

Instationarität des Strömungs- und Druckfeldes bei der Pyramidenumströmung

M. Ikhwan & B. Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik
Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH),
Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Beitrag präsentiert Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen über das Strömungs- und Druckfeld um scharfkantige, pyramidenförmige Bauformen mit quadratischer Grundfläche. Die Strömungsgeschwindigkeiten um die pyramidenförmigen Strukturen wurden mit Hilfe eines 2D-Laser-Doppler-Anemometers (LDA) gemessen. Die Druckverteilungen auf den Pyramidenoberflächen wurden mittels der gebräuchlichen Druckaufnahmetechnik („taps“) erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass der Pyramidenbasiswinkel und die Windrichtungen die wesentlichen Parameter sind, welche die Strömungs- und Druckcharakteristika um pyramidenförmige Strukturen bestimmen. Zufallsverteilte Schwankungen (Instationarität der Strömung) liefern bekanntlich die Belastungsspitzen auf Bauwerke, weswegen ihnen eine besondere Bedeutung zukommt

1. Einleitung

Vom aerodynamischen Gesichtspunkt hat ein pyramidenförmiges Gebäude seine eigene interessante Charakteristik [1,3,6,7]. Trotz dieser Charakteristik existieren nur sehr wenige Arbeiten in der Literatur zur Problematik der Pyramidenumströmung. Demgegenüber existiert eine Vielzahl von Studien über rechteckige Gebäude, siehe z.B. [4], allerdings können deren Ergebnisse nicht einfach auf pyramidenförmige Bauwerke übertragen werden. Darüber hinaus existieren für pyramidenförmige Bauwerke weder in den nationalen noch in den internationalen Normenwerken einschlägige Vorschriften.

Ruck und Roth [6, 7] führten 1997 experimentelle Untersuchungen an Pyramiden durch. Sie beschrieben grundlegende Phänomene des Strömungs- und Druckfeldes um pyramidenförmige Strukturen. Das Strömungsverhalten auf der Leeseite einer Pyramide mit quadratischer Grundfläche zeigt, dass sich die zeitgemittelten Strömungsstrukturen signifikant von denen von Rechteckbauwerken unterscheiden. Hieraus folgt zwangsläufig, dass auch die Windbelastung der Pyramiden sich aufgrund unterschiedlicher Außendruckverhältnisse unterscheidet. Abuomar & Martinuzzi [1] untersuchten steile Pyramiden bei unterschiedlichen Basiswinkeln ($\xi=45^\circ$, 60° und 67.5°). Die Ergebnisse zeigten erstaunlicherweise, dass das Strömungsfeld und die Druckmerkmale nicht signifikant vom Basiswinkel der Pyramide abhängen. Andererseits wurde ein völlig anderes Verhalten für flache Pyramiden gefunden [3], bei denen der Basiswinkel das Ablöse- und Wiederanlegegebiet stark beeinflusst. Offensichtlich besteht also ein phänomenologischer Unterschied im Strömungs- und Druckfeld zwischen steilen und flachen pyramidenförmigen Strukturen.

In der hier rapportierten Studie werden die experimentellen Ergebnisse von vier weiteren Pyramiden (Basiswinkel 20° , 30° , 45° und 70°) präsentiert und mit Ergebnissen aus [6,7] verglichen. Es wird gezeigt, dass sich die Umströmung von flachen und steilen Pyramiden sehr stark unterscheidet.

2. Experimentelle Technik

Die experimentellen Untersuchungen wurden im geschlossenen 29 m langen Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydromechanik der Universität Karlsruhe durchgeführt. Vier unterschiedliche Pyramidenmodelle wurden untersucht, mit verschiedenen Basiswinkeln (20° , 30° , 45° und 70°) und jeweils 200×200 mm rechteckiger Basislänge (l). Die kleinste Pyramide, Pyramide P20, besitzt eine Höhe von 36.40 mm und die höchste, Pyramide P70, eine Höhe von 274.75 mm.

Der Windkanal weist einen achteckigen Querschnitt (max. 1,5 m Breite) auf. Die Grenzschichthöhe in der Messstrecke beträgt 500 mm. Durch den kombinierten Einbau von strömungsprofilformenden Strukturen (Wirbelgeneratoren und einer 2600 mm langen Rauigkeitstrecke) lässt sich eine naturähnliche atmosphärische Grenzschicht im Windkanal simulieren (Abb.1(a)). Die vertikale Verteilung der mittleren horizontalen Geschwindigkeit in der Messstrecke kann mit dem Potenzgesetz $u(z) / u_{\text{ref}} = (z / z_{\text{ref}})^\alpha$ und einem Profilexponenten $\alpha = 0.26$ sehr gut angenähert werden (Abb.1(b)). Aus dem logarithmischen Ansatz bestimmt sich die Rauheitshöhe z_0 im Modell zu 2.84 mm; dies entspricht bei einem Modellmaßstab 1:200 in der Natur $z_0 = 0.57$ m. Entsprechend EUROCODE 1: ENV 1991-2-4 [2] kann diese Rauheitslänge zwischen Vorstadt oder Industriegebiet ($z_0 = 0.3$ m) und Stadtzentrum ($z_0 = 1$ m) eingeordnet werden.

