



FAKULTÄT FÜR
BAUINGENIEURWESEN

DR.-ING. M. KASPERSKI

PRIVAT-DOZENT
FÜR ENTWURFSGRUNDLAGEN
IM KONSTRUKTIVEN INGENIEURBAU

Extremwertanalyse der
Windgeschwindigkeiten für das Gebiet der
Bundesrepublik Deutschland

- Zusammenfassung -

gefördert durch das Deutsche Institut für Bautechnik DIBt
Az.: IV 12-5-3.79-897/99

1. Ausgangssituation und Ziel der Untersuchung

Im Rahmen der Umsetzung des Eurocode 1 Teil 2.4 Windlasten erarbeitet der Normungsausschuß Bauwesen NABau 00.02.03 z.Zt. eine neue Ausgabe der DIN 1055 Teil 4. Im Gegensatz zur bisher gültigen Norm wird in der Neuausgabe für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland eine Windzonenkarte veröffentlicht, in der die anzusetzenden Windgeschwindigkeiten für den Bauwerksentwurf in Abhängigkeit der geographischen Lage angegeben werden. Im Anhang des Eurocode-Dokumentes findet sich bereits ein Vorschlag für eine Windzonenkarte (Bild 1), die - wie auch im Normungsausschuß diskutiert wurde - insbesondere folgende Unzulänglichkeiten aufweist:

- vermutlich falsche Zuordnung einzelner Stationen (z.B. Rostock und Bremen in gleicher Windzone wie Düsseldorf)
- Sprünge der Zahlenwerte zu den Nachbarländern (z.B. Dänemark 27.0, Deutschland 32.0)
- berücksichtigter Beobachtungszeitraum nur bis 1980, d.h. es stehen 20 Jahre weitere Daten zur Verfügung
- Unklarheit über den methodischen Ansatz zur Festlegung der Zahlenwerte

