

# Hohe Mühlen fangen viel Wind

Wind- und Geräuschemessungen bei einer hohen Windturbine

Übersetzung aus dem Niederländischen

[Hoge molens vangen veel wind](#)

wind- en geluidmetingen  
bij een hoge windturbine

von

Werner Zavelberg  
Elsdorf bei Bergheim

von

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

Datum: Januar 2002  
Ausgabennummer: NWU-106  
Seitenanzahl: 24

Natuurkundewinkel  
Rijksuniversität Groningen  
Nijenborgh 4  
9747 AG Groningen  
Tel. 050 – 4634867  
nawi@pyhs.rug.nl

Der Naturkundewinkel stellt  
naturwissenschaftliche Kenntnis und Fähigkeiten zur Verfügung an nicht kommerzielle Gruppierungen und Organisationen und Kommunen, durch Beratung und wissenschaftlichen Untersuchungen

## **Überblick:**

**Dieses Projekt versucht eine Erklärung für die Tatsache zu geben, dass Windturbinen bei bestimmten Wetterbedingungen mehr Geräusche produzieren und dadurch auf größeren Abstand zu hören sind als dies nach der üblichen Theorie möglich sind.**

**Diese Theorie besagt, dass die Windgeschwindigkeit logarithmisch mit der Höhe zunimmt.**

**Aus unserem Projekt folgt, dass dieser Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Höhe bei einer stabilen Atmosphäre nicht gilt. Die Windgeschwindigkeit nimmt bei zunehmender Höhe schneller zu.**

**Ausgehend von der Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe wird die Windgeschwindigkeit auf Achsenhöhe größer sein, als es die logarithmische Funktion ausweist.**

**Eine Windturbine wird dadurch mehr Geräusche produzieren.**

## 1. Inhalt

	<b>Seite</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Das Windgeschwindigkeitsprofil</b>	
<b>2.1 Entwicklung Windgeschwindigkeit mit der Höhe</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Entwicklung Windgeschwindigkeit in stabiler Atmosphäre</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Effekt auf Hörbarkeit der Windturbine</b>	<b>7</b>
<b>3. Experimenteller Aufbau</b>	
<b>3.1 Wahl der Messmethoden</b>	<b>8</b>
<b>3.2 Messlokation und Wetter</b>	<b>9</b>
<b>3.3 Geräuschemessung</b>	<b>9</b>
<b>3.4 Direkte Windmessung</b>	<b>10</b>
<b>3.5 Windprofilmessung</b>	<b>10</b>
<b>3.6 Verarbeitung Videobilder</b>	<b>11</b>
<b>4. Ergebnisse</b>	
<b>4.1 Direkte Windmessung</b>	<b>13</b>
<b>4.2 Geräuschemessungen</b>	<b>13</b>
<b>4.3 Steigungsgeschwindigkeit und Flugbahn Luftballons</b>	<b>15</b>
<b>4.4 Gemessene Windprofile</b>	<b>16</b>
<b>5. Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen</b>	<b>19</b>
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>21</b>
<b>Referenzen</b>	<b>23</b>
<b>Dankwort</b>	<b>23</b>
<b>Anhang: Technische Gegebenheiten Tacke 1.5. Windturbine</b>	

## 1. Einleitung

Für das Fach „Praktikum Projekt“ an der Rijksuniversität Groningen im ersten Jahr des Studiums Natur- und Sternkunde ist es gedacht, selber einen Entwurf für ein Projekt zu finden. Eine andere Möglichkeit ist es, ein Projekt vom Naturkundewinkel anzunehmen. Wir haben uns hierfür entschieden, weil so ein Projekt auch eine Bedeutung für die Allgemeinheit besitzt und etwas ist, was uns alle interessiert.

Beim Ort Bourtange an der holländisch-deutschen Grenze stehen auf der deutschen Seite eine Anzahl von Windturbinen. Es ist geplant, dass noch mehr von solchen Windturbinen, mit einer Achsenhöhe von ungefähr 100 m, aufgestellt werden. Ein Gemeinschaftsverein in Bourtange hat hiergegen Beschwerde eingereicht, weil sowohl die Ruhe als auch die Außensicht hierdurch belastet wird. Die Windturbinen produzieren nach Angaben der Anwohner zu viel Geräusche, sogar bei einem Abstand von einem Kilometer liegen diese Geräusche noch über dem normalen Umgebungsgeräusch. Vor allem nachts tritt dieser Effekt auf. Der Verein hat inzwischen einen Rechtsanwalt beauftragt. Um unabhängig gemessene Werten in die Untersuchung einzubeziehen, wurde der Naturkundewinkel eingeschaltet.

Wir haben als Praktikumsgruppe diesen Auftrag angenommen. Der Auftrag beinhaltete, die Windgeschwindigkeit in verschiedener Höhe zu bestimmen und darüber hinaus festzustellen, wo der Unterschied in die Windgeschwindigkeit zwischen einer stabilen und einer instabilen Atmosphäre liegt. Außerdem sollten korrekt gemessene Geräuschdaten ermittelt werden. Die Begleitung wurde von Dr. Ing. Frits van den Berg durchgeführt, Koordinator der Naturkundewinkel RUG, der auch geholfen hat, von unseren Versuchsbeschreibungen einen Bericht zu machen.

## 2. Das Windgeschwindigkeitsprofil

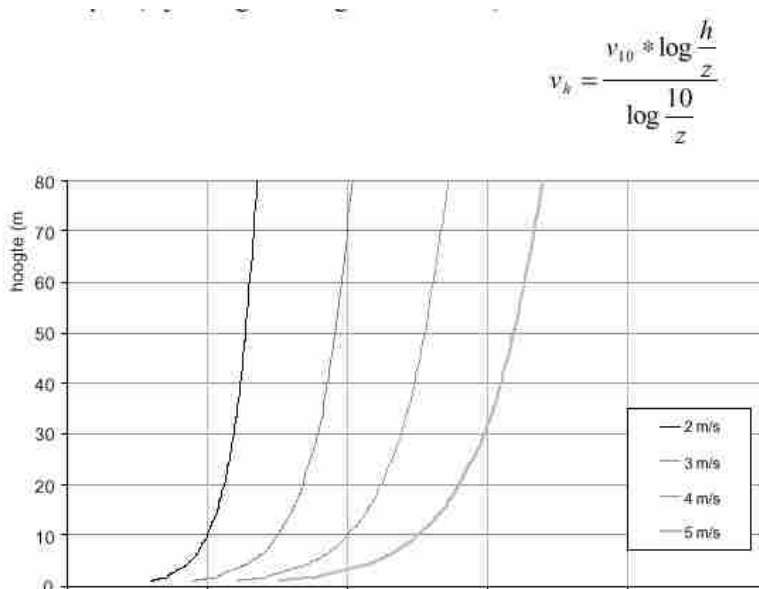
### 2.1. Entwicklung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe

Das Geräusch, das von einer modernen Windturbine verursacht wird, wird vor allem bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Luft an den Flügeln vorbeibewegt. Diese Geschwindigkeit wird wieder bestimmt durch das Drehmoment der Turbine und die Windgeschwindigkeit in Höhe der Flügel. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche immer weiter zu, so dass die Windgeschwindigkeit in Höhe der Flügel größer ist als an der Erde.

Wenn die Geräuscentwicklung einer Windturbine ermittelt wird, ist die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe der Referenzwert für die Windgeschwindigkeit. Diese Höhe ist üblich für die Angabe von der Windgeschwindigkeit, zum Beispiel auch in Wetterberichten.

Die für die Geräuschbelastigungen wichtigste Periode ist in der Nacht, weil Menschen dann schlafen wollen. Übrigens ist es dann auch oft ruhiger als tagsüber, so dass ein hinderliches Geräusch mehr auffällt.

Die Geräusche einer Windturbine werden im allgemeinen tagsüber gemessen, aber tagsüber ist üblicherweise so, dass die Atmosphäre meist instabil ist. Das heißt, dass die Luft ist mehr oder weniger turbulent. Die Windgeschwindigkeit zeigt dann eine bestimmte Zunahme mit der Höhe, nämlich eine logarithmische Zunahme. Das übliche Modell für die Windgeschwindigkeit  $v_h$  ist dann auch ein logarithmisches Modell mit als Standard Windgeschwindigkeit der Windgeschwindigkeit  $V_{10}$  auf Höhe 10 Meter. Der Verlauf wird durch untenstehende Formel gegeben (siehe z. B. Referenz 1 oder 2), wobei  $z$  die Rauheitshöhe der Landschaft ist (bei flachen Grasland gilt z. B.  $z = 3$  cm).



