

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Lehrstuhl für Massivbau

Zum Ankündigungsverhalten von älteren Brückenbauwerken bei Spannstahlausfällen infolge von Spannungsrisskorrosion

Jan Lingemann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl (i.R.)
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer,
Universität Dortmund

Die Dissertation wurde am 10.08.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 15.12.2010 angenommen.

Zum Ankündigungsverhalten von Brückenbauwerken bei Spannstahlausfällen infolge von Spannungsrisskorrosion

Zusammenfassung

In Brückenbauwerken, welche spannungsrisskorrosionsempfindlichen Spannstahl enthalten, können unbemerkt Spannstahlbrüche auftreten. Um ein plötzliches Versagen infolge von Spannstahlausfällen zu verhindern, wird das Ankündigungsverhalten dieser Bauwerke in einer mechanisch querschnittweisen Betrachtung untersucht. Hierbei wird häufig festgestellt, dass bereichsweise kein Ankündigungsverhalten nachweisbar ist. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Wahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung auch in solchen Fällen nachweisbar ist. Für die Entwicklung des Verfahrens wird anhand einer Literaturrecherche zunächst das Phänomen Spannungsrisskorrosion (SRK) aus materialwissenschaftlicher Sicht beschrieben. Es werden Schadensfälle aus der Baupraxis sowie Ursachen und Randbedingungen für SRK in der Baupraxis beschrieben und bekannte Detektionsmethoden für Spannstahlbrüche und –anrisse vorgestellt. Weiterhin werden das Vorgehen sowie Randbedingungen und Rechenannahmen für die mechanisch querschnittweise Untersuchung erläutert. Auf der Grundlage der Ergebnisse der mechanisch querschnittweisen Untersuchung wird ein stochastisches Nachweisverfahren entwickelt. Da das stochastische Verfahren mit einem hohen Rechenaufwand verbunden ist, wird darüber hinaus ein vereinfachtes Verfahren vorgestellt, mit dem die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit ohne vorherige Ankündigung mit geringem Aufwand abgeschätzt werden kann.

Abstract

In the 1960's and 1970's in Germany a number of bridges was built using special types of prestressing steels, which later were found to be sensitive to stress corrosion cracking (StCC). In these steels cracks and ruptures can occur without any notice at the concrete surface. In order to prevent sudden failures due to StCC, in a cross-section-wise mechanical analysis it is checked whether or not the girder will fail suddenly without prior notice or whether there will be crack formation before failure. In this analysis it is often found that in case of unnoticed proceeding stress corrosion processes in some sections a sudden failure has to be expected. In the present thesis a new stochastic method is introduced, by which the probability that failure might occur without prior warning can be assessed. For the development of the method, first the phenomenon StCC is investigated. Actual cases of StCC, causations and conditions for StCC as well as detection methods are shown. The cross-section-wise-analysis and its assumptions and conditions are explained. On the basis of the results of the cross-section-wise mechanical analysis the new stochastic method is developed. Since the stochastic analysis means a great calculating-effort, a simplified method is presented, with that the probability of sudden failures without prior warning can easily be estimated.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München. Ermöglicht wurde die Arbeit durch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch, dem mein besonderer Dank für seine Anregungen und seine Unterstützung gilt.

Ebenfalls danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer herzlich für ihr Interesse an dieser Arbeit und für die bereitwillige Übernahme des Koreferates. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann.

Für die Förderung der Forschungsvorhaben, die dieser Arbeit zugrunde liegen, danke ich dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung sowie der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren. Außerdem danke ich den Teilnehmern des Arbeitskreises „Versagensvorankündigung bei Spannstahlausfall“ für die Möglichkeit, bei der Erarbeitung der Handlungsanweisung mitwirken zu können und für das Vertrauen in meine Arbeit.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben weiterhin meine Kollegen am Lehrstuhl für Massivbau beigetragen, bei denen ich mich für die schöne Zeit am Lehrstuhl bedanke. Insbesondere möchte ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Florian Dier, Dipl.-Ing. Daniel Dunkelberg und Dipl.-Ing. Peter Lenz für Hinweise und Anregungen bedanken.

Meinen Eltern und Geschwistern danke ich besonders für die stete Förderung und Ermutigung. Besonders danke ich meiner Frau Sylvia für ihre Geduld und ihre uneingeschränkte Unterstützung.

Fürstenfeldbruck, im Dezember 2011
Jan Lingemann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Beschreibung des Phänomens Spannungsrissskorrosion (SRK).....	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Arten der Spannungsrissskorrosion	5
2.2.1	Anodische Spannungsrissskorrosion	5
2.2.2	Kathodische bzw. wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion.....	6
2.3	Empfindlichkeit von Spannstählen gegenüber SRK	10
2.3.1	Allgemeines	10
2.3.2	Bekannte SRK-empfindliche Spannstähle	10
2.3.3	Einflussfaktoren hinsichtlich der SRK-Empfindlichkeit	14
2.4	Überprüfung der SRK-Empfindlichkeit von Spannstählen im Korrosionsversuch	16
2.4.1	Versuchsauslegungen gemäß bestehender Regelwerke	16
2.4.2	Bewertung der verschiedenen Versuchsauslegungen	17
3	Spannungsrissskorrosion in der Baupraxis.....	19
3.1	Bekannte Fälle von Spannungsrissskorrosion	19
3.1.1	Spannstahlbrüche infolge von SRK während der Bauzeit	19
3.1.2	Verzögerte Spannstahlbrüche infolge von SRK während der Nutzung	20
3.1.3	Sonderfall: Spannungsrissskorrosion bei Monolitzen	24
3.2	Ursachen und Randbedingungen für SRK	25
3.2.1	Während des Transportes, der Lagerung und des Einbaus	25
3.2.2	Im eingebauten Zustand vor dem Verpressen	25
3.2.3	Zwischen dem Vorspannen und dem Verpressen	26
3.2.4	Randbedingungen für SRK nach dem Verpressen	26
3.2.5	Zusammenfassung der Randbedingungen für SRK	28
4	Möglichkeiten zur Detektion von Anrissen und Spanngliedbrüchen in bestehenden Bauwerken	29
4.1	Allgemeines	29
4.2	Übersicht über bekannte Detektionsverfahren	30
4.2.1	Indirekte Detektionsverfahren.....	30
4.2.2	Zerstörende direkte Detektionsverfahren	33
4.2.3	Zerstörungsfreie und minimalinvasive direkte Verfahren	34
4.2.4	Verfahren zur Detektion neuer Brüche	35
4.3	Bewertung der bekannten Verfahren	36

5	Mechanisch-querschnittweise Untersuchung des Ankündigungsverhaltens	38
5.1	Allgemeines	38
5.2	Vorgehen beim Nachweis	39
5.2.1	Schritt 1: Bestimmung der Restspannstahlfläche.....	39
5.2.2	Schritt 2: Bestimmung der Restsicherheit.....	40
5.2.3	Bauwerke mit Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten.....	42
5.3	Annahmen für die rechnerische Untersuchung.....	43
5.3.1	Nachweisquerschnitte und Spanngliedausfälle	43
5.3.2	Versagensankündigung	43
5.3.3	Materialeigenschaften	44
5.3.4	Lastannahmen	46
5.3.5	Einwirkungskombinationen	47
5.3.6	Einfluss der Querkraft auf das Ankündigungsverhalten	49
6	Stochastisches Verfahren zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung	50
6.1	Ansatz für das stochastische Verfahren	50
6.2	Modellannahmen für das stochastische Verfahren	51
6.2.1	Grundsätzliche Randbedingungen	51
6.2.2	Annahme 1: Der Spannstahlausfall innerhalb eines Hüllrohres ist örtlich korreliert.....	52
6.2.3	Annahme 2: Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Spanngliedbrüchen ist längs der Hüllrohre gleich verteilt.....	56
6.2.4	Annahme 3: Die Untersuchung des Ankündigungsverhaltens erfolgt in diskreten Nachweisquerschnitten.....	57
6.3	Beschreibung des stochastischen Verfahrens	59
6.3.1	Abbildung von Bauwerken im stochastischen Modell.....	59
6.3.2	Beispiel mit Variation der erforderlichen sowie der Restspanngliedanzahlen	61
6.3.3	Berücksichtigung der stetigen Zunahme der Bruchanzahl.....	64
6.3.4	Einfluss der statisch unbestimmten Wirkung der Vorspannung	70
6.3.5	Einfluss von größeren Verpressfehlern auf das Ankündigungsverhalten	74
6.3.6	Einfluss der Anzahl der Nachweisquerschnitte	75
6.4	Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung	76

7	Parametervariation und Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens	78
7.1	Zielsetzung und Ansatz.....	78
7.2	Beschreibung der untersuchten Szenarien	79
7.3	Identifikation maßgeblicher Eingangsparameter	82
7.4	Auswertung der Parameterstudie	86
7.4.1	Vorgehensweise	86
7.4.2	Einfluss der Spanngliedanzahl.....	86
7.4.3	Einfluss der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten	87
7.5	Vereinfachtes Verfahren	88
7.6	Anwendungsgrenzen des vereinfachten Verfahrens	89
7.7	Parameteruntersuchung zum vereinfachten Verfahren	90
7.8	Vergleich des vereinfachten und des stochastischen Verfahrens.....	93
8	Beispielhafte Anwendungen der Verfahren.....	95
8.1	Beispiel einer mehrfeldrigen Hohlkastenbrücke.....	95
8.2	Beispiel einer zweifeldrigen Plattenbalkenbrücke.....	99
8.3	Bewertung der angewendeten Verfahren.....	102
9	Zusammenfassung	103
10	Literatur	107
	<u>Anhang</u>.....	115
	A Berechnungsablauf beim stochastischen Verfahren	117
	B Verteilungsfunktionen für Spanngliedbrüche in einem Querschnitt ...	122
	C Durchgeführte Parametervariation.....	126

Abkürzungen und Formelzeichen

In den nachfolgenden Definitionen werden die Formelzeichen aus der „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissegefährdetem Spannstahl erstellt wurden“ [BMV 2009] verwendet. Die Formelzeichen stimmen mit den Regelwerken aus den 1960er und 1970er Jahren überein und weichen von den Formelzeichen im aktuellen Regelwerk [DIN-FB 102:2009-03] ab. Die Formelzeichen wurden gewählt, da die Eingangswerte für die Untersuchung älterer Brückenbauwerke in der Regel aus der statischen Berechnung des Bestandes bzw. alten Regelwerken entnommen werden.

Große lateinische Buchstaben

A_b	Bruttoquerschnittsfläche des Betons
$A_{Z,r}$	Restspannstahlfläche bei Rissbildung
$A_{Z,r,erf}$	zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderliche Restspannstahlfläche
C	Konstante zur Berücksichtigung der spezifischen Widerstandsfähigkeit sowie der Schärfe der Angriffsbedingungen
$E_{\text{Schritt 1}}$	Einwirkungskombination im Schritt 1 des querschnittweisen Nachweises des Ankündigungsverhaltens
$E_{\text{Schritt 2}}$	Einwirkungskombination im Schritt 2 des querschnittweisen Nachweises des Ankündigungsverhaltens
E_z	Elastizitätsmodul des Spannstahls
M_{As}	von der vorhandenen Betonstahlbewehrung aufnehmbares Moment
$M_{Az,r}$	von der Restspannstahlfläche bei Rissbildung unter Ansatz der Materialkennwerte nach Kapitel 5.3.3 aufnehmbares Moment
M_g	Biegemoment infolge ständiger Einwirkungen
M_p	Biegemoment infolge der seltenen Verkehrseinwirkungen
$M_{\Delta T}$	Biegemoment infolge des selten auftretenden linearen Temperaturunterschiedes
$M_{\Delta T, \text{freq}}$	Biegemoment infolge des häufig auftretenden linearen Temperaturunterschiedes
$M_{vx, \infty}$	statisch unbestimmter Anteil des Biegemomentes infolge Vorspannung zum Zeitpunkt $t = \infty$ (vgl. Kapitel 5.3.4)
$N(i)$	Gesamtanzahl der möglichen Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen
$N_k(i)$	Anzahl der Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen im Fall k
$N_1(i)$	Anzahl der Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen im Fall 1

$N_2(i)$	Anzahl der Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen im Fall 2
$N_3(i)$	Anzahl der Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen im Fall 3
$N_4(i)$	Anzahl der Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen im Fall 4
$P_k(i)$	Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls k
$P_2(i)$	Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls 2
$P_4(i)$	Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls 4
$P(F(i) = k) = P_k(i)$	Wahrscheinlichkeit, dass bei i Spanngliedbrüchen der Fall k vorliegt
$P(F(i) = k F(i-1) = j)$	Wahrscheinlichkeit, dass bei i Spanngliedbrüchen der Fall k vorliegt, unter der Bedingung, dass bei $(i-1)$ Spanngliedbrüchen der Fall j vorgelegen hat
$P_4^*(i)$	Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls 4 bei i Spanngliedbrüchen unter der Bedingung, dass bei $(i - 1)$ Spanngliedbrüchen der Fall 2 vorlag
$P_{4,\text{con}}$	$= \sum_{j=0}^{i_{\text{max}}} P_4^*(j)$
$P_{4,\text{con},10}$	Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,\text{con}}$ für Szenarios mit 10 Nachweisquerschnitten
P_L	Logarithmus zur Basis 10 der Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,\text{con}}$ nach dem stochastischen Verfahren
R_m	Mittelwert der Zugfestigkeit des Werkstoffes
W_b	Widerstandsmoment der Randfaser des Bruttobetonquerschnittes

Kleine lateinische Buchstaben

a, b, c	Parameter des linearen Ansatzes zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung
f_{ck}	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons (5 %-Quantilwert) nach 28 Tagen gemäß [EN 206:2001-07] und [DIN 1045-2:2008-08]
$f_{ctk;0,95}$	Charakteristischer Wert des 95 %-Quantils der zentrischen Zugfestigkeit des Betons gemäß [EN 206:2001-07] und [DIN 1045-2:2008-08]
f_c	Mittelwert der Druckfestigkeit des Betons bzw. des Verpressmörtels
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons gemäß [EN 206:2001-07] und [DIN 1045-2:2008-08]
f_{korr}	Korrelationsfaktor zur Beschreibung der örtlichen Korrelation von Spannstahlbrüchen innerhalb eines Hüllrohres
g	Einwirkung infolge Eigengewicht

Δg	Einwirkung infolge Ausbaulast
i	Anzahl von Spanngliedbrüchen (beim stochastischen Verfahren); Bezeichnung des betrachteten Querschnittes
i_{\max}	maximale Anzahl von Spanngliedbrüchen
k, j	Fall-Nummer gemäß Tabelle 6.1
$n_{br,i}$	zum Nachweis einer ausreichenden rechnerischen Restsicherheit im Querschnitt i erforderliche Restspanngliedanzahl, aufgerundet auf die nächste ganzzahlige Spanngliedanzahl
$n_{cr,i}$	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung im Querschnitt i , abgerundet auf die nächste ganzzahlige Spanngliedanzahl
n_F	Restspanngliedanzahl im Feldbereich bei Querschnitten mit Ankündigungsverhalten: Restspanngliedanzahl bei Rissbildung bei Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten: Erforderliche Restspanngliedanzahl
n_{NP}	Restspanngliedanzahl im Nullpunktbereich bei Querschnitten mit Ankündigungsverhalten: Restspanngliedanzahl bei Rissbildung bei Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten: Erforderliche Restspanngliedanzahl
n_S	Restspanngliedanzahl im Stützbereich bei Querschnitten mit Ankündigungsverhalten: Restspanngliedanzahl bei Rissbildung bei Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten: Erforderliche Restspanngliedanzahl
p	Einwirkung aus Verkehr
q	Anzahl der Untersuchungsquerschnitte im Untersuchungsbereich
Δq	häufige Einwirkung aus Verkehr und ständiger Last = $g + \Delta g + 0,5 \cdot q$
q_k	Anzahl der Querschnitte, in denen $n_{br,i} > n_{cr,i}$ gilt oder in denen Risse nicht detektierbar sind
q_s	Anzahl der Querschnitte mit Spanngliedanzahl s_{\max}
s	Anzahl der Spannglieder im Untersuchungsbereich (hüllrohrweise)
s_i	Spanngliedanzahl im Querschnitt i
s^e	Anzahl der effektiven Spannglieder im Untersuchungsbereich
s_{\max}	maximale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich (falls z. B. im Stützbereich eine größere Spanngliedanzahl vorhanden ist)
s_{\min}	minimale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich (i. d. R. im Feldbereich)
x	Differenz der Maximalwerte der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und der bezogenen erforderlichen Restspanngliedanzahlen im Untersuchungsbereich
x^e	Differenz der Mittelwerte der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und der bezogenen erforderlichen Restspanngliedanzahlen im Untersuchungsbereich

y_{bz}	Abstand des Schwerpunktes der Spannstahlfläche zum Schwerpunkt der Bruttoquerschnittsfläche des Betons
z_z	innerer Hebelarm (iterativ zu ermitteln)

Kleine griechische Buchstaben

β_{bz}	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons gemäß [DIN 1045:1959-11] und folgende Ausgaben bis zum Jahr 2001
β_R	Rechenwert der Würfeldruckfestigkeit des Betons gemäß [DIN 1045:1959-11] und folgende Ausgaben bis zum Jahr 2001
$\beta_{5\%}$	5 %-Quantilwert der Würfeldruckfestigkeit des Betons gemäß [DIN 1045:1959-11] und folgende
γ_g	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen (= 0,9 bzw. 1,1)
γ_p	Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrseinwirkungen
$\varepsilon_{v,\infty}^{(0)}$	Vordehnung des Spannstahls unter Berücksichtigung der Spannkraftverluste
$\varepsilon_{v,\infty}$	Gesamtdehnung des Spannstahls (Vordehnung zum Zeitpunkt $t = \infty$ + Zusatzdehnung)
η	Anzahl der Einzeldrähte in einem Bündelspannglied
κ_i	Beiwert zur Berücksichtigung einer vom Feldbereich abweichenden Spanngliedanzahl im Querschnitt i
$\kappa_{br,i}$	modifizierte, zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit im Querschnitt i erforderliche bezogene Restspanngliedanzahl
$\kappa_{cr,i}$	modifizierte bezogene Restspanngliedanzahl bei Rissbildung im Querschnitt i
$\kappa_{br,max}$	Maximum der modifizierten, zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit in den Querschnitten mit $n_{br,i} > n_{cr,i}$ erforderlichen bezogenen Spanngliedanzahlen $\kappa_{br,i}$
$\kappa_{cr,max}$	Maximum der modifizierten bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung $\kappa_{cr,i}$ in den Querschnitten mit $n_{br,i} \leq n_{cr,i}$
σ	mechanische Zugspannung
$\sigma_{b,\Delta q}$	Betonrandspannungen infolge häufiger Einwirkung aus Verkehr und ständiger Last
σ_v	Spannstahlspannung
τ_b	Verbundspannung

Abkürzungen

Cl	Chlor
e	Elektron
Fe	Eisen
H ₂	Wasserstoff (molekular)
H _{ad}	Wasserstoff (atomar, adsorbiert)
K	Kalium
O	Sauerstoff
S	Schwefel
NH ₄ ⁺	Ammonium
SCN ⁻	Thiocyanat (alte Bezeichnung: Rhodanid)
SO ₄ ²⁻	Sulfat
HV	Vickershärte
pH	pH-Wert
SRK	Spannungsrissskorrosion
<i>G</i>	Lastfall ständige Lasten
<i>V</i>	Lastfall Vorspannung
<i>P</i>	Lastfall Verkehrslast
ΔT	Lastfall linearer Temperaturunterschied

1 Einleitung

Spannbetonbrücken machen einen Großteil des Brückenbestandes in Deutschland aus. Zahlreiche dieser Bauwerke wurden in den späten 1950er Jahren, in den 1960er und Anfang der 1970er Jahre erstellt [Naumann 2007]. In dieser Zeit sind bei einigen Bauwerken während oder kurz nach der Bauzeit plötzliche spröde Spannstahlbrüche infolge von Spannungsrisskorrosion (SRK) aufgetreten. Die Schadensfälle traten bei Verwendung von vergüteten Spannstählen auf, die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber SRK zeigen. Die Anzahl der Schäden ist im Vergleich zur Anzahl der Bauwerke gering. Außerdem konnten die Brüche in den meisten Fällen auf ungünstige Umgebungsbedingungen während des Transportes, der Lagerung oder zwischen Einbau und Verpressen der Spannglieder zurückgeführt werden [Nürnberger 1980].