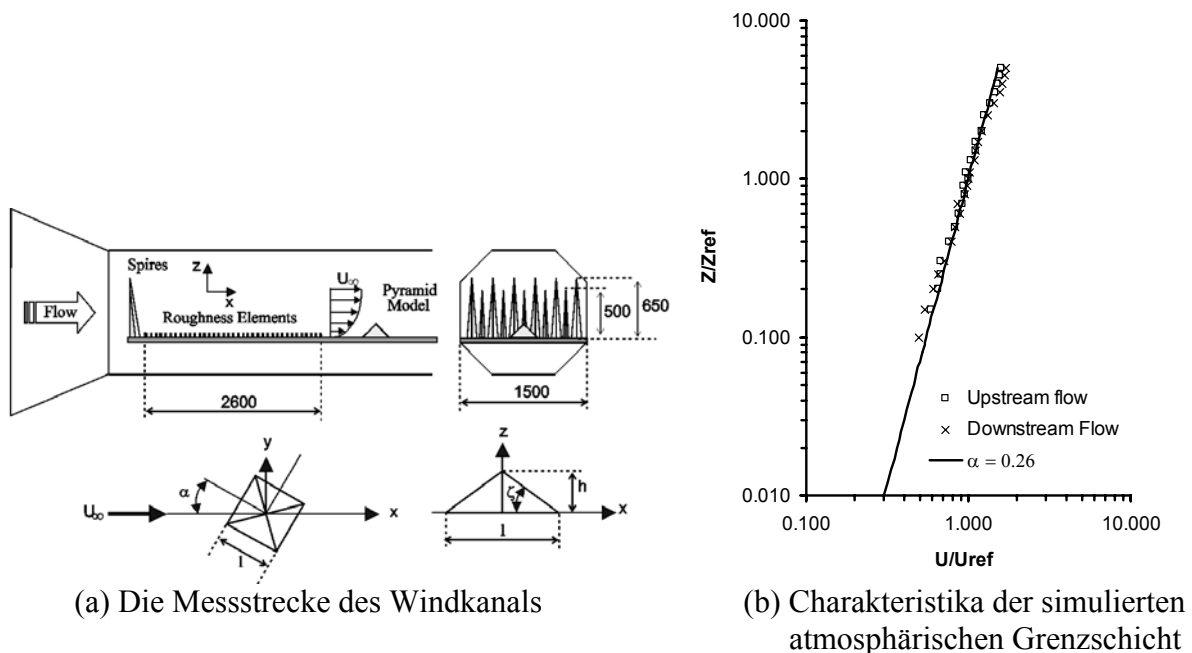


Abbildung 1. Atmosphärische Grenzschichteinstellung

Zwei unterschiedliche experimentelle Messsysteme, ein Strömungsmesssystem und ein Druckmesssystem, wurden im Windkanal eingesetzt. Das Strömungsfeld um die Pyramiden wurde mit einem 2-D Laser-Doppler-Anemometer (LDA) vermessen. Das LDA-System arbeitet in Vorwärtslichtstreuung und verwendet blaues (488.0 nm) und grünes (514.5 nm) Laserlicht eines 4 Watt Argon-Ion Lasers. Die Streuteilchen werden mit einem Nebelgenerator und dem Nebelfluid 1,2-Propandiol (Durchmesser 1-2 μm) generiert. Die Streulichtsignale wurden mit einem Photomultiplier detektiert und mit zwei Signalprozessoren TSI - IFA 550 verarbeitet und gefiltert (300 kHz bis 1 MHz.)

Die Druckverteilungen (c_p -Werte) auf den Pyramidenoberflächen wurden mittels der gebräuchlichen Druckaufnahmetechnik („taps“) gemessen. Druckbohrungen mit 1.5 mm Durchmesser wurden systematisch auf einer Hälfte einer Pyramidenoberfläche verteilt. Der maximale Abstand zwischen Pyramidenkante und den Druckbohrungen betrug 6.5 mm, damit konnte eine gute Erfassung der Druckbeiwerte an den Rändern gewährleistet werden. Die Pyramiden P20, P30, P45 und P70 wurden je mit 46, 48, 57 und 57 Druckbohrungen versehen.

3. Strömungscharakteristika

Die Strömungsfelder wurden bei einer Windrichtung $\gamma=0^\circ$ vermessen (normal zur Vorderseite). Die Anströmung wurde durch Reynoldszahlen von 12.000 bis 90.000 charakterisiert, basierend auf der Pyramidenhöhe (h) und eine freie Anströmgeschwindigkeit $U_0=5$ m/s. Die Strömungsfelder wurden von $1 \times l$ (l : Basislänge) stromauf bis $2 \times l$ stromab der Pyramide und $1.5 \times h_{70}$ (die Höhe der Pyramide P70) über der Pyramide ausgemessen. Die Strömungscharakteristika werden im Folgenden in parallelen Flächen mit einem Abstand von $1/8 \times l$ in y -Richtung präsentiert.

Abbildung 2 zeigt die horizontalen Geschwindigkeitsprofile in der Mittenebene der Pyramiden ($y=0$). Auf den ersten Blick scheint es, dass es bei der Pyramide P20 ($h/l = 0.1820$) keine bedeutenden Änderungen im Profil gibt, jedoch wie in einer besseren Auflösung des Plots zu erkennen ist, gibt es erhebliche Veränderungen im Strömungsfeld auf der Leeseite der Pyramide.

