

Basiswissen für Dachhandwerker

Windsog

Teil 1: Physikalische Grundlagen

Teil 2: DIN EN 1991-1-4

Autor: Dipl.-Ing. Markus Friedrich, 15732 Eichwalde

Stand: Dezember 2022

© Copyright Markus Friedrich Datentechnik
Inhaberin Lisa Römer
Bahnhofstraße 74
D - 15732 Eichwalde bei Berlin

Tel. 030 / 6670235 - 0
E-Mail info@friedrich-datentechnik.de

www.friedrich-datentechnik.de

Alle Rechte sind geschützt.
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Autors.

Einleitung

Die Häufigkeit von Extremwetterereignissen in Folge des Klimawandels nimmt kontinuierlich zu. Diesem Trend folgend, wurden die zugehörigen Normen und die Fachregeln der Berufsverbände überarbeitet und dabei deutlich komplexer.

Mit dieser Einführung möchte ich Ihnen einen Einblick in die Grundlagen der Windsogphysik geben. Diese sind für das Verständnis der Normen und die darauf aufbauenden Berechnung der Windsogkräfte unerlässlich. In Teil 2 gebe ich Ihnen einen Einblick in die DIN EN 1991-1-4 und deren Anwendung.

Hinweis: Die hier gemachten Aussagen repräsentieren einzig den Kenntnisstand des Autors. Sie erheben nicht den Anspruch auf rechtliche oder technische Korrektheit. Insbesondere können nicht alle Aspekte für die Planung und Prüfung von Dachkonstruktionen erschöpfend behandelt werden. Der Autor haftet nicht für Schäden, die aus der Nutzung dieser Broschüre entstehen!

Normen und Regeln

Bei der Erstellung von Einzelnachweisen zur Windsogsicherung von Dächern sind folgende Normen bzw. Fachregeln verbindlich anzuwenden:

- DIN EN 1991-1-4 Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
 DIN EN 1991-1-4/NA Nationaler Anhang
 DIN EN 1990 Grundlagen der Tragwerksplanung
- ZVDH Fachregeln des Deutschen Dachdeckerhandwerks – Fachregel für
 Dächer mit Abdichtungen
- ZVDH Fachregeln des Deutschen Dachdeckerhandwerks – Fachregel für
 Dachdeckungen
- ZVSHK Befestigung von Metaldächern und -fassaden –
 Berechnungsgrundlagen zur Windlastnorm DIN 1055-4: 2005-03

Teil 1: Physikalische Grundlagen

Luft, Wind, Sog

Luft ist ein Gasgemisch, bestehend aus ca. 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und 1 % sonstigen Gasteilchen. Die Gasteilchen kann man sich als kleine Kugeln vorstellen, welche im Raum umherschwirren und bei einer Kollision mit anderen Kugeln aneinander abprallen.

Könnte man Gasmoleküle sichtbar machen, wäre schnell klar, dass ruhende Luft alles andere als ruhend ist. In Wahrheit fliegen nahezu unendlich viele Gasteilchen kreuz und quer durch den Raum. Ruhend ist die Luft nur, weil genauso viele Gasteilchen nach links wie rechts, oben wie unten und nach vorne wie hinten fliegen. Daraus folgt:

- Bei *Windstille* sind die Flugbahnen der Gasteilchen gleichverteilt auf die 6 möglichen Flugrichtungen (nach rechts, links, oben, unten, vorne und hinten)
- Bei *Wind* fliegen mehr Gasteilchen in Windrichtung als in die restlichen 5 Richtungen

Steht den in Windrichtung fliegenden Gasteilchen ein Hindernis im Weg, passiert das gleiche, wie wenn tausende von Tennisspieler ihren Aufschlag an einer Wand trainieren. Ist die Wand nicht stabil genug, stürzt sie ein. Dies begründet viele Orkanshäden, nicht jedoch Windsog am Flachdach. Die Tennisbälle üben einen Druck auf die Mauer aus, Sog jedoch ist das Gegenteil von Druck.

Satz von Bernoulli

Selbst im stärksten Sturm fliegt nur ein Bruchteil der Gasteilchen in Windrichtung. Die Mehrzahl der Gasteilchen fliegt nach wie vor kreuz und quer durch den Raum. Die kreuz und quer fliegenden Teilchen bilden den „statischen Luftdruck p_{stat} “, wobei das p für pressure (englisch: Druck) steht. Die in Windrichtung fliegenden Teilchen bilden den „dynamischen Luftdruck q “, Staudruck genannt.

Formel: $p = p_{\text{stat}} + q$

Parameter: p_{stat} = statischer Luftdruck
 q = Staudruck

Bei Windstille wird q zu 0. Den verbleibenden statischen Luftdruck kann man an einem Barometer ablesen. Bernoulli fand heraus, dass sich bei Wind der statische Luftdruck in dem Maße verringert, in dem der Staudruck zunimmt. Daraus ergibt sich, leicht vereinfacht formuliert, der

Satz von Bernoulli: Die Summe von statischem und dynamischem Luftdruck ist konstant.

Sog = Druckmangel

An einem Warmdachaufbau lässt sich die Entstehung von Sog als Folge mangelnden (statischen) Luftdrucks anschaulich darstellen.

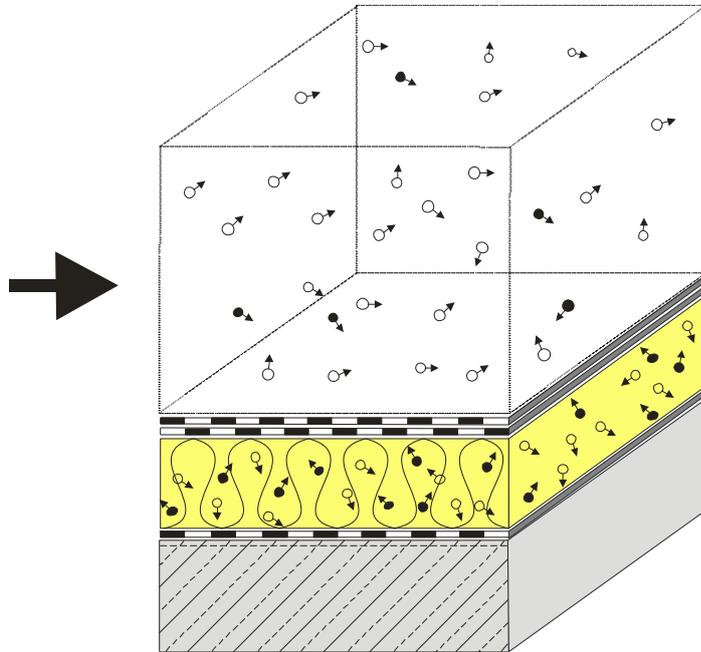


Bild 1: Bewegung der Gasteilchen ober- und unterhalb der Abdichtungslage

Bei Wind von links bewegen sich oberhalb der Dachabdichtung mehr Gasteilchen nach rechts als in die restlichen 5 Richtungen, also auch der Richtung nach unten. Innerhalb der Dämmung hingegen bewegen sich alle Gasteilchen gleichverteilt in alle 6 Richtungen. Damit bewegen sich innerhalb der Dämmung mehr Gasteilchen nach oben als in der Luftströmung des Windes nach unten. Resultat: Die Oberlage der Dachabdichtung wird von innen heraus nach oben gedrückt.

