Lagesicherheit leichter Dachkonstruktionen im Wind

H. Hirtz

In den letzten Jahrzehnten wurden in zunehmendem Maße neue Dachsysteme entwickelt, deren Lagesicherheit im Wind sich nicht mehr ausschließlich aufgrund konstruktiver Erfahrung beurteilen läßt. Soweit ein Versagen dieser Systeme zu einer Gefährdung der öffentlichen Sicherheit oder Ordnung bzw. zu erheblichen wirtschaftlichen Nachteilen führen kann, ist neben ihrer Trag-sicherheit auch ihre Lage-sicherheit (insbes. die Sicherheit gegen Abheben oder Kippen) zu untersuchen.

1. Lagesicherheit, Kräfte, Sicherheitsbeiwerte

Die Lagesicherheit von Dachkonstruktionen im Wind läßt sich rechnerisch durch Vergleich der einwirkenden Kräfte (bzw. ihrer Wirkungen) mit der Tragfähigkeit der Kostruktion nach folgender Gleichung ermitteln:

$$\Sigma \gamma_F \cdot \text{einwirkende Kräfte} \leq \frac{1}{\gamma_M} \cdot \text{Tragfähigkeit der Konstruktion}$$

Die einzelnen Größen sind in Bild 1 erläutert.

Die einwirkenden Kräfte sind hier Windlast und Eigenlast. Bei Leichtdächern, die in der Regel als Flachdach ausgebildet sind, wirkt die Windlast in Form von Sog abhebend auf die Dachfläche. Unter bestimmten Bedingungen ist zusätzlich ein im Gebäudeinnern auftretender Überdruck in die Sicherheitsbetrachtung einzubeziehen. Zur Eigenlast des betrachteten, vom Wind beaufschlagten Bauteils können die Eigenlasten aller ausreichend sicher angeschlossenen Bauteile darunter sowie der aufliegenden „Ballastkörper" zugerechnet werden. Bei Bauteilen mit merklich schwankendem Feuchtegehalt ist dabei eine angemessene untere Fraktile anzusetzen. Unter der Tragfähigkeit der Konstruktion ist beim Abhebenachweis die Tragfähigkeit der Verbindungen (z. B. Bolzen, Schrauben, Nägel, Kleber) zu verstehen, die das betrachtete Bauteil mit der jeweils tragenden Unterkonstruktion verbinden. Betrachtet man die Lagesicherheit frei aufliegender Bauteile, so ist die rechte Seite der Ungleichung also Null.

Die Wahl der Sicherheitsbeiwerte wird durch verschiedene Erwägungen beeinflußt. Der Teilsicherheitsbeiwert der ungünstig wirkenden Windlast hängt wesentlich von der „Genauigkeit" ab, mit der die Windwirkung erfaßt wird. Ferner ist zu berücksichtigen, welcher charakteristische Wert der Windgeschwindigkeit (Auftretenswahrscheinlichkeit) der Berechnung zugrunde gelegt wird. Wegen der Vielzahl der Einflußparameter ist im Einzelfall die Entscheidung über den Sicherheitsbeiwert schwierig. Im allgemeinen wird $\gamma_{f,\,wind} = 1{,}3$ für ausreichend gehalten. Für die günstig wirkende Eigenlast dürfte ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_g = 0{,}9$ im allgemeinen angemessen sein. Der Beiwert der Tragfähigkeit hängt von den Eigenschaften der Verbindungsmittel – im wesentlichen von der Streuung der Festigkeit – ab.

Schließlich sind die möglichen Schadensfolgen von Einfluß auf die Wahl des Sicherheitsbeiwertes. Man wird also unterscheiden zwischen Lagesicherheitsuntersuchungen

des Dach-Tragsystems
und
der Dach-Eindeckung
(Abdichtung, Isolierung usw.)

Für Tragwerke gültige Sicherheitsbeiwerte sind in technischen Regelwerken angegeben. Im DIN-Normenwerk z. B. in DIN 1052 (Holzbauwerke) und DIN 18 800 Teil 1 (Stahlbauten). Für Untersuchungen an der Eindeckung können diese Sicherheitsbeiwerte zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führen. Es ist daher erwünscht und wegen der geringeren möglichen Schadensfolgen auch vertretbar, geringere Sicherheitsbeiwerte anzusetzen. Damit begibt man sich jedoch auf eine „Gratwanderung". Während zu hohe Sicherheitsbeiwerte unwirtschaftliche Lösungen ergeben, können zu niedrige zu unvertretbaren Schadensraten führen. Über die angemessene „Kalibrierung" der Sicherheitsbeiwerte kann nur die Bewährung der Konstruktion in der Praxis Auskunft geben. Aus diesen Gründen ist die Aussagekraft rein rechnerischer Untersuchungen begrenzt. Da die Ergebnisse von Sicherheitsüberlegungen bei Dacheindeckungen dem Anwender ohnehin nur in Form handwerklicher Regeln zugänglich gemacht werden können, fällt der Gebäudeaerodynamik und der Sicherheitstheorie in diesem Zusammenhang die Rolle von Hilfswissenschaften zu. Durch Aufzeigen der grundsätzli-

