

Der Einfluss eines stromauf befindlichen Tals auf die Leistungsdichte des Windes für eine Windenergieanlage

The influence of an upstream valley on the wind power density for wind turbines

B. Ruck & D. Zemella

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe, Germany, ruck@kit.edu

Schlagworte: Windenergieanlage, stromauf gelegenes Tal, Leistungsdichte des Windes
Keywords: Wind turbine, Upstream valley, wind power density

Zusammenfassung

Um den Einfluss von Tälern im Zuströmbereich von Windenergieanlagen (WEA) genauer zu untersuchen und Validierungsmöglichkeiten für Berechnungsverfahren zu erhalten, wurden experimentelle Untersuchungen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal an zwei Talmodellen durchgeführt. Hierbei wurden WEAs stromab eines "Störtals" in variiertem Abstand angenommen. Die Oberfläche von Tal und Umgebung wurde als Waldfläche nachgebildet. Die Strömungsbedingungen, die auf die Rotorfläche wirken, wurden für den jeweiligen WEA-Abstand vom Tal mittels der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) in Abhängigkeit von Nabenhöhe und Rotordurchmesser vermessen. Aus den Geschwindigkeitsdaten wurden sodann die lokalen Leistungsdichten des Windes für typische Rotorflächen und Nabenhöhen bestimmt. Durch Bezug der Ergebnisse mit Störtal auf die Ergebnisse ohne Störtal lässt sich ein Expositionsbeiwert angeben, der die Leistungseinbußen der WEA als Funktion des Abstands vom Tal erkennen lässt.

1. Einführung

Windenergieanlagen (WEA) werden zunehmend auch in orographisch gegliedertem Gelände aufgestellt. Ertragsabschätzungen sind dabei eine wichtige Voraussetzung für Standortentscheidungen. Um die Effizienz einer Windkraftanlage zu beurteilen und die jährliche Stromproduktion im Vorfeld der Errichtung abzuschätzen, muss die Windklimatologie am vorgesehenen Standort bekannt sein. Leider sind die ortsspezifische Winddaten in den meisten Fällen unbekannt, so dass Winddaten von entfernten Wetterstationen herangezogen und durch Strömungsmodelle hochgerechnet werden müssen ('micro-siting'). Zu diesem Zweck werden Strömungsmodelle unterschiedlichen Typs verwendet. Lineare Strömungsmodelle, siehe Troen & Petersen 1989 oder Mortensen et al. 1993, berechnen die Windklimatologie durch Parametrierung von relevanten Einflussfaktoren (Oberflächenrauigkeit, Abmessungen von standortnahen Hindernissen, Höhenlinienverlauf des Geländes). Charakteristisch für diese linearen Strömungsmodelle ist, dass das zumeist verwendete Orographiemodell aus Jackson & Hunt 1975 nur für ebenes Gelände oder sanfte Hügellandschaften sowie neutrale Schichtung der Atmosphäre angewendet werden kann. In komplexem, orographisch gegliedertem Gelände liefern lineare Strömungsmodelle allseits bekannte Abweichungen von der Wirklichkeit wie z.B. eine Überschätzung von orographiebedingten Windbeschleunigungen, siehe Bowen & Mortensen 2004, Botta et al. 1992, Ayotte 2008. Im Gegensatz zu linearen Strömungsmodellen berechnen 3-D nichtlinearer Strömungsmodelle, wie von Gravdahl &

Harstveit 2000 dargestellt, das 3-D-Windfeld mit Eingabedaten aus einem digitalen Geländemodell, einer Rauigkeitskarte und mit Daten der Windklimatologie von mindestens einer Wetterstation innerhalb des modellierten Gebiets. Die Windfeldberechnung basiert dabei auf der Lösung der zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS). Um das System von Gleichungen zu schließen, wird überwiegend das $k-\epsilon$ Turbulenzmodell verwendet. Nun ist aus verschiedenen Bereichen der Forschung bekannt, dass RANS-Modelle die turbulente kinetische Energie häufig über- und Rezirkulationszonen unterschätzen, insbesondere dann, wenn großskalige turbulente Wirbelphänomene bei relativ stark gekrümmten Oberflächen berechnet werden sollen, siehe Schmidt et al. 2013, Sumner et al. 2010. Komplexere oder sogar zeitaufgelöste Strömungsberechnungen z.B. mit der Large Eddy Simulation (LES) oder der Direkte Numerische Simulation (DNS) sind entweder aus Kostengründen für den industriellen Einsatz ungeeignet oder noch gar nicht durchführbar, da die zu simulierenden Reynolds-Zahlen viel zu hoch sind. Trotz Verwendung statistischer Turbulenzmodelle, zeigen offensichtlich 3-D nichtlineare Strömungsmodelle eine bessere Übereinstimmung mit Mastmessungen als Ergebnisse mit linearen Strömungsmodellen. Unabhängige Studien zu diesem Thema, siehe auch Walmsley 1990, sind jedoch selten und zeigen, dass sowohl lineare wie nichtlineare Strömungsmodelle bei Vorhandensein von komplexem, orographisch gegliedertem Gelände zu erheblichen Berechnungsunsicherheiten führen können. So kann die Frage, wie genau die Windenergieressource für einen bestimmten Ort abgeschätzt werden kann, nicht zweifelsfrei mit den in Verwendung befindlichen Berechnungsprogrammen beantwortet werden. Um die Wirtschaftlichkeitsberechnung für eine WEA in orographisch gegliedertem Gelände detaillierter abzusichern und damit auch die Möglichkeit der Validierung von herkömmlichen Berechnungsprogrammen zu ermöglichen, wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal vorgenommen, wobei insbesondere der Verlust der Windleistungsdichte interessiert, der durch ein der WEA vorgelagertes Tal induziert wird.

