



**FLYGTEKNISKA
FÖRSÖKSANSTALTEN**

The Aeronautical Research
Institute of Sweden

**BERÄKNING AV LJUDUTBREDNING FRÅN
VINDKRAFTVERK AV NÄSUDDEN-TYP
MED HJÄLP AV EN ATMOSFÄRISK STRÅL-
GÅNGSMODELL**

av
Bengt Hallberg

BERÄKNING AV LJUDUTBREDNING FRÅN VINDKRAFT- VERK AV NÄSUDDEN-TYP MED HJÄLP AV EN ATMOS- FÄRISK STRÅLGÅNGSMODELL

av
Bengt Hallberg *)

SAMMANFATTNING

I denna pilotstudie har en numerisk strålgångsmodell utnyttjats för att ta reda på om meteorologiska effekter påverkar ljudutbredningen från ett tvåbladigt vindkraftverk så att den periodiska ljudnivåvariation (modulation), som har visat sig vid mätningar, minskar med ökande avstånd.

Resultaten blev att modellen gav realistiska värden på modulationens storlek, och att modulationens "utsuddning" med ökat avstånd kunde illustreras genom att variera vindhastighetsgradienten under den tid det tar för ett blad att vrida sig ett varv.

Arbetet har utförts på uppdrag av Flygtekniska försöksanstalten.

*) Studsvik Nuclear

Beställare: Flygtekniska försöksanstalten, (FFA)
Stockholm

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		Sid
1	INLEDNING	3
2	METEOROLOGISKA EFFEKTER PÅ LJUDUTBREDNING	3
3	STRÅLGÅNGSMODELL	3
4	BERÄKNINGAR OCH RESULTAT	3
5	SLUTSATSER OCH FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER	6
6	REFERENSER	7
	FIGURER	7

1 INLEDNING

Mätningar av buller från Näsuddens vindkraftverk [1] har påvisat en modulation, dvs att ljudnivån varierar i tiden med en frekvens på ca 1 Hz, se figur 1. Den mänskliga hörseln är känslig för denna modulation, vilket medför att ljudets uppfattbarhet ökar och den maske-ringseffekt som själva vinden åstadkommer genom t ex att sätta löv i rörelse minskar. Det konstaterades också att modulationen minskar och försvinner när avståndet ökar. Beräkningar med en atmosfärisk strålgångsmodell [2] har gjorts för att utröna om denna effekt är betingad av variationer i vindhastighet och temperatur. Tidigare forskning [3] har visat att dessa meteorologiska parametrar har stort inflytande på ljudets utbredning.

2 METEOROLOGISKA EFFEKTER PÅ LJUDUTBREDNING

Då ljudvågor utbreder sig i en inhomogen och rörlig atmosfär, dvs då vind- och temperaturvariationer med höjden (gradienter) förekommer, avböjs det (figur 2). Detta påverkar ljudnivån i en mottagare, då dels själva ljudstrålarna fokuseras eller defokuseras, och ljudets infallsvinkel mot marken förändras. Över mark med finit impedans (som t ex en gräsyta) kan man generellt säga att ljudnivån minskar då ljudet avböjs uppåt, och ökar när det böjs nedåt. I det förra fallet kan pga markens avskärmande effekt ljudskugga uppstå, och i det senare kan flera strålar från källan nå samma mottagarpunkt varvid höga ljudnivåer blir följden.

3 STRÅLGÅNGSMODELL

För att beräkna ljudets utbredning krävs, utom i vissa specialfall, numerisk lösning av nio första ordningens icke-linjära differentialekvationer [2], vilket ger läget på den aktuella strålen och dess ljudintensitet. Genom att skicka ut många strålar i olika utgångsvinklar kan de som når en specifik mottagare hittas och ljudtrycket beräknas, med hänsyn tagen till reflexion mot mark och känd impedans. Som indata krävs ljudkällans egenskaper, ljudnivån som funktion av frekvensen, samt vindhastighet, vindriktning och temperatur på olika höjd.

4 BERÄKNINGAR OCH RESULTAT

Ett tvåbladigt vindkraftverk som i figur 3 betraktades. Dess egenskaper som ljudkälla approximerades med att bladspetsarna, där hastigheten är störst, betraktades som rundstrålande punktkällor. Ljudnivåns variation med tiden beräknades rakt nedströms genom att ett varv för ett blad studerades. Vid tiden 0 står det rakt uppåt (position 1), och konsekutiva positioner med 45° vinkelavstånd valdes. Näsuddenverket har ett konstant varvtal av 25 varv/min, dvs 1 varv tar 2.4 s. Det tar då 0.3 s för bladen att vrida sig 45° . Då ljudnivån studerades rakt nedströms från tornet, beaktades att vid position 1.5 och 9 så skärmas ett blad av detta, och ger därför inte något bidrag till ljudnivån.

De indata som använts vid beräkningarna redovisas nedan.

Geometri: Navhöjd (m):	77
Bladlängd (m):	42.5 *)
Mottagarhöjd (m):	1.2
Horisontella avstånd (m):	57, 114, 300

Med dessa värden blir källhöjderna (bladspetsarna):

<u>Position</u>	<u>Höjd, övre (m)</u>	<u>Höjd, nedre</u>
1 (5, 9)	119.5	(skymd)
2 (4, 6, 8)	107.1	46.9
3 (7)	77	(77)

Som källstyrka ansattes en ljudnivå på 100 dB på 1 m avstånd för alla frekvenser, eftersom endast variationerna var viktiga, och inte ljudnivån i sig. Ljudtrycket från bladspetsarna beräknades vara korrelerat, vilket troligen inte är fallet. Detta medför att oktavbandsnivåerna i position 2 m fl kan vara något annorlunda. Ljudtrycket i de övriga positionerna är dock rätt, varför slutsatserna nedan ändå är berättigade.