RECHNERISCHE UNTERSUCHUNG DER LAGESICHERHEIT IM WIND

$$\boxed{\Sigma \gamma_F \cdot \text{EINWIRKENDE KRÄFTE} \leq \frac{1}{\gamma_M} \cdot \text{TRAGFÄHIGKEIT DER KONSTRUKTION}}$$

WINDSOG
MIT IM MITTEL: $\gamma_W = 1{,}3$
EIGENLAST
MIT IM MITTEL: $\gamma_G = 0{,}9$
(EINSCHL. "AUFLASTEN": $G = G_1 + G_2 + \ldots$)

BRUCH- ODER REISSFESTIGKEIT DER VERBINDUNGEN ("VERANKERUNGEN") Z.B. DER BOLZEN, SCHRAUBEN, NÄGEL, KLEBER
MIT IM MITTEL: $\gamma_M = 1{,}7$ BIS $3{,}0$

BEISPIEL: ABHEBENACHWEIS NACH DIN 1055 TEIL 4 NEU (IN VORBEREITUNG) BEI BERÜCKSICHTIGUNG DER SOGSPITZEN

$$1{,}1 \cdot \text{SOGWIRKUNG} - 0{,}9 \cdot \text{WIRKUNG DER EIGENLAST} = \frac{1}{1{,}3} \cdot \text{GRÖSSTE VOM VERBINDUNGSMITTEL AUFNEHMBARE KRAFT}$$

Bild 1.

Dipl.-Ing. H. Hirtz
Baudirektor im Institut für Bautechnik, Berlin

chen Zusammenhänge können sie wertvolle Aussagen über die Richtigkeit von Konzepten zur Lagesicherung von Dacheindeckungen im Wind liefern. Sie ermöglichen es, die Wirksamkeit konstruktiver Maßnahmen zu beurteilen und tragen damit wesentlich zu einer gezielten Weiterentwicklung der Dachsysteme bei. In diesem Sinne wollen die folgenden Ausführungen verstanden werden.

2. Windlasten, Versagensmechanismen

Überlegungen zur Lagesicherheit haben bei den Windwirkungen am Dach zu beginnen. Diese Wirkungen sollen mit der einfachsten Formel über die Verteilung der äußeren Drücke am Bauwerk

$$\text{Windlast } w = c_p \cdot q$$

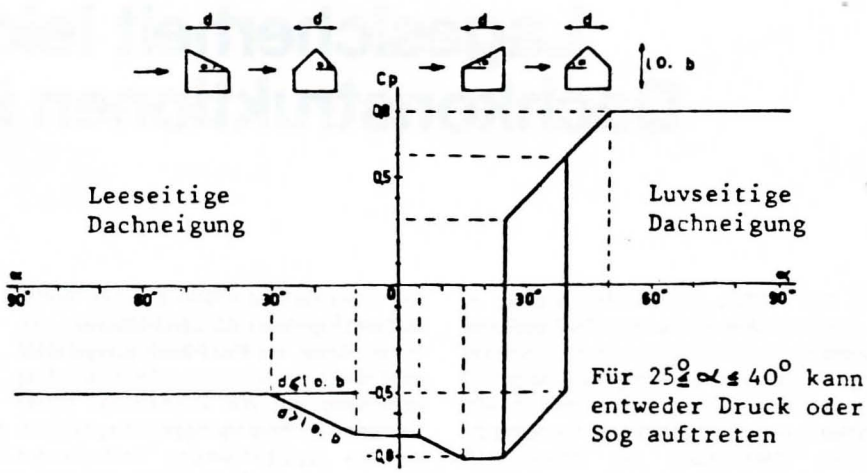
beschrieben werden. Dabei erfaßt der aerodynamische Druckbeiwert c_p den Einfluß der Baukörperform und der Art der Anströmung (insbesondere auch der Anströmrichtung), der