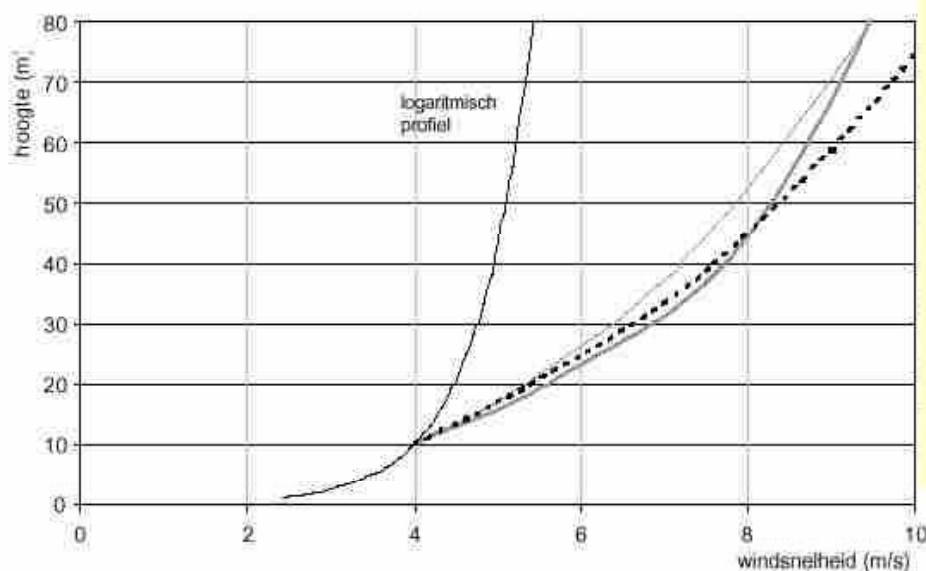
Figur 1:  
Entwicklung  
Windgeschwindigkeit mit Höhe  
nach logarithmischem Modell  
(instabile und neutrale  
Atmosphäre) bei verschiedenen  
Windgeschwindigkeiten  $V_{10}$  auf  
Referenzhöhe 10 Meter.

## 2.2. Entwicklung Windgeschwindigkeit in stabiler Atmosphäre

Bei wenig Wind und einem abkühlenden Boden ist fast keine Turbulenz in der Atmosphäre, diese ist stabil. Die Atmosphäre ist dann nah am Erdoberfläche in Schichten aufgebaut, die kaum untereinander gekoppelt sind. Bei längerer Dauer der Abkühlung nimmt die Dicke dieser Schichten zu. Bei mehr Wind und durch Erwärmung des Bodens, was tagsüber auftritt, verschwindet dieser Aufbau und diese Atmosphäre ist dann nicht mehr stabil.

Eine stabile Atmosphäre kommt nachts fast in der Hälfte der Zeit vor, nämlich während 45 % aller Nachtstunden im Jahr (siehe Referenz 1).

Weil die Luftschichten in einer stabilen Atmosphäre übereinander gleiten, kennt der Wind kein logarithmisches Profil mehr, aber ein Profil, wobei die Luft am Boden fast still steht und bei Zunahme der Höhe die Windgeschwindigkeit relativ schnell zunimmt. In Figur 2 ist eine Anzahl von Holzschlag gemessener Windprofile angegeben (übernommen von Referenz 1).



Figur 2: gemessenen Windprofilen bei stabiler Atmosphäre und Windprofil nach logarithmischem Modell, eingeschalt auf eine Windgeschwindigkeit  $V_{10} = 4 \text{ m/s}$  auf Referenzhöhe 10 Meter

## 2.3. Effekt auf Hörbarkeit Windturbine

Bei einer stabilen Atmosphäre erwarten wir, dass ausgehend von der Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe der Wind auf Achsenhöhe der Windturbine stärker sein wird, als nach der Theorie, die von einem Windprofil in instabiler Atmosphäre ausgeht. Diese stabile Atmosphäre kommt vor allem in klaren Nächten vor.

Wir erwarten in einer klaren Nacht ein Windprofil, welches mit der Höhe stärker linear zunimmt als tagsüber, wo die Zunahme logarithmisch ist.

Bei den Geräuschmessungen erwarten wir, dass nachts, durch die höheren Windgeschwindigkeiten auf Achsenhöhe, ein höheres Geräuschniveau auftritt als tagsüber, auch wenn die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe die gleiche ist.

### 3. Experimenteller Aufbau

#### 3.1. Wahl der Messmethoden

Wir müssen das Geräuschniveau als Folge der Windturbine, die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe (Referenzhöhe) und das Windprofil messen können.

Vor dem Messen der Geräuschpegel stand schon schnell fest, dass wir einen bei Naturkundewinkel vorhandenen Lautstärkemesser mit automatischer Datensicherung (Larson Davis Typ 2800) benötigen. Bei den Messungen haben wir, soweit wie möglich, die Standardregeln beachtet (siehe Referenz 2).

Die direkte Messung der Windgeschwindigkeit stand auch schnell fest. Der Naturkundewinkel verfügte über einen Windmesser, den wir benutzen können. In Bourtange gab es bereits einen 10 m langen Pfosten, wo wir diesen Windmesser befestigen konnten.

Das Windprofil war eine andere Sache. In der ersten Instanz hatten wir vor, mittels eines Windmessers an einem Wetterballon, welcher mit einem Fliegerseil am Boden befestigt wurde, das Profil zu untersuchen. Der Vorteil war, dass die Windgeschwindigkeit ganz genau gemessen würde. Es war aber nicht ganz klar, ob diese Art des Messens überhaupt möglich wäre. Sehr schnell wurde deutlich, dass auf den Ballon als Folge seines Umfanges auch bei wenig Wind eine große horizontale Kraft wirken würde. Hierdurch würde das Verhältnis zwischen der horizontalen und der vertikalen Kraft (Steigungskraft) auf den Ballon sehr ungünstig sein. Tests ergaben, dass auch bei wenig Wind und einem großen Ballon an einem Seil, dieses Seil keinen größeren Winkel als 30 Grad zur Erdoberfläche erreichen würde. Um ausreichend Höhe zu bekommen, müsste dann das Seil länger sein müssen, was aber wieder ein größeres Gewicht und somit eine geringere Steigungskraft verursachen würde.

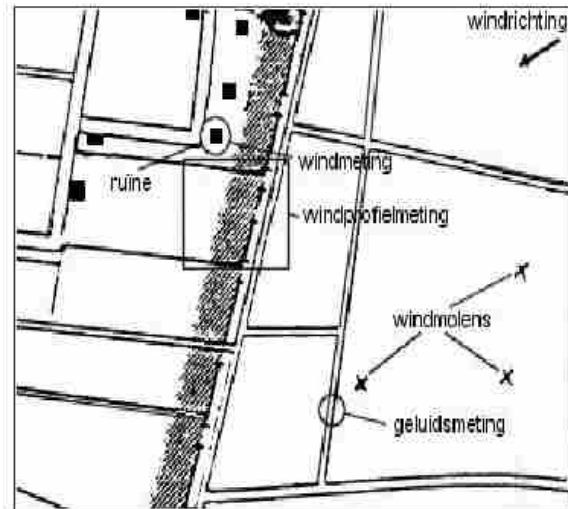
Eine andere Idee war, die Apparatur unter einen Flieger zu hängen. Ein Problem hierbei wäre dann auch die Stabilität dieses Fliegers in der Luft. Weil keiner von uns ein erfahrener Flieger ist, würde das unerwartete Schwierigkeiten geben können. Um die Gefahr auszuschließen, dass der Flieger (mit Messgeräten) crashen würde, haben wir hiervon abgesehen. Übrigens könnten wir auch bei dieser Messmethode Fragezeichen setzen. Es sollte nämlich bei wenig Wind gemessen werden und die Frage ist, ob ein Flieger dann noch ausreichend Tragevermögen haben würde, auch wenn wir die Messgeräte erst dann nach oben ziehen würden, wenn der Flieger schon in der Luft wäre.

Letztendlich haben wir eine Lösung gewählt, die uns schon früher eingefallen war, nämlich das Hochlassen von heliumgefüllten Luftballons, deren zurückgelegte Strecke dann mit einer Videokamera festgehalten wird. Hierdurch ist dann ein Windprofil festzustellen. Es gab noch viele Probleme, so waren die Ballons nicht im dunkeln zu sehen. Eine richtige Lösung haben wir hier innerhalb der verfügbaren Zeit nicht gefunden. Deswegen konnten wir auch nur bis kurz nach Sonnenuntergang und dann erst wieder ab kurz vor Sonnenaufgang messen.

