

Einwirkung Wind Ein kritischer geschichtlicher Rückblick

1874 gibt H. Gerber in der Zeitschrift des "Bayerischen Architectur- und Ingenieurvereins" in Heft 6, Seite 25, die Windlastformel des englischen Gelehrten und Bauingenieurs "Smeaton" an.

John Smeaton (* 8. Juni 1724 in Austhorpe bei Leeds, West Yorkshire; † 28. Oktober 1792 ebenda) war ein englischer Ingenieur und gilt als der Vater des Bauingenieurwesens, da er die entsprechenden Grundlagen für die Ingenieurwissenschaften legte. Er wurde 1753 zum Mitglied der Royal Society gewählt und gewann 1759 die Copley Medaille für seine Arbeiten zur Mechanik von Wasser- und Windmühlen. Die Untersuchungen beschrieben das Verhältnis zwischen Druck und Geschwindigkeit von in Luft bewegten Objekten und führten zur Definition des Smeaton-Koeffizienten. In den Folgejahren bis 1782 führte er weitere Untersuchungen zu diesem Thema durch, die ihn dazu brachten, die "vis viva Theorie" von Gottfried Wilhelm Leibniz zu unterstützen, die eine frühe Beschreibung des Energieerhaltungssatzes darstellte. Dies brachte ihn in Konflikt mit vielen Mitgliedern des wissenschaftlichen Establishments, die diese Theorie als unvereinbar mit dem Momentum-Erhaltungssatz (Impuls-Erhaltungssatz) von Isaac Newton (Impuls = Masse mal Geschwindigkeit) verstanden.

Nach Smeaton ist der Winddruck auf eine senkrecht zur Windrichtung gerichteten Fläche für die Geschwindigkeit v des Windes in Metern per Sekunde :

$$\pi = v^2 \cdot 0.120 \text{ kg per } m^2$$

Bei 120 km/h wären das 133 kg/m², oder 1.33 kN/m² lieber Herr Smeaton sel.

Nachweislich ist diese Formel falsch, doch wurde sie von massgebenden Wissenschaftlern stets verteidigt, obwohl sie die richtige physikalische Gleichung von Bernoulli hätten kennen müssen.

Dr. W. Wittmann, Privatdozent an der Königl. Technischen Hochschule München gibt 1882 in seinem Werk "Statik der Hochbaukonstruktionen Zweiter Theil Holzconstruktionen" folgende Formel an, die der Formel von Smeaton entspricht :

c) Winddruck Die Pressung, welche durch den Stoss des Windes pro qm (m^2) einer zur Windrichtung MN senkrechten Ebene hervorgebracht wird, beträgt

$$q = 0.116v^2 kg$$

wenn v die Geschwindigkeit des Windes in Metern pro Secunde.

W. Flury, Ingenieur, hat ca. Ende 19. Jahrhunderts einen "Leitfaden für den Unterricht in der Baumechanik" verfasst. Der Leitfaden ist von Hand geschrieben.

Auch Flury gibt die Windlast nach Smeaton an, beziffert deren Koeffizient auf 0.1225.

$$w = v^2 \cdot 0.1225 \text{ kg per m}^2$$

Bei 120 km/h wären das 136 kg/m², oder 1.36 kN/m² lieber Herr Flury sel.

Die *"Verordnungen betreffend Berechnung und Prüfung der eisernen Brücken und Dachkonstruktionen an den schweizerischen Eisenbahnen vom 19. August 1892, vom 11. Juni"* geben folgende Winddrücke an :

Für unbelastete Brücken von 0.150 t auf den m² der wirksamen Ansichtsfläche.

Für belastete Brücken 0.100 t auf den m² der wirksamen Ansichtsfläche

Die wirksame Ansichtsfläche wurde beschrieben, der fahrende Zug als Ansichtsfläche ebenfalls.

Berechnen wir aus den Angaben die Windgeschwindigkeit mit dem falschen Flury-resp. Smeaton-Faktor von 0.1225 :

$$v = \sqrt{\frac{150}{0.1225}} \cdot 3.6 = 126 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$v = \sqrt{\frac{100}{0.1225}} \cdot 3.6 = 103 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Diese Werte waren einleuchtend, sind aber falsch (Siehe Seiten 3 und 4).

Professor R. Schöler, Direktor der Anhaltischen Bauschule Zerbst gibt 1904 in seinem Werk "Die Statik und Festigkeitslehre des Hochbaues" an :

Gemäss Ministerialerlass vom 30. April 1902 ist der Winddruck zu 125 kg/m² rechtwinklig getroffener Fläche, für Türme zu 150 kg/m² anzunehmen. Bei freistehenden Gebäuden, deren Frontwände nicht durch Querwände versteift sind, ist mit einem Winddruck von 75 kg/m² zu rechnen.