$$\text{Staudruck } q = \frac{v^2}{1600}\ \text{kN/m}^2$$

den Einfluß der Windgeschwindigkeit (d. h. der meteorologischen Gegebenheiten). Für beide Größen gelten komplizierte Abhängigkeiten von vielen Parametern. Die Anwendung des vorhandenen Wissens hierüber im Bauwesen setzt radikale Vereinfachungen voraus. Für den Anwender muß jedoch erkennbar bleiben, welche maßgebenden Parameterkombinationen im jeweiligen Bemessungsfall zum ungünstigsten Ergebnis führen. Der Grad der Vereinfachung hängt von der „Empfindlichkeit" des jeweils betrachteten Problems ab. So werden im allgemeinen die tatsächlich räumlich und zeitlich veränderlichen Windwirkungen mit ihren Extremwerten als zeitlich unveränderlich aufgefaßt und in ihrer Verteilung am Bauwerk mit aerodynamischen Beiwerten erfaßt, die über Teilflächen räumlich gemittelt sind. In kritischen Fällen sind auch örtliche Spitzenwerte zu berücksichtigen. Wo Materialermüdungen zum Versagen führen, muß auch auf die zeitliche Veränderlichkeit der Windwirkungen eingegangen werden. Auch der Versagensmechanismus spielt also in diesem Zusammenhang eine Rolle.

Um zu erläutern, wie sich beim Übergang vom Steildach zum Flachdach die Akzente hinsichtlich der Lagesicherheit im Wind verschieben, soll nachstehend lediglich der Einfluß der Dachneigung auf die Druck-Sog-Verteilung am Dach gezeigt werden. Für diese Erläuterungen werden die Angaben der Europäischen Konvention der Stahlbauverbände (E.C.C.S.) in ihren „Empfehlungen zur Berechnung der Windwirkungen an Bauwerken" im folgenden Bild benutzt (Bild 2).

Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß bei Dachneigungen über 40° und Anströmung senkrecht zum First Sog nur in Lee



Aerodynamische Druckbeiwerte für geneigte Dächer (nach E.C.C.S.-Recommendations "Wind Effects")

Bild 2.

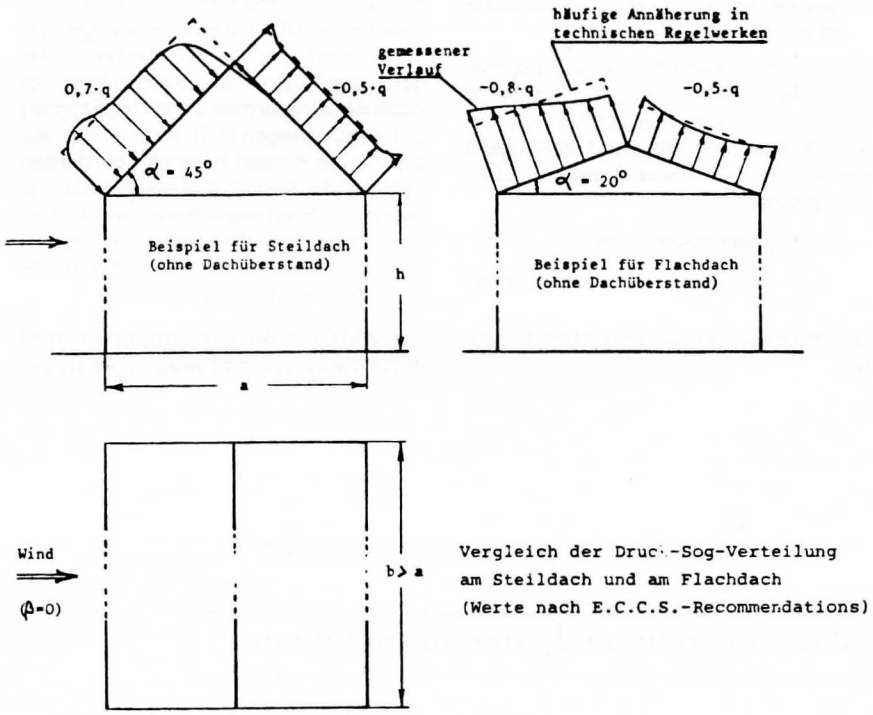
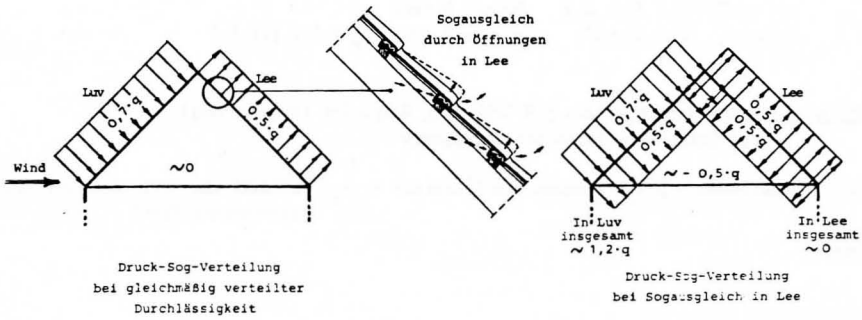


Bild 3.