### 3.2. Messlokation und Wetter

Die Messungen wurden südöstlich von Bourtange gemacht. Wir haben gemessen am Mittwochabend 9. bis einschließlich Donnerstagvormittag 10. Mai 2001. Die Temperatur am Mittwoch war max. 21 Grad (Donnerstag 25 Grad) und minimal 8 Grad (Do. 11 Grad). Beide Tage zählen je 14 Stunden Sonnenschein, keinen Regen und nahezu keine Bewölkung. Die Windgeschwindigkeit betrug im Schnitt 4.5 m/s am Mittwoch von Ostnordost und 4.8 m/s und am Donnerstag von Ost. Diese Wetterdaten sind von Station Eelde. Den Wetterumständen nach war die Atmosphäre an beiden Tagen tagsüber instabil und nachts stabil.

Am 09. Mai ging die Sonne unter um 21.11 Uhr, am nächsten Tag auf um 06.01 Uhr.



Figur 3  
Plan der Messlokation, ungefähr 2 km südöstlich von Bourtange; der Ausschnitt beschträgt in Wirklichkeit 2,4 bei 2,7 km.

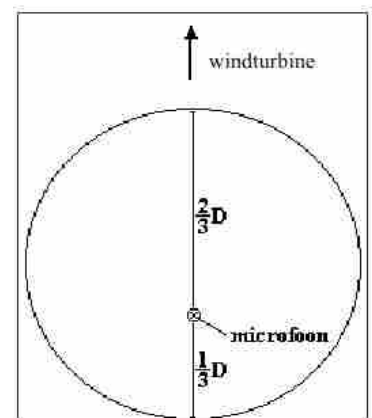
Wie in Figur 3 zu sehen ist, wurde die direkte Windmessung bei der Ruine eines Hauses gemacht, wobei wir die Möglichkeit hatten, den Windmesser auf einer Höhe von 10 m zu befestigen. Die Windprofilmessung ist auf der brachliegenden Weide in Nähe der Ruine gemacht. Die Geräuschemessungen ist auf dem angegebenen Platz gemacht, weil wir da nach Richtlinie (mit Beziehungen zu Abstand und Richtung des Windes; siehe Referenz 2) messen konnten.

Die drei Windturbinen sind vom Typ Tacke 1.5s mit einer Achsenhöhe von 80 m und einem Rotordiameter von 70,5 m. Der dreiflüglige Rotor hat eine Drehzahl von zwei Werten (zwischen 11 und 20 Umdrehungen in der Minute) und gibt Energie bei einer Windgeschwindigkeit ab 3 m/s (auf Achsenhöhe). Siehe weiteres im Anhang. Es wurde gemessen an der westlichsten Turbine.

### 3.3. Geräuschemessung

Bei der Geräuschemessung haben wir die Richtlinien von Sten Ljunggren (Referenz 2) verwendet. Wir haben ungefähr bei dem Abstand gemessen, wo das Geräusch nach diesen Richtlinien gemessen werden soll. Dieser Standardabstand ist die Höhe der Achse der Windturbinen plus der Länge von einem Flügel. In diesem Fall war der Abstand ungefähr 110 Meter; wir haben gemessen auf einem Abstand von 102 Meter. Der Winkel zwischen Windrichtung und Linie Windturbine – Messung dürfte max. 15° sein; wir sind höchstens 10° von der Windrichtung abgewichen.

Auf dem Boden haben wir eine kreisförmige Holzplatte hingelegt, von einem Meter Durchmesser (siehe Figur 4). Darauf haben wir das Mikrofon auf Abstand  $\frac{2}{3}D$  zu der Seite, die sich am nächsten bei der Windmühle befand, hingelegt und zur Windmühle hin ausgerichtet.



Figur 4: Position des Mikrofons auf

runder Holzplatte



Wir haben berücksichtigt, dass der Mittelpunkt des Mikrophons höchstens 8 mm von der Platte entfernt sein dürfte. Deswegen haben wir eine halbe Windkugel verwendet, nur oberhalb des Mikrophons. Mit Hilfe einer Eichbron (Bruel & Kjaer Typ 4230) ist der Lautstärkemesser geeicht. Der verwendete Lautstärkemesser war ein Larson Davis Typ 2800.

#### 3.4. Die direkte Windmessung

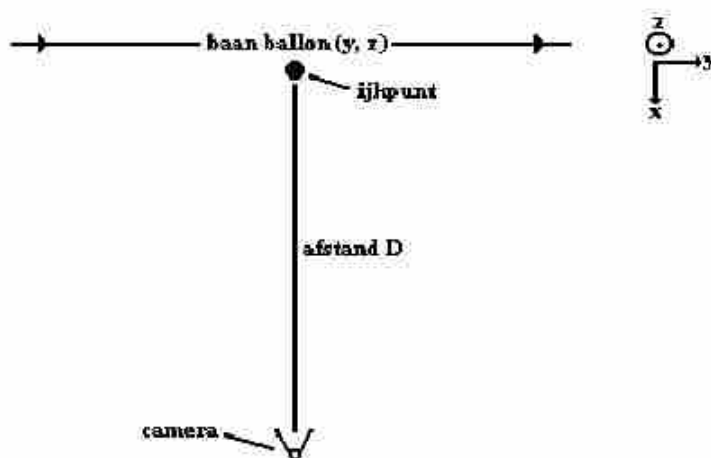
Für die Windmessung auf direkter Höhe war schon eine Konstruktion vorhanden. Es war ein Posten zur Verfügung, der ausschiebbar war bis zu einer Länge von 10 m. Der Windmesser wurde hierauf montiert. Der Posten war zu drehen, so dass wir den Windmesser in die Richtung des Windes drehen konnten. Der Windmesser war mittels eines Signaldrahtes am Boden abzulesen. Der verwendete Windmesser war ein DTA 400 digitale Anemometer.

#### 3.5. Windprofilmessung

Bei dieser Messung war es gedacht, die Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe zu messen. Hierzu haben wir einen Müllbeutel, zusammen mit ein paar Ballons, alle gefüllt mit Helium in die Luft steigen lassen um dies mit einer Videokamera aufzunehmen. Der dunkle Müllbeutel hatte den Vorteil, dass dieser auf dem Videobildschirm gut sichtbar war. Ein Nachteil des Müllbeutels war, dass er durch das Gewicht wenig Aufwärtstrieb hatte. Die Luftballons selber waren auf dem Videoschirm nicht sichtbar, halfen aber dem Müllbeutel aufzusteigen. Wir sind davon ausgegangen, dass der Müllbeutel und die Ballons sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Wind bewegen würden.

Unter der Bahn des Ballons haben wir einen Eichpunkt aufgestellt, bestehend aus einem Pfosten mit Latten mit Zwischenabstand von 4,7 m. Den Abstand zwischen Kamera und dem Eichpunkt haben wir während der Messungen variiert. Abstände zwischen 100 und 300 m waren für uns am besten geeignet, weil bei einem kleineren Abstand die Bahn des Ballons nicht richtig ins Bild gebracht werden konnte und bei einem größeren Abstand der Ballon nicht richtig mehr zu sehen war.

Die Zeit haben wir ermittelt aus der Anzahl der Frames (= Einzelne Bilder, aus denen eine Videoaufnahme besteht). Jede Sekunde haben wir dann einen Frame ausgelesen („gecaptured“), so dass die Geschwindigkeit des Ballons aus den Unterschieden von den aufeinanderfolgenden Frames zu bestimmen ist. Durch die Bilder, eingelesen in einem Grafikprogramm, ist es möglich, die Bahn der Ballons festzustellen. In Figur 5 haben wir die Positionen der Kamera und die Bahn der Ballons wiedergegeben.