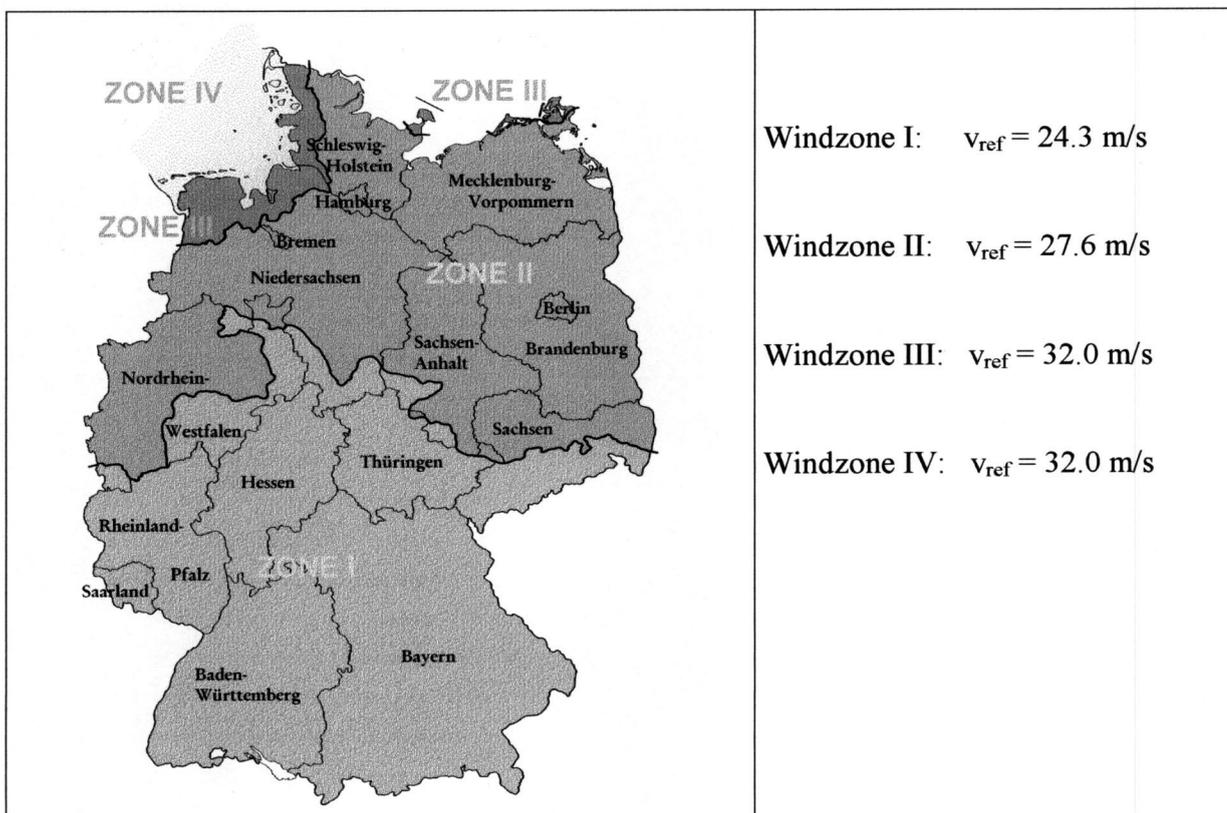


Bild 1: Aktuelle Fassung der Windzonenkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (Eurocode 1, Teil 4, 1995)

2. Methodik und Ergebnisse

Der erste Schritt in Rahmen der extremwertstatistischen Auswertung besteht in der Identifikation statistisch und physikalisch unabhängiger Starkwindereignisse. Extreme Windverhältnisse sind in Deutschland insbesondere mit außertropischen Zyklonen bzw. Sturmtiefs verbunden. Ein zweites wesentliches Starkwindphänomen tritt in Form von Gewitterstürmen in Erscheinung. Als weiterer Sturmtyp sind konvektive Prozesse, die insbesondere an der Sturmtieffront auftreten können und zu zusätzlichen hohen Böenwindgeschwindigkeiten führen, zu erfassen.

Zur Separierung der drei Starkwindphänomene werden Schwellenwerte definiert, und zwar ein erster Schwellenwert für die mittlere Windgeschwindigkeit v_m , ein zweiter Schwellenwert für die Böengeschwindigkeit v_b und ein dritter Schwellenwert für den Quotienten aus Böengeschwindigkeit und zugehöriger mittlerer Windgeschwindigkeit; dieser Quotient wird auch als Böfaktor Bu bezeichnet. Im einzelnen gelten dann folgende Identifikationskriterien:

Sturmtief:	$v_m > v_{m,gr}$	und	$Bu < Bu_{gr}$
Gewitter:	$v_m < v_{m,gr}$	und	$v_b > v_{b,gr}$
Böenfront:	$v_m > v_{m,gr}$	und	$Bu > Bu_{gr}$

Für den Vergleichswert des Böfaktor Bu_{gr} wird dabei einheitlich ein Wert von 1.8 verwendet. Ein sinnvoller unterer Wert für die mittlere Windgeschwindigkeit in einem Sturmtief ist 14 m/s, für die Böenwindgeschwindigkeit wird ein unterer Wert von 22.4 m/s angesetzt.

Für die weitere Analyse werden die Böengeschwindigkeiten der Gewitter bzw. der Böenfronten mittels eines einheitlichen Böfaktors in eine mittlere Windgeschwindigkeit eines äquivalenten Sturmtiefs überführt. Dieser Schritt wird notwendig, um im Rahmen der Normung zu einer einheitlichen Grundlage für alle Sturmphänomene zu gelangen. Als maßgebender Böfaktor wird $Bu = 1.6$ verwendet.

Böenspitzen werden pro Tag aufgezeichnet. Die mit der oben beschriebenen Methode identifizierten Gewitter und Böenfronten sind somit zwangsläufig unabhängige Ereignisse. Für die identifizierten Sturmtiefs ergibt sich dagegen die Notwendigkeit, aus der identifizierten Anzahl von Starkwindstunden voneinander unabhängige Sturmereignisse zu separieren. Hierbei ist ein Auf- und Abschwelen der Sturmintensität zu berücksichtigen. Während eines länger andauernden Sturmes können sowohl Phasen mit Windgeschwindigkeiten oberhalb als auch unterhalb des Schwellenwertes aufeinander folgen. Ist der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Windgeschwindigkeiten oberhalb des Schwellenwertes kleiner als maximal 12 Stunden, werden beide Sturmstunden dem selben Sturm zugeordnet. Ist ein größerer Zeitabstand gegeben, hat sich eine neue Tiefdruckfront ausgebildet, die von der vorhergehenden weitestgehend unbeeinflusst ist. Jeder Tiefdrucksturm geht mit dem zugehörigen maximalen Stundenmittelwert $v_{m,max}$ in die Extremwertstatistik ein. Alle übrigen Stunden eines Sturmtiefes mit $v_m < v_{m,max}$ werden nicht weiter berücksichtigt. Wie sich zeigen läßt, ist diese Vorgehensweise gestattet, wenn die weiteren Sturmstunden eines Sturmtiefs im statistischen Mittel kleiner als die