Warum für freistehende, innen nicht ausgesteifte Gebäude weniger Windlast angenommen werden darf, wird nicht begründet.

Erst der Normentwurf 160 des SIA von 1951 (Belastungsnormen) und die SIA-Norm 160 von 1956 geben dann die richtige Formel für die Berechnung des Staudrucks an, die auf der Bernoulli-Gleichung basiert :

Die richtige Formel lautet :

$$q = \frac{v^2 \cdot \rho}{2 \cdot g}$$

Wobei ρ oder $\gamma = 1.2 \text{ kg/m}^3$, 12 N/m^3 , spezifisches Gewicht der Luft

v = Windgeschwindigkeit in m/sec

g = Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/sec}^2$

Die Herleitung dieser physikalischen Formel hat 1738 der Schweizer Physiker Daniel Bernoulli (1700 bis 1782) aus dem Verhältnis zwischen Statischem Druck und dynamischen Druck berechnet und bewiesen.

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 + \rho g h = \text{const. (Bernoulli'sche Gleichung)}$$

Verläuft die Stromlinie entlang einer Äquipotentialfläche der Gravitationskraft, so reduziert sich die Bernoulli'sche Gleichung auf den Ausdruck

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const.} \equiv p_0$$

In Worten lautet die Bernoulli'sche Gleichung :

Statischer Druck (p) plus Staudruck ($\rho v^2/2$) ergibt den Gesamtdruck (p_0)

Bei dem 1892 von der SBB angegebenen Staudruck von 0.15 t/m^2 , resp. 0.1 t / m^2 (siehe Seite 2) wäre die Windgeschwindigkeit nach der Bernoulli-Gleichung korrigiert :

$$v = \sqrt{\frac{150 \cdot 2 \cdot 9.81}{1.2}} \cdot 3.6 = 178 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$v = \sqrt{\frac{100 \cdot 2 \cdot 9.81}{1.2}} \cdot 3.6 = 145 \frac{km}{h}$$

150 Jahre lang wurden von den Bauingenieuren die Windlasten nach Smeaton, also falsch angenommen !

Der Staudruck des Windes ist abhängig von der Luftwichte und der Geschwindigkeit des Windes. Da die Wichte der Luft hinreichend genau mit 1.2 kg/m^2 oder 12 N/m^2 festgelegt wird, kann man auf folgende Formel kürzen :

$$q = \frac{v^2}{16.35} \text{ oder genügend genau } q = \frac{v^2}{16}$$

Bei 120 km/h resp. $120'000 \text{ m} / 3600 \text{ sec} = 33.33 \text{ m/sec}$ ist der Staudruck q also :

$$q = \frac{33.33^2}{16.35} = 68 \frac{kg}{m^2} = 0.68 \frac{kN}{m^2}$$

Gehen wir davon aus, dass gemäss DIN für Bauten am Meer eine Windgeschwindigkeit von 160 km/h anzunehmen ist, ergäbe das bei Smeaton einen Staudruck von 237 kg/m^2 (2.37 kN/m^2), nach heutigen Normen 121 kg/m^2 (1.21 kN/m^2).

Der Staudruck p_{stau} ist die Erhöhung des Drucks am Staupunkt eines umströmten Körpers gegenüber dem statischen Druck p_0 der Luft.

Der hydrodynamische Druck p_d entspricht dem Staudruck. Er resultiert aus der kinetischen Energie der strömenden Fluidelemente in einer Strömung. Der hydrodynamische Druck nimmt quadratisch mit der Strömungsgeschwindigkeit v der Fluidelemente zu:

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Welchen Einfluss hatte die fehlerhafte Formel von Smeaton auf die Bauwerke, die vor ca. 1935 bis ca. 1952 gebaut wurden ?