Deutlichere Veränderungen werden auch beobachtet, wenn der Basiswinkel auf 30° zunimmt. Die mittleren horizontalen Geschwindigkeiten unmittelbar nach der Pyramide verringern sich und negative Werte werden im nahen Lee des Pyramidenrandes identifiziert. Diese Veränderungen treten bis zu einem Abstand von 200 mm hinter der Pyramide auf, d.h. bis zu einem x/l -Verhältnis = 1.0.

Bei der Pyramide P45 erkennt man eine Rückströmung im Nachlauf der Pyramide. Die Nullgeschwindigkeiten werden bei $2/3 h_{45}$ beobachtet. Der Abstand der veränderten Profile erhöht sich auf 400 mm bei $x/l = 2.0$. Diese Trends lassen sich vermutlich auch bei Pyramiden mit Basiswinkeln zwischen 45° und 70° erkennen. Die mittleren horizontalen Geschwindigkeiten verringern sich erheblich unmittelbar hinter der Pyramide P70. Die Nullgeschwindigkeit im nahen Lee des Pyramidenrandes wird bei $2/3 h_{70}$ gefunden. In einem Abstand von 500 mm ($x/l = 2.5$) werden die mittleren horizontalen Geschwindigkeitsprofile noch durch die Pyramide beeinflusst.

An der stromauf gelegenen Seite der Pyramiden beginnen die mittleren horizontalen Profiländerungen in einem Abstand von 200 mm zu entstehen ($x/l=-1$). Bei der flachen Pyramide lassen sich nur minimale Abweichungen erkennen. Für die steile Pyramide (d.h. Pyramide P70) können die Profiländerungen eindeutig beobachtet werden. Die Geschwindigkeiten nehmen in der Nähe von der Pyramidenoberfläche ab. Negative Werte werden in Bodennähe des stromauf gelegenen Pyramidenrandes identifiziert, und der Nullwert wird in der Höhe von 0.15 beobachtet (normalisiert mit h_{70}).

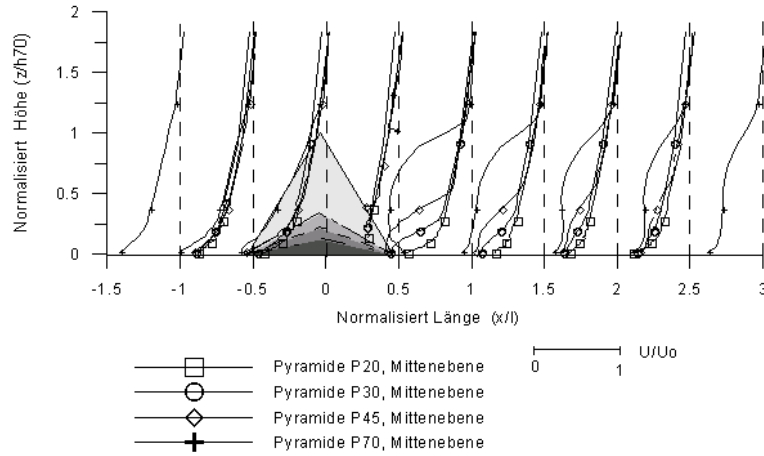


Abbildung 2. Mittlere Geschwindigkeitsprofile in der Mittenebene, $U_0 = 5 \text{ m/s}$

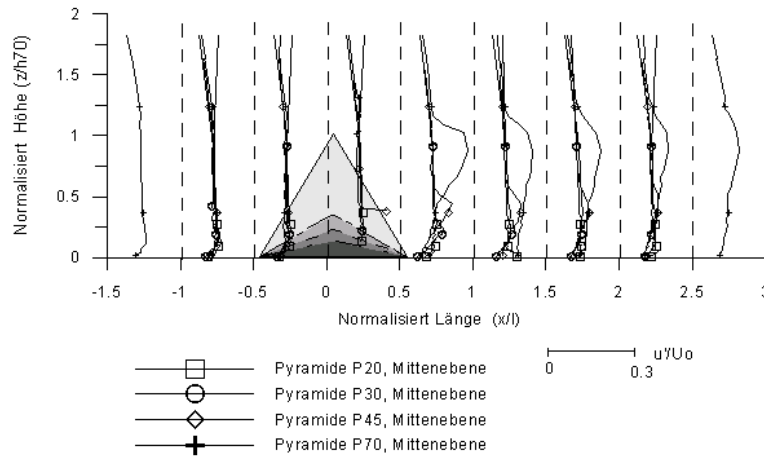


Abbildung 3. Profile der horizontalen Turbulenzintensität in der Mittenebene, $U_0 = 5 \text{ m/s}$