ABBAU DER SOGBELASTUNG BEI ÖRTLICHER SOGÜBERLASTUNG AM ZIEGELGEDECKTEN STEILDACH

Bild 4.

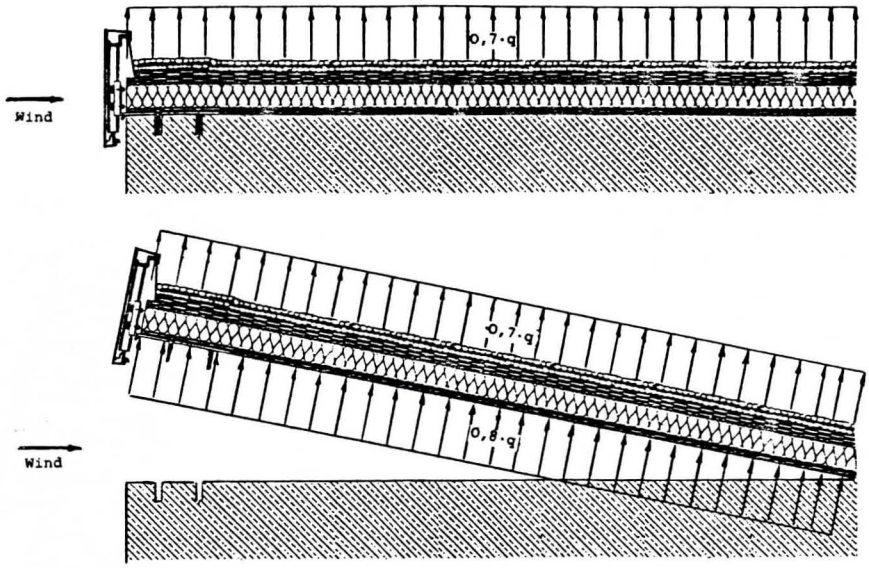
auftritt. Mit abnehmender Dachneigung ändern sich die Verhältnisse in Lee nicht, während in Luv zunächst ein Bereich unstabiler Strömungsverhältnisse erreicht wird, in dem Druck oder Sog auftreten kann. Von etwa 30° an abwärts ist der Sog in Luv höher als in Lee. Das folgende Bild veranschaulicht diese Veränderung mit zwei Beispielen (Bild 3).

Daraus ergeben sich entscheidende Folgerungen für die Lagesicherheit der beiden Dachformen. Beim Steildach, üblicherweise ziegelgedeckt, ist jeder Ziegel oben gelagert und durch Reibungsschluß bzw. Klammern gehalten. Bei Sogüberlastung in Lee können die Ziegel an ihrem unteren Ende angelüftet werden, wodurch ein Druckausgleich zwischen dem Dachinnenraum und dem äußeren Sog und damit ein Abbau des auf die Ziegel wirkenden resultierenden Soges erreicht wird. Dieser Druckausgleich wird schließlich vollständig erreicht, wenn einzelne Ziegel in Lee herausgerissen werden. Dadurch wird die leeseitige Eindeckung entlastet und die luvseitige hat den gesamten Winddruck aufzunehmen. Diese Lastumlagerung wird im folgenden Bild schematisch dargestellt (Bild 4).

Das Steildach hat also eine begrenzte Möglichkeit, sich bei Sogüberlastung wieder zu stabilisieren.

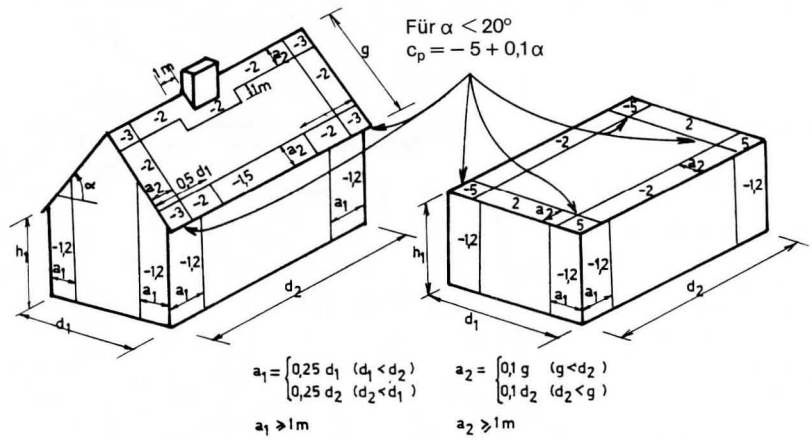
Das Flachdach dagegen wird bei einer Sogüberlastung in Luv, d.h. an der dem Wind zugewandten Seite angehoben. Dadurch vergrößert sich die abhebende Last, weil sich unter der angehobenen Fläche von unten nach oben wirkend Druck von etwa 0,8 q aufbaut. Diesen Vorgang zeigt das folgende Bild (Bild 5). Ein derartiges Dach kann nicht mehr standhalten und wird abgehoben.

