udtrykt som logaritmisk dekrement:

$$\delta = \frac{C_m}{2f_m M_m} = \frac{\int_0^R c_k(r) \varphi_m^2(r) dr}{2f_m \int_0^R m(r) \varphi_m^2(r) dr}, \quad (2)$$

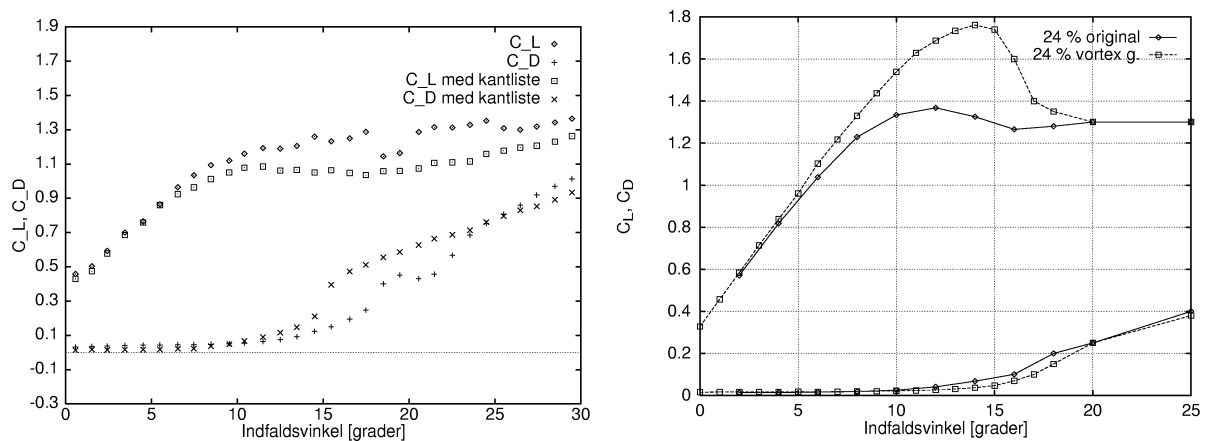
hvor  $C_m$  er modaldæmpningen,  $f_m$  er egenfrekvensen i Hz,  $M_m$  modalmassen,  $\varphi_m$  modalformen og  $m(r)$  er massen pr. længdeenhed i radius  $r$ . Modalformen er hovedsagelig bestemt af selve vingen, men herudover af den aktuelle mølles konstruktion.

Af udtrykket (2) ses det umiddelbart, at modalformen har stor betydning for den totale dæmpning, idet den vægter de lokale profilegenskaber. Det vil med andre ord sige, at dæmpningsegenskaberne af det yderste stykke af vingerne har den største indflydelse på den totale dæmpning. Dæmpningsegenskaberne for hver sektion af vingerne afhænger som vist i formel (1) af fire led: ét der afhænger af  $C_D$ , ét afhængigt af hældningen på  $C_D$ , ét afhængigt af  $C_L$  og endeligt ét der afhænger af hældningen på  $C_L$ . Dermed vil vingernes totale dæmpning ændres markant, hvis det er muligt at modificere disse størrelser på den yderste del af vingerne. For at opretholde en god effektkurve kan det dog være nødvendigt også at modificere profilegenskaberne på den inderste del af vingerne i retning mod mindre dæmpning. På grund af vægtningen fra modalformen kan det sammenlagt give en større total dæmpning for hele vingen, uden at effektkurven ændres væsentligt.

## Profilegenskaberne ændres markant

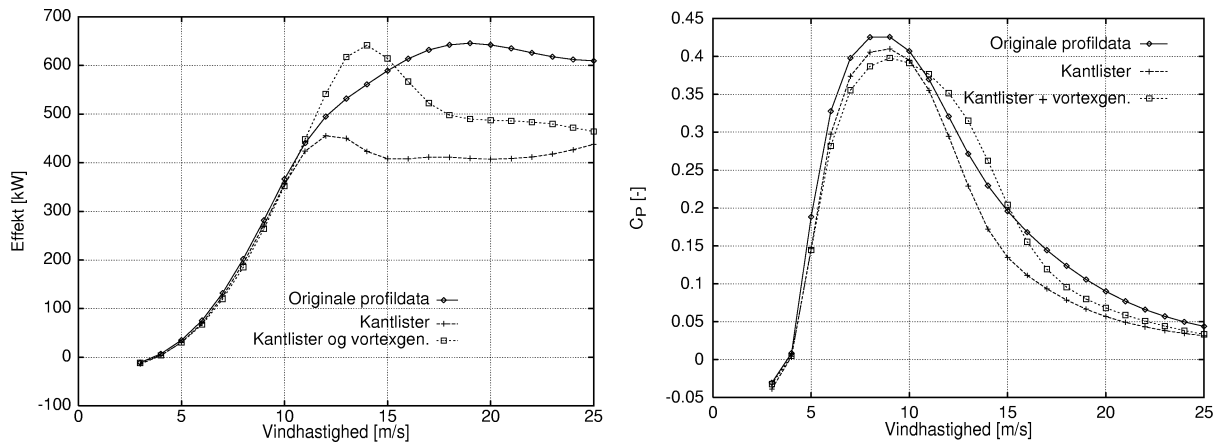
Eksperimentelle undersøgelser med profilsektioner i vindkanal har vist, at kantlister har en markant virkning på et profils egenskaber. Kantlisten bevirker, at strømmingen – over en vis indfaldsvinkel – afløser fra forkanten, hvorved opdriften reduceres, og modstanden øges.