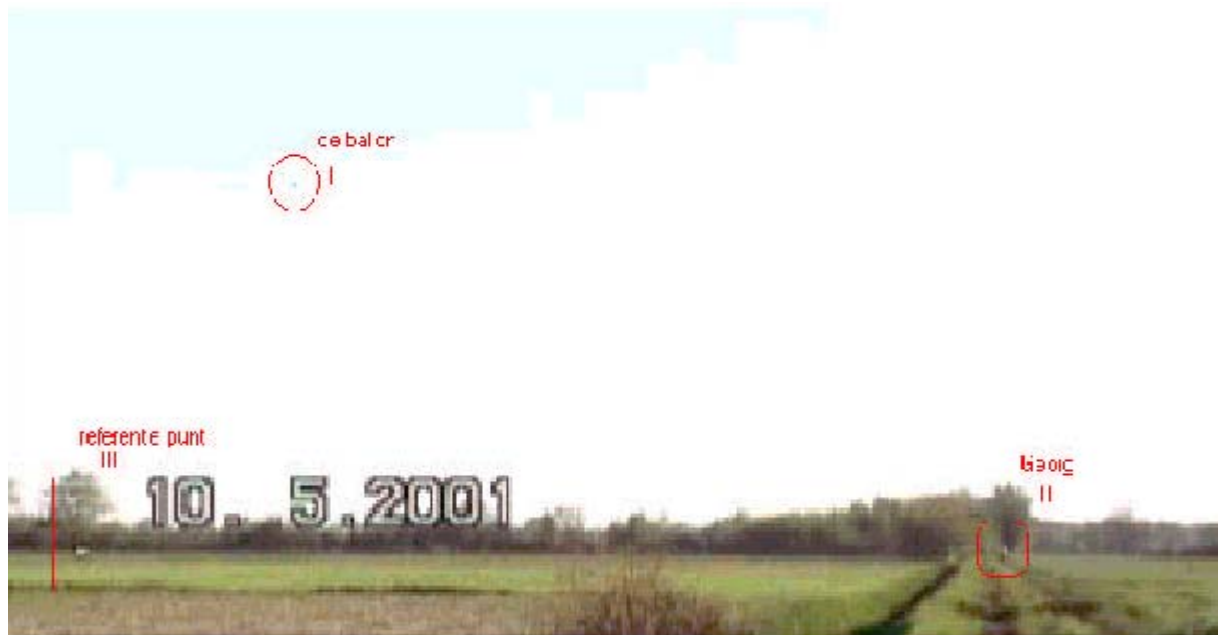


Figur 5: Skizze (Aufsicht) ist die Position der Kamera gegenüber der Bahn des Ballons. Der Wind kommt aus der y-Richtung, die z-Richtung steht hoch (in einer Lot-Linie auf der Fläche der Zeichnung)

### 3.6. Verarbeitung Videobilder

Um Videobilder zu bearbeiten, haben wir Software gebraucht. Zum Bearbeiten der Videobilder verwendeten wir die Pinnacle Systems Software Studio PCTV pro, für die Bearbeitung der Videocaptures PhotoShop 5.

Szenen dieser Videoaufnahmen (wie im Beispiel Figur 6) haben wir in das Grafikprogramm geladen, so dass wir durch die Zahl der Pixel zwischen den Punkten ziemlich genau die Abstände messen konnten, weil wir die wirkliche Breite und Höhe des Eichpfostens wußten. Ein Pixel entsprach ungefähr 15 cm. Wir haben jede Sekunde ein Bild „gecaptured“ und hierin die Position des Ballons dem Eichposten gegenüber festgelegt. Wir haben nicht alle Aufnahmen benutzt, weil der Ballon nicht immer gut sichtbar war.

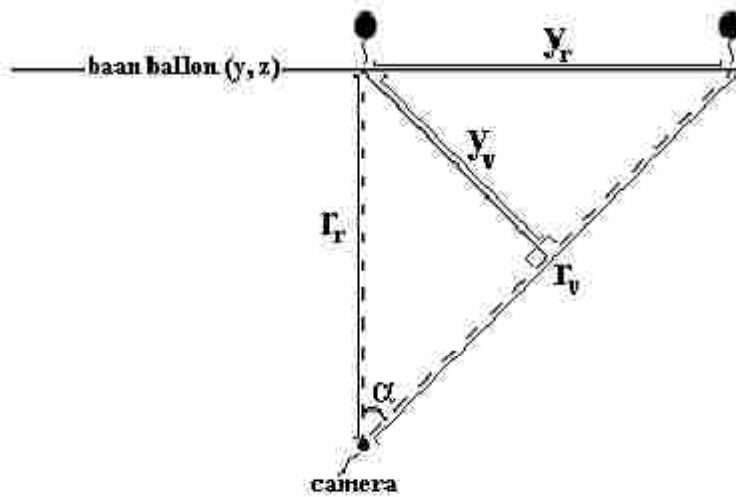


Figur 6: Beispiel eines Frames (Bild), wobei die Abstände bestimmt sind. Dieses Bild ist von den Messungen des Windprofils um 8.15 Uhr. I ist ein Kreis, worin der Ballon sich befindet. II ist Georg, der den Ballon losgelassen hat und III ist der Eichposten mit den zwei horizontalen Latten mit einem Abstand untereinander von 4,7 Meter; die untere Latte steht auf 0,5 Meter. Die Qualität der Bilder die wir benutzt haben, ist erheblich besser als die hier abgedruckte Version.

Mit Hilfe der Eichpunkte in der x- und y-Richtung sind die Pixel umzurechnen nach Meter. Wenn die Blickrichtung der Kamera jedoch nicht im Lot auf der Bahnfläche des Ballons steht, tritt eine Verzerrung des Bildes auf. Die wirklichen Abstände sind dann eine schräge Projektion auf dem Bildschirm. Dies haben wir wie folgt korrigiert: Der wirkliche Abstand in y- (Bahnfläche) und z- (Höhe) Richtung ist der gemessene Abstand geteilt durch den Faktor  $\cos(\alpha)$  – siehe Figur Nr. 7. Die Verbindung zwischen  $y_r$  und  $y_v$  wird dann gegeben durch die nächste Formel:

$$y_r = y_v / \cos(\alpha) = y_v / (1 - y_v^2 / r_r^2)$$

Den wirklichen Abstand vom Kamera-Eichposten  $r_r$  und dem Abstand  $y_v$  bestimmt man so aus dem Videobild. Das gleiche gilt für z (in der Formel kann man alle y durch z ersetzen).



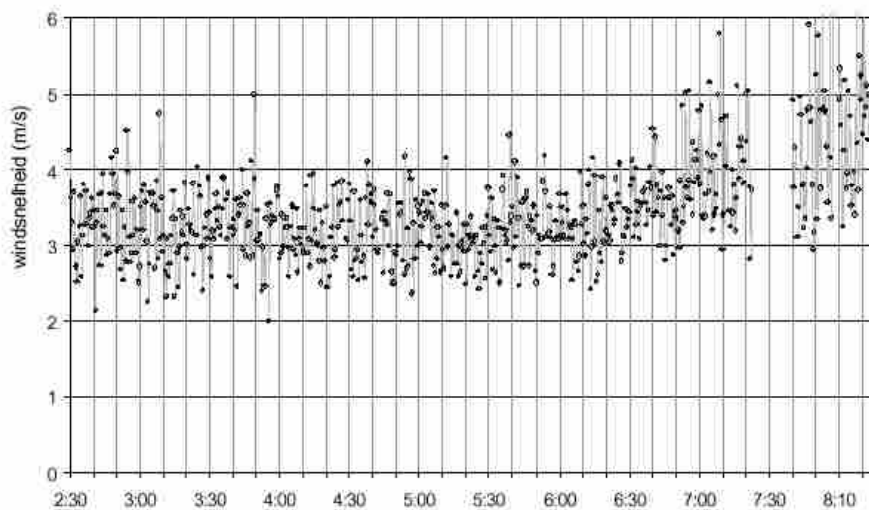
Figur 7: Abbildung der Bahn des Ballons in die  $y$ -Richtung.  $y_v$  wird als schräge Position auf dem Videobild wahrgenommen,  $y_r$  ist der wirkliche Abstand, die wir sehen würden, in einer Parallelprojektion.  $r_r$  ist der Abstand Kamera-Bahnfläche;  $r_v$  der Abstand Kamera-Bildpunkt der Linie entlang im Lot liegend auf der Bildfläche.

## 4. Resultate

Die verschiedenen zu untersuchenden Größen sind nicht alle gleichzeitig gemessen. Die direkten Messungen der Windgeschwindigkeit (auf 10 m Höhe) fanden in der Nacht und am frühen Morgen statt. Die Messungen des Windprofils erfolgten abends vor Sonnenuntergang (21:11 Uhr) und morgens ab Morgendämmerung bis einige Stunden nach Sonnenaufgang (06.01 Uhr). Die Geräuschemessungen sind nachts gemacht, zum größten Teil ohne Zeitangabe (automatische Datensicherung im Geräuschmesser).

### 4.1. Direkte Windmessungen

Während der Nacht und am frühen Morgen wurden die Messwerte des Windmessers auf 10 Meter Höhe notiert. In Figur 8 sind diese pro 30 oder 60 Sekunden gemessenen Werte zeitlich aufgeteilt. Daraus resultiert, dass die Windgeschwindigkeit in der Nacht zwischen 3 à 3,5 m/s geblieben ist, mit Variationen bis ca. 1 m/s. Deutlich zu sehen ist, dass im Laufe des frühen Morgens ungefähr ab 06.20 Uhr auf 10 m Höhe mehr Wind gekommen ist. Im Durchschnitt war über Nacht die Windgeschwindigkeit 3,2 m/s.



