

**Mehrfachbefestigungen unter  
Berücksichtigung des duktilen Verhaltens von  
Kunststoffdübeln (ETAG Kunststoffdübel)**

**Zulässige Last pro Befestigungspunkt**

**T 3073**

**T 3073**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6842-3

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

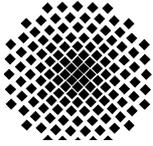
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

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.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)



**Universität Stuttgart**

Institut für Werkstoffe  
im Bauwesen  
Abteilung Befestigungstechnik

Pfaffenwaldring 4  
D-70550 Stuttgart

Tel.: + 49 (0) 711 685 3320  
Fax: + 49 (0) 711 685 2285

## **Mehrfachbefestigungen unter Berücksichtigung des duktilen Verhaltens von Kunststoffdübeln (ETAG Kunststoffdübel)**

### **Zulässige Last pro Befestigungspunkt**

M. Rößle, R. Eligehausen

Bericht Nr.: AF 04/05-DIBt/1204  
Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstrasse 30 L  
10829 Berlin  
Datum: 23.12.2004

Der Bericht umfasst 29 Seiten.

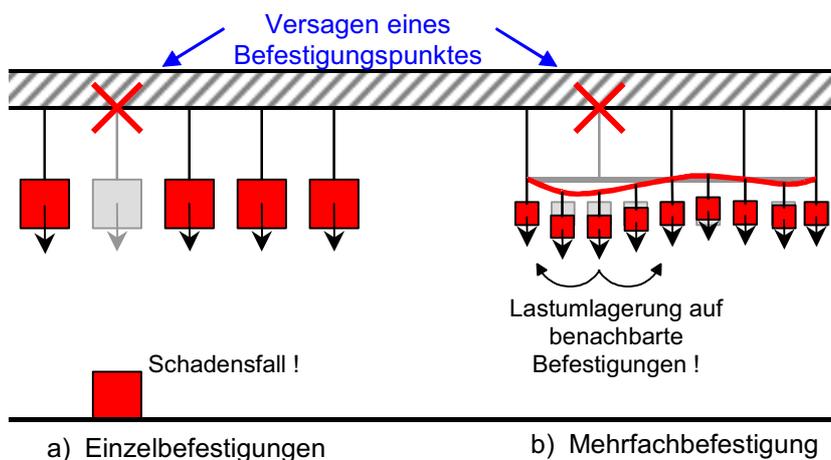


## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Tragsystem	5
2.1	Tragprofil	6
2.2	Verankerung	6
2.2.1	Reales Tragverhalten von Kunststoffdübeln	6
2.2.2	Simulation des Dübeltragverhaltens	8
2.2.2.1	Elasto-sprödes Materialverhalten	8
2.2.2.2	Duktiles Last-Verschiebungs-Verhalten	8
3	Deterministische Untersuchungen	10
3.1	Intaktes System	10
3.2	Ausfall eines Befestigungspunktes (1. Innenlager)	10
3.2.1	Einfluss der Steifigkeit des Tragprofils	10
3.2.2	Einfluss des Dübeltragverhaltens	11
3.2.2.1	Allgemeines	11
3.2.2.2	Kunststoffdübel	14
3.3	Zusammenfassung	15
4	Probabilistische Untersuchungen	16
4.1	Versagenskriterien	16
4.1.1	Ausfall von zwei benachbarten Befestigungspunkten	16
4.1.2	Überschreiten der Tragfähigkeit des Tragprofils	17
4.2	Stochastisches Modell	18
4.2.1	Tragverhalten der Kunststoffdübel	18
4.2.2	Rissbreite	19
4.2.3	Tragprofil	19
4.2.4	Einwirkung	19
4.2.5	Zusammenfassung	20
4.3	Ergebnisse	20
4.3.1	Ausfall benachbarter Befestigungspunkte	20
4.3.2	Biegeversagen des Profils nach Ausfall eines Befestigungspunktes	22
4.4	Zusammenfassung	26
5	Zusammenfassung	28

## 1 Einführung

Für die bauaufsichtliche Zulassung von Metalldübeln im Sinne von ETAG 001, Teil 6, [1] werden im Vergleich zu Einzelbefestigungen nach ETAG 001, Teil 1, [2] deutlich geringere Anforderungen gestellt, da das Versagen eines Befestigungspunktes nicht zum Versagen der gesamten Konstruktion führen muss (Bild 1.1). Aufgrund der geringeren Anforderungen ist das Erreichen bzw. Überschreiten der Höchstlast bei einem Dübeln mit Zulassung nach ETAG 001, Teil 6, im Bereich der Gebrauchlast möglich, falls er z.B. in einem sehr breiten Riss verankert wird.



**Bild 1.1: Auswirkung des Versagens eines Befestigungspunktes**

- a) Einzelbefestigung: keine Lastumlagerung möglich, Schaden**  
**b) Mehrfachbefestigung: Lastumlagerung möglich, kein Systemversagen**

Nach ETAG 001, Teil 6, kann auf einen statischen Nachweis der Umlagerung der Kräfte (Bild 1.1.b) verzichtet werden, wenn mindestens  $n_1$  Befestigungspunkte in einer Reihe zur Lastabtragung zur Verfügung stehen und zugleich die Bemessungslast pro Befestigungspunkt  $N_{S,d}$  begrenzt wird.

In Deutschland und der überwiegenden Zahl der Mitgliedstaaten gilt:

$$N_{S,d} \leq 3,0 \text{ kN} \quad \dots \text{ für } n_1 \geq 4 \text{ Befestigungspunkte bzw.}$$

$$N_{S,d} \leq 2,0 \text{ kN} \quad \dots \text{ für } n_1 = 3 \text{ Befestigungspunkte.}$$

Diese Werte wurden unter Berücksichtigung eines ideal spröden Dübeltragverhaltens abgeleitet.

Bei höheren Beanspruchungen pro Befestigungspunkt muss statisch nachgewiesen werden, dass das Tragsystem den möglichen spröden Ausfall eines beliebigen Befestigungspunktes erträgt oder es müssen Dübel mit einer Zulassung nach ETAG 001, Teil 1, verwendet werden.

Pregartner [3] untersucht das Tragverhalten von Kunststoffdübeln in gerissenem Beton ausführlich. Seine Untersuchungen zeigen, dass die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln nach Überschreiten der Höchstlast nur in geringem Maße abfällt.



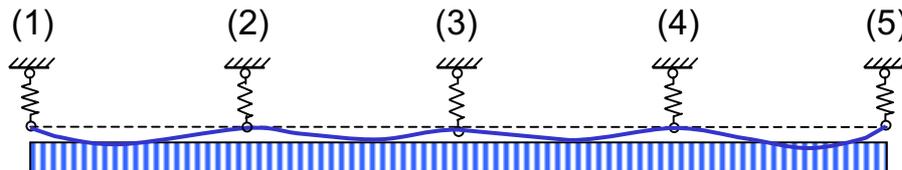
Tritt ein duktiler Versagen eines einzelnen Befestigungspunktes innerhalb einer Mehrfachbefestigung auf, so wird das Tragprofil im Vergleich zu einem sprödem Ausfall und sonst gleichen Bedingungen deutlich weniger beansprucht. Weiter stellt sich bei einem duktilen Versagen der Gleichgewichtszustand unter deutlich geringeren Verformungen ein im Vergleich zu sprödem Ausfall eines Befestigungspunktes. Deshalb erscheint es möglich die zulässige Beanspruchung pro Befestigungspunkt  $N_{S,d}$  bei duktil versagenden Befestigungsmitteln (z.B. Kunststoffdübel) im Vergleich zum spröden Fall zu erhöhen.

Ziel der Untersuchung ist die maximale Beanspruchung pro Befestigungspunkt  $N_{S,d}$  so festzulegen, dass sich bei duktilem Versagen das gleiche Zuverlässigkeitsniveau einstellt wie im spröden Fall mit  $N_{S,d} = 3,0$  kN.

Dazu werden nachfolgend deterministische und probabilistische Studien durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse kann maximale Beanspruchung pro Befestigungspunkt  $N_{S,d}$  für duktil versagende Befestigungsmittel in redundanten Systemen abgeleitet werden.

## 2 Tragsystem

Die zulässige Last pro Befestigungspunkt für redundante Befestigungen gemäß ETAG 001, Teil 6, wurde anhand deterministischer und probabilistischer Berechnung an 4-Feldträgern mit konstanter Stützweite (Bild 2.1) abgeleitet. Der mögliche Ausfall eines Befestigungspunktes wurde dabei ideal-spröde simuliert.



**Bild 2.1: 4-Feldträger mit nachgiebiger Auflagerung**

Die Auflagerreaktionen und Schnittkräfte eines Durchlaufträgers hängen von der Einwirkung, der Feldlänge und den Steifigkeiten des Tragprofils und der Verankerung (Dübel) ab.

Untersuchungen [5] abgehängter Decken- und Fassadensysteme zeigen, dass die Tragfähigkeit dieser Mehrfachbefestigungen im intakten Zustand aufgrund konstruktiver Anforderungen, wie z.B. der Forderung einer Mindestanzahl an Befestigungspunkten pro m<sup>2</sup> Deckenfläche oder Mindestquerschnitten bei Holzlatten, in der Regel nur gering ausgenutzt wird.

Die Biegebeanspruchung bzw. die Verformung bei Durchlaufträgern mit konstanten Stützweiten steigt quadratisch bzw. in der vierten Potenz mit der Feldlänge an. Durch die eingeführte Begrenzung der zulässigen Last pro Befestigungspunkt auf  $N_{s,d} \leq 3,0$  kN wird die Feldlänge der Durchlaufträgersysteme in Abhängigkeit der Einwirkung beschränkt. Damit soll gewährleistet werden, dass das Tragsystem die erhöhte Biegebeanspruchung nach dem Ausfall eines Befestigungspunktes erträgt und somit eine Umlagerung der Kräfte auf benachbarte Befestigungspunkte ermöglicht. Die angreifenden Einwirkungen werden auch nach einem Ausfall eines Befestigungspunktes zuverlässig in die Tragkonstruktion weitergeleitet.

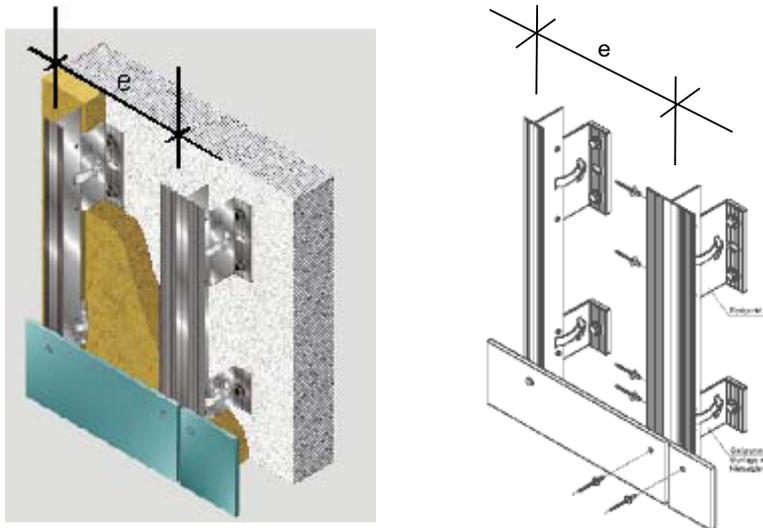
Die Lastumlagerung auf benachbarte Befestigungspunkte bedingt jedoch deutlich größere Verformungen als im intakten Zustand. In den möglichen, aber seltenen Fällen eines spröden Ausfalls eines Verankerungspunktes muss deshalb die Überschreitung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit in Kauf genommen werden. Dieses Vorgehen ist aus Sicht der Verfasser zulässig, da in technischen Bestimmungen (z.B. [7], [8]) an den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ( $P_f \approx 10^{-3}$ ) deutlich geringere Sicherheitsanforderungen gestellt werden als an den Grenzzustand der Tragfähigkeit ( $P_f \approx 10^{-6}$ ).