Die Schadensstatistik hat ergeben, daß mit abnehmendem Dacheigengewicht neben den vorstehend erwähnten räumlich gemittelten Werten auch örtliche Spitzenwerte bei der Untersuchung der Lagesicherheit zu berücksichtigen sind. Sie bilden sich vor allem bei Anströmung über Eck aus. Das folgende Bild (Bild 6) zeigt, daß Sogspitzen insbesondere an den Dachecken auftreten und mit abnehmender Dachneigung anwachsen. Bei Gebäuden, die eine Öffnung besitzen oder an bestimmten Stellen geöffnet werden können, wird sich der Druck oder Sog im Inneren aufbauen, der an der Außenfläche im Bereich der Öffnung herrscht. Bei Gebäuden mit einer starken Gliederung des Innenraumes durch Dekken und Trennwände wird dies kaum Auswirkungen auf das Dach haben. Anders liegen die Verhältnisse z.B. bei Hallen ohne Unterteilung des Innenraumes, wie dies bei Hangars der Fall ist. Hier sollte bei



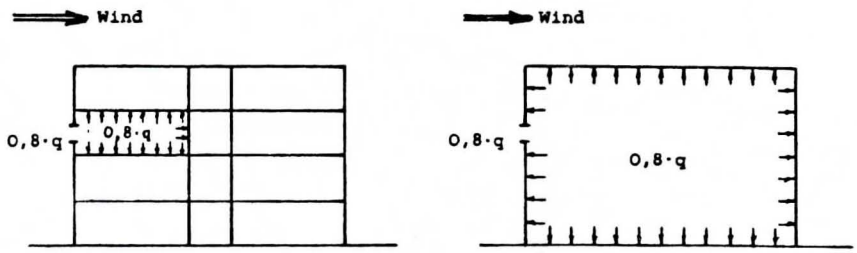
WINDLASTERHÖHUNG BEI ABHEBEN EINES FLACHDACHES IN LUV
(schematisch dargestellt an der Eindeckung)

Bild 5.



Aerodynamische Beiwerte für die örtlichen Sogspitzen
– jeweiliger Größtwert für die ungünstigste Anströmrichtung –
(nach E.C.C.S.-Recommendations "wind Effects")

Bild 6.



Gebäude mit Unterteilung des Innenraumes durch Decken und Trennwände (Öffnung in Luv)

Gebäude ohne Unterteilung des Innenraumes (Öffnung in Luv)

Einfluß des Innendrucks infolge Wind auf die Lagesicherheit von Dächern

Bild 7.