stärkste Sturmstunde sind. Dies trifft für das Windklima in Deutschland zu. Eine Berücksichtigung der Dauer eines Sturmes würde dagegen erforderlich, wenn - wie z.B. bei tropischen Wirbelstürmen - das Niveau der stärksten mittleren Windgeschwindigkeit über mehrere Stunden erhalten bleibt.

Alle Sturmereignisse werden für die Tiefdruckstürme, die Gewitter und die Böenfronten in einer eigenen Stichprobe zusammengefaßt und mittels einer Reihenfolgestatistik mit aufsteigender Windgeschwindigkeit (Urliste) ausgewertet. Eine Beschränkung auf die Jahresextremwerte genügt dabei nicht. Vielmehr zeigen die vorliegenden Winddaten, daß Tiefdruckstürme nicht isoliert als einzelnes extremes Ereignis innerhalb eines längeren Zeitraums auftreten, sondern häufig in einer Gruppe von mehreren extremen Stürmen beobachtet werden. In Jahren mit größerer Sturmhäufigkeit kann dann der zweit- oder drittstärkste Sturm des Jahres die Maximalwerte der angrenzenden Jahre deutlich übertreffen, so daß eine Vernachlässigung dieser Ereignisse zu einer Verfälschung der Extremwertstatistik führt.

Als grundlegendes Modell für die Extremwertverteilung der Windgeschwindigkeiten wird eine Extremwertverteilung Typ III verwendet. Nach einer Anpassung des theoretischen Modells an die beobachteten Spuren der Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit können mit den identifizierten Parametern die 98%-Fraktilwerte und die 99.9%-Fraktilwerte ermittelt werden. Dabei ist die Schätzung der 99.9% infolge der Extrapolation um mehr als eine Größenordnung (Extrapolation auf Überschreitenswahrscheinlichkeit 1/1000 bei Beobachtungszeitraum von wenigen Dekaden) mit merklichen statistischen Unsicherheiten behaftet. Eine unmittelbare Verifikation des Teilsicherheitsfaktors für Windlasten als Quadrat des Quotienten 99.9%-Fraktile zu 98%-Fraktile ist somit auf der Grundlage der Roh-Schätzungen einer Station nicht möglich.

Eurocode 1, Teil 2.4 Windlasten führt explizit in seinem Hauptteil einen Richtungsfaktor c_{DIR} ein, der es erlaubt, richtungsabhängige Windlasten herzuleiten. Üblicherweise werden Sektoren von 30° unterschieden. Grundsätzlich akkumuliert sich für ein Sturmphänomen die beobachtete richtungsunabhängige Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit einer bestimmten Windgeschwindigkeit aus den einzelnen Sektorbeiträgen in Form des Produktes der Beiträge aus den einzelnen Richtungen. In der Vergangenheit wurden vielfach Gutachten erstellt, mit dem Ziel, den charakteristischen Wert $v_{ref, i}$ mit $p = 0.98$ unabhängig für jede Windrichtung i zu ermitteln. Bei Akkumulation über z.B. zwölf 30° -Sektoren ergibt sich dann eine Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit von $0.98^{12} = 0.785$, d.h. ein erheblich zu kleiner Wert.