Lastkombinationen mit Wind ergaben falsche und zu hohe Einwirkungen. Für übliche Bauten, die man heute unter einer Windgeschwindigkeit von 136 km/h berechnet, ergibt sich folgendes Bild:

Staudruck nach Smeaton, Flury etc. = $175 \text{ kg/m}^2 = 1.75 \text{ kN/m}^2$ = 100%

Staudruck nach SIA-Norm 160 1951/56 = $87.3 \text{ kg/m}^2 = 0.873 \text{ kN/m}^2$ = 50%

Tabellarisch gesehen zeigt sich, dass der von Smeaton angegebene Staudruck doppelt so hoch war, als nach der richtigen Bernoulli-Gleichung. (Rot = falsche Staudrücke Smeaton, Blau = SIA Norm 261)

Windgeschwindigkeit		Staudruck nach Smeaton	Staudruck nach Norm
km/h	m/sec	kN/m ²	kN/m ²
50	13.889	0.24	0.12
60	16.667	0.34	0.17
70	19.444	0.46	0.23
80	22.222	0.60	0.30
90	25.000	0.77	0.38
103	27.778	1.00	0.50
110	30.556	1.14	0.57
126	33.333	1.50	0.75
130	36.111	1.60	0.80
138	37.778	1.80	0.9
140	38.889	1.85	0.92
153	41.667	2.13	1.10
160	44.444	2.42	1.21
166	47.222	2.60	1.30
180	50.000	3.06	1.53

Wir erkennen, dass Herr Smeaton zwar auf dem richtigen Weg war, aber übersehen hat, den Faktor 2 als Teiler in seine Formel einzusetzen. Herr Dr. W. Wittmann, Herr Flury und weitere haben bei ihm abgeschrieben. Sie haben die physikalische Herleitung der Gleichung von Bernoulli nicht begriffen, die Vorlesung geschwänzt oder ignoriert.

Diese Tatsache gilt es bei der Bewertung alter Bauten, die vor 1952 nach den normativen Regeln der Statik und Bemessung gebaut wurden, zu berücksichtigen.

Beispiele

1)

M. Ros, Direktor der EMPA, hat 1929 an dem 1909 in Betrieb genommenen "Wiesner-Viadukt" der Rhätischen Bahn Belastungsversuche durchgeführt. Der Winddruck wurde gemäss den gültigen Vorschriften mit 100 kg/m^2 bzw. 150 kg/m^2 angenommen (Schweizerische Bauzeitung Band 97/98 aus dem Jahre 1931)

2)

1889 wurde auf dem Eschberg bei Winterthur ein 30 m hoher Aussichtsturm aus Stahl gebaut. Als Windlast wurde 200 kg/m^2 angenommen. Es wurde angenommen, dass die Eisenfläche von unten bis oben gleich belastet wurde. Zusammengezogen ergab dies 400 kg / m Turm oder eine Resultierende von 12.0 Tonnen. Interessant ist die Angabe von 200 kg/m^2 . Nach dem Motto "sicher ist sicher" wurde also die doppelte Einwirkung angenommen, die von der Bundesbahn für unbelastete Brücken angegeben wurde. Diese 200 kg/m^2 entsprachen nach der Bernoulli-Gleichung und der heute geltenden Norm einer Windgeschwindigkeit von 206 km/h . (Schweizerische Bauzeitung 13/14 von 1889).

3)

Beim Bau des Lehrgerüsts der Bodensee-Toggenburgbahn über das Sittertobel wurde die Windlast mit 150 kg/m^2 angenommen. Das entsprach damals nach der falschen Smeaton-Gleichung nur einer Windgeschwindigkeit von 126 km/h . Nach richtiger Gleichung entsprechen 150 kg/m^2 einer Windgeschwindigkeit von 178 km/h . (Schweizerische Bauzeitung 55/56 aus dem Jahre 1910)

4)

Man darf davon ausgehen, dass 1912 auch die Lokomotivhalle im Aebigut Bern unter Berücksichtigung der von der Eidgenossenschaft angegebenen Windlasten gebaut wurde. Für Hochbauten galten damals die gleichen Werte, wie für Brückenbauten. *"Je nach örtlichen Verhältnissen ist der Winddruck zwischen 0.100 und $0.150 \text{ t auf den } m^2$ anzunehmen und die Windrichtung mit einer Neigung von 10° gegen den Horizont in die Rechnung einzuführen."*

Da die Halle im städtischen Gebiet liegt, durfte man 1912 von 100 kg/m^2 ausgehen, was einer falschen Windgeschwindigkeit von 103 km/h nach Smeaton, aber in Wirklichkeit 146 km/h entspricht. (Schweizerische Bauzeitung 61/62 aus dem Jahre 1913).

5)

Prof. Dr. J. Ackeret vom Institut für Aerodynamik der ETH Zürich veröffentlicht in der Schweizerischen Bauzeitung 107/108 vom Jahre 1936 einen Artikel "Der Winddruck auf Schornsteine mit Kreisquerschnitt".

Er verwendet die richtige Formel für die Windlastermittlung !.

6)

Die SIA-Norm 112 von 1935.