Da eine Gefährdung der Tragsicherheit von Brückenbauwerken durch Spannstahlausfälle jedoch in jedem Fall vermieden werden muss, wurden Ende der 1970er Jahre aufgrund dieser Erkenntnisse sowohl die Überwachungsvorschriften für Spannstähle [IBt 1978] als auch die Ausführungsbestimmungen für Spannbetonbauwerke [DIN 4227:1979-12] verschärft. Für die bauaufsichtliche Zulassung von Spannstählen wird seit dem ein Korrosionsversuch gefordert, den der Spannstahl mit einer Mindeststandzeit überstehen muss. Außerdem ist seit dem die zulässige Zeitspanne zwischen dem Einbau des Spannstahls und dem Verpressen der Spannglieder begrenzt. Unter baupraktischen Bedingungen sind die nach 1978 in der Bundesrepublik Deutschland zugelassenen Spannstähle bei Einhaltung dieser Regelungen nicht mehr empfindlich gegenüber SRK.

Um 1990 traten erneut vereinzelt Schadensfälle an ca. 30 Jahre alten vorgespannten Bauteilen im Hochbau auf. Die Schadensfälle waren Folge eines langsam bis zum Bruch des Spannstahls fortschreitenden Risswachstums im Spannstahl infolge von SRK. Es muss angemerkt werden, dass die Anzahl der bekannten verzögerten Schadensfälle im Vergleich zur Anzahl der Bauwerke sehr gering ist. In Brückenbauwerken wurden bislang nur vereinzelt Anrisse oder Spannstahlbrüche festgestellt. Schwerwiegende Schadensfälle durch verzögerte Brüche infolge von SRK sind im Brückenbau jedoch bisher nicht bekannt.

Bei der Untersuchung von Bauwerken mit vergüteten Spannstählen zeigte sich, dass offensichtlich nur wenige Chargen des Spannstahls eine hohe Empfindlichkeit gegenüber SRK aufweisen. Bei diesen empfindlichen Spannstahlchargen kann es vor dem Verpressen der Spannglieder leicht zu einer Vorschädigung des Spannstahls in Form von Korrosionsnarben oder Anrissen kommen. Bei den Schadensfällen konnten sich Risse in vorgeschädigten Bereichen nach dem Verpressen weiter im Spannstahl ausbreiten, obwohl die Hüllrohre insgesamt gut verpresst und

im Bereich des Spannstahls keine korrosionsfördernden Substanzen vorhanden waren [Nürnberg u. a. 1994], [Zilch u. Müller 1996]. Eine Anrissbildung durch SRK ist unter diesen Bedingungen im Regelfall jedoch nicht möglich [Moersch 2005].

Wird das Vorhandensein von Anrissen im Spannstahl z. B. durch Untersuchungen an entnommenen Spannstahlproben ausgeschlossen, so ist die Wahrscheinlichkeit von Spannstahlbrüchen infolge von Spannungsrisskorrosion gering. Aufgrund der Chargenabhängigkeit der SRK-Empfindlichkeit gilt das Untersuchungsergebnis allerdings nur für die untersuchte Charge bzw. das untersuchte Spannglied. Welche Chargen des Spannstahls eine hohe Empfindlichkeit gegenüber SRK haben, ist nicht bekannt. Auch über den Anteil empfindlicher Chargen an der Gesamtproduktion liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Um SRK mit ausreichender Sicherheit ausschließen zu können, wäre daher die Untersuchung zahlreicher Spannstahlproben erforderlich. Hierdurch würden die bestehenden Bauwerke jedoch stark beschädigt. Die Untersuchung von Spannstahlproben ist daher nur in Einzelfällen sinnvoll und zur grundsätzlichen Lösung der Problemstellung in der Praxis nicht geeignet.

Sofern keine ausreichenden Untersuchungsergebnisse vorliegen, welche die Unempfindlichkeit des im Einzelfall verwendeten Spannstahls belegen, kann ein langsam fortschreitendes Risswachstum in eingebauten SRK-empfindlichen Spannstählen aufgrund der Untersuchungsergebnisse von Schadensfällen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Vor diesem Hintergrund muss die Auswirkung einer unbemerkt zunehmenden Anzahl von Spannstahlbrüchen auf betroffene Brückenbauwerke untersucht und hinsichtlich einer möglichen Gefährdung der Standsicherheit beurteilt werden.

Zu diesem Zweck wurden im Jahr 1993 die „Empfehlungen zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St 145/160 Neptun N40 bis 1965 erstellt wurden“ [BMV 1993] eingeführt. Hierin ist eine querschnittweise rechnerische Untersuchung des Ankündigungsverhaltens von Spannbetonbrücken vorgesehen. Der Nachweis soll sicherstellen, dass sich ein eventuelles Bauteilversagen infolge von Spanngliedbrüchen durch eine deutlich sichtbare Rissbildung ankündigt und dass kein schlagartiges Bauteilversagen auftritt. Kann bei einem Bauwerk nicht in allen Querschnitten ein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden, so sind weitergehende Maßnahmen bis hin zur Lastreduzierung oder Verstärkung des Bauwerkes erforderlich.

Mittlerweile liegen umfangreiche Erfahrungen mit der rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens von Spannbetonbrücken vor. Häufig zeigen die Untersuchungen, dass in Querschnitten im Bereich geringer Beanspruchungen zahlreiche Spannstähle ausfallen müssen, bevor es zu einer Rissbildung im Beton kommt. Mit dem verbleibenden Restspannstahlquerschnitt ist der Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit oft nicht mehr möglich.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein stochastisches Verfahren vorgestellt, mit dem der Nachweis des Ankündigungsverhaltens am Gesamtsystem in Längsrichtung auch dann gelingen kann, wenn in einzelnen Querschnitten eines Bauwerkes kein Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden kann. Mit dem Verfahren wird die Auftretenswahrscheinlichkeit eines

rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung auf Grundlage der Ergebnisse der querschnittweisen Untersuchung abgeschätzt. Die vereinfachte Version des Verfahrens wird in die „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden“ [BMV 2009], welche zurzeit erarbeitet wird, aufgenommen.

Für die Entwicklung eines Ansatzes zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung ist es erforderlich, die Charakteristik der Spannungsrissskorrosion zu kennen. Im *Kapitel 2* der vorliegenden Arbeit wird daher zunächst das Phänomen Spannungsrissskorrosion in materialwissenschaftlicher Hinsicht beschrieben. Die baupraktische Relevanz der Spannungsrissskorrosion wird in *Kapitel 3* erläutert. Hier werden bekannte Schadensfälle vorgestellt. Außerdem erfolgt eine Abgrenzung zu Schadensfällen, bei denen SRK zwar vorgekommen ist, jedoch nur die Folge von konstruktiven Mängeln oder Korrosionseinflüssen war. Schließlich werden Randbedingungen, welche SRK verursachen oder fördern, identifiziert.

Bei der Untersuchung und Bewertung von Bauwerken mit SRK-empfindlichem Spannstahl ist es notwendig, ggf. vorhandene Anrisse und Brüche des Spannstahls möglichst frühzeitig zu erkennen. In *Kapitel 4* werden daher bekannte Methoden zur Detektion von Spannstahlbrüchen oder Anrissen vorgestellt.

In *Kapitel 5* wird die mechanisch-querschnittweise Untersuchung des Ankündigungsverhaltens gemäß [BMV 2009] beschrieben. Die Ergebnisse der querschnittweisen Untersuchung werden als Eingangswerte für das stochastische Verfahren zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung benötigt, welches in *Kapitel 6* erläutert wird.

Da die Untersuchung von Bauwerken mit dem stochastischen Verfahren einen hohen Rechenaufwand erfordert, wird in *Kapitel 7* ein vereinfachtes Verfahren vorgestellt, mit dem die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden kann.

In *Kapitel 8* werden das vereinfachte und das stochastische Verfahren beispielhaft beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens von zwei Brückenbauwerken angewendet und bewertet.

2 Beschreibung des Phänomens Spannungsrisskorrosion (SRK)

2.1 Allgemeines

Unter Spannungsrisskorrosion (SRK) wird die Ausbreitung von Rissen in Werkstücken unter der gleichzeitigen Einwirkung von Korrosion und statischer mechanischer Zugspannung verstanden. Eine Schädigung durch SRK erfolgt nach [Nürnberger 1995] und [Mietz 1999] im Allgemeinen in drei Phasen:

- 1) Rissbildungsprozess - Inkubationsphase der Anrissbildung
- 2) Risswachstumsprozess - Rissausbreitung infolge von Spannungsrisskorrosion
- 3) Reißphase

Die Inkubationsphase umfasst Korrosionsvorgänge, welche zur Bildung von Anrissen führen. In der Rissausbreitungsphase dehnen sich bereits vorhandene Anrisse unter fortschreitender SRK zunehmend im Werkstoff aus. Die Reißphase umfasst lediglich die Bruchbildung. Der Bruch des Werkstücks erfolgt in der Regel plötzlich und verformungsarm.

Im Unterschied zu anderen Korrosionsarten ist in keiner der genannten Phasen zwangsläufig ein mit dem bloßen Auge erkennbarer Korrosionsangriff feststellbar. Die Rissausbreitung innerhalb des Werkstoffes ist in der Regel ebenfalls nicht oberflächlich erkennbar. Der Fortschritt der Korrosion sowie die Restlebensdauer eines betroffenen Spannstahls in einem Brückenbauwerk können daher in der Praxis kaum bestimmt werden.

In der Vergangenheit sind in insgesamt fünf Fällen verzögerte Spanngliedbrüche infolge von Spannungsrisskorrosion an ca. 30 Jahre alten vorgespannten Bauteilen im Hochbau bekannt geworden, die in einem Fall zum Einsturz und in zwei Fällen zum Teileinsturz führten. Bei der Untersuchung der Spannstähle der Schadensfälle wurden in vielen Anrissen Mörtelreste oder Korrosionsspuren festgestellt. Hieraus wird geschlossen, dass die Anrisse im Wesentlichen bereits während der Bauzeit bzw. zu einem früheren Zeitpunkt aufgetreten sind und dass die Rissausbreitung innerhalb des verpressten Hüllrohrs stattgefunden hat. Die Phase der Rissausbreitung dauerte in diesen Fällen deutlich länger als die Phase der Anrissbildung. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass das Risswachstum bei Verwendung empfindlicher Spannstähle unter bestimmten Randbedingungen auch im vollständig verpressten Hüllrohr ohne Anwesen-

heit von korrosiven Substanzen fortschreiten und zu einem verzögerten Versagen des Spannstahls führen kann.

Im Brückenbau sind verzögerte Spannstahlbrüche infolge von SRK nur in Einzelfällen festgestellt worden. Schäden oder Einstürze von Brückenbauwerken infolge von verzögerten Spannstahlbrüchen sind bislang nicht bekannt. Das Auftreten von verzögerten Brüchen in bestehenden Brückenbauwerken mit spannungsrisskorrosionsempfindlichem Spannstahl kann mit dem aktuellen Kenntnisstand jedoch nicht pauschal ausgeschlossen werden.

Für die Entwicklung von Methoden zur rechnerischen Berücksichtigung von verzögerten Spannstahlbrüchen ist es zunächst erforderlich, den Ablauf und die Eigenschaften der Spannungsrisskorrosion zu kennen. Im Folgenden sind daher Erkenntnisse über das Phänomen Spannungsrisskorrosion zusammengestellt und erläutert.

2.2 Arten der Spannungsrisskorrosion

2.2.1 Anodische Spannungsrisskorrosion

Spannungsrisskorrosion wird als anodisch bezeichnet, wenn eine Rissbildung durch örtliche Metallauflösung vorliegt [Rehm u. a. 1981]. Anodische Spannungsrisskorrosion tritt bevorzugt auf, wenn eine Passivschicht oder eine sonstige schützende Deckschicht die Metalloberfläche bedeckt. Notwendige Bedingung für das Auftreten anodischer Spannungsrisskorrosion ist eine kritische Kombination eines spezifisch wirkenden Angriffsmittels, eines im Hinblick auf diese Korrosionsart im angreifenden Medium empfindlichen Werkstoffes sowie eine statische Belastung des Werkstoffes. Typische SRK erzeugende Medien sind nitrathaltige Elektrolyte. Neben Nitraten sind unter anderem Sulfate und Chloride bekannte Promotoren der anodischen SRK.

Die angreifenden Medien, aber auch hohe Zugspannungen oder Vorschädigungen können eine örtliche Zerstörung der schützenden Deckschicht verursachen [Isecke 1983]. An der Werkstoffoberfläche setzen dann elektrolytische Auflösungsprozesse ein, die zur Rissbildung führen [Nürnberg 1995]. Am Grund eines Anrisses oder Risskeimes existiert aufgrund der fortschreitenden Rissbildung infolge Belastung und Korrosion keine passivierende Deckschicht, wodurch eine anodische Eisenauflösung möglich ist und das Risswachstum beschleunigt wird [Frey 1988]. Die Risse können je nach Werkstoff inter- oder transkristallin verlaufen [Isecke 1983]. Die Korrosionsgeschwindigkeit ist äquivalent zur anodischen Metallauflösung in der Risspitze [Mietz 1999].

In der Vergangenheit ist anodische SRK vor allem in vorgespannten Viehstalldecken in Verbindung mit Tonerdeschmelzzement aufgetreten. Letzterer konnte keinen Dauerhaften Korrosionsschutz des Spannstahls sicherstellen. In Verbindung mit SRK-empfindlichem Spannstahl kam es in der nitrathaltigen Umgebung zu zahlreichen Spannstahlbrüchen. Abgesehen von diesem inzwischen bekannten Sonderfall ist das Zusammentreffen aller für anodische SRK notwendigen Randbedingungen in der Baupraxis selten, weshalb Spannstahlbrüche infolge rein anodischer SRK heute äußerst selten auftreten.

2.2.2 Kathodische bzw. wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion

Im Gegensatz zur anodischen Spannungsrissskorrosion sind die Bedingungen für das Auftreten von kathodischer SRK weniger spezifisch. Bei der im Spannbetonbau auftretenden SRK handelt es sich daher in der Regel um kathodische, wasserstoffinduzierte SRK [Nürnberger 1990], [Grimme u. a. 1983]. Folgende Voraussetzungen sind hierfür notwendig:

- Empfindlichkeit des Werkstoffes
- Aufhebung der Passivität bzw. Zutritt von korrosionsfördernden Medien zur Stahloberfläche
- mechanische Belastung des Werkstoffes

Das Ausschalten einer der genannten Randbedingungen reicht aus, um kathodische SRK zu verhindern. Da die Empfindlichkeit des Werkstoffes eine notwendige Randbedingung ist, tritt SRK in der Regel nur bei Spannstählen mit hoher Empfindlichkeit für diesen Korrosionstyp auf.

Wenn die Passivität des Werkstoffes aufgehoben wird, kann eine flächige Korrosion der Werkstoffoberfläche stattfinden. Die hierbei ablaufenden chemischen Reaktionen sind in Bild 2.1 dargestellt. Je nach pH-Wert des Elektrolyten stellen sich unterschiedliche Reaktionen ein, bei denen jeweils im Bereich der Kathode Wasserstoff produziert und an der Spannstahloberfläche in atomarer Form adsorbiert wird. Da die Wasserstoffproduktion im Bereich der Kathode maßgebend für den Ablauf der SRK ist, spricht man in diesem Fall von kathodischer bzw. von wasserstoffinduzierter SRK. Teilweise wird in der Literatur auch von Wasserstoffversprödung (hydrogen embrittlement) gesprochen [Isecke 1983].

Bei sehr empfindlichen Spannstählen sind bereits sehr geringe Korrosionsraten, welche mit dem bloßen Auge zum Teil nicht erkennbar sind, ausreichend für eine kritische Wasserstoffproduktion [Frey 1988], [Isecke u. a. 1995], [Moersch 2005]. Im Extremfall kann auch bei Einwirkung von wenig aggressiven Medien wie feuchter Luft oder destilliertem Wasser, sowie unter scheinbar harmlosen Feuchtigkeitsniederschlägen auf der Stahloberfläche, durch geringe Korrosionsreaktionen die für die Rissausbreitung in empfindlichen Spannstählen erforderliche Wasserstoffaktivität erreicht werden [Mietz 1999].