Der Windsog von außen entpuppt sich somit als mangelnder Gegendruck nach unten. Dies erklärt auch die große Windsogstandsicherheit von Kompaktdächern. Beim Einschwemmen geschlossenzelliger Dämmung in Bitumen gibt es kaum freie Gasteilchen, welche die Abdichtung nach außen „abstoßen“ könnten.

Anströmung von Gebäuden

Würde der Wind parallel zur Dachfläche strömen, hätten wir mit Bernoulli alles erklärt. Halbwegs parallel strömt der Wind aber nur im Dachmittigenbereich. Im Eck- und Randbereich sind Wirbel die Hauptverursacher erhöhten Windsogs.

Strömt der Wind auf eine Fassade, **staut** er sich und übt einen **Druck** auf die Fassade aus. Der Begriff **Staudruck** wird anschaulich. Der Wind bleibt jedoch nicht vor der Fassade stehen. Er strömt entlang der Fassade und über das Dach. Dabei entstehen Wirbel an den Gebäudekanten.

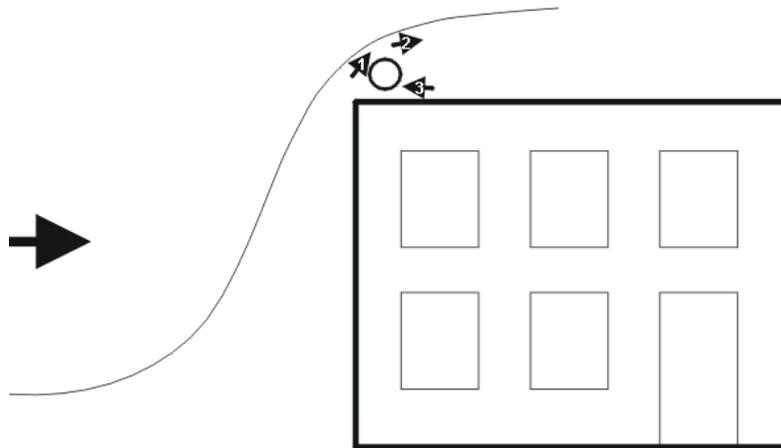


Bild 2: Randwirbel am Dachrand

Die Pfeile 1 und 2 geben die Hauptflugrichtung der Gasteilchen des Windes an. Durch das Mitreißen von Gasteilchen oberhalb der Dachkante entsteht ein Unterdruck am Dachrand. Dieser wird von den mit Pfeil 3 gekennzeichneten Gasteilchen ausgeglichen. Es bildet sich ein Wirbel, der nahe am Dachrand zu erhöhter Sogbelastung führt. Die erhöhte Sogbelastung ergibt sich hierbei aus der Flugrichtung der Gasteilchen nahe am Dachrand. Dort strömen besonders viele Gasteilchen nach oben, was den Sog gegenüber dem reinen Bernoulli-Effekt mit paralleler Strömung vergrößert.

Der Sog ist umso größer, je höher die Windgeschwindigkeit und je kleiner der Wirbel

Die Zunahme der Kräfte mit kleiner werdenden Wirbeln ergibt sich aus der geringeren Entfernung der nach oben fliegenden Gasteilchen zur Dachoberfläche. Dies erklärt auch, weshalb die Sogspitzen bei Anströmung über Eck am stärksten sind. Dort geschieht folgendes:

Strömt der Wind über Eck heran, bilden sich 2 Wirbel. Diese werden vom Eck ausgehend größer, wodurch sich eine Tütenform ergibt.

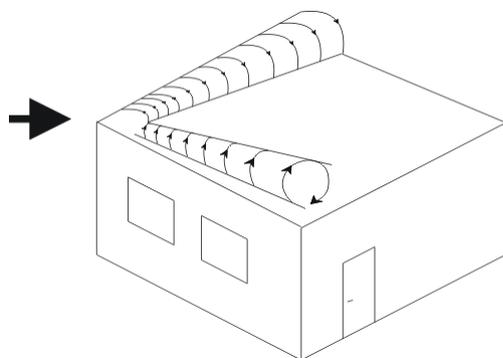


Bild 3: Über-Eck-Anströmung

Im Eck entsteht aufgrund kleiner Wirbelradien die größte Sogwirkung. Hinzu kommt ein Windanteil der entlang der Rotationsachse strömt und dadurch die effektive Windgeschwindigkeit erhöht.

Innendruck

Neben dem Sog von außen kann auch der Druck von innen das Dach nach oben drücken. Sog und Innendruck addieren sich zu einer gemeinsamen Last.

Damit der Wind in das Gebäude eindringen und den Innendruck aufbauen kann, muss die Fassade luftdurchlässig sein. Mehr oder weniger sind dies fast alle Fassaden, was wiederum bedeuten würde, dass sich über kurz oder lang der Staudruck von der Fassade ins Gebäudeinnere überträgt. Damit wären die meisten Gebäude als offen zu betrachten und der Innendruck immer zu berücksichtigen. Dem ist jedoch nicht so, denn der entscheidende Schadensverursacher ist nicht der gleichmäßig strömende Wind. Schäden entstehen i.d.R. durch Böen, also kurzzeitige Luftstöße mit stark erhöhten Windgeschwindigkeiten. Für den Innendruck ist entscheidend, ob während der Böe ausreichend Druck im Gebäude aufgebaut wird. Dies ist bei großen, geöffneten Toren der Fall, jedoch nicht bei Ritzen und Fugen oder wenigen, gekippten Fenstern.

Eine Voraussetzung für die Einbeziehung des Innendruckes ist die Beschaffenheit der Tragdecke. Bei Betondecken kann der Druck aus dem Innenraum nicht bis zur Dachabdichtung dringen. Nur wenn sowohl Gebäudehülle als auch Tragdecke luftdurchlässig sind, wird der Innendruck wirksam.

Interessant ist noch der Fall „Geschlossene Gebäudehülle mit luftdurchlässiger Tragdecke (typ. Trapezblech)“. Bei geschlossener Gebäudehülle kann der Wind nicht ins Gebäudeinnere eindringen und Innendruck aufbauen. Dennoch schmälert die durchlässige Tragdecke die Widerstandsfähigkeit der Dachabdichtung.

