

# Zuverlässigkeitsbeurteilung von Gerüsten unter Windeinwirkung

**T 1790**

T 1790

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

10.29  
**CERRAM**

---

CONSULTING ENGINEERS FOR  
RELIABILITY AND RISK  
ASSESSMENT AND MANAGEMENT

**ZUVERLÄSSIGKEITSBEURTEILUNG  
VON GERÜSTEN UNTER  
WINDEINWIRKUNG**

München, November 1986

CERRAM / IfB 1

**INHALTSVERZEICHNIS**

|  | Seite |
|--|-------|
| Kurzfassung  | iii   |
| Abstract   | iii   |
| Résumé   | iii   |
| Inhaltsverzeichnis   | iv    |
| 1. EINFÜHRUNG  | 1     |
| 2. DATEN ÜBER GERÜSTBENUTZUNG                                | 2     |
| 3. PROBABILISTISCHES MODELL DER GERÜSTEINSATZ-<br>GESCHICHTE | 2     |
| 4. MODELL DER WINDEINWIRKUNG                                 | 6     |
| 5. ANALYSE UND ERGEBNISSE                                    | 8     |
| 5.1 Theoretischer Hintergrund                                | 8     |
| 5.2 Numerische Durchführung der Analyse                      | 11    |
| 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN  | 16    |
| 7. LITERATUR   | 17    |

## KURZFASSUNG

Ein stochastisches Modell für die Zuverlässigkeitsermittlung von Gerüsten sowie Bauwerken unter Montagezuständen unter Windeinwirkung wurde entwickelt. Als direktes Ergebnis konnte der die reduzierte Nutzungsdauer dieser Konstruktionen reflektierende und bereits in den Normen verwendete Lastabminderungsfaktor  $\chi$  bestimmt bzw. statistisch untermauert werden. Die Analyse wurde für einfach- sowie wiederverwendbare Gerüstkonstruktionen durchgeführt.

Schlagwörter: Gerüste, Montagezustände, Windlast, Abminderungsfaktor, Zuverlässigkeit, stochastische Modellierung

## ABSTRACT

A stochastic model for estimating reliabilities of scaffolds of structures during construction stages under wind loading is developed. As a direct result, load reduction factors - which reflects the reduced design life - as already used in present codes were determined and statistically justified respectively. The analyses have been carried out for single- and multiple-use types of scaffolds.

Keywords: Scaffolds, Stages of Construction, Wind Loads, Reduction Factors, Reliability, Stochastic Modelling

## RÉSUMÉ

Un modèle probabiliste pour calculer la fiabilité des échafaudages et des constructions en état de montage en cas d'action du vent est proposé. Le résultat de la recherche est formulé comme coefficient partiel de l'action qui reflète l'utilisation réduite des constructions. Ce coefficient, qui était déjà employé aux codes, est fondé à l'aide des méthodes statistiques. La recherche était exécutée pour des échafaudages à l'emploi unique et applications multiples.

Mots: échafaudage, état de montage, action du vent, coefficient de l'action, fiabilité, modèle probabiliste

## 1. EINFÜHRUNG

Im Rahmen der Bemessung vieler Tragwerkstypen kommt der Windeinwirkung maßgebliche Bedeutung zu. Eine möglichst genaue Erfassung dieser Einwirkung ist somit zur Beurteilung sowohl des Sicherheitsniveaus als auch der Wirtschaftlichkeit eines Tragwerkes notwendig. Dementsprechend liegen bereits umfangreiche Analysen für eine Reihe von Tragwerken, wie z.B. Schornsteinen, TV-Türmen, Hochhäusern, Brücken etc. vor. Diese betrachteten Tragwerkstypen können allgemein unter dem Begriff der "baulichen Anlagen" zusammengefaßt werden. Eine sehr wichtige Eigenschaft dieser "baulichen Anlagen" ist die Tatsache, daß sie vom Tag der Fertigstellung bis zum Ende ihrer Nutzungsdauer ständig den verschiedensten Einwirkungen ausgesetzt sind. Im Gegensatz dazu ist dies bei der Betrachtung sogenannter "Bau- oder Montagezustände" nicht der Fall. Unter dem Aspekt "Montagezustand" ist in besonderer Weise auch der Bereich "Gerüste" zu sehen. Diese Konstruktionen werden im allgemeinen temporär eingesetzt, und sind somit in gewisser Hinsicht "zufällig" den Windeinwirkungen (im speziellen den Starkwinden, sprich Stürmen) unterworfen. In diesem Zusammenhang soll der Begriff "zufällig" derart verstanden werden, daß das gleichzeitige Auftreten des Gerüsteinsatzes und eines Starkwindes einen Zufallscharakter aufweist. Die Berücksichtigung dieses temporären Einsatzes wird in den Normen durch die Abminderung des Staudruckes, z.B. mittels eines sogenannten statistischen Faktors [1],[2] ermöglicht, und zwar in der folgenden Form:

$$F = q \cdot \chi \cdot c_1 \cdot \sum_j c_{f,j} \cdot A_i \quad (1.1)$$

worin

- F - resultierende Kraft
- q - Staudruck
- $\chi$  - statistischer Faktor
- $c_1$  - zusätzlicher Beiwert in Abhängigkeit von der Lage des Gerüsts in Verbindung mit einer baulichen Anlage
- $c_{f,j}$  - aerodynamischer Kraftbeiwert für das Gerüstbauteil i
- $A_i$  - Bezugsfläche für das Gerüstbauteil

bedeuten. Die Festlegung des Abminderungsfaktors für den Geschwindigkeitsdruck, zur Berücksichtigung von Bauzuständen bzw. des temporären Einsatzverhaltens von Gerüsten erfolgt primär aufgrund von Erfahrungswerten, und ist derzeit mit  $\chi = 0.7$  festgelegt. Dieser Wert bezieht sich

laut Norm auf eine vorgesehene Dauer der Montage von 1 Tag bis 24 Monate, unter der Voraussetzung, daß keine Sicherungsmaßnahmen - wie z.B. Entziehen der Konstruktion oder konstruktives Verstärken der Konstruktion bei Aufkommen von Sturm - vorgesehen sind (siehe Tafel 5 in [3], Tabelle 4 in [4]).

In der vorliegenden Arbeit wird nun dieser Abminderungsfaktor mit Hilfe stochastischer Modelle statistisch ermittelt bzw. untermauert. Dabei werden im folgenden Gerüste unter Windbelastung analysiert.