Im Folgenden werden die getroffenen Annahmen für die hier durchgeführte Untersuchung kurz erläutert.

## 2.1 Tragprofil

Der Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Tragprofils einer Mehrfachbefestigung im Sinne von ETAG 001, Teil 6, wird im intakten Zustand, also ohne Berücksichtigung eines möglichen Ausfalls eines Befestigungspunktes geführt.

In der vorliegenden Studie wird analog zu [6] ein Fassadentragsystem (Bild 2.2) untersucht.



**Bild 2.2:**  
**Fassadensystem**

Um den Einfluss der Biegesteifigkeit des Tragprofils auf die Umlagerung der Kräfte bei einem duktilen Ausfall eines Befestigungspunktes zu studieren, werden in den probabilistischen Untersuchungen in Abschnitt 4 Tragprofile mit unterschiedlichen Trägheitsmomenten („biegeweich“–„biegesteif“) untersucht. Im „biegeweichen“ Fall wurde das Trägheitsmoment der realen Unterkonstruktion verwendet. Im „biegesteifen“ Fall wurde das Trägheitsmoment mit dem Faktor 5 erhöht.

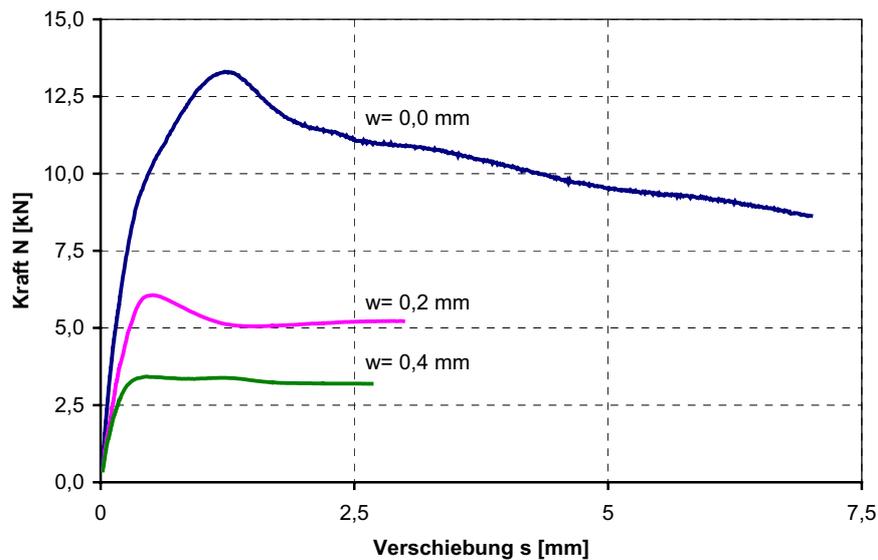
Das Tragprofil verhält sich in den nachfolgenden Berechnungen stets linear elastisch. Diese Annahme musste getroffen werden, um das mechanische Modell innerhalb der probabilistischen Untersuchung zu vereinfachen.

## 2.2 Verankerung

Die Verankerung des Tragprofils (redundante Befestigung) in der tragenden Stahlbetonkonstruktion erfolgt mittels Kunststoffdübel. Die Berücksichtigung des Tragverhaltens von Kunststoffdübel in gerissenem Beton wird nachfolgend beschrieben.

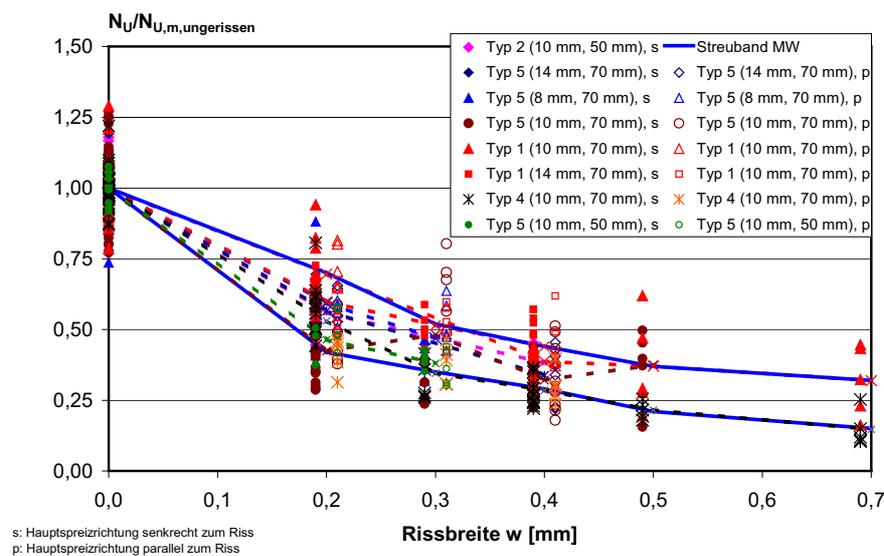
### 2.2.1 Reales Tragverhalten von Kunststoffdübeln

Pregartner [3] untersucht das Tragverhalten von Kunststoffdübeln in gerissenem Beton sehr ausführlich. Bild 2.3 zeigt, dass der Tragwiderstand von Kunststoffdübeln nach Überschreiten der Höchstlast nur in geringem Maße abfällt. Bei großen Rissbreiten ( $w = 0,4 \text{ mm}$ ) bleibt die Last nahezu konstant nach dem Erreichen der Höchstlast. Das Versagen von Kunststoffdübel in gerissenem Beton kann somit als duktil bezeichnet werden.



**Bild 2.3:**  
Tragverhalten von Kunststoffdübeln in gerissenem Beton, Parameter: Rissbreite  $w$ , aus [3]

In Bild 2.4 ist die Abnahme der bezogenen Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln in Abhängigkeit der Rissbreite dargestellt.



**Bild 2.4:**  
Bezogene Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln in Abhängigkeit der Rissbreite-, aus [3]

Bei einer Rissbreite  $w = 0,2$  mm erreichen Kunststoffdübel im Mittel etwa 50 bis 60% der Tragfähigkeit in ungerissenem Beton (Bild 2.4). Bei größeren Rissbreiten verläuft der Abfall der Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln degressiv. Bei der Rissbreite  $w = 0,7$  mm beträgt die mittlere Tragfähigkeit nach Pregartner [3] etwa 25% der mittleren Tragfähigkeit in ungerissenem Beton. Pregartner führt dies darauf zurück, dass durch die Rissöffnung die Spreizkraft der Kunststoffdübel lediglich in Richtung senkrecht zur Rissebene abgebaut wird. Die Spreizkraft in Richtung der Rissebene wird davon nur wenig beeinflusst und steht auch nach einer Rissöffnung zum großen Teil zur Verfügung. Deshalb geht der Tragwiderstand von Kunststoffdübeln auch bei großen Rissbreiten nicht vollständig verloren.

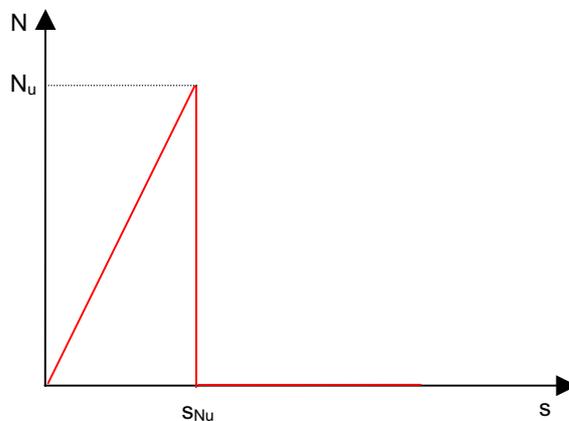
## 2.2.2 Simulation des Dübeltragverhaltens

Mehrfachbefestigungen (Durchlaufträger) sind statisch unbestimmte Tragsysteme. Die Verteilung der Kräfte bei statisch unbestimmten Systemen hängt von der Steifigkeit des Trägers und der Steifigkeit der Lagerung ab. Bei Überschreiten der Höchstlast eines Befestigungspunktes können sich die Steifigkeitsverhältnisse deutlich verändern.

Ziel der Untersuchung ist es den Einfluss der Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln nach Überschreiten der Höchstlast auf die Zuverlässigkeit der Konstruktion zu ermitteln. Deshalb wird in der vorliegenden Untersuchung zwischen sprödem und duktilem Ausfall von Befestigungspunkten unterschieden.

### 2.2.2.1 Elasto-sprödes Materialverhalten

Den Untersuchungen zur maximalen Beanspruchung pro Befestigungspunkt nach ETAG 001, Teil 6, wurde ein ideal elasto-sprödes Materialverhalten unterstellt (Bild 2.3).



**Bild 2.5:**

**Ideal elasto-sprödes Last-Verschiebungs-Verhalten von Befestigungsmitteln**

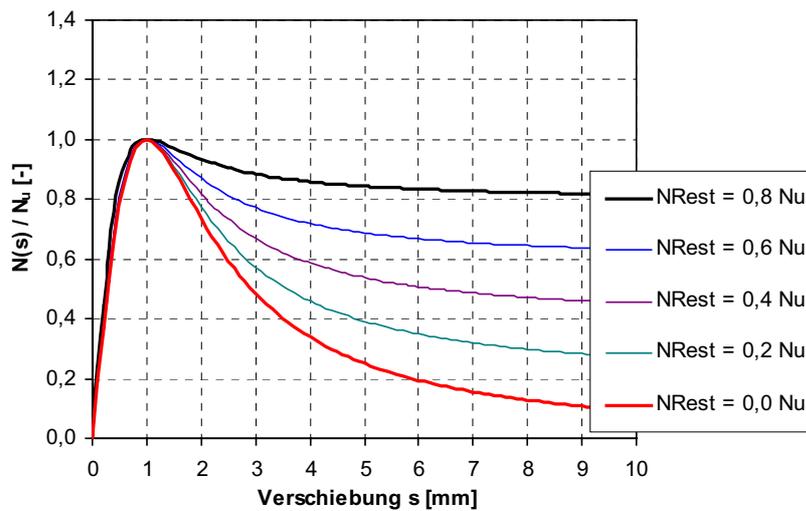
Das Last-Verschiebungs-Verhalten von ideal elasto-sprödem Material ist durch den linearen Anstieg der Traglast bis zum Erreichen der Höchstlast  $N_u$  gekennzeichnet. Nach dem Überschreiten der Verschiebung bei Höchstlast  $s_{Nu}$  geht die Tragfähigkeit „schlagartig“ auf Null zurück.

In der Realität weisen Befestigungsmittel kein ideal elasto-sprödes Verhalten auf. Jedoch können verschiedene Metaldübeltypen diesem Modell recht nahe kommen.