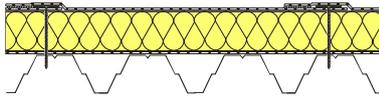


Bild 4a: Dachbahn bei Windstille

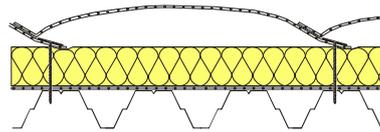


Bild 4b: Aufbauchende Dachbahnen bei Wind

Hinweis: Trapezbleche sind symbolisch gezeichnet. In Realität liegen diese um 90° gedreht.

Ursache: Unter Windsog bauchen die Dachbahnen zwischen den Befestigerreihen auf (Tunnelbildung). Dadurch vergrößert sich das Volumen zwischen Tragdecke und Dachbahnen, was eine Verringerung des Luftdruckes bewirkt. Dieser „Unterdruck“ könnte die Dachbahnen zurückhalten, würde nicht Luft aus dem Gebäudeinneren nachströmen und den Effekt verringern.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man von vier Windphänomenen am Dach sprechen:

- 1) Bernoulli-Effekt im Dachmittenbereich
- 2) zylindrische Wirbel am Dachrand
- 3) tütenförmige Wirbelpaare im Eckbereich
- 4) Innendruck

Dieses stark vereinfachende Modell ist die Grundlage aller Berechnungsmethoden. Da eine exakte Berechnung nicht möglich ist, übertragen wir dieses vereinfachte Modell auf einen realen, komplexen Baukörper. Unter Zuhilfenahme einer Norm nennt sich dieses Vorgehen Bemessung.

Bemessung

Die windtechnische Bemessung von Gebäuden erfolgt in 3 Schritten:

- 1.) Bestimmung von Eck- und Randflächen. Der Rest wird zur Innenfläche.
- 2.) Bestimmung der Kräfte in den jeweiligen Flächen.
- 3.) Wahl der Befestigungsart und Berechnung der Befestigungsmittel

Zu 1.) Die Bestimmung der Flächen erfolgt anhand der zu erwartenden Wirbel am Dachrand. Laut DIN EN 1991-1-4 ist die Randtiefe $1/10$ der Gebäudebreite oder $1/5$ der Gebäudehöhe. Der kleinere Wert ist maßgeblich.

Der o.a. Rand ist der Außenrand. Ergänzend existiert noch ein Innenrand mit 5-facher Tiefe. Im Innenrand existiert zwar kein stabiler Wirbel, andererseits ist die Luft dort noch sehr „aufgewühlt“ und nicht mit einer zur Dachoberfläche parallelen Strömung vergleichbar. Die Eckschenkel sind so tief wie der Außenrand und 2,5-mal so lang.

Zu 2.) Die Kräfte sind direkt abhängig von der Flächenart. Im Eck entstehen die höchsten Sogkräfte, gefolgt von Außenrand, Innenrand und Innenbereich.

Zu 3.) siehe „Basiswissen Windsog: Lagesicherung“ dieser Schriftenreihe

Nicht-quaderförmige Baukörper

Zur Bemessung nicht-quaderförmiger Gebäude betrachtet man Eck für Eck und Rand für Rand die Anströmung des Windes und schätzt ab, welche Art Wirbel zu erwarten sind und wie groß diese Wirbel werden können.

Für ein L-förmiges Gebäude ergibt sich die Zuordnung der Fassadenlängen wie folgt:

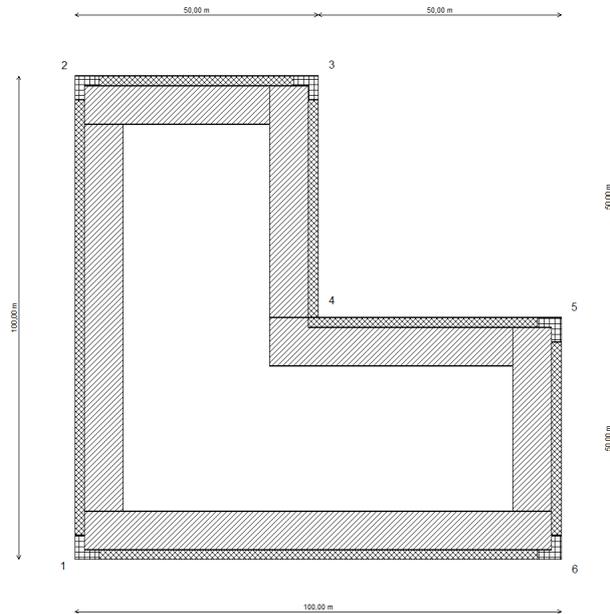


Bild 5: L-förmiger Grundriss (Quelle: MF Windsog)

Für Ecke 1 sind die Fassaden mit jeweils 100 m Länge maßgebend, da der von links-unten anströmende Wind auf das Dach umgelenkt wird und dort verwirbelt. Für die wirksamen Fassadenlängen an den Ecken gelten folgende Zuordnungen:

	waagrecht	senkrecht
Ecke 1	100 m	100 m
Ecke 2	50 m	100 m
Ecke 3	50 m	50 m
Ecke 4	Inneneck	
Ecke 5	50 m	50 m
Ecke 6	100 m	50 m

Da sich über der Innenecke kein tütenförmiges Wirbelpaar ausbildet, wird dort nur ein Rand ausgebildet. Im Innenbereich hinter dem Inneneck treten die geringsten Windsogkräfte auf.

Doch Vorsicht: Die o.a. Lösung gilt nicht für alle L-förmigen Grundrisse! Bei deutlich kleineren Innenschenkellängen (3 -> 4 und 4 -> 5) wird das Gebäude zu einem Quader und ist auch wie ein solcher zu bemessen. In diesem Fall sind alle Ecken wie Ecke 1 auszubilden.

Abgerundete Grundrisse, insbesondere zylindrische Gebäude, sind weniger kritisch, da mehr Wind um die Fassade geleitet wird und am Dach weniger Wirbel, insbesondere keine Eckwirbel, auftreten. Vorausgesetzt allerdings, die Rundungen sind groß genug.

Teilgebäude

Bei der Sanierung von Teildachflächen ist darauf zu achten, dass der Wind vom Auftragsvolumen des Dachdeckers keine Kenntnis hat. Die Bemessung muss immer mit dem realen Gebäudegrundriss, nicht mit den Maßen der zu sanierenden Teildachfläche, erfolgen! Im nachfolgenden Beispiel wären die maßgeblichen Gebäudelängen B und L_{ges} . Dadurch werden die 2 Ecken größer und die Ränder tiefer. Andererseits müssen am Übergang zur Bestandsdachfläche keine Ecken ausgebildet werden.