Störung der atmosphärischen Anströmung durch ein Tal

Der Einfluss von orographisch gegliedertem Gelände wie zum Beispiel eines Hügels, eines steilen Abhangs oder eines Tals auf die mittleren Geschwindigkeitsprofile und auf die Turbulenzcharakteristik der Windströmung ist nicht zu vernachlässigen. Während der Effekt durch Hügel in zahlreichen Studien untersucht wurde (Jackson und Hunt 1975; Bradley 1980; Mason 1986), ist der Effekt, welcher durch ein Tal entsteht, weit weniger erforscht worden. Einige Studien zur Überströmung von Tälern finden sich aber in der Literatur (Hsu und Kennedy 1971; Counihan 1974; Verma und Cermak 1974; Sierputowski et al. 1995, Carpenter und Locke 1999), jedoch beziehen sie sich meist auf eine Berg-Tal-Konstellation. Studien zur reinen Talüberströmung wurden z.B. von Gharib und Roshko 1987 durchgeführt, die untersuchten, ab wann sich eine Rezirkulationszone innerhalb eines überströmten Hohlraums bildet. Keogh und Addison 1996 führten ähnliche Untersuchung für Wasser und einem Hohlraum in einem Gerinne durch. Ähnliche Studien sind im Bereich der Stadtmeteorologie zu finden, welche sich mit der Überströmung von „Straßenschluchten“ in Städten beschäftigen, see e.g. Louka et al. 2000. Darüber hinaus sind Untersuchungen zur Verbreitung von Luftschadstoffen in Tälern (Beniston et al. 1989) oder Untersuchungen zu Windablagerungsprozessen in hügeligen Gebieten (Goossens und Offer 1997) vorhanden. Experimente von Snyder et al. 1991 zeigten, dass die Strömung schon vor dem Tal beeinflusst wird. Durch das Eintreten der Strömung in das Tal wird das vor dem Tal herrschende Druckfeld gestört. Dieses neue bzw. gestörte Druckfeld breitet sich weiter nach Oberstrom aus und verursacht eine Zunahme der oberflächennahen Geschwindigkeit vor dem Tal. Snyder et al. 1991 stellten fest, dass die Zunahme der oberflächennahen Geschwindigkeiten umso größer ist, je flacher die Hangneigung des Tals ist. Eine detaillierte Analyse wie sich die Strömung in Be-

zug auf die Geschwindigkeiten und die Schubspannungen in einem Tal verhält, wurde von Garvey 2004 durchgeführt. Die von ihm ermittelten Geschwindigkeitsverläufe zeigen deutlich, dass die Geschwindigkeiten sehr stark abnehmen und negative Werte erreichen, d.h. dass sich im Tal eine Rezirkulationszone ausbildet. Ab wann sich eine Rezirkulationszone ausbildet, hängt von mehreren Faktoren ab. Unter anderem spielen die Talmorphologie, die Oberflächenrauheit, die thermische Stabilität und die Hangneigung eine wichtige Rolle (Beniston et al. 1989; Dobosy 1989; Mason 1987; Snyder et al. 1991). Garvey 2004 und Snyder et al. 1991 zeigten, dass die Maximalwerte (Spitzen) im Profil der Reynoldsschubspannung mit zunehmender Entfernung vom Tal nach oben wandern, was ein deutliches Zeichen dafür ist, dass sich in dem von ihnen untersuchten Tal ein Ablösegebiet unterstrom des Tals ausbildet.

Zu der allgemeinen Anströmung eines Tals sei erwähnt, dass sich der Wind, sofern dieser das Tal im 90°-Winkel anströmt, seine Richtung vor, im Inneren und nach dem Tal nicht ändert. Ein ganz anderes Strömungsbild ergibt sich, wenn das Tal nicht rechtwinkelig angeströmt wird. Hier haben eine Reihe von Untersuchungen z.B. mit Verfahren zur Strömungssichtbarmachung gezeigt, siehe z.B. Bullard et al. 2000, dass der ankommende Wind versucht, sich im Tal parallel zur Talkante auszurichten.

2. Experimentelle Details

2.1. Grenzschichtsimulation und Talmodelle

Die Untersuchungen wurden im VW-Windkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik des KIT durchgeführt. Der geschlossene, rückgeführte Windkanal hat eine Länge von 29 m und verfügt über eine 8 m lange Messstrecke mit achteckigem Querschnitt und einer Breite von 1,5 m. Die Messstrecke wird in einen 4 m langen Einlassteil, der für die Bildung der Grenzschicht benötigt wird, und einen 4 m langen Messteil unterteilt, in dem die Grenzschicht mit einer Höhe von etwa 0,55 m nahezu konstant verläuft. Die Simulation der atmosphärischen Grenzschicht im Windkanal wurde nach einschlägigen Kriterien, siehe auch Meroney 1968, Counihan 1971, Plate 1982, vorgenommen. Das Geschwindigkeitsfeld am Eingang der Messstrecke entspricht einer Oberflächenrauigkeit der Kategorie Vororte/Wälder nach DIN EN 1991-1-4:2010-12. Mit dem logarithmischen Wandgesetz wird die Rauigkeitslänge im Modell zu $z_0 = 0,9$ mm bestimmt. Aus dem Vergleich der Rauigkeitslängen zwischen Modell und Natur kann der Maßstab zu 1:400 bestimmt werden. Die Schubspannungsgeschwindigkeit beträgt im Modell $u^* = 0,34$ m/s und die Wandschubspannung $\tau_0 = 0,15$ N/m².



Abb. 1: Foto eines in den atmosphärischen Grenzschichtwindkanal eingebauten Tals

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei unterschiedlich breite Talmodelle in einen atmosphärischen Grenzschichtwindkanal eingebaut und mit der zuvor beschriebenen, naturähnlich simulierten atmosphärischen, neutral geschichteten Grenzschichtströmung überströmt, siehe Abb. 1. Die Modelle wurden aus Holz gefertigt. Um Waldbewuchs zu simulieren, wurden Modellbäume in die Oberflächen eingesteckt, die eine Höhe von ca. 6 cm Höhe aufwiesen, was in der Natur 24 m entspricht.

Es handelte sich dabei um konische Grundformen, wie sie etwa bei Fichten auftreten, die nicht im Lichtschluss wachsen. Die simulierte Baumdichte entsprach sehr lockerem Waldbewuchs mit ca. 55 Bäumen pro ha. Details zur Simulation von Waldbewuchs für Windkanalstudien finden sich bei Ruck & Adams 1991 sowie Gromke & Ruck 2008.