## 2. DATEN ÜBER GERÜSTBENUTZUNG

In der Literatur finden sich bezüglich der "Gerüsteinsetz-Geschichte" praktisch leider keine detaillierten Angaben, d.h. es fehlt jegliche Art von Aufzeichnung über Einsatzhäufigkeit und Einsatz- sowie Ruhezeiten von Gerüsten innerhalb der geforderten Lebensdauer (= Nutzungsdauer). Entsprechende statistische Daten würden eine geeignete Entscheidungshilfe bezüglich Akzeptanz oder Verwerfung eines gewählten Modells bieten. Die für die hier durchgeführte Analyse zur Verfügung stehenden Daten beziehen sich daher einzig und allein auf die Nutzungs- und Vorhaltdauer von Gerüsten [5],[6].

## 3. PROBABILISTISCHES MODELL DER GERÜSTEINSETZGESCHICHTE

Zur Modellierung der Gerüsteinsetz-Geschichte im Hinblick auf die Ermittlung der Windeinwirkung sind im wesentlichen zwei Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall wird angenommen, daß ein Gerüst in ähnlicher Konfiguration *wiederholt* zum Einsatz kommt, während sich im zweiten Fall die Betrachtung auf *einen* speziellen, möglicherweise länger andauernden, Einsatz beschränkt, für den eine eigene Bemessung des Gerüstes durchgeführt wird.

Betrachtet man zunächst den ersterwähnten Fall, so kann die Lösung durch Anwendung der Theorie der stochastischen Prozesse gefunden werden. Eine sehr wichtige Gruppe von stochastischen Prozessen bilden in diesem Zusammenhang jene Prozesse, die nur zwei Werte annehmen; sie werden als sog. Zwei-Wert-Prozesse (oder auch als "dot- dash-processes") bezeichnet. Eine typische Realisation eines Zwei-Wert-Prozesses ist in Abb.1 dargestellt. Nimmt ein Zwei-Wert-Prozeß  $\{X(t), t \geq 0\}$  die beiden Werte 1 und -1 an, so wird dieser als Eins-minus-Eins-Prozeß bezeichnet. Eine mögliche mathematische Darstellung eines Eins-minus-Eins-Prozesses ist folgende: wird  $N(0) = 0$  definiert und ferner angenommen, daß für  $t > 0$  die Anzahl der

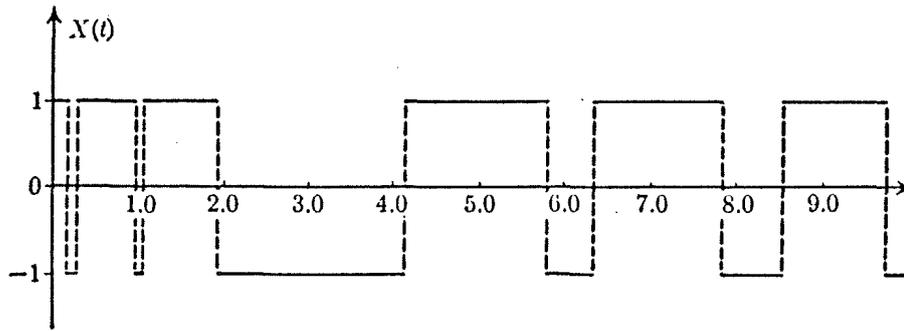


Abb. 1: Typische Realisation eines sogenannten "Random Telegraph Signal" (entnommen aus [7])

Zustandswechsel des Eins-minus-Eins-Prozesses  $X(\cdot)$  im Intervall  $(0, t]$  durch  $N(t)$  gegeben ist, so gilt für  $X(t)$  folgender Ausdruck:

$$X(t) = X(0) (-1)^{N(t)} \quad (3.1)$$

In Gl.(3.1) stellt  $X(0)$  den Anfangswert und  $N(t)$  den Zählprozeß des Eins-minus-Eins-Prozesses dar. Ist nun  $\{N(t), t \geq 0\}$  durch einen Poisson-Prozeß ([7],[8]) gegeben, so wird  $\{X(t), t \geq 0\}$  als "random telegraph signal" bezeichnet (Abb.1).

In allgemeiner Form stellt Gl.(3.2)

$$Y(t) = \frac{B + A}{2} + \left\{ \frac{B - A}{2} \right\} X(t) \quad (3.2)$$

klarerweise einen Zwei-Wert-Prozeß dar, dessen mögliche Werte durch A und B gegeben sind.

Für die im vorliegenden Fall durchzuführende Modellierung der Gerüst-einsatz-Geschichte kann eine mögliche vernünftige Darstellung durch einen sogenannten On-Off-(Eins-Null-) Prozeß erreicht werden. Dieser Prozeß ist in Gl.(3.3) formuliert und eine typische Realisation ist in Abb. 2 dargestellt.

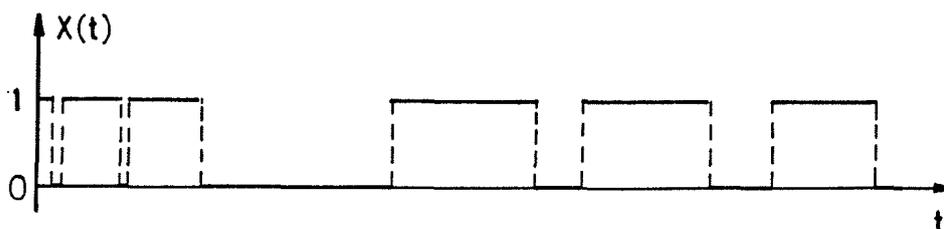


Abb. 2: Typische Realisation eines On-Off-(Eins-Null-) Prozesses

$$Y(t) = 0.5 + 0.5 X(t) \quad (3.3)$$

$$X(t) = X(0) (-1)^{N(t)} \quad (3.1)$$

Wird nun angenommen, daß  $\{N(t), t > 0\}$  einem Poisson-Prozeß

$$P(x|v, t) = \frac{(vt)^x e^{-vt}}{x!} \quad (3.4)$$

gehört, so werden die Wartezeiten zwischen den Poisson-Ereignissen durch die Exponential-Verteilung beschrieben. Gl.(3.4) ermittelt die Wahrscheinlichkeit, daß  $x$  Ereignisse in einem Zeitabschnitt  $[0, t]$  bei einer vorgegebenen mittleren Auftretensrate  $v$  auftreten.

Die exponential-verteilten Wartezeiten werden durch die Dichtefunktion

$$f_x(t, v) = v e^{-vt} \quad (3.5)$$

bzw. durch die Summenverteilung

$$F_x = 1 - e^{-vt} \quad (3.6)$$

charakterisiert.

Bei der Beschreibung der Gerüsteinsatz-Geschichte erscheint jedoch die Annahme eines Poisson-Prozesses aus folgenden Gründen nicht zielführend. Wie oben gezeigt werden die Wartezeiten durch eine Exponential-Verteilung beschrieben. Betrachtet man deren Dichtefunktion (Abb. 3a), so erkennt man, daß auch sehr kleine Wartezeiten (d.h. sehr nahe bei  $t=0$ ) möglich sind. Man kann sich leicht vorstellen und die Praxis zeigt dies auch, daß sehr kleine "Wartezeiten" zwischen Auf- und Abbau bzw. Ab- und erneutem Aufbau keinesfalls möglich sind. Unter diesem Gesichtspunkt muß somit von einer gewissen Mindestwartezeit ausgegangen werden.