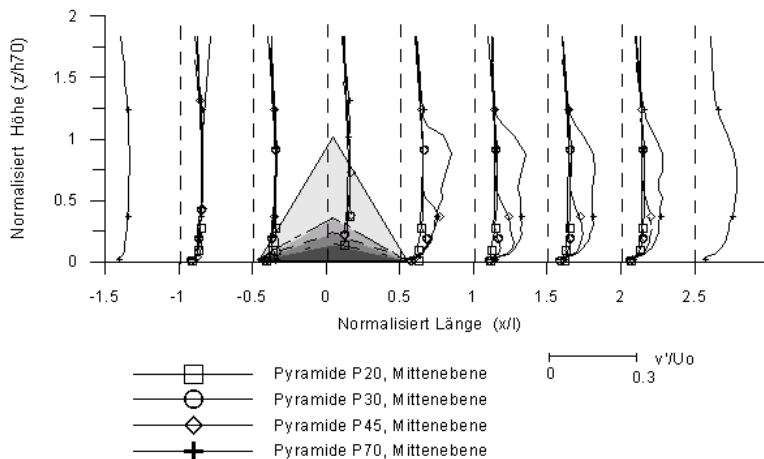


Abbildung 4. Profile der vertikalen Turbulenzintensität in der Mittenebene, $U_0 = 5 \text{ m/s}$

Die horizontalen Profile der Turbulenzintensität in der Mittenebene der Pyramiden werden in Abbildung 3 dargestellt. Sie nehmen im stationären Zustand (Zuströmung) Werte zwischen 5 % bis 10 % an. Deutliche Veränderungen des stationären Zustandes erscheinen erstmals bei

$x/l = -0.5$. Die Turbulenzintensität wird größer besonders für Pyramide P70, bei der die Turbulenzintensität in der Nähe des Pyramidenbodens um 27 % zunimmt. Stationäre Verhältnisse werden für flache Pyramiden (Pyramide P20 und P30) schon wieder bei einer Entfernung von $x/l = 1$ stromabwärts erreicht und für Pyramide P45 bei $x/l = 1.5$ erreicht. Für Pyramide P70 beträgt die maximale Turbulenzintensität 32%. Dieser Wert wird stromabwärts nahe der Spitze der Pyramide in einer Entfernung von $x/l=0.15$ beobachtet. Bis zu einer Entfernung von $x/l=2.5$ stromabwärts von Pyramide P70 schwankt die Turbulenzintensität zwischen 10 % und 25 %.

Abbildung 4 zeigt die Profile der vertikalen Turbulenzintensität in der Mittenebene. Die Profile sind im Verlauf ähnlich wie die horizontale Turbulenzintensität. Die Werte sind jedoch ungefähr 5% niedriger als die in der horizontalen Richtung. Dies kann eindeutiger in Abbildung 5 beobachtet werden, wo die horizontale und vertikale Turbulenzintensität in der Mittenebene bei $x/l = 0.5$ für Pyramide P20 und P70 dargestellt wird. Es ist interessant zu beobachten, dass die maximalen Werte der Turbulenzintensität an der Spitze der Pyramide vorkommen. Für steile Pyramide nimmt die Turbulenzintensität wesentlich zu.

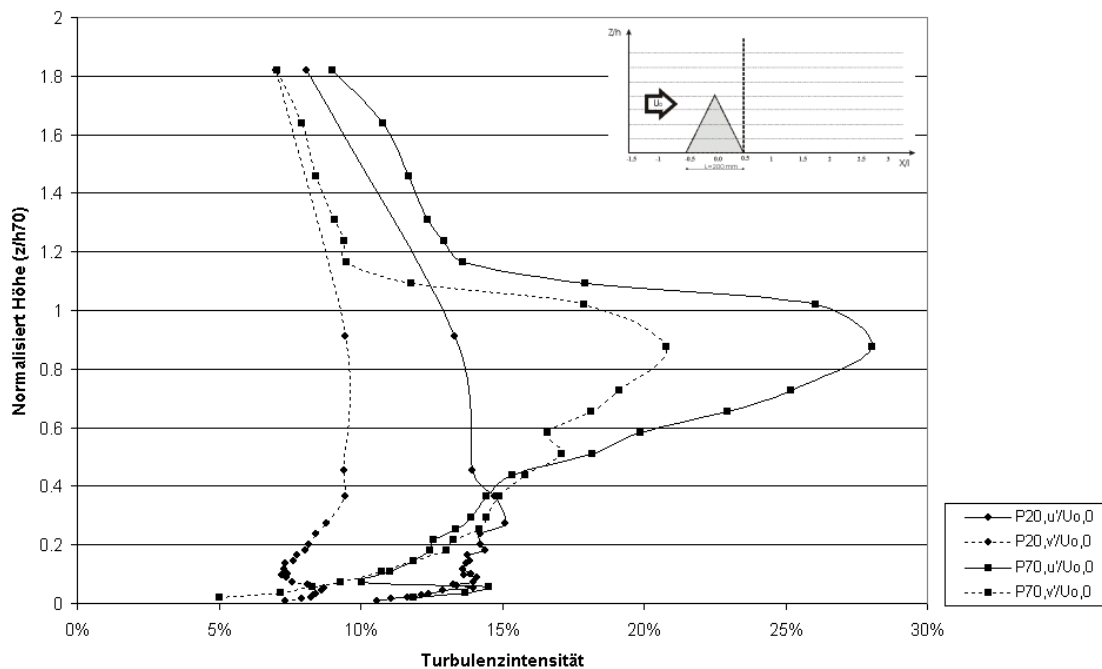


Abbildung 5. Horizontale und vertikale Turbulenzintensität in der Mittenebene auf der Lee-Seite ($x/l = 0.5$) von Pyramide P20 und P70

Obige Diskussion zeigt, dass der Basiswinkel der Pyramide die Schwankungen der Strömung stromauf und stromab der Pyramide wesentlich beeinflusst. Er beeinflusst nicht nur die Absolutwerte, sondern wirkt sich auch auf die Entfernung der instationären Zone aus. Ein Beispiel wird für Pyramide P30 und P70 in Abbildung 6 gegeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass für P30 der stationäre Zustand schon bei $x/l = 1.0$ erreicht ist, während für P70 bei $x/l = 2.5$ der Zustand immer noch instationär verbleibt.