Abb. 2 zeigt eine Prinzipskizze der Versuchsführung. An den unterschiedlichen WEA-Standorten stromab des Tals wurden die mittleren Windgeschwindigkeitsprofile gemessen. Danach erfolgte eine Aufintegration der Leistungsanteile über den Rotorflächen. Variiert wurde bei den Experimenten der WEA-Abstand zum Tal, Nabenhöhe und Rotordurchmesser.

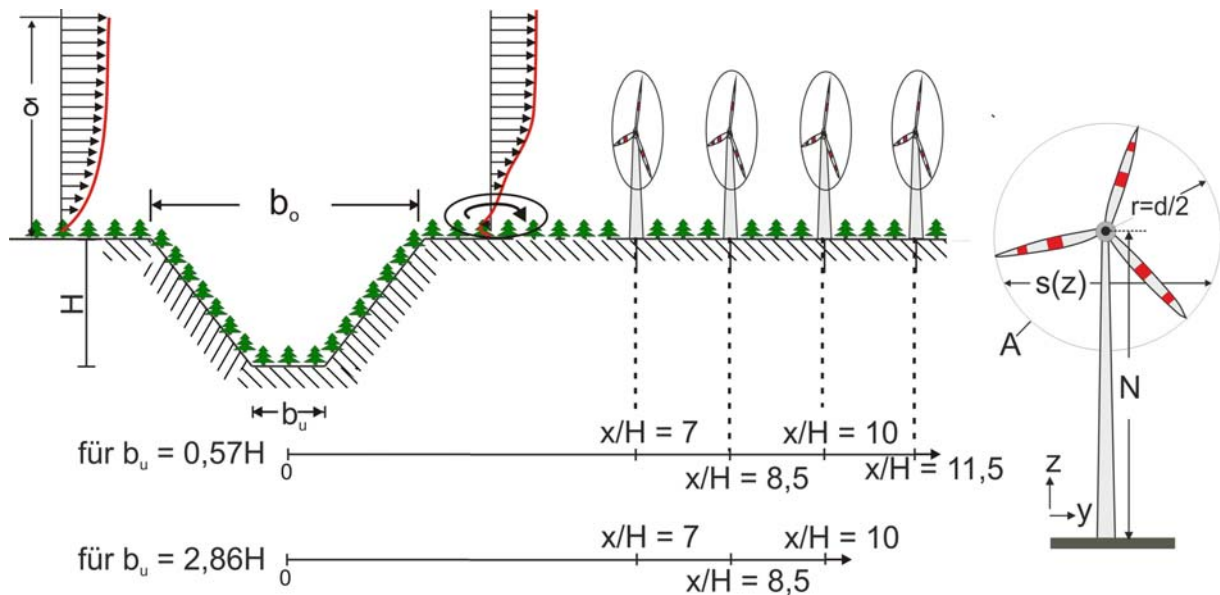


Abb. 2: Prinzipskizze der beiden Talmodelle mit WEA-Standorten; Anströmung von links, Modell 1: $H=17,5$ cm, $b_u = 10$ cm ($0,57 H$), $b_o = 38$ cm, entspricht in der Natur einer Tiefe von 70 m, einer oberen Breite von 152 m und einer unteren Breite von 40 m; Modell 2: $H=17,5$ cm, $b_u = 50$ cm ($2,86 H$), $b_o = 78$ cm; entspricht in der Natur einer Tiefe von 70 m, einer oberen Breite von 312 m und einer unteren Breite von 200 m.

3. Ergebnisse

Zur Ermittlung des Expositionsbeiwerts wurden die erhaltenen Windleistungen auf die Windleistung der gleichen Anlage aber vor dem Tal (oder ohne Tal) bezogen.

Luftleistung vor dem Tal:

$$P_{\text{vor}}(N,r) = \frac{1}{2} \cdot \int_{z_0=(N-r)}^{z_1=(N+r)} \rho \cdot u_{\text{vor}}^3(z) \cdot s(z) \cdot dz$$

Luftleistung nach dem Tal:

$$P_{\text{nach}}(N,r,x) = \frac{1}{2} \cdot \int_{z_0=(N-r)}^{z_1=(N+r)} \rho \cdot u_{\text{nach}}^3(x,z) \cdot s(z) \cdot dz$$

Leistungsbeiwert: $c_{\text{exp}}(N,r,x) = \frac{P_{\text{nach}}(N,r,x)}{P_{\text{vor}}(N,r)}$

Nabenhöhe
Abstand Tal - WEA

Rotordurchmesser

$c_{\text{exp}} < 1$: Verminderung der Leistungsdichte
 $c_{\text{exp}} > 1$: Verbesserung der Leistungsdichte

Der Leistungsbeiwert ist anlagenspezifisch! Es werden typische WEA-Daten zugrunde gelegt.

Für die Berechnungen der Expositionsbeiwerte wurden die in Tab. 1 aufgelisteten Kombinationen von Nabenhöhe und Rotordurchmesser zugrunde gelegt. In Abb. 3 werden die Expositionsbeiwerte für das schmale Tal und für einen Rotordurchmesser von 80 m wiedergegeben. Der Einfluss des Tals zeigt sich deutlich und je nach Position und Höhe der WEA werden Verluste von bis zu knapp 10 % registriert.

| | | D | | | | |
|---|-------|------|------|-------|-------|-------|
| | | 60 m | 80 m | 100 m | 120 m | 140 m |
| N | 60 m | x | | | | |
| | 70 m | x | x | | | |
| | 80 m | x | x | x | | |
| | 90 m | x | x | x | x | |
| | 100 m | x | x | x | x | x |
| | 110 m | x | x | x | x | x |
| | 120 m | x | x | x | x | x |