Markytans akustiska egenskaper (markimpedansen) beskrivs med en fyrparameters markmodell enligt referens 4. Då mätdata ej förelåg från Näsudden bedömdes värden uppmätta över ängsmark i Borås [4] var lämpliga. Dessa är:

a:	0.32
b (°):	5
c (Hz):	17280
d (Hz):	1320

Strålgångsmodellen behöver även meteorologiska indata. Dessa består av vindhastighet på minst två höjder, vindriktning på en höjd och temperatur på minst två höjder. Till dessa indata kan flera funktionsuttryck för höjdvariationen anpassas.

För temperaturen användes en linjär funktion av höjden (z), då endast s k neutral skiktning studerades. Denna innebär ett temperaturavtagande med ca 1 °C per 100 m, dvs $dT/dz = -0.01$.

Vindriktningen valdes att vara konstant så att vinden blåste tvärs bladens rotationsplan. Vindhastighetens höjdberoende approximerades med en logaritmisk profil:

$$u(z) = \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

där u är vindhastigheten
 z_0 är höjden där vindhastigheten är 0.

*) FFA inlagd not: Verklig bladlängd 37.5 m, skillnaden påverkar dock ej nämnvärt resultat och slutsatser enligt uppgift från författaren.

Som värde användes 0.04 m, vilket är baserat på mätningar på Näsudden [5]. Ljudutbredningen studerades för olika givna vindhastigheter på navhöjd (77 m). Faktorn a kan för de olika fallen bestämmas ur ekv 1, varefter $u(z)$ kan beräknas. Tabell 1 ger vindhastigheten som funktion av höjden.

Tabell 1 Vindhastighetens höjdvariation enligt ekv 1, med given vindhastighet på navhöjd (u_n)

Höjd	u (m/s)	
	$u_n = 6$	$u_n = 15$
1	2.55	6.38
5	3.83	9.58
10	4.38	10.95
30	5.25	13.13
77	6	15
100	6.21	15.51
130	6.42	16.04

Med givna indata vad gäller geometri, mark och meteorologiska parametrar beräknades ljudnivåer för mittfrekvenser i tersbanden 200 - 2500 Hz, varefter oktavbandsnivåer togs fram från dessa. Resultaten redovisas i figurerna 4-8.

Figur 4 visar strålarna när bladen befinner sig i position 2 (eller position 4). Vi ser att två strålar, en direkt och en reflekterad, från varje källa når mottagaren. Ljudnivån blir summan av dessa fyra, med hänsyn tagen till ljudvågens fas. Vi ser också att nettoeffekten av temperaturgradienten (som vill böja strålarna uppåt) och vindhastighetsgradienten (som vill böja strålarna nedåt) blir en nedåtböjning, så att infallsvinkeln mot marken blir brantare än vad den skulle ha varit om gradienterna inte funnes. Ljudnivåerna ges i figur 7 vid tiden 0.3 s (0.9, 1.5 osv).

Figurena 5 - 7 visar ljudnivåvariationer, under ett varav, på olika avstånd rakt nedströms från kraftverket. Vi ser den typiska modulationen med en amplitud på 8-10 dB, vilket är i god överensstämmelse med mätresultaten, jämför figur 1. Den maximala ljudnivån erhöles då bladen var horisontella (positionerna 3 och 7), då fyra strålar i fas adderades, dvs vi hade konstruktiv interferens. Vi ser att amplituden minskar något med avståndet för de lägre oktavbanden. I figur 8 visas ljudnivåer för avståndet 300 m, men för $u_0 = 15$ m/s. En något minskad amplitud blev fallet.

För att studera hur fluktuationer av vindgradienten inverkar på modulationen varierades denna genom att vinden på 100 m höjd minskades med 0.5 m/s, och vinden på 10 m höjd ökades med 0.5 m/s, vilket gav en mindre vindgradient, se figur 9 och tabell 2. En motsvarande ökning och minskning på 100 respektive 10 m gav en större gradient. "Medel"-kurvan i figur 9

är gradienten med $u_n = 15$ m/s, se tabell 1. Fluktuationer av den storleksordningen är inte ovanliga, se referensⁿ 6. Dessa tre gradienter lades slumpmässigt ut i 0.5-sekundersperioder under ett varv. Detta illustreras i figur 10. I figurena 11 och 12 ges resultaten av dessa vindgradientvariationer för avstånden 114 respektive 300 m. Vi noterar att modulationen är klart märkbar vid det kortare avståndet, medan den vid det längre delvis har "suddats ut" av vindfluktuationerna. I verkligheten varierar också temperaturgradienten, vilket borde ge ytterligare "utsuddning". Detta kunde också bli fallet om vindkraftverket skulle betraktas som flera punktkällor med en lämplig fördelning längs bladet.

5 SLUTSATSER OCH FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER

Denna pilotstudie har visat att

- den numeriska strålgångsmodellen lämpar sig väl för den här sortens ljudutbredningsstudier,
- modellen gav realistiska värden på modulationens storlek,
- modulationens "utsuddning" med ökat avstånd kunde modelleras genom att variera vindhastighetsgradienten.