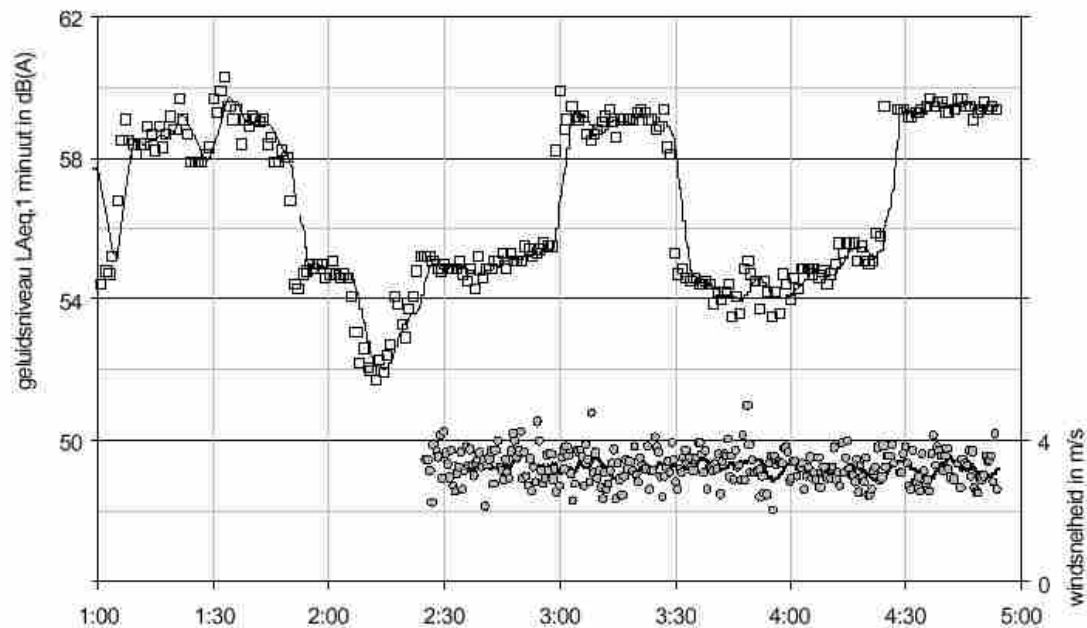
**Figur 8:**  
Verlauf der  
Windgeschwindigkeit  
auf 10 m Höhe während  
der Nacht und frühen  
Morgen vom 10. Mai  
2001

### 4.2. Geräuschemessung

Das Geräuschniveau der westlichsten Windturbine wurde gemessen und war auch ganz durch diese Windturbine bestimmt. In Figur 9 ist dies zeitlich gegliedert dargestellt. Gegeben ist das pro Minute gemessene äquivalente Geräuschniveau ( $L_{Aeq}$ ). Diese Messungen haben angefangen am 10. Mai 2001 um 01.00 Uhr und wurden gestoppt um 04.53 Uhr, weil der Akku des Messgerätes keinen Strom mehr geliefert hat. Über einen Teil der Zeit haben auch die direkt gemessenen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt.

Was in der Grafik auffällt, ist, dass die Windgeschwindigkeit während der Nacht fast konstant geblieben ist, aber das Geräuschniveau nicht. Dies zeigt ein Blockmuster mit Sprüngen von ungefähr 5 dB(A).

Um diese Strukturen in der Grafik besser erkennen zu lassen, sind in Figur 9 Linien hinzugefügt, die immer über die vorgehende 5 Minuten Durchschnittswerte verbinden. Dies bedeutet, dass vom Geräuschniveau 5 Messwerte gemittelt sind, von der Windgeschwindigkeit 10. Das Blockmuster im Geräuschniveau bleibt aber deutlich sichtbar. Die Windturbine scheint zu zwischen Geräuschniveaus von ca. 55 und 59 dB(A) zu wechseln, wobei auch kürzere Zeit ein geringeres Geräuschniveau von ca. 52 dB(A) vorkommt. Bei Anfang der Messungen konnten wir hören, dass hohe Geräuschniveaus einher gingen mit einem auffallenden tonal „singenden“ Geräusch. In einem Geräuschkennlinien-Spektrum scheint die Ursache davon in einer deutlichen Erhöhung bei 597 Hz zu liegen.



Figur 9: Nachts gemessene durchschnittlich äquivalente Geräuschniveau per Minute in dB(A) (offene Vierecke) und Windgeschwindigkeiten in m/s (graue Kreise); die Linien verbinden die pro 5 Minuten gemittelte Messwerte.

Es scheint wenig Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Geräuschniveau zu bestehen. Aus einer Analyse von dem Zusammenhang zwischen Geräuschniveau und Windgeschwindigkeit zwischen 02.25 Uhr und 04.55 Uhr ergibt sich kein signifikanter Zusammenhang (Korrelationskoeffizient 0,1). Es ist wohl, im Gegensatz zu dem was wir erwarteten, eine runtergehende Tendenz: Ein höheres Geräuschniveau scheint zusammenzugehen mit einer geringeren Windgeschwindigkeit.

Aus den Messungen kann das Geräuschniveau  $L_{WA}$  von der Windturbine abgeleitet werden. Dieses Geräuschniveau ist nicht konstant, es hängt ab von der Drehzahl und der Windgeschwindigkeit.

Nach Ljunggren (Referenz 2) wird es durch folgende Formel bestimmt:

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

worin  $L_{Aeq}$  das gemessene Geräuschniveau auf (schrägem) Abstand  $R$  des Messpunktes zum Mittelpunkt der Flügel ist, hier also  $R = 130$  Meter.

Aus den Messungen ergibt sich, dass während der Nacht Geräuschniveaus gemessen werden, die in drei verschiedenen Stärken eingeteilt werden können (siehe Figur 9). Zwischen 02.09 und 2.16 Uhr kommen

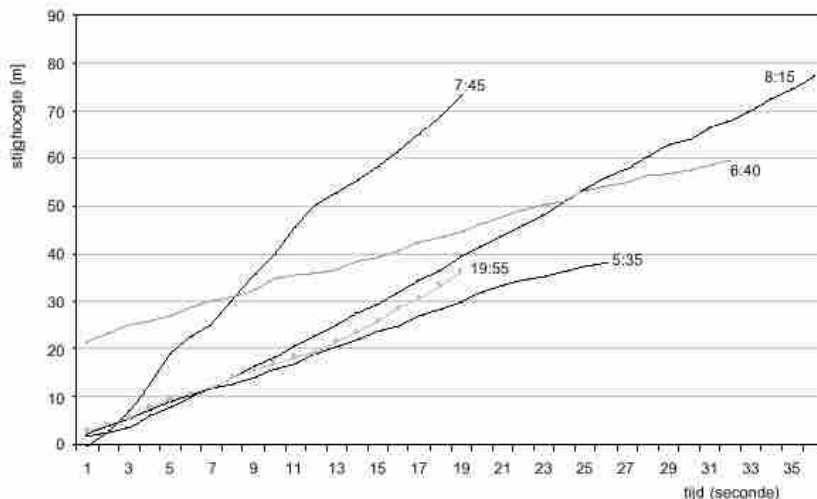
die niedrigsten Geräuschniveaus vor, das äquivalente Geräuschniveau  $L_{Aeq}$  in der Zeit ist 52,1 dB(A). Von 01.47 bis 02.08 Uhr, von 02.27 bis 02.57 Uhr und von 03.30 bis 04.20 Uhr ist das äquivalente Geräuschniveau 54,9 dB(A). Von 01.08 bis 01.49 Uhr und von 02.59 bis 03.28 Uhr und von 04.23 bis 04.53 Uhr ist das äquivalente Geräuschniveau 59,4 dB(A).

Aus diesen Gegebenheiten kann man berechnen, dass das Geräuschniveau der Windturbine Werte angenommen hat zwischen  $L_{WA} = 99,4$  resp. 102,2 und 106,7 dB(A).

### 4.3. Steigungsgeschwindigkeit und Bahn der Ballons

In Figur 10 ist die Höhe der Ballons im Zeitablauf ab dem Loslassen dargestellt (um 06.40 kurz nach dem Loslassen). Die Höhe ist um die Sekunde bestimmt, bei der Messung um 06.40 um die zwei Sekunden. In Tabelle 1 sind die zu den best passenden geraden Linien in Figur 11 gehörenden Formeln wiedergegeben und zusätzlich die Werte der Korrelationskoeffizienten. Aus der Höhe der Korrelationskoeffizienten ergibt sich deutlich, dass die Linien in Figur 11 ziemlich übereinstimmend mit den geraden Linien ist. So ist die Steigungsgeschwindigkeit (für die Zeit  $t$  in der Formel) in der Flucht konstant geblieben. Dies ist auch das, was wir erwarten hatten.