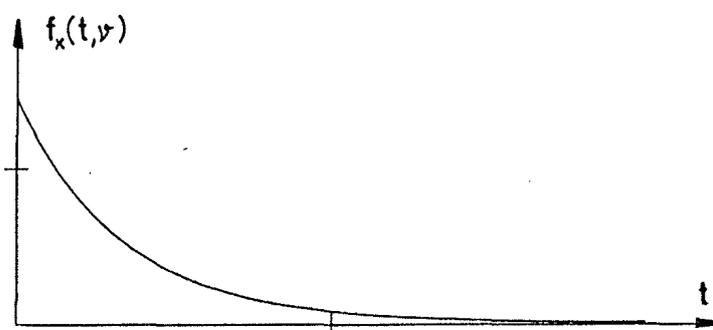


Abb. 3a: Exponential-Verteilung

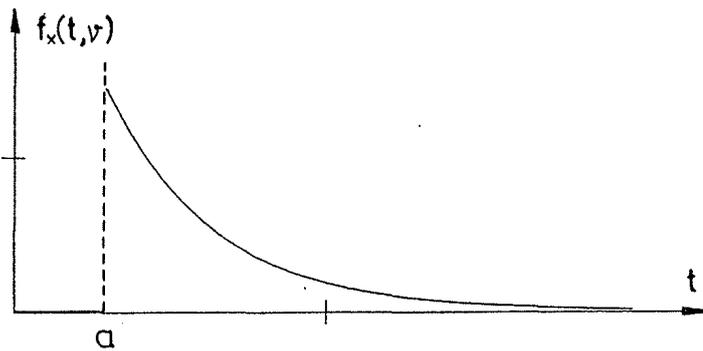


Abb. 3b: verschobene Exponential-Verteilung,

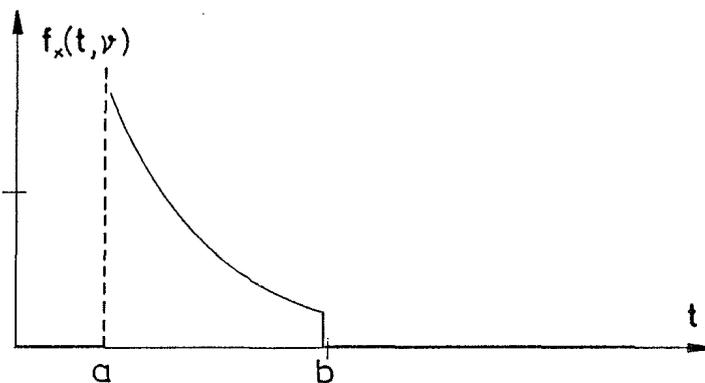


Abb. 3c: verschobene und begrenzte Exponential-Verteilung

Dies wird durch eine verschobene Exponential-Verteilung, wie in Abb. 3b dargestellt, erreicht. Andererseits sind auch sehr lange Wartezeiten ( $t \rightarrow \infty$ ) - die gemäß obiger Verteilung, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, auftreten können - im praktischen Gerüsteinsatz nicht gegeben. Eine diesbezügliche Lösung bietet die, in Abb. 3c dargestellte, verschobene und nach oben begrenzte Exponential-Verteilung. Nach durchgeführter Renormalisierung lautet der Ausdruck für die Dichtefunktion der Wartezeiten

$$f_x(t, \nu) = C \nu e^{-\nu t} = \frac{\nu e^{-\nu t}}{e^{-\nu a} - e^{-\nu b}} \quad (3.7)$$

Die Summenverteilung weist somit die Form

$$F_x(t, \nu) = \int_a^t C \nu e^{-\nu t} dt = C (e^{-\nu a} - e^{-\nu t}) = \frac{e^{-\nu a} - e^{-\nu t}}{e^{-\nu a} - e^{-\nu b}} \quad (3.8)$$

auf. Die Auswirkungen dieser Modellierung auf die Gerüsteinsatz-Geschichte bzw. deren Realisationen kann der Abb. 4 entnommen werden. Die verwendeten Parameter sind hier von sekundärer Bedeutung; diese werden in einem späteren Abschnitt in genauerer Ausführung behandelt.

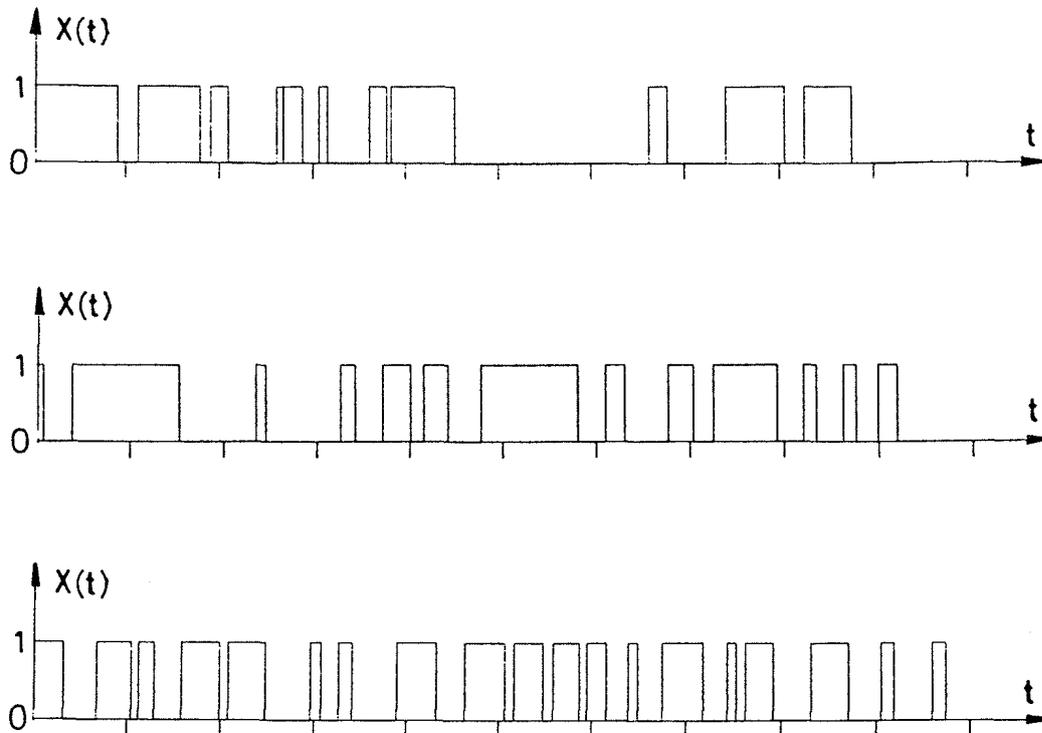


Abb. 4: Gerüsteinsatz-Geschichte, Wartezeiten gehorchen einer  
 (a) Exponential-Verteilung  
 (b) verschobenen Exponential-Verteilung  
 (c) verschobenen und begrenzten Exponential-Verteilung

Für den zweiten Fall - d.h. für die Betrachtung eines *einzigsten* Gerüsteinsatzes - bietet die Modellierung keine Schwierigkeiten. Das Gerüst ist vom Aufstellungszeitpunkt bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes (= Abbau des Gerüsts) allen Einwirkungen ohne Unterbrechung ausgesetzt.