Bei Eisenbahnbrücken ist die Windlast nach wie vor mit 150 kg/m^2 unbelastete Brücke und mit 100 kg/m^2 belastete Brücke anzunehmen.

Bei Strassenbrücken ist der Staudruck mit 150 kg/m^2 auf das unbelastete Bauwerk anzunehmen, (was einer Windgeschwindigkeit von 178 km/h entspricht).

Bei Hochbauten berechnet sich die Windbelastung p_w auf den m^2 senkrecht getroffener Fläche allgemein zu

$$p_w = c \cdot q$$

Hierin bedeutet $q = 100 \text{ kg/m}^2$

Bei geschlossenen Bauwerken sind bis auf weiteres für den Beiwert c die nachfolgenden Werte unter Berücksichtigung der Dachneigung α anzunehmen :

Für die dem Wind zugekehrte Flächen $c = 1.2 \sin \alpha - 0.4$

Für die dem Wind abgekehrten Flächen $c = -0.4$

Für Hochbauten, die dauernd einem unmittelbaren Winddruck entzogen sind (?), wie auch für Verbände von mehr als 15 m Länge, darf der Winddruck zu bloss 60 Prozent der hievore festgesetzten Werte angenommen werden.

Aha, so ganz sicher war man sich nicht mehr.

7)

Beim Neubau der "hölzernen Strassenbrücke über das Schwarzwasser bei Rütiplötsch BE" bemerkt Dr. sc. Techn. Ernst Burgdorfer, dipl. Ing. ETH, (Burgdorfer und Lauterburg, Ingenieure, Bern), dass er die Brücke mit einem Winddruck von 150 kg/m^2 berechnet. (Schweizerische Bauzeitung 111/112 aus dem Jahre 1938).

8)

Beim Bau der Kräzernbrücke in St. Gallen im Jahre 1940 treffen wir auf die Bemerkung, die der SIA-Norm 112 von 1935 entspricht : *Seitenwind im Bauzustand. Vorschriftsgemäss ist eine Windlast von 150 kg/m^2 anzunehmen.* Diese Aussage stammt von Max Meier – Zuppinger, Chefingenieur der Firma Ch. Choppart aus Zürich. (Schweizerische Bauzeitung 115/116 aus dem Jahre 1940).

Im Entwurf der SIA-Norm 160 vom Jahre 1952 tritt endlich die Gleichung von Bernoulli auf.

Der Staudruck wurde nach Gebäudehöhe und folgender Tabelle abgestuft :

0 - 5 m	5 - 20 m	20 - 40 m	40 - 80 m	80 - 160 m	160 - 320 m	m
70	85	100	120	150	180	kg/m ²
103	134	145	160	178	195	km / h

Fazit :

Beim Abschätzen von Einwirkungen durch Wind auf alte Bauten ist – sofern man sich nicht nur auf Normen verlassen will – unbedingt von gemessenen Windgeschwindigkeiten auszugehen. Dazu schreibt Ingenieur Flury ca. 1900 :

"Was die Windgeschwindigkeit angeht, so steigt dieselbe selten über 35m/sec. Einen Wind mit mehr als 28 m/sec nennt man Orkan. Eine der grössten Geschwindigkeiten wurde am 12. Februar 1894 von der Hamburger Seewarte beobachtet; die Messung ergab 40 m/sec im Maximum und eine stundenlang anhaltende Durchschnitts-Geschwindigkeit von über 35 m/sec."

40 m/sec entsprechen 144 km/h und einem Staudruck von 98 kg/m^2 oder 0.98 kN/m^2 . Nach Smeaton allerdings wäre das ein Staudruck von 196 kg/m^2 oder 1.96 kN/m^2

36 m/sec entsprechen 130 km/h und einem Staudruck von 80 kg/m² oder 0.80 kN/m². Nach Smeaton allerdings wäre das ein Staudruck von 160 kg/m² oder 1.60 kN/m².

Auch Dr. Ing Dr. Ing. E.h. Klaus Pieper, der bekannte Nachkriegs - Sanierer historischer Bauten, gibt 1983 in seinem Buch (ISBN 3-433-00967-8 "Sicherung historischer Bauten Seite 75) an :

Der Einfluss der Windlast auf die oft sehr grossen historischen Konstruktionen wird gefühlsmässig meist überschätzt. Hier lohnen sich spezielle Betrachtungen, die über die Windlastnormen hinausgehen...

Die höchsten Windlasten entstehen in Böen. Diese haben selten Ausdehnungen von 40 m Höhe und 80 m Länge.