Die Überschreitenswahrscheinlichkeit der richtungsscharfen Windlast ergibt sich streng genommen nicht nur aus dem Starkwindklima, d.h. der Richtungsabhängigkeit der Starkwindereignisse, sondern auch aus der Aerodynamik des Baukörpers, d.h. der Richtungsabhängigkeit der aerodynamischen Koeffizienten in Form von Druck- oder Kraftbeiwerten. Eine Trennung dieses Zusammenhanges in zwei unabhängige Richtungseinflüsse ist nicht allgemeingültig, d.h. für beliebige Baukörper, möglich. Statt dessen wird üblicherweise eine konservative Näherung eingeführt, bei der die Überschreitenswahrscheinlichkeit der richtungsabhängigen Windgeschwindigkeit gegenüber der richtungsunabhängigen verringert wird. Bei diesem Ansatz wird aus jeder Windrichtung die gleiche Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit gefordert. Verwendet man als Ausgangswert für $p(v \leq v_{ref})$ den charakteristischen Wert 0.98, führt der obige Zusammenhang bei

der üblichen Einteilung in 30°-Sektoren auf den Zielwert von $0.98^{1/12} = 0.9983$ für die anzusetzende Windgeschwindigkeit in jedem Sektor.

Grundlage der Untersuchung bilden die an den Stationen des Deutschen Wetterdienstes aufgezeichneten meteorologischen Daten. Es wurde eine Auswahl von 183 Stationen getroffen, die eine für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland flächendeckende und repräsentative Übersicht des Starkwindklimas liefert. Pro Tag stehen üblicherweise 24 Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit sowie die mittlere Windrichtung zur Verfügung. Zusätzlich sind pro Tag die maximale Böenwindgeschwindigkeit sowie der zugehörige Zeitpunkt mit Stunde und Minute angegeben. Die Daten liegen in elektronischer Form vor.

Für die statistische Auswertung werden gleichartige Stationen in Gruppen zusammengefaßt. Die Gruppenbildung erfolgt unter der Bedingung, daß sich die Spuren der Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Stationen merklich durchmischen, d.h. die gemeinsame Spur soll insbesondere im oberen Ast bei den hohen Windgeschwindigkeiten von allen beteiligten Stationen beeinflußt sein. Die Umsetzung dieser relativ scharfen Forderung führt dann für 183 Einzelstationen zur Bildung von 20 Dreiergruppen und 35 Zweiergruppen. 53 verbleibende Stationen lassen sich nicht in Gruppen zusammenfassen und verbleiben in der Einzelauswertung.

Bei einzelnen Stationsgruppen werden merkliche Krümmungen der Spuren beobachtet, andere Stationsgruppen zeigen dagegen keine Krümmung der Spuren. Da die identifizierten Krümmungen statistisch praktisch nicht abgesichert sind, wird auf eine Extrapolation über die 98%-Fraktile hinaus im Rahmen der Auswertungen für die Erarbeitung einer Windzonenkarte in Abstimmung mit der Betreuergruppe verzichtet.

Für die Einteilung in Windzonen wird eine Schrittweite von 2.5 m/s gewählt. Als kleinster Wert für die charakteristische Windgeschwindigkeit ergibt sich 22.5 m/s. Insgesamt ergeben sich 5 Windzonen, deren charakteristische Werte der mittleren Windgeschwindigkeit sowie des zugehörigen mittleren Windgeschwindigkeitsdruck in Tabelle 1 zusammengefaßt sind.

Tabelle 1: Charakteristische Werte der mittleren Windgeschwindigkeit und des zugehörigen Geschwindigkeitsdrucks

Windzone	I	II	III	IV	V
vm [m/s]	22.5	25.0	27.5	30.0	32.5
qm [kN/m ²]	0.32	0.39	0.47	0.56	0.66

Die Zusammenfassung in Windzonen orientiert sich an der naturräumlichen Gliederung Deutschlands sowie den Bezirks- oder Gemeindegrenzen. Die Aufarbeitung der Ergebnisse erfolgt einerseits graphisch in einer Windzonenkarte, andererseits tabellarisch in

einer Liste, in der für alle Bundesländer die Windzonen nach Bezirken und Gemeinden zugeordnet werden.

Die Auswertungen der Richtungsabhängigkeit der Windgeschwindigkeiten zeigen, daß eine Aufarbeitung der Ergebnisse für die Normung im Sinne der Herleitung von Richtungsfaktoren nicht möglich ist. Die Aufarbeitung der Richtungsabhängigkeit wurde daher in Abstimmung mit der Betreuergruppe nicht weiter verfolgt.

3. Windzonenkarte

Bild 2 zeigt die Verteilung der gewählten Windzonen über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland.