### 2.2.2.2 Duktiles Last-Verschiebungs-Verhalten

Kunststoffdübel verhalten sich relativ duktil, d.h. die Tragfähigkeit fällt nach Überschreiten der Höchstlast nicht schlagartig auf Null ab, sondern sie besitzen auch bei Verschiebungen  $s > s_{Nu}$  eine nennenswerte Tragfähigkeit.

Im nachfolgenden Modell wird der Grenzwert der Tragfähigkeit bei großen Verschiebungen  $s \gg s_{Nu}$  als Resttragfähigkeit  $N_{Rest}$  bezeichnet (Bild 2.6). Weiter Angaben zur mathematischen Formulierung des verwendeten Materialgesetzes sind in [4] enthalten.



**Bild 2.6:**  
**Duktiles Last-**  
**Verschiebungs-Verhalten**

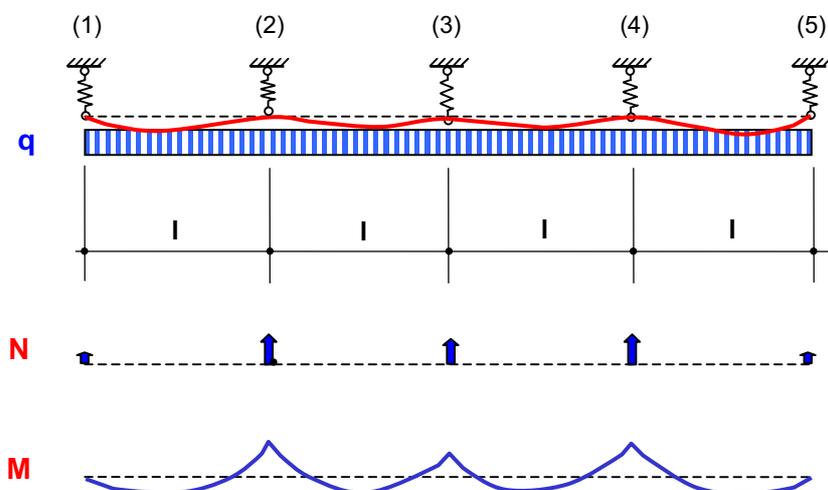
Bild 2.6 zeigt den Verlauf der bezogenen Tragfähigkeit der Dübel im verwendeten Modell. Die Tragfähigkeit des Dübel bei Verschiebungen  $s > s_{N_u}$  hängt im Wesentlichen vom Verhältnis der Resttragfähigkeit zur Höchstlast  $N_{Rest}/N_u$  ab. Dieses Materialverhalten dient nur zur Darstellung des Einflusses des Verhaltens der Befestigung nach Erreichen der Höchstlast. In der Realität können Befestigungsmittel spätestens bei einer Verschiebung  $s$  größer der Verankerungstiefe  $h_{ef}$  keine Beanspruchungen mehr aufnehmen.

### 3 Deterministische Untersuchungen

Im deterministischen Teil der Untersuchung werden die Auswirkungen des Ausfalls eines Befestigungspunktes in einem 4-Feld Träger untersucht. Parameter der Untersuchung ist das Verhalten des Befestigungsmittels nach Überschreiten der Höchstlast (spröde - duktil).

#### 3.1 Intaktes System

Ausgangspunkt der Untersuchung ist das *intakte* System, d.h. alle Verankerungen sind intakt und voll funktionsfähig. Bild 3.1 zeigt qualitativ die Verformungsfigur, die Auflagerkräfte und die Momentenlinie eines 4-Feldträgers.



**Bild 3.1:**  
System im intakten  
Zustand

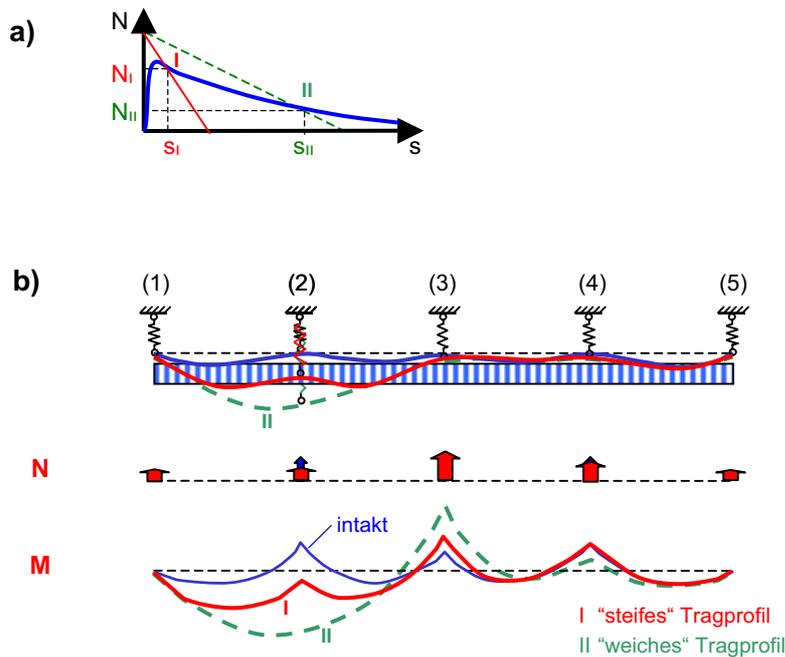
Bei einer realitätsnahen Steifigkeitsverhältnisse der Verankerung und des Trägers, wird das erste Innenlager (Punkt 2 bzw. 4) maximal beansprucht. Das erste Innenlager wird nahezu mit der dreifachen Last beansprucht wie das benachbarte Randlager. Ein Ausfall des Innenlagers ist deshalb sehr viel wahrscheinlicher als der Ausfall eines Randlagers. Deshalb wird in der nachfolgenden Untersuchung nur der Fall betrachtet, dass das erste Innenlager ausfällt. Die maximale Biegebeanspruchung tritt bei einem Durchlaufträger ebenfalls an der Stelle des ersten Innenlagers auf (Stützmoment).

#### 3.2 Ausfall eines Befestigungspunktes (1. Innenlager)

Die Auswirkungen des Ausfalls eines Verankerungspunktes in einem redundanten Tragsystem hängen von der Steifigkeit des Tragprofils und dem Verhalten des Befestigungspunktes nach Überschreiten der Höchstlast ab.

##### 3.2.1 Einfluss der Steifigkeit des Tragprofils

Der Einfluss der Steifigkeit des Tragprofils ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, trotzdem soll der Einfluss an dieser Stelle kurz gezeigt werden. Bild 3.2 zeigt qualitativ, dass sich bei Verwendung des gleichen Last-Verschiebungs-Verhaltens eines Befestigungsmittels zwei sehr unterschiedliche Gleichgewichtszustände einstellen können abhängig von der Steifigkeit des Tragprofils.



**Bild 3.2:**  
**Einfluss der Steifigkeit  
 des Tragprofils**

In beiden Fällen (I und II, Bild 3.2) wurde die Höchstlast der Verankerung überschritten. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Trägers im Fall I stellt sich der Gleichgewichtszustand unter einer geringen Verformung der Verankerung ein. Das Befestigungsmittel (Punkt 2) trägt im Fall I noch nahezu seine Höchstlast und deshalb müssen vom Tragsystem nur geringe Lasten auf benachbarte Befestigungsmittel übertragen werden. Im Fall II dagegen stellt sich der Gleichgewichtszustand unter deutlich größeren Verschiebungen ein. Das Befestigungsmittel im Auflagerpunkt 2 kann unter der dann vorliegenden Verschiebung kaum mehr zur Lastabtragung beitragen und die Beanspruchung des Tragprofils ist deshalb deutlich größer. Somit wird gezeigt, dass auch die Steifigkeit des Tragprofils die Beanspruchungen nach dem Erreichen der Höchstlast eines Befestigungsmittels bestimmt.

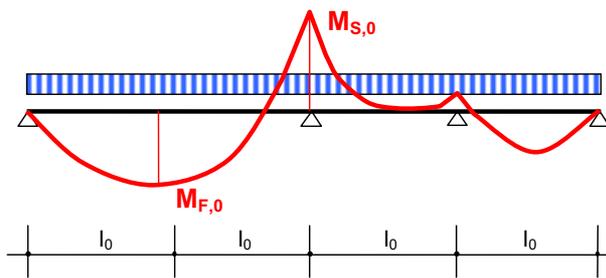
### 3.2.2 Einfluss des Dübeltragverhaltens

#### 3.2.2.1 Allgemeines

Bild 3.3 zeigt die Biegebeanspruchung des Tragprofils nach Überschreiten der Höchstlast des Verankerungspunktes 2. In Bild 3.3a) versagt der Befestigungspunkt spröde und die Stützweite des Systems beträgt  $l_0$ . Bild 3.3b) zeigt qualitativ den Zustand des Systems mit einer Stützweite  $l_1$  und einem „duktilen“ Versagen des Befestigungspunktes 2. Die Last, die über den Befestigungspunkt 2 übertragen wird, ist mit  $N_{\text{Rest}}$  bezeichnet.



a) Sprödes Versagen



b) Duktiler Versagen

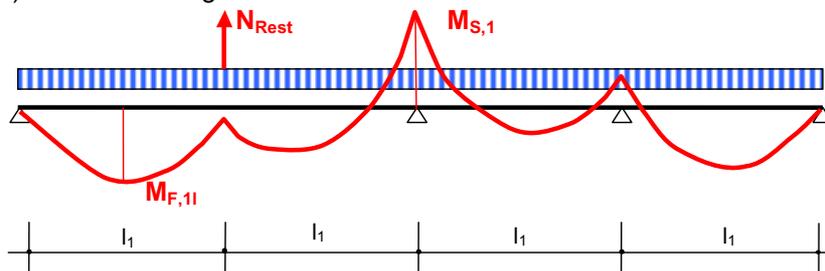


Bild 3.3:

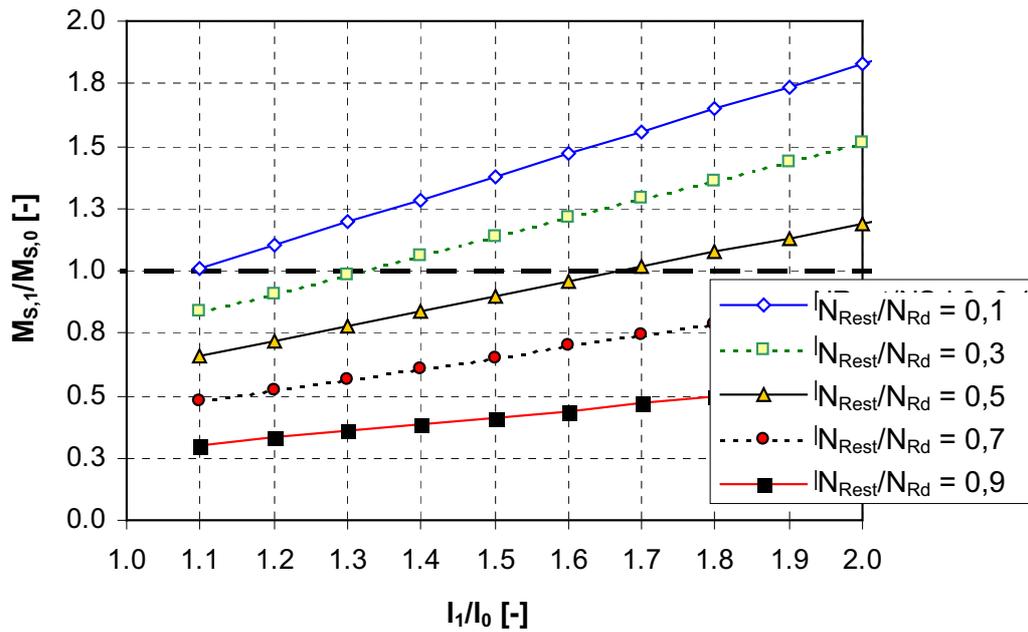
Qualitativer Verlauf der Biegebeanspruchung eines 4-Feldträgers

- a) Spröder Dübelausfall, Feldlänge  $l_0$
- b) Duktiler Dübelausfall, Feldlänge  $l_1$

Ziel der Untersuchung ist, das Verhältnis der Stützweiten  $l_1/l_0$  so zu bestimmen, dass das Tragprofil bei gleicher Linienlast  $q$  nach dem Ausfall des ersten Innenlagers mit dem gleichen maximalen Moment  $M_{S,1} = M_{S,0}$  beansprucht wird bzw. sich die gleiche maximale Verformung einstellt. Mit dem so bestimmten Verhältnis  $l_1/l_0$  kann dann der Bemessungswert der angreifenden Last bestimmt werden, der bei Verwendung von Kunststoffdübeln angesetzt werden darf ohne Berücksichtigung des Einflusses eines Ausfalls eines Befestigungspunktes in der statischen Berechnung.