Tab. 1: Kombinationen von Nabenhöhe N und Rotordurchmesser D

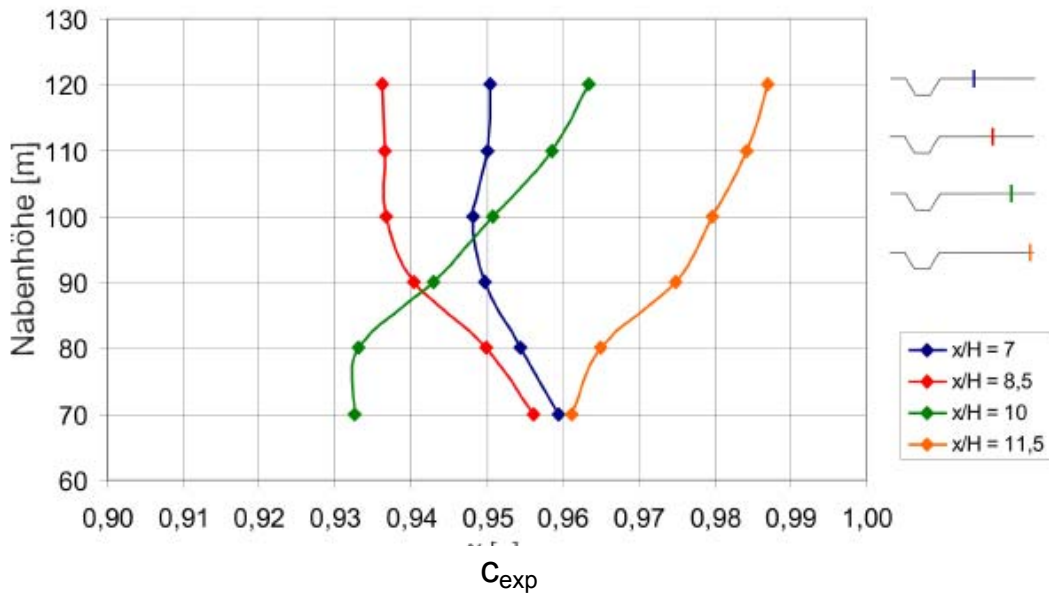


Abb. 3: Expositionsbeiwerte für einen Rotordurchmesser von 80m und variable Nabenhöhe; schmales Tal.

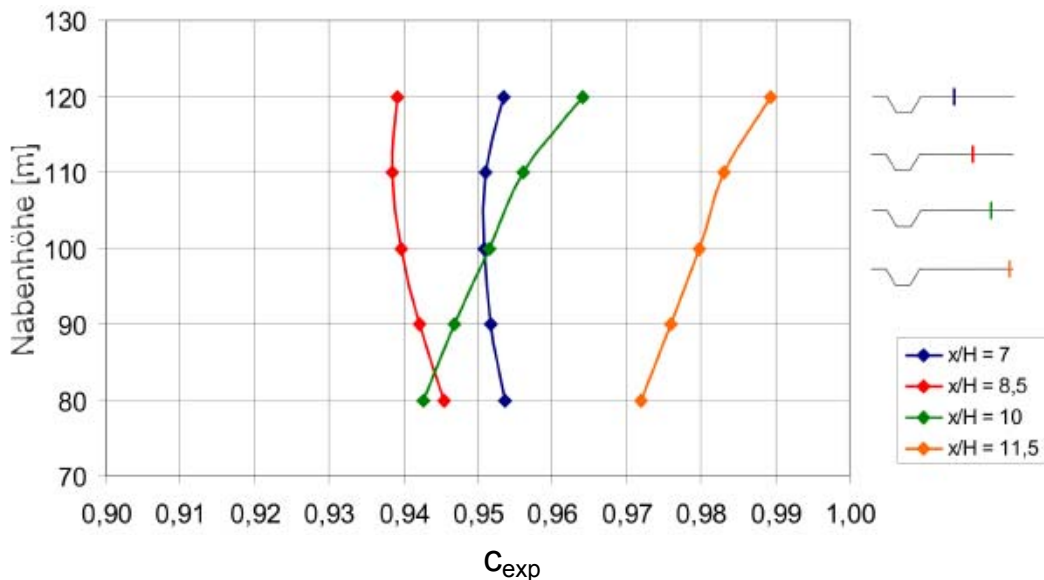


Abb. 4: Expositionsbeiwerte für einen Rotordurchmesser von 100m und variable Nabenhöhe; schmales Tal.

Die Interpretation der Kurven in Abb. 3 ist einfach, denn jede Kurve bezieht sich auf einen festen, angegebenen Abstand von Störtal zur WEA. Die Rotorfläche ist vorgegeben (hier: Durchmesser 80 m). Geht man entlang der Kurve nach oben, so bedeutet dies, dass bei unverändertem Abstand Tal-WEA die Nabe mit Rotor nach oben geschoben wird, also die Nabenhöhe zunimmt. Ein größer werdender Rotor vergleichmäßigt die induzierten Schwankungen im Expositionsbeiwert, wie man aus dem Vergleich von Abb. 3 und 4 (100 m Rotordurchmesser) erkennen kann.

Für einen fest gewählten Rotordurchmesser gibt es viele mögliche Abstände zwischen Störtal und WEA und viele mögliche Nabenhöhen. Man kann deshalb die Kurven aus den Abbildungen 3 und 4 nicht nur für die ausgewählten Horizontalpositionen aus den Messungen erhalten, sondern durch Interpolation des Strömungsfelds auch alle anderen Kurven im gesamten Abstandsvariationsbereich $7 < x/H < 11,5$. Trägt man die c_{exp} -Werte nun farbcodiert in einem Plot von Nabenhöhe über Abstand auf, so entsteht ein Isoplot, in dem Flächen/Punkte gleicher Farbe den gleichem Expositionsbeiwert markieren. Jeder Punkt in der Farbebene entspricht somit einer Nabenhöhe (Ordinatenwert) einer WEA mit vorgegebenem Rotordurchmesser positioniert stromab in einem bestimmten Abstand vom Störtal, siehe Abb. 5-10.