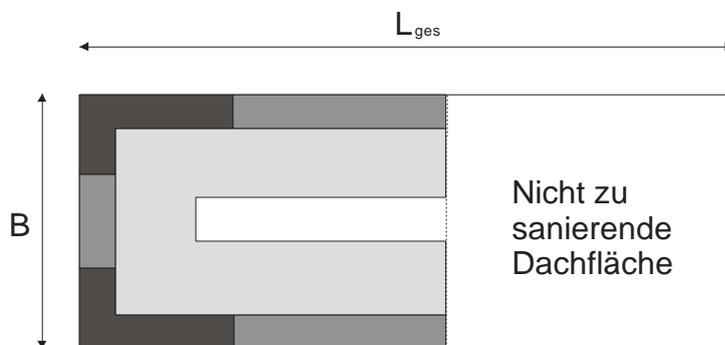


Bild 6: Bemessung von Gebäudeteilen

Auch bei der Bemessung eines Gebäudes, welches später planmäßig erweitert werden soll, sind u.U. die Endgebäudeabmessungen anzusetzen. Ohne diesen vorausseilenden Blick müsste nach Errichtung des zweiten Bauabschnitts der erste nachbefestigt werden. Ein i.d.R. recht aufwändiges Verfahren.

Aufgehende Gebäudeteile

Vor und hinter aufgehenden Gebäudeteilen bilden sich Luftwirbel. Bei Anströmung auf eine Wand bilden sich liegende, zylindrische Wirbel mit einem Durchmesser \leq der Wandhöhe.

Strömt der Wind von hinten um das aufgehende Bauteil herum, können sich 2 stehende, zylindrische Wirbel hinter der Fassadenkante bilden. Deren Durchmesser liegt typ. im Bereich von 1/10 der Fassadenbreite.

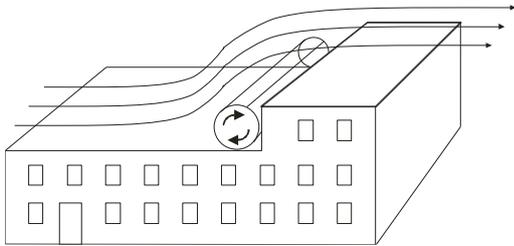


Bild 7a: Wirbel vor aufgehendem Gebäudeteil

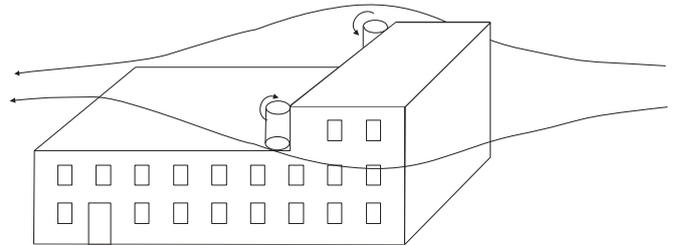


Bild 7b: Wirbel hinter aufgehendem Gebäudeteil

Bei Überströmung von rechts nach links (Bild 7b), kann sich hinter dem Aufbau ein liegender, zylindrischer Wirbel bilden, der jedoch die entgegengesetzte Drehrichtung des liegenden Wirbels in Bild 7a links hat.

Für die Bemessung sind alle möglichen Wirbelausbildungen zu überlagern und in Randbereiche umzusetzen. Der Randbereich sollte ungefähr so tief sein, wie die aufgehende Wand hoch ist.

Einen Sonderfall bilden aufgehende Gebäudeteile, welche höher als breit sind. Diese werden mit einem umlaufenden Rand in der halben Breite des aufgehenden Bauteils versehen. Stellt man sich die Verwirbelung an einem Kamin vor, wird klar, dass hier die Höhe nicht maßgeblich sein kann.

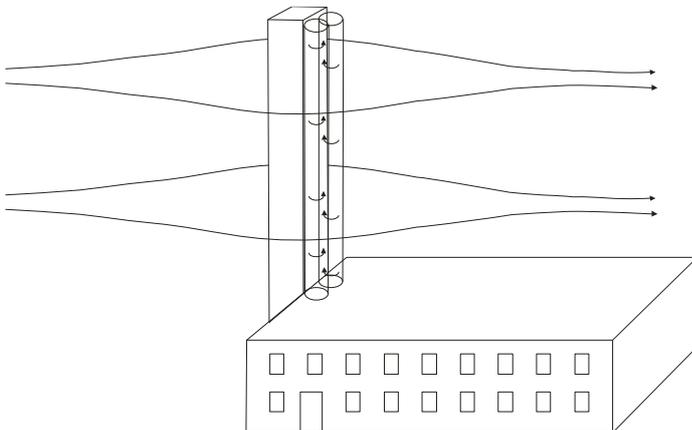


Bild: Wirbelbildung hinter hohen, schlanken Bauteilen

Eckbereiche sind um aufgehende Bauteile nicht einzusetzen, da sich i.d.R. keine tütenförmigen Wirbelpaare oder sonstige, vergleichbar kleine Wirbel bilden.

Windsogberechnung

Für Windkräfte an luftundurchlässigen* Oberflächen gilt die Formel

$$W = q * c_p * SF \quad [1]$$

Die Parameter haben folgende Bedeutung:

1. **W** ist der resultierende **Windsog**. Maßeinheit: kN / m² (= Kraft je Fläche)
2. Der **Staudruck q** repräsentiert den Druck, den der anströmende Wind ausübt.
Formel: $q = \frac{1}{2} * \rho * v^2$ mit $\rho = \text{Luftdichte} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ und $v = \text{Windgeschwindigkeit}$
3. Der **Formbeiwert cp** gibt an, wie sich der Staudruck auf Oberflächen auswirkt.
Am Dach gilt: In den Ecken ist der Formbeiwert groß, im Dachrandbereich mittel und im Mittenbereich am geringsten. Der Innendruck wirkt auf alle Teilflächen gleich.
Der Formbeiwert cp setzt sich aus c_{pe} (e = extern = von außen wirkend) und c_{pi} (Innendruckbeiwert) zusammen.
4. Der **Sicherheitsfaktor** stellt sicher, dass die Unterschiede von Theorie (Quader auf ebener Fläche) zu Praxis (komplexer Baukörper in realer Landschaft) ausgeglichen werden.
Für Wind muss der Sicherheitsfaktor lt. DIN EN 1990 auf **1,5** gesetzt werden.

Setzt man die ausführlichen Parameter ein, entsteht die Formel

$$W = \frac{1}{2} * (1,25 \text{ kg/m}^3) * v^2 * (c_{pe} + c_{pi}) * 1,5 \quad [2]$$

Formel [2] enthält zwar nur 3 veränderliche Werte (v , c_{pe} und c_{pi}), diese selbst sind jedoch von mehreren Parametern abhängig. Die **Windgeschwindigkeit v** ist abhängig von Windzone, Geländerauhigkeit und Gebäudehöhe. Die **Formbeiwerte** ergeben sich aus Dachform, Dachbereich (c_{pe}) und der Durchlässigkeit von Gebäudehülle und Tragdecke (c_{pi}). All diese Werte entnehmen wir der DIN EN 1991-1-4. Mit der Handhabung dieser Norm befasst sich der zweite Teil dieser Schriftenreihe.