#### 4. MODELL DER WINDEINWIRKUNG

Wie bereits mehrfach gezeigt ([9],[10]) kann das zeitliche Auftreten extremer klimatischer Einwirkungen (Wind) durch Poisson-Prozesse vorhergesagt werden. Bei der Betrachtung von Windlasten ist die Annahme gerechtfertigt, daß sowohl die Intensität als auch die Einwirkungsdauer durch unabhängige Zufallsvariable dargestellt werden kann, wobei sich die Unabhängigkeit auf die verschiedenen Auftretensereignisse bezieht. Die

Zufallsvariablen gehorchen zudem für jedes Auftreten derselben Verteilungsfunktion.

Mit anderen Worten, die Windeinwirkung kann durch einen sogenannten gefilterten Poisson-Prozeß im erweiterten Sinne [7] modelliert werden. Eine mögliche Überlappung der einzelnen Auftretensereignisse kann auf Grund der sehr kurzen Einwirkungsdauer von Stürmen als unbedeutend angesehen bzw. vernachlässigt werden. Dies wird u.a. auch durch eine, unter diesem Aspekt durchgeführten Simulation bestätigt. Betrachtet man nämlich einen Zeitraum von 10 Jahren, dies entspricht in etwa der Nutzungsdauer eines Gerüsts, so ergibt sich in 15 von 1000 simulierten Zeitverläufen jeweils eine einzige Überlappung, die zudem noch von äußerst geringer Überlappungsdauer gekennzeichnet sind.

Die Intensität der Windeinwirkung unterliegt nun einer im folgenden angegebenen Verteilungsfunktion. Den Windgeschwindigkeiten werden meist entweder die Extremwertverteilungen der größten Werte des Fisher-Tippett Typs I, auch Gumbel-Verteilung genannt, oder die Fisher-Tippett Typ II (Fréchet) Verteilung angepaßt. Die ebengenannten Verteilungen werden bekanntlich durch folgende Darstellungen beschrieben.

$$F_I(x) = \exp(-e^{-\alpha(x-u)}) \quad -\infty < x < \infty \quad (4.1)$$

worin  $\alpha$  der Formparameter, der das Maß der Streuung bestimmt, und  $u$  den Modalwert bedeuten.

$$F_{II}(x) = \exp\left(-\left(\frac{u}{x}\right)^k\right) \quad x \geq 0 \quad (4.2)$$

mit  $u$  als dem sogenannten charakteristischen Wert und  $k$  einem inversen dimensionslosen Maß der Streuung.

Untersuchungen [11] zeigten, daß keiner der beiden Verteilungen ein eindeutiger Vorzug zu geben ist. Der gravierendste Unterschied zwischen den beiden Verteilungen, nämlich daß Typ II nur positive, Typ I dagegen positive sowie negative Ereigniswerte enthält, die im Zusammenhang mit extremalen Windgeschwindigkeiten keine physikalische Bedeutung besitzen, ließ vielfach das Pendel zu Gunsten der Typ II Verteilung ausschlagen. In der vorliegenden Arbeit wird dennoch die Gumbel-Verteilung verwendet, die jedoch bei Null abgeschnitten wird, womit das Auftreten negativer Ereigniswerte entfällt. Die Dichtefunktion einer derartig modifizierten Gumbel-Verteilung lautet [8]

$$f_v(v) = \begin{cases} 0 & v < 0 \\ k f_I(x) & v \geq 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

mit dem Renormalisierungsfaktor

$$k = \frac{1}{1 - F_1(0)} \quad (4.4a)$$

und

$$f_1(x) = \alpha \exp(-\alpha(x-u) - e^{-\alpha(x-u)}) \quad (4.4b)$$

Die Verteilung des Winddruckes  $f_p(p)$ , und somit der Intensität, kann, bei bekannter Verteilung der Windgeschwindigkeit  $f_v(v)$ , wie folgt ermittelt werden [8].

Das bekannte funktionale Verhältnis dieser beiden Parameter lautet

$$p = c v^2 \quad (4.5)$$

Der Faktor  $c$  stellt darin eine Konstante dar, während  $p$  und  $v$  Zufallsvariable sind. Das Ergebnis der Ableitung resultiert in der Dichtefunktion

$$f_p(p) = k \left\{ \alpha \exp[-\alpha(\sqrt{\frac{p}{c}} - u) - \exp(-\alpha(\sqrt{\frac{p}{c}} - u))] \frac{1}{2\sqrt{pc}} \right\}, p \geq 0 \quad (4.6)$$

und der Summenverteilung des Winddrucks

$$F_p(p) = k \left\{ \exp[-\exp(-\alpha(\sqrt{\frac{p}{c}} - u))] \right\}, p \geq 0 \quad (4.7)$$

Die erhaltene Verteilung entspricht der Form nach - abgesehen von der Renormalisierungskonstanten  $k$  - einer Gumbel-Verteilung.

Nachdem nun das probabilistische Modell für den Gerüsteinsatzverlauf und das Modell für die Windeinwirkung formuliert wurde, kann im nächsten Schritt die explizite Betrachtung der Windlast auf Gerüstkonstruktionen durchgeführt werden.

## 5. ANALYSE UND ERGEBNISSE

### 5.1 Theoretischer Hintergrund

Die vorangegangene Idealisierung im Rahmen der durchgeführten Modellierung reduziert das zu behandelnde Problem, d.h. die Ermittlung der Windlast für Gerüste, auf das Auffinden der Summenverteilung des Maximums der Intensität innerhalb der geforderten Nutzungsdauer. Betrachtet man vorerst jene Situation, in der das Tragwerk innerhalb der Nutzungsdauer ohne Unterbrechung den Windeinwirkungen ausgesetzt ist, so zeigen z.B. die

Ausführungen in [12] und [13] mögliche Lösungswege auf.