Das kann man während Winterstürmen mit Schneefall gut beobachten. Bei einer Windgeschwindigkeit von 35 bis 40 m/sec, dauern also diese Höchstlasten nur einige Sekunden.

Während dem Sturm Lothar vom 26. Dezember 1999 wurde in Vaduz eine Böenspitze von 165 km/h (46 m/sec), gemessen. Das entspricht einem Staudruck von 1.285 kN/m² während der Dauer von einigen Sekunden.

In St. Gallen war die maximal gemessene Böenspitze 131.4 km/h (36.5 m/sec), was einem Staudruck von 0.82 kN/m² entspricht.

Auf dem Säntis wurde eine Böenspitze von 229.7 km/h gemessen (63.8 m/sec), was einem Staudruck von 2.49 kN/m² entspricht.

Während dem Sturm Vivian vom 27. Februar 1990 wurde in Altdorf eine maximale Böenspitze von 131 km/h (36.4 m/sec) gemessen. Das entspricht einem Staudruck von 0.81 kN/m².

In Glarus war die maximal gemessene Böenspitze 168 km/h (46.7 m/sec), was einem Staudruck von 1.33 kN/m² entspricht.

Wind ist eine dynamische Kraft, die wir für die Bemessung von Tragwerken vereinfachend als statische Last annehmen. Jeder kann feststellen, dass während eines Sturmes die Geschwindigkeiten andauernd ändern.

Die Windlastkarte der SIA-Norm 261 von 2014 trägt diesen Ereignissen Rechnung. Für Glarus und Vaduz wird z.B. ein Staudruck von 1.31 kN/m² angegeben. Das heisst, wenn wir diese Einwirkungen als Grundlage für die Statik verwenden, sind wir auf der sicheren Seite und haben genügend Reserven. Allerdings werden wir bei der Nachrechnung alter Bauten feststellen, dass

sie solchen Einwirkungen gar nicht standhalten würden – weil sie nie unter der Einwirkung Wind berechnet oder untersucht wurden. Wenn wir bestehende Holzbauten – vor allem landwirtschaftliche Bauten und Hallen - genau durchrechnen, werden wir erkennen, dass viele nicht tragsicher sind, wenn wir Böenspitzen als dauernde Einwirkungen annehmen.

Bei Böenspitzen handelt es sich um kurzfristige Lasten in der Grössenordnung von Sekunden. Früher wurden deshalb die Böenspitzen stossartigen Einwirkungen gleichgesetzt und bei Holzbauten mit Spannungserhöhungen von Faktor 1.5 berücksichtigt.

Wie ich mit diesem Beitrag aufzeige, haben Wissenschaftler und massgebende Ingenieure des 18., 19. Und 20. Jahrhunderts bedenkenlos bei Herrn Smeaton abgeschrieben.

Vermutlich würden sie sich damit verteidigen, dass sie die Gleichung von Daniel Bernoulli schon gekannt haben, aber sicherheitshalber diejenige von Smeaton verwendet hätten – die die doppelten Staudrücke ergibt. In Tat und Wahrheit haben sie sich davor gescheut, einem anerkannten mit Orden hoch dekorierten Alleswisser Fehler aufzuzeigen. Eigentlich eine Blamage!

Es ist wichtig, die bestehenden EURO-Normen und die daraus abgeleiteten Landesnormen laufend zu überdenken und vor allem zu vereinfachen, statt sie laufend noch komplizierter und damit fehleranfälliger zu machen. Was kompliziert ist und wissenschaftlich daherkommt, ist – wie wir bei Smeaton sehen – ab und zu weniger wissenschaftlich als vorgespiegelt.

Jeder praktische Ingenieur und Unternehmer muss wissen, dass seine Arbeit unter Umständen von Experten an gültigen Normen gemessen wird – auch wenn sie zu vorsichtig ausgelegt sind. Dazu braucht es keinen Schadenfall. Schon die Vermutung eines Dritten genügt und führt zu langwierigen Prozessen, aus denen der Ingenieur, der von der Norm abweicht, nie als Sieger hervorgehen wird. Also ist es weise, die Normen einzuhalten, auch wenn deren Vorgaben nicht immer mit Weisheit zu tun haben. Und noch klüger ist er, wenn der praktische Ingenieur nach Ablauf der Aufbewahrungspflicht von 10 Jahren sämtliche Akten vernichtet und danach keine alten Unterlagen Juristen und Experten mehr zu Verfügung stellt.

Wird die lebenslange Haftung des Ingenieurs vom EU-Recht übernommen, ist es ratsam, diesen Beruf gar nicht mehr zu wählen.