Hinweis: Der mit **1,5** festgeschriebene **Sicherheitsfaktor** entstammt dem Sicherheitskonzept der DIN EN 1990 (Kapitel 6 und Anhang A1.2 (A)). Windeinwirkungen gelten in DIN EN 1991-1-4 Punkt 3.3 als „veränderliche, freie Einwirkungen“ und werden in DIN EN 1990 Punkt 4.1.1 den „veränderlichen Einwirkungen (Q)“ zugeordnet.

* Dachziegel/Dachsteine werden bei Windangriff angehoben. Dadurch kann hoher Luftdruck von der Unterseite des Ziegels nach außen entweichen. Der Ziegel fällt zurück und das Dach beginnt zu klappern. Da dieser Effekt den Windsog teilweise ausgleicht, sollten „Windeinwirkungen auf kleinformatige, hinterströmbare Dach- und Wandbekleidungen“ entsprechend den Fachregeln ausgeführt werden (DIN EN 1991-1-4/NA, NDP zu 1.1 (11) Anmerkung 1).

Teil 2: DIN EN 1991-1-4

Wiederholung Sogberechnung

Die Formel

$$\begin{aligned} W &= q * c_p * SF && [1a] \\ &= \frac{1}{2} * \text{Luftdichte} * v^2 * (c_{pe} + c_{pi}) * SF && [1b] \\ &= \frac{1}{2} * (1,25 \text{ kg/m}^3) * v^2 * (c_{pe} + c_{pi}) * 1,5 && [1c] \end{aligned}$$

ist allgemeingültige Physik und daher auch Grundlage für die DIN EN 1991-1-4. Die Formel gibt an, wie der Staudruck des Windes (q) auf die Dachfläche übertragen wird (c_p). In der DIN EN 1991-1-4 ist der c_p -Wert im Eck des Flachdaches für scharfkantige Gebäude mit 2,5 angegeben (Seite 40, Tabelle 7.2). Damit ist der Windsog im Eck 2,5-mal so hoch wie der Winddruck in Höhe des Flachdaches. Der Sicherheitsfaktor SF wird fest mit 1,5 angewendet und stellt sicher, dass die Unterschiede zwischen Theorie und Praxis ausgeglichen werden.

Zur Bemessung eines Daches lt. DIN EN 1991-1-4 benötigen wir

- 1.) den Staudruck q in Höhe der Dachfläche
- 2.) die Formbeiwerte c_{pe} für Eck, Außenrand, Innenrand und Innenbereich
- 3.) den Innendruckbeiwert c_{pi}
- 4.) die Flächeneinteilung des Daches (Ecken, Randbereiche, Innenbereich)

Staudruck

Der Staudruck q ergibt sich aus der Windgeschwindigkeit v ($q = \frac{1}{2} \cdot \text{Luftdichte} \cdot v^2$). Die Windgeschwindigkeit v wiederum ist abhängig von Gebäudehöhe, Windzone und Geländerauhigkeit.

Die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe resultiert aus der Luftreibung an der Erdoberfläche. Aufgrund der Reibung ist die Windgeschwindigkeit in Bodennähe geringer als weiter oben. Mit zunehmender Höhe nimmt dieser Effekt ab. Wie stark der Effekt wirkt, ergibt sich aus der Geländerauhigkeit. Über dem Meer ist die Bodenreibung am geringsten, in Innenstädten mit eng aneinander gebauten Hochhäusern am größten.

Die DIN EN 1991-1-4 unterscheidet fünf Geländekategorien, wobei für Deutschland die Geländekategorie 0 nicht zu berücksichtigen ist. Aus den restlichen vier werden die Mischprofile Nordseeinseln (GK 1), Küstennahe Gebiete (GK 1 und 2) und Binnenland (GK 2 und 3).

Geländekategorie I: Offene See, Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse.

Geländekategorie II: Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z.B. landwirtschaftliches Gebiet.

Geländekategorie III: Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder.

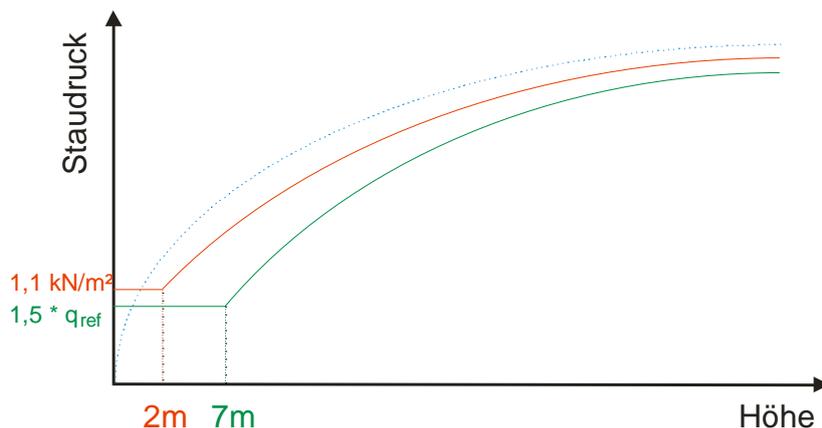


Bild 1: Windprofile für Inseln der Nordsee und Binnenland

Der nationale Anhang DIN EN 1991-1-4/NA bildet in Abschnitt B.3.3 die Zusammenhänge von Höhe und Geländerauhigkeit zur Windgeschwindigkeit in mehreren Formeln ab. Ab einer Höhe von 2 m (Inseln der Nordsee), 4 m (küstennahe Gebiete) oder 7 m (Binnenland) errechnet sich der höhenabhängige Staudruck mit Exponentialfunktionen. Für geringere Höhen wird der Staudruck direkt angegeben, da die Exponentialfunktionen (Bild 1, blaue Linie) zu Windstille an der Erdoberfläche führen würden. Da dies erfahrungsgemäß nicht sein kann und ernahe Verwirbelungen von den Formeln nicht erfasst werden können, ist dieses Vorgehen sinnvoll.

Die Exponentialfunktionen beziehen sich auf einen Bezugsstaudruck q_{ref} in 10 m Höhe, welcher seinerseits von der Windzone abhängt.