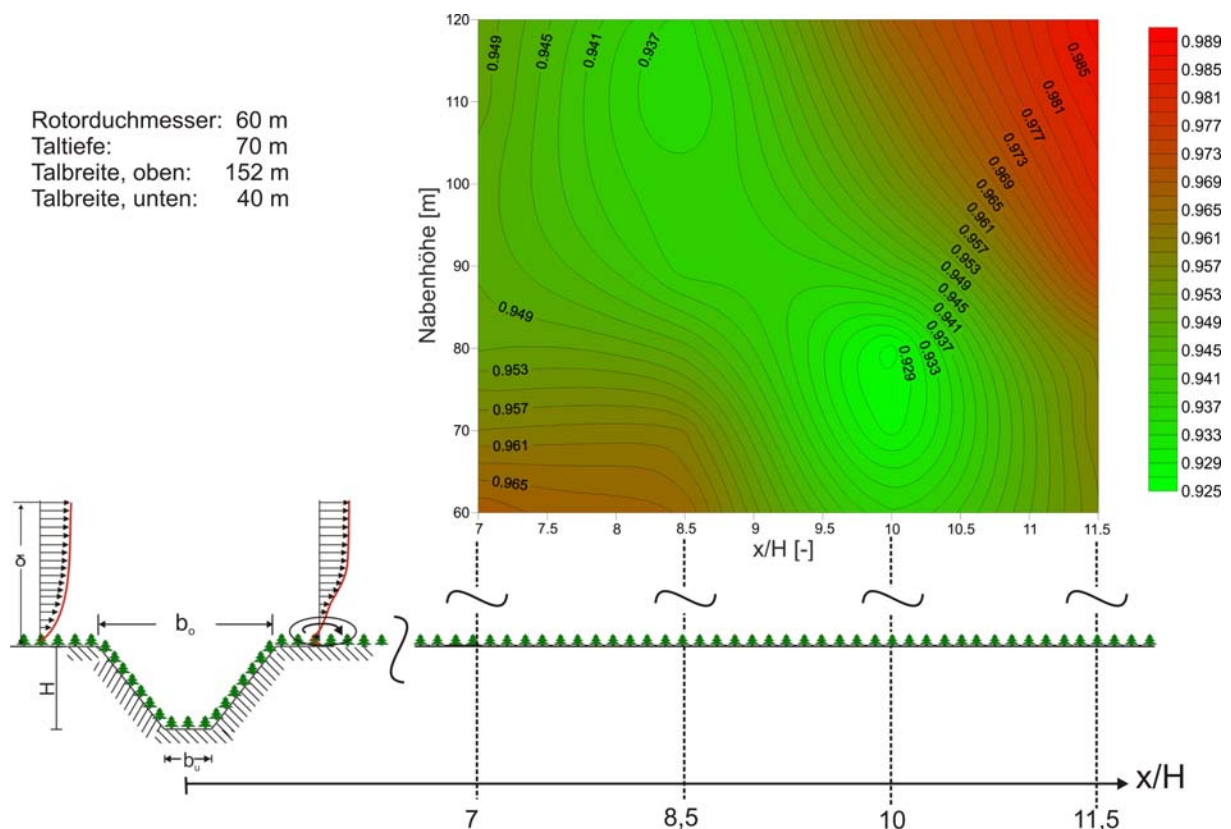


Abb. 5: Expositionsbeiwerte stromab eines Tals für Windenergieanlagen mit festem Rotordurchmesser von 60 m bei variablem Abstand zum Tal und variabler Nabenhöhe; kleines Tal

Mit Hilfe dieser Darstellungen kann nun in der Praxis bestimmt werden, um welchen prozentualen Anteil sich die für die WEA zur Verfügung stehende Leistungsdichte des Windes durch die spezifisch vorliegende Konfiguration aus Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Abstand vom Störtal verändert.

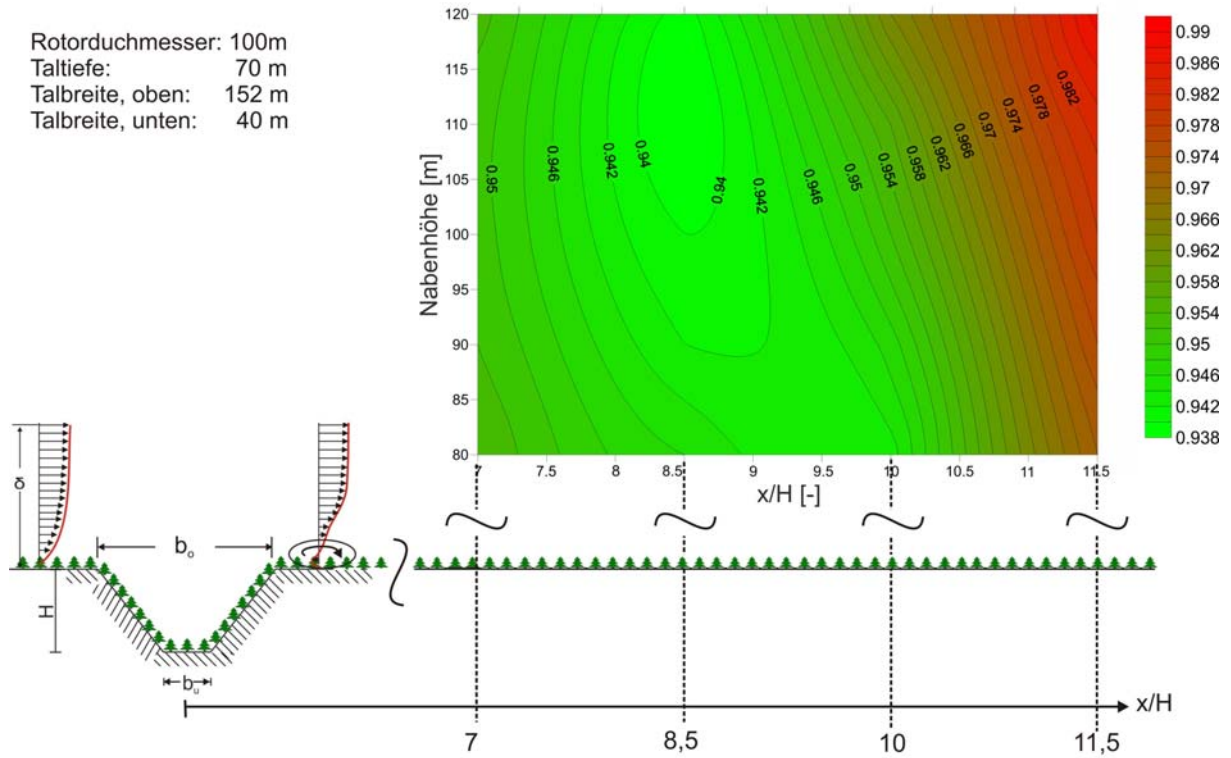


Abb. 6: Expositionsbeiwerte stromab eines Tals für Windenergieanlagen mit festem Rotordurchmesser von 100 m bei variablem Abstand zum Tal und variabler Nabenhöhe; kleines Tal