Virningen af kantlister på et NACA 63-215 profil er undersøgt eksperimentelt ved vindtunnelforsøg, dels af FFA ved 2D målinger [2] og dels af Risø ved måling på et fuldskalablade, LM-8.5, i Velux vindtunnelen, [3]. Resultatet af sidstnævnte målinger er vist i Figur 1(a). Det ses, at profilet med kantliste har næsten samme egenskaber som det oprindelige profil i det lineære område, mens det for indfaldsvinkler over ca.  $8^\circ$  har markant ændrede egenskaber. Kantlisten giver forkantstall på profilet ved  $8\text{--}10^\circ$ , hvorved den maksimale opdrift ( $C_L$ ) begrænses til  $1.0\text{--}1.1$  samtidig med at modstanden ( $C_D$ ) vokser betydeligt. I dette driftsområde med forkantstall må det forventes, at profilkarakteristikken for kantlisten kun afhænger svagt af profildesignet. Det vil sige, at de observerede ændringer i profildataene ved brug af kantlisten kan overføres til andre profiler. Selv på profiler med lavere maksimal opdrift ser det ud til, at kantlisten stadig har en betydelig virkning, ikke så meget på  $C_L$ , men i betydelig grad på  $C_D$ . Ud fra de to nævnte vindtunnelmålinger er der opstillet et sæt profildata for et profil ( $14\text{--}18\%$ ) med kantliste, som er brugt i de efterfølgende aeroelastiske beregninger på LM-19.0 bladet.



Figur 1: (a) Målte profilkarakteristikker for NACA63-215 profil med og uden kantliste, [3]. (b) Modelleret virkning af vortexgeneratorer på et 24% FFA profil.

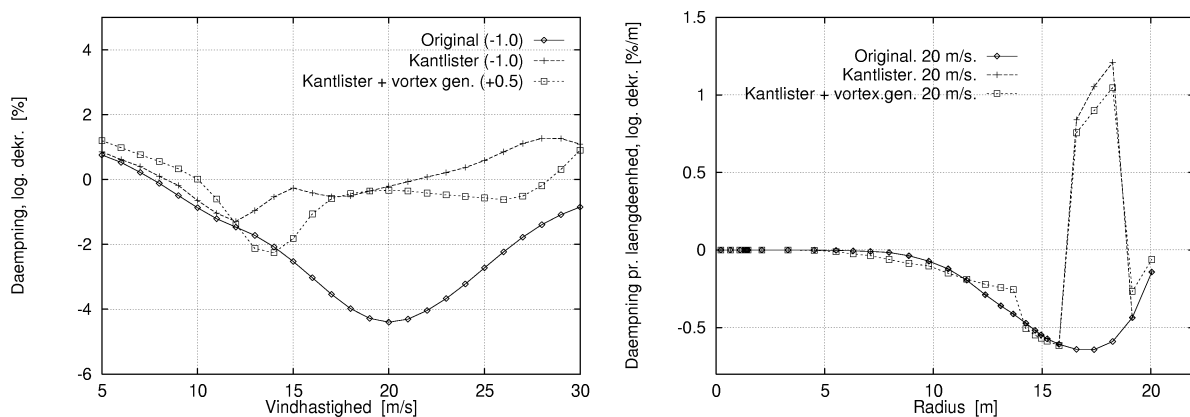
På grund af de ændrede profilkarakteristikker ændres møllens effektkurve, og det vil ofte være hensigtsmæssigt at ændre på profilegenskaberne i et andet område af vingerne. En mulighed er at montere vortexgeneratorer på den inderste del af vingerne, hvilket kan kombineres med en mere positiv tipvinkel. Dette er illustreret i Figur 1(b), hvor den skønnede effekt af vortexgeneratorer på et 24% profil er vist. I Figur 2 er virningen på effektkurven illustreret. I konfigurationen med kantlister er der monteret 2 m lister fra tipoverskæringen ( $r = 18.5$  m) og indad. I den tredje konfiguration er der tillige monteret vortexgeneratorer på den inderste del af vingerne ( $r = 3\text{--}14$  m), samtidig med at tipvinklen er ændret  $1.5^\circ$  positivt.