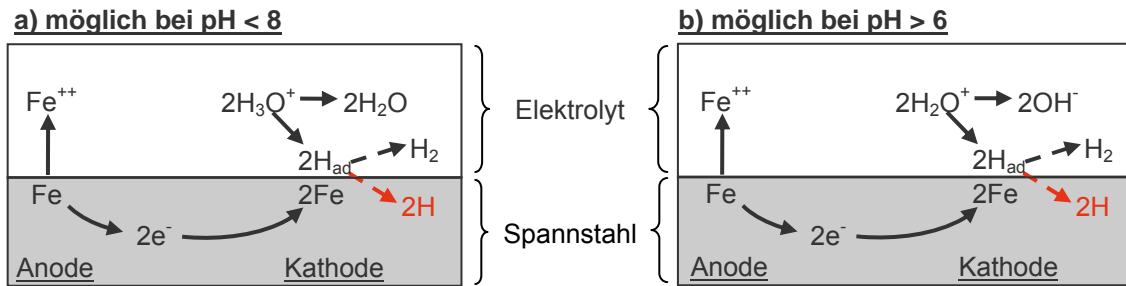


Bild 2.1: Darstellung der chemischen Reaktionen bei flächiger Korrosion des Spannstahls in einem Elektrolyt mit Wasserstoffentwicklung an der Kathode

Der adsorbierte atomare Wasserstoff kann, abhängig von den Umgebungsbedingungen, entweder zu molekularem Wasserstoff rekombinieren und die Stahloberfläche wieder verlassen und somit unschädlich sein, oder in den Stahl eindiffundieren. Die an der Stahloberfläche adsorbierbare Wasserstoffmenge steigt mit zunehmender Wasserstoffkonzentration, mit abnehmendem pH-Wert des Elektrolyten, mit zunehmender Sauerstoffarmut und bei Anwesenheit von Promotoren [Rehm u. a. 1981], [Nürnberger 1992]. Nach [Isecke 1983] verhindern Promotoren die Rekombination von adsorbiertem atomarem Wasserstoff und fördern so die Absorption des Wasserstoffes. Bekannte Promotoren sind z. B. Schwefelwasserstoff und andere Sulfide, Thiocyanate (alte Bezeichnung: Rhodanide) sowie Verbindungen von Arsen, Selen, und Phosphor.

Der im Stahl absorbierte atomare Wasserstoff liegt zum Teil im Kristallgitter gelöst (interstitiell) vor. Der größte Teil des Wasserstoffes ist jedoch an Störstellen im Metallgitter wie Leerstellen, Fremdatomen, Versetzungen, Korngrenzen und Hohlräumen gebunden. Zur Beschreibung der Wirkung des im Metallgitter gelösten Wasserstoffes wurden verschiedene Modellvorstellungen entwickelt. Die Wirkung lässt sich durch eine örtliche Aufweitung des Metallgitters beschreiben, woraus Eigenspannungen sowie eine Reduzierung der Kohäsionskräfte zwischen den Atomen resultieren [Grimme u. a. 1983]. Hierdurch wird die Fließspannung des Spannstahls herabgesetzt. Durch die lokale Bindung des Wasserstoffes an Gitterfehlstellen hingegen wird die Fließspannung lokal erhöht [Moersch 2005]. Dies hat zur Folge, dass Spannungsspitzen hier nicht durch Plastifizierung abgebaut werden können. Beide Effekte zusammen führen zu einer Versprödung des Spannstahls.

Zur Bildung eines Anrisses kann es bei Erreichen einer kritischen Wasserstoffkonzentration oder infolge einer mechanischen Zugbeanspruchung kommen. Unter hoher Zugbeanspruchung genügt bei empfindlichen Stählen schon eine sehr niedrige Wasserstoffaktivität, um Risswachstum auszulösen. Bei entsprechender Wasserstoffkonzentration sind bei anfälligen Stählen andererseits schon niedrige mechanische Belastungen von etwa 10 % der Streckgrenze für wasserstoffinduzierte SRK ausreichend [Nürnberger 1995]. Bei empfindlichen Spannstählen kann unter ungünstigen Bedingungen schon die Eigenspannung aus dem Herstellprozess des Spannstahls zur Bildung von Anrissen und zum Risswachstum bis zum Versagen führen [Isecke u. a. 1995]. Neben Anrissen sind nach [Mietz 1999] in Metalloberflächen in der Regel Defekte wie Versätze und Spalten vorhanden, die zusätzlich als Risskeime dienen.

Bei einer Anrissbildung durch Wasserstoffaufnahme infolge von flächiger Korrosion gehen die Anrisse in der Regel nicht von Korrosionsnarben aus (Bild 2.2). In diesem Fall wurden teilweise sehr geringe Abständen zwischen den Anrissen festgestellt (Bild 2.3).

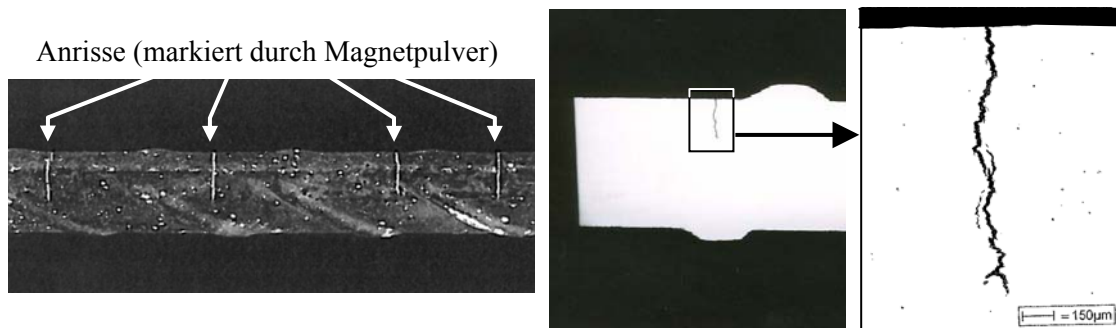


Bild 2.2: Makroskopische Aufnahme eines Spannstahles mit Anrissen von einem Schadensfall aus [Mietz 1999] (links), und Mikroskopaufnahmen von Querschliffen durch einen Anriss aus [Nürnberger u. a. 1994] (rechts)

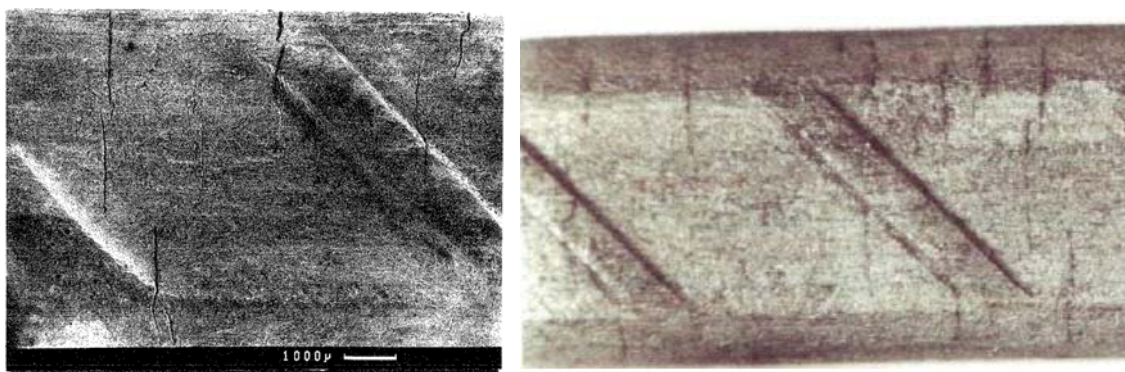


Bild 2.3: Spannstahlproben aus Schadensfällen mit Anrissen, vor Aufnahme abgebeizt, aus [Nürnberger u. a. 1994]

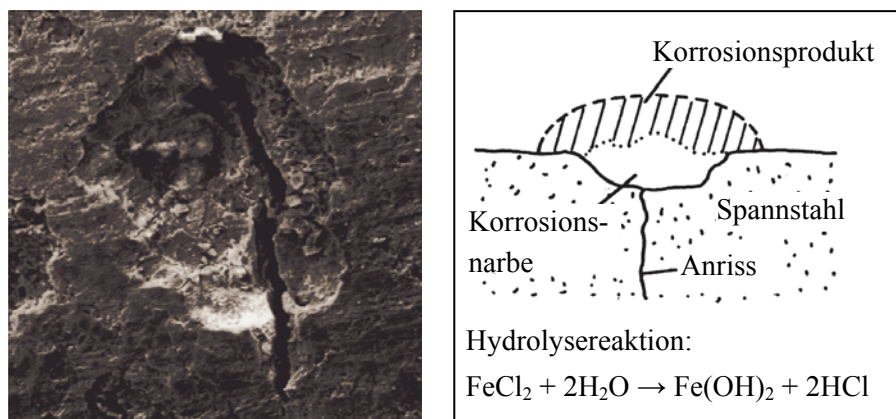


Bild 2.4: Anrissbildung in einem Spannstahl ausgehend von einer Korrosionsnarbe (links) sowie zugehörige Hydrolysereaktion innerhalb der Korrosionsnarbe (rechts), aus [Nürnberger 1992]

Sind jedoch Korrosionsnarben z. B. infolge chloridinduzierter Lochkorrosion vorhanden, dann kann der pH-Wert des Elektrolyten innerhalb der Korrosionsnarbe infolge der Hydrolyse von Fe^{3+} -Ionen abnehmen, so dass die Aufnahme von Wasserstoff begünstigt wird. In diesem Fall ist die Entstehung von Anrissen im Bereich von Korrosionsnarben wahrscheinlich. Bild 2.4 zeigt einen Anriss eines Spannstahls im Bereich einer chloridinduzierten Lochfraßnarbe.

Am Grund von Anrissen bzw. Korrosionsnarben treten Spannungskonzentrationen auf, die zu einer lokalen plastischen Verformung des Spannstahls und damit zu einer hohen Versetzungsdichte im Gefüge des Spannstahls führen. Der Wasserstoff kann sich in diesem Bereich anreichern und ein kontinuierliches Risswachstum bis zum Versagen des Spannstahls verursachen [Grimme u. a. 1983]. Die Risse verlaufen hierbei senkrecht zur Hauptspannungsrichtung.

Der Bruch des Werkstoffes infolge von Spannungsrisskorrosion erfolgt plötzlich und ohne nennenswerte Brucheinschnürung. Der Bruchausgang befindet sich stets an der Werkstoffoberfläche. Typische Bruchbilder von Spannstählen infolge von SRK haben einen oder mehrere dunkle, linsenförmige Anrissbereiche und mattgraue Restbrüche (Bild 2.5). Bei Untersuchung von Bruchflächen im Rasterelektronenmikroskop zeigen die Bruchflächen von Spannstählen mit Festigkeiten $R_m > 900 \text{ MPa}$ im Anrissbereich in der Regel interkristalline Bruchflächen (Bild 2.6, linke Bildhälfte) und in den unmittelbar angrenzenden Bereichen einen feinen Wabenbruch (Bild 2.6, rechte Bildhälfte).

Die Korrosionsgeschwindigkeit der wasserstoffinduzierten SRK ist u.a. abhängig von der Höhe der Zugspannungen, der Intensität der Wasserstoffentwicklung sowie der Empfindlichkeit des Spannstahls. Die Standzeiten von Spannstahl unter Einwirkung von SRK können zwischen Stunden und mehreren Jahren variieren.

Da wasserstoffinduzierte SRK nach aktiver Korrosion an jeder Stelle längs eines Spannglieds auftreten kann, ist eine Vorhersage der Lage des zum Versagen führenden Risses im Spannstahl nicht möglich. Ein Versagen muss nicht notwendigerweise in den maximal beanspruchten Bereichen auftreten.



Bild 2.5: Typische Bruchfläche infolge SRK mit zwei dunklen, linsenförmigen Anrissen und mattgrauer Restbruchfläche, aus [Nürnberger u. a. 1994]

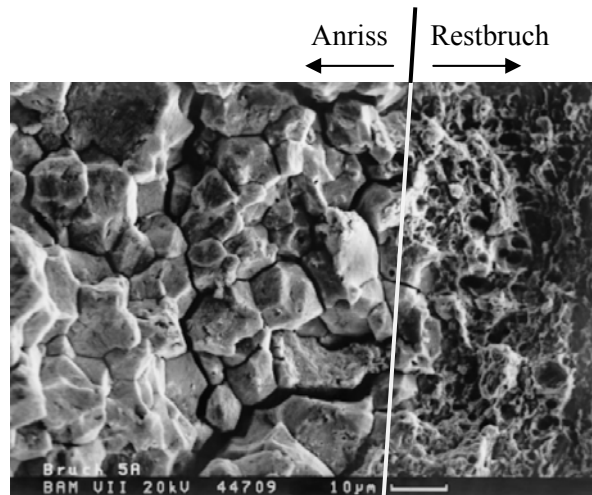


Bild 2.6: REM-Aufnahme aus dem Übergang vom Anrissbereich (mit interkristalliner Bruchfläche) zum Restbruchbereich (mit feinem Wabenbruch), aus [Mietz u. a. 1998]

2.3 Empfindlichkeit von Spannstählen gegenüber SRK

2.3.1 Allgemeines

Nach [Moersch 2005] ist die Widerstandsfähigkeit eines Spannstahls gegenüber SRK abhängig von seiner Spaltbruchneigung und der Differenz zwischen der lokalen Kohäsionskraft und der lokalen Zugspannung im Gefüge. Die Spaltbruchneigung wird durch die Anzahl von Fremdatomen und Versetzungen im Gitter des Spannstahls bestimmt. Durch die Bindung von Wasserstoff in diesen Bereichen wird die Spaltbruchneigung je nach Art und Dichte der Fehlstellen mehr oder weniger verstärkt. Sie steigt bei Spannstählen gleicher Herstelltechnologie mit zunehmender Festigkeit an. Hinsichtlich der Differenz zwischen der lokalen Kohäsionskraft und der lokalen Zugspannung im Gefüge ist die Kohäsionskraft im reinen Eisen entscheidend, die nach [Moersch 2005] für alle Spannstahlarten gleich hoch ist. Durch Aufnahme von Wasserstoff wird die lokale Kohäsionskraft jedoch reduziert.

2.3.2 Bekannte SRK-empfindliche Spannstähle

Nach [Nürnberger 1995] kann wasserstoffinduzierte SRK unter bestimmten Randbedingungen wie der Anwesenheit von Promotoren, hoher statischer Beanspruchung, dynamisch-plastischer Beanspruchung oder unter hohen Wasserstoffkonzentrationen bei allen unlegierten und niedriglegierten Stählen auftreten. Die hierfür erforderlichen Randbedingungen sind jedoch in der Regel baupraktisch nicht relevant, so dass in der Baupraxis nur sehr wenige Spannstähle

SRK-empfindlich sind. Nachfolgend werden alle Spannstahlarten aufgeführt, bei denen Spannstahlschäden bekannt geworden sind. Bei diesen Spannstählen muss davon ausgegangen werden, dass einzelne Chargen eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber SRK haben können.

Spannstähle St 145/160 und St 140/160

In [BMV 2009] werden folgende Spannstähle allgemein als SRK-empfindlich klassifiziert:

- **Vergüteter Spannstahl St 145/160 (neue Bezeichnung St 1420/1570)**
Handelsname Neptun
Hersteller: Firma Felten & Guillaume Carlswerke AG
Produktionszeitraum: 1959 bis 1964
Querschnitt: Rund oder oval
- **Vergüteter Spannstahl St 145/160 (neue Bezeichnung St 1420/1570)**
Handelsname Sigma
Hersteller: Hütten- und Bergwerke Rheinhausen AG
Produktionszeitraum: bis 1965
Querschnitt: Rund oder oval
- **Vergüteter Spannstahl St 145/160 (neue Bezeichnung St 1420/1570)**
Handelsname Sigma
Hersteller: Hütten- und Bergwerke Rheinhausen AG
Produktionszeitraum: ab 1965 bis ca. 1978
Querschnitt: Oval
Bei diesem Stahl wurde der Widerstand gegenüber SRK im Vergleich zum Spannstahl aus der Produktion bis 1965 gemäß [Bertram u. a. 2002] durch eine Vergrößerung des Silizium-Mangan-Verhältnisses sowie durch den Ersatz eines Teils des Kohlenstoffes durch Chrom erhöht. Dennoch ist ein Schadensfall mit diesem Spannstahl bekannt.
- **Ölschlussvergüteter Spannstahl St 140/160 (neue Bezeichnung St 1370/1570)**
Hersteller: Stahlwerke Hennigsdorf
Produktionszeitraum: von ca. 1960 bis ca. 1993
Querschnitt: Oval
Nach [Lankau 1984] kam ab ca. 1984 ein neues Vergütungsverfahren zum Einsatz. In [Krumbach u.a. 1997], [Mietz u. a. 1998] und [Mietz 1999] wird jedoch für beide Produktionszeiträume eine erhöhte SRK-Empfindlichkeit festgestellt.

Nach [Isecke u. a. 1995] spielen bei diesen Spannstählen die Werkstoffeigenschaften einzelner Chargen der Herstellung noch vor den Umgebungsbedingungen die vorherrschende Rolle hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion. Dies zeigt sich daran, dass bei sehr empfindlichen Chargen bereits minimale Korrosionsprozesse ausreichen, um eine Rissbildung zu verursachen, während weniger empfindliche Chargen unter ähnlichen Einbaubedingungen keine Anrissbildung zeigen. Die Ursache für die unterschiedliche Empfindlichkeit verschiedener Chargen ist nicht bekannt. Ebenso wenig liegen Informationen darüber vor, welcher Anteil der hergestellten Chargen eine stark erhöhte Empfindlichkeit aufweist.

Gemäß [Isecke u. a. 1995] handelt es sich bei den oben genannten empfindlichen Spannstählen um vergütete Spannstähle, die sich von den heute zugelassenen Stählen vor allem im Silizium-, Mangan- und Chromgehalt unterscheiden. Die nach 1978 in Westdeutschland zugelassenen vergüteten Spannstähle können im Regelfall bei Einhaltung aller Vorschriften unter baupraktischen Bedingungen als unempfindlich gegenüber SRK angesehen werden [Bertram u. a. 2002].

Die oben aufgelisteten, in Westdeutschland hergestellten Spannstähle werden in [Bertram u. a. 2002] wie folgt gruppiert:

- **Spannstähle „alten Typs“:**
Neptun- und Sigma-Spannstähle aus der Produktion bis 1965
- **Spannstähle der „neuen Generation“:**
Sigma-Spannstahl aus der Produktion nach 1965

Die meisten Schäden infolge von SRK wurden an Bauwerken mit Neptun-Spannstahl beobachtet. Bei Bauwerken, für die der ähnlich zusammengesetzte und ebenfalls vergütete Sigma-Spannstahl verwendet worden ist, ist nur ein Schadensfall bekannt, obwohl dieser Spannstahl in Deutschland insgesamt in deutlich größerer Menge eingebaut worden ist als der Neptun-Spannstahl [DAfStb 1992]. Da die Sigma Oval Spannstähle der ersten Generation von der chemischen Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften jedoch mit den Neptun Spannstählen vergleichbar sind, werden diese Spannstähle im Allgemeinen zusammenfassend als Spannstähle „alten Typs“ bezeichnet. Spannstähle „alten Typs“ gelten gemäß [BMV 2009] als *stark* SRK-gefährdet.