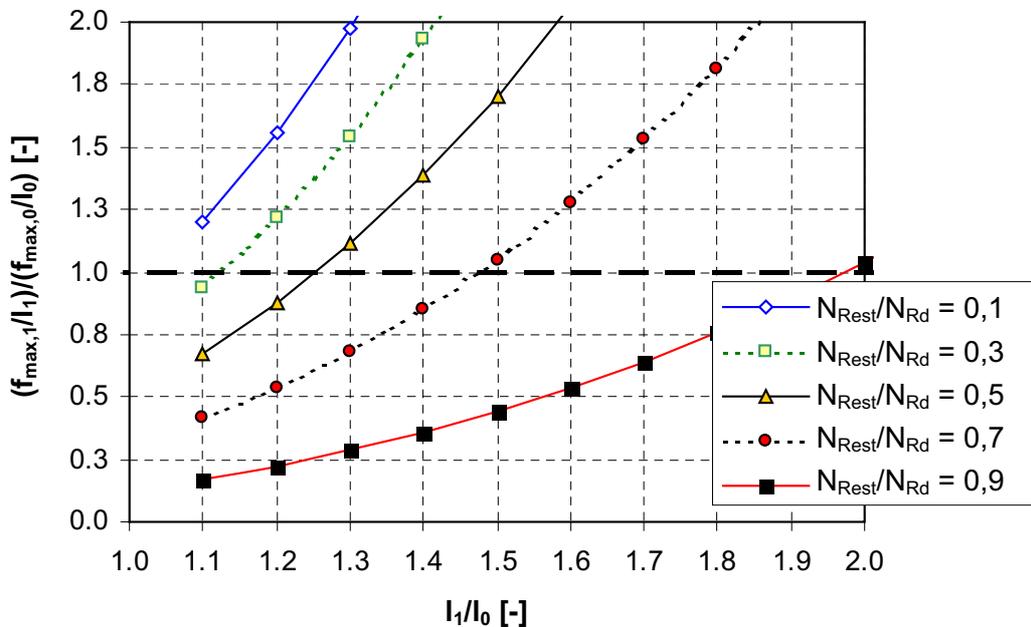
Bild 3.4 zeigt das Verhältnis der maximalen Biegebeanspruchungen des Tragprofils  $M_{S,1}/M_{S,0}$  aufgetragen über das Stützweitenverhältnis  $l_1/l_0$ . Parameter der Untersuchung ist das Verhältnis der Resttragfähigkeit zur Bemessungslast des Trägers.

Bei Verhältnissen  $M_{S,1}/M_{S,0} > 1$  in Bild 3.4 wird das Tragprofil mit der Stützweite  $l_1$  nach dem duktilen Ausfall des Verankerungspunktes stärker beansprucht als nach einem spröden Ausfall und der Stützweite  $l_0$ . Beträgt das Verhältnis  $M_{S,1}/M_{S,0} = 1$ , so stellt sich in beiden Fällen die gleiche Biegebeanspruchung nach dem Ausfall des Verankerungspunktes ein.



**Bild 3.4:** Verhältnis der maximalen Stützmomente  $M_{S,1}/M_{S,0}$  nach Ausfall des 1. Innenlagers in Abhängigkeit der bezogenen Stützweite des Systems; Parameter:  $N_{Rest}/N_{Sd}$

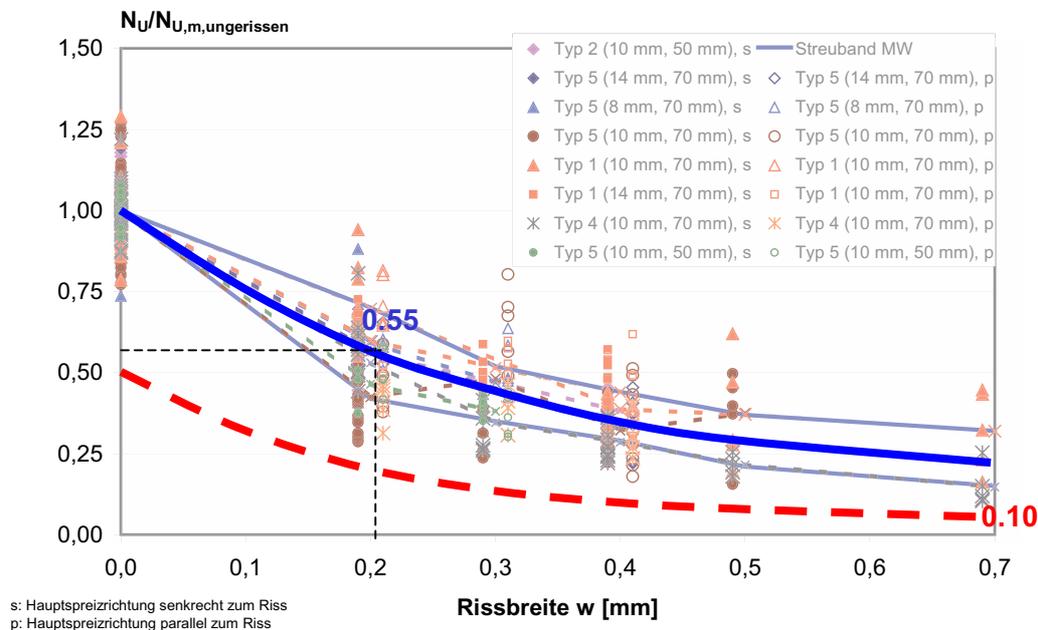
Analog dazu sind in Bild 3.5 die Verhältnisse bezüglich der maximal auftretenden Verformungen dargestellt.



**Bild 3.5:** Verhältnis der maximalen Verformungen  $f_{max,1}/f_{max,0}$  nach Ausfall des 1. Innenlagers in Abhängigkeit der bezogenen Stützweite des Systems; Parameter:  $N_{Rest}/N_{Rd}$

### 3.2.2.2 Kunststoffdübel

In Bild 3.6 sind zu den Versuchsergebnissen von Pregartner die Mittelwertkurve (durchgehend blau) und der untere Grenzwert (gestrichelt rot) der Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln eingetragen.



**Bild 3.6: Mittelwert und unterer Grenzwert der bezogenen Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln**

Die charakteristische Tragfähigkeit von redundanten Befestigungsmitteln wird bei einer Rissbreite  $w = 0,2$  mm bestimmt. Der Mittelwert der bezogenen Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln beträgt etwa 55% der Tragfähigkeit in ungerissenem Beton. Legt man der Untersuchung einen realistischen Variationskoeffizienten  $v = 15\%$  bei einer Rissbreite  $w = 0,2$  mm zugrunde ergibt sich der charakteristische Widerstand  $N_{R,k}$  zu:

$$\begin{aligned} N_{R,k} &= N_{u,m,w=w_k} \cdot (1 - k_{5\%} \cdot V) \\ &= 0,55 \cdot N_{u,w=0} \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,15) = 0,41 N_{u,w=0} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Für den Bemessungswert des Widerstandes gilt:

$$N_{R,d} = N_{R,k} / \gamma_M = 0,41 \cdot N_{u,w=0} / (1,5 \cdot 1,2) = 0,23 N_{u,w=0} \quad (3.2)$$

Um das Verhältnis der Resttragfähigkeit zur Bemessungslast von Kunststoffdübeln abzuschätzen, wird die minimale bezogene Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln bei einer Rissbreite  $w = 0,7$  mm verwendet. Nach Bild 3.6 wird diese zu 10% der Tragfähigkeit in ungerissenem Beton angesetzt. Bei großen Rissbreiten versagen Kunststoffdübel auf niedrigem Lastniveau nahezu ideal plastisch (vgl. Bild 2.3). Deshalb kann die Resttragfähigkeit zu

$$N_{Rest} = 0,1 N_{u,w=0}$$

abgeschätzt werden. Bezieht man die Resttragfähigkeit auf den Bemessungswert des Widerstands so ergibt sich:

$$N_{Rest} = 0,1 N_{u,w=0} = 0,1 / 0,23 N_{R,d} = 0,43 N_{R,d} \quad (3.3)$$



Geht man mit dem Verhältniswert  $N_{\text{Rest}} = 0,43 N_{\text{R,d}}$  in Bild 3.4, so erhält man für das Stützweitenverhältnis  $l_1/l_0 \approx 1,5$  in etwa die gleiche Momentenbeanspruchung im Tragprofil wie bei einem sprödem Versagen des Befestigungspunktes ( $M_{\text{S,1}}/M_{\text{S,0}} = 1$ ).

Da die Durchbiegung sich proportional zur 4. Potenz zur Feldlänge verhält, stellt sich die gleiche bezogene Durchbiegung erwartungsgemäß bei kleineren bezogenen Stützweiten ( $l_1/l_0 \approx 1,2$ ; Bild 3.5) ein. Aufgrund der geringeren Anforderungen an den Zustand der Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zur Tragfähigkeit ist dieser Wert in der vorliegenden Untersuchung nur von geringer Bedeutung.

Da die Auflagerkräfte bei Durchlaufträgern linear von der Stützweite abhängen ergibt sich aus dieser deterministischen Untersuchung, dass die zulässige Beanspruchung pro Befestigungspunkt bei duktil versagenden Befestigungsmitteln (z.B. Kunststoffdübeln) im Vergleich zu spröde versagenden Dübeln um etwa 50% erhöht werden kann.

Die prozentuale Erhöhung der Beanspruchung der benachbarten Dübel ist bei duktilem Versagen geringer als bei sprödem Versagen, da der „ausgefallene“ Dübel wenn auch in reduziertem Umfang Last in den Verankerungsgrund einleitet.

### 3.3 Zusammenfassung der deterministischen Untersuchung

Die deterministische Untersuchung zeigt, dass die zulässige Last pro Befestigungspunkt von redundanten Systemen bei duktil versagenden Befestigungsmitteln im Vergleich zu spröde versagenden Dübeln erhöht werden kann.