Die Steigungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich pro Messung, weil wir nicht jedesmal die gleiche Menge als Helium benutzt haben. Auch ist die Steigungsgeschwindigkeit beeinflusst von der verschiedenen Anzahl der Ballons und Müllbeutel, die wir benutzt haben.



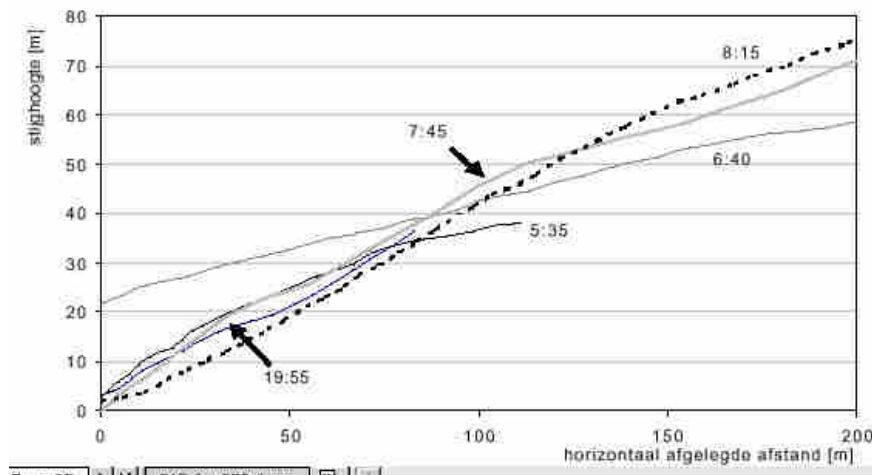
Figur 10;  
Steighöhe der zu fünf unterschiedlichen Zeitpunkten losgelassenen Ballons als Funktion von der Zeit (kurz) nach dem Loslassen

Tabelle 1: Corr. Coeff. und Formeln zu den best passenden geraden Linien bei der Steighöhe aus Figur 10.

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

In Figur 11 sind die Bahnen gezeichnet, denen die Ballons die erste Zeit nach dem Loslassen gefolgt sind. Den Ballons, welche um 19.55 und 05.35 Uhr losgelassen wurden, konnte gefolgt werden, bis sie einen horizontalen Abstand von ungefähr 100 m zurückgelegt hatten (weil wir die Kamera relativ nah an der Bahn der Ballons stehen hatten).

Die Messung von 06.40 Uhr fängt auf 20 Meter Höhe an, weil auf dem Teil der Videoaufnahme der Ballon nicht zu sehen war. Der Ballon zeichnete sich nicht gegen den Hintergrund ab, solange er noch nicht über die Bäume, die dahinter standen, herauskam. Einmal über den dunklen Hintergrund herausgekommen, war der Ballon gut zu sehen, bis zu einer Höhe von ungefähr 60 Meter. Die Messungen von 07.45 und 08.15 Uhr sind, weil es schon hell geworden war, über eine längere Projektion zu verfolgen gewesen. Kein einziger Ballon war zu verfolgen bis über eine Höhe von 75 Meter.



Figur 11: von den Ballons zurückgelegte Bahnen (Steighöhe und horizontal in Windrichtung zurückgelegter Abstand) in fünf Zeitmessungen nach dem Loslassen

#### 4.4. Gemessene Windprofile

Aus der Bahn, welche der Ballon als Funktion der Zeit folgt, können sowohl die vertikale als auch die horizontale Geschwindigkeit bestimmt werden. Die vertikale Geschwindigkeit ist die Steigungsgeschwindigkeit, welche gegeben ist in Tabelle 1 (die Zahl für Zeit t in Formel für Steighöhe). Die horizontale Geschwindigkeit ist die Windgeschwindigkeit die wir wissen wollen. Die horizontale Geschwindigkeit kann aus der Relation zwischen dem horizontal zurückgelegten Abstand und der Zeit bestimmt werden. Die Korrelationskoeffizient dieser Relation, welcher durch Differentiation der horizontalen Geschwindigkeit gefunden wird, ist sehr hoch (siehe Tabelle 2), dies zeigt auf eine hohe Genauigkeit des Resultats. Die Windgeschwindigkeit von 80 m beruht auf Extrapolation der Messgegebenheiten; die Windprofile sind nur bis eine max. Höhe von 75 m gemessen.

Tabelle 2: aus Bahn von Ballons berechnetes Windprofil (= Relation Windgeschwindigkeit – Höhe); der Korrelationskoeffizient ist die von Relation zwischen horizontaler Abstand und Zeit

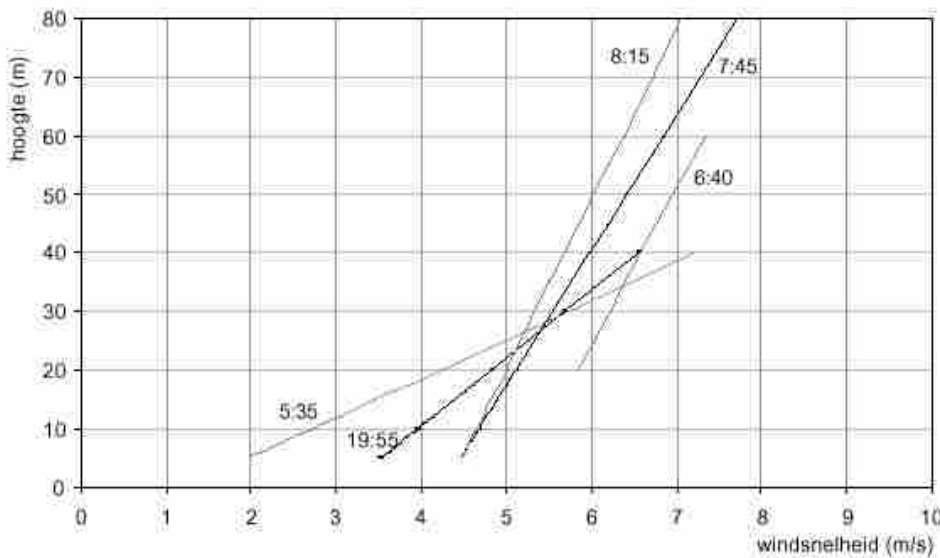
meting (kloktijd)	corr.coeff.	windsnelheid als functie van de hoogte h (m/s)	windsnelheid (m/s)	
			op 10 m hoogte	op 80 m hoogte
19:55	0,994	$V_{wind} = 0,087h + 3,1$	4,0	10,1
5:35	1,000	$V_{wind} = 0,150h + 1,2$	2,7	13,2
6:40	1,000	$V_{wind} = 0,037h + 5,1$	5,5	8,1
7:45	1,000	$V_{wind} = 0,043h + 4,3$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

In Figur 12 ist das Windprofil von jeder Messung grafisch wiedergegeben (wie in Tabelle 2 angegeben).

Aus Figur 12 ergibt sich, dass die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe abends (um 19.55) 4 m/s war, abnehmend auf ca. 3 m/s im letzten Teil der Nacht (05.35 Uhr). Nach Sonnenaufgang (06.01 Uhr) steigt die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe auf rund 5 m/s; dass stimmt gut überein mit der direkten Windgeschwindigkeitsmessung (siehe Figur 8).

Auf größerer Höhe, über ca. 30 m., ist das umgekehrt (im Vergleich zu 10 m Höhe); da tritt, gerade nachts, die höchste Windgeschwindigkeit auf und nach Sonnenaufgang die niedrigste.

Auf ungefähr 30 Meter Höhe bleibt während der größten Teil der Zeit die Windgeschwindigkeit ungefähr konstant.