Aus experimentellen Untersuchungen [Zilch u. Müller 1999] sowie von einem Schadensfall mit verzögerten Spannstahlbrüchen infolge von SRK [Zilch u. Müller 1996] ist bekannt, dass auch bei Sigma Spannstählen der neuen Generation verzögerte Brüche in vollständig verpressten Hüllrohren auftreten können. Daher gelten Sigma Oval Spannstähle „neuen Typs“ gemäß [BMV 2009] als SRK-gefährdet. Da dieser Spannstahl weniger empfindlich gegenüber SRK ist, ist gemäß [Bertram u. a. 2002] bei den bis 1978 hergestellten Bauwerken von einer Vorschädigung des Spannstahls nur dann auszugehen, wenn:

- der Spannstahl nicht vorschriftsmäßig transportiert und gelagert wurde,
- die Herstellung der Spannglieder nicht ordnungsgemäß war,
- der Spannstahl zu lange im gespannten und unverpressten Zustand war oder
- das Verpressen unvollständig war.

Basierend auf den Erkenntnissen aus einem Schadensfall muss jedoch davon ausgegangen werden, dass es bei Sigma Spannstählen der „neuen Generation“ (1965 - 1978) auch bei einer gleichzeitigen ungünstigen Ausnutzung mehrerer zulässigen Grenzwerte hinsichtlich der Empfindlichkeit des Spannstahls bzw. der Zeiträume zwischen Einbau und Verpressung des Spannglieds zu Spannstahlschäden kommen kann.

Aufgrund der metallurgischen Zusammensetzung sowie der Ergebnisse von Korrosionsversuchen [Mietz 1999] wird Spannstahl der Stahlwerke Hennigsdorf in [BMV 2009] ebenfalls als *stark* SRK-gefährdet eingestuft. In [Mietz u. a. 1998] wird von einem Brückenbauwerk berichtet, bei dem zahlreiche Spanngliedbrüche an Spanngliedern aus Hennigsdorfer Spannstahl festgestellt wurden.

Spannstähle St 110/135

Seit Anfang 1974 wurde diese Spannstahlsorte für glatte und gerippte Stabspannglieder mit Durchmessern von 26 mm, 32 mm und 36 mm eingesetzt. Schon innerhalb des ersten Jahres traten in mehreren Bauwerken Schäden an einzelnen dieser Spannstähle auf [Nürnberger 1980]. In [Rehm u. a. 1981] wird von einem Brückenbauwerk berichtet, welches mit glatten Stabspanngliedern \varnothing 36 mm aus St 110/135 vorgespannt wurde. Die Spannglieder wurden 18 Tage nach der Anlieferung vorgespannt. Während der Spannarbeiten und im Zeitraum bis 300 Stunden nach Abschluss der Spannarbeiten brachen insgesamt neun Spannglieder infolge von Spannungsrisskorrosion. Alle Brüche traten im mittleren Drittel der Spannglieder, also im Bereich der Tiefpunkte der Spanngliedlage, auf. Die Brüche konnten auf in die Hüllrohre eingedrungene Absetzwässer des Betons sowie auf die Verwendung eines nicht zugelassenen, rhodanidhaltigen Betonverflüssigers zurückgeführt werden.

Nachdem mit diesem Spannstahl zahlreiche vergleichbare Fälle aufgetreten sind, wurde die bauaufsichtliche Zulassung des Spannstahls im Jahr 1975 zurückgezogen. Nach [Nürnberger 1995] entsprachen alle Bauwerke, an denen Spannstahlschäden aufgetreten sind, nach erfolgreichem Abschluss der Sanierungsarbeiten bezüglich der Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit dem damaligen Stand der Technik. Da sämtliche Bauwerke, bei denen dieser Spannstahl zum Einsatz gekommen ist, zurückverfolgt werden konnten, wird davon ausgegangen, dass diese Bauwerke untersucht und ggf. instandgesetzt wurden, so dass keine Gefahr von ihnen ausgeht.

Spannstähle St 135/150

In [Naumann 1969] wird von Schadensfällen an Spannstahl St 135/150 berichtet, die auf SRK zurückgeführt werden. In einem Fall trat ein verzögerter Bruch eines Spanndrahtes in einer vorgespannten 14 cm dicken Rollbahndecke eines Flughafens auf. Im Bereich des Bruches wurde eine große Luftblase im Hüllrohr gefunden, außerdem zeigte der Spannstahl Korrosionsspuren mit Narbenbildung. Sulfide oder Halogenide wurden im Bruchbereich nicht gefunden. Ob andere korrosive Substanzen vorhanden waren, ist nicht bekannt. In einem anderen Fall brachen drei Anker einer Spundwand im Alter von ca. drei Jahren. Die Anker bestanden aus 22 Drähten \varnothing 8 mm mit einer Festigkeit von $150 \text{ kp/mm}^2 = 1470 \text{ MPa}$. In diesem Fall wurden starke Korrosionsspuren an den Drähten gefunden. Nach dem Entrosten wurden außerdem rissartige Anfressungen festgestellt. Inwieweit diese auf SRK zurückzuführen sind, ist nicht geklärt. In beiden Fällen lagen andere Korrosionsmechanismen vor, die ggf. von SRK überlagert wurden. Die Fälle bestätigen, dass SRK unter ungünstigen Umständen auch in anderen als den oben genannten Spannstählen auftreten kann. Da es sich jedoch um nicht vollständig geklärte Einzelfälle handelt und weitere Schadensfälle nicht bekannt sind, wird im Folgenden

nicht weiter auf diese Spannstähle eingegangen. Auch der teilweise eingesetzte vergütete Spannstahl St 135/150 Neptun N120 ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht als SRK-empfindlich einzustufen [StraßenNRW 2009].

2.3.3 Einflussfaktoren hinsichtlich der SRK-Empfindlichkeit

Festigkeit des Spannstahls

Mit zunehmender Festigkeit eines Spannstahls nimmt die Empfindlichkeit gegenüber SRK im Allgemeinen zu. Nach [Nürnberger 1995] steigt die Wahrscheinlichkeit für wasserstoffinduzierte Rissbildungen an Stählen oder Gefügebereichen mit Festigkeiten $R_m > 1200$ MPa deutlich an. Bei der Prüfung der Vickershärte werden an Stählen dieser Festigkeit Härtegruppen ab etwa HV 350 ermittelt. Die Standzeiten von Stählen im Korrosionsversuch nehmen bei konstanter Zugspannung mit zunehmender Festigkeit, also abnehmender Ausnutzung des Stahls, etwa im Verhältnis der Härten ab. Nach [Stolte 1963] besteht zwischen der Standzeit des Werkstoffes im Korrosionsversuch, der Werkstofffestigkeit und der statischen Zugspannung der in Gleichung (2.1) angegebene Zusammenhang.

$$t = \frac{C}{\sigma^3 \cdot R_m^9} \quad (2.1)$$

- mit: C = Konstante zur Berücksichtigung der spezifischen Widerstandsfähigkeit sowie der Schärfe der Angriffsbedingungen
 σ = mechanische Zugspannung
 R_m = Mittelwert der Zugfestigkeit des Werkstoffes

Trotz des grundsätzlich vorhandenen Zusammenhangs zwischen der Werkstofffestigkeit und der SRK-Empfindlichkeit finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben zu der Frage, ob die Überfestigkeit eines Spannstahls zwangsläufig ein Kriterium zur Beurteilung der SRK-Empfindlichkeit ist. In [Nürnberger u. a. 1994] wird bei den in Kapitel 2.3.2 genannten Spannstählen *alten Typs* bei empfindlichen Chargen teilweise eine deutlich über der Nennfestigkeit liegende Zugfestigkeit festgestellt. Demnach sind bei Spannstahl St 145/160 des alten Typs Zugfestigkeiten über 1680 MPa ungewöhnlich und können ein Hinweis auf eine erhöhte SRK-Empfindlichkeit sein. In der gleichen Textstelle wird allerdings von einem Schadensfall mit Neptun Spannstahl alten Typs berichtet, bei dem die gemessenen Zugfestigkeiten 1680 MPa nicht überschritten haben. Nach [BMV 2009] werden Zugfestigkeiten über 1700 MPa als kritisch hinsichtlich der SRK-Empfindlichkeit eingestuft. Der Nennwert der Zugfestigkeit eines Spannstahls St 145/160 beträgt 1570 MPa.

Bei einem Schadensfall mit Sigma-Oval-Spannstahl der *neuen Generation* konnte keine Überfestigkeit des Spannstahls festgestellt werden [Zilch u. Müller 1996]. Dieses Ergebnis wird durch [Mietz 1999] bestätigt, wonach das Überschreiten einer bestimmten Festigkeit weder notwendiges noch hinreichendes Kriterium zur Abschätzung der Empfindlichkeit gegenüber

SRK ist. Nach [Mietz u. Isecke 2002] können Überfestigkeiten zwar ein Hinweis auf eine besondere Empfindlichkeit des Spannstahls sein, jedoch wurden auch in Spannstählen ohne Überfestigkeiten Schäden festgestellt.

Verformungskennwerte des Spannstahls

Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Verformungskennwerten wie der Bruchdehnung oder der Brucheinschnürung sind nur aus [Menzel u. Nürnberger 1998] bekannt. Hiernach lassen sich die Standzeiten von Spannstählen in Korrosionsversuchen nicht überzeugend mit den Verformungskennwerten korrelieren.

Legierung des Spannstahls

Nach [Bertram u. a. 2002] wurde die Widerstandsfähigkeit des Sigma-Spannstahls 1965 durch eine Vergrößerung des Silizium-Mangan-Verhältnisses sowie durch den Ersatz eines Teils des Kohlenstoffes durch Chrom erhöht. In [Zilch u. Müller 1999] wurde das Verhalten von Sigma-Spannstahl des alten Typs und der neuen Generation im Auslagerungsversuch untersucht. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass sich der im Korrosionsversuch unter Laborbedingungen überlegene Spannstahl der neuen Generation unter Bauteilbedingungen nicht günstiger verhält als der Spannstahl des alten Typs. Zwischen dem Kohlenstoff- oder Mangangehalten und den Standzeiten von Spannstählen im Korrosionsversuch wurde von [Menzel u. Nürnberger 1998] keine überzeugende Korrelation gefunden.

Querschnittsform und Durchmesser des Spannstahls

In [Bertram u. a. 2002] wird festgestellt, dass Spannstähle gleicher Sorte mit rundem Querschnitt und glatter Oberfläche nachweislich unempfindlicher gegen SRK sind als solche mit ovalem Querschnitt. Hierfür sind verschiedene Ursachen denkbar. Zum einen könnte das größere Verhältnis von Oberfläche zur Querschnittsfläche eine Rolle spielen, da über die größere Oberfläche bei gleichem Querschnitt mehr Wasserstoff in den Stahl eindringen kann. In [Zilch u. Müller 1999] wird darüber hinaus vermutet, dass die ovale Querschnittsform eine andere Gefügestruktur bewirkt, wodurch der Kerbeinfluss von Anrissen zunimmt.

Die bisher bekannten Schadensfälle sind bei Spannstählen des Typs Neptun N40 und Sigma Oval 40 aufgetreten. Bei beiden Spannstählen handelt es sich jeweils um die Drähte mit der innerhalb der jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassung größten zugelassenen Querschnittsfläche. In Auslagerungsversuchen sind jedoch auch Drahtbrüche an Drähten vom Typ Sigma Oval 20 beobachtet worden [Zilch u. Müller 1999]. Es ist denkbar, dass die Größe des Querschnitts einen Einfluss auf die SRK-Empfindlichkeit hat, da große Querschnitte eine größere Oberfläche aufweisen und da die Anrisse infolge SRK immer von der Werkstoffoberfläche ausgehen. In [Moersch 2005] wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Werkstückdurchmesser ein maßgebender Parameter hinsichtlich der Wasserstoffdiffusion ist. Hiernach müssten Stäbe mit größeren Durchmessern eine höhere Widerstandsfähigkeit haben.

2.4 Überprüfung der SRK-Empfindlichkeit von Spannstählen im Korrosionsversuch

2.4.1 Versuchsauslegungen gemäß bestehender Regelwerke

Nach dem Auftreten einiger Schadensfälle infolge von SRK wurden im Jahr 1978 vom Institut für Bautechnik (IBt) die Anforderungen an Spannstähle für die Erteilung von bauaufsichtlichen Zulassungen verschärft [IBt 1978]. Seit diesem Zeitpunkt sind für die Zulassung von Spannstählen Korrosionsversuche erforderlich, um eine ausreichende Unempfindlichkeit gegenüber SRK nachzuweisen. Aktuell sind die Anforderungen an Spannstähle durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) in der „Richtlinie für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen für Spannstähle“ [DIBt 2004] geregelt. Hier werden Korrosionsversuche zur Prüfung des Widerstandes gegen SRK unter einer statischen Prüfspannung von $0,8 \cdot R_m$ an mindestens sechs Proben gefordert. Die Prüfungen sind nach [DIN EN ISO 15630-3:2002-08] durchzuführen.

Nach [DIN EN ISO 15630-3:2002-08] ist die Standzeit einer Probe im Korrosionsversuch bei konstanter Zugkraft und konstanter Temperatur zu ermitteln. Die Probe soll vor dem Versuch nicht plastisch verformt worden sein. Für den Versuch können zwei alternative Prüflösungen verwendet werden:

- **Prüflösung A (auch FIP-Prüflösung genannt):**
Wässrige Lösung von Ammoniumthiocyanat, hergestellt durch Lösen von 200 g NH_4SCN in 800 ml destilliertem oder entmineralisiertem Wasser. Das Ammoniumthiocyanat muss analytisch mindestens 99 % NH_4SCN und darf höchstens 0,005 % Cl^- , 0,005 % SO_4^{2-} und 0,001 % S^{2-} aufweisen.
- **Prüflösung B (auch DIBt-Prüflösung genannt):**
Wässrige Lösung von Kaliumsulfat (K_2SO_4), Kaliumchlorid (KCl) und Kaliumthiocyanat (KSCN), hergestellt mit destilliertem oder entmineralisiertem Wasser. Prüflösung B muss 5 g SO_4^{2-} , 0,5 g Cl^- und 1 g SCN^- enthalten.

Die verwendete Prüflösung soll im Versuch eine Temperatur von 50 °C haben. Als Versuchsergebnis ist der Median der Lebensdauer der untersuchten Proben bis zum Bruch zu ermitteln. Hinsichtlich der Bewertung der in den Korrosionsversuchen mit Prüflösung A ermittelten Standzeiten verweist [DIBt 2004] auf [EN 10138:2006-05], welche zurzeit im Entwurf vorliegt. Hier wird für Drähte abhängig von der geforderten SRK-Widerstandsklasse entweder ein Minimalwert von 2 h und ein Median von 5 h (Widerstandsklasse C1) oder ein Mittelwert von 1,5 h und ein Median von 4 h (Widerstandsklasse C1L) gefordert. In Korrosionsversuchen mit Prüflösung B muss nach [DIBt 2004] eine Standzeit von 2000 h erreicht werden (Widerstandsklasse C2). Nach [IBT 1978] war im Versuch eine Standzeit von mindestens 500 h zu erreichen.

2.4.2 Bewertung der verschiedenen Versuchsauslegungen

Die DIBt-Prüflösung für Korrosionsversuche wurde in [Grimme u. a. 1983] als Standardprüfverfahren vorgeschlagen. Die Lösung entspricht hinsichtlich des Chlorid- und des Sulfatgehaltes üblichen Hüllrohrwässern. Für die Herstellung der Lösung wurde in [Grimme u. a. 1983] statt destilliertem Wasser eine gesättigte Ca(OH)_2 -Lösung verwendet. Die Prüflösung hat bei Verwendung von destilliertem Wasser einen pH-Wert von etwa 7 und bei Verwendung von Ca(OH)_2 -Lösung einen pH-Wert von etwa 12,6. Auch dies stimmt gut mit den in Hüllrohrwässern gemessenen pH-Werten überein. Bei karbonatisierten Betonwässern sowie bei Regen oder Kondenswässern wurden pH-Werte von etwa 7 oder geringer gemessen, während die pH-Werte von frischen Betonwässern zwischen 10 und 13 lagen. Der Gehalt an Thiocyanat-Ionen (SCN^-) soll eine Förderung der Wasserstoffabsorption bewirken und stellt somit eine Verschärfung der praktischen Verhältnisse dar.

Nach [Mietz 1999] weist die DIBt-Lösung gegenüber der FIP-Lösung den Vorteil auf, dass nicht relativ kurze Standzeiten zum Entscheidungskriterium für die Widerstandsfähigkeit des Spannstahls werden, sondern das Nichtauftreten eines Bruches innerhalb der vorgegebenen Standzeit von 2000 h. Diese entspricht etwa der nach [DIN 4227:1979-12] zulässigen Zeitspanne zwischen dem Vorspannen der Spannstähle und dem Verpressen von zwölf Wochen. Hierdurch wird auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verbessert.

Nach [Moersch 2005] hat der Versuch mit der FIP-Lösung die Vorteile, dass er schnell und einfach durchzuführen ist. Allerdings tritt hierbei eine stark abtragende Korrosion an der Probe auf, was die Standzeiten insbesondere bei kleinen Drahtdurchmessern unverhältnismäßig stark verkürzen kann. Außerdem unterscheiden sich die Standzeiten von SRK-empfindlichem Spannstahl bei diesem Versuch nicht zwangsläufig signifikant von denen SRK-unempfindlicher Spannstähle. Demgegenüber hat die DIBt-Lösung den Vorteil, dass der Bruch unter praxisnäheren Bedingungen und ohne starke abtragende Korrosion eintritt. Aufgrund der längeren Versuchsdauer ist dieser Versuch jedoch bei der Produktionskontrolle kaum anwendbar. In [Moersch 2005] wird vorgeschlagen, zur Verbesserung der Aussagekraft des Versuches die erforderliche Standzeit am Durchmesser der Probe sowie am Diffusionskoeffizienten zu orientieren.

In [Nürnberger u. a. 1994] wurden Proben von SRK-gefährdeten Spannstählen alten Typs aus zahlreichen Bauwerken in Korrosionsversuchen untersucht. Hierbei wurde die FIP-Prüflösung verwendet. Bei allen Spannstahlproben wurden verkürzte Standzeiten beobachtet. Aufgrund der unterschiedlichen Standzeiten wurde die SRK-Empfindlichkeit der Spannstähle bewertet. Empfindliche Spannstähle zeigten in der Regel Standzeiten von weniger als zwei Stunden, während einzelne offenbar weniger empfindliche Proben Standzeiten von über zwei Stunden erreichten. Allerdings ist anzumerken, dass bei der Mehrzahl der als empfindlich eingestuften Spannstähle im Rahmen der Untersuchungen an Bauwerken keine Anrisse oder Spannstahlbrüche gefunden wurden. Die im Korrosionsversuch herrschenden Umgebungsbedingungen waren daher offensichtlich deutlich ungünstiger als die tatsächlichen Verhältnisse. Da keine vergleichenden Korrosionsversuche an unempfindlichen Spannstählen aus bestehenden Bauwerken

durchgeführt wurden, ist die Aussagefähigkeit der Ergebnisse der Korrosionsversuche nicht zweifelsfrei geklärt.