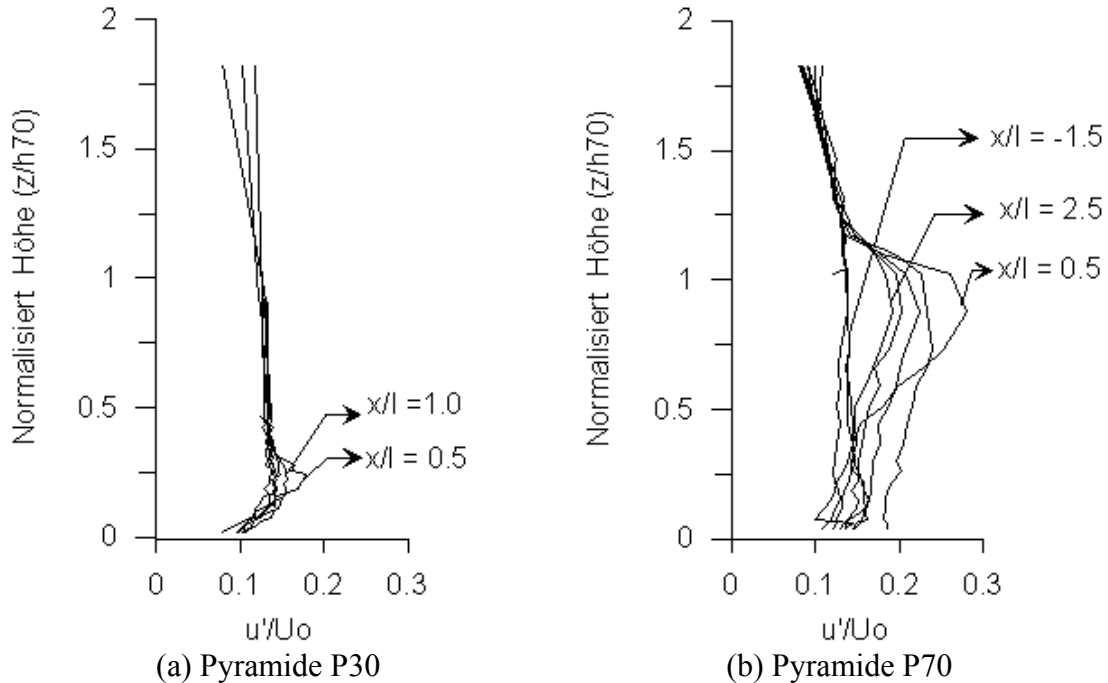


Abbildung 6. Horizontale Turbulenzintensitäten in der Mittenebene der Pyramide P30 und P70, $U_0 = 5\text{m/s}$

4. Druckverteilungen

Die Druckmessungen an den Pyramidenoberflächen wurden bei einer Anströmgeschwindigkeit von 12 m/s vorgenommen, um messbare und zuverlässige Druckunterschiede zu erhalten. Dabei wurden die Anströmungsrichtungen (γ) bei jeder Pyramide von 0° bis 180° in 15° Schritten variiert. Dimensionslose Druckkoeffizienten (c_p -Werte) wurden durch Division der gemessenen unterschiedlichen Effektivdrücke durch den dynamischen Druck der Strömung in Referenzhöhe (in der ungestörten Anströmung) berechnet, $z_{\text{ref}} = 275.4\text{ mm}$.

In Abbildung 7 wird die Verteilung der Außendruckbeiwerte auf den Pyramidenoberflächen bei verschiedenen Basiswinkeln wiedergegeben. Eine Vergrößerung des Basiswinkels der Pyramide führt zu einer Zunahme des maximalen Druckes auf der Luvseite und zu einer Abnahme des Druckes auf der stromabwärts gerichteten Pyramidenoberfläche. Der Basiswinkel bestimmt somit in starkem Maße die resultierende horizontale Windlast eines pyramidenförmigen Bauwerks.

Des weiteren verändert die Variation des Basiswinkels die Druckverteilung nicht nur vom Absolutbetrag her, sondern es wird auch die Flächenverteilung d.h. die Position von Maxima und Minima der c_p -Werte auf den Pyramidenoberflächen verändert. Für die Pyramide P20 wurden maximale c_p -Werte auf der Frontseite an der Basis der Pyramide gefunden. Maximale Sogwerte (minimale c_p -Werte) finden sich hingegen nahe der Vorderkante auf der linken und rechten Seitenfläche der Pyramide. Wie in Abb. 7.b beobachtet werden kann, wird die Position des maximalen Druckes und Sogs verschoben, wenn der Basiswinkel der Pyramide zunimmt. Der maximale Druck verschiebt sich nach oben zur Mitte der Vorderseite der Pyramide, während der Ort des maximalen Sogs in den Seitenflächen sich nach unten in Richtung zur Basislinie bewegt. Der maximale Überdruck c_p -Wert wird für Pyramide P45 (Abb. 7.c) bei 28% der totalen Pyramidenhöhe mit einem maximalen Wert von 0.30 vorgefunden.