Es wird, entsprechend den vorangegangenen Abschnitten, angenommen, daß das Auftreten der Einwirkungen Poisson-verteilt ist und des weiteren die Intensitäten dieser Einwirkungen statistisch unabhängige und identisch verteilte Zufallsvariable darstellen. Es wird eine Verallgemeinerung des Prozesses dahingehend eingeführt, daß die Dauer der Einwirkung durch eine Zufallsvariable gegeben ist, die wiederum für die einzelnen Auftretensereignisse als statistisch unabhängig und identisch verteilt angesehen wird.

Bezeichnet  $\nu$  die mittlere Auftretensrate und  $F_P(p)$  die Summenverteilung der Intensität für jedes Auftretensereignis, so kann, basierend auf dem Satz der totalen Wahrscheinlichkeit, die Summenverteilung des Maximums der Intensitäten wie folgt ermittelt werden.

$$F_{P_m}(p) = P(P_m < p) = \sum_{n=0}^{\infty} P(P < p | N = n) P(N = n) \quad (5.1)$$

wobei  $N$  eine die Anzahl der Ereignisse innerhalb der Nutzungsdauer  $T$  beschreibende Zufallsgröße bezeichnet.

Die Wahrscheinlichkeit, daß  $N$  den Wert  $n$  annimmt ist gegeben durch

$$P(N = n) = \frac{(\nu T)^n \exp(-\nu T)}{n!} \quad (5.2)$$

Ferner gelten folgende Beziehungen

$$P(P < p | N = n) = [F_P(p)]^n \quad \text{für } n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.3a)$$

$$P(P < p | N = n) = 0, \quad s < 0 \quad \text{für } n = 0 \quad (5.3b)$$

$$P(P < p | N = n) = 1, \quad s > 0 \quad \text{für } n = 0 \quad (5.3c)$$

Die letzte Gleichung vernachlässigt mögliches Überlappen der Auftretensereignisse. Dies bedeutet insofern keine signifikante Einschränkung, da dieser Sachverhalt wie bereits erwähnt ohnehin näherungsweise dem gewählten Windlastmodell entspricht.

Werden Gl.(5.3) und (5.2) in Gl.(5.1) eingesetzt, so ergibt sich

$$\begin{aligned} F_{P_m}(p) &= \sum_{n=0}^{\infty} [F_P(p)]^n \frac{(\nu T)^n \exp(-\nu T)}{n!} = \exp(-\nu T) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{[(\nu T) F_P(p)]^n}{n!} \\ &= \exp(-\nu T) \exp(-\nu T F_P(p)) = \exp(-\nu T (1 - F_P(p))) \quad (5.4) \end{aligned}$$

Diese Beziehung gilt allerdings nur für den Fall, daß das Tragwerk während

der Nutzungsdauer ohne Unterbrechung den Einwirkungen ausgesetzt ist. Bei Betrachtung des Gerüstfalles mit *wiederholtem* Einsatz innerhalb der Nutzungsdauer, ohne Bemessung jedes einzelnen Einsatzes, wird diese Voraussetzung jedoch nicht erfüllt. Dieser Fall wird durch den zuvor behandelten On-Off-(Eins-Null-) Prozeß beschrieben. Dies bedeutet nun, daß bei der Ermittlung von  $F_{P_m}(p)$  nur jene Ereignisse berücksichtigt werden, die während eines Gerüsteinsetzes auftreten. Mit anderen Worten, es ist die Wahrscheinlichkeit, daß das Maximum der Intensitäten kleiner als ein vorgegebener Wert ist, unter der Bedingung zu ermitteln, daß sich das Gerüst gerade im Einsatz befindet. Diese Problematik wird vorteilhafterweise durch die Anwendung der Simulationsmethode gelöst.

Der zweite Fall des Gerüsteinsetzes, d.h. der *einmalige* Gerüsteinsetzung innerhalb der Nutzungsdauer - bzw. der jeweils neuerlichen Bemessung jedes einzelnen Gerüsteinsetzes - ist einer analytischen Behandlung direkt zugänglich. Hier handelt es sich um einen ununterbrochenen Einsatz und es gilt somit die Beziehung (5.4). Wird in Gl.(5.4) für  $T$  die Dauer des Gerüsteinsetzes gesetzt, so erhält man durch  $F_{P_m}(p)$  die Wahrscheinlichkeit, daß das Maximum der Intensität innerhalb des Zeitraumes  $T$  den Wert  $p$  nicht übersteigt.

In der Folge werden nun drei von einander zu unterscheidende Untersuchungen durchgeführt, wobei sich zwei auf den oben erwähnten ersten Gerüstfall, d.h. Gerüstfall "1" und die dritte auf den Gerüstfall "2" beziehen. Alle drei Fälle haben gemeinsam, daß in Abhängigkeit der Fraktilwerte der Summenverteilung, die zugehörigen Winddruckwerte ermittelt werden. Diese Formulierung hat den Vorteil, daß die den Fraktilen entsprechenden Werte mit den in den derzeitigen Normenwerken angegebenen deterministischen Staudruckwerten direkt vergleichbar sind. Einerseits wurde der auf den bisherigen Erfahrungswerten begründete Gerüsteinsetzung, d.h. mit der Dauer  $T_{G1}$ , mit einem fiktiven, ununterbrochenen Einsatz  $T_1$  verglichen. Beide Fälle beziehen sich auf dieselbe Nutzungsdauer ( $T_{G1} = T_1 = 10$  Jahre). Von größerem praktischen Interesse ist jedoch der Vergleich der modellierten Gerüsteinsetzungsdauer von  $T_{G1} = 10$  Jahren mit der Nutzungsdauer eines Bauwerkes, z.B.  $T_2 = 50$  Jahre. Aus diesem Vergleich kann schließlich der zu ermittelnde Abminderungsfaktor  $\chi$  berechnet werden. Dieser "statistische Faktor" stellt den Bezug zwischen dem für die Bemessung von Gerüsten maßgeblichen Staudruck und den in den Normenwerken für allgemeine Windwirkungen angeführten Staudruckwerten dar.

Wird für die Darstellung der Gerüsteinsetzung-Geschichte ein einziger Prozeß verwendet, d.h. die "Wartezeiten" zwischen Aufbau und Abbau (= Einsatzzeit), sowie Abbau und erneutem Aufbau (= Ruhezeit) sind ident exponen-

tial-verteilt, so ergibt sich eine Gesamteinsatzzeit, die bei etwa 50% der Nutzungsdauer liegt. Dieser Wert entspricht jenem der z.B. in [6] angegeben wird. Damit auch eine größere oder geringere Gesamteinsatzzeit (in Prozent der Nutzungsdauer) betrachtet werden kann, ist es notwendig die Einsatzzeiten und Ruhezeiten durch gesonderte, modifizierte Exponential-Verteilungen, d.h. Exponential-Verteilungen mit unterschiedlichen Parameterwerten (mittlere Auftretensrate, untere und obere Grenzen), zu beschreiben. Es sind somit zwei Prozesse zur Modellierung des Gerüstein-satzverlaufes erforderlich.