Versuchsergebnisse zeigen, dass Kunststoffdübel auch bei sehr großen Rissbreiten ( $w = 0,7 \text{ mm}$ ) zumindest eine Tragfähigkeit von  $0,43 N_{\text{R,d}}$  aufweisen. Weiter versagen Kunststoffdübel in breiten Rissen nahezu duktil, d.h. nach Überschreiten der Höchstlast fällt der Tragwiderstand nur in sehr geringem Maße ab.

Vergleicht man die Biegebeanspruchung des Tragprofils unter Berücksichtigung dieser Effekte, so kann die zulässige Last pro Befestigungspunkt mit dem Faktor 1,5 im Vergleich zu spröde versagenden Befestigungsmitteln erhöht werden.

Legt man den gültigen Wert  $N_{\text{Sd}} = 3,0 \text{ kN}$  nach ETAG 001, Teil 6, zu Grunde, so kann der entsprechende Wert bei redundanten Befestigungen mit Kunststoffdübeln auf  $N_{\text{Sd}} = 1,5 \cdot 3,0 = 4,5 \text{ kN}$  angehoben werden.

## 4 Probabilistische Untersuchungen

Die Zuverlässigkeit technischer Systeme oder Komponenten kann mit Hilfe probabilistischer Methoden quantifiziert werden. Das Ergebnis probabilistischer Untersuchungen spiegelt keine tatsächlich vorhandene, sondern eine operative Versagenswahrscheinlichkeit wider, da in der Regel nicht alle Größen in einem stochastischen Modell exakt beschrieben werden können. Mit Hilfe probabilistischer Methoden können aber die Zuverlässigkeitsniveaus unterschiedlicher Systeme unter Verwendung des gleichen stochastischen Modells objektiv verglichen werden.

Nachfolgend wird der Einfluss des Dübeltragverhaltens (spröde/duktil) auf die Zuverlässigkeit redundanter Systeme (4-Feldträger) untersucht. Ziel der Untersuchung ist, das Maß der Erhöhung der zulässigen Last pro Befestigungspunkt bei duktil versagenden Befestigungspunkten so zu bestimmen, dass sich in beiden Fällen in etwa die gleiche operative Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  einstellt.

### 4.1 Versagenskriterien

Die Definition von Versagenskriterien ist Voraussetzung zur Berechnung einer Versagenswahrscheinlichkeit. In der vorliegenden Untersuchung wird nur der Grenzzustand der Tragfähigkeit des redundanten Systems untersucht, da hier deutlich strengere Anforderung gestellt werden müssen im Vergleich zur Gebrauchstauglichkeit.

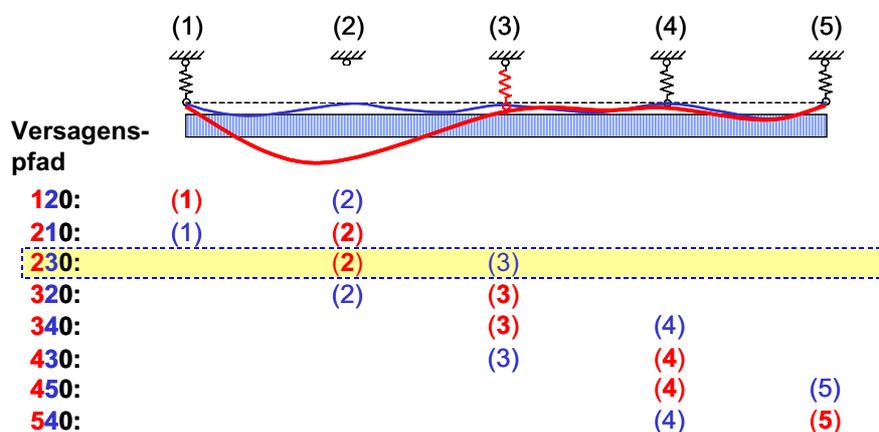
Nach dem Ausfall eines Befestigungspunktes kann in einem redundanten System

- die Tragfähigkeit der benachbarten Befestigungspunkte oder
- die Tragfähigkeit des Tragprofils überschritten werden.

#### 4.1.1 Ausfall von zwei benachbarten Befestigungspunkten

Der Ausfall von zwei benachbarten Befestigungspunkten innerhalb eines redundanten Systems wird in der vorliegenden Studie als Systemversagen der Befestigung definiert, da dann der sog. „Reißverschluss effekt“ einsetzen kann, d.h. die benachbarten Dübel werden immer stärker beansprucht und versagen ebenfalls. Weiter hat der Ausfall von benachbarten Befestigungen in der Regel große Verformungen des befestigten Systems zur Folge, die nicht mehr toleriert werden können.

Bild 4.1 zeigt die möglichen „Versagenspfade“ eines 4-Feldträgers.



**Bild 4.1:**  
 Versagenspfade eines  
 4-Feldträgers



In Bild 4.1 oben ist der Fall dargestellt, dass der Befestigungspunkt „2“ bereits ausgefallen und der Befestigungspunkt „3“ eben seine Höchstlast erreicht. In der vorliegenden Untersuchung erhält dieser Versagenspfad die Bezeichnung „230“. An erster Stelle steht der zuerst ausgefallene Befestigungspunkt „2“, die zweite Stelle bezeichnet den Punkt der seine Höchstlast genau erreicht. Insgesamt sind bei einem 4-Feldträger acht Kombinationen möglich (Bild 4.1).

#### 4.1.2 Überschreiten der Tragfähigkeit des Tragprofils

Wird die Tragfähigkeit des Tragprofils nach dem Ausfall eines Befestigungspunktes überschritten, kann dies zum Versagen des gesamten Systems führen.

Da das Tragprofil im vorliegenden mechanischen Modell linear elastisches Materialverhalten aufweist, können keine plastischen Gelenke nach dem Ausfall eines Befestigungspunktes ausgebildet werden. Diese können in der Realität zu großen, nicht tolerierbaren Verformungen führen. Deshalb wird auf der „sicheren Seite“ liegend das Erreichen der Streckgrenze innerhalb des Querschnitts als Versagenkriterium des Tragprofils definiert.

Voruntersuchungen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird, haben gezeigt, dass das Tragprofil unter den oben definierten Verhältnissen von Einwirkung und Widerstand im intakten Zustand unter voller rechnerischen Ausnutzung der Biegetragfähigkeit ( $S_d/R_d = 1$ ) mit einer Wahrscheinlichkeit von  $P_f = 3,2 \cdot 10^{-6}$  (HL-Index  $\beta = 4,51$ ) zu Fließen beginnt. Dieser Wert stimmt mit dem im Bauwesen [8] geforderten Zuverlässigkeitsniveau von  $\beta = 4,7$  - bezogen auf den Zeitraum eines Jahres - gut überein.

Für die Berechnung der Erhöhung des Bemessungswertes der angreifenden Last pro Befestigungspunkt wird nachfolgend wie folgt verfahren.

- Zuerst wird die Ausnutzung  $k_{\text{spröde}}$  der Biegetragfähigkeit des Profils im intakten Zustand bestimmt, so dass sich bei einem *sprödem* Ausfall der Befestigung ein Zuverlässigkeitsindex von  $\beta = 4,5$  einstellt.
- Anschließend wird die Ausnutzung  $k_{\text{duktil}}$  der Biegetragfähigkeit des Profils im intakten Zustand bestimmt, so dass sich bei einem *duktilen* Versagen des Befestigungspunktes ebenfalls ein Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 4,5$  ergibt.
- Durch den Vergleich der beiden Ausnutzungen ( $k_{\text{duktil}}/k_{\text{spröde}}$ ) kann auf die Erhöhung der zulässigen Last pro Befestigungspunkt  $f = N_{S_d, \text{duktil}}/N_{S_d, \text{spröde}}$  zurückgerechnet werden:

Die höhere Ausnutzung der Biegetragfähigkeit des Profils kann aus einer Erhöhung der Beanspruchung bzw. aus einer Vergrößerung der Stützweiten resultieren:

Bei konstanten Stützweiten ( $l_{\text{duktil}} = l_{\text{spröde}}$ ) des Tragprofils und variabler Beanspruchung ( $q_{d, \text{duktil}} > q_{d, \text{spröde}}$ ) gilt:

$$\frac{N_{S_d, \text{duktil}}}{N_{S_d, \text{spröde}}} = \frac{q_{d, \text{duktil}}}{q_{d, \text{spröde}}} = \frac{k_{\text{duktil}}}{k_{\text{spröde}}}$$

Gl. 4.1

$$N_{S_d, \text{duktil}} = \frac{k_{\text{duktil}}}{k_{\text{spröde}}} \cdot N_{S_d, \text{spröde}}$$

Bei variablen Stützweiten ( $l_{\text{duktil}} > l_{\text{spröde}}$ ) des Tragprofils und konstanter Einwirkung ( $q_{d1} = q_{d0}$ ) gilt:



$$\frac{N_{Sd,duktil}}{N_{Sd,spröde}} = \frac{l_{duktil}}{l_{spröde}}; \quad \text{und} \quad \frac{l_{duktil}^2}{l_{spröde}^2} = \frac{k_{duktil}}{k_{spröde}}$$

Gl. 4.2

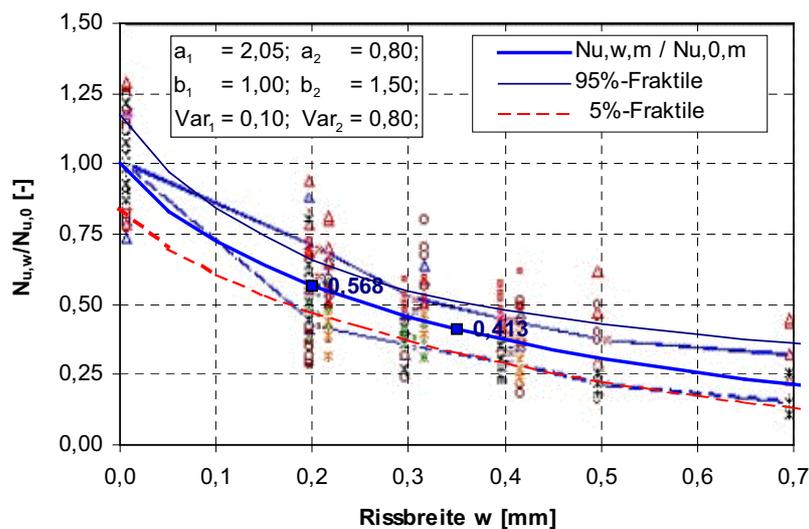
$$N_{Sd,duktil} = \sqrt{\frac{k_{duktil}}{k_{spröde}}} \cdot N_{Sd,spröde}$$

## 4.2 Stochastisches Modell

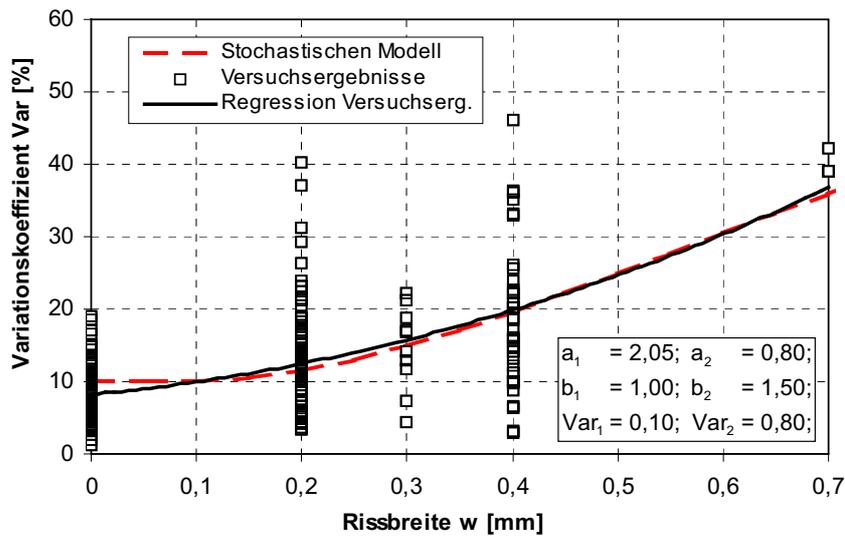
### 4.2.1 Tragverhalten der Kunststoffdübel

Das Tragverhalten der Kunststoffdübel in gerissenem Beton wird mit dem in [4] entwickelten Modell simuliert (vgl. 3.2.2.2).