Vidare studier kunde vara att

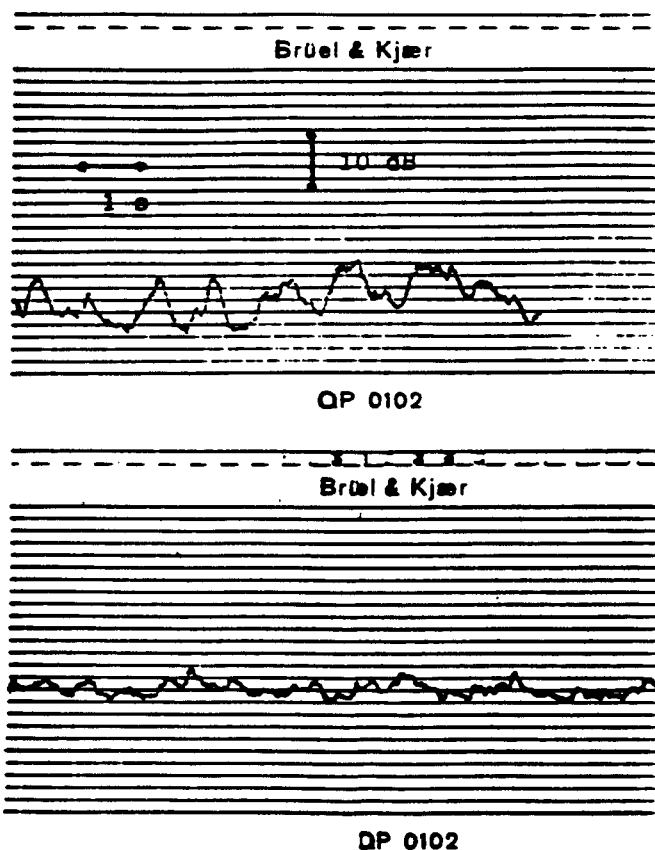
- studera modulationen i andra riktningar och på andra avstånd,
- införa variationer även för temperaturgradienten,
- variera de meteorologiska parametrarna baserat på mätningar av vind- och temperaturfluktuationer,
- betrakta en mer sammansatt ljudkälla, t ex punktkällor utpridda längs bladen.

Tabell 2 Vindhastighetens höjdvariation enligt ekv 1, med varierande vindgradient (medel motsvarar $u_n = 15$ i tabell 1)

Höjd (m)	u (m/s)		
	Mindre gradient	Medelgradient	Större gradient
1	7.89	6.38	4.89
5	10.38	9.58	8.78
10	11.45	10.95	10.45
30	13.15	13.13	13.10
77	14.61	15	15.38
100	15.01	15.51	16.01
130	15.42	16.04	16.64

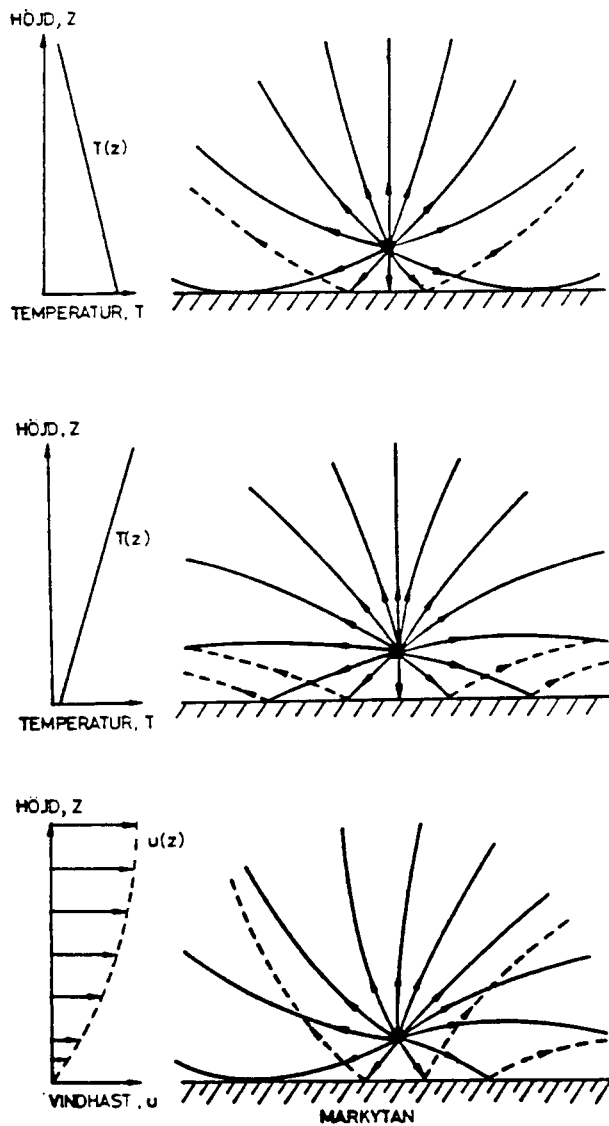
6 REFERENSER

- [1] Ekström, L. 3K Akustikbyrån i Stockholm AB,
(personlig kommunikation).
- [2] Hallberg, B.,
Larsson, C.,
Israelsson, S. En numerisk strålspårningsmodell för ljudutbredning.
Meteorologiska institutionen, Uppsala Universitet,
1989.
- [3] Hallberg, B.,
Larsson, C.,
Israelsson, S. Outdoor sound level variations due to fluctuating meteorological parameters.
Applied Acoustics 26(3), 1989.
- [4] Thomasson, S-E. Bestämning av markimpedansen.
Rapport R32:1979, Statens råd för byggnadsforskning, 1979.
- [5] Bergström, H.. Meteorologiska institutionen, Uppsala universitet,
(personlig kommunikation).
- [6] Bergström, H.. Wind gradient fluctuations and wind velocity differences at
Näsudden, Gotland, during near-neutral stratification.
Meteorologiska institutionen, Uppsala universitet.
Rapport 81, 1984.