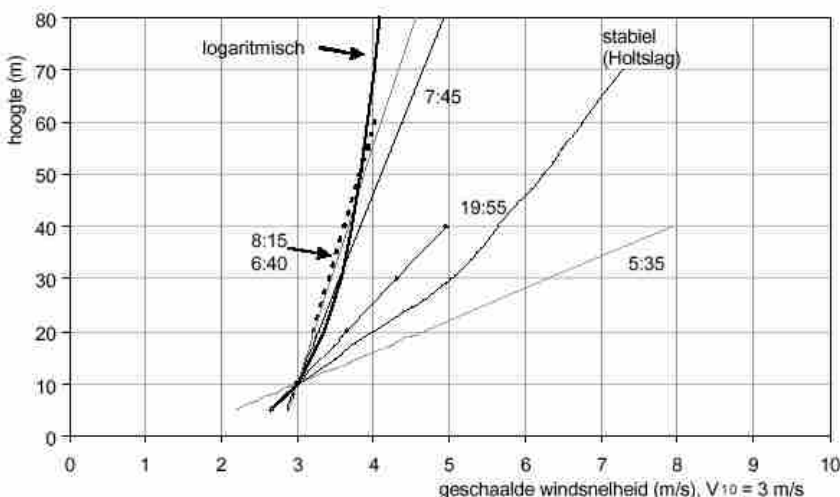
Figur 12: mit Ballons bestimmte Windprofile an fünf verschiedenen Zeitpunkten

In Figur 13 sind die Windprofile nochmals dargestellt, aber jetzt sind die Messwerte mit einem konstanten Faktor geschaltet, so dass die Windgeschwindigkeit auf der Referenzhöhe von 10 m immer gleich ist mit 3 m/s (an Windgeschwindigkeit die nachts am meisten vorkommt).

Darüber hinaus ist hier das üblich benutzte logarithmische Profil hinzugefügt (wie beschreiben in Paragraph 2.1). Nach diesem theoretischen Windprofil nimmt die Veränderung der Windgeschwindigkeit ab, je mehr die Höhe zunimmt.

Unsere Messungen zeigen, dass dies mit den experimentell ermittelten Daten nicht übereinstimmt.

Ein durch Holzschlag gemessenes Profil (siehe Figur 2; eine gepunktete Linie, hier geschaltet auf  $V_{10} = 3$  m/s) für eine stabile Atmosphäre ist auch noch zugefügt.



Figur 13: mit Ballons bestimmte Windprofile zu fünf verschiedenen Zeitpunkten, geschaltet auf eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s auf Referenzhöhe 10 Meter); gleichzeitig ist das logarithmische Windprofil eingezeichnet und das Profil von einer stabilen Atmosphäre nach Holzschlag.



Aus Figur 13 ergibt sich, dass das logarithmische Profil ziemlich übereinstimmt mit den nach Sonnenaufgang gemessenen Windprofilen. Die Abweichungen zwischen dem theoretischen und dem gemessenen Profil sind auf 80 m Höhe max. 25 %.

Abends und nachts ist der Unterschied aber viel größer. Die Windgeschwindigkeit nimmt dann viel schneller zu als es das logarithmische Profil vorhersagt; dies stimmt mit dem Profil überein, welches wir in einer stabilen Atmosphäre gefunden haben.

Es ist übrigens zu erwarten, dass auf größerer Höhe, als hier gemessen, die Windgeschwindigkeit nicht mehr so schnell zunimmt und letztendlich zu einem Wert tendiert, der auf großer Höhe gilt (der geostrophische Wind).

Auf Basis von Extrapolation der Messgegebenheiten nach 80 Meter Höhe und im Vergleich mit dem logarithmischen Windprofil, welches allgemein benutzt wird, können wir das folgende sagen: Abends ist die Windgeschwindigkeit in 80 m Höhe um den Faktor 2,0 höher (+ 100%) als vorhergesagt, aufgrund der Windgeschwindigkeit auf Referenzhöhe (10 Meter), spät in der Nacht ist dies sogar ein Faktor 3,3 (+ 230%).

## 5. Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen

Für die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe wird üblicherweise ein logarithmisches Windprofil genutzt. Mit Hilfe von diesem (theoretischen) Profil wird bei Windturbinen, ausgehend von dem Wind in einer Referenzhöhe von 10 Metern, der Wind auf Achsenhöhe vorhergesagt.

Dieses Modell stimmt nicht bei einer stabilen Atmosphäre, die vor allem nachts vorkommt, im Gegensatz zu einem (sommerlichen) Tag, wenn die Atmosphäre instabil ist.

In einer stabilen Atmosphäre gleiten die Luftlagen mehr oder weniger übereinander und es sind die Geschwindigkeitsunterschiede in vertikaler Linie größer als in einer instabilen Atmosphäre, wo die Luftlagen durch Turbulenz (aufsteigende Luft) aneinander gekoppelt wurden. Eine stabile Atmosphäre ist keine Seltenheit, sogar in den Sommermonaten eher die Regel: Bei 45 % der nächtlichen Stunden pro Jahr ist die Atmosphäre stabil (vgl. Wetterstation Eelde, Referenz 1).

Nachts kann die von uns gemessene Windgeschwindigkeit mehr als dreimal so groß werden als erwartet: Auf 80 Meter Höhe ist die Windgeschwindigkeit 13,2 m/s <sup>(1)</sup>, obwohl aufgrund des logarithmischen Modells nur 3,7 m/s erwartet würden. Umgekehrt kann man sagen, dass bei einer Windgeschwindigkeit von 13,2 m/s auf 80 Meter Höhe eine Windgeschwindigkeit von 10 m/s auf 10 Meter Höhe erwartet würde und nicht von 2,7 m/s wie gemessen.

Abends, noch vor Sonnenuntergang, ist die Windgeschwindigkeit auf 80 Meter Höhe zweimal so groß als erwartet.

Übrigens scheint eine höhere Windgeschwindigkeit auf großer Höhe auch mit einer niedrigeren Geschwindigkeit nahe am Boden einherzugehen. Auf ungefähr 30 Meter Höhe scheint ein „Kehrpunkt“ zu sein, wo die Windgeschwindigkeit ungefähr gleich bleibt, eine Erhöhung darüber geht einher mit einer niedrigeren Windgeschwindigkeit darunter und umgekehrt.

Es ist eine schwache Relation zwischen der Geräuscentwicklung und der Windgeschwindigkeit festzustellen: weniger Wind (auf 10 Meter Höhe) bedeutet mehr Geräusche. Die Erklärung liegt wahrscheinlich in der Besonderheit des Windes unter- und oberhalb des oben beschriebenen Kehrpunktes: weniger Wind auf 10 Meter Höhe bedeutet mehr Wind auf Höhe des Rotors.

Aufgrund allgemeiner Erkenntnisse (Referenz 3) nimmt das Geräuschniveau  $L_{WA}$  einer Windturbine um 0,3 dB(A) zu, wenn die Windgeschwindigkeit mit 1 m/s zunimmt. Wenn also die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe 3 m/s beträgt, aber auf Achsenhöhe ist die Windgeschwindigkeit so hoch, dass das aufgrund unserer Erkenntnisse mit 10,5 m/s auf 10 Meter Höhe übereinstimmen sollte, dann bedeutet diese höhere Windgeschwindigkeit (+ 7,5 m/s) eine Erhöhung des  $L_{WA}$  mit  $7,5 \cdot 0,3 = 2,3$  dB(A).

Der Wind in Referenzhöhe blieb während der Nacht fast konstant circa 3 m/s (im Schnitt 3,2 m/s). Aber auf Rotorhöhe war dieser also größer und variierte also vielleicht mehr. Aus Geräuschemessungen ergibt sich, dass die Geräusche der grenznächsten Windturbine während der Nacht, trotz fast konstanter Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe, schrittweise variierte von 102,2 nach 106,7 dB(A) <sup>2</sup>. Ein deutscher Bericht (Referenz 4) gibt für eine Tacke TW 1,5 ein  $L_{WA}$  von 104 dB(A) bei einer Windgeschwindigkeit von 10 (!) m/s auf 10 Meter Höhe.

<sup>1</sup> hochgerechnet von dem in 50 m Höhe gemessenen Profil

<sup>2</sup> kurzfristig auch etwas niedriger, 99,3 dB(A)

Der Sprung von 4,5 dB(A) im Geräusch der Windturbine könnte zusammenhängen mit Variationen in der Windgeschwindigkeit auf Rotorenhöhe, aber es ist merkwürdig dass die Veränderungen dann so sprunghaft sind. Eine Erklärung kann auch das Umschalten der Turbine auf eine höhere Drehzahl sein, was auftritt, wenn der Wind eine bestimmte Stufe überschreitet. Nach einer Faustregel (Ref. 5) nimmt das Geräuschvermögen zu mit  $50 \cdot \log$  (Drehgeschwindigkeit): 4,5 dB(A), das impliziert dann eine Zunahme der Drehgeschwindigkeit um 23 %.

Aufgrund des logarithmischen Windprofils würde man dieses Schalten nicht erwarten, weil man (übrigens ausgehend bei der ziemlich niedrigen Windgeschwindigkeit von 3 m/s auf 10 Meter Höhe) auf Achsenhöhe eine relativ niedrige Windgeschwindigkeit erwarten würde, wobei die Windturbine mit einer niedrigen Umdrehungszahl drehen würde.