Bild 4.2 und Bild 4.3 zeigen, dass das gewählte stochastische Modell das reale Tragverhalten von Kunststoffdübeln gut simuliert. Dies gilt sowohl für die mittlere Höchstlast (Bild 4.2) als auch für die Streuung der Höchstlast (Bild 4.3) von Kunststoffdübeln in Abhängigkeit der Rissbreite.



**Bild 4.2:**  
Tragfähigkeit von  
Kunststoffdübeln in  
gerissenem Beton,  
Vergleich:  
Versuchsergebnisse  
- Simulation



**Bild 4.3:**  
**Streuung der**  
**Tragfähigkeit von**  
**Kunststoffdübel in**  
**gerissemem Beton,**  
**Vergleich:**  
**Versuchsergebnisse**  
**- Simulation**

In [4] sind detaillierte Angaben zum verwendeten stochastischen Modell der Dübeltragfähigkeit gegeben. Die Tragfähigkeit nach Überschreiten der Höchstlast wird analog zu Abschnitt 2.2.2 simuliert.

Die vorhandene Modellunsicherheit wird in den Berechnungen mit dem Faktor  $\xi$  ( $m = 1$ ,  $v = 15\%$ , LNV) abgeschätzt.

#### 4.2.2 Rissbreite

Die Verteilung der Rissbreiten folgt einer Gamma-Verteilung mit dem Mittelwert  $m = 0,1$  mm und einer Standardabweichung  $s = 0,1$  mm. Diese Werte sind das Ergebnis einer umfassenden Untersuchung von Bergmeister [9].

#### 4.2.3 Tragprofil

Der mittlere Widerstand des Tragprofils errechnet sich aus dem Produkt des Bemessungswertes der Einwirkung ( $S_d = R_d$ ) und dem Materialteilsicherheitsfaktor  $g_M$ . Die Variationskoeffizient wird auf  $v=10\%$  festgelegt. Dieser Ansatz ist konservativ, da die Überfestigkeit des Materials vernachlässigt wird.

#### 4.2.4 Einwirkung

Analog zu [4] wird auf Seiten der Einwirkung zwischen ständiger und veränderlicher Last unterschieden. Das Verhältnis ständiger zu veränderlicher Einwirkung beträgt 1/1 (Bemessungswerte).

Die ständige Einwirkung (Eigengewicht) weist nur geringe Streuungen auf ( $v=10\%$ ) und folgt einer Log-Normalverteilung. Der charakteristische Wert der ständigen Einwirkung ( $\gamma_G = 1,35$ ) wird als Mittelwert definiert. Die veränderliche Einwirkung (Verkehrslast) streut deutlich stärker ( $v=40\%$ ) und wird mit einer geeigneten Extremwert-Verteilung (Gumbel-Verteilung) simuliert. Der charakteristische Wert der veränderlichen Einwirkung ( $\gamma_G = 1,50$ ) wird als 98% Fraktilwert interpretiert. Daraus ergibt sich der in Tabelle 4.1 angegebene Mittelwert der veränderlichen Einwirkung.



#### 4.2.5 Zusammenfassung

Tabelle 4.1 zeigt eine Zusammenfassung der verwendeten stochastischen Modells.

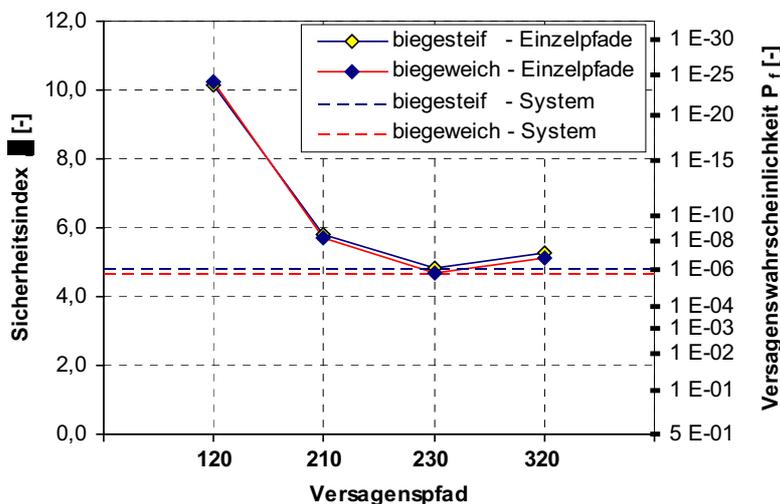
Variable		Verteilungstyp	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	
für jeden Dübel	Dübel im Riss	Riss	Rechteck	0,5		
	Rissbreite	w	Gamma	0,1	0,1	
	Dübeltragfähigkeit 1	$N_1$	LNV	$f(N_{u,0}(w))$		10%
	Dübeltragfähigkeit 2	$N_2$	LNV	$f(N_{u,0}(w))$		80%
	Resttragfähigkeit	$N_{Rest}$	LNV	$f(N_{u,0}(w))$		30%
	Modellunsicherheit	$\xi$	LNV	1		15%
Widerstand Profil	$W_{yk}$	LNV	$S_d \cdot \gamma_M$		10%	
Ständige Last	G	LNV	$S_d \cdot 0,5 / \gamma_G$		10%	
Veränderliche Last	Q	Gumbel	$S_d \cdot 0,5 / 2,037 / \gamma_Q$		40%	

Tabelle 4.1: Stochastisches Modell

### 4.3 Ergebnisse

#### 4.3.1 Ausfall benachbarter Befestigungspunkte

Bild 4.4 zeigt die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Versagenspfade (vgl. Abschnitt 4.1.1) und die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  des Gesamtsystems bei sprödem Tragverhalten der Dübel. Die Biegesteifigkeit des Trägers beeinflusst die Zuverlässigkeit des Systems und der einzelnen Komponenten nur gering.



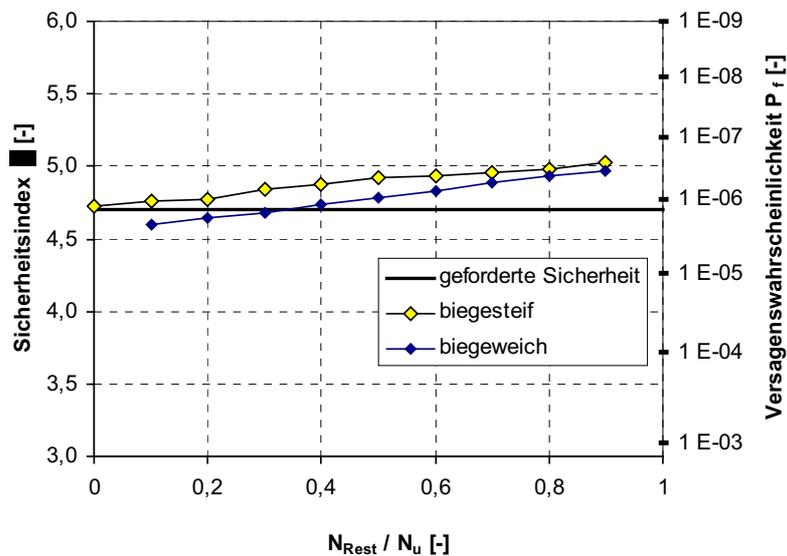
**Bild 4.4:**  
Wahrscheinlichkeit der einzelnen Versagenspfade bei sprödem Dübelausfall, Parameter: Biegesteifigkeit des Trägers

Bild 4.4 macht sehr deutlich, dass der Versagenspfad „230“ die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems dominiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass zuerst der höchstbeanspruchte Punkt 2 ausfällt und anschließend die Höchstlast des mittleren Befestigungspunktes 3 erreicht wird beträgt etwa  $10^{-6}$  und entspricht damit fast exakt der Versagenswahrscheinlichkeit des Systems. Die übrigen Versagenspfade leisten somit nur einen zu vernachlässigenden



Beitrag zur Systemversagenswahrscheinlichkeit und werden im Weiteren nicht mehr berücksichtigt.

In Bild 4.5 ist die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit (Pfad „230“) über die bezogene Resttragfähigkeit des Befestigungspunktes  $N_{Rest}/N_u$  dargestellt. Parameter ist die Biegesteifigkeit des Profils.



**Bild 4.5:**  
**Wahrscheinlichkeit des**  
**Versagenspfades „230“ in**  
**Abhängigkeit von  $N_{Rest}/N_u$ ,**  
**Parameter: Biegesteifig-**  
**keit des Trägers**

Bild 4.5 zeigt, dass die Zuverlässigkeit eines redundanten Systems mit steigender bezogener Resttragfähigkeit des Befestigungsmittels erwartungsgemäß ansteigt. Dieser Anstieg ist jedoch relativ gering. Sowohl bei einem biegeweichen wie auch bei einem biegesteifen Tragprofil sinkt die Versagenswahrscheinlichkeit von sehr sprödem Verhalten ( $N_{Rest}/N_u=0$ ) zu sehr duktilem Verhalten ( $N_{Rest}/N_u=0,9$ ) in etwa mit dem Faktor 1/7 bis 1/10. Diese Unterschiede sind bei probabilistischen Untersuchungen als nicht signifikant anzusehen. Daher rechtfertigt dieser relativ geringe Zuverlässigkeitserfolg bei redundanten Systemen, die mit duktil versagenden Befestigungsmitteln verankert sind, aus Sicht der Verfasser kein gesondertes Vorgehen in Bezug auf die Versuchsbedingungen und Auswertekriterien im Zulassungsverfahren im Vergleich zu Dübeln, die spröde versagen.

Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse können die dominierenden Einflüsse auf die Versagenswahrscheinlichkeit gezeigt werden. Die Wichtungsfaktoren  $\alpha_i$  im Standardnormalenraum zeigen das Gewicht der einzelnen streuenden Größen an der Versagenswahrscheinlichkeit. Am probabilistischen Bemessungspunkt  $X^*$  (=Punkt mit der höchsten Versagenswahrscheinlichkeit) gilt:

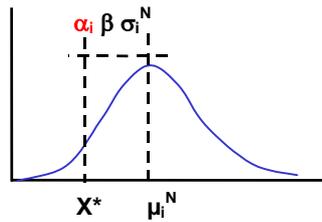


$$\mu_G = a_0 + \sum a_i \mu_i^N$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sum (a_i \sigma_i^N)^2}$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}$$

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_G} a_i \rightarrow X^* = \mu_i^N - \alpha_i \beta \sigma_i^N$$



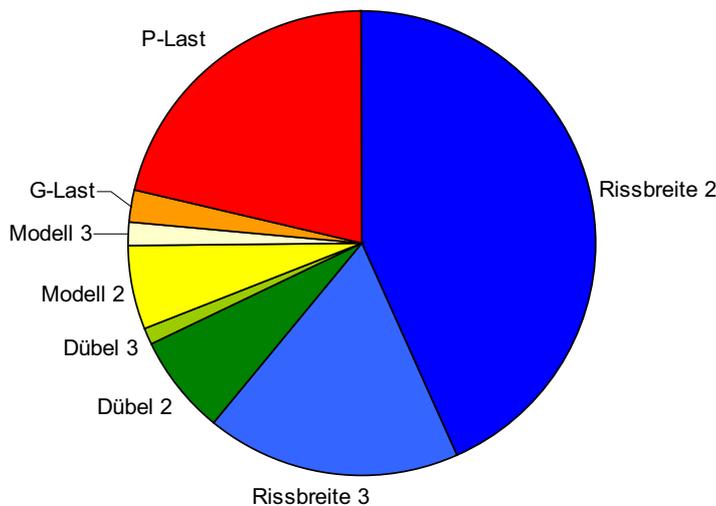
Gl. 4.3

Die Summe der Quadrate der aller Wichtungsfaktoren  $\alpha_i$  ergibt definitionsgemäß 1:

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_i)^2 = 1$$

Gl. 4.4

Bild 4.6 zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse in Form eines Kreisdiagramms für den Versagenspfad „230“.

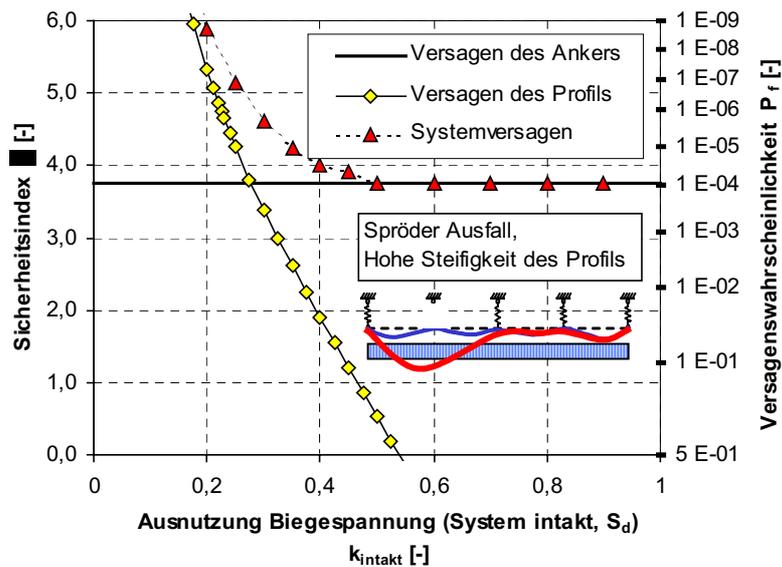


**Bild 4.6:**  
**Ergebnis der**  
**Sensitivitätsanalyse**  
**Versagenspfad „230“**

Bild 4.6 zeigt den dominierenden Einfluss der Rissbreiten im Verankerungsbereich von Dübel 2 und 3 für den Versagenspfad „230“. Die veränderliche Einwirkung und die Streuung im Dübelverhalten der Dübel spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb wirkt sich die Duktilität der Dübel nach Überschreiten der Höchstlast nur relativ gering auf die Zuverlässigkeit der redundanten Befestigung aus.

#### 4.3.2 Biegeversagen des Profils nach Ausfall eines Befestigungspunktes

In Bild 4.7 ist die Zuverlässigkeit des Ankers (1. Innenlager) und des Tragprofils bei sprödem Ausfall des Befestigungspunktes aufgetragen.

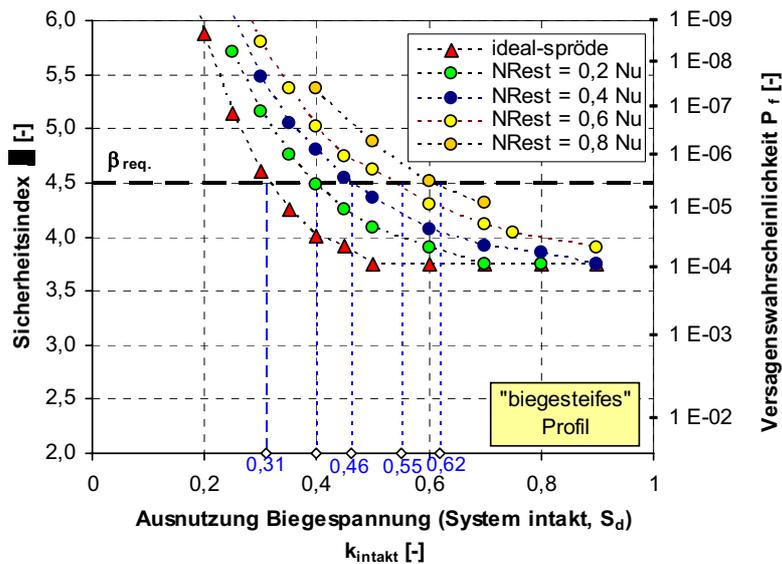


**Bild 4.7:**  
 Zuverlässigkeit des Ankers,  
 des Profils und des Systems  
 in Abhängigkeit der  
 Ausnutzung der  
 Profiltragfähigkeit im  
 intakten Zustand, spröder  
 Ausfall

Bei der Berechnung wurde unterstellt, dass der Befestigungspunkt im intakten Zustand stets voll ausgenutzt ist. Deshalb ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Ankers in Bild 4.7 konstant zu  $P_f = 10^{-4}$ . Die Zuverlässigkeit des Tragprofils nach dem spröden Ausfall des Befestigungspunktes nimmt mit steigender Ausnutzung der Biegespannung rasch ab.

Die Systemversagenswahrscheinlichkeit (Versagen des Ankers + Versagen des Profils) wird bei geringer Ausnutzung des Profils ( $k < 0,20$ ; Bild 4.7) vom Profil selbst, bei großer Ausnutzung des Profils ( $k > 0,40$ , Bild 4.7) von der Dübeltragfähigkeit bestimmt. Das kommt daher, dass bei einer geringen Ausnutzung des Profils im intakten Zustand die Tragfähigkeit des Profils auch nach dem Ausfall eines Befestigungspunktes nicht überschritten wird. Umgekehrt beschränkt die Zuverlässigkeit des Befestigungspunktes die Systemzuverlässigkeit bei hoher Ausnutzung des Tragprofils im intakten Zustand, da erst ein Ausfall des Befestigungspunktes zum Versagen des Profils führt.

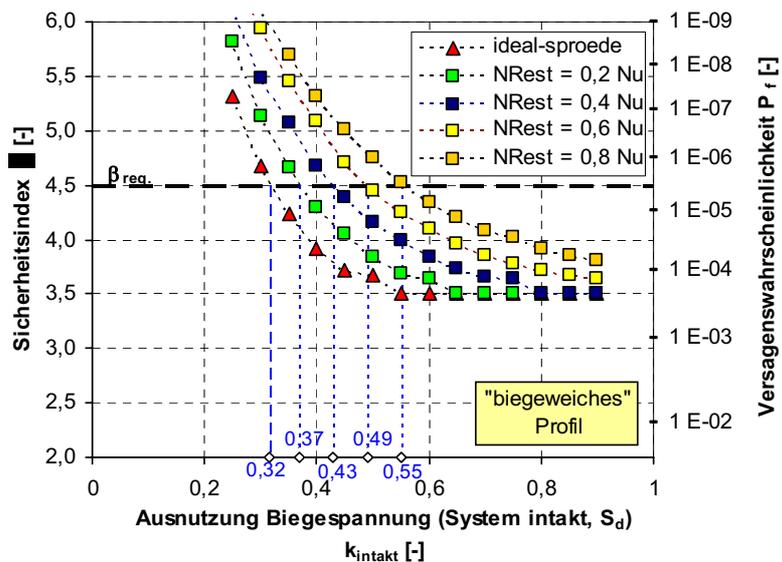
Bild 4.8 zeigt die Systemzuverlässigkeit in Abhängigkeit der Ausnutzung der Biegetragfähigkeit des Tragprofils im biegesteifen Fall. Parameter der Untersuchung ist die bezogene Resttragfähigkeit des Befestigungspunktes.



**Bild 4.8:**  
Zuverlässigkeit des Systems in Abhängigkeit der Ausnutzung der Profiltragfähigkeit im intakten Zustand, „steifes“ Profil

Nach Abschnitt 4.1.2 erreicht das Tragprofil im intakten Zustand einen Zuverlässigkeitsindex  $\beta^\circ = 4,5$ . In Bild 4.8 ist dieser Wert zum Vergleich eingetragen. Durch Ablesen kann die Ausnutzung im intakten Zustand ermittelt werden, so dass die gleiche Systemzuverlässigkeit unter Berücksichtigung des möglichen Ausfalls eines Befestigungspunktes erreicht wird. Für den Fall von sprödem Versagen ergibt sich ein Wert  $k = 0,31$ , für den duktilen Fall ( $N_{\text{Rest}}/N_u = 0,8$ )  $k = 0,62$ .

Analog dazu zeigt Bild 4.9 die Verhältnisse bei einem biegeweichen Träger.



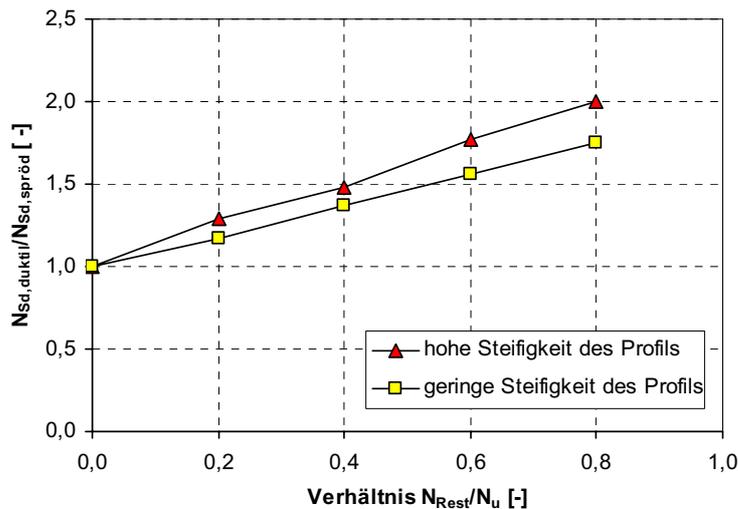
**Bild 4.9:**  
Systemversagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Ausnutzung der Profiltragfähigkeit im intakten Zustand, „weiches“ Profil

Die Erhöhung der zulässigen Beanspruchung pro Befestigungspunkt kann aus den oben gezeigten Ergebnissen der probabilistischen Untersuchung auf einem konstanten Zuverlässigkeitsniveau abgeleitet werden.