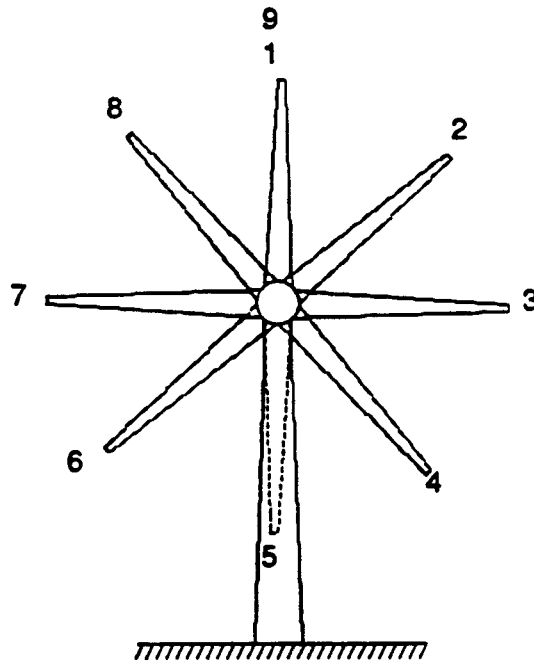
Figur 1

Ljudnivå för oktavbandet med mittfrekvensen 1000 Hz som funktion av tiden. Mätningarna utfördes på 1.2 m höjd nedströms Näsuddens vindkraftverk. I den övre delen visas ljudnivån på 114 m avstånd, medan den nedre visar förhållandet på 350 m avstånd.



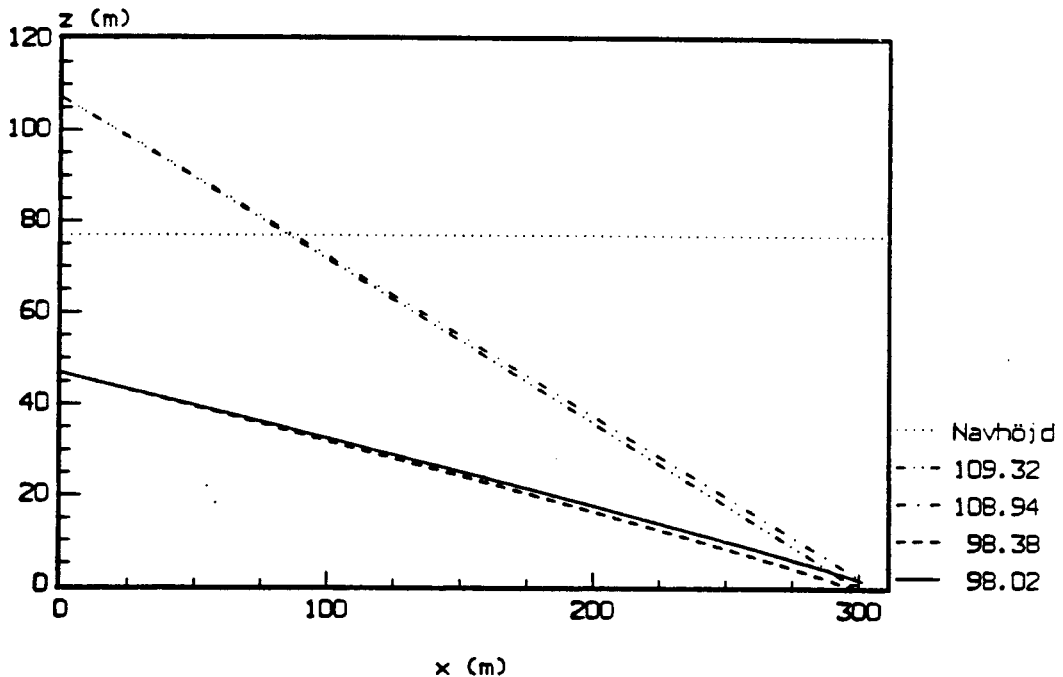
Figur 2

Avböjning av ljudstrålar från en källa i atmosfären, orsakad av, i ordning uppifrån: minskande temperatur med höjden (vanligast dagtid), ökande temperatur med höjden (vanligtvis nattetid) och av vinden.