Insgesamt muss daher festgestellt werden, dass sowohl der DIBt- als auch der FIP-Test zur Bewertung der SRK-Empfindlichkeit fabrikneuer Spannstähle im Rahmen der Eigen- bzw. Fremdüberwachung entwickelt wurden. Eine Bewertung von Spannstahlproben, die bestehenden Bauwerken entnommen wurden, ist auf Grundlage der beiden Tests grundsätzlich ebenfalls möglich. Die Einflüsse einer im Bauwerk durch Korrosion oder bei der Entnahme durch mechanische Beanspruchung eingetretenen Vorschädigung sind jedoch nicht bekannt. Die Anforderungen einer Standzeit von fünf Stunden im FIP-Test [BMV 2009] liegen daher auf der sicheren Seite. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass der Spannstahl im Korrosionsversuch mit zunehmender Spannung empfindlicher reagiert. Für die Bewertung eines Spannstahls aus einem bestehenden Bauwerk erscheint daher die Durchführung von zusätzlichen Korrosionsversuchen unter der im Bauwerk vorhandenen Zugspannung ratsam.

3 Spannungsrisskorrosion in der Baupraxis

3.1 Bekannte Fälle von Spannungsrisskorrosion

3.1.1 Spannstahlbrüche infolge von SRK während der Bauzeit

Aus der Literatur sind zahlreiche Fälle bekannt, in denen SRK-empfindliche Spannstähle beim Verpressen oder kurze Zeit später schlagartig versagten. Bereits in [Leonhardt 1962] wird von Spannstahlbrüchen an vergüteten Drähten infolge von SRK bzw. Wasserstoffversprödung berichtet. In [Nürnberger 1980] werden ebenfalls mehrere Fälle von Spanngliedbrüchen analysiert. Betroffen waren hauptsächlich vergütete Spannstähle der Festigkeit St 110/135 und St 145/160. Die beobachteten Spannstahlbrüche traten oft einige Stunden oder Tage nach dem Vorspannen auf, meistens noch vor Abschluss der Verpressarbeiten. Im Jahr 1975 wurde die Zulassung des Spannstahls St 110/135 aufgrund der aufgetretenen Schadensfälle zurückgezogen.

Beim Spannstahl St 145/160 sind einzelne Spannstahlbrüche schon während des Transportes oder während der Lagerung der Spannglieder auf der Baustelle aufgetreten. Die mechanische Belastung dieser Spannstähle resultierte aus den Eigenspannungen des Spannstahls bzw. den Biegespannungen bei Anlieferung des Spannstahls in Ringen. Da die heute zugelassenen und verwendeten Spannstähle bei Einhaltung aller Vorschriften in der Regel nicht SRK-empfindlich sind, erscheinen Fälle von Spanngliedbrüchen, die während oder kurz nach der Bauzeit auftreten, heute nicht mehr relevant. Für die Beurteilung bestehender Bauwerke sind im Wesentlichen Spannstahlbrüche interessant, welche stark verzögert in einem Bauwerksalter von ca. 30 Jahren aufgetreten sind.

3.1.2 Verzögerte Spannstahlbrüche infolge von SRK während der Nutzung

Im Gegensatz zu den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Spannstahlbrüchen werden im Folgenden Brüche beschrieben, die nach der Fertigstellung während der Nutzung des Bauwerks aufgetreten sind. Berücksichtigt werden nur solche Fälle, bei denen ein insgesamt ordnungsgemäßer Verpresszustand der Spannglieder vorlag und im Bereich der Spannglieder keine korrosionsfördernden Substanzen nachgewiesen werden konnten. Die Anzahl dieser bislang bekannt gewordenen Schäden durch verzögerte Brüche infolge von SRK ist im Vergleich zur Anzahl der Bauwerke sehr gering. Wesentliche Daten zu den dem Autor bekannten Fällen aus dem Hochbau sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Tabelle 3.2 enthält Daten zu bekannten Fällen von verzögerten Spannstahlbrüchen im Brückenbau. Hier sind keine durch SRK verursachten schwerwiegenden Schäden oder Einstürze bekannt.

Tabelle 3.1: Während der Nutzung aufgetretene Schadensfälle infolge verzögerter Spannstahlbrüche durch SRK an Dachkonstruktionen im Hochbau

Nr.	Bauwerk	Baujahr	Spannstahl	Vorfall	Befund zum Spannstahl
1	Fabrikhalle in Lohr	1959	St 145/160 Neptun N40 (3 Spannglieder)	Bauwerks- untersuchung im Jahr 1993 (Alter: 34 Jahre)	Einzelne Anrisse [Nürnberger u. a. 1994]
2	Produktionshalle in Mannheim	1961	St 145/160 Neptun N40 (2 Spannglieder)	Einsturz im Jahr 1989 (Alter: 28 Jahre)	Zahlreiche, über das Bauteil verteilte Anrisse und Brüche [Nürnberger u. a. 1994]
3	Fabrikhalle in Mühlacker	1962	St 145/160 Neptun N40 (6 Spannglieder)	Einsturz im Jahr 1992 durch Unterstützung verhindert (Alter: 30 Jahre)	Über das Bauteil verteilte Anrisse und Brüche [Nürnberger u. a. 1994]
4	Industriehalle in Berlin	1964	St 145/160 Neptun N40 (2 Spannglieder)	Bauwerks- untersuchung bei Abriss im Jahr 1991 (Alter: 27 Jahre)	Zahlreiche, über das Bauteil und das Bauwerk verteilte Anrisse und Brüche [Nürnberger u. a. 1994]
5	Produktionshalle in Schrobenhausen	1965	St 145/160 Sigma Oval 40 neue Generation (1 Spannglied)	Einsturz im Jahr 1995 durch Unterstützung verhindert (Alter: 27 Jahre)	Zahlreiche, über das Bauteil verteilte Anrisse und Brüche, Luftblase im Bruchquerschnitt [Zilch u. Müller 1996]

Tabelle 3.2: Während der Nutzung aufgetretene Fälle von Spannstahlschäden infolge SRK in Brückenbauwerken

Nr.	Bauwerk	Baujahr	Spannstahl	Vorfall	Befund zum Spannstahl
1	Kreuzungsbauwerk Hohenzollerndamm, Berlin	1957 bis 1958	St 145/160 Neptun N40	Untersuchung des Spannstahls im Jahr 1998 (Alter: 40 Jahre)	Zahlreiche Anrisse am makroskopisch praktisch korrosionsfreien Spannstahl gefunden [Mietz u. Fischer 2005]
2	Überführungsbauwerk in Bronnzell	1958 bis 1959	St 145/160 Neptun N40	Planmäßiger Abriss im Jahr 1984 (Alter: 25 Jahre)	Zahlreiche Anrisse [Nürnberger u. a. 1994]
3	Eisenbrücke Berlin	1964 bis 1968	St 140/160 Hennigsdorf	Untersuchung im Rahmen von Umbauarbeiten im Jahr 1998 (Alter: 30 Jahre)	Zahlreiche Anrisse in den Querspanngliedern [Mietz u. a. 1998]
4	L 26 Überführungsbauwerk über DB, Prenzlau	1971 bis 1972	St 140/160 Hennigsdorf BSG 100 mit 24 Drähten	Abriss im Jahr 2003 wg. starker Längsrissbildung (Alter: 31 Jahre)	Anrissbildung durch wasserstoffinduzierte SRK [Macheleidt 2005]
5	L 26 Überführungsbauwerk über Grabowstr., Prenzlau	1971 bis 1972	St 140/160 Hennigsdorf BSG 100 mit 24 Drähten	Abriss im Jahr 2003 wg. starker Längsrissbildung (Alter: 31 Jahre)	Anrissbildung durch wasserstoffinduzierte SRK [Macheleidt 2005]
6	B5 Wustermark	1962	St 140/160 Hennigsdorf BSG 100 mit 24 Drähten	nicht bekannt (Alter: ca. 43 Jahre)	Ein Drahtbruch infolge SRK [Macheleidt 2005]

In der Vergangenheit wurde von einigen weiteren teilweise spektakulären Schadensfällen berichtet, bei denen ebenfalls SRK als Versagensursache genannt wurde. Hier ist z. B. der Einsturz des südlichen Randbogens der Berliner Kongresshalle im Jahr 1980 zu nennen. Bei der Dachkonstruktion handelte es sich im inneren Bereich um eine sattelförmig gekrümmte Schalenkonstruktion (Bild 3.1, Pos. 2). Im äußeren Bereich wurde die Form der inneren Schalenkonstruktion mit einer flächig ausgebildeten Spannband-Konstruktion (Pos. 1) fortgesetzt, welche das Eigengewicht der äußeren Randbögen (Pos. 3) aufnahm und mit Drahtspanngliedern aus St 145/160 von Typ Sigma Oval 30 im inneren Ringbalken (Pos. 4) zurückverankerte. Die Ausführung der Außendächer als Spannblätter bewirkte, dass diese im frei gespannten Bereich unter Querbelastung eine sanft gekrümmte Biegelinie ausbilden konnten, im Übergang in die Randbauteile jedoch auf kurzer Länge stark gekrümmt wurden. Die Außendächer reagierten daher in einem schmalen Übergangsbereich zu den steifen Randbauteilen sehr empfindlich auf Verformungen und Biegebeanspruchungen. In [Schlaich u. a. 1980] wurde

gezeigt, dass durch Kriechen, Schwinden und äußere Lasten Verformungen auftraten, die zu einer plastischen Biegebeanspruchung der Drahtspannglieder geführt haben. Hinzu kommt in diesen Bereichen ein teilweise hoher Chloridgehalt des Betons. Spanngliederbrüche wurden systematisch nur an diesen Stellen gefunden. In den übrigen Bereichen des Tragwerks waren die Spannglieder in gutem Zustand und – soweit bekannt – frei von Brüchen. An den Bruchstellen wiesen die Spannglieder starke Korrosionsspuren auf. In [Schlaich u. a. 1980] werden daher „konstruktive Mängel bei der Planung und Bauausführung der Außendächer und als Folge davon durch korrosionsbedingte Brüche ihrer den Randbogen tragenden Spannglieder“ als Schadensursache genannt. Nach Meinung des Autors ist es unwahrscheinlich, dass ein weniger SRK-empfindlicher Spannstahl diesen Randbedingungen dauerhaft standgehalten hätte. In diesem Fall ist SRK daher nicht die Ursache des Einsturzes, sondern die Konsequenz konstruktiver Mängel.

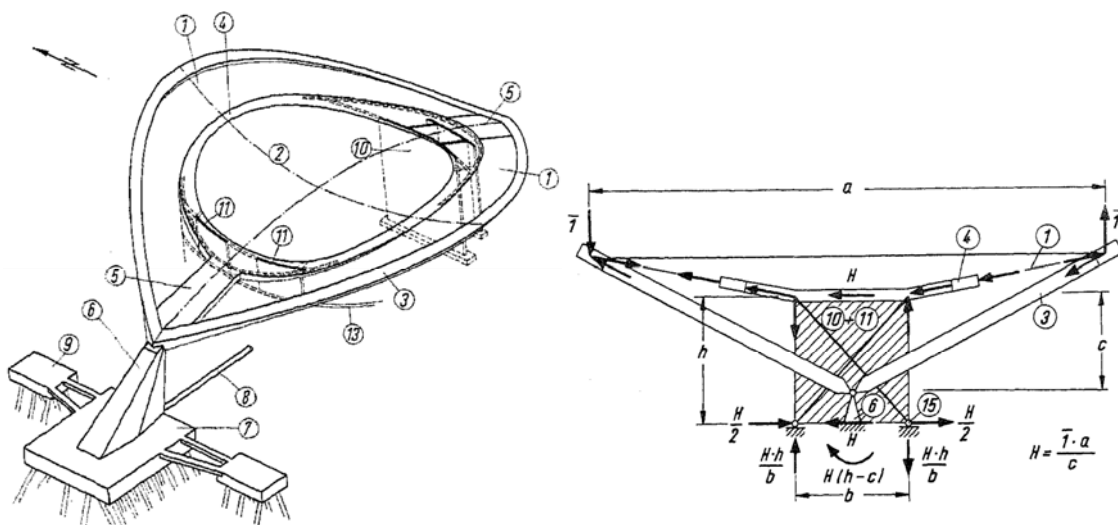


Bild 3.1: Tragwerk des Daches der Berliner Kongresshalle (links) und vereinfachte Darstellung des Tragverhaltens unter antimetrischer Dachlast (rechts), aus [Schlaich u. a. 1980]

Ein weiteres oft zitiertes Beispiel ist das Versagen der Dachkonstruktion im Schwimmbad Uster in der Schweiz. Bei diesem Hallenbauwerk war eine abgehängte Decke als 8 cm starke Ortbetonkonstruktion ausgeführt worden. Die abgehängte Decke war mit Bügeln $\varnothing 10$ mm aus Chromnickelstahl (nichtrostender Stahl) an die tragende Dachkonstruktion angehängt worden. Im begehbaren Zwischenraum wurde die Abluft aus dem Schwimmbad zur Lüftungsanlage geführt [SIA 1985a]. Nach [SIA 1985b] wurde der Hohlraum nach der Herstellung des Bauwerkes im Jahr 1972 nur in den Jahren 1979 und 1984 inspiziert, wobei jeweils keine Korrosion an den Aufhängebügeln festgestellt wurde. Allerdings wurde im Jahr 1984 ein gebrochener Aufhängebügel gefunden. Da die SRK-Problematik in diesem Zusammenhang jedoch nicht bekannt war, wurde diese Versagensankündigung nicht erkannt und das Problem mit der Reparatur des Bügels als gelöst angesehen. Im Jahr 1985 kam es dann zum Versagen der abgehängten Decke. Als Einsturzursache wurde ein Versagen der Aufhängebügel festgestellt. Bei der Untersuchung der Bügel zeigte sich, dass chloridinduzierte SRK eine Rissbildung im

oberflächlich blanken Chromnickelstahl verursacht hatte. In [SIA 1985b] wird vermutet, dass die Bügel sukzessive gebrochen sind und die benachbarten Bügel dadurch zusätzlich belastet wurden. Bei Überschreitung der Bügeltragfähigkeit an einer Stelle setzte dann ein Reißverschluss effekt ein, bei dem die verbleibenden Bügel nacheinander versagen. Aufgrund der Konstruktion, des verwendeten rostfreien Stahls und der direkten Chloridexposition des Werkstoffs ist dieser Schadensfall im Rahmen der Fragestellung dieser Arbeit jedoch ebenfalls nicht als repräsentativ anzusehen.

In [Nürnberger 1980] wird ebenfalls von einigen, teilweise stark verzögerten Schäden berichtet. Bei Bauteilen mit Vorspannung im nachträglichen Verbund traten etwa 50 % dieser Schäden bis vier Wochen nach dem Vorspannen und 75 % in einem Zeitraum von einem Jahr nach dem Vorspannen auf. Bei Bauteilen mit Vorspannung in sofortigem Verbund wurde die überwiegende Anzahl der Schäden erst nach mehr als fünf Jahren festgestellt. Bei allen genannten Fällen wurden jedoch ungünstige Umgebungsbedingungen, mangelnder Korrosionsschutz, Verpressfehler, Zutritt von Regenwasser, Anwesenheit von korrosiven Substanzen oder Fremdmetallkontakte nachgewiesen. In diesen Fällen wäre auch bei Verwendung eines SRK-unempfindlichen Spannstahls mit einem Korrosionsangriff und daher einer verkürzten Lebensdauer der Spannglieder zu rechnen gewesen. Auch ist wahrscheinlich, dass Schäden z. B. infolge von Undichtigkeiten des Bauwerkes frühzeitig bemerkt werden. Hinsichtlich der in dieser Arbeit untersuchten Fragestellung der Auswirkungen einer möglicherweise unerkannt in Bauwerken fortschreitenden SRK sind diese Fälle daher nicht relevant.

[Vehovar u. a. 1998] berichten von einer Spannbetonbrücke in Slowenien, bei der im Zuge einer Brückeninspektion eine starke Rissbildung im Überbau sowie Rostfahnen festgestellt wurden. Die Brücke war mit Drahtspanngliedern mit einer Festigkeit von 1800 MPa vorgespannt. Weitere Angaben zur Art und Festigkeit des Spannstahls liegen nicht vor. Bei der Untersuchung zeigte sich, dass der Spannstahl bereichsweise stark korrodiert war. Während unkorrodierte Spannstahlproben die geforderte Bruchdehnung und Brucheinschnürung erreichten, zeigten Proben mit Korrosionsspuren eine deutliche Versprödung. Diese wurde auf eine Wasserstoffaufnahme des Spannstahls infolge von chloridinduzierter Korrosion zurückgeführt. Somit waren auch in diesem Fall korrosionsfördernde Substanzen die Auslöser der Schäden. Ob die Rissbildung in der Brücke eine Folge von Spanndrahtbrüchen ist oder andere Gründe hat, ist nicht bekannt.

Vor dem Hintergrund der geringen Anzahl von stark verzögerten Schadensfällen ohne sonstige korrosive Einwirkungen kann vermutet werden, dass entweder die Anzahl der Spannstahl-Chargen mit stark erhöhter Empfindlichkeit gegenüber SRK klein ist oder dass das gleichzeitige Auftreten von hoher Empfindlichkeit des Spannstahls und kritischen, SRK auslösenden Bedingungen im Bauablauf nur selten vorgekommen ist. Ausreichende Informationen zum Bauablauf sind jedoch in den wenigsten der bekannten Fälle verfügbar. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass ggf. weitere bisher unbekannte Schadensfälle infolge von SRK aufgetreten sind. Es ist daher anhand der vorliegenden Informationen nicht möglich, allgemeingültige Abgrenzungskriterien hinsichtlich des Spannstahls bzw. des Bauablaufes abzuleiten, unter deren Einhaltung eine Gefährdung durch SRK nicht gegeben ist. Auf der sicheren Seite liegend muss

daher bei den in Kapitel 2.3.2 genannten Spannstählen, insbesondere vor dem Hintergrund des zunehmenden Bauwerksalters sowie des zunehmenden Schwerverkehrs, von der Möglichkeit der Gefährdung ausgegangen werden.

3.1.3 Sonderfall: Spannungsrisskorrosion bei Monolitzen

In [Little u. Staehle 2001] wird von durch Mikroorganismen verursachten Korrosionsschäden in Monolitzen berichtet. Hier haben Fadenpilze das Korrosionsschutzfett der Monolitze abgebaut. Bei Abbau der Fette entstehen Säuren (z. B. Ameisen-, Zitronen- und Essigsäure). Zusätzlich kann Wasser abgeschieden werden. Unter diesen Bedingungen kann es zu SRK kommen. Beobachtet wurde dies in einem mehrgeschossigen Gebäude in den USA, wo SRK schließlich zum Bruch einer Monolitze führte. In der Publikation wird auf einen ähnlichen mikrobiell verursachten Korrosionsschaden durch SRK an verbundlosen Spanngliedern bei einem Betonbehälter eines Kraftwerks in Denver hingewiesen. Der gleiche Korrosionsmechanismus wurde in einem Zementsilo in der Schweiz festgestellt, in dem mehrere Monolitzen gebrochen waren [Hunkeler u. a. 2005]. Im Bereich der Brüche wurde hier praktisch kein Korrosionsschutzfett mehr vorgefunden. Stattdessen wurden große Mengen an Essigsäure nachgewiesen.