Figur 2: (a) Beregnede effektkurver for oprindelige og modificerede profildata. Konfigurationen med vortexgeneratorer er med ændret tipvinkel (+  $1.5^\circ$ ) (b) Tilhørende virkningsgrads-kurver,  $C_P$ .

## Ændringer i bladdæmpningen

De viste ændringer i profilets egenskaber har stor betydning for den aerodynamiske dæmpning. I Figur 3 er vist den aerodynamiske dæmpning i kantretningen med henholdsvis de oprindelige profildata og med de modificerede profildata. Der er regnet for de samme tre konfigurationer som i Figur 2(a). Det ses af Figur 3(a), at den totale



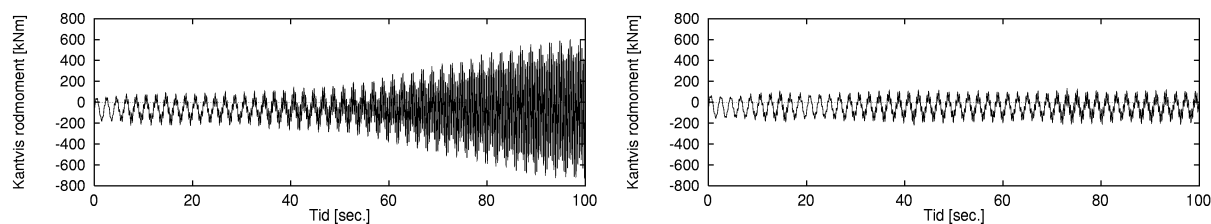
Figur 3: (a) Beregnet aerodynamisk dæmpning i kantvis retning som funktion af vindhastigheden og (b) dæmpningen pr. længdeenhed ved 20 m/s. Beregningerne er kvasistatiske.

dæmpning ændres fra en minimumsværdi på ca.  $-4\%$  til ca.  $-2\%$ . Samtidigt flyttes det kritiske driftspunkt fra 20 m/s til 14 m/s, hvilket primært skyldes vortexgeneratorernes indflydelse. Af Figur 3(b) ses det, at i den oprindelige konfiguration er dæmpningen over hele vingen negativ ved 20 m/s. I konfigurationerne med kantlister er virkningen af disse en lokal forøgelse af dæmpningen i området med kantlister på ca.  $1.5\text{--}2.0\%/m$ .

Den ændrede dæmpning kan illustreres på en anden måde, som vist i Figur 4. Her er et tidsspor af kantvis rodbøjningsmoment ved 20 m/s vist for en mølle med henholdsvis de oprindelige og de modificerede profildata.

Som tidligere nævnt vil der ved montering af kantlister være tale om en balance imellem forhøjet aerodynamisk dæmpning og reduceret produktion. I praksis vil det derfor være relevant at optimere dette forhold igennem en hensigtsmæssig placering af listerne, samt en kombination med brug af vortexgeneratorer.

Andre parametre end profilers egenskaber har betydning for problematikken, blandt andet vingernes udbøjnings-



Figur 4: Eksempler på tidsspor af kantvis rodmoment for (a) originale profildata og (b) modificerede profildata (vortexgeneratorer + kantlister). Vindhastigheden er 20 m/s og strukturdæmpningen er 3% (log. dekrement) i kantvis retning.

form og -retning, koblingen til møllens dynamik (primært 2. nikke-/krøjefrekvens [1]) og vingernes planform.

På baggrund af arbejdet med problematikken må det idag betragtes som muligt at inddrage disse betydende parametre i designfasen og designe vinger, hvor sandsynligheden for kantsvingninger er lille. En mulighed for dette er at benytte profiler, hvor de ønskede egenskaber er indbygget i profilets form – og hvor det altså ikke er nødvendigt at foretage modifikationer efterfølgende.

## Litteratur

- [1] Petersen, Jørgen T., Flemming Rasmussen, Kenneth Thomsen. *Kantsvingninger og rotordynamik*. Risø-I-791(DA). Forskningscenter Risø, Roskilde. Maj 1994.
- [2] Björck, Anders. *2-D Airfoil Wind Tunnel Test at Stall*. Presented at the IEA 7<sup>th</sup> Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines. November 1993.
- [3] Antoniou, Ioannis, Helge Aagaard Madsen, Flemming Rasmussen. *Wind Tunnel Measurements on a LM 8.2 m Blade*. Risø-I-800(EN). Risø National Laboratory, Denmark. December 1995.