Für den Gerüstfall "2" wird der Vergleich für die Nutzungsdauer  $T_{G2}$  (=Gerüst) und  $T_2$  (= 50 Jahre) auf analytischem Wege durchgeführt.

Ausgehend von Gl.(5.4) erhält man für den Gerüstein-satz

$$F_{P_m}(p) = \exp(-vT_1 (1 - F_P(p))) \quad (5.5a)$$

$$F_{P_m}(p) = \exp(-vT_1 (1 - k \{ \exp [ -\exp ( -\alpha ( \sqrt{\frac{p}{c}} - u ) ] \} ) ) ) \quad (5.5b)$$

und für den Bauwerksnutzungsdauer  $T_2$ :

$$F_{P_m}(p) = \exp(-vT_2 (1 - F_P(p))) \quad (5.6a)$$

$$F_{P_m}(p) = \exp(-vT_2 (1 - k \{ \exp [ -\exp ( -\alpha ( \sqrt{\frac{p}{c}} - u ) ] \} ) ) ) \quad (5.6b)$$

Es läßt sich somit für einen gegebenen, interessierenden Fraktilwert der zugehörige Staudruckwert ermitteln.

$$p_1 = c \left\{ u - \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ -\ln \left[ \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{\ln F_{P_m}(p)}{vT_1} \right) \right] \right\} \right\}^2 \quad (5.7)$$

$$p_2 = c \left\{ u - \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ -\ln \left[ \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{\ln F_{P_m}(p)}{vT_2} \right) \right] \right\} \right\}^2 \quad (5.8)$$

Der Quotient  $p_1/p_2$  ergibt somit den Abminderungsfaktor für den betrachteten Gerüstfall.

### 5.2 Numerische Durchführung der Analyse

Für die numerische Analyse wurden die Parameterwerte des Windlast-modelles wie folgt gewählt:

$$u = 25.0 \text{ [m/sec]}, \quad 1/\alpha = 3.0 \text{ [m/sec]}, \quad c = 0.625, \quad v_{\text{Wind}} = 1.0 \text{ [1/Jahre]}$$

Bei Betrachtung des Falles des *wiederholten* Gerüsteinsatzes wurde im ersten Schritt (Tabelle 1, Abb. 6) der Vergleich  $T_{G1} = T_1$  für den selben Zeitraum ( $T_{G1} = 10$  Jahre) und im nächsten Schritt (Tabelle 2, Abb. 7) ein Vergleich  $T_{G1} = 10$  Jahre (Gerüst) und  $T_2 = 50$  Jahre (Bauwerk) durchgeführt. Dabei werden drei unterschiedliche typische Gerüstzeitverläufe verwendet. Diese in den Tabellen und Abbildungen mit (a), (b) und (c) bezeichneten Verläufe werden durch die Parameter

- (a)  $v_{\text{Einsatz}} = 2.0$  ,  $a = 0.075$  [Jahre] ,  $b = 0.50$  [Jahre]  
 $v_{\text{Ruhe}} = 2.0$  ,  $a = 0.075$  [Jahre] ,  $b = 0.50$  [Jahre]
- (b)  $v_{\text{Einsatz}} = 3.0$  ,  $a = 0.05$  [Jahre] ,  $b = 0.30$  [Jahre]  
 $v_{\text{Ruhe}} = 2.0$  ,  $a = 0.10$  [Jahre] ,  $b = 0.50$  [Jahre]
- (c)  $v_{\text{Einsatz}} = 0.5$  ,  $a = 0.0$  [Jahre] ,  $b = 2.00$  [Jahre]  
 $v_{\text{Ruhe}} = 2.0$  ,  $a = 0.1$  [Jahre] ,  $b = 0.50$  [Jahre]

gekennzeichnet. Die Parameter "a" und "b" entsprechen jenen der Abb. 3c und bezeichnen die untere und obere Grenze der "Wartezeiten". Der Verlauf (a) ergibt eine Gesamteinsatzzeit von ca. 50% der Gerüstnutzungsdauer. Die entsprechenden Werte für die Verläufe (b) und (c) liegen bei etwa 35% bzw. 75%. Typische Realisationen von (a), (b) und (c) sind in Abb. 5 gegeben. Hierin ist zudem das Auftreten eines Sturmes durch einen Pfeil angedeutet.

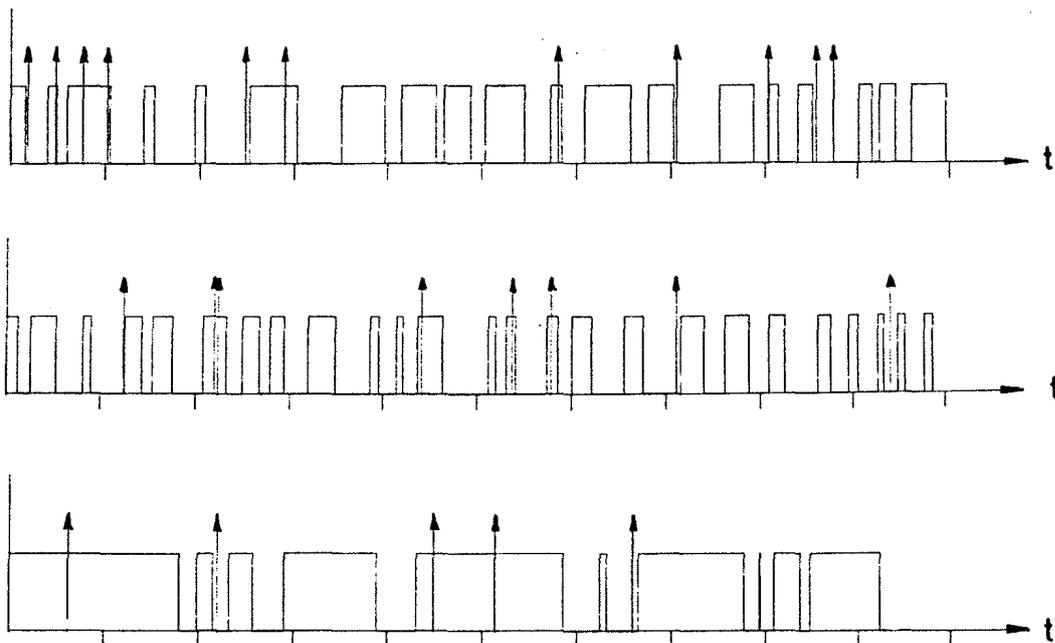


Abb. 5: Typische Realisationen von (a),(b) und (c)

Die Tabellen enthalten die Resultate die durch jeweils 5000 Simulationen ermittelt wurden. Die Auflistung der für die einzelnen Verläufe (a,b,c) erhaltenen Staudrücke erfolgt in Abhängigkeit vom angeführten Fraktilewert. Für die Fälle  $T_1$  und  $T_2$  werden sowohl die exakten, der Gl.(5.4) entsprechenden- als auch die simulierten Werte angeführt. Die Werte des Falles  $T_{G1}$  stellen das Ergebnis der durchgeführten Simulation dar.