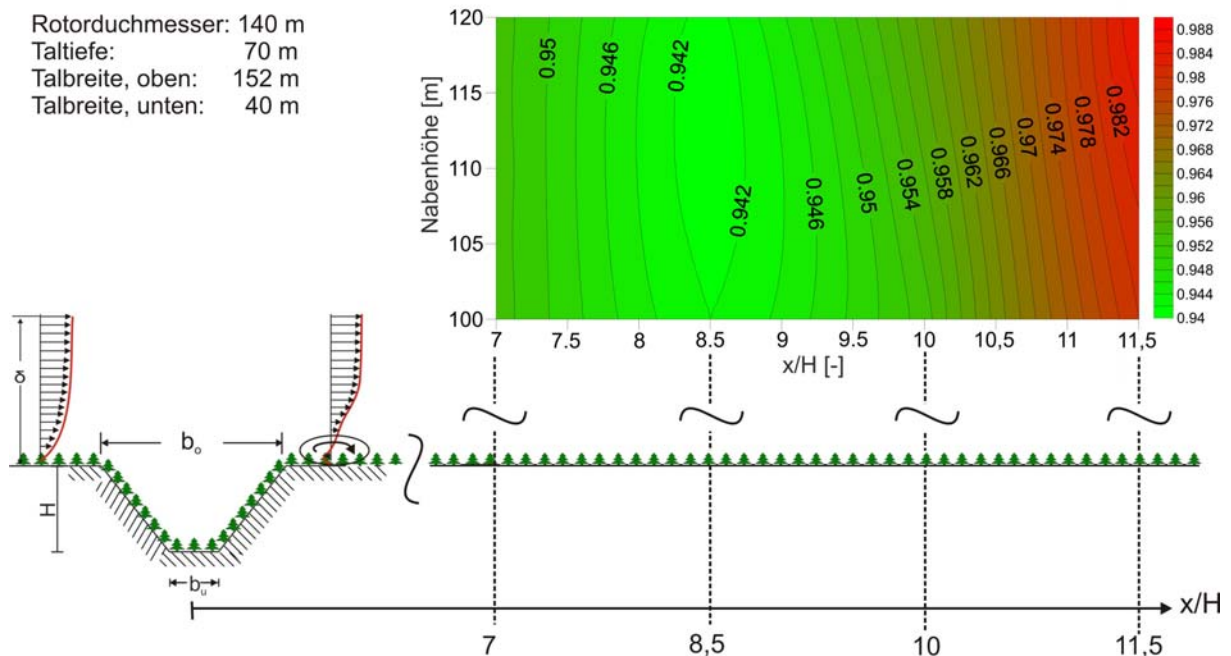


Abb.7: Expositionsbeiwerte stromab eines Tals für Windenergieanlagen mit festem Rotordurchmesser von 140 m bei variablem Abstand zum Tal und variabler Nabenhöhe; kleines Tal

Rotordurchmesser: 60 m
 Taltiefe: 70 m
 Talbreite, oben: 312 m
 Talbreite, unten: 200 m

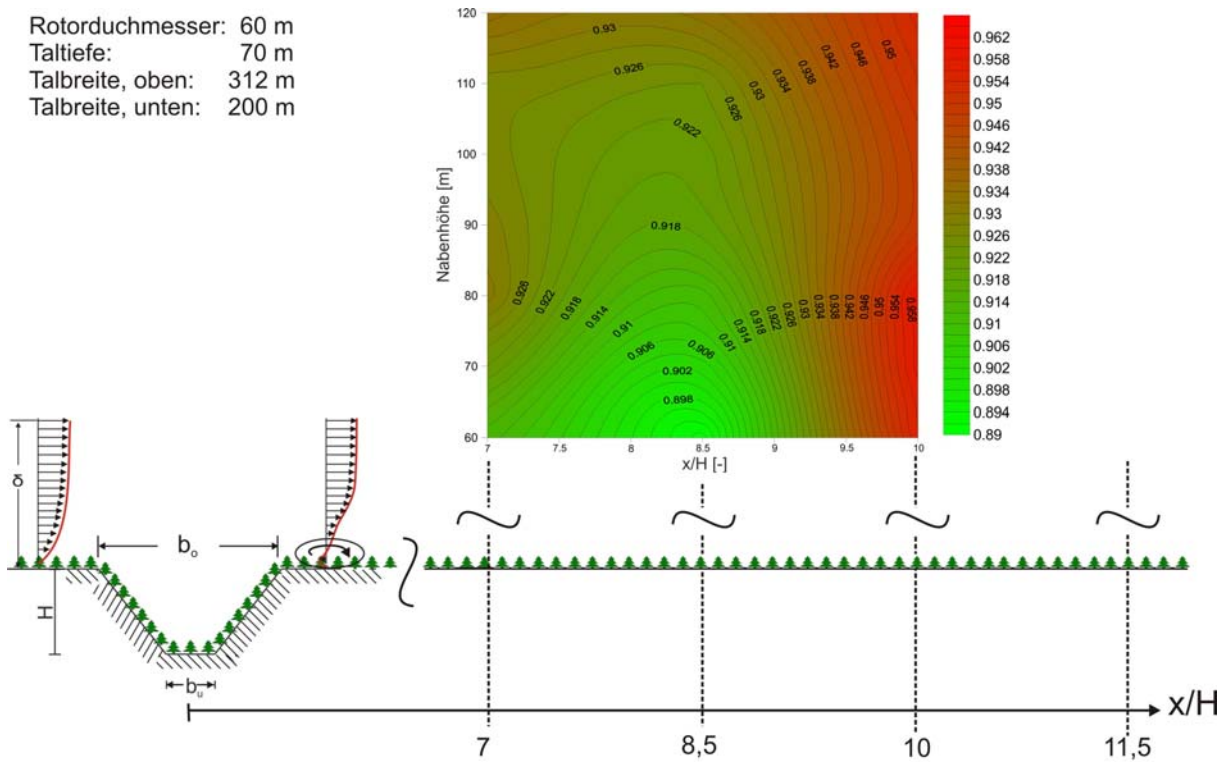


Abb.8: Expositionsbeiwerte stromab eines Tals für Windenergieanlagen mit festem Rotordurchmesser von 60 m bei variablem Abstand zum Tal und variabler Nabhöhe; großes Tal