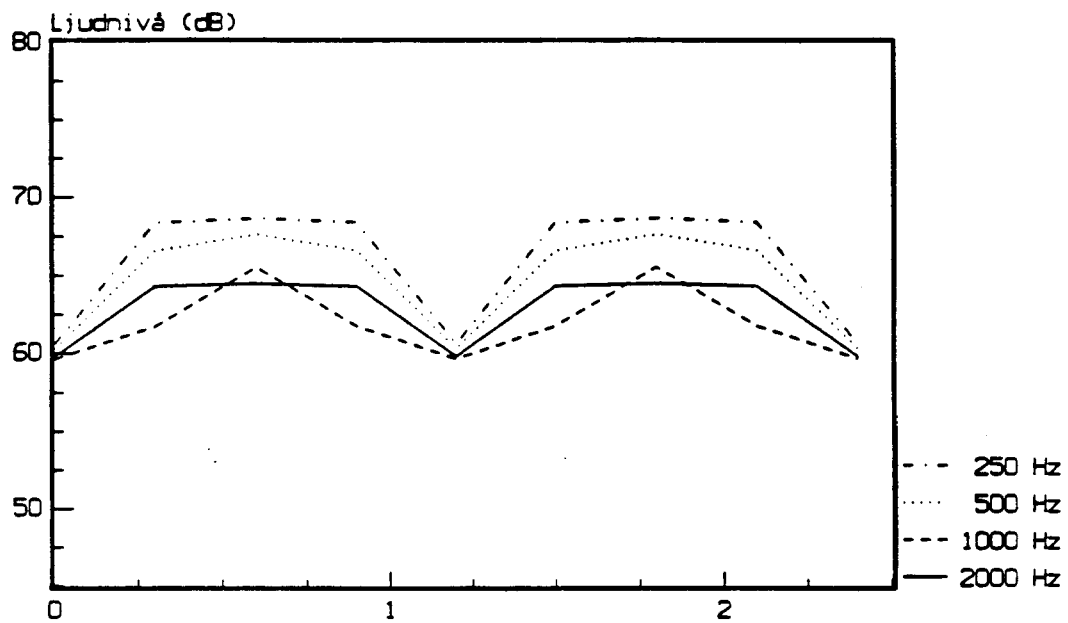
Figur 3

Schematisk bild av ett tvåbladigt vindkraftverk med uppströmsrotor, sett från en position nedströms. Ett varv startar med ena bladet i position 1, och slutar med detta blad i position 9. Vid dessa och position 5 skymmer tornet ett av bladen, vilket illustreras genom streckning av detsamma.



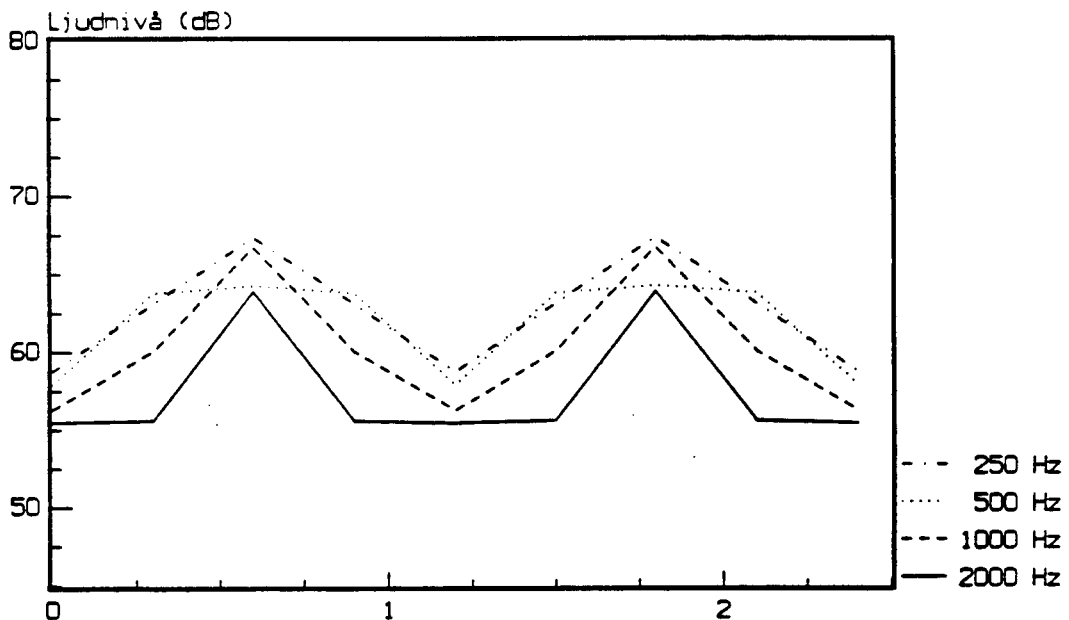
Figur 4

Strålgång då bladen är i position 2, 4, 6 eller 8 (se Fig 3). Ljudnivån blir summan av de fyra strålar som når mottagaren vid 300 m på 1,2 m höjd. Navhöjden är markerad med en punktdad linje, och utgångsvinklarna listas (0° innebär att strålen är riktad rakt uppåt).



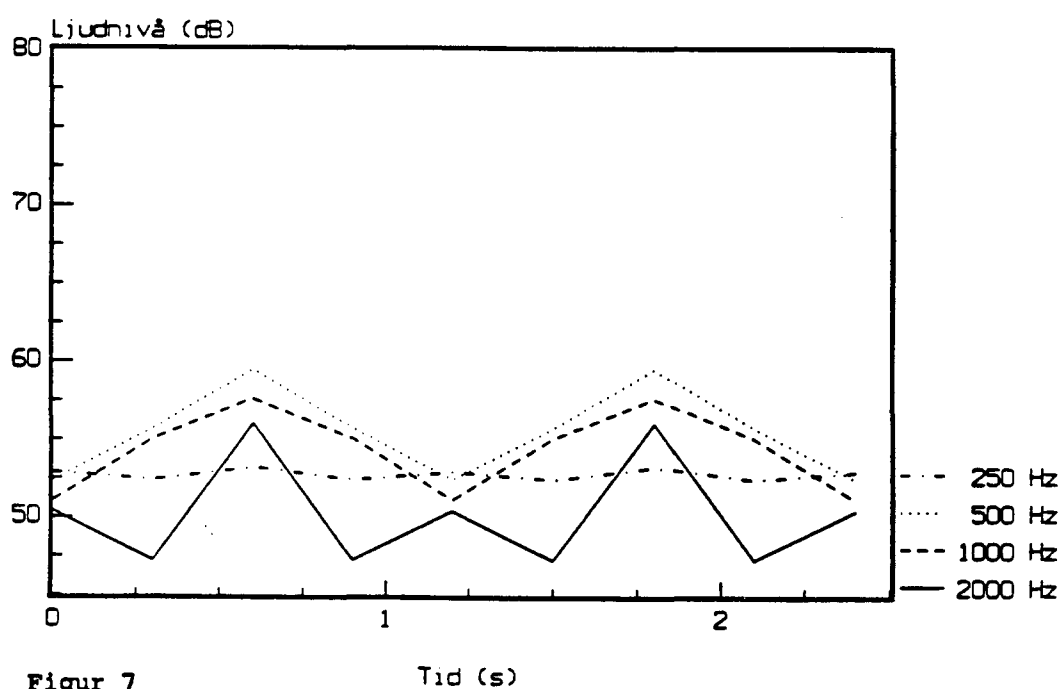
Figur 5 Tid (s)