Für die steile Pyramide P70 wird der maximale c_p -Werte bei einer Höhe von 55% der totalen Pyramidehöhe mit einem Wert von 0.76 gemessen, wohingegen der maximale Sog sich wiederum nahe der Basislinien der seitlichen Oberflächen (Abb. 7.d) befindet. Die Ergebnisse reihen sich gut ein in frühere Studien [1, 6, 7], wobei bestätigt wird, dass für steile Pyramiden die Änderungen im Druckfeld durch die Basiswinkelvariation relativ klein ausfällt.

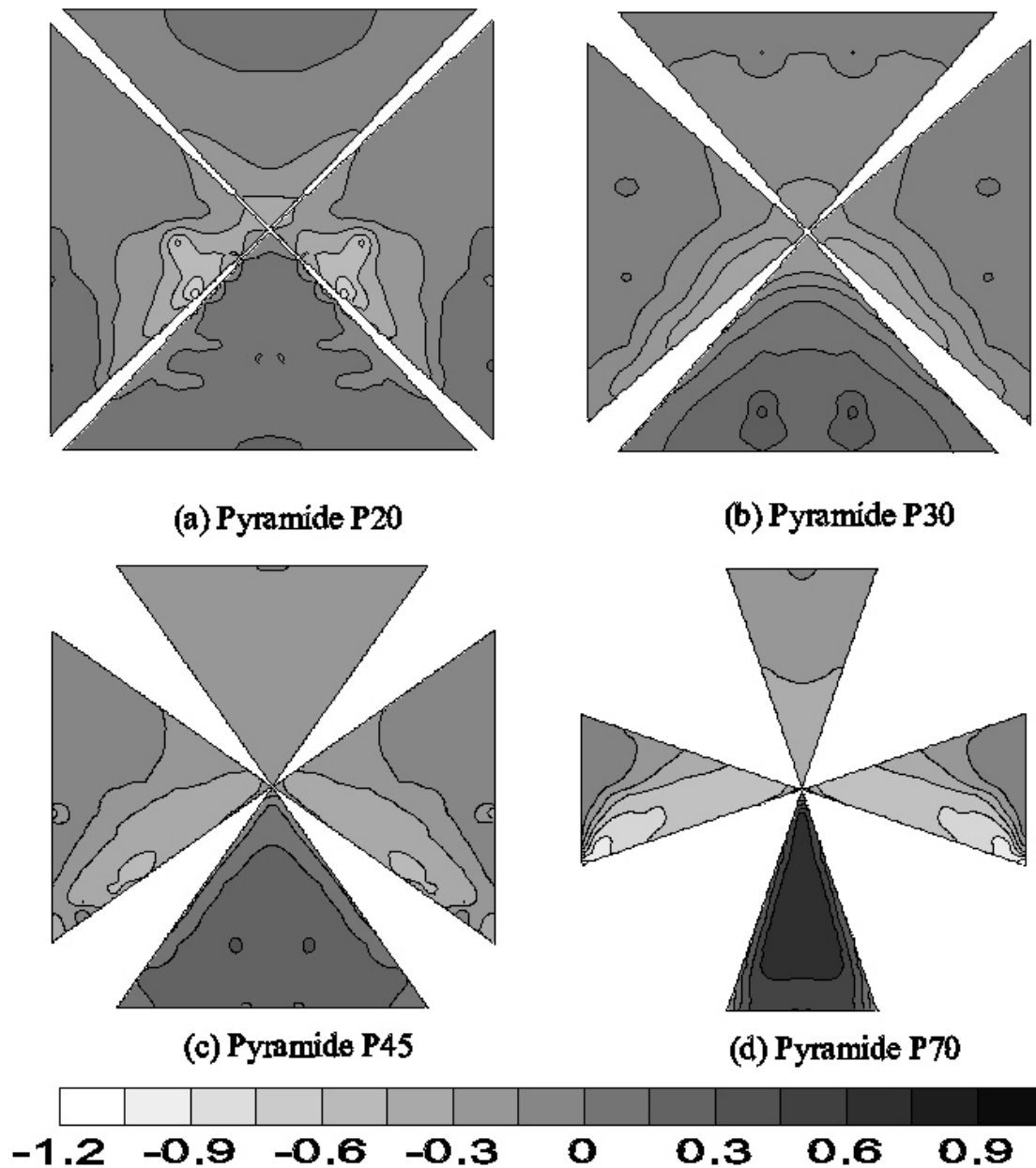


Abbildung 7. Verteilung des Druckbeiwerts (c_p -Werte) auf den Pyramideoberflächen ($\gamma = 0^\circ$, $U_0 = 12 \text{ m/s}$)