Den Bezugsstaudruck q_{ref} entnimmt man der Windzonenkarte in Anhang NA.A1. Diese weist 4 Windzonen auf:

- | | |
|---|--|
| 1. Süddeutschland | ($v_{ref} = 22,5 \text{ m/s} \rightarrow q_{ref} = 0,32 \text{ kN/m}^2$) |
| 2. Norddeutschland, westl. NRW, Voralpenland | ($v_{ref} = 25,0 \text{ m/s} \rightarrow q_{ref} = 0,39 \text{ kN/m}^2$) |
| 3. Nordsee-Küstenregion, nördl. Mecklenburg... | ($v_{ref} = 27,5 \text{ m/s} \rightarrow q_{ref} = 0,47 \text{ kN/m}^2$) |
| 4. Nordsee, Nordseeküste, Fehmarn, nördl. Rügen | ($v_{ref} = 30,0 \text{ m/s} \rightarrow q_{ref} = 0,56 \text{ kN/m}^2$) |

Beispielrechnung 1

Gebäudestandort: Stuttgart
Geländekategorie: Binnenland
Gebäudehöhe: 16 m

Aus dem Gebäudestandort ergibt sich die Windzone = 1, der Referenzstaudruck $q_{ref} = 0,32 \text{ kN/m}^2$
Der Staudruck am Dach berechnet sich lt. DIN EN 1991-1-4/NA Seite 18, Formel NA.B.2, wie folgt:

$$\begin{aligned} q &= 1,7 * q_{ref} * (h / 10)^{0,37} \\ &= 1,7 * 0,32 \text{ kN/m}^2 * (16\text{m} / 10\text{m})^{0,37} \\ &= 0,647 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Formbeiwerte am Flachdach

Die Formbeiwerte am Flachdach (Dachneigung $< 5^\circ$) sind für 4 Dachbereiche zu ermitteln:
Eck, Außenrand, Innenrand und Innenbereich.

Die Länge und Breite der Bereiche ergeben sich aus dem Wert e , welcher das Minimum von windwirksamer Fassadenbreite und doppelter Gebäudehöhe darstellt.

$$e = \text{Minimum}(2 * h, b)$$

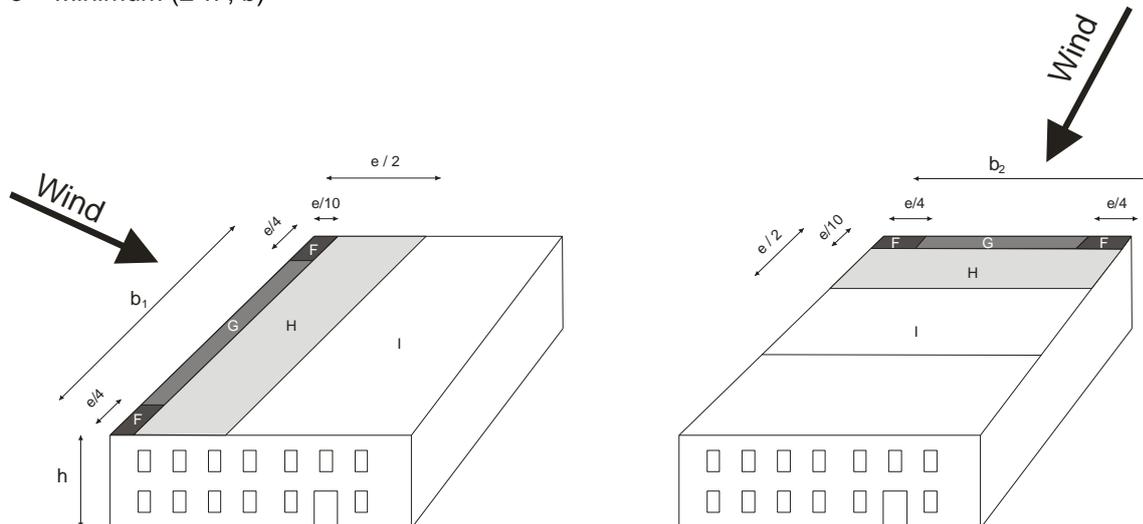


Bild 2: Dachbereichseinteilung

Beispiel:

Gebäudehöhe = 8 m, Gebäudelänge $b_1 = 32 \text{ m}$, Gebäudebreite $b_2 = 10 \text{ m}$

Bei Anströmung auf b_1 : $e = \min(2 * 8 \text{ m}, 32 \text{ m}) = 16 \text{ m}$

Bei Anströmung auf b_2 : $e = \min(2 * 8 \text{ m}, 10 \text{ m}) = 10 \text{ m}$

Aus den 2 Werten für e ergeben sich für die Längs- und Breitseite unterschiedliche Randtiefen und Eckschenkellängen. Die jeweiligen Werte können mit den Angaben aus Bild 2 bestimmt werden.

Durch Überlagerung aller 4 Windanströmrichtungen ergibt sich die Gesamtbereichseinteilung.

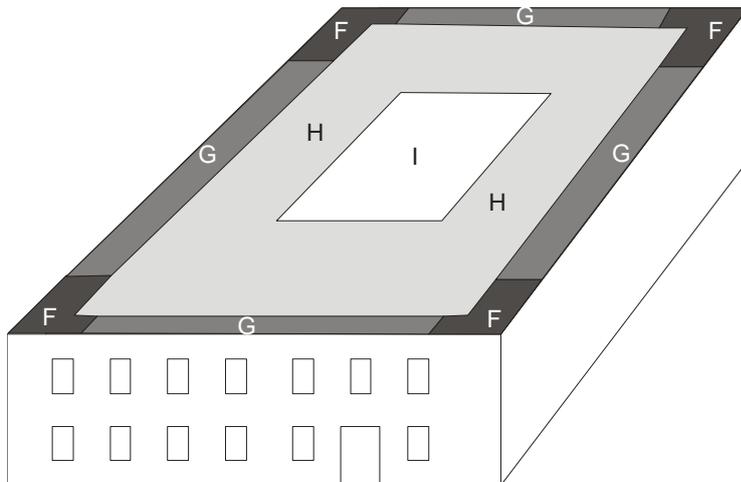


Bild 3: Dachflächeneinteilung nach Überlagerung

Für die Bemessung eines Flachdaches mit luftundurchlässiger Tragdecke müssen nur noch die Formbeiwerte aus Tabelle 7.2 (Seite 40) entnommen werden. Es gelten die Werte in der Spalte $cp_{e,1}$, da die Lasteinzugsfläche für Dachbauschrauben $< 1 \text{ m}^2$ ist.