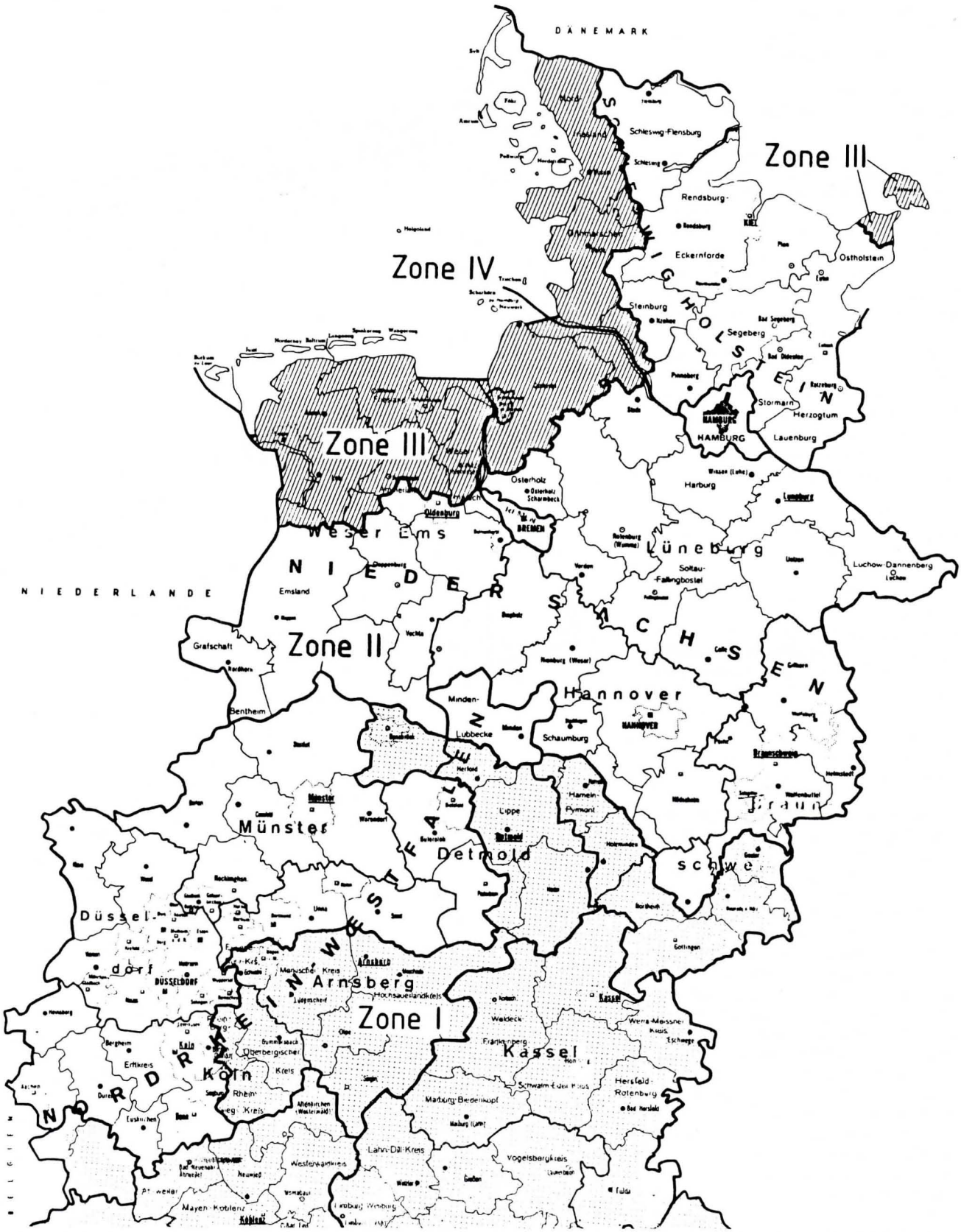

DÄNEMARK
NIEDERLANDE
Zone I
Zone II
Zone III
Zone IV
SCHLESWIG-HOLSTEIN
NIEDERSACHSEN
NORDRHEIN-WESTFALEN
Schleswig-Flensburg
Rendsburg-
Eckernförde
Ostholstein
Steinburg
Segeberg
Stormarn
Herzogtum
Lauenburg
HAMBURG
Harburg
Osterholz
BREMEN
Oldenburg
Weser Ems
Lüneburg
Soltau-Fallingbostel
Luchow-Dannenberg
Emsland
Grafschaft
Bentheim
Hannover
Minden-
Lübbecke
Schaumburg
Hameln-Pyrmont
Lippe
Detmold
Münster
Braun
schwei
Düssel-
dorf
DÜSSELDORF
Arnsberg
Kassel
Köln
Erftkreis
Bergheim
Oberbergischer
Kreis
Rhein-
Sieg-Kreis
Euskirchen
Hersfeld-
Rotenburg
Marburg-Biedenkopf
Lahn-Dill-Kreis
Vogelsbergkreis
Westerwaldkreis
Neuwied
Mayen-Koblenz
Koblenz
Fulda
Waldeck
Frankenberg
Werra-Meissner-Kreis
Eschwege
Hochsauerlandkreis
Meschede
Olpe
Siegen
Gießen
Wetzlar
Limburg
Lauterbach
Alzey
Bad Kreuznach
Kaiserslautern
Pirmasens
Trier
Bitburg
Daun
Cochem
Mayen
Ahrweiler
Altenkirchen
Westerwald
Bad Neuenahr
Ahrweiler
Bad Kreuznach
Kaiserslautern
Pirmasens
Trier
Bitburg
Daun
Cochem
Mayen
Ahrweiler
Altenkirchen
Westerwald
Bad Neuenahr
Ahrweiler

Bild 8.

der Lagesicherheitsuntersuchung des Daches ein Innendruck von 0,8 · q berücksichtigt werden (Bild 7).

Der Berechnungswert des Staudruckes q erfaßt die geographischen Gegebenheiten und die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe über Gelände sowie der Geländebeschaffenheit. In einigen Ländern wurden Karten mit Berechnungswerten der Windgeschwindigkeit gleicher Auftretenswahrscheinlichkeit veröffentlicht. In der Bundesrepublik gilt für Hochbauten seit 1938 nach DIN 1055 Teil 4 (Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke) unabhängig vom Bauwerksstandort ein Bezugswert. Diese Festlegung wird auch mit der Neuausgabe dieser Norm übernommen. Der Bezugswert hat in Abhängigkeit vom Bauwerksstandort innerhalb der Bundesrepublik unterschiedliche Auftretenswahrscheinlichkeit. Eine vom Deutschen Wetterdienst in den letzten Jahren durchgeführte Untersuchung hat ergeben, daß bei einer Einteilung der Bundesrepublik in vier Bereiche für den genannten Wert folgende mittlere Auftretenswahrscheinlichkeiten zu erwarten sind:

Zone I (Binnenland)
einmal in 50 Jahren

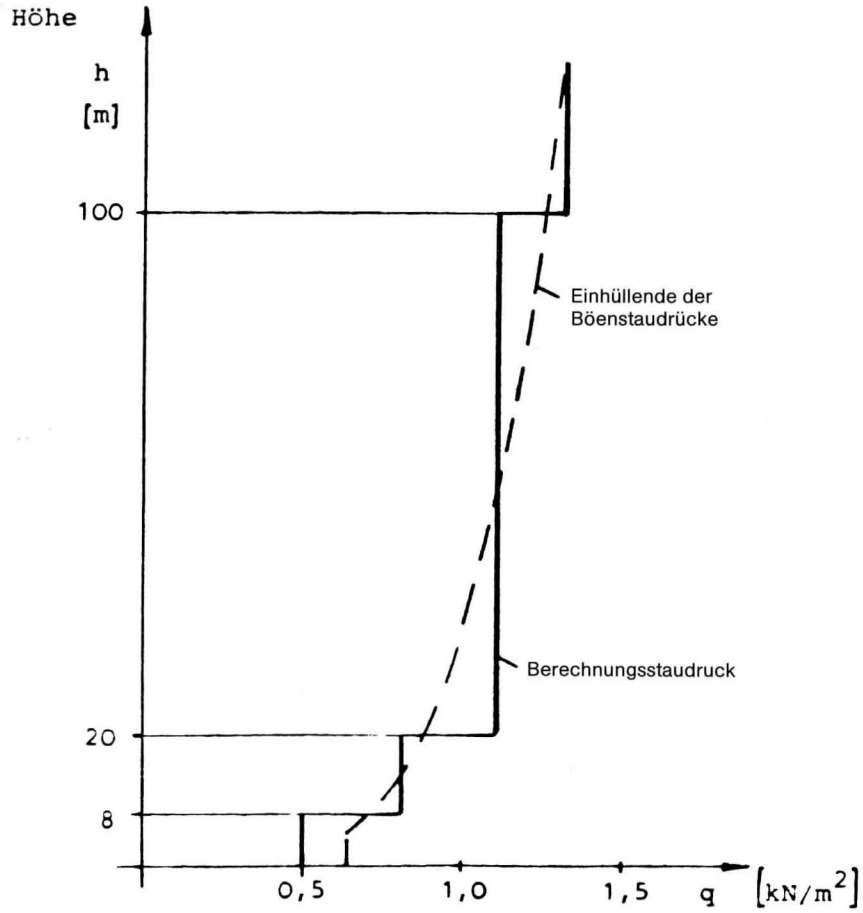
Zone II (Nordwestdeutsche Tiefebene)
einmal in 10 Jahren

Zone III (Küstenbereich)
einmal pro Jahr

und Zone IV (vor der Küste)
zehnmal pro Jahr

Im Binnenland muß ab 500 m Höhe über N.N. ein Ansteigen der Auftretenswahrscheinlichkeit angenommen werden. Die folgende Karte mit Angabe der vier Zonen wurde als Anhang zu DIN 1056 – Frei stehende Schornsteine in Massivbauart – im Oktober 1984 veröffentlicht (Bild 8).

Die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit und damit des Staudrucks wird häufig mit einem Exponentialgesetz oder einem logarithmischen Gesetz beschrieben. Nach DIN 1055 Teil 4 gilt die im folgenden Bild dargestellte „Treppenlinie" als Berechnungsgrundlage. Diese Linie ist eine für die Rechentechnik der 30er Jahre vereinfachte Annäherung an eine Einhüllende aller wahrscheinlichen Böenprofile. Ein Einfluß der Geländerauhigkeit wird in der Bundesrepublik nicht berücksichtigt (Bild 9).



ABHÄNGIGIGKEIT DES BERECHNUNGSSTAUDRUCKS VON DER HÖHE ÜBER GELÄNDE NACH DIN 1055 TEIL 4

Bild 9.

3. Konzepte zur Lagesicherung

Nach den vorstehenden Ausführungen läßt sich die Lagesicherheit von Belägen auf Flachdächern im Wind gewährleisten durch

a) ausreichende Befestigung oder Belastung

b) Berücksichtigung der örtlichen Sturmintensität und der Exposition des Daches (Höhe über Gelände)

Eine Befestigung oder Belastung der Beläge hat sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Lagesicherheit je nach dem Bereich am Dach, in dem diese Maßnahmen durchgeführt werden. Sie lassen sich wie folgt bewerten:

1. Größte Bedeutung hat eine Befestigung der Beläge am Rand des Daches. Soweit die Bauart dies zuläßt, sollte hier eine kraftschlüssige Einspannung ausgeführt werden, zumindest ist aber durch „Verwahren" konstruktiv dafür Sorge zu tragen, daß der Wind nicht unter die Dacheindeckung fassen kann.

