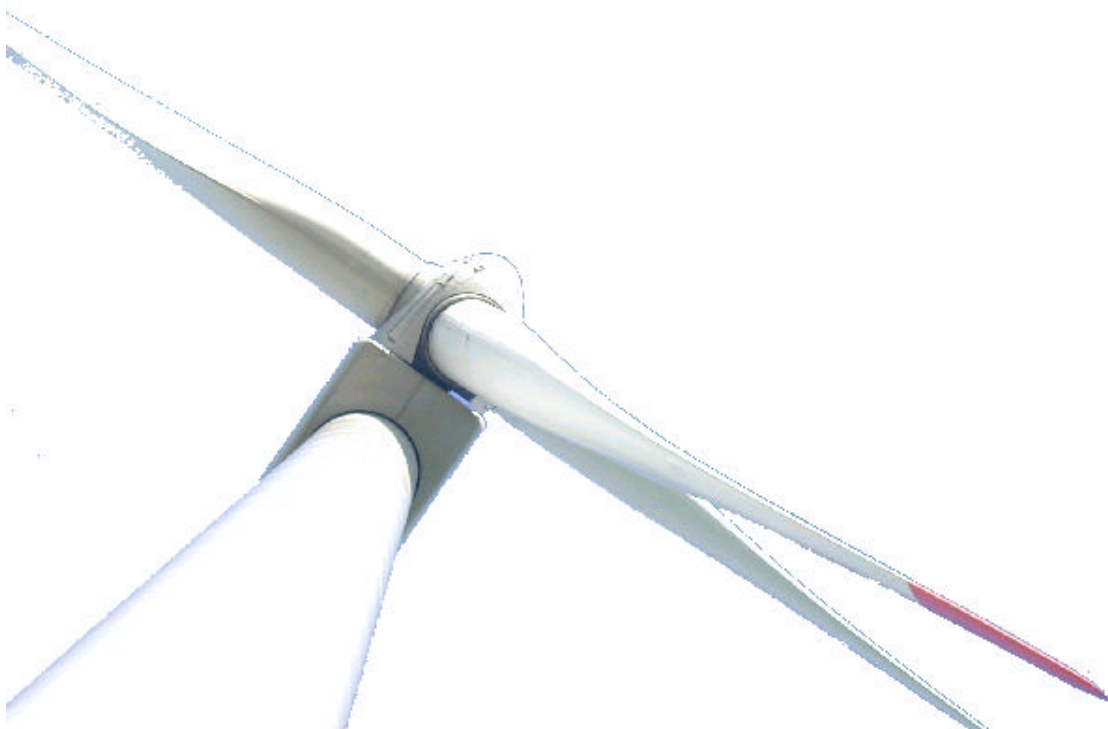


Ψ \vec{E} t' $\&$ N_2
 $\$$ \odot \mathcal{H} \triangle $\%$ Σ
 ω \perp \mathfrak{N} $|k|$ \ddot{e} \angle \S

Hoge molens vangen veel wind

wind- en geluidmetingen
bij een hoge windturbine



Hoge molens vangen veel wind

wind- en geluidmetingen bij een hoge windturbine

Herman Kloosterman
Derek Land
Joost Massolt
Georg Muntingh
Frits van den Berg

Datum: januari 2002
Uitgavenummer: NWU-106
Aantal blz: 24

Natuurkunde winkel
Rijksuniversiteit Groningen
Nijenborgh 4
9747 AG Groningen
tel: 050 - 363 4867
nawi@phys.rug.nl

*De Natuurkundewinkel stelt
natuurkundige kennis en vaardigheid
beschikbaar aan niet-commerciële
groepen en organisaties, en overheden
door het verlenen van advies en
het uitvoeren van onderzoek*

Samenvatting

Dit project probeert een verklaring te geven voor het feit dat windturbines bij bepaalde weersomstandigheden meer geluid maken en daardoor op grotere afstand te horen zijn dan volgens de gebruikelijke theorie mogelijk is. Deze theorie voorspelt dat de windsnelheid logaritmisch toeneemt met de hoogte. Uit ons project blijkt dat dit verband tussen windsnelheid en hoogte niet geldt bij een stabiele atmosfeer. De windsnelheid neemt dan sneller toe bij het toenemen van de hoogte. Uitgaande van de windsnelheid op 10 meter hoogte zal de windsnelheid op ashoogte groter zijn dan volgens het logaritmische verband. Een windturbine zal daardoor meer geluid produceren.

blz. 4

Inhoudsopgave

	blz.
1. Inleiding	5
2. Het windsnelheidsprofiel	
2.1. Ontwikkeling windsnelheid met de hoogte	6
2.2. Ontwikkeling windsnelheid in stabiele atmosfeer	7
2.3. Effect op hoorbaarheid windturbine	7
3. Experimentele opzet	
3.1. Keuze van meetmethoden	8
3.2. Meetlocatie en weer	9
3.3. De geluidsmeting	9
3.4. De directe windmeting	10
3.5. De windprofielmeting	10
3.6. Verwerking videobeelden	11
4. Resultaten	
4.1. Directe windmetingen	13
4.2. Geluidmetingen	13
4.3. Stijgsnelheid en baan ballonnen	15
4.4. Gemeten windprofielen	16
5. Gevolgtrekkingen uit de meetresultaten	19
6. Conclusie	21
Referenties	23
Dankwoord	23
Appendix: Technische gegevens Tacke 1.5 windturbine	24

1. Inleiding

Voor het vak “Practicum Project”, gegeven aan de Rijksuniversiteit Groningen in het eerste jaar van de studie Natuur- en Sterrenkunde, is het de bedoeling zelf een onderwerp voor een project te vinden. Een andere mogelijkheid is om een project aan te nemen van de Natuurkundewinkel. Hier hebben wij voor gekozen, mede omdat zo'n project ook een maatschappelijke inslag heeft, en dat was iets wat ons allemaal aansprak.

Bij het plaatsje Bourtange aan de Nederlands-Duitse grens staan aan de Duitse kant een aantal windturbines en het is de bedoeling dat er nog meer van deze windturbines met een ashoogte van ongeveer 100 meter, worden geplaatst. Een bewonersvereniging in Bourtange heeft hier bezwaar tegen aangetekend, omdat zowel de rust als het uitzicht hierdoor aangetast worden. De windturbines produceren volgens de omwonenden te veel lawaai: zelfs op een afstand van een kilometer komt het lawaai nog boven het omgevingsgeluid uit. Vooral 's nachts komt dit verschijnsel voor. De vereniging heeft inmiddels een advocaat in de arm genomen. Om ook onafhankelijk gemeten waarden in het onderzoek te betrekken heeft de vereniging de Natuurkundewinkel ingeschakeld.

Wij hebben als practicumgroep deze opdracht aangenomen. De opdracht was om de windsnelheid op verschillende hoogtes te bepalen, en dan met name het verschil in die windsnelheden tussen een stabiele en instabiele atmosfeer. Daarnaast was het de bedoeling correct gemeten geluidsgegevens te verkrijgen. De begeleiding is verzorgd door ir. Frits van den Berg, coördinator van de Natuurkundewinkel RUG, die ook heeft geholpen om van ons verslag dit rapport te maken.

blz. 6

2. Het windsnelheidsprofiel

2.1. Ontwikkeling windsnelheid met de hoogte

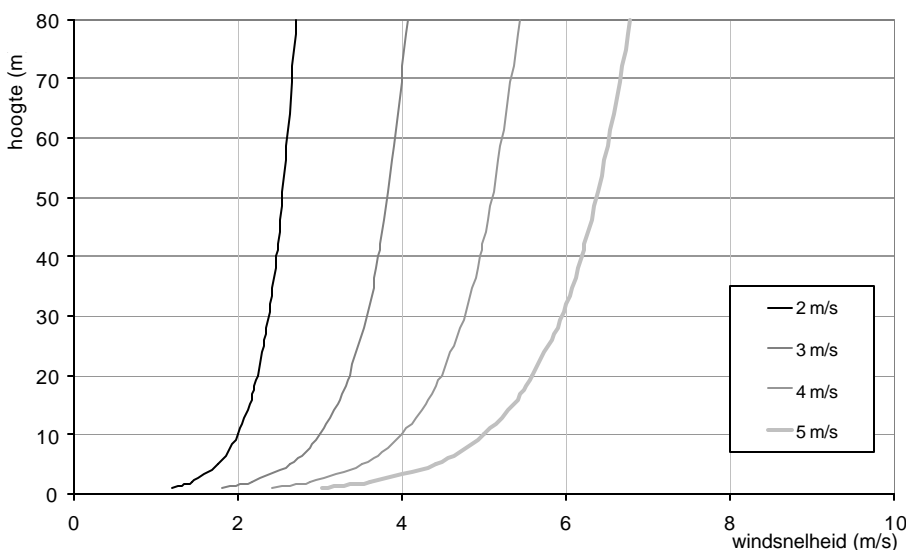
Het geluid dat door een moderne windturbine wordt uitgestraald wordt vooral bepaald door de snelheid waarmee de lucht langs de wieken beweegt. Deze snelheid wordt weer bepaald door het toerental van de turbine en de windsnelheid ter hoogte van de wieken. De windsnelheid neemt altijd met de hoogte boven het aardoppervlak toe, zodat de windsnelheid ter hoogte van de wieken groter is dan bij de grond.