Hintergrundinfo Lasteinzugsfläche:

Wenn der Wind mit seinen Wirbeln an einer Oberfläche saugt, tut er dies an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark. Evtl. bilden sich an einer Oberfläche sogar mehrere Wirbel. Der Randwirbel bildet starken Sog nahe der Dachkante. Weiter innen strömen die Gasteilchen in Richtung der Dachoberfläche und können dort sogar Druck bewirken. Je größer eine Oberfläche, desto besser ist die Lastverteilung, da sich Bereiche mit mehr bzw. weniger Sog auf ein Mittelmaß ausgleichen. Dieser Ausgleich kann aber nur wirken, wenn die zugehörigen Lasteinzugsflächen mind. 1 m^2 , idealerweise $> 10 \text{ m}^2$, groß und ausreichend aussteift sind. Dies ist bei Dachbahnen nicht der Fall. Die Lasteinzugsfläche je Dachbauschraube ist $\leq 0,5 \text{ m}^2$ (wg. Mindestanzahl 2 Befestiger / m^2 aus der Fachregel) und eine Dachbahn ist nicht starr genug um die unterschiedlichen Sogkräfte ausgemittelt auf die einzelnen Schrauben zu verteilen. Daher gilt für die Bemessung von Dachbauschrauben immer der Wert $cp_{e,1}$!

Beispielrechnung 2

Gebäudestandort: Hannover
Geländekategorie: Binnenland
Gebäudehöhe: 8 m

Aus dem Gebäudestandort ergibt sich die Windzone = 2 mit Referenzstaudruck $q_{ref} = 0,39 \text{ kN/m}^2$.
Der Staudruck am Dach berechnet sich lt. DIN 1991-1-4/NA, Seite 18, Formel (NA.B.2) wie folgt:

$$\begin{aligned}q &= 1,7 * q_{ref} * (h / 10)^{0,37} \\ &= 1,7 * 0,39 \text{ kN/m}^2 * (8\text{m} / 10\text{m})^{0,37} \\ &= 0,61 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Formbeiwert* cp im Eck: F = 2,5
im Außenrand: G = 2,0
im Innenrand: H = 1,2
im Innenbereich: I = 0,6 (DIN 1991-1-4/NA, Seite 8, NCI zu 7.2.3)

Sicherheitsfaktor SF = 1,5

Mit Formel [1a] ($W_{sog} = q * cp * SF$) berechnet sich der Windsog für die 4 Dachbereiche wie folgt:

$$\begin{aligned}W_{eck} &= 0,61 \text{ kN/m}^2 * 2,5 * 1,5 \\ &= 2,29 \text{ kN /m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{Rand \text{ außen}} &= 0,61 \text{ kN/m}^2 * 2,0 * 1,5 \\ &= 1,83 \text{ kN /m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{Rand \text{ innen}} &= 0,61 \text{ kN/m}^2 * 1,2 * 1,5 \\ &= 1,10 \text{ kN /m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{innen} &= 0,61 \text{ kN/m}^2 * 0,6 * 1,5 \\ &= 0,55 \text{ kN /m}^2\end{aligned}$$

*Anmerkung: Alle Formbeiwerte werden, tlw. entgegen der Originalschreibweise, ohne Vorzeichen dargestellt.

Dachrandausbildung

Hinter der Attika bildet sich ein Wirbel, welcher nur dann die Dachoberfläche erreichen kann, wenn er größer als die Höhe der Attika ist. Daher schützen Attiken insbesondere vor den kleinen Eckwirbeln und Wirbeln direkt an der Außenkante. Diesen Umstand berücksichtigt die DIN 1991-1-4 in Tabelle 7.2 (Seite 40). Dort werden, abhängig vom Verhältnis (Attikahöhe h_p / Gebäudehöhe h), verringerte c_{p_e} -Werte für Dächer mit Attiken angegeben.

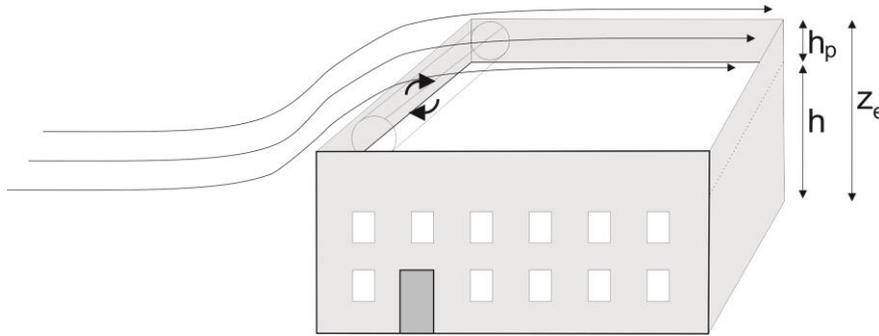


Bild 4: Wirbelbildung hinter Attika

Dächer mit abgeschrägten oder abgerundeten Dachkanten sind strömungstechnisch ebenfalls günstiger als scharfkantige Dachrandausbildungen. An Rundungen und schrägen Traufen „knickt“ der Luftstrom weniger scharf ab und führt zu einer sanfteren Umströmung der Traufe. Diese verhindert kleine Wirbel und die damit verbundenen, hohen Soglasten.

Innendruck

Bei Gebäuden mit luftdurchlässiger Tragdecke ist der Innendruck zu berücksichtigen. Die DIN EN 1991-1-4 unterscheidet beim Innendruck 3 Gebäudehüllentypen: geschlossen, durchlässig und offen.

- Geschlossen ist ein Gebäude bei einem Öffnungsanteil der Außenwände $< 1\%$. Verschließbare Fenster, Türen und Tore gelten nicht als Öffnung, sofern diese bei Sturm nicht betriebsbedingt geöffnet werden müssen (Rettungsdienste, Notaufnahme Krankenhaus...).
- Der Innendruckbeiwert c_{p_i} für geschlossenen Gebäude ist 0.
- Ausnahme: luftdurchlässige Tragdecken erhöhen c_{p_i} auf 0,2 (Siehe Basiswissen Windsog, Teil 1)
- Offen sind Gebäude bei denen mind. eine Wand fehlt oder die Fassade an 2 Wandflächen zu mehr als 30 % offen ist. In diesen Fällen ermittelt man den Kraftbeiwert aus Tabelle 7.6 und 7.7.
- Durchlässige Gebäude sind alle Fälle zwischen offen und geschlossen.

Der Innendruckbeiwert durchlässiger Gebäude errechnet sich aus dem Verhältnis der windangeströmten Öffnungen zu den Gesamtöffnungen. Das ist sinnvoll, da die windparallele und windabgewandten Öffnungen den Innendruck abbauen. Bei völlig gleichmäßig verteilten Öffnungen wird der Innendruckbeiwert zu ca. 0,15.