Ebenfalls in [Hunkeler u. a. 2005] wird von einem Versagen einer Monolitze sowie von mehreren Drahtbrüchen bei dem Dach eines Parkhauses unter einer Sporthalle in St. Gallen berichtet. Als Ursache werden systematische Abdichtungsmängel bei den Spanngliedern im Bereich von Schwindgassen der Deckenplatte vermutet. Dies ermöglichte eine Spaltkorrosion im Bereich von Spalten in den Kontaktflächen der Litzendrähte sowie im Bereich von mechanischen Verletzungen durch Spannwerkzeuge. Als Folge der Spaltkorrosion kam es zu wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion, wodurch die Litze schließlich versagte.

Hinsichtlich des Ankündigungsverhaltens bei Spannstahlschäden verhalten sich verbundlos vorgespannte Bauteile bei Spannstahlausfällen in der Regel gutmütiger als Bauteile mit Spanngliedern im Verbund, da der Spannkraftabfall auf der gesamten Länge eines Spannglieds wirkt und so in der Regel eine Versagensankündigung durch Rissbildung in den maximal beanspruchten Bereichen auftritt. Im Folgenden wird daher nicht weiter auf diese Fälle eingegangen.

3.2 Ursachen und Randbedingungen für SRK

3.2.1 Während des Transportes, der Lagerung und des Einbaus

Da eine Anrissbildung nach dem Verpressen i. d. R. ausgeschlossen werden kann, sind verzögerte Spannstahlbrüche nur dann möglich, wenn eine Vorschädigung des Spannstahls vorliegt. Ein erhöhtes Risiko für verzögerte Spannstahlbrüche infolge SRK besteht nach [Moersch 2005], wenn die Spannglieder vor dem Verpressen entgegen dem heute aktuellen Stand der Technik transportiert, gelagert oder eingebaut wurden. Nach [Grimme u. a. 1983] ist eine unsachgemäße Lagerung der Spannglieder vor dem Einbau in der Baupraxis die am häufigsten auftretende Ursache für SRK. Einige Schadensfälle infolge von Spannstahlbrüchen während der Bauzeit sind aufgetreten, weil die Spannglieder bodennah auf feuchtem Untergrund oder unter Abdeckplanen gelagert wurden. Hierdurch konnte Feuchtigkeit bzw. Schwitzwasser an die Spannglieder gelangen und Korrosionsvorgänge auslösen. Bereits in [Naumann 1969] wird darauf hingewiesen, dass Spannglieder daher in gut belüfteten, beheizbaren geschlossenen Räumen mit einer maximalen Luftfeuchtigkeit von 60 % zu lagern sind. Mechanische Schädigungen (z. B. durch Hammerschläge) sowie Beanspruchungen bis zur Streckgrenze erhöhen die Empfindlichkeit des Spannstahls ebenfalls, da der Stahl hierbei bereichsweise plastifiziert und somit eine erhöhte Anzahl von Gitterfehlstellen aufweist, in denen sich Wasserstoff anlagern und zu Anrissen führen kann.

3.2.2 Im eingebauten Zustand vor dem Verpressen

Nach dem Einbau der Spannglieder spielen die Temperatur und die Feuchtigkeit in den Hüllrohren eine maßgebende Rolle für die Korrosion der Spannglieder. Schon bei geringen Mengen von Flüssigkeit in den Hüllrohren wurden relative Luftfeuchten in den Hüllrohren von 100 % festgestellt. Im Zeitraum zwischen der Betonage und dem Verpressen der Spannglieder wurde in Hüllrohren ebenfalls eine relative Feuchte von 100 % gemessen. Aufgrund des Temperaturrückgangs infolge abfließender Hydratationswärme wird i. d. R. der Taupunkt in den Hüllrohren unterschritten. Ein ausreichendes Feuchtigkeitsangebot für die für SRK erforderlichen Korrosionsprozesse steht daher zum Teil großflächig zur Verfügung [Grimme u. a. 1983].

Bei der Betonage ist außerdem die Wahrscheinlichkeit, dass Restwasser aus dem Betoniervorgang in die Hüllrohre gelangt, als hoch einzuschätzen. Bei diesen Wässern wurden erhöhte Chlorid- und Sulfatgehalte festgestellt. Häufig wurden pH-Werte zwischen 10 und 13 gemessen [Moersch 2005], bei Wässern die sich über längere Zeit in den Hüllrohren befanden allerdings auch pH-Werte im Neutralbereich [Grimme u. a. 1983]. Bei empfindlichen Spannstählen sind diese Umgebungsbedingungen als kritisch einzustufen.

Auch durch Regenwasser oder Leitungswasser in den Hüllrohren kann es zur Korrosion des Spannstahls kommen. Wird die Luftfeuchtigkeit in den Hüllrohren hingegen stets sehr niedrig

gehalten (< 60 %), ist die Korrosion mangels Feuchtigkeitsangebot erheblich behindert. Eine Senkung der Luftfeuchtigkeit ist z. B. durch Spülen der Hüllrohre mit trockener Luft oder mit Stickstoff möglich [Grimme u. a. 1983].

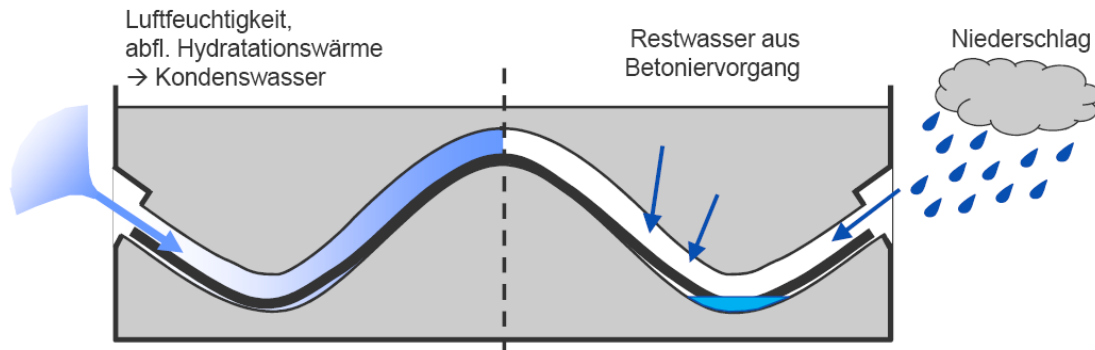


Bild 3.2: Darstellung möglicher Ursachen für SRK vor dem Verpressen

3.2.3 Zwischen dem Vorspannen und dem Verpressen

Nach [Nürnberger 1980] traten zahlreiche Schadensfälle infolge SRK an Spannstählen der Festigkeit St 100/135 im noch nicht verpressten Zustand bzw. kurz nach dem Verpressen auf. Bei Schäden, die erst nach mehreren Tagen bzw. Monaten auftraten, wurden ebenfalls mangelhaft oder nicht verpresste Hüllrohre vorgefunden. Der Zeitraum zwischen dem Anspannen und dem Verpressen der Spannlieder ist kritisch, da hohe Zugspannungen im Spannstahl wirksam sind und ein ausreichender Korrosionsschutz nicht vorliegt. Zusätzlich können die im Kapitel 3.2.2 genannten korrosionsfördernden Randbedingungen auftreten. Der Zeitraum zwischen der Herstellung und dem Verpressen von Spannliedern ist daher gemäß den aktuellen Regelwerken auf zwölf [DIN 1045-3:2008-08] bzw. sechs Wochen [ZTV-ING:2006-07] beschränkt. Der Zeitraum zwischen dem Vorspannen und dem Verpressen darf nach [DIN 1045-3:2008-08] maximal zwei Wochen betragen.

3.2.4 Randbedingungen für SRK nach dem Verpressen

Sofern keine korrosionsfördernden Substanzen vorhanden sind, ist der Spannstahl im vollständig verpressten Hüllrohr vor Korrosion geschützt. Eine Wasserstoffentwicklung ist somit unterbunden. Nach [Isecke u. a. 1995] kann das Entstehen von Anrissen im ordnungsgemäß verpressten Zustand daher auch nach längeren Standzeiten des Bauwerks ausgeschlossen werden. Eine Rissausbreitung bis zum Bruch des Spannstahls ist bei empfindlichem Spannstahl allerdings auch im vollständig verpressten Zustand möglich. Nach [Wölfel 1992] können auch in Spannstählen mit geringerer Empfindlichkeit vergleichbare Schäden auftreten, jedoch in der Regel nur im Zusammenhang mit anderen schädigenden Einflüssen wie Korrosion oder einer mechanischen Vorschädigung.

Nach [Moersch 2005] kann der Spannstahl nach dem Verpressen keinen Wasserstoff aufnehmen, solange der pH-Wert des Mörtелеlektrolyten über 12,6 liegt und solange keine korrosionsfördernden Substanzen (z. B. Chlorid) zur Spannstahlfläche gelangen. Lediglich in Sonderfällen wie Fremdmetallkontakt (z. B. mit verzinkten Hüllrohren) oder extremer Sauerstoffarmut ist unter diesen Bedingungen eine Wasserstoffentwicklung möglich. Sinkt der pH-Wert unter 12,6, so kann SRK nicht ausgeschlossen werden. Diese Bedingungen können z. B. bei einer bis zum Spannstahl fortgeschrittenen Karbonatisierung des Betons bzw. des Verpressmörtels, bei Verpressfehlern oder auch in Spalten an den Berührstellen der Spannstähle untereinander vorliegen. In jedem Fall kann die Einwirkung von Chloriden die SRK um ein Vielfaches verstärken.

Wenn schon vor dem Verpressen Korrosionsvorgänge an den Spannstählen stattgefunden haben, dann ist für den Ablauf der Korrosion nach dem Verpressen der Grad der Vorschädigung entscheidend [Moersch 2005]. Ist vor dem Verpressen eine starke Narbenkorrosion aufgetreten, dann kann eine Repassivierung des Elektrolyten innerhalb der Narbe auch nach dem Verpressen teilweise ausbleiben. Die Wasserstoffproduktion kann sich dann lokal fortsetzen und zur Anrissbildung im Spannstahl führen. Wenn der Spannstahl vor dem Verpressen ausschließlich kurzzeitig Wasserstoff aufgenommen hat, dann kann dieser den Spannstahl entweder wieder verlassen oder sich über Transportprozesse im Bereich von Gefügestörungen anreichern.

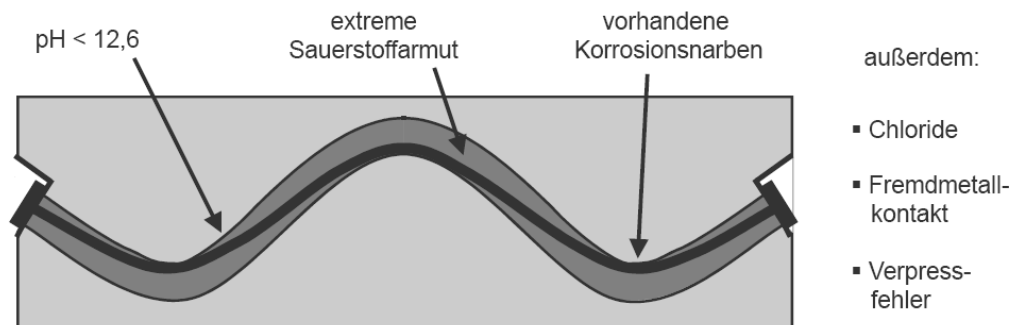


Bild 3.3: Darstellung möglicher Randbedingungen für SRK nach dem Verpressen

In [Moersch u. Schießl 2000] wird berichtet, dass die Einwirkung einer Zugschwellbeanspruchung mit Schwingbreiten von 50 MPa die Standzeiten von Spannstählen im Korrosionsversuch deutlich reduziert. Nur bei Schwingbreiten < 10 MPa wurde kein nennenswerter Einfluss auf die Standzeiten festgestellt. In [Nürnberger u. Beul 2000] wird übereinstimmend festgestellt, dass Schwingungen mit niedriger Amplitude oder auch durch Nutzungsänderungen bedingte Dehnungen die SRK-Empfindlichkeit von Spannstählen auffällig vergrößern. Beide Untersuchungsergebnisse wurden jedoch an Zugproben unter Schwellbelastung und gleichzeitigem Korrosionsangriff ermittelt. In Brückenbauwerken ist jedoch in der Regel nicht mit aktiver Korrosion des Spannstahls zu rechnen. Ob Spannungsamplituden oder Lastzunahmen auch in diesem Fall zu erhöhten Empfindlichkeiten führen, ist nicht bekannt. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Schwerverkehrs [Lenz u. Zilch 2009], insbesondere auf Brücken der Bundesfernstraßen [Naumann 2007], wäre dies kritisch zu beurteilen.

3.2.5 Zusammenfassung der Randbedingungen für SRK

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass verzögerte Spannstahlbrüche in vollständig verpressten Hüllrohren im Regelfall nur dann auftreten können, wenn eine Vorschädigung des Spannstahls in Form von Anrissen oder Korrosionsnarben vorhanden ist. Im Laufe der Herstellung eines Spannbetonbauwerkes können Vorschädigungen bei zahlreichen Gelegenheiten entstehen (Tabelle 3.3). Einige dieser ungünstigen Randbedingungen können z. B. durch sachgemäßen Transport des Spannstahls, Lagerung in beheizten geschlossenen Räumen und Verhinderung von mechanischen Beschädigungen vermieden werden. Andere SRK fördernde Einflüsse wie z. B. der Einfluss der Luftfeuchtigkeit oder der Zeitraum zwischen dem Vorspannen und dem Verpressen lassen sich zwar minimieren, in der Regel jedoch nicht völlig verhindern. Die Empfindlichkeit des Spannstahls unter den baupraktischen Randbedingungen ist daher ein wesentlicher Parameter für das Auftreten von verzögerten Spannstahlbrüchen. Nach dem Verpressen können Vorschädigungen in Form von Anrissen, Korrosionsnarben nur unter ungünstigen Randbedingungen entstehen. Bei ordnungsgemäß verpressten Hüllrohren ist eine Neubildung von Anrissen in der Regel nicht möglich.

Tabelle 3.3: Während des Bauablaufes mögliche Ursachen für die Bildung von Vorschädigungen, bei denen ein langsames Risswachstum infolge von SRK auftreten kann

Phase	Mögliche Ursachen für Vorschädigungen
Transport des Spannstahls	- Tausalze - Chloride aus Meerwasser (z. B. bei Transport auf dem Seeweg) - Feuchtigkeit, Kondenswasser
Lagerung des Spannstahls	- Tausalze - Chloride aus Meerwasser - Feuchtigkeit, Kondenswasser (z. B. bei Lagerung im Freien unter Planen oder bei bodennaher Lagerung)
Einbau des Spannstahls	- Mechanische Beschädigung (z. B. durch Hammerschläge) - Verklemmen des Spannstahls, starke Dehnung des Spannstahls beim Einziehen - Knicke im Spannstahl
Zeitraum zwischen dem Einbau des Spannstahls und dem Verpressen der Hüllrohre	- Betonwässer im Hüllrohr (erhöhte Chlorid- und Sulfatgehalte) - Niederschlagswässer im Hüllrohr - Luftfeuchtigkeit, Kondenswasser (insbesondere bei abfließender Hydratationswärme) - längere Zeiträume zwischen Vorspannen und Verpressen (mechanische Beanspruchung ohne ausreichenden Korrosionsschutz)
Zeitraum nach dem Verpressen der Hüllrohre	- pH-Wert des Verpressmörtels < 12,6 - Vorschädigungen in Form von Anrissen oder Korrosionsnarben - extreme Sauerstoffarmut - korrosionsfördernde Stoffe - Fremdmetallkontakt (Kontaktkorrosion z. B. mit verzinkten Hüllrohren) - Spaltkorrosion in nicht vollständig verpressten Bereichen

4 Möglichkeiten zur Detektion von Anrissen und Spanngliedbrüchen in bestehenden Bauwerken

4.1 Allgemeines

Gemäß Kapitel 3.2.4 können sich im ordnungsgemäß verpressten Hüllrohr im Allgemeinen keine Anrisse im Spannstahl bilden. In bereits bestehenden Anrissen und Fehlstellen kann das Risswachstum jedoch auch nach dem Verpressen fortschreiten. Für die Beurteilung der Tragsicherheit von Bauwerken mit SRK-empfindlichem Spannstahl ist es daher wichtig zu erkennen, ob Anrisse oder ggf. schon Spannstahlbrüche im Bauwerk vorhanden sind.

Aufgrund des in Kapitel 2 beschriebenen Ablaufes der SRK ist der Korrosionsfortschritt bzw. die Reststandzeit des Spannstahls bei eingebautem Spannstahl jedoch in der Regel nur schwer feststellbar. Im folgenden Kapitel werden daher verschiedene aus der Literatur bekannte Verfahren vorgestellt, die zur Detektion von Anrissen bzw. Brüchen von Spannstählen entwickelt wurden. Hierbei wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen indirekten und direkten Detektionsverfahren unterschieden. Während die direkten Verfahren zum Ziel haben, Schäden am Spannstahl selbst festzustellen werden mit indirekten Verfahren Folgeschäden von Spannstahlbrüchen in angrenzenden Bauteilen detektiert. Die direkten Verfahren werden zusätzlich in zerstörende und zerstörungsfreie Verfahren unterteilt. Sofern eine direkte Detektion von Spannstahlschäden möglich ist, hat diese gegenüber indirekten Verfahren prinzipbedingt den Vorteil, dass evtl. vorhandene Schäden zu einem früheren Zeitpunkt erfasst werden können.

In Deutschland sind zurzeit noch zahlreiche Bauwerke mit SRK-empfindlichem Spannstahl vorhanden. Die Untersuchung des Spannstahls aller betroffenen Bauwerke auf Anrisse und Spannstahlbrüche ist in Anbetracht der Anzahl der bestehenden Bauwerke mit praktisch vertretbarem Aufwand kaum möglich. In der Praxis wird daher hauptsächlich auf indirekte Detektionsverfahren zurückgegriffen, welche im Rahmen der regelmäßigen Bauwerksuntersuchungen einfach angewendet werden können.