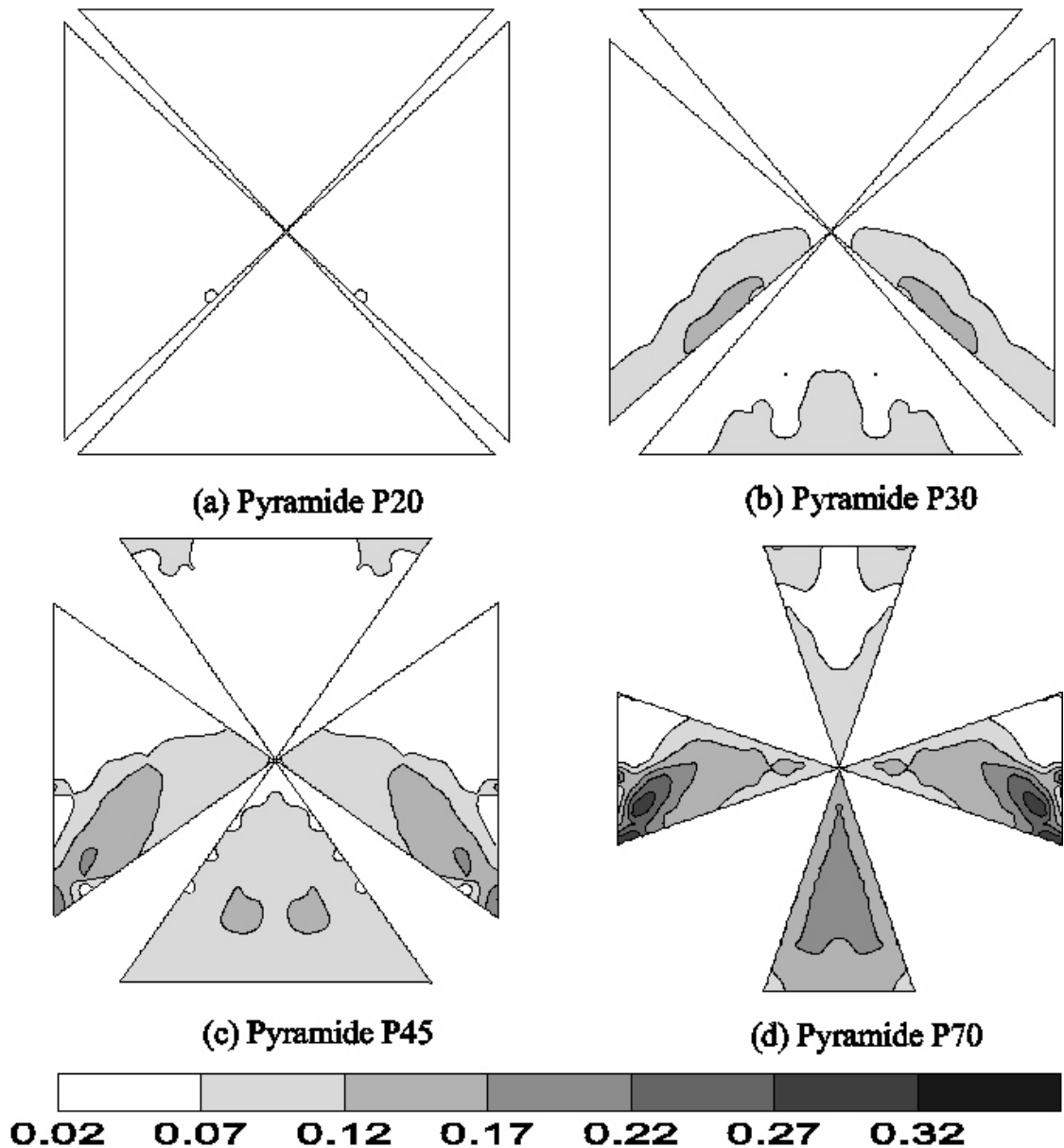


Abbildung 8. Schwankungen des Druckbeiwertes auf den Pyramidenoberflächen
($\gamma = 0^\circ$, $U_0 = 12 \text{ m/s}$)

Abbildung 8 zeigt die Schwankungen des Druckbeiwertes in den betrachteten Pyramidenoberflächen. Die Schwankungen nehmen zu, wenn der Basiswinkel der Pyramide zunimmt. Für Pyramide P20 (Abb. 8.a.) ist die Schwankung relativ klein, der maximale Wert der Schwankung beträgt 0.027. Diese maximale Schwankung tritt bei den stromaufwärts liegenden Kanten der Pyramide auf, dort, wo sich auch die Bereiche maximalen Sogs befinden. Wenn der Basiswinkel auf 30° zunimmt, (Abb. 8.b.) steigt die maximale Schwankung auf einen Wert von 0.138 an. Ihre Position ist wiederum bei den stromaufwärts liegenden Kanten der Pyramide, jedoch diesmal etwas nach unten verschoben. Für Pyramide P45 und P70 werden die maximalen Schwankungen genau an der Basislinie der Pyramidenseitenflächen registriert, wobei ein maximaler Wert von 0.225 und 0.318 auftritt. Druckschwankungen finden sich ebenso auch auf den Frontflächen der Pyramide, mit Schwankungswerten von 0.005, 0.026, 0.125 und 0.183 (Pyramide P20, P30, P45, und P70).