2. Erhöhte Aufmerksamkeit hinsichtlich der Lagesicherung beansprucht ferner der sogenannte Randbereich, d. h. ein Streifen der Breite etwa b/8 entlang des Randes. Dabei ist b die kürzere Grundrißseite. Innerhalb des Randstreifens ist besondere Sorgfalt im ecknahen Bereich bei der Aufnahme der Sogkräfte notwendig.

3. Schließlich ist der Restbereich der Dachfläche zu nennen, bei dem kaum Schäden durch Sogwirkung zu erwarten sind, wenn die anderen Bereiche dem Windangriff standhalten.

Die Lagesicherheit läßt sich auch durch die Gestaltung des Bauwerks (z. B. Brüstungen, Windpflüge) beeinflussen. Dem sind nicht zuletzt aus ästhetischen Gründen Grenzen gesetzt.

Ordnungsschema für Angaben zur Lagesicherung von Dachabdichtungen bei Wind

Baustoffe		Maßnahmen						
		in der Innenfläche			im Randstreifen			
Abdichtungsfolie	Untergrund	Kleber Baustoff, Art des Klebers	Nagel Art, Anzahl/m²	Auflast Baustoff kg/m²	Kleber Baustoff, Art des Klebers	Nagel Art/Anzahl/m²	Auflast Baustoff kg/m²	am Rand
Bituminöse Abdichtungsbahnen	Holz, Holzwerkstoffe							
	Beton							
	Gasbeton							
	Stahltrapezprofile							
PVC – weich Folien	Holz, Holzwerkstoffe							
	Beton							
	Gasbeton							
	Stahltrapezprofile							
Polyisobutylenfolien	Holz, Holzwerkstoffe							
	Beton							
	Gasbeton							
	Stahltrapezprofile							

Bild 10.

4. Angaben für den Anwender

Die erwähnten Maßnahmen zur Lagesicherung beeinflussen sich gegenseitig, so daß eine umfassende Aussage über ihre Wirksamkeit nur durch Beurteilung des Gesamtsystems gegeben werden kann, bestehend aus

tragendem Unterbau
(Material: z. B. Brettschalung, Stahlbeton, Gasbeton, Stahltrapezprofile, jeweils unter Erfassung ihrer Winddichtigkeit)

Zwischenlagen
(z. B. Lochglasflies zum Dampfdruckausgleich, Wärmedämmung)

Abdichtungsfolie
(z. B. Bitumenbahnen, PVC weich, Polyisobutylen)

Randkonstruktion
(z. B. Randverwahrung, Einklebung, Einklemmung)

Ausbildung des Randstreifens
(z. B. Nagelung, Klebung, Belastung)

Auflast
(z. B. Kies, Betonplatten).

Musterhafte Gesamtkonstruktionen sollten eingehend beschrieben und mit ihren Einzelheiten nach einem einheitlichen Schema dargestellt werden. Einen Vorschlag für ein tabellarisches Ordnungsschema enthält Bild 10. Durch Angabe von Musterkonstruktionen soll die Anwendung anderer gleichwertiger Lösungen nicht ausgeschlossen werden. In der Bundesrepublik sollten diese Angaben entsprechend der unterschiedlichen Sturmintensität zugeschnitten sein auf eine Normalsituation, die den Zonen I und II entspricht und eine verstärkte Ausbildung entsprechend den Verhältnissen in den Zonen III und IV.

Während sich die Elemente des Steildaches aufgrund jahrhundertelanger Erfahrung herausgebildet haben, hat es im Bereich des Leicht- und Flachdaches in den letzten Jahrzehnten eine stürmische Entwicklung gegeben. Neuerungen gab es nicht nur hinsichtlich der verwandten Baustoffe, sondern auch bei ihrer Kombination in Dacheindeckungssystemen. Sämtliche für den Anwender wichtigen Eigenschaften dieser Konstruktionen lassen sich kaum noch vom einzelnen beurteilen. Daher hat sich auch in den letzten Jahren zum Nutzen aller Beteiligten die Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachrichtungen bei der Entwicklung dieser Konstruktionen verstärkt. Ergebnisse derartiger Zusammenarbeit wurden bereits in die Flachdachrichtlinien des Zentralverbandes des Deutschen Dachdeckerhandwerkes und der Bundesfachabteilung Bauwerksabdichtung aufgenommen. Es bietet sich an, derartige Ergebnisse auch im Rahmen des DIN-Normenwerkes mit DIN 18531 – Dachabdichtungen – dem Anwender zugänglich zu machen.