Rotordurchmesser: 100 m
 Taltiefe: 70 m
 Talbreite, oben: 312 m
 Talbreite, unten: 200 m

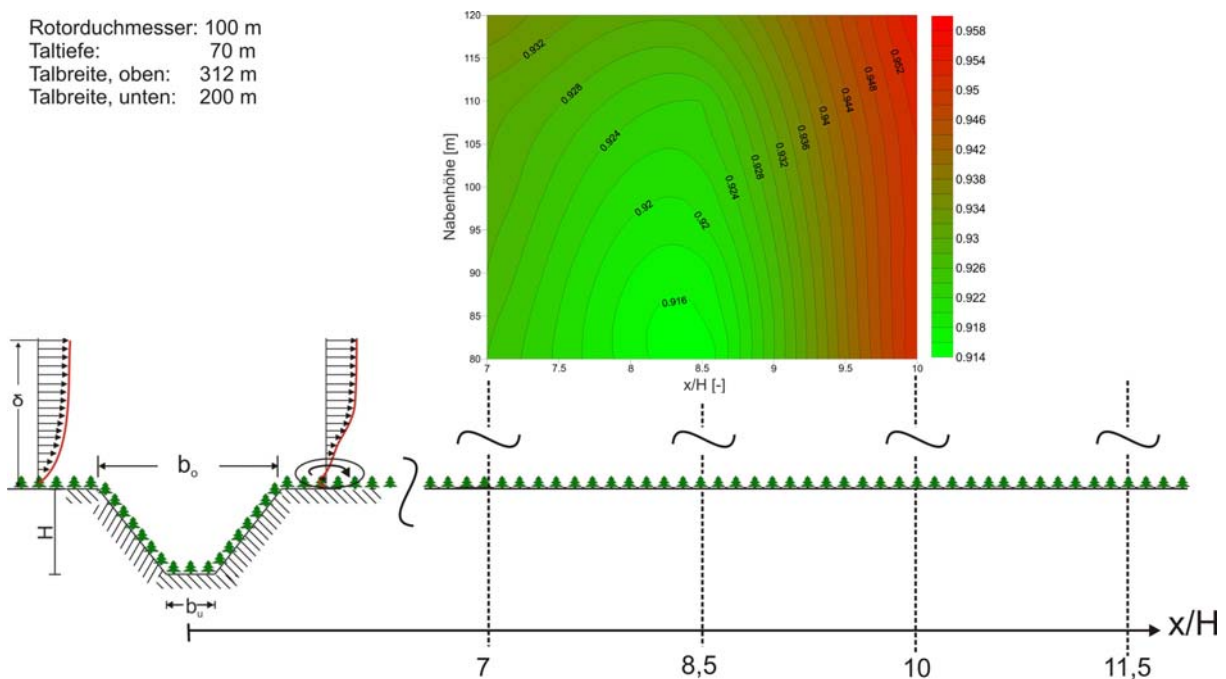


Abb.9: Expositionsbeiwerte stromab eines Tals für Windenergieanlagen mit festem Rotordurchmesser von 100 m bei variablem Abstand zum Tal und variabler Nabhöhe; großes Tal

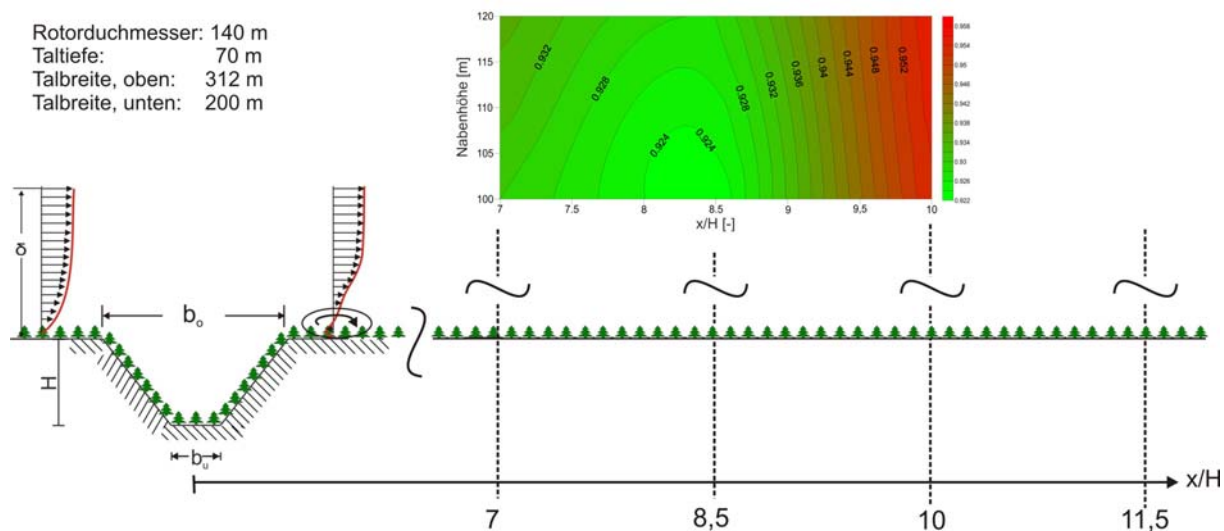


Abb.10: Expositionsbewerte stromab eines Tals für Windenergieanlagen mit festem Rotordurchmesser von 140 m bei variablem Abstand zum Tal und variabler Nabenhöhe; großes Tal

Wie die experimentellen Windkanaluntersuchungen gezeigt haben, nimmt die Leistungsdichte des Windes durch ein oberstrom gelegenes Tal ab. Dabei sind die Leistungsverluste für das untersuchte breite Tal größer als für das kleine. Dies ist auf eine Ablösezone zurückzuführen, die an der hinteren Talkante entsteht, wenn die Rezirkulationszone im Tal sich nicht über die ganze Talbreite erstrecken kann. Besonders signifikante Verluste an Windleistungsdichte entstehen, wenn die Nabenhöhe in der Größenordnung der Taltiefe liegt und die WEA nah an das Tal heranrückt. Im Vergleich zu einem vorgelagerten Störhügel von gleicher Höhe wie die Taltiefe, siehe Ruck et al 2013, fallen die Leistungseinbußen durch ein stromauf befindliches Tal geringer aus. Dennoch ist nicht zu verkennen, dass in Gebieten mit geringen bis mittleren Windgeschwindigkeiten, ein Luftleistungsverlust von 5-10% sehr wohl für die Entscheidung der Errichtung einer WEA aus wirtschaftlichen Gründen entscheidend sein kann.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr.-Ing. Boris Pavlovski für seine Unterstützung bei den LDA-Messungen im Grenzschichtwindkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik.