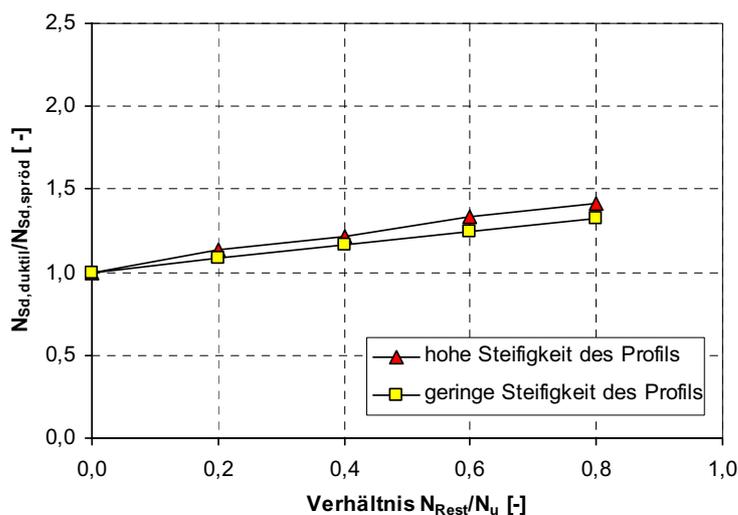
Wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, kann die Erhöhung der zulässigen Beanspruchung pro Befestigungspunkt zu einer Vergrößerung der Stützweite des Systems bzw. zu einer Erhöhung der Beanspruchung bei konstanter Stützweite oder einer Kombination aus beiden Effekten führen.

Bild 4.10 zeigt das Verhältnis der zulässigen Beanspruchungen pro Befestigungspunkt  $N_{Sd,dukttil}/N_{Sd,spröde}$  in Abhängigkeit der bezogenen Resttragfähigkeit des Befestigungsmittels. Der Auswertung in Bild 4.10 liegt zugrunde, dass die Erhöhung der Biegebeanspruchung aus einer Erhöhung der Einwirkung bei einer konstanten Stützweite  $l$  resultiert.



**Bild 4.10:**  
Erhöhungsfaktor  $f = N_{Sd,dukttil}/N_{Sd,spröde}$  in Abhängigkeit der bezogenen Resttragfähigkeit  $N_{Rest}$ ,  $l = \text{const}$ ,  $q = \text{variabel}$

Bild 4.11 zeigt die analoge Auswertung, allerdings wurde hier unterstellt, dass die Erhöhung der Biegebeanspruchung aus einer Vergrößerung der Stützweite bei konstanter Einwirkung  $q_d$  resultiert.



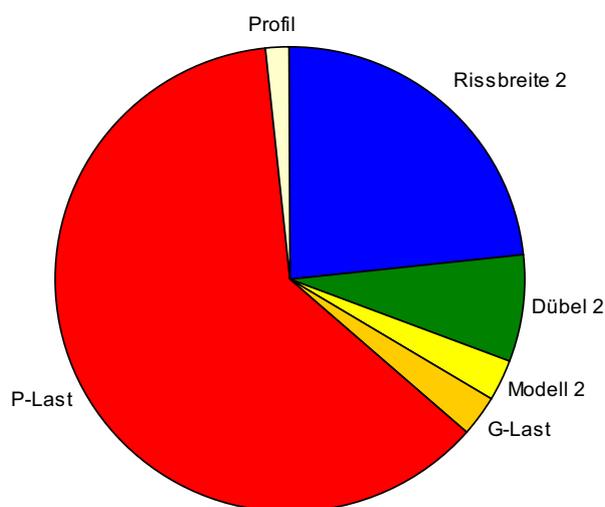
**Bild 4.11:**  
Erhöhungsfaktor  $f = N_{Sd,dukttil}/N_{Sd,spröde}$  in Abhängigkeit der bezogenen Resttragfähigkeit  $N_{Rest}$ ,  $q = \text{const}$ ,  $l = \text{variabel}$

Die Auswertungen in Bild 4.10 und Bild 4.11 zeigen, dass die zulässige Last pro Befestigungspunkt bei duktilen Befestigungsmitteln im Vergleich zu spröden Befestigungsmitteln erhöht werden kann. In Abhängigkeit der bezogenen Resttragfähigkeit

und der Steifigkeit des Profils kann aus den oben gezeigten Bildern die Erhöhung der zulässigen Last pro Befestigungspunkt abgelesen werden, die das gleiche Zuverlässigkeitsniveau  $\beta^0 = 4,5$  gewährleistet.

Kunststoffdübel versagen in breiten Rissen sehr duktil, d.h. der Tragwiderstand fällt nach Erreichen der Höchstlast nur sehr langsam ab. Nach Meinung der Verfasser scheint ein Wert  $N_{Rest}/N_u$  im Bereich von 0,6 bis 0,8 vertretbar. In diesem Bereich ergibt sich ein zulässiger Erhöhungsfaktor der Beanspruchung von 1,3 bis 2,0, abhängig davon, ob die Stützweite (1,3 bis 1,4; Bild 4.11) oder die Einwirkung (1,6 bis 2,0; Bild 4.10) variiert wird.

Bild 4.12 zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für den Ausfall des Befestigungspunktes 2 und dem Versagen des Tragprofils.



**Bild 4.12:**  
**Ergebnis der**  
**Sensitivitätsanalyse**  
**„Ausfall Punkt 2 + Profil“**

Der für das Versagen maßgebende Parameter ist die veränderliche Einwirkung. Eine hohe Duktilität des Befestigungsmittels nach Überschreiten der Höchstlast reduziert die Einwirkung auf das Tragprofil im Vergleich zum spröden Ausfall sehr deutlich.

Deshalb ist es möglich den Bemessungswert der Beanspruchung pro Befestigungspunkt bei redundanten Befestigungen mit duktilem Versagen im Vergleich zu Befestigungen mit sprödem Versagen zu erhöhen. Nach Meinung der Verfasser ist ein Erhöhungsfaktor von 1,5 vertretbar.

#### 4.4 Zusammenfassung der probabilistischen Untersuchung

Die probabilistische Studie zeigt, dass die Duktilität die Zuverlässigkeit benachbarter Dübel nicht wesentlich verbessert, da das Versagen der Dübel von der vorhandene Rissbreite maßgebend beeinflusst wird. Die Überbeanspruchung der benachbarten Dübel führt sowohl bei sprödem wie auch bei duktilem Versagen der Befestigungsmittel nur dann zu einem Systemversagen, wenn auch der benachbarte Dübel in einem breiten Riss verankert ist. Deshalb ist es aus Sicht der Verfasser nicht sinnvoll Kunststoffdübel im Zulassungsverfahren anders zu behandeln als spröde versagende Befestigungsmittel.

Die probabilistischen Untersuchungen zeigen weiter, dass der Bemessungswert der Last pro Befestigungspunkt von redundanten Systemen bei duktil versagenden Befestigungsmitteln im Vergleich zu spröde versagenden Dübeln erhöht werden kann. Kunststoffdübel erreichen



in etwa das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie spröde Befestigungsmittel, wenn der Erhöhungsfaktor der Last pro Befestigungspunkt 1,5 beträgt.

Legt man den gültigen Wert  $N_{Sd} = 3,0$  kN nach ETAG 001, Teil 6, zu Grunde, so kann der entsprechende Wert bei redundanten Befestigungen mit Kunststoffdübeln auf  $N_{Sd} = 1,5 \cdot 3,0 = 4,5$  kN angehoben werden.



## 5 Zusammenfassung

Dübel zur Befestigung redundanter Systeme werden innerhalb des Zulassungsverfahrens im Vergleich zu voll risstauglichen Dübeln unter reduzierten Prüfbedingungen geprüft. Deshalb ist ein Ausfall dieser Dübel in sehr breiten Rissen möglich. Dieser mögliche Ausfall eines Befestigungspunktes muss bei spröde versagenden Befestigungsmitteln statisch nicht nachgewiesen werden, wenn die Last pro Befestigungspunkt den Wert  $N_{Sd} = 3,0$  kN nicht überschreitet.

Kunststoffdübel weisen auch nach Überschreiten der Höchstlast einen nennenswerten Tragwiderstand auf. Das Versagen der Kunststoffdübel kann als nahezu duktil bezeichnet werden. Deshalb wird das Tragprofil bei einem Ausfall eines Befestigungspunktes innerhalb eines redundanten Systems im Vergleich zu spröden Befestigungen deutlich geringer beansprucht und die zulässige Beanspruchung pro Befestigungspunkt  $N_{Sd}$  kann erhöht werden.

Sowohl die deterministischen Untersuchungen (Abschnitt 3) wie auch die probabilistischen Studien (Abschnitt 4) zeigen, dass eine Erhöhung von  $N_{Sd}$  für Kunststoffdübel gerechtfertigt ist. Ein Erhöhungsfaktor von 1,5 bei Kunststoffdübel gewährleistet in etwa das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie bei „spröden“ Befestigungsmitteln. Deshalb empfehlen die Verfasser für Kunststoffdübel den Bemessungswert der Beanspruchung pro Befestigungspunkt bei redundanten Befestigungen auf  $N_{Sd} = 4,5$  kN ( $n_1 \geq 4$  Befestigungspunkte) zu beschränken.

Stehen nur  $n_1 = 3$  Befestigungspunkte zur Verfügung sollte der Wert  $N_{Sd}$  analog zum Vorgehen nach ETAG 001, Teil 6, auf  $N_{Sd} = 1,5 \cdot 2,0 = 3,0$  kN beschränkt werden.

Redundante Befestigungen mit höheren Beanspruchungen pro Befestigungspunkt sind möglich. Allerdings muss der Ausfall eines beliebigen Befestigungspunktes dann statisch nachgewiesen werden.

Die probabilistischen Untersuchungen zeigen weiter, dass Kunststoffdübel im Zulassungsverfahren unter denselben Bedingungen geprüft und ausgewertet werden sollten wie Dübel nach ETAG 001, Teil 6, da die vorhandene Duktilität die Wahrscheinlichkeit, dass benachbarte Befestigungspunkte versagen, nur wenig verringert.



## Literatur

- [1] European Organization for Technical Approvals (EOTA): ETAG 006, *“Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Part Six: Metal Anchor for Multiple Use in Concrete for Non-structural Applications“*, Draft, Mai 2002
- [2] European Organization for Technical Approvals (EOTA): ETAG 001, *“Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Part One: Anchors in General“*, 1997
- [3] Pregartner, T.: *Tragverhalten von Kunststoffdübeln in ungerissenem und gerissenem Beton*, Diss., Universität Stuttgart, 2003
- [4] Röble, M.: *Zur Zuverlässigkeit redundanter Befestigungen in gerissenem Beton unter Zugbeanspruchung*, Diss., Universität Stuttgart, 2004 (in Vorbereitung)
- [5] Röble, M., Fuchs, W: *Mehrfachbefestigungen - Fassaden, Rohrleitungen, abgehängte Decken*, Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Bericht Nr. 00/2-3/5, 2000, nicht veröffentlicht
- [6] Röble, M., Eligehausen, R.: *Multiple Fastenings to Concrete*, University of Stuttgart, Institute of Construction Materials, Report No. 02/17-3/16a, 2002, nicht veröffentlicht
- [7] DIN-NABau: *Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin-Köln, 1981
- [8] prEN 1990: 2001 Eurocode: *Grundlagen der Tragwerksplanung*, Deutsche Fassung, Schlussentwurf, CEN, 2001
- [9] Bergmeister, K: *Stochastik in der Befestigungstechnik mit realistischen Einflussgrößen*, Diss., Universität Innsbruck, 1988