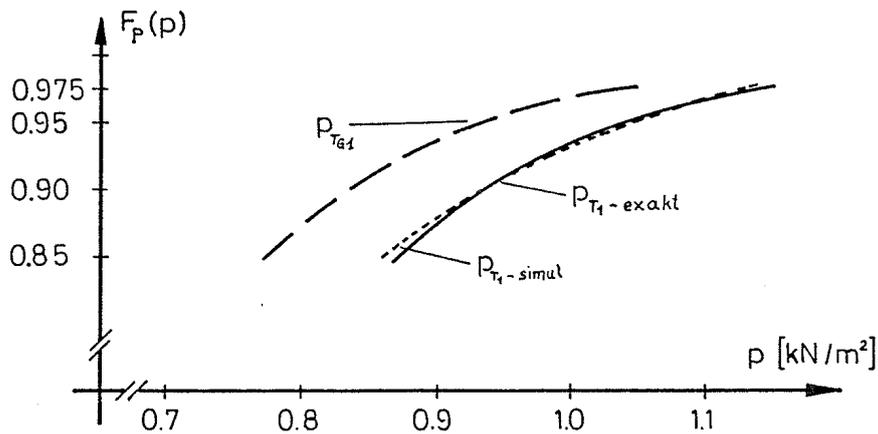


Abb. 6: Ergebnisse des Vergleichs  $T_{G1}/T_1$  für den Verlauf (a)

| Verlauf | Fraktile | $P_{T_1\text{-exakt}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $P_{T_1\text{-simul.}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $P_{T_{G1}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|---------|----------|--|---|--------------------------------------|
| a       | 0.85     | 0.871  | 0.864   | 0.775                                |
|         | 0.90     | 0.933  | 0.938   | 0.837                                |
|         | 0.95     | 1.041  | 1.053   | 0.931                                |
|         | 0.975    | 1.152  | 1.135   | 1.051                                |
| b       | 0.85     | 0.871  | 0.864   | 0.730                                |
|         | 0.90     | 0.933  | 0.937   | 0.798                                |
|         | 0.95     | 1.041  | 1.055   | 0.899                                |
|         | 0.975    | 1.152  | 1.136   | 0.995                                |
| c       | 0.85     | 0.871  | 0.876   | 0.837                                |
|         | 0.90     | 0.933  | 0.928   | 0.890                                |
|         | 0.95     | 1.041  | 1.047   | 1.002                                |
|         | 0.975    | 1.152  | 1.176   | 1.133                                |

Tabelle 1: Ergebnisse des Vergleichs  $T_{G1}/T_1$

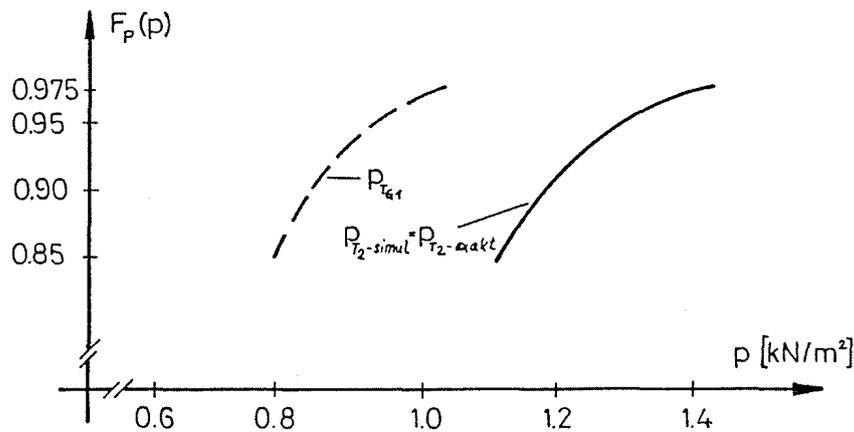


Abb. 7: Ergebnisse des Vergleichs  $T_{G1}/T_2$  für den Verlauf (a)

| Verlauf | Fraktile | $P_{T_2}$ -exakt<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $P_{T_2}$ -simul.<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $P_{T_{G1}}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
|---------|----------|--|---|--------------------------------------|
| a       | 0.85     | 1.112                                    | 1.119                                     | 0.779                                |
|         | 0.90     | 1.182                                    | 1.183                                     | 0.835                                |
|         | 0.95     | 1.302                                    | 1.301                                     | 0.932                                |
|         | 0.975    | 1.426                                    | 1.422                                     | 1.022                                |
| b       | 0.85     | 1.112                                    | 1.119                                     | 0.739                                |
|         | 0.90     | 1.182                                    | 1.181                                     | 0.791                                |
|         | 0.95     | 1.302                                    | 1.308                                     | 0.884                                |
|         | 0.975    | 1.426                                    | 1.427                                     | 1.008                                |
| c       | 0.85     | 1.112                                    | 1.108                                     | 0.827                                |
|         | 0.90     | 1.182                                    | 1.195                                     | 0.895                                |
|         | 0.95     | 1.302                                    | 1.316                                     | 1.006                                |
|         | 0.975    | 1.426                                    | 1.401                                     | 1.097                                |

Tabelle 2: Ergebnisse des Vergleichs  $T_{G1}/T_2$

Beim Vergleich  $T_{G1}$  und  $T_1$  erhält man für die einzelnen Verläufe folgende Faktoren  $\lambda$  :

Verlauf (a) :  $\lambda \approx 0.90$     Verlauf (b) :  $\lambda \approx 0.85$     Verlauf (c) :  $\lambda \approx 0.95$

Der vornehmlich interessierende statistische Faktor  $\chi$ , der aus dem Vergleich  $T_{G1}$  und  $T_2$  erhalten wird, nimmt für die einzelnen Verläufe folgende Werte an:

Verlauf (a) :  $\chi \approx 0.70$    Verlauf (b) :  $\chi \approx 0.68$    Verlauf (c) :  $\chi \approx 0.75$

Die Ergebnisse der Betrachtung des Falles des *einfachen* Gerüsteinsatzes sind in Tabelle 3 und Abb. 8 dargestellt. Es wurde hierfür angenommen, daß der einmalige Einsatz eine Dauer von 2 Jahren umfaßt. Diese Zeitspanne entspricht der oberen Grenze der Bau- und Montagedauern in [3, Tafel 5] und [4, Tabelle 4]. In der Tabelle 3 ist in Abhängigkeit vom Fraktilewert der Staudruck für den 2-Jahres-Zeitraum und für den 50-Jahres-Zeitraum, sowie das Verhältnis dieser beiden Staudrücke aufgelistet.