Bei allen nachfolgend genannten Verfahren ist jedoch zu beachten, dass eine Schädigung des Spannstahls in der Regel erst dann erkannt werden kann, wenn diese bereits ein gewisses Ausmaß angenommen hat [Zilch u. a. 2008a]. Insbesondere gilt dies für die indirekten Detektionsverfahren. Aus diesem Grund ist bei Anwendung dieser Methoden immer zu prüfen, ob für

das Bauwerk eine ausreichende Restsicherheit unter Berücksichtigung eines Spanngliedausfalls bis zur Detektionsgrenze nachgewiesen werden kann (vgl. Kapitel 5 und 6).

4.2 Übersicht über bekannte Detektionsverfahren

4.2.1 Indirekte Detektionsverfahren

Das einzige ggf. äußerlich erkennbare Anzeichen für Spanngliedbrüche ist eine *Rissbildung im Beton*. Diese tritt auf, wenn die Vorspannkraft durch Spannstahlbrüche lokal so weit abnimmt, dass die Betonzugfestigkeit in der ursprünglich vorgedrückten Zugzone infolge äußerer Lasteinwirkung überschritten wird und es zu einer Bildung von Biegerissen kommt. Dieses Vorgehen wird als indirektes Verfahren eingestuft, da Brüche nicht am Spannstahl selber sondern durch resultierende Schäden an den umgebenden Bauteilen detektiert werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass für eine Rissbildung häufig eine deutliche lokale Reduktion der Vorspannung erforderlich ist. In der Regel müssen hierfür zahlreiche Spannstahlbrüche mit geringem Abstand auftreten. Zusätzlich ist eine ausreichend große äußere Belastung erforderlich. In betroffenen Bauteilen gibt es jedoch in der Regel Bereiche, in denen die äußeren Beanspruchungen so gering sind, dass selbst beim lokalen Ausfall aller vorhandenen Spannglieder keine Risse auftreten.

In Versuchen wurde gezeigt, dass die Verteilung der Spannung im Bauteil bei Spannstahlbrüchen von der linear-elastisch ermittelten Spannungsverteilung abweichen kann [König u. a. 1996]. Aufgrund der Verankerung der gebrochenen Spannglieder auf beiden Seiten des Bruchquerschnittes stellt sich im Steg ein Scheibenspannungszustand ein, bei dem die Betonzugspannung auf Höhe der Spanngliedlage höher sein kann als am unteren Rand des Querschnittes. Es ist daher möglich, dass sich ein Riss zuerst auf Höhe der Spanngliedlage bildet, bevor er an die Unterseite des Bauteils durchdringt. Weiterhin kann die Rissbildung maßgeblich durch Eigenspannungszustände beeinflusst werden, welche z. B. durch folgende Einflüsse hervorgerufen werden können:

- **Unterschiedliches Kriechen und Schwinden verschiedener Querschnittsteile:**

In [König u. Fehling 1989] wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass bei Hohlkästen mit relativ dünnen Untergurten und dicken Stegen die Untergurte deutlich höhere Kriechzahlen und Schwindmaße aufweisen als die Stege. Hierdurch entstehen im Steg Druckspannungen und im Untergurt Zugspannungen. Bei einer Abminderung der Normalkraft aus Vorspannung würde die Rissbildung im unteren Flansch des Hohlkastens hierdurch begünstigt werden.

- **Schwindbehinderung des Betons durch den Betonstahl:**
Hierdurch werden im Beton hauptsächlich Zugspannungen hervorgerufen, wodurch die Rissbildung begünstigt wird.
- **Angewandtes Bauverfahren:**
Eigenspannungen können z. B. aus der zeitlich versetzten Herstellung einzelner Querschnittsteile entstehen, wenn die zuerst hergestellten Querschnittsteile bei der Herstellung der nachfolgenden Querschnittsteile bereits statisch beansprucht werden. Teilweise werden z. B. bei Hohlkästen die Bodenplatte und die Stege vor der Fahrbahnplatte hergestellt. Je nach Steifigkeit des Lehrgerüsts können bei der Herstellung der Fahrbahnplatte Spannungen im bereits erhärteten Querschnittsteil auftreten, die als Eigenspannungen ins System eingepreßt werden. Da der eingepreßte Eigenspannungszustand in diesem Fall Spannungen mit dem gleichen Vorzeichen erzeugt wie der Endzustand, würde eine Rissbildung hierdurch begünstigt werden.
- **Nichtlineare Temperaturverteilung:**
Bei zeitlich konstanten Temperaturen an den Außenseiten und im Inneren eines Körpers liegt ein stationärer Temperaturzustand vor, der sich durch einen konstanten Anteil und einen linearen Temperaturverlauf zwischen der Ober- und Unterseite abbilden lässt. Tritt jedoch eine schnelle Erwärmung oder Abkühlung der Bauteiloberfläche auf, so ergeben sich instationäre Temperaturzustände, bei denen bis zum Erreichen eines stationären Zustandes nichtlineare Temperaturverteilungen und infolge dessen Eigenspannungen im Bauteil auftreten. Eigenspannungen heben sich innerhalb des Querschnittes auf, so dass aus ihnen keine Schnittgrößen resultieren. Daher werden sie bei der Berechnung der Schnittgrößen im Allgemeinen nicht berücksichtigt. Die größten Zugeigenspannungen an den Querschnittsrändern treten im Tagesgang in der Regel nachmittags zwischen 16:00 und 18:00 Uhr auf [Buba 2005]. Im Stegbereich ist zwischen 04:00 und 06:00 Uhr mit den größten Zugeigenspannungen zu rechnen. In [Zichner 1976] werden die Eigenspannungen von Plattenbalken- und Hohlkastenbrücken ausgewertet. Für Hohlkastenbrücken werden Zugeigenspannungen in der Größenordnung von 1,0 MPa an der Oberseite bzw. 0,7 MPa an der Unterseite angegeben. Bei Plattenbalken betragen die Werte 1,0 bzw. 1,2 MPa.

Die Größe der Eigenspannungen aus den verschiedenen Einflüssen ist stark vom System abhängig. Lang andauernde Eigenspannungszustände können außerdem durch Kriechinflüsse reduziert werden. Im Rahmen der rechnerischen Untersuchung von betroffenen Bauwerken werden Eigenspannungen in der Regel durch pauschale Abminderungen der Betonzugfestigkeit berücksichtigt.

Neben einer Versagensankündigung durch Biegerisse ist theoretisch auch eine Versagensankündigung durch Schubrisse im Stegbereich möglich. In [König u. a. 1996] wird jedoch gezeigt, dass bei parabelförmig geführten Spanngliedern in der Regel nicht mit der Bildung von Schubrisen infolge von Spannstahlbrüchen zu rechnen ist.

Darüber hinaus ist theoretisch auch die Bildung von parallel zum Spannglied verlaufenden Längsrissen infolge der Verankerung der Spanndrähte auf beiden Seiten eines Spannstahlbru-

ches denkbar. Bei einem aus dem Hochbau bekannten Schadensfall sowie in Versuchskörpern zeigte sich im Bruchquerschnitt auf Höhe des Spannstahls ein horizontal verzweigtes Rissbild, welches auf eine hohe Verbundbeanspruchung durch die Verankerung der gebrochenen Spanndrähte hinweist (Bild 4.1). Reine Verankerungsrisse ohne Biegerisse wurden bisher jedoch nicht beobachtet. Es ist anzumerken, dass die Bildung von Verankerungsrissen stark von der Qualität des Verpressmörtels im Bereich der Bruchstelle abhängt. Bei einer ggf. mangelhaften Verpressung des Spannglieds kann die Verankerungslänge der Drähte deutlich zunehmen, wodurch die ringförmig um das Spanglied verlaufende Betonzugspannung im Verankerungsbereich reduziert wird und eine Rissbildung ggf. nicht mehr eintritt. Außerdem haben die meisten Spannglieder bei üblichen Querschnitten von Brückenbauwerken größere Betondeckungen, so dass eine Längsrissbildung nochmals unwahrscheinlicher wird.

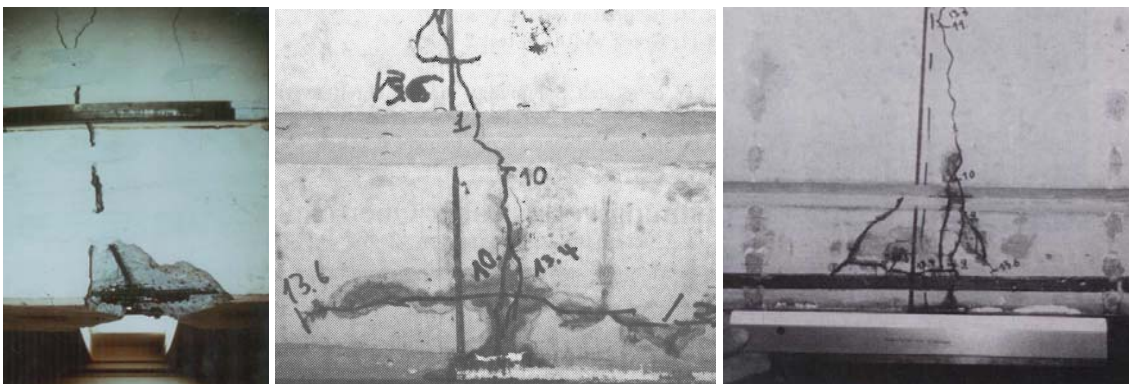


Bild 4.1: Rissbild eines Schadensfall (links) sowie im Versuch (Mitte und rechts), aus [BMV 2009]

Alternativ oder ergänzend zur visuellen Untersuchung der Betonoberfläche auf Risse kann eine Überprüfung der Rissbildung auch mit anderen Verfahren erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Anwendung von geeigneten *Faseroptischen Sensoren* [Bergmeister u. Santa 2004]. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Systemen zur Erfassung von Rissbildungen (z. B. Zigzag-Sensor) und Systemen zur Messung von Dehnungen (z. B. Bragg-Grating-Verfahren oder Fabry-Perot-Sensoren) [Casas u. Cruz 2003]. Bei Systemen zur Messung der Dehnungen ist zu beachten, dass neben Dehnungen infolge von Lasteinwirkungen in der Regel auch Temperaturdehnungen mit erfasst werden. Diese müssen durch separate Messungen erfasst und bei der Auswertung der Ergebnisse rechnerisch berücksichtigt werden. Faseroptische Sensoren in verschiedenen Formen werden bereits zur Langzeitüberwachung von einzelnen Brückenbauwerken eingesetzt [Dohrmann 1995], [Casas u. Cruz 2003], [ISIS Canada 2009]. In der Literatur werden diese Systeme als weitgehend praxisreif beschrieben. Über die Verwendung solcher Systeme in Deutschland ist bislang jedoch nichts bekannt.

Eine weitere Methode zur Erfassung von Rissen stellen *optische Messsysteme* dar. In [Stratmann u. a. 2008] wird ein Verfahren zur Messung von Rissbreiten auf Basis der Mehrbildphotogrammetrie vorgestellt. Hiermit ist die Messung der Rissbreiten durch Graustufenanalysen an Digitalphotographien möglich. Für die Messungen wird eine handelsübliche Digitalkamera mit

speziellem Ausrüstungszubehör verwendet. Durch die digitale Aufnahme und Verarbeitung der Bilder wird eine weitgehend automatisierte Auswertung von Rissbreiten ermöglicht. Das Verfahren könnte in Bereichen, in denen eine Änderung der Rissbreite als Hinweis auf vorhandene Spannstahlbrüche gewertet werden kann, zur Erfassung dieses Ankündigungszeichens eingesetzt werden. Neben dem beschriebenen System erscheint die Anwendung z. B. von stereophotogrammetrischen Messsystemen oder Systemen zur digitalen Erfassung der Oberfläche theoretisch möglich. Praktische Anwendungen solcher Systeme sind jedoch bislang nicht bekannt. Die Anforderungen an solche Systeme wären eine ausreichende Auflösung zur frühzeitigen Erfassung von Dehnungsänderungen und Rissbildungen, eine geeignete Softwarelösung zur Auswertung der Verformungsänderungen durch Vergleich der Photogrammetrischen Aufnahmen von verschiedenen Zeitpunkten und eine möglichst einfache Durchführung der Messungen.

Aufgrund der guten Verbundeigenschaften des ovalen, gerippten Spannstahls verankern sich die Spannstähle im Bereich eines Spannstahlbruches in der Regel auf relativ kurzer Länge. Spanngliedbrüche beeinflussen die Steifigkeit von vorgespannten Bauteilen daher in der Regel nur wenig, sofern diese nicht in weiten Bereichen des Bauteils in hoher Anzahl auftreten. Die *Erfassung der Änderung der Verformungen* oder der *Eigenfrequenz* eines Bauteils sind daher in der Regel nicht geeignet, um Spannstahlbrüche frühzeitig zu detektieren [Wölfel 1992], [Zilch u. a. 2008b].

4.2.2 Zerstörende direkte Detektionsverfahren

Eine vergleichsweise sichere Methode zur Untersuchung einer Spannstahlprobe auf Anrisse ist das *Magnetpulverprüfverfahren*. Hierbei wird ein Prüfmittel aus fluoreszierenden, ferromagnetischen Teilchen auf den zu untersuchenden, magnetisierten Spannstahl aufgebracht. Infolge des Feldgradienten bilden sich bei Anrissen sichtbare Pulverraupen aus (vgl. Bild 2.2). Während das Verfahren selber zerstörungsfrei angewendet werden kann, ist zur Freilegung der Spannglieder und zur Öffnung der Hüllrohre ein zerstörender Eingriff erforderlich. Hierbei können jedoch durch visuelle Inspektion auch Informationen zum Gesamtzustand des Spanngliedes und über das Vorhandensein von Spannstahlbrüchen im Bereich der Bauteilöffnung gewonnen werden.

Eine Entnahme von Spannstahlproben kommt nur dann in Frage, wenn dies aus statischer Sicht vertretbar ist und wenn im Querschnitt der Spannstahlentnahme ein Versagen mit Vorankündigung zu erwarten ist [Beutel u. a. 2006]. Hierbei kann z. B. durch Messung der Rückdehnung eines Spanndrahtes nach einem Trennschnitt die *vorhandene Vorspannung* bestimmt werden, woraus Hinweise auf möglicherweise vorhandene Brüche innerhalb der Verankerungslängen beidseits des Trennschnittes gewonnen werden können. Durch *Zugversuche am entnommenen Spannstahl* können zusätzliche Informationen über die mechanischen Eigenschaften sowie zum Vorhandensein von Anrissen in den Spannstahlproben gewonnen werden. *Korrosionsversuche* (gemäß Kapitel 2.4) und eine *chemische Analyse* der Spannstahlproben können Aufschluss über die SRK-Empfindlichkeit und die Art des Spannstahls geben. Die Ergebnisse der letztgenannten

Untersuchungen gelten für den gesamten untersuchten Spanndraht. Rückschlüsse auf weitere Spanndrähte sind jedoch i. d. R. nicht möglich.

4.2.3 Zerstörungsfreie und minimalinvasive direkte Verfahren

Zur zerstörungsfreien Ortung von Spannstahlbrüchen wurden in der Praxis bisher hauptsächlich die *Magnetische Streufeldmessung* bzw. das *Remanenzmagnetismus-Verfahren* verwendet. Beide Verfahren nutzen die ferromagnetischen Eigenschaften des Spannstahls. Bei der Streufeldmessung wird ein Spannstahl aktiv magnetisiert. An den Bruchstellen von Spannstahlbrüchen bilden sich Nord- und Südpole des Magnetfeldes aus. Das in diesem Bereich entstehende magnetische Streufeld kann bei der Messung des Magnetfeldes an der Bauteiloberfläche lokalisiert werden. Beim Remanenzmagnetismus-Verfahren wird die Messung nicht unter einem aktiven Magnetfeld durchgeführt. Stattdessen wird der Spannstahl durch externes Überfahren mit Magneten aufmagnetisiert. Das Magnetfeld wird zwischen den einzelnen Aufmagnetisierungsschritten an der Bauteiloberfläche gemessen. Hierbei können Einflüsse zum Beispiel aus Bügeln oder aus der schlaffen Längsbewehrung weitgehend eliminiert werden [Hillemeier u. a. 1997], [Sawade 1999]. Die magnetisierte Länge des Spannstahls sollte 3 m nicht unterschreiten. Bei einzelnen Spannstählen mit großen Querschnitten ist die Detektion von Spannstahlbrüchen bis zu einer Betondeckung von ca. 30 cm möglich. Sind hingegen mehrere Einzeldrähte mit kleinem Querschnitt in Verbindung mit schlaffer Bewehrung vorhanden, so gelingt die Detektion eines Bruches nur bis zu einer Betondeckung von ca. 10 cm [Scheel 2006]. Damit eignet sich das Verfahren hauptsächlich zur Ortung von Spannstahlbrüchen in Querspanngliedern der Fahrbahnplatte.

Neben den auf den ferromagnetischen Eigenschaften des Stahls basierenden Detektionsverfahren werden in der Literatur noch einige andere zerstörungsfreie Verfahren genannt. Die meisten dieser Verfahren sind jedoch noch nicht ausreichend weit entwickelt oder sogar ungeeignet, um Spannstahlbrüche in vorgespannten Bauteilen mit nachträglichem Verbund festzustellen. Der Vollständigkeit halber werden die in der Literatur gefundenen Ansätze nachfolgend dennoch aufgeführt.

Bei der *Ultraschallreflexionsmessung* werden an einem Ende des Spannglieds Ultraschallwellen eingeleitet. Diese werden an Grenzflächen von Inhomogenitäten reflektiert. Unter günstigen Umständen sind mit diesem Verfahren größere Fehlstellen im Abstand weniger Meter vom Einleitungspunkt der Ultraschallwellen detektierbar. Die Feststellung von Anrissen ist jedoch nicht möglich [Holst u. a. 2007].

Auf einem ähnlichen Prinzip beruht das Verfahren der *Reflektrometrische Impulsmessung (RIMT)*. Hierbei werden anstatt Ultraschallwellen hochfrequente Stromimpulse vom Spanngliedende aus durch das Spannglied gesendet. Die Laufzeiten und Intensitäten der Reflexionen werden gemessen. Hieraus kann die Entfernung von Spanngliedbrüchen vom Spanngliedende bestimmt werden. In der Baupraxis ist das Verfahren aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren jedoch nur beschränkt einsetzbar [Holst u. a. 2007].

Bei der *Elektromagnetischen Resonanzmessung (ERM)* werden Resonanzfrequenzen des Spannstahls aus den an Inhomogenitäten reflektierten elektromagnetischen Wellen (ähnlich RIMT) ermittelt. Ein Spanngliedbruch ist nach [Holst u. a. 2007] mit diesem Verfahren ab einem Bruchuferabstand von 0,5 mm messbar. Bei elektrischem Kurzschluss der zu untersuchenden Spannstähle mit anderen Bewehrungs- oder Spannelementen sowie metallischen Hüllrohren ist das Verfahren jedoch nicht anwendbar [Mietz u. Fischer 2005].