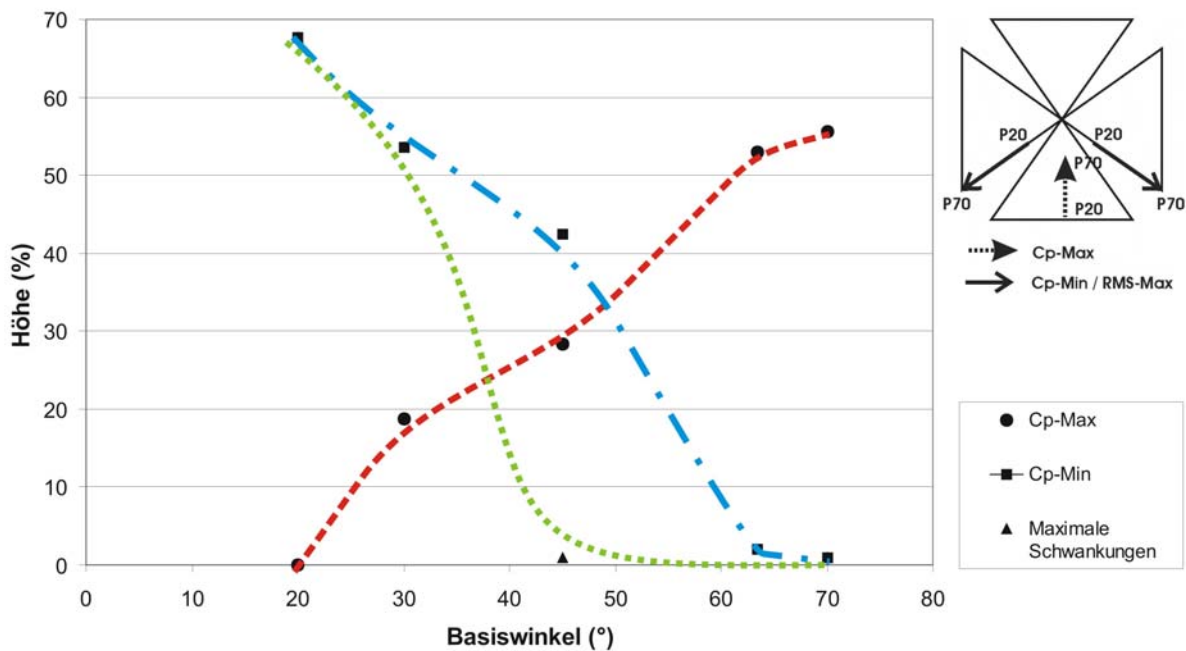


Abbildung 9. Position von cp-max, cp-min und der maximalen Schwankungen als Funktion des Basiswinkels ($\gamma = 0^\circ$, $U_0 = 12 \text{ m/s}$).

In Abbildung 9 sind die Positionen von cp-max, cp-min und maximaler Schwankungen in Abhängigkeit des Basiswinkels dargestellt. Im allgemeinen tritt cp-max in der Mitte der Vorderseite der Pyramide auf. Die Position verschiebt sich in vertikaler Richtung zur Spitze der Pyramide, wenn der Basiswinkel zunimmt. Im Gegensatz dazu verschiebt sich die Position von cp-min zur Grundlinie der Pyramide, wenn der Basiswinkel zunimmt. Es wurde beobachtet, dass die Position von cp-min die Grundlinie der Pyramide bei einem Basiswinkel 70° erreicht. Die allgemeine Position der maximalen Schwankungen ist zur cp-min ähnlich, aber der Gradient ist verschieden, besonders bei Basiswinkel zwischen 30° bis 60° . Die Position der maximalen Schwankungen verändert sich signifikant, wenn der Basiswinkel 45° erreicht.

Die Untersuchungen haben bislang zu wichtigen Erkenntnissen geführt, die eine detaillierte Einschätzung des Strömungs- und Druckfeldes um pyramidenförmige Bauwerke ermöglicht. Durch weitere Untersuchungen sollen zusätzliche Pyramidenkonfigurationen ausgemessen werden, um abschließend funktionale Zusammenhänge für die praktische Windlastbemessung von pyramidenförmigen Bauwerken aufstellen zu können.

Dankesworte

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei der deutschen Forschungsgemeinschaft DFG/Bonn für die Förderung des Vorhabens im Rahmen des Projektes Nr. Ru 345/25-1 bedanken.

Literatur

1. Abuomar, M.M., Martinuzzi, R.J., 2000. An Experimental Investigation of the flow around a Surface Mounted Pyramid. 6th Triennial International symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, August 13-17, 2000, Sherbrooke, Canada.
2. EUROCODE 1: Basis of Design and Actions on Structure, 1991. Part 2.4: Wind Actions, pp. 16.

14.10

3. Ikhwan, M., Ruck, B. 2002. Investigation of Flow and Pressure Characteristics Around Pyramidal Shape Buildings. Proceeding, 10. GALA-Conference, *Lasermethoden in der Strömungmeßtechnik*, University of Rostock, Germany, part 5.26, September 2002 .
4. Isyumov, N. 1999. Overview of Wind Action on Tall Building and Structures. Wind Engineering into 21st Century, Rotterdam, ISBN 90-5809-059-0, pp. 15-28.
5. Peterka, J.A., Meroney, R.N., Kothari, K.M., 1985. Wind Flow Patterns About Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 21, pp. 21-38.
6. Roth, M., 1997. Analyse der Umströmung pyramidenförmiger Hindernisse. Diplomarbeit, IfH, Forschungsgruppe Stömungsmesstechnik, Univ.Karlsruhe (TH).
7. Ruck, B., Roth, M., 1997. The Flow and Pressure Distribution Around Pyramids. *Laser Anemometry Advances and Applications*, Proceedings of the 7th International Conference, September 8-11, pp.761-769.