Ljudnivån för olika oktavband som funktion av tiden, under ett varv. Avstånd: 57 m. Mottagarhöjd: 1,2 m. Neutral skiktning. Vindhastighet på navhöjd (u_n): 6 m/s.



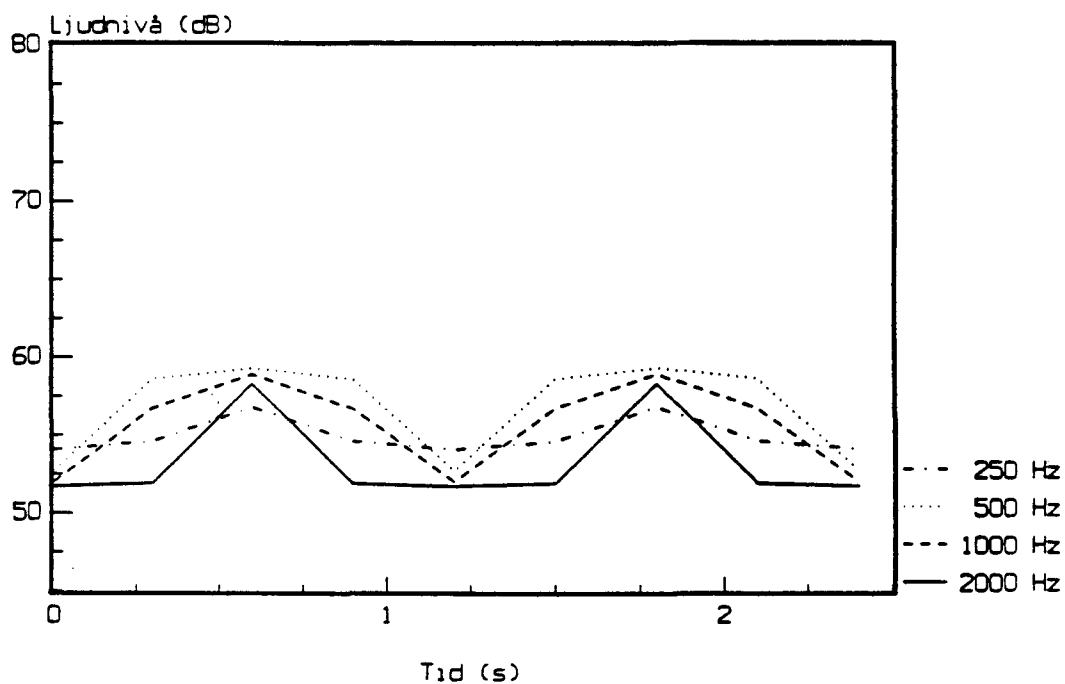
Figur 6 Tid (s)

Ljudnivån för olika oktavband som funktion av tiden, under ett varv. Avstånd: 114 m. Mottagarhöjd: 1,2 m. Neutral skiktning. Vindhastighet på navhöjd (u_n): 6 m/s.