Als het geluidsvermogen van een windturbine wordt gemeten, is de windsnelheid op 10 meter hoogte de referentiewaarde voor de windsnelheid. Deze hoogte is gebruikelijk voor opgave van de windsnelheid, ook bijvoorbeeld in weerberichten.

De voor geluidshinder belangrijkste periode is de nacht, omdat mensen dan willen slapen. Bovendien is het dan vaak stiller dan overdag, zodat een hinderlijk geluid meer opvalt. De toelaatbare geluidsniveaus liggen 's nachts dan ook lager dan overdag.

De hoeveelheid door een windturbine uitgestraald geluid wordt in het algemeen echter overdag gemeten. Maar overdag is het gebruikelijk dat de atmosfeer instabiel of neutraal is, d.w.z. dat de lucht meer of minder turbulent is. De windsnelheid vertoont dan een bepaalde toename met de hoogte, namelijk een logaritmische toename. Het gebruikelijke model voor de windsnelheid v_h op een hoogte h , is dan ook een logaritmisch model, met als standaard windsnelheid de windsnelheid v_{10} op hoogte 10 meter. Het verloop wordt daarin gegeven door onderstaande formule [zie bijvoorbeeld referentie 1 of 2], waarin z de ruwheidshoogte van het landschap is (bij vlak grasland geldt $z = 3$ cm):

$$v_h = \frac{v_{10} * \log \frac{h}{z}}{\log \frac{10}{z}}$$

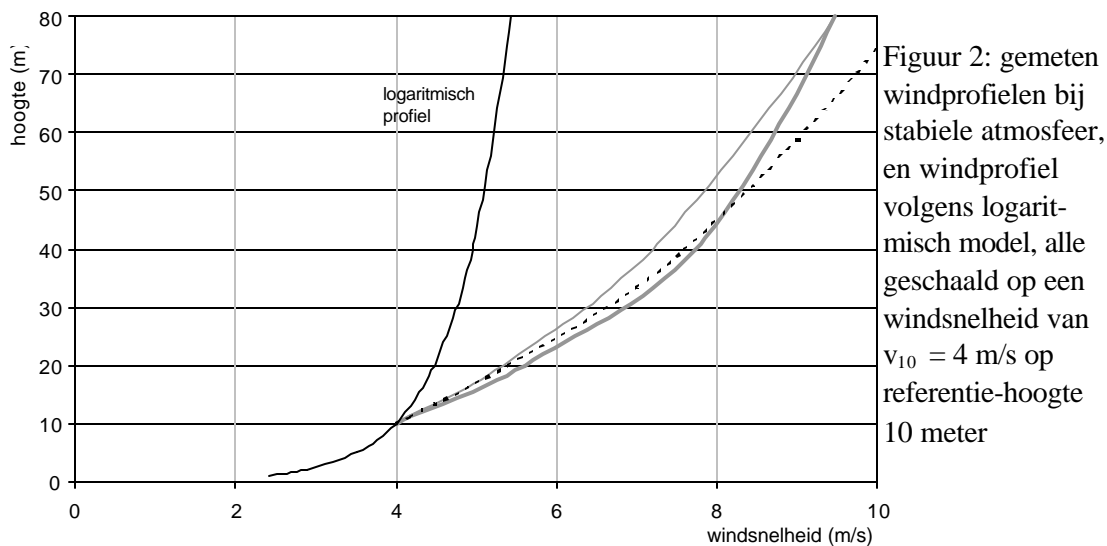


Figuur 1: ontwikkeling windsnelheid met hoogte volgens logaritmisch model (instabiele en neutrale atmosfeer), bij verschillende windsnelheden v_{10} op referentiehoogte 10 meter

2.2. Ontwikkeling windsnelheid in stabiele atmosfeer

Bij weinig wind en een afkoelende bodem is er vrijwel geen turbulentie in de atmosfeer en is deze stabiel. De atmosfeer is dan dicht bij het aardoppervlak in lagen opgebouwd, die nauwelijks onderling gekoppeld zijn. Naarmate de afkoeling langer duurt neemt de dikte van deze lagen toe. Bij meer wind en door verwarming van de bodem, wat overdag optreedt, verdwijnt de laagsgewijze opbouw. De atmosfeer is dan niet meer stabiel. Een stabiele atmosfeer komt 's nachts gedurende bijna de helft van de tijd voor, namelijk tijdens 45% van alle nachturen per jaar [zie referentie 1].

Doordat de luchtlagen bij een stabiele atmosfeer over elkaar heen glijden, kent de wind geen logaritmisch profiel meer, maar een profiel waarbij de lucht op de grond vrijwel stilstaat en bij toename van de hoogte de windsnelheid relatief snel toeneemt. In figuur 2 zijn een aantal door Holtslag gemeten windprofielen gegeven [overgenomen uit referentie 1].



2.3. Effect op hoorbaarheid windturbine

Bij een stabiele atmosfeer verwachten we dat, uitgaande van de windsnelheid op 10 meter hoogte, de wind op ashoogte van de windturbine sterker zal zijn dan volgens de theorie die geënt is op het windprofiel in een instabiele atmosfeer. Deze stabiele atmosfeer komt vooral in (heldere) nachten voor.

We verwachten in een heldere nacht een windprofiel met een meer lineaire toename met de hoogte dan overdag, als de toename logaritmisch is.

Bij de geluidsmeting verwachten we dat door de hogere windsnelheid op ashoogte 's nachts een hoger geluidsniveau optreedt dan overdag, ook al is de windsnelheid op 10 meter hoogte hetzelfde.

3. Experimentele opzet

3.1. Keuze van meetmethoden

We moeten het geluidsniveau tengevolge van de windturbine, de windsnelheid op 10 meter hoogte (referentiehoogte) en het windprofiel kunnen meten.

Voor het meten van het geluidsniveau stond al snel vast dat er gebruik zou worden gemaakt van een bij de Natuurkundewinkel aanwezige geluidsmeter met automatische dataopslag (Larson Davis type 2800). Bij de metingen hebben we zoveel mogelijk de standaardregels [zie referentie 2] in acht genomen.

De directe meting van de windsnelheid stond ook snel vast. De Natuurkundewinkel beschikte over een windmeter die we konden gebruiken. In Bourtange was er reeds een 10 meter lange paal, waarop we deze windmeter konden bevestigen.

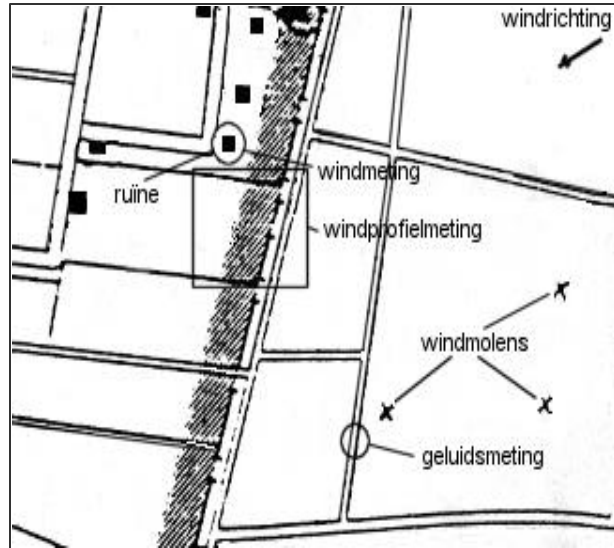
Het windprofiel was een andere zaak. In eerste instantie waren wij van plan om het profiel te onderzoeken door middel van een windmeter aan een weerballon, die met vliegertouw aan de grond bevestigd zou worden. Het voordeel was dat de windsnelheid nauwkeurig gemeten zou worden. Het was echter niet helemaal duidelijk of deze manier van meten überhaupt wel mogelijk zou zijn, want al snel was duidelijk dat op de ballon als gevolg van zijn omvang ook bij weinig wind een grote horizontale kracht zou werken. Hierdoor zou de verhouding tussen de horizontale en de verticale kracht (de stijgkracht) op de ballon zeer ongunstig zijn. Het testen wees uit dat, ook bij weinig wind, bij een grote ballon aan een touwtje, dat touwtje geen grotere hoek dan 30 graden met het aardoppervlak zou maken. Om voldoende hoogte te bereiken zou dan het touw lang moeten zijn, wat echter weer een groter gewicht en dus een geringere stijgkracht zou veroorzaken.