| Fraktile | P <sub>2</sub> -Jahre<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | P <sub>10</sub> -Jahre<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | P <sub>2</sub> -Jahre / P <sub>10</sub> -Jahre<br>[ - ] |
|----------|---|--|---|
| 0.85     | 0.656   | 1.112  | 0.59  |
| 0.90     | 0.712   | 1.182  | 0.60  |
| 0.95     | 0.808   | 1.302  | 0.62  |
| 0.975    | 0.907   | 1.426  | 0.64  |

Tabelle 3: Ergebnisse für den Gerüstfall "2" bzw. Montagezustand

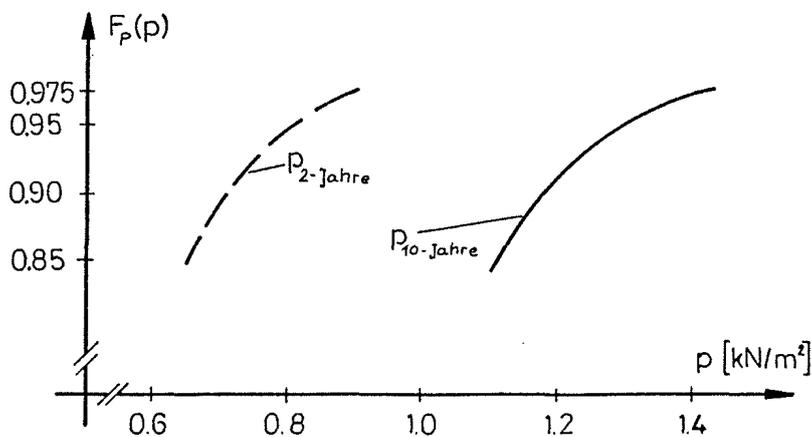


Abb. 8: Ergebnisse für den Gerüstfall "2" bzw. Montagezustand

## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse dieser Untersuchung erlauben folgende Schlußfolgerungen bzw. Anregungen zur Normung von Gerüsten und Montagezuständen unter Windlasten:

- Obwohl Daten über Gerüstaufstellzeiten zur Durchführung statistischer Tests für den verwendeten stochastischen Prozeß zur Modellierung der Einsatzdauer- und Ruhezeiten wünschenswert wären, so sind die resultierenden Abminderungsfaktoren relativ unempfindlich gegenüber der Einsatzdauer innerhalb der Gerüstnutzungsdauer. Variationen von  $\pm 20\%$  um eine durchschnittliche 50%ige Einsatzdauer haben lediglich eine Variation des Abminderungsfaktors von  $< 7\%$  zur Folge.
- Für einmalig verwendete, d.h. für jeden Einsatz neu bemessene, Gerüste mit einer 2-jährigen Einsatzdauer ergibt sich ein Abminderungsfaktor von etwa 0.6. Dies gilt auch für entsprechend lange Montagezustände.
- Bei mehrfach verwendbaren Gerüsten mit einer Nutzungsdauer von zehn Jahren und einer 50%igen Einsatzdauer ist der Abminderungsfaktor 0.7 (Bemessungswindgeschwindigkeit ist hier auf 50 Jahre bezogen).
- Diese Abminderungsfaktoren sind unabhängig von den gewählten Fraktilwerten u.z. im Bereich 0.85 - 0.975.
- Für jene Fälle deren Bezugszeitraum der Bemessungswindlast mit dem der Nutzungsdauer des Gerüstes ident ist (z.B. 10 Jahre) ist der Abminderungsfaktor mit etwa 0.9 anzusetzen.
- Die hier erhaltenen Ergebnisse bestätigen den derzeit in der Norm verwendeten Wert des Abminderungsfaktors von 0.7. Der vorliegende Bericht präzisiert jedoch genau die unterschiedlichen Fälle, über die die Norm derzeit keine detaillierte Auskunft gibt. Für Montagezustände kann der Faktor z.B. noch abgemindert werden.
- Zusammenfassend ist zu bemerken, daß die derzeitige Normung der Windlasten für Gerüste und Montagezustände die Abminderungswerte zum Teil wohl richtig aber doch zu pauschal angibt. Die hier vorliegende Studie gibt die Basis für eine sinnvolle und notwendige weitere Differenzierung.

## 7. LITERATUR

- [1] DIN 4420 Teil 1, Arbeits- und Schutzgerüste (ausgenommen Leitergerüste), Berechnung und bauliche Durchbildung, Norm-Vorlage November 1985
- [2] DIN 4420 Teil 4, Arbeits- und Schutzgerüste aus vorgefertigten Bauteilen (Systemgerüste), Werkstoffe, Gerüstbauteile, Abmessungen, Lastannahmen und sicherheitstechnische Anforderungen, Entwurf Februar 1985, CEN-Harmonisierungsdokument Entwurf prHD 1/229, November 1984
- [3] HIRTZ, H.: Bericht über den Stand der Arbeiten an Regeln zur Erfassung der Windwirkung auf Bauwerke, Konstruktiver Ingenieurbau - Berichte Heft 35/36, (Hrsg.: W. Zerna, Ruhr-Universität Bochum), Bochum 1981, pp. 159 - 173
- [4] DIN 1055, Teil 4, Windwirkungen auf Bauwerke, Norm-Vorlage August 1986
- [5] PLÜMECKE, K.: Preisermittlung für Bauarbeiten, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1979, p. 84
- [6] Österreichische Baugeräteliste (ÖBGL) 1981, (Hrsg.: Vereinigung industrieller Bauunternehmungen Österreichs, Wien 1981, pp. 452ff
- [7] PARZEN, E.: Stochastic Processes, Holden-Day, San Francisco, Calif. 1967
- [8] SCHUËLLER, G.I.: Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München, 1981
- [9] RUSSELL, L.R. und SCHUËLLER, G.I.: Probabilistic Models for Texas Gulf Coast Hurricane Occurrences, J. Petroleum Techn., March 1974, pp. 279 - 288
- [10] SCHUËLLER, G.I.: Über die Kombination von klimatischen Belastungen, Der Bauingenieur, Vol. 50, pp. 133 - 137, 1975
- [11] SCHUËLLER, G.I. und PANGGABEAN, H.: Probabilistic Determination of Design Wind Velocity in Germany, Proc. Inst. Civ. Engrs., Part 2, 1976, Dec., 61, pp. 673 - 683.
- [12] WEN, Y.K.: Statistical Combination of Extreme Loads, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, No. ST5, May 1977, pp. 1079 - 1093
- [13] DER KIUREGHIAN, A.: Second-Moment Combination of Stochastic Loads, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST10, October 1978, pp. 1551 - 1567