Bild 2: Neue Windzonenkarte Bundesrepublik Deutschland

4. Wertung für die praktische Anwendung

Die neu erarbeitete Windzonenkarte stellt gegenüber dem alten Vorschlag eine wesentliche Verbesserung dar. Dies liegt zunächst an der umfangreichen Datenbasis, die gegenüber der Vorläufer-Auswertung i.d.R. mindestens 20 weitere Jahre Beobachtungszeitraum umfaßt. Zum anderen erfolgte die Auswertung nach einer in sich konsistenten und modernen Methodik der Extremwertstatistik, die eine zuverlässige Ermittlung der charakteristischen Werte der Windgeschwindigkeit in Form der 98%-Fraktilen ermöglicht.

Dagegen ist eine Überprüfung des in DIN 1055 Teil 100 für die Einwirkungen infolge Wind empfohlenen Teilsicherheitsfaktors von 1.5 ist auf der Grundlage der Datenbasis nicht möglich. Die beobachteten Krümmungen der Spuren der Nicht-Überschreitungswahrscheinlichkeiten erweisen sich als nicht konsistent und erscheinen daher eher zufälligen Charakter zu haben. Eine Extrapolation auf den Entwurfswert in Form der 99.9%-Fraktile ist daher nicht ohne weitere Verfeinerungen der statistischen Methoden sinnvoll.

Für die richtungsabhängige Auswertung der Windgeschwindigkeiten wird eine konsistente Methode vorgestellt, welche die Herleitung von Richtungsfaktoren erlaubt. Die Auswertung der Richtungsabhängigkeit des Starkwindklimas zeigt eine merkliche Ausprägung insbesondere für den Sturmtyp Sturmtief. Grundsätzlich ergeben sich für alle ausgewerteten Stationen für diesen Sturmtyp Beschränkungen auf wenige 30°-Sektoren, wobei die Daten den Schluß nachlegen, daß ein Sturmtief nicht mit starken Windgeschwindigkeiten aus östlichen Richtungen verbunden ist. Eine normmäßige Aufbereitung der Richtungsabhängigkeit ist allerdings nicht sinnvoll, da sich die Richtungsabhängigkeit viel stärker räumlich ändert als die Windgeschwindigkeit. Somit ist es nicht möglich, für eine Windzone eine einheitliche Regelung für die Richtungsabhängigkeit zu treffen. Eine Regelung im Sinne einer Einhüllenden für mehrere Stationen ist dabei nicht zweckmäßig, da mindestens ein 90°-Sektor mit der maximalen Windgeschwindigkeit zu beaufschlagen wäre und dann der Vorteil eines richtungsabhängigen Modells unmittelbar verloren geht.

Gegenüber dem alten Vorschlag der Windzonenkarte ergeben sich mit dem neuen Arbeitsergebnis erhebliche Unterschiede. Zunächst erfolgt eine Aufteilung in fünf Windzonen. Diese Verfeinerung erscheint insbesondere sinnvoll, um das besonders günstige Windklima in der Zone I zu erfassen. Die Reduktion der Windlast gegenüber dem alten Vorschlag beträgt dabei 15%. Die Einordnung von Gebieten in Deutschland in Windzonen führt mit dem neuen Vorschlag für viele Standorte zu einer günstigeren Beurteilung des Windklimas. So wird z.B. für den Ballungsraum Rhein-Ruhr die Windlast um 50% verringert.

5. Projektleitung, Sachbearbeitung, Mitglieder der Betreuergruppe

Projektleitung

PD Dr.-Ing. M. Kasperski
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bauingenieurwesen
44780 Bochum

Sachbearbeitung

Dr.-Ing. N. Hölscher

Dipl.-Ing. U. Versen

Betreuergruppe

Von seiten des DIBt wurden folgende Betreuer des Forschungsvorhabens benannt:

Dipl.-Ing. V. Häusler
Deutsches Institut
für Bautechnik
Postfach 620229
10792 Berlin

Dr.-Ing. M. Hortmanns
RWTH Aachen
Institut für Stahlbau
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

Professor Dr.-Ing. U. Peil
TU Braunschweig
Institut für Stahlbau
Beethovenstraße 51
38016 Braunschweig

Auf Wunsch des Projektleiters wurde zusätzlich vom
Deutschen Wetterdienst als weiterer Betreuer eingeladen:

Dipl.-Met. J. Schorlemmer
Deutscher Wetterdienst
Postfach 100465
63004 Offenbach