Een ander idee was om de apparatuur onder een vlieger te hangen. Een probleem hierbij zou zijn hoe de vlieger stabiel in de lucht te houden. Daar wij geen van allen ervaren vliegersportbeoefenaars zijn zou dit onverwachte moeilijkheden kunnen geven. Om de mogelijkheid uit te sluiten dat de vlieger (met meetapparatuur) zou crashen, hebben wij hier van afgezien. Overigens konden we ook bij de uitvoerbaarheid van deze meetmethode vraagtekens zetten. Het was namelijk de bedoeling te meten bij weinig wind en de vraag is of een vlieger dan nog voldoende draagvermogen zou hebben, ook al zouden we de meetapparatuur pas ophijzen als de vlieger al hoog in de lucht zou staan.

Uiteindelijk hebben wij gekozen voor een oplossing die al eerder bij ons was opgekomen, namelijk het oplaten van heliumgevulde ballonnen en dan met een videocamera het traject van de ballon vast te leggen. Hieruit is dan een windprofiel op te maken. Dit gaf echter ook nog veel problemen. Zo waren de ballonnen niet te zien in het donker. Een echte oplossing hebben wij hier, binnen de beschikbare tijd, niet voor gevonden, daarom konden we alleen meten tot kort na zonsondergang en pas weer vanaf kort vóór zonsopgang.

3.2. Meetlocatie en weer

De metingen werden ten zuidoosten van Bourtange gedaan. Er is voor gekozen om te meten op woensdagavond 9 tot en met donderdagochtend 10 mei 2001. De temperatuur op woensdag was maximaal 21 °C (donderdag: 25 °C) en minimaal 8°C (do: 11 °C). Beide dagen telden elk 14 uur zonneshijn, geen regen en vrijwel geen bewolking. De windsnelheid bedroeg gemiddeld 4,5 m/s op woensdag uit oostnoordoost, en 4,8 m/s op donderdag uit het oosten. Deze weergegevens zijn van station Eelde. Gezien de weersomstandigheden was de atmosfeer op beide dagen overdag instabiel, 's nachts stabiel. Op 9 mei ging de zon onder om 21:11, de volgende dag op om 6:01.



Figuur 3: Plattegrond van de meetlocatie, ca. 2 km ten zuidoosten van Bourtange; de uitsnede beslaat in werkelijkheid 2,4 bij 2,7 km

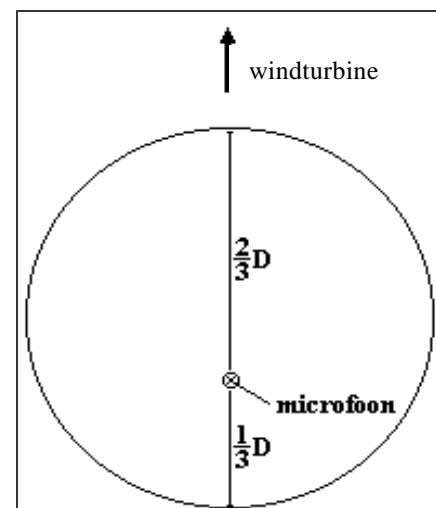
Zoals in figuur 3 te zien is, werd de directe windmeting bij de ruïne van een huis gedaan waar we de mogelijkheid hadden om de windmeter op een hoogte van 10 meter te bevestigen. De windprofielmeting is op braak liggend weiland vlakbij de ruïne gedaan. De geluidsmeting is op de aangegeven plaats gedaan, omdat we daar conform de richtlijn (met betrekking tot afstand en de richting van de wind; zie referentie 2) konden meten.

De drie windturbines zijn van het type Tacke 1.5s met een ashoogte van 80 meter en een rotor diameter van 70,5 meter. De driebladige rotor heeft een toerental dat twee waarden (tussen 11 en 20 omwentelingen per minuut) kan aannemen en levert energie bij windsnelheden vanaf 3 m/s (op ashoogte). Zie verder de appendix. Er is gemeten aan de meest westelijke turbine.

3.3. De geluidsmeting

Bij de geluidsmeting hebben we gebruik gemaakt van de richtlijn van Sten Ljunggren [referentie 2]. We hebben gemeten op ongeveer de afstand waarop het geluid volgens deze richtlijn gemeten moet worden. Deze standaard afstand is de hoogte van de as van de windmolen plus de lengte van een wiek. In dit geval was deze afstand ongeveer 110 meter: wij hebben gemeten op een afstand van 102 meter. De hoek tussen de windrichting en de lijn windturbine - meting mocht maximaal 15° bedragen: wij waken hooguit 10° van de windrichting af.

Op de grond hebben we een cirkelvormige houten plaat van 1 meter doorsnede neergelegd (zie figuur 4). Daarop hebben we de microfoon op afstand $\frac{2}{3}$ diameter, van de kant die zich het dichtste bij de windmolen bevond



Figuur 4: positie microfoon op ronde houten plaat

blz. 10

neergelegd, gericht naar de windmolen. We hebben er rekening mee gehouden dat het middelpunt van de microfoon hooguit 8 mm van de plaat verwijderd mocht zijn. Daarom is er gebruik gemaakt van een halve windbol, alleen boven de microfoon. Met behulp van een ijkbron (Bruel & Kjaer type 4230) is de geluidsmeter geijkt. De gebruikte geluidsmeter was een Larson Davis type 2800.

3.4. De directe windmeting

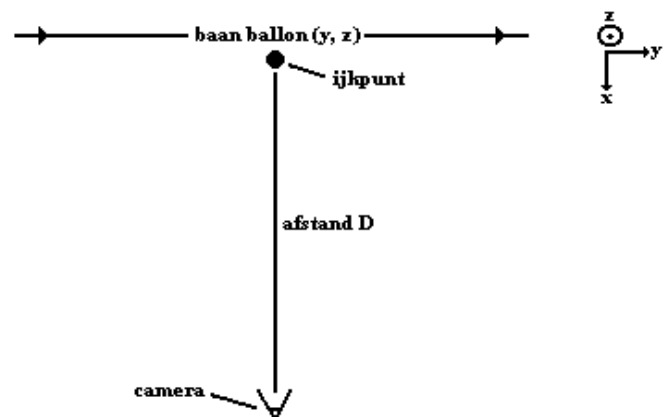
Voor de windmeting op 10 meter hoogte was reeds een constructie voorhanden. Er was een paal beschikbaar die was uit te schuiven tot een lengte van 10 meter. De windmeter werd hier op gemonteerd. De paal was te draaien, zodat we de windmeter in de richting van de wind konden draaien. De windmeter was door middel van een signaaldraad op de grond af te lezen. De gebruikte windmeter was een DTA 4000 digitale anemometer.

3.5. De windprofielmeting

Bij deze meting was het de bedoeling de windsnelheid als functie van de hoogte te meten. Dit hebben we gedaan door een vuilniszak samen met een paar ballonnen, alle gevuld met helium, de lucht in te laten en dit met een videocamera op te nemen. De donkere vuilniszak had als voordeel dat deze goed zichtbaar was op het videoscherm, een nadeel van de vuilniszak was dat door het gewicht van de zak er weinig opwaartse kracht overbleef. De ballonnen zelf waren niet zichtbaar op het scherm maar hielpen de vuilniszak om te stijgen. We zijn er vanuit gegaan dat de vuilniszak en de ballonnen met dezelfde snelheid als de wind mee zouden bewegen.

Onder de baan van de ballon hebben we een ijkpunt opgesteld, bestaande uit een paal met latjes met tussen afstand van 4,7 meter. De afstand tussen de camera en dit ijkpunt hebben we gevarieerd gedurende de metingen. Afstanden tussen de 100 en 300 meter waren voor ons het meest geschikt omdat bij een kleinere afstand de baan van de ballon niet goed in beeld gebracht kon worden en bij een grotere afstand de ballon niet meer te zien was.