Sind alle Öffnungen zu einer Windanströmung hin gerichtet, nimmt der Innendruckbeiwert durchlässiger Gebäudehüllen sein Maximum von 0,35 an. Zwischen gleichverteilten und 1-seitigen Öffnungen wird der c_{p_i} -Wert über den Hilfwert μ ermittelt:

$$\mu = (\text{windparallele} + \text{windabgewandte Öffnungen}) / \text{Gesamtöffnungsfläche} \quad [2]$$

In Bild 7.13 (DIN EN 1991-1-4, Seite 54) kann der c_{p_i} -Wert über dem μ -Wert abgelesen werden. Die Bereiche mit negativem c_{p_i} entstehen durch Anströmungen mit höherem windabgewandtem als windzugewandtem Flächenanteil. Diese sind für uns irrelevant, da der Wind um 180° drehen kann und damit der windzugewandte Öffnungsanteil wieder überwiegt. Im Faktor h/d (Höhe zu Breite) wird ausgedrückt, dass Öffnungen in Türmen ($h/d > 1$) weniger Einfluss auf den c_{p_i} -Wert haben, als bei einem Flachbau ($h/d \leq 0,25$). Im nachfolgenden Bild 5 sehen Sie eine vereinfachte Darstellung.

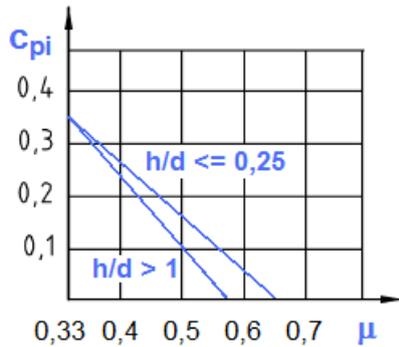


Bild 5: Innendruckbeiwert bei luftdurchlässiger Fassade

An Bild 5 erkennt man, dass der c_{pi} -Wert nicht unter ca. 0,1 sinken kann ($\mu = 0,5$ und $h/d > 1$). Beide Kurven enden bei einem μ -Wert von 0,35. Höhere Werte sind nur möglich, wenn die windzugewandten Öffnungen mindestens doppelt so groß wie die parallel und abgewandt liegenden Öffnungen sind. In diesem Fall liegt eine „dominante Fläche“ vor, bei welcher der c_{pi} -Wert mit $0,75 \cdot c_{pe}$ des betroffenen Fassadenbereiches berechnet wird. Sind die Öffnungen der dominanten Fläche 3 x so groß wie die der restlichen Fassaden, wird $c_{pi} = 0,9 \cdot c_{pe}$.

Beispielrechnung 3

Gebäudestandort:	Husum
Geländekategorie:	küstennahes Gebiet
Gebäudehöhe:	12 m
Öffnungsflächen gesamt:	32 m ²
größte windzugewandte Öffnungsflächen:	20 m ²

Aus dem Gebäudestandort ergibt sich die Windzone = 4 mit Referenzstaudruck $q_{ref} = 0,56 \text{ kN/m}^2$. Der Staudruck am Dach berechnet sich lt. DIN EN 1991-1-4/NA Seite 19, Formel NA.B.5 wie folgt:

$$q = 2,3 \cdot q_{ref} \cdot (h / 10)^{0,27} = 2,3 \cdot 0,56 \text{ kN/m}^2 \cdot (12\text{m} / 10\text{m})^{0,27} = 1,35 \text{ kN/m}^2$$

Formbeiwert c_p im Eck:	F = 2,5
im Außenrand:	G = 2,0
im Innenrand:	H = 1,2
im Innenbereich:	I = 0,6 (DIN 1991-1-4/NA, Seite 8, NCI zu 7.2.3)

Innendruckbeiwert lt. Formel [2]: $\mu = 12 \text{ m}^2 / 32 \text{ m}^2 = 0,375$

Aus Bild 5: $c_{pi} = 0,28$

Sicherheitsfaktor $SF = 1,5$

Mit Formel [1a] [$W_{sog} = q \cdot (c_{pe} + c_{pi}) \cdot SF$] berechnen sich die Windsogkräfte in den 4 Dachbereichen wie folgt:

$$W_{\text{Eck}} = 1,35 \text{ kN/m}^2 \cdot (2,5 + 0,28) \cdot 1,5 = 5,63 \text{ kN /m}^2$$

$$W_{\text{Rand außen}} = 1,35 \text{ kN/m}^2 \cdot (2,0 + 0,28) \cdot 1,5 = 4,62 \text{ kN /m}^2$$

$$W_{\text{Rand innen}} = 1,35 \text{ kN/m}^2 \cdot (1,2 + 0,28) \cdot 1,5 = 3,0 \text{ kN /m}^2$$

$$W_{\text{innen}} = 1,35 \text{ kN/m}^2 \cdot (0,6 + 0,28) \cdot 1,5 = 1,78 \text{ kN /m}^2$$

Steildächer

Dächer mit einer Dachneigung $\geq 5^\circ$ gelten als Steildächer. Unterschieden werden Pultdach, Satteldach, Walmdach, Sheddach, gekrümmte Dächer und Kuppeln. Schmetterlings- und Trogdächer sind dabei eine Variante des Satteldaches. Sheddächer basieren auf Pult- oder Satteldach mit Abminderungsfaktoren für die innenliegenden Sheddachflächen. Mischformen wie Krüppelwalmdächer, Mansarddach, Berliner Dach (straßenseitig Mansarde, hofseitig Flachdach) u.s.w. sind aus den Grundformen abzuleiten.

Eine Beschreibung der Flächenaufteilung samt Interpretation der zugehörigen Formbeiwerte möchte ich hier nicht durchführen. Zum einen sind alle Angaben in der DIN EN 1991-1-4 ausführlich nachzulesen, zum anderen wäre die Flächenbildung durch Überlagerung der Teildachflächen bei bis zu 9 Teilflächentypen viel zu komplex, als dass hierbei noch eine manuelle Lösung machbar wäre. Interessierte können sich unter www.friedrich-datentechnik.de eine Test-Version von MF_Steildach herunterladen. Diese führt die Berechnung samt Flächenaufteilung, Überlagerung und Optimierung vollautomatisch durch und stellt die Ergebnisse grafisch dar.

Achtung: Wie bereits in Teil 1 dieser Schriftenreihe erwähnt, fallen deutsche Ziegeldächer nicht in den Geltungsbereich der DIN EN 1991-1-4, da es sich hierbei um „kleinformatige, hinterströmbare Dach- und Wandbekleidungen“ nach DIN EN 1991-1-4/NA NDP zu 1.1 (11) Anmerkung 1 handelt.
Metalldächer, Wellplattendächer und mit Dachbahnen abgedichtete Steildächer sind zwingend nach DIN EN 1991-1-4 zu bemessen.

Anmerkung

Diese Schriftenreihe wendet sich an Leser, welche sich zum ersten Mal mit dem Thema Windsog am Dach beschäftigen. Daher habe ich einige Details nicht vertieft oder schlicht und einfach unter-schlagen. Dinge wie Vorzeichen bei Formbeiwerten, standzeitabhängige Sicherheitsfaktoren u.a.m. habe ich der einfachen Lesbarkeit geopfert. Profis werden um ein detailliertes Studium der Original-Norm nicht herumkommen.