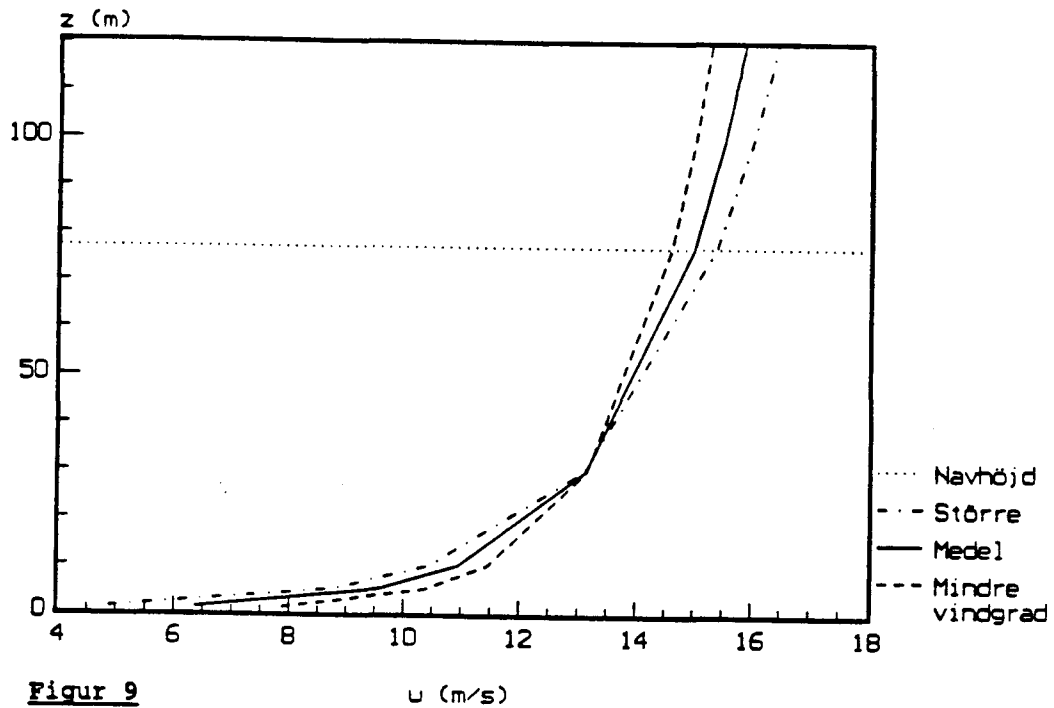
Figur 7

Ljudnivån för olika oktavband som funktion av tiden, under ett varv. Avstånd: 300 m. Mottagarhöjd: 1,2 m. Neutral skiktning. Vindhastighet på navhöjd (u_n): 6 m/s.



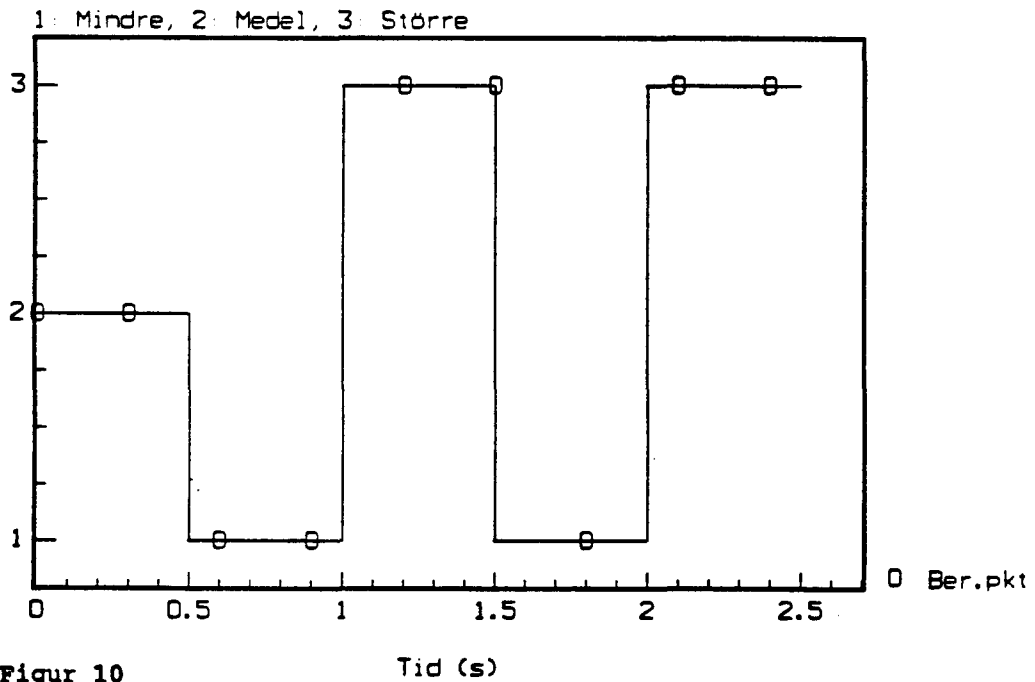
Figur 8

Som Fig 7 fast för $u_n = 15$ m/s.



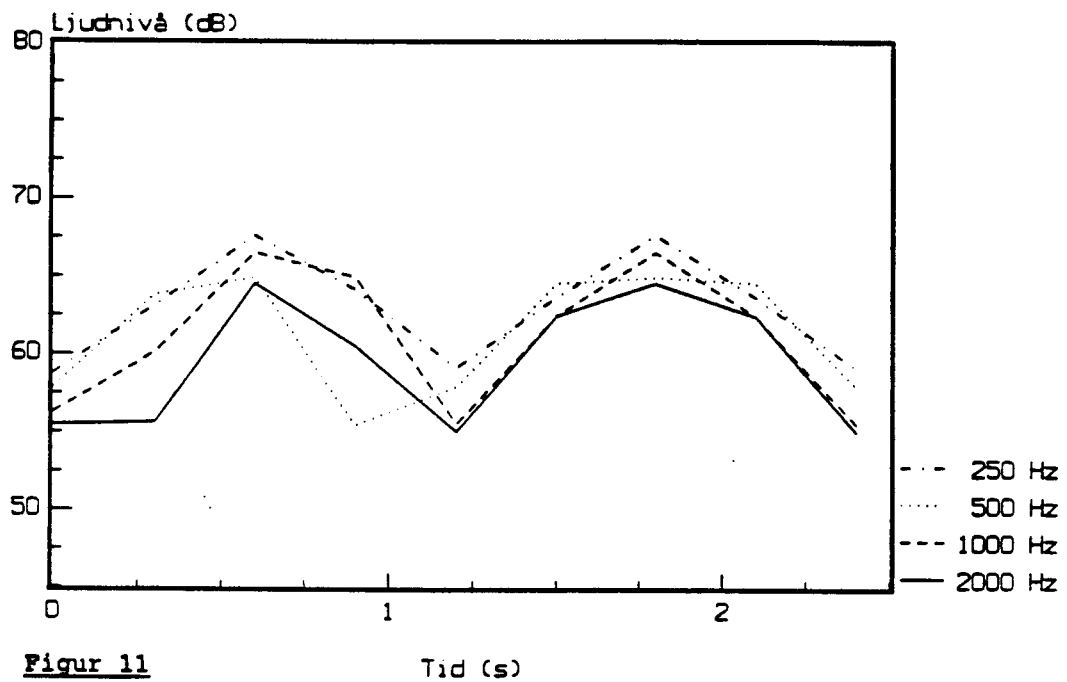
Figur 9

Vindhastigheten som funktion av höjden. Tre fall visas: Medelfallet (se Tabell 1) med $u_D = 15$ m/s, och två fall med större respektive mindre vindhastighetsgradient (se Tabell 2).