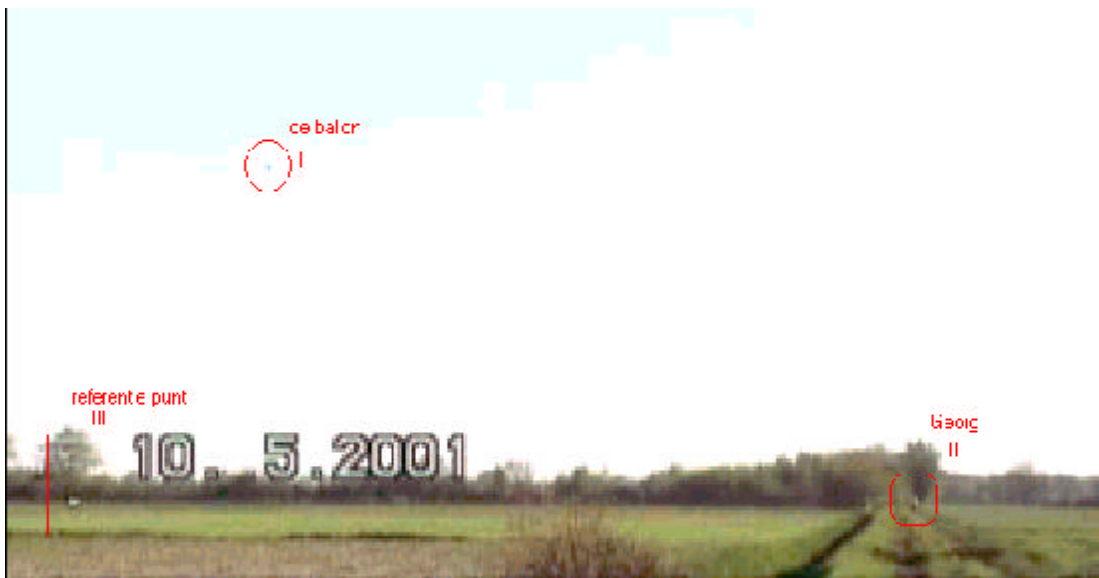
De tijd hebben we gehaald uit het aantal frames (= afzonderlijke beelden waaruit video-opname bestaat). Om de seconde hebben we een frame uitgelezen ('gecaptured') zodat de snelheid van de ballon te bepalen is uit de plaatsverschillen van opvolgende frames. Door de beelden in te lezen in een tekenprogramma is het mogelijk om de baan van de ballon vast te leggen. In figuur 5 hebben we de posities weergegeven van de camera en van de baan van de ballonnen.



Figuur 5: schets (bovenaanzicht) van de positie van de camera ten opzichte van de baan van de ballonnen; de wind komt uit de y- richting, de z-richting staat omhoog (loodrecht op vlak van tekening)

3.6. Verwerking videobeelden

Om de videobeelden te verwerken hebben we gebruik gemaakt van software: voor het bewerken van de video beelden hebben we gebruik gemaakt van Pinnacle Systems™ Studio PCTV pro, voor het bewerken van de videocaptures PhotoShop 5. Scènes van de video-opnames (zoals het voorbeeld in figuur 6) hebben we ingeladen in het tekenprogramma zodat we door het aantal pixels tussen punten te tellen vrij precies de afstanden konden opmeten tussen de verschillende punten omdat de (werkelijke) breedte en de hoogte van de ijkpaal bekend waren. Een pixel kwam overeen met ongeveer 15 cm. We hebben elke seconde een beeld ‘gecaptured’ en hierin de positie van de ballon ten opzichte van de ijkpaal vastgelegd. We hebben niet alle opnamen gebruikt omdat de ballon niet altijd even goed zichtbaar was.



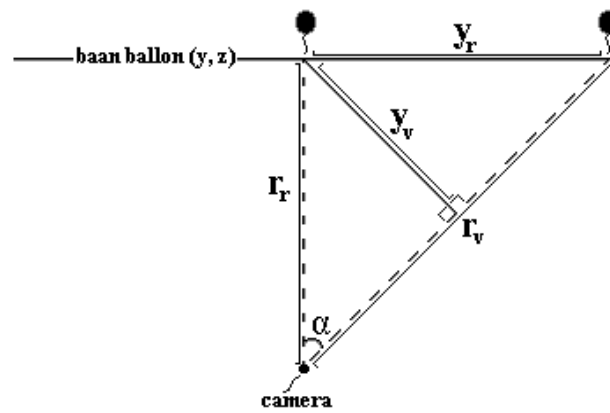
Figuur 6: voorbeeld van een frame (beeld) waaruit afstanden zijn bepaald; deze foto is van de meting van het windprofiel om 08:15 uur. I is een cirkel waarbinnen de ballon zich bevindt. II is Georg die de ballon heeft losgelaten en III is de ijkpaal met 2 horizontale latjes met een onderlinge afstand van 4.7 meter; de onderste lat staat op 0.5 meter. De kwaliteit van de afbeelding die we gebruikt hebben, is vele malen beter dan de hier afgedrukte versie.

Met behulp van de ijkpunten in de x- en de y-richting zijn de pixels om te rekenen naar meters. Echter, als de kijkrichting van de camera niet loodrecht op het baanvlak van de ballonnen staat treedt een vertekening op: de werkelijke afstanden zijn dan een schuine projectie op het beeldscherm. Hiervoor hebben we als volgt gecorrigeerd: de werkelijke afstand in y- (baanvlak) en z- (hoogte) richting is de gemeten afstand gedeeld door de factor $\cos(\alpha)$ (zie figuur 7). Het verband tussen y_r en y_v wordt dan gegeven door:

$$y_r = y_v / |\cos(\alpha)| = y_v / \sqrt{1 - y_v^2/r_r^2}$$

waardoor de werkelijke afstand kan worden bepaald uit de afstand camera-ijkpaal r_r en de afstand y_v bepaald uit het videobeeld. Hetzelfde geldt voor z (in de formule kan men alle y door z vervangen).

blz. 12



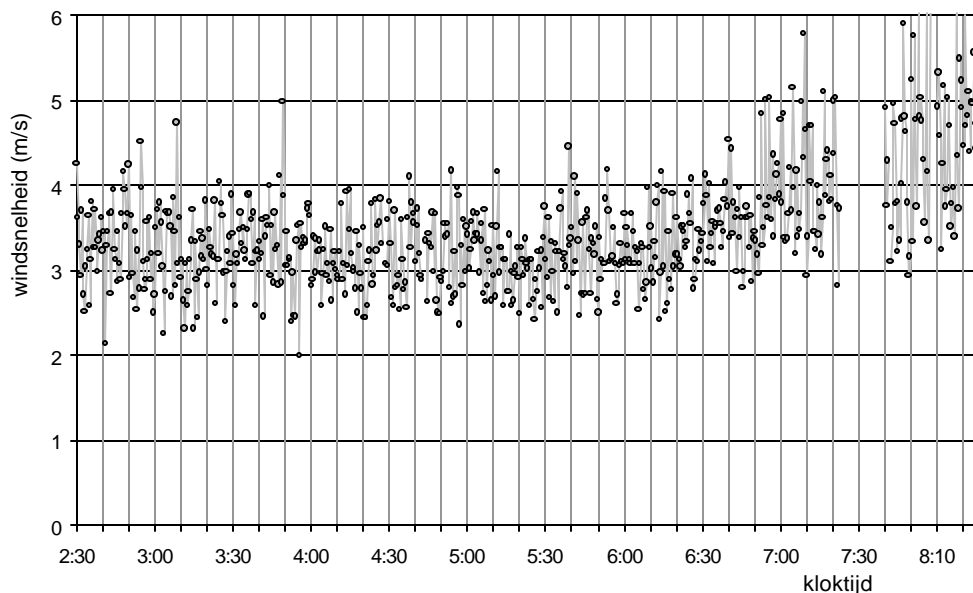
Figuur 7: Afbeelding van de baan van de ballon in de y -richting. y_v wordt als schuine projectie op het videobeeld waargenomen, y_r is de werkelijke afstand die te zien zou zijn in een parallelprojectie. r_r is de afstand camera-baanvlak, r_v de afstand camera - beeldpunt langs de lijn loodrecht op het beeldvlak

4. Resultaten

De verschillende te onderzoeken grootheden zijn niet alle gelijktijdig gemeten. De directe metingen van de windsnelheid (op 10 meter hoogte) vonden plaats in de nacht en vroege ochtend. De metingen van het windprofiel waren 's avonds vóór zonsondergang (21:11 uur) en 's morgens vanaf de ochtendschemer tot enige uren na zonsopgang (6:01 uur). De geluidsmetingen zijn 's nachts gedaan, voor het grootste deel van de tijd onbemand (automatische opslag in geluidmeter).

4.1. Directe windmetingen

Gedurende de nacht en vroege ochtend zijn de meetwaarden van de windmeter op 10 meter hoogte genoteerd. In figuur 8 zijn deze, per 30 of 60 seconden gemeten waarden uitgezet tegen de tijd. Daaruit blijkt dat de windsnelheid gedurende de nacht rond de 3 à 3,5 m/s is gebleven met variaties tot ca. 1 m/s. Duidelijk is te zien dat het in de loop van de vroege ochtend, vanaf ongeveer 6:20 uur, op 10 meter hoogte harder is gaan waaien. Gemiddeld over de nacht was de windsnelheid 3,2 m/s.