Dieses höhere Geräusch der Windturbine geht übrigens einher mit einem auffallend „singenden“ Geräusch, verursacht durch einen Ton von 597 Hz. Nach der holländischen Gesetzgebung würde diese extra Belastung mit 5 dB(A) bewertet und müsste gesondert genehmigt werden.

Zum Schluss merken wir noch an, dass es noch zwei Erklärungen dafür gibt, dass die Geräusche der Windturbine nachts mehr auffallen. Zum ersten ist es nachts bei einer stabilen Atmosphäre still, weil dann die Windgeschwindigkeit am Boden sehr niedrig ist, wodurch Pflanzen und Bäume, die sich mit dem Wind bewegen, nur wenig Geräusche machen. Zum zweiten sorgt die starke Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe in der Richtung des Windes für eine Ablenkung des Geräusches nach unten und dadurch kann man das Geräusch auf größeren Abstand deutlicher hören.

## 6. Zusammenfassung

Beim Messen des Geräusches von Windturbinen wird zuviel von den Gegebenheiten auf 10 Meter Höhe bei tagsüber typischen Wetterumständen ausgegangen, obwohl die Geräusche gerade nachts die Belästigungen darstellen. Nachts ist die Relation zwischen Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe und auf Rotorenhöhe (Geräuschproduktion der Turbine) anders als tagsüber. Es gibt nachts auf Rotorenhöhe oft mehr Wind als aufgrund der Windgegebenheiten auf 10 Meter Höhe erwartet wird. Eine Windturbine produziert dadurch, auch wenn die Drehzahl konstant bleiben würde, mehr Geräusche als erwartet. Eine Windturbine mit verschiedenen Umdrehungszahlen wird nachts öfters als erwartet auf einer höhere Umdrehungszahl drehen, was für eine extra Geräuschproduktion sorgt.

Die durch uns untersuchte Windturbine produziert auch noch einen auffallenden singenden Ton. Letztlich ist es durch ein anderes Windprofil nachts ruhiger (weniger Umgebungsgeräusche) und das Geräusch wird von der Turbine stärker zum Boden abgelenkt.

Eine Auflistung unserer Schlußfolgerungen:

### *Geräusch Windturbine:*

Das Geräusch einer der Windturbinen (die westlichste, grenznächste) ist nur nachts gemessen worden. Während der Messung (9/10. Mai 2001) war die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe im Schnitt 3,2 m/s.

Das Geräusch variierte sprunghaft in seiner Stärke: plötzlich sprang das Geräuschniveau auf ein 4,5 dB(A) höheres Niveau, nach ungefähr einer halben Stunde ging es wieder herunter auf einen geringeren Wert, um ungefähr eine Stunde später wieder nach oben zu springen. Das höhere Niveau geht auch einher mit einem deutlich wahrnehmbaren „singenden“ Geräusch von 597 Hz. Für so ein Geräusch würde nach der holländischen Gesetzgebung ein Zuschlag von 5 dB(A) gegeben.

Die Ursache dieser schrittweisen Veränderungen in Geräuschstärke ist nicht bekannt, hängt aber wahrscheinlich mit den Variationen des Windes auf Rotorenhöhe oder mit dem Schalten zwischen einer höheren oder niedrigeren Umdrehungszahl der Turbine zusammen.

### *Geräuschniveau $L_{WA}$*

Aus diesen Messungen kann abgeleitet werden, dass das Geräuschniveau  $L_{WA}$  der Turbine während der Nacht 102 resp. 107 dB(A) beträgt, bei einer Windgeschwindigkeit von 3,2 m/s auf 10 Meter Höhe (während einer kurzen Zeit war das Geräuschniveau einmal noch etwas geringer als 102 dB(A), nämlich 99 dB(A)). Ein deutscher Rapport gibt für Tacke TW 1,5 ein  $L_{WA}$ <sup>1</sup> von 104 dB(A) bei einer Windgeschwindigkeit von 10 (!) m/s auf 10 Meter Höhe an.

### *Windprofil*

Aus den Messungen des Windprofils (= Verlauf Windgeschwindigkeit mit der Höhe) ergibt sich, dass bei einer stabilen Atmosphäre nachts die Windgeschwindigkeit auf Achsenhöhe merklich größer ist als aufgrund der normalen Annahmen, die für eine instabile Atmosphäre tagsüber gelten, vorhergesagt wird. Auf Basis dieser Annahmen ist auf 80 Meter Höhe die Windgeschwindigkeit 1,4 mal so hoch wie die auf 10 Meter Höhe.<sup>2</sup> Aus den Messungen ergibt sich, dass einige Zeit nach Sonnenaufgang ein etwas höherer, aber doch ziemlich vergleichbaren Wert (nämlich ein Faktor 1,5 – 1,6) gefunden wird. Dieser Wert wird aber merklich höher (Faktor 2,5) nach Sonnenuntergang und in der Nacht vor Sonnenaufgang viel höher (4,9). Die Windgeschwindigkeit nimmt also auf 80 Meter Höhe im Laufe des Abends und der Nacht stark zu, obwohl die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe kaum verändert ist.

<sup>1</sup> auf Deutsch der "immisions-relevante Schalleistungspegel"

<sup>2</sup> der genaue Wert ist abhängig von der Rauheitshöhe, 1 - 10 cm

Die Windgeschwindigkeit in der Nacht auf 80 Meter Höhe (13,2 m/s) würden nach den üblichen Annahmen übereinstimmen mit einer Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe von 9,5 m/s. Dies erklärt möglicherweise, dass es nachts bei einer Geschwindigkeit von ca. 3 m/s (auf 10 Meter Höhe) zu Geräuschen kommt, welche nach dem logarithmischen Profil erst bei einer viel höheren Windgeschwindigkeit (nämlich ca. 10 m/s auf 10 Meter Höhe) auftreten dürften.

***Windprofil und Konsequenzen für Geräuschbelastung:***

In Berechnungen von Geräuschbelastungen rund um einen Windturbinenpark wird von einem logarithmischen Windprofil (= übliche Annahme) ausgegangen. Zu einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s (auf 10 Meter Höhe) gehört dann eine Geschwindigkeit auf 80 Meter Höhe von 4,1 m/s. In Wirklichkeit scheint es aber nachts  $4,9 \cdot 3 = 14,7$  m/s zu sein. Nach dem logarithmischen Profil korrespondiert diese wirkliche Windgeschwindigkeit auf Achsenhöhe mit 10,5 m/s auf 10 Meter Höhe und nicht mit 3 m/s.

Aufgrund der allgemeinen Messresultate nimmt das Geräuschniveau  $L_{WA}$  um 0,3 dB(A) zu, wenn die Windgeschwindigkeit um 1 m/s zunimmt. Wenn also die Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe 10,5 m/s statt 3 m/s sein würde, dann würde das eine Zunahme des  $L_{wa}$  mit 2,3 DB(A) bedeuten. Wichtiger als diese höhere Windgeschwindigkeit ist wahrscheinlich aber, dass die Windturbine mit einer höheren Drehzahl dreht, wodurch die Geräuschproduktion nochmals wieder höher wird.

Durch diese höheren Windgeschwindigkeiten und Drehzahl ergeben sich höhere Geräuschpegel.

## 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 von 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](http://www.wind.enron.com/PRODUCTS/15/15specs.html))

### 1.5 Technical Specifications

	65 m	70.5 m	77 m
<b>Performance</b>			
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
<b>Rotor</b>			
Number of blades	3	3	3
Diameter	65 m	70.5 m	77 m
Swept area	3318 m <sup>2</sup>	3902 m <sup>2</sup>	4657 m <sup>2</sup>
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
<b>Gearbox</b>		<b>Tower</b>	
Type: Three step planetary spur gear system i=72, for 77 meter rotor: i=80		Multi layer coated, conical tubular steel tower with interior safety ladder to the nacelle Load lifting system, 250 kg carrying force	
<b>Generator</b>		<b>Hub height:</b>	
Type: Rotary current asynchronous with slip rings Rated power: 1500 kW		65 meter rotor: 65 or 80 meter 70.5 meter rotor: 65 or 80 meter meter 77 meter rotor: 80 meter	
<b>Inverter</b>		<b>Lightning Protection System</b>	
Type: IGBT-frequency inverter		Lightning receptor installed on blade tips Discharge inside the rotor blades along nacelle and tower	
<b>Braking Systems</b>		<b>Sound Proofing</b>	
Individual pitch regulation Brake control system: fail-safe		Structure borne noise insulation of the drive train Sound reduced gearbox Reduced blade tip speed Noise reduced nacelle	
<b>Yaw System</b>			
Motor driven with wind direction sensor and automatic cable unwind			
<b>Control System</b>			
Microprocessor-based programmable logic controller (PLC) Remote control operating system			

Specifications subject to possible modification.