Literatur

- Ayotte, K.W., 2008:** Computational Modelling for Wind Energy Assessment. J. Wind Eng. Ind. Aerod., 96, pp. 1571–1590.
- Beniston, D., R., J.A., H., 1989:** A combined numerical and wind tunnel study of ventilation and air pollution episodes in a rural valley of Switzerland. Boundary-Layer Meteorology, 48(1-2):129–156.
- Botta, G., Castagna, R., Borghetti, M., Mantegna, D., 1992:** Wind analysis on complex terrain – The case of Acqua Spruzza, Jour. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 39, pp. 357-66.
- Bowen, A.J., Mortensen, N.G., 2004:** WAsP prediction errors due to site orography, Report Risø-R-995(EN), Risø National Laboratory Roskilde Denmark, 2004, ISSN 0106-2840, ISBN 87-550-2320-7
- Bradley, E., 1980:** An experimental study of profiles of wind speed, shearing stress and turbulence at the crest of a large hill. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 106:101–123.
- Bullard, J., Wiggs, G., Nash, D., 2000:** Experimental study of wind directional variability in the vicinity of a model valley. Geomorphology, 35:127–143.
- Carpenter, P., Locke, N., 1999:** Investigation of wind speeds over multiple two-dimensional hills, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 83, 109-120

- Counihan, J., 1971:** Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements, *Atmospheric Environment*, 5 (8), pp. 637–642.
- Counihan, J., 1974:** Flow over concatenated sinusoidal hills, RD/L/N 57/74, Central Electricity Research Laboratories, Leatherhead, England
- DIN EN 1991-1-4:2010-12,** Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dobosy, R. J., 1989:** Modeling bulk atmospheric drainage flow in a valley. *J. Appl. Meteor.*, 28:936–947
- Garvey, B., 2004:** Measurement of flows over isolated valleys, *Boundary-Layer Meteorology*, 117:417–446
- Gharib, M., Roshko, A., 1987:** The effect of flow oscillations on cavity drag. *Journal of Fluid Mechanics*, 177:501–530.
- Goossens, D., Offer, Z. Y., 1997:** Aeolian dust erosion on different types of hills in a rocky desert: wind tunnel simulations and field measurements. *Journal of Arid Environments*, 37:209 – 229
- Gravdahl AR, Harstveit K., 2000:** WindSim – Flow simulations in complex terrain, Assessment of wind resources along the Norwegian coast, Deutsche Windenergie Konferenz DEWEK
- Gromke, C., Ruck, B., 2008:** "Aerodynamic modeling of trees for small scale wind tunnel studies", *Forestry, Oxford Journal*, Volume 81, Issue 3, pp. 243-258
- Hsu, S.-T., Kennedy, J. F., 1971:** Turbulent flow in wavy pipes. *Journal of Fluid Mechanics*, 47:481–502.
- Jackson, P.S., Hunt, J.C.R., 1975:** Turbulent wind over a low hill, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 101,1975, p. 929–955
- Keogh, D., Addison, P., 1996:** Coherent flow structures in open-channel slot flow. *Coherent Flow Structur*, 14:267–280.
- Louka, P., Belcher, S., Harrison, R., 2000:** Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft. *Atmospheric Environment*, 34: 2613 – 2621.
- Mason, P., 1986:** Flow over the summit of an isolated hill. *Boundary-Layer Meteorology*, 37:385–405
- Mason, P. J., 1987:** Diurnal variations in flow over a succession of ridges and valleys. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 113(478):1117–1140
- Meroney, R. N., 1968:** Characteristics of Wind and Turbulence in and above Model Forests, *J. Appl. Meteorol.*, 7, pp. 780-788
- Mortensen, N.G., Landberg, L., Troen, I., Petersen, E.L., 1993:** Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP). Vol. 2: User's Guide, Risø-I-666(v.2) (EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark
- Plate, E.J., 1982:** Wind tunnel modelling of wind effects in engineering, *Engineering Meteorology* (edited by Plate E.J.), Elsevier, pp. 573–640.
- Ruck, B., Adams, E., 1991:** Fluid mechanical aspects of the pollutant transport to coniferous trees. In: *Boundary-Layer Meteorology*. 56 (1), S. 163–195.
- Ruck, B., Boes, R., Gruber, M., 2013:** "Loss of wind power for wind turbines due to an upstream hill", *Int. Journal of Energy*, Issue 4, Vol. 7, ISSN: 1998-4316
- Schmidt, T., Mockett, C., Thiele, F., 2013:** Minimization and Quantification of Errors and Uncertainties in RANS Modeling, *Management and Minimisation of Uncertainties and Errors in Numerical Aerodynamics, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Volume 122, pp. 77-100
- Sierputowski, P., Ostrowski, J., Cenedese, A., 1995:** Experimental study of wind flow over the model of a valley. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57:127 – 136.
- Snyder, W. H., Khurshudyan, L. H., Nekrasov, I. V., Jr, R. E. L., Thompson, R. S., 1991:** Flow and dispersion of pollutants within two-dimensional valleys. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 25(7):1347 – 1375.
- Sumner, J., Watters, C.S., Masson, C., 2010:** CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel, *Energies*, 3, pp. 989-1013
- Troen, I. and Petersen, E.L., 1989:** European Wind Atlas, Published for the Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, by Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, ISBN 87-550-1482-8
- Verma, S. B., Cermak, J. E., 1974:** Wind-tunnel investigation of mass transfer from soil corrugations. *J. Appl. Meteor.*, 13(5):578–587
- Walmsley, J.L., Troen, I., Lalas, D.P., Mason, P.J., 1990:** Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full- scale observations. *Boundary-Layer Meteorology* 52, pp. 259-81.