Figuur 8:
verloop van de
windsnelheid
op 10 meter
hoogte
gedurende de
nacht en vroege
ochtend van
10 mei 2001

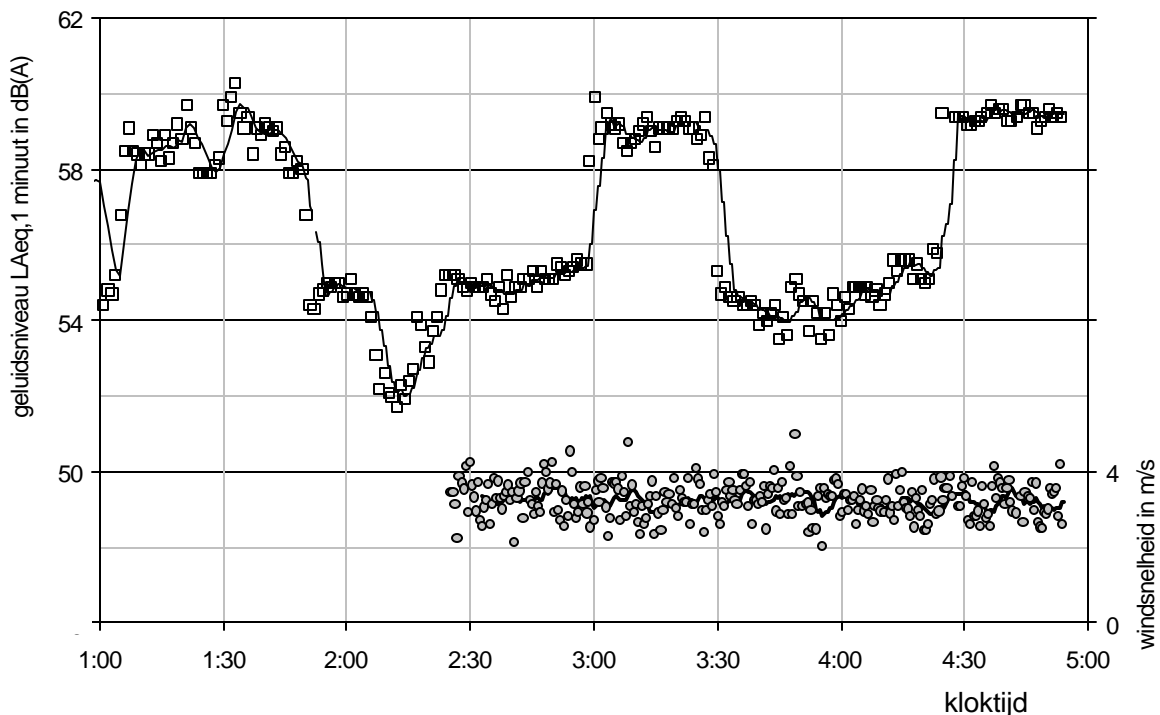
4.2. Geluidmetingen

Het geluidsniveau dat werd gemeten bij de meest westelijke windturbine, en dat geheel door die windturbine werd bepaald, is in figuur 9 uitgezet tegen de tijd. Gegeven is het per minuut gemeten equivalente geluidsniveau (L_{Aeq}). De metingen zijn begonnen op 10 mei 2001 om 1:00 uur en gestopt om 4:53 uur omdat de accu van de meter geen stroom meer leverde. Over een deel van de tijd zijn ook de direct gemeten windsnelheden uitgezet.

Wat opvalt in de grafiek is dat de windsnelheid gedurende de nacht gemiddeld vrijwel constant is gebleven, maar het geluidsniveau niet. Dat vertoont een 'blok'patroon met sprongen van ongeveer 5 dB(A).

blz. 14

Om structuren in de grafiek wat beter naar voren te laten komen zijn in figuur 9 lijnen toegevoegd die de steeds over de voorgaande 5 minuten gemiddelde meetwaarden verbinden. Dit betekent dat van het geluidsniveau 5 meetwaarden zijn gemiddeld, van de windsnelheid 10. Het blokpatroon in het geluidsniveau blijft duidelijk aanwezig. De windturbine lijkt te 'schakelen' tussen geluidsniveaus van ca. 55 en 59 dB(A), terwijl er ook gedurende korte tijd een wat lager geluidsniveau van ca. 52 dB(A) voorkomt. Bij aanvang van de metingen konden we horen dat de hoge geluidsniveaus gepaard gingen met een opvallend tonaal, 'zingend' geluid. In een geluidsspectrum blijkt de oorzaak daarvan een duidelijke verhoging bij 597 Hz.



Figuur 9: 's nachts gemeten gemiddelde equivalent geluidsniveau per minuut in dB(A) (open vierkanten) en windsnelheid in m/s (grijze cirkels); de lijnen verbinden de per 5 minuten gemiddelde meetwaarden

Er lijkt weinig verband te bestaan tussen de windsnelheid en het geluidsniveau. Uit een analyse van het verband tussen geluidsniveau en windsnelheid tussen 2:25 en 4:55 uur blijkt er geen significante samenhang te zijn (correlatiecoëfficiënt 0,1). Er is wel, in tegenstelling tot wat we verwachtten, een dalende tendens: een hoger geluidsniveau neigt samen te gaan met een lagere windsnelheid.

Uit de metingen kan het geluidsvermogensniveau L_{WA} van de windturbine worden afgeleid. Dit vermogensniveau is niet constant, maar hangt af van het toerental en de windsnelheid. Volgens Ljunggren [referentie 2] wordt deze gegeven door:

$$L_{WA} = L_{Aeq} + 10 \cdot \log(4\pi R^2) - 6 \quad \text{dB(A)}$$

waarin L_{Aeq} het gemeten geluidsniveau op (schuine) afstand R van het meetpunt tot het middelpunt van het wiekenstelsel, dat hier gelijk is aan $R = 130$ meter.

Uit de metingen blijkt dat er tijdens de nacht geluidsniveaus werden gemeten die in drie verschillende sterktes kunnen worden ingedeeld (zie figuur 9). Tussen 2:09 en 2:16 komen de

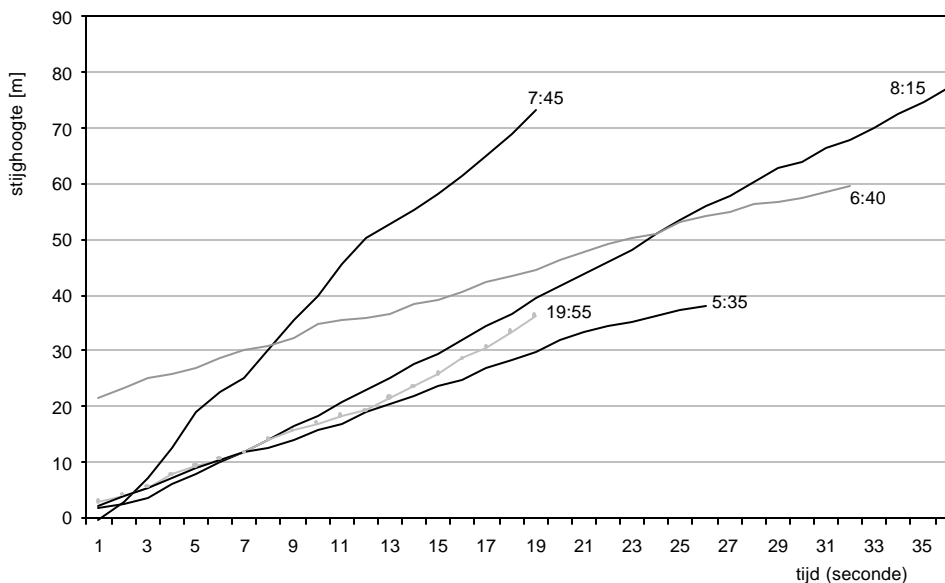
laagste geluidniveaus voor; het equivalente geluidniveau L_{Aeq} in die tijd is 52,1 dB(A). Van 1:47 tot 2:08, van 2:27 tot 2:57 en van 3:30 tot 4:20 uur is het equivalente geluidniveau 54,9 dB(A). Van 1:08 tot 1:49, van 2:59 tot 3:28 en van 4:23 tot 4:53 uur is het equivalente geluidniveau 59,4 dB(A).

Uit deze gegevens kan men nu berekenen dat het geluidsvermogen van de windturbine waarden heeft aangenomen van $L_{WA} = 99,4$ resp. 102,2 en 106,7 dB(A).

4.3. Stijgsnelheid en baan ballonnen

In figuur 10 is de hoogte van de ballonnen uitgezet tegen de tijd vanaf het loslaten (om 6:40 uur vanaf een korte tijd na het loslaten). De hoogte is om de seconde bepaald, bij de meting van 6:40 om de twee seconden. In tabel 1 zijn de bij best passende rechte lijnen in figuur 11 behorende formules weergegeven met bovendien de waarden van de correlatiecoëfficiënt. Uit de hoge waarden van de correlatiecoëfficiënt blijkt duidelijk dat de lijnen in figuur 11 goed overeen komen met rechte lijnen. Dus de stijgsnelheid (het getal voor de tijd t in de formules) is tijdens de vlucht constant gebleven. Dit is wat we ook verwacht hadden.

De stijgsnelheden verschillen per meting omdat we niet elke keer dezelfde hoeveelheid helium gebruikt hebben. Ook is de stijgsnelheid beïnvloed door de verschillende aantallen ballonnen en vuilniszakken die we hebben gebruikt.