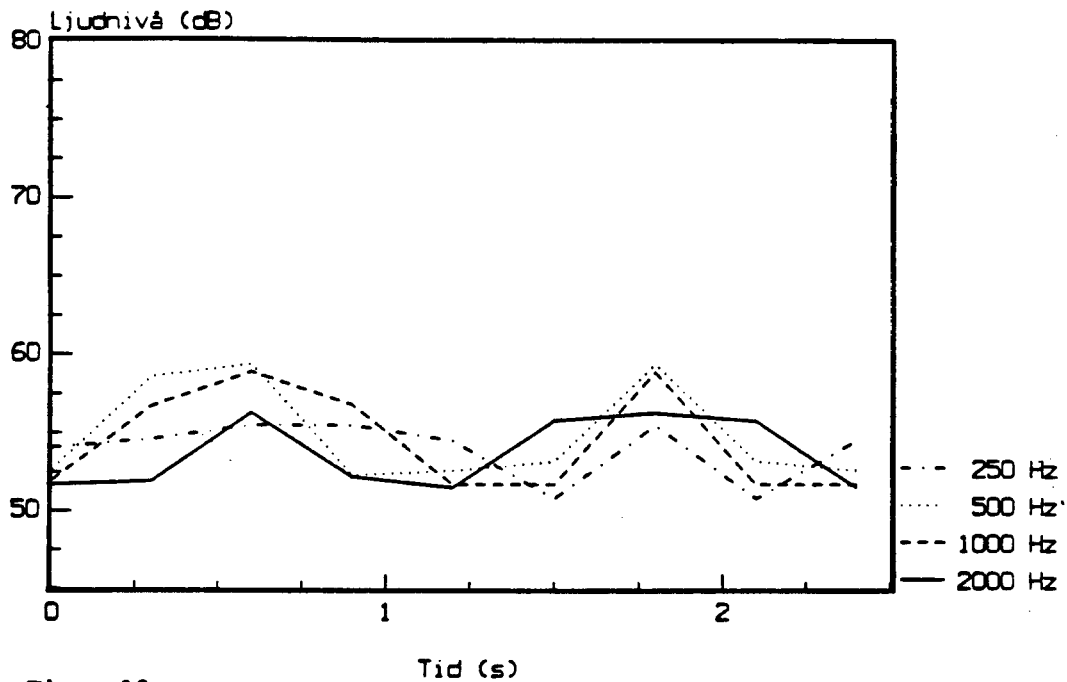
Figur 10

Variation av vindhastighetsgradienten under ett rotorvarv. Tidpunkter för vilka beräkningar har skett är markerade.



Figur 11

Ljudnivån för olika oktavband som funktion av tiden, under ett varv då vindhastighetsgradienten varierat som i Fig 10. Avstånd: 114 m. Mottagarhöjd: 1,2 m. Neutral skiktning.



Figur 12

Som Fig 11, fast för avståndet 300 m.

Utgivare FLYGTEKNISKA FÖRSÖKSANSTALTEN Aerodynamiska avdelningen Box 11021 (FFA) STOCKHOLM	Beteckning FFA TN 1990-38		
	Datum Oktober 1990		Sekretess Öppen
	Dnr 1128/90	Ex nr 37	Antal sidor 13
Uppdragsgivare Flygtekniska försöksanstalten (FFA), Bromma STOCKHOLM	Uppdragsnummer AU-3519	Beställning 506 266-5 Provprogram	
Fdok			
Rapportens titel BERÄKNING AV LJUDUTBREDNING FRÅN VINDKRAFTVERK AV NÄSUDDEN- TYP MED HJÄLP AV EN ATMOSFÄRISK STRÅLGÅNGSMODELL			
Författare Bengt Hallberg *)		Arbetet utfört av	
Granskad av S-E Thor		Godkänd av Anders Gustafsson	
Sammanfattning SAMMANFATTNING I denna pilotstudie har en numerisk strålgångsmodell utnyttjats för att ta reda på om meteorolo-giska effekter påverkar ljudutbredningen från ett tvåbladigt vindkraftverk så att den periodiska ljudnivåvariation (modulation), som har visat sig vid mätningar, minskar med ökande avstånd. Resultaten blev att modellen gav realistiska värden på modulationens storlek, och att modulationens "utsuddning" med ökat avstånd kunde illustreras genom att variera vind-hastighetsgradienten under den tid det tar för ett blad att vrida sig ett varv. Arbetet har utförts på uppdrag av Flygtekniska försöksanstalten. Studsvik rapport nr NS-90/33. *) Studsvik Nuclear			
Nyckelord Vindkraftverk, Buller, Vindkraft, Modulation, Strålgångsmodell			
			Godkänd för publicering
Distribution STEV Studsvik FFA Ex nr: 1-10 11-30 31-80			