Figuur 10: stijghoogte van de op vijf tijdstippen losgelaten ballonnen als functie van de tijd (even) na het loslaten

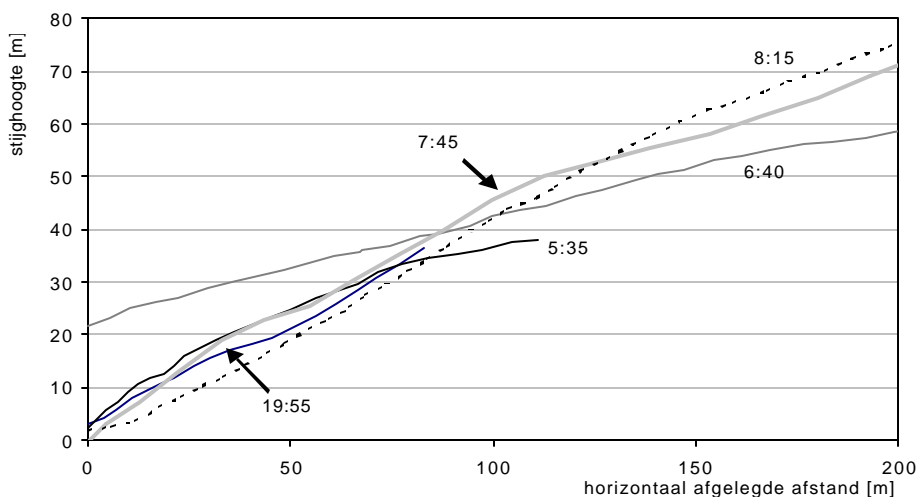
Tabel 1: corr. coëff. en formules behorende bij de best passende rechte lijnen bij de stijghoogtes gegeven in figuur 10.

meting (kloktijd)	corr.coëff.	stijghoogte
19:55	0,994	$h = 1,78 \cdot t + 1,7$
5:35	0,999	$h = 1,48 \cdot t + 1,2$
6:40	0,999	$h = 1,24 \cdot t + 22,5$
7:45	0,997	$h = 2,06 \cdot t - 1,2$
8:15	0,999	$h = 2,23 \cdot t + 3,1$

blz. 16

In figuur 11 zijn de banen getekend die de ballonnen de eerste tijd na loslaten volgden. De ballonnen opgelaten om 19:55 en 5:35 konden worden gevolgd totdat ze een horizontale afstand van ongeveer 100 meter hadden afgelegd, dit omdat we de camera relatief dicht bij de baan van de ballon hadden staan.

De meting van 6:40 uur begint op 20 meter hoogte omdat op het eerste deel van de video de ballon niet zichtbaar was: de ballon stak niet af tegen de achtergrond zolang hij nog niet boven de bomen die er achter stonden uitkwam. Eenmaal boven de donkere achtergrond uitgekomen was de ballon goed te zien tot een hoogte van ongeveer 60 meter. De metingen van 7:45 en 8:15 ten slotte zijn, omdat het reeds licht was geworden, over een langer traject te volgen geweest. Geen enkele ballon was te volgen tot een hoogte boven 75 meter.



Figuur 11: door de ballonnen afgelegde banen (stijghoogte en horizontaal in windrichting afgelegde afstand) vanaf vijf tijdstippen waarop ze werden losgelaten

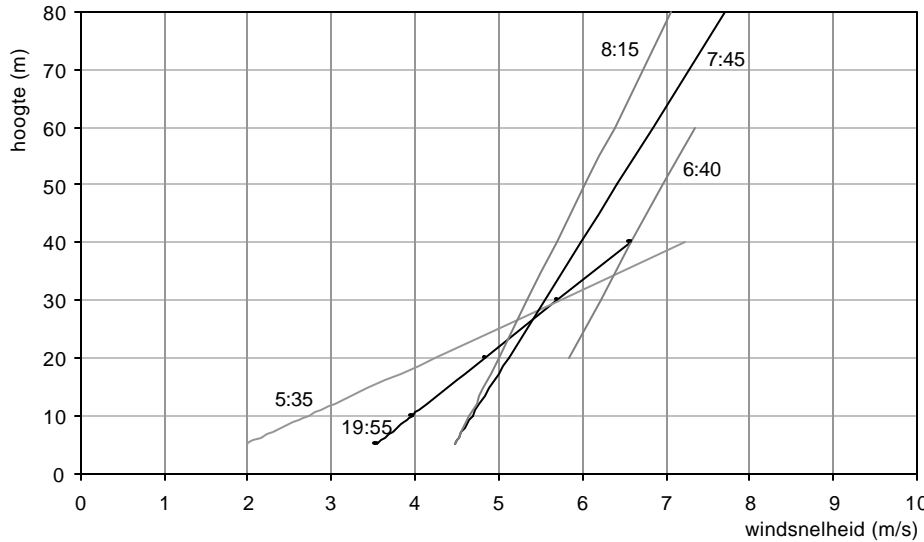
4.4. Gemeten windprofielen

Uit de baan die de ballon als functie van de tijd volgt kunnen zowel de verticale als de horizontale snelheid worden bepaald. De verticale snelheid is de stijgsnelheid welke gegeven is in tabel 1 (getal voor tijd t in formule voor stijghoogte). De horizontale snelheid is de windsnelheid die we willen weten. De horizontale snelheid kan uit de relatie tussen de horizontaal afgelegde afstand en tijd worden bepaald. De correlatiecoëfficiënt van deze relatie, waaruit door differentiatie direct de horizontale snelheid wordt gevonden, is zeer hoog (zie tabel 2), hetgeen wijst op een hoge nauwkeurigheid van het resultaat. De windsnelheid op 80 meter hoogte berust op extrapolatie van de meetgegevens; de windprofielen zijn maar tot op maximaal 75 meter hoogte gemeten.

Tabel 2: uit baan van ballonnen berekend windprofiel (= relatie windsnelheid - hoogte); de correlatiecoëfficiënt is van de relatie tussen horizontale afstand en tijd

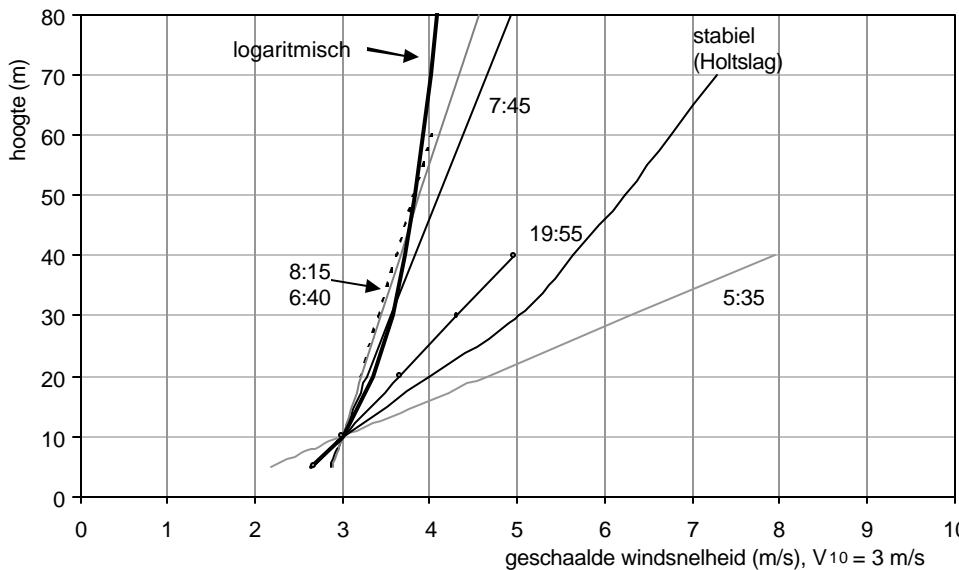
meting (kloktijd)	corr.coeff.	windsnelheid als functie van de hoogte h (m/s)	windsnelheid (m/s) op 10 m hoogte	windsnelheid (m/s) op 80 m hoogte
19:55	0,994	$V_{\text{wind}} = 0,087 \cdot h + 3,1$	4,0	10,1
5:35	1,000	$V_{\text{wind}} = 0,150 \cdot h + 1,2$	2,7	13,2
6:40	1,000	$V_{\text{wind}} = 0,037 \cdot h + 5,1$	5,5	8,1
7:45	1,000	$V_{\text{wind}} = 0,043 \cdot h + 4,3$	4,7	7,7
8:15	0,999	$V_{\text{wind}} = 0,034 \cdot h + 4,3$	4,6	7,0

In figuur 12 is het windprofiel zoals gegeven in tabel 2 van elke meting grafisch weergegeven. Uit figuur 12 blijkt dat de windsnelheid op 10 meter hoogte 's avonds (19:55) 4 m/s bedroeg, afnemend naar circa 3 m/s in het laatste deel van de nacht (5:35). Na zonsopkomst (6:01 uur) stijgt de windsnelheid op 10 meter hoogte naar rond 5 m/s; dit komt goed overeen met de directe windsnelheidsmeting (zie figuur 8). Op grotere hoogte, boven ca. 30 m, is het omgekeerd aan de situatie op 10 meter hoogte: daar treedt juist 's nachts de hoogste windsnelheid op en na zonsopkomst de laagste. Op ongeveer 30 meter hoogte blijft gedurende het grootste deel van de tijd de windsnelheid vrijwel constant.



Figuur 12: met ballonnen bepaalde windprofielen op vijf verschillende tijdstippen

In figuur 13 zijn de windprofielen nogmaals uitgezet, maar nu zijn de meetwaarden zo geschaald (door vermenigvuldiging met een constante factor) dat de windsnelheid op de referentiehoogte van 10 meter steeds gelijk is aan 3 m/s (een windsnelheid die 's nachts het meeste voorkomt). Bovendien is daar het gebruikelijke logaritmische profiel, zoals beschreven in paragraaf 2.1, aan toegevoegd. Volgens dit theoretische windprofiel neemt de verandering in de windsnelheid af naarmate de hoogte toeneemt. Uit de metingen die wij gedaan hebben blijkt dat dit niet goed overeenkomt met de experimentele data. Een door Holtslag gemeten profiel (zie figuur 2; gestippelde lijn hier geschaald op $v_{10} = 3$ m/s) voor een stabiele atmosfeer is eveneens toegevoegd.



Figuur 13: met ballonnen bepaalde windprofielen op vijf verschillende tijdstippen, geschaald op een windsnelheid van 3 m/s op referentiehoogte (10 meter); tevens is het logaritmische windprofiel ingetekend en het profiel van een stabiele atmosfeer volgens Holtslag

blz. 18

Uit figuur 13 blijkt dat het logaritmisch profiel wel redelijk overeen komt met de na zonsopkomst gemeten windprofielen: de afwijking tussen het theoretisch en gemeten profiel is (op 80 meter hoogte) maximaal 25%. 's Avonds en 's nachts is dat verschil echter veel groter: de windsnelheid neemt dan veel sneller toe dan voorspeld met het logaritmisch profiel en komt overeen met het profiel zoals gevonden in een stabiele atmosfeer. Het is overigens te verwachten dat op grotere hoogten dan hier gemeten de windsnelheid niet meer zo snel toeneemt en uiteindelijk naar een waarde gaat die op grote hoogte geldt (de geostrofische wind).

Op basis van extrapolatie van de meetgegevens naar 80 meter hoogte en in vergelijking met het logaritmische windprofiel dat algemeen wordt gehanteerd kunnen we het volgende stellen. 's Avonds is de windsnelheid op 80 meter hoogte een factor 2,0 hoger (+ 100%) dan voorspeld op grond van de windsnelheid op referentiehoogte (10 meter), laat in de nacht is dat zelfs een factor 3,3 (+ 230%).

5. Gevolgtrekkingen uit de meetresultaten

Voor de toename van de windsnelheid met de hoogte wordt gewoonlijk een logaritmisch windprofiel gebruikt. Met behulp van dit (theoretisch) profiel wordt bij windturbines de wind op ashoogte voorspeld op grond van de wind op de referentiehoogte van 10 meter. Dit model blijkt in een stabiele atmosfeer, die vooral 's nachts voorkomt, niet te gelden. Dit in tegenstelling tot een (zomerse) dag wanneer de atmosfeer instabiel is.

In een stabiele atmosfeer glijden luchtlagen min of meer over elkaar heen en zijn de snelheidsverschillen in verticale richting groter dan in een instabiele atmosfeer waarin de luchtlagen door turbulentie (opstijgende lucht) aan elkaar gekoppeld worden. Een stabiele atmosfeer is geen zeldzaamheid, maar in de zomermaanden eerder regel: bij 45% van de nachtelijke uren per jaar is de atmosfeer stabiel (gegevens Eelde; zie referentie 1).

's Nacht blijkt de door ons gemeten windsnelheid ruim drie keer zo groot te kunnen worden als verwacht: op 80 meter hoogte is de windsnelheid 13,2 m/s,¹ terwijl op grond van het logaritmisch model slechts 3,7 m/s zou worden verwacht. Omgekeerd kan men zeggen dat bij een windsnelheid van 13,2 m/s op 80 meter hoogte een windsnelheid op 10 meter hoogte zou worden verwacht van 10,0 m/s, niet van 2,7 m/s zoals gemeten.

's Avonds, nog voor zonsondergang, is de windsnelheid op 80 meter hoogte twee keer zo groot als verwacht.

Overigens lijkt een hogere windsnelheid op grote hoogte gepaard te gaan met een lagere snelheid dicht bij de grond. Op ongeveer 30 meter hoogte lijkt er een 'kantelpunt' te zijn waar de windsnelheid ongeveer hetzelfde is gebleven gedurende ons onderzoek: een verhoging daarboven gaat samen met een verlaging van de windsnelheid daaronder en omgekeerd.

Er is een zwakke relatie tussen het geluidsvermogen en de windsnelheid: minder wind (op 10 meter hoogte) betekent meer geluid. Dit kan misschien verklaard worden door het windgedrag onder en boven het kantelpunt: bij minder wind op 10 meter is er juist meer wind bij de rotor.

Op grond van algemene gegevens [referentie 3] neemt het geluidsvermogensniveau L_{WA} van een windturbine toe met 0,3 dB(A) als de windsnelheid met 1 m/s toeneemt. Als dus de windsnelheid op 10 meter hoogte 3 m/s bedraagt, maar op ashoogte is de windsnelheid zo hoog dat dat volgens de gebruikelijke gegevens zou overeenkomen met 10,5 m/s op 10 meter hoogte, dan betekent deze hogere windsnelheid (+ 7,5 m/s) een verhoging van het L_{WA} met $7,5 \cdot 0,3 = 2,3$ dB(A).

De wind op referentiehoogte bleef tijdens de nacht vrijwel constant circa 3 m/s (gemiddeld 3,2 m/s), maar op rotorhoogte was deze dus groter en varieerde misschien meer. Uit geluidsmetingen blijkt dat het geluidsvermogen van de windturbine het meest nabij de grens tijdens de nacht, ondanks de vrijwel constante wind op 10 meter hoogte, stapsgewijs varieerde van 102,2 naar 106,7 dB(A).² Een Duits rapport [referentie 4] geeft voor een Tacke TW 1.5 een L_{WA} van 104 dB(A) bij een windsnelheid van 10 (!) m/s op 10 meter hoogte.

¹ extrapolatie van profiel gemeten tot 50 meter hoogte

² en korte tijd ook wat lager, nl. 99,3 dB(A)

blz. 20

De stap van 4,5 dB(A) in het geluid van de windturbine zou kunnen samenhangen met overeenkomstige variaties in de windsnelheid op rotorhoogte, maar het is merkwaardig dat die variaties dan zo stapsgewijs zijn. Een verklaring kan ook het overschakelen van de turbine naar een hoger toerental zijn, wat optreedt als de wind een drempelwaarde overschrijdt. Volgens een vuistregel [ref. 5] neemt het geluidsvermogen toe met $50 \cdot \log(\text{toerental})$: 4,5 dB(A) impliceert dan een toename van het toerental met 23%.

Op grond van het logaritmische windprofiel zou men dit schakelen niet verwachten, omdat men dan immers (uitgaande van de betrekkelijk lage windsnelheid van 3 m/s op 10 meter hoogte) op ashoogte een relatief lage windsnelheid zou verwachten, waarbij de windturbine met een laag toerental zou blijven draaien.

Het hogere geluidsvermogen gaat overigens gepaard met een opvallend tonaal, 'zingend' geluid, veroorzaakt door een toon van 597 Hz. Voor een dergelijk geluid zou volgens Nederlandse wetgeving een toeslag moeten worden gegeven van 5 dB(A), waardoor de geluidsbelasting 5 dB(A) hoger zou zijn in overeenstemming met de extra hinder.

Tenslotte merken we nog op dat om nog twee redenen het geluid van de windturbines 's nachts relatief meer opvalt. Ten eerste is het 's nachts, bij een stabiele atmosfeer, stil omdat dan de windsnelheid aan de grond erg laag is waardoor planten en bomen die met de wind bewegen, weinig geluid maken. Ten tweede zorgt de sterke toename van de windsnelheid met de hoogte in de richting met de wind mee voor een afbuiging van het geluid naar beneden; daardoor kan men het geluid verderop beter horen.

6. Conclusies

Bij het meten van het geluidsvermogen van windturbines wordt te veel van gegevens op 10 meter hoogte bij weersomstandigheden overdag uitgegaan, terwijl juist het geluid 's nachts bepalend is voor de hinder. 's Nachts is de relatie tussen windsnelheid op 10 meter hoogte en rotorhoogte (en dus de geluidsproductie van de turbine) anders dan overdag. Er is 's nachts op rotorhoogte vaak veel meer wind dan verwacht op grond van windgegevens op 10 meter hoogte. Een windturbine produceert daardoor, ook als het toerental constant zou blijven, meer geluid dan verwacht. Een windturbine met verschillende toerentallen zal echter 's nachts vaker dan verwacht op een hoger toerental draaien, hetgeen voor een extra geluidsproductie zorgt. De door ons onderzochte windturbine produceert ook nog een opvallend, tonaal geluid. Tenslotte is het door het andere windprofiel 's nachts stiller (minder omgevingsgeluid) en wordt het geluid van de turbine meer naar de grond toe gebogen.

Hieronder zetten we onze bevindingen op een rij.

Geluid turbine

Het geluid van één van de windturbines (namelijk de meest westelijke, die het meest nabij de grens staat) is alleen 's nachts gemeten. Tijdens de metingen (9/10 mei 2001) was de windsnelheid op 10 m hoogte gemiddeld 3,2 m/s.

Het geluid bleek stapsgewijs te variëren in sterkte: plotseling sprong het geluidsniveau naar een 4,5 dB(A) hoger niveau, na ongeveer een half uur daalde het weer naar de lagere waarde, om ongeveer een uur later weer omhoog te gaan. Het hogere niveau gaat ook gepaard met een duidelijk waarneembaar tonaal ('zingend') geluid van 597 Hz. Voor een dergelijk geluid zou volgens Nederlandse wetgeving een toeslag moeten worden gegeven van 5 dB(A).

De oorzaak van de stapsgewijze variatie in de geluidsterkte is niet bekend, maar hangt waarschijnlijk samen met variaties in de wind op rotorhoogte of met schakelen tussen een hoog en laag toerental van de turbine.

Geluidsvermogensniveau L_{WA}

Uit de meting kan worden afgeleid dat het geluidsvermogensniveau L_{WA} van de turbine tijdens deze nacht 102 resp. 107 dB(A) bedraagt bij een windsnelheid van 3,2 m/s op 10 meter hoogte (gedurende korte tijd was het geluidsniveau éénmaal nog wat lager dan 102 dB(A), namelijk 99 dB(A)). Een Duits rapport geeft voor een Tacke TW 1.5 een L_{WA} ¹ van 104 dB(A) bij een windsnelheid van 10 (!) m/s op 10 meter hoogte.

Windprofiel

Uit de metingen van het windprofiel (= verloop windsnelheid met de hoogte) blijkt dat bij een stabiele atmosfeer 's nachts de windsnelheid op ashoogte aanmerkelijk groter is dan voorspeld op grond van de gebruikelijke aannames die gelden voor een instabiele atmosfeer overdag. Op basis van die aannames is op 80 m hoogte de windsnelheid 1,4 maal zo hoog is als die op 10 meter hoogte.² Uit de metingen blijkt dat enige tijd na zonsopgang een wat hogere, maar toch redelijk vergelijkbare waarde (namelijk een factor 1,5 - 1,6) wordt gevonden. Deze waarde wordt echter aanmerkelijk hoger (factor 2,5) na zonsondergang en in de nanacht vóór zonsopgang véél hoger (4,9). De windsnelheid neemt dus op 80 meter in de loop van de avond en nacht sterk toe, ondanks dat (hier) de windsnelheid op 10 meter hoogte nauwelijks verandert.

¹ in het Duits de "immissions-relevanten Schalleistungspegel"

² de precieze getalswaarde is afhankelijk van de ruwheidshoogte, 1 - 10 cm

blz. 22

De windsnelheid in de nacht op 80 meter hoogte (13,2 m/s) zou volgens de gebruikelijke aannamen overeenkomen met een windsnelheid op 10 meter hoogte van 9,5 m/s. Dit verklaart mogelijk dat er 's nachts bij een windsnelheid van ca. 3 m/s (10 m hoogte) een geluidsvermogen blijkt op te treden dat volgens het logaritmisch profiel 'hoort' bij een veel hogere windsnelheid (namelijk van ca. 10 m/s op 10 m hoogte).

Windprofiel: consequenties voor geluidsbelasting

In berekeningen van de geluidsbelasting rond een windturbine(park) wordt uitgegaan van een logaritmisch windprofiel (= gebruikelijke aanname). Bij een windsnelheid van 3 m/s (10 m hoogte) hoort dan een snelheid op 80 meter hoogte van 4,1 m/s. In werkelijkheid blijkt deze 's nachts dus $4,9 \cdot 3 = 14,7$ m/s te zijn. Volgens het logaritmisch profiel correspondeert deze werkelijke windsnelheid op ashoogte met 10,5 m/s op 10 m hoogte, niet met 3 m/s.

Op grond van algemene meetresultaten neemt het geluidvermogensniveau L_{WA} toe met 0,3 dB(A) als de windsnelheid met 1 m/s toeneemt. Als dus de windsnelheid op 10 meter hoogte 10,5 m/s zou zijn in plaats van 3 m/s, dan zou dat een toename van het L_{WA} met 2,3 dB(A) betekenen. Belangrijker dan deze hogere windsnelheid is waarschijnlijk echter dat de windturbine met een hoger toerental draait, waardoor de geluidsproductie nog weer hoger wordt.

De geluidscontouren komen door deze verhogingen van windsnelheid en toerental op grotere afstanden te liggen.

Referenties

1. Atmosferische stabiliteit en hoorbaarheid van windturbines; G.P. van den Berg, Natuurkunde winkel, Groningen, 2001
2. Expert group study on 'Recommended practices for wind turbine testing and evaluation', 10. Measurement of noise immersion from wind turbines at noise receptor locations; Sten Ljunggren, Department of Building Science, The Royal Institute of Technology, Sweden, 1994/1997
3. "Acoustic noise production of wind turbines in practice", ECN-rapport
4. "Schallimmissionsprognose für Emissionen aus dem Betrieb van Windenergieanlagen für den Windpark Walchum"; Plenum Energy GmbH (25 november 1998)
5. Wind turbine noise; S. Wagner, R. Bareiss en G. Guidati; 1996, Springer Verlag

Dankwoord

Graag willen wij een aantal mensen bedanken.

- Dhr. J. Smit, voor het uitlenen van de apparatuur en voor de adviezen.
- Dhr. R. Rodriguez, voor het mogen gebruiken van zijn computer met randapparatuur voor het analyseren van de videogegevens.
- Dhr. G. Kloosterman, voor het mogen gebruiken van zijn videoapparatuur.
- Dhr. A. Roggen voor zijn pogingen een infraroodcamera te regelen.
- De heliumafdeling van de faculteit voor de verstrekte fles helium.
- Joost zijn server, voor het niet helemaal crashen

En natuurlijk dhr. Walter Flight, voor alles wat hij voor ons gedaan heeft. Dat is onder andere het regelen van twee caravans waar wij in konden overnachten, het maken van heerlijke maaltijdsoep en het verzorgen van koffie. Ook de installatie waarmee wij de windmeter op 10 meter hoogte konden plaatsen was door dhr. Flight geconstrueerd.

Appendix: Technische gegevens Tacke 1.5 windturbine

(bron: www.wind.enron.com/PRODUCTS/15/15specs.html)

1.5 Technical Specifications

	65 m	70.5 m	77 m
Performance			
Cut-in wind speed	4.0 m/s	3.0 m/s	3.0 m/s
Cut-out wind speed (5 sec. gust)	25 m/s	25 m/s	20 m/s
Rated wind speed	13 m/s	12 m/s	11.8 m/s
Rotor			
Number of blades	3	3	3
Diameter	65 m	70.5 m	77 m
Swept area	3318 m²	3902 m²	4657 m²
Rotor speed (variable)	11-20 rpm	11-20 rpm	10-18 rpm
Maximum tip speed	68 m/s	73.8 m/s	72.6 m/s
Blade length	31.2 m	34.0 m	37.2 m

Gearbox

Type: Three step planetary spur gear system
i=72, for 77 meter rotor: i=80

Generator

Type: Rotary current asynchronous with slip rings

Rated power: 1500 kW

Inverter

Type: IGBT-frequency inverter

Braking Systems

Individual pitch regulation

Brake control system: fail-safe

Yaw System

Motor driven with wind direction sensor and automatic cable unwind

Control System

Microprocessor-based programmable logic controller (PLC)

Remote control operating system

Tower

Multi layer coated, conical tubular steel tower with interior safety ladder to the nacelle

Load lifting system, 250 kg carrying force

Hub height:

65 meter rotor: 65 or 80 meter

70.5 meter rotor: 65 or 80 meter
meter

77 meter rotor: 80 meter

Lightning Protection System

Lightning receptor installed on blade tips

Discharge inside the rotor blades along nacelle and tower

Sound Proofing

Structure borne noise insulation of the drive train

Sound reduced gearbox

Reduced blade tip speed

Noise reduced nacelle

Specifications subject to possible modification.