Die *Reflektrometrische Spektroskopie* nutzt die Eigenschaft, dass Wechselströme höherer Frequenz hauptsächlich im oberflächennahen Bereich des Spannstahls geleitet werden (Skin-Effekt). Nach [Holst u. a. 2007] ist es denkbar, über Hochfrequenz-Reflektionsmessungen Injektionsfehlstellen und Spanngliedbrüche zu lokalisieren. Bei Betonbauteilen wurden jedoch mit zunehmender Schädigung nur sehr geringe Messwertänderungen festgestellt, weshalb das Verfahren baupraktisch kaum einsetzbar erscheint [Holst u. a. 2007].

Eine weitere zerstörungsfreie Detektionsmethode sind *Durchstrahlungsprüfungen* mit Röntgen- oder Gammastrahlung. Hierfür ist ein beidseitiger Zugang zum Bauteil erforderlich. Die Durchstrahlung ist möglich bei Betonbauteilen mit einer Dicke von bis zu 60 cm. Brüche können mit diesem Verfahren jedoch nur dann geortet werden, wenn die Bruchufer ausreichend weit voneinander entfernt sind, so dass der Zwischenraum durchstrahlt werden kann. Aufgrund großer erforderlicher Sicherheitsvorkehrungen ist das Verfahren auf Einzel- bzw. Sonderanwendungen beschränkt [Holst u. a. 2007].

Ungeeignet für die Detektion erscheint aufgrund der Angaben in der Literatur die *Messung der Anziehungskraft* mit jochförmigen Magneten. Beim Abfahren eines Spannglieds mit einem Jochmagneten schließt sich der magnetische Fluss zu einem großen Teil im Spannstahl. Bei Spannstahlbrüchen mit ausreichender Entfernung der Bruchufer nimmt die magnetische Permeabilität und damit die Anziehungskraft des Magneten in diesem Bereich ab. Die hierfür erforderlichen Bruchweiten treten jedoch in der Regel nur bei Spannbeton ohne Verbund auf. In Nordamerika, wo Spannbeton ohne Verbund häufig eingesetzt wird, wird dieses Verfahren angewendet [Scheel 2006].

4.2.4 Verfahren zur Detektion neuer Brüche

Mit der *Schallemissionsanalyse* ist es möglich, die bei der Rissbildung bzw. dem Risswachstum im Beton freiwerdenden Schallwellen zu erfassen und die Quelle zu lokalisieren. Nach [Holst u. a. 2007] könnten auch die beim Bruch eines Spannstahls entstehenden Schallwellen erfasst werden. Spannstahlbrüche könnten hierbei aufgrund der Frequenz des Schallsignals eindeutig identifiziert werden. Mit diesem Verfahren ist es möglich, neue Brüche des Spannstahls zu erkennen und zu lokalisieren. Der vorhandene Schädigungszustand kann jedoch grundsätzlich nicht erfasst werden.

Bei der Messung des *elektrischen Durchgangswiderstandes* werden Widerstandsmessungen mit den Widerständen aus Initialmessungen verglichen. Zur Auswertung der Messwerte sind in

[Fuzier u. a. 2005] zusätzlich Richt- und Grenzwerte für elektrische Durchgangswiderstände angegeben. Zur Durchführung der Messung ist an beiden Enden der Messlänge ein elektrischer Anschluss an das Spannglied erforderlich. Mit der Messung können Spanngliedbrüche sowie der mittlere Korrosionsabtrag über die Messlänge bestimmt werden. Über die Art des Korrosionsabtrages sowie die Lage und das Ausmaß der Schadstelle können jedoch keine Informationen gewonnen werden. Wegen der Kurzschlusswirkung ist das Verfahren bei metallischen Hüllrohren jedoch nicht anwendbar [Holst u. a. 2007]. Da SRK-empfindlicher Spannstahl hauptsächlich in Verbindung mit metallischen Hüllrohren verwendet wurde, scheidet dieses Verfahren zur Bruchortung in der Regel aus.

In [König u. a. 1998a] wird die Methode der *Erfassung des Elektrochemischen Rauschens* vorgestellt. Hierbei werden die aus elektrochemischen Korrosionsprozessen resultierenden Ladungsänderungen gemessen. Die Messung erfolgt durch zwei Elektroden ohne elektrischen Kontakt zum Spannstahl. Bereits bei geringsten Korrosionsvorgängen kann hiermit eine Zunahme des Rauschpegels festgestellt werden. Eine genaue Zuordnung der Rauschergebnisse zu bestimmten Korrosionsformen war bisher jedoch nicht möglich. Zur Anwendbarkeit des Verfahrens bei Spannstählen in metallischen Hüllrohren liegen keine Informationen vor, so dass das Verfahren zurzeit als nicht als praxisreif eingestuft werden kann.

4.3 Bewertung der bekannten Verfahren

Die Detektion von Spannstahlbrüchen erfolgt in der Praxis bisher hauptsächlich über die indirekte Methode der visuellen Erfassung von Rissbildungen im Beton. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass zur Erzeugung eines Ankündigungssignals in der Regel zahlreiche Spannstahlbrüche in einem Querschnitt erforderlich sind. Ergänzend zu dieser Methode ist die Erfassung von Rissen oder Dehnungsänderungen durch faseroptische Messsysteme möglich. Hierfür wurden faseroptische Messsysteme in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt [Dohrmann 1995], [Casas u. Cruz 2003], [ISIS Canada 2009].

In Einzelfällen wurden zerstörende direkte Verfahren zur Untersuchung des Spannstahls angewendet. Hiermit lassen sich die sichersten Informationen über den Zustand des untersuchten Spannglieds gewinnen. Der Nachteil dieser Verfahren ist jedoch, dass eine Untersuchung mit vertretbarem Aufwand nur lokal möglich ist. Wenn Brüche überall im Bauteil mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten können, dann ist die mögliche Stichprobe gemäß [Scheel 2006] in der Regel zu klein, um allgemeine Aussagen aus den Prüfungen ableiten zu können.

Von den zerstörungsfreien direkten Verfahren wurden bisher nur die ferromagnetischen Verfahren, die Faseroptischen Messsysteme sowie die Schallemissionsanalyse zur Detektion von Spannstahlbrüchen erfolgreich eingesetzt. Mit der Erfassung des elektrochemischen Rauschens konnten Spannstahlbrüche bisher nur unter Laborbedingungen erfasst werden.

Über die Anwendung ferromagnetischer Messverfahren wird in [Sawade 1999] und [Scheel 1999] berichtet. In beiden Textstellen wird beschrieben, dass die Messergebnisse nachträglich durch Bauwerksöffnungen verifiziert wurden. In [Mietz u. Fischer 2005] wurden ebenfalls zwei unterschiedliche ferromagnetische Verfahren geprüft und mit dem Verfahren der elektromagnetischen Resonanzmessung verglichen. Hierbei zeigten die beiden ferromagnetischen Verfahren im Bereich eines durch eine Kernbohrung durchtrennten Spannglieds einen Bruch an. Teilweise wurden von diesen Verfahren jedoch auch im Bereich intakter Spannglieder Brüche angezeigt. In diesen Bereichen wurde teilweise eine starke Korrosion des Hüllrohrs festgestellt. Mit der elektromagnetischen Resonanzmessung konnte kein Spannstahlbruch festgestellt werden, da ein elektrischer Kontakt zwischen den einzelnen Drähten des Spannglieds bestanden hat. Anrisse im Spannstahl konnten von keinem der Verfahren detektiert werden.

Im europäischen Ausland und in Nordamerika wird das Verfahren der Schallemissionsanalyse teilweise bereits zur Langzeitüberwachung von Brücken eingesetzt [Paulson u. a. 2001]. Mit diesem Verfahren ist es möglich, Spanngliedbrüche auch in solchen Bereichen zu detektieren, in denen bei Anwendung indirekter Detektionsverfahren kein Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden kann. Nachteilig ist allerdings, dass eine Erfassung des vorhandenen Zustands nicht möglich ist. Eine sichere Aussage über die vorhandene Restspanngliedanzahl kann daher in der Regel nicht getroffen werden.

In [Holst u. a. 2007] wird angemerkt, dass die in Kapitel 4.2.3 genannten direkten Verfahren zur Ortung von Brüchen bzw. Anrissen hinsichtlich der Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Ortungsgenauigkeit nur eine begrenzte Aussagekraft besitzen. Die Bestimmung des Korrosionszustandes und die Ortung von Brüchen an eingebauten Spannstählen sind demnach zurzeit noch nicht möglich.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass es einige vielversprechende Ansätze zur frühzeitigen zerstörungsfreien und direkten Detektion von Spanngliedbrüchen gibt. Mit einigen dieser Verfahren wurden in der Praxis bereits positive Erfahrungen gesammelt. Zum jetzigen Zeitpunkt scheint auf der Basis der vorliegenden Informationen jedoch noch keines der vorgestellten direkten Verfahren umfassend praxistauglich zu sein. Hinsichtlich der indirekten Verfahren erscheinen insbesondere die faseroptischen Sensoren geeignet zu sein, um eventuelle Ankündigungssignale frühzeitig zu erfassen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Detektion von Schäden bei allen Verfahren ein gewisses Ausmaß der Schädigung voraussetzt. Daher ist sowohl bei den indirekten als auch bei den direkten Verfahren ein Nachweis der Restsicherheit des Tragwerkes für den geschädigten Zustand erforderlich.

5 Mechanisch-querschnittweise Untersuchung des Ankündigungsverhaltens

5.1 Allgemeines

Aufgrund der um 1990 vereinzelt im Hochbau aufgetretenen Schäden infolge von verzögerten Spannstahlbrüchen durch SRK (vgl. Tabelle 3.1) wurde in den folgenden Jahren ein Konzept zum Umgang mit Bauwerken mit SRK-empfindlichem Spannstahl erarbeitet. Vor 1993 traten Schäden ausschließlich an Bauwerken mit Neptun-Spannstahl auf. Im Jahr 1993 wurde daher die „Empfehlungen zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St 145/160 Neptun N40 bis 1965 erstellt wurden“ [BMV 1993] eingeführt. Nachdem im Jahr 1995 ein Schadensfall mit Sigma-Spannstahl aufgetreten war, wurden die Empfehlungen auch für Bauwerke mit diesem Spannstahl angewendet.

Nach den Empfehlungen des BMV ist für betroffene Brückenbauwerke zunächst ein querschnittweise geführter rechnerischer Nachweis des Ankündigungsverhaltens vorgesehen (Rissvor-Bruch-Kriterium). Der Nachweis ist in den Zehntelpunkten jedes Feldes zu führen. Er gliedert sich in zwei Schritte, die im folgenden Kapitel beschrieben werden. Die Grundlagen des Nachweises wurden u. A. in [König u. a. 1996] verfasst. Durch den Nachweis des Ankündigungsverhaltens soll sichergestellt werden, dass sich ein Bauteilversagen durch eine deutlich sichtbare Rissbildung früh genug ankündigt, um ggf. Maßnahmen zur Sicherung des Bauwerkes zu treffen.

Zurzeit wird die Neufassung „Empfehlung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissegefährdetem Spannstahl erstellt wurden“ [BMV 2009] verfasst. Auch in dieser Fassung ist zunächst eine querschnittweise rechnerische Untersuchung des Ankündigungsverhaltens vorgesehen. Da der rechnerische Nachweis des Ankündigungsverhaltens den eigenen Untersuchungen in Kapitel 6 zugrunde liegt, werden die Annahmen sowie das grundsätzliche Vorgehen im Folgenden kurz vorgestellt.

Es ist anzumerken, dass das Nachweiskonzept gemäß [BMV 1993] auf die Untersuchung von Bauwerken in Längsrichtung ausgelegt ist. Die sinngemäße Anwendung auf die Querrichtung von Brückenbauwerken ist zwar nicht ausgeschlossen. Eine Anwendung der Regelungen für die Untersuchung von Bauwerken in Querrichtung wird jedoch in der Regel nicht zum Erfolg führen, da die Detektion eines Ankündigungssignals aufgrund der an der Oberseite der

Fahrbahnplatte vorhandenen Abdichtungen, Fahrbahnbeläge und Kappen kaum möglich ist. Für die Querrichtung sind daher in der Regel gesonderte Überlegungen erforderlich.

5.2 Vorgehen beim Nachweis

5.2.1 Schritt 1: Bestimmung der Restspannstahlfläche

Im ersten Schritt des Nachweises ist die zum Zeitpunkt der Rissbildung vorhandene Restspannstahlfläche $A_{Z,r}$ nach Gleichung (5.1) bzw. (5.2) zu bestimmen. Hierbei wird die Spannstahlfläche in jedem Untersuchungsquerschnitt rechnerisch so weit reduziert, dass unter der häufigen Einwirkungskombination die Betonzugfestigkeit überschritten wird. Hinweise zum Ansatz der Betonzugfestigkeit finden sich in Kapitel 5.3.3. Die anzusetzende häufige Einwirkungskombination wird in Kapitel 5.3.5 erläutert.

$$\beta_{bz} = \sigma_{b,\Delta q} - A_{Z,r} \cdot \varepsilon_{v,\infty}^{(0)} \cdot E_Z \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{y_{bz}}{W_b} \right) + \frac{M_{vx,\infty}}{W_b} + \frac{M_{\Delta T, \text{freq}}}{W_b} \quad (5.1)$$

$$\Leftrightarrow A_{Z,r} = \frac{\sigma_{b,\Delta q} - \beta_{bz} + \frac{M_{vx,\infty}}{W_b} + \frac{M_{\Delta T, \text{freq}}}{W_b}}{\varepsilon_{v,\infty}^{(0)} \cdot E_Z \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{y_{bz}}{W_b} \right)} \quad (5.2)$$

- mit:
- β_{bz} = Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit (siehe Kapitel 5.3.3)
 - $\sigma_{b,\Delta q}$ = Betonrandspannungen infolge Δq
 - Δq = häufige Einwirkung aus Verkehr und ständiger Last (vgl. Kapitel 5.3.5)
 - = $g + \Delta g + 0,5 \cdot p$
 - g = Einwirkung infolge Eigengewicht (vgl. Kapitel 5.3.4)
 - Δg = Einwirkung infolge Ausbaulast (vgl. Kapitel 5.3.4)
 - p = Einwirkung infolge Verkehr (vgl. Kapitel 5.3.4)
 - $A_{Z,r}$ = Restspannstahlfläche bei Rissbildung
 - $\varepsilon_{v,\infty}^{(0)}$ = Vordehnung des Spannstahls unter Berücksichtigung der Spannkraftverluste
 - E_Z = Elastizitätsmodul des Spannstahls
 - A_b = Bruttoquerschnittsfläche des Betons
 - y_{bz} = Abstand des Schwerpunktes der Spannstahlfläche zum Schwerpunkt der Bruttoquerschnittsfläche des Betons
 - W_b = Widerstandsmoment der Randfaser des Bruttobetonquerschnittes
 - $M_{vx,\infty}$ = statisch unbestimmter Anteil des Biegemomentes infolge Vorspannung zum Zeitpunkt $t = \infty$ (vgl. Kapitel 5.3.4)
 - $M_{\Delta T, \text{freq}}$ = Biegemoment infolge des häufig auftretenden linearen Temperaturunterschiedes

Bei der Berechnung nach [BMV 2009] wird eine sichtbare Biegerissbildung im Beton als Ankündigungssignal angenommen. Betroffene Bauwerke sind in der Regel nach [DIN 4227:1953-10] bemessen. Hiernach dürfen bei Bauteilen mit beschränkter Vorspannung und nicht ruhenden Lasten unter Ansatz von ständigen Lasten, Vorspannung, Kriechen und Schwinden sowie der halben Verkehrslast keine Zugspannungen im Querschnitt auftreten. Bei Annahme der häufigen Einwirkungskombination mit der halben Verkehrslast ist in diesen Querschnitten daher bei Spannstahlausfällen früh mit Zugspannungen zu rechnen. Für das Überschreiten der rechnerischen Zugfestigkeit muss jedoch in der Regel eine größere Menge des Spannstahls ausfallen. Bei voll vorgespannten Querschnitten darf nach [DIN 4227:1953-10] auch unter vollen Gebrauchslasten keine Zugspannung auftreten. Um unter der häufigen Einwirkungskombination eine Rissbildung zu verursachen, muss hier entsprechend mehr Spannstahl ausfallen.

5.2.2 Schritt 2: Bestimmung der Restsicherheit

Unter Ansatz der im ersten Schritt ermittelten Restspannstahlfläche $A_{Z,r}$ ist im zweiten Schritt für jeden Untersuchungsquerschnitt gemäß Gleichung (5.3) bzw. (5.4) nachzuweisen, dass unter der seltenen Einwirkungskombination gemäß Kapitel 5.3.5 eine ausreichende Restsicherheit gegenüber einem Biegebruch vorliegt. Die Restsicherheit gilt als ausreichend, wenn unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes für die ständigen Einwirkungen für die Verkehrslasten eine Sicherheit von $\gamma_p \geq 1,1$ nachgewiesen werden kann. In diesem Fall hat der untersuchte Querschnitt ein ausreichendes Ankündigungsverhalten.

$$\gamma_g \cdot M_g + \gamma_p \cdot M_p + M_{vx,\infty} + M_{\Delta T} \leq M_{Az,r} + M_{As} \quad (5.3)$$

$$\Leftrightarrow \gamma_p = \frac{M_{Az,r} + M_{As} - M_{\Delta T} - M_{vx,\infty} - \gamma_g \cdot M_g}{M_p} \quad (5.4)$$

- mit:
- γ_g = Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen (= 0,9 bzw. 1,1)
 - M_g = Biegemoment infolge ständiger Einwirkungen
 - γ_p = Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrseinwirkungen (für den Nachweis eines ausreichenden Ankündigungsverhaltens muss $\gamma_p \geq 1,1$ nachgewiesen werden)
 - M_p = Biegemoment infolge der seltenen Verkehrseinwirkungen
 - $M_{\Delta T}$ = Biegemoment infolge des selten auftretenden linearen Temperaturunterschiedes
 - $M_{Az,r}$ = von der Restspannstahlfläche bei Rissbildung unter Ansatz der Materialkennwerte nach Kapitel 5.3.3 aufnehmbares Moment
 - M_{As} = von der vorhandenen Betonstahlbewehrung aufnehmbares Moment

Im Hinblick auf das stochastische Verfahren ist ebenfalls die zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderliche Restspannstahlfläche $A_{Z,r,erf}$ zu bestimmen. Dies erfolgt durch Umstellen der Gleichung (5.3) gemäß Gleichung (5.5).

$$A_{Z,r,erf} = \frac{\gamma_g \cdot M_g + \gamma_p \cdot M_p + M_{vx,\infty} + M_{\Delta T} - M_{As}}{\varepsilon_{v,\infty} \cdot E_z \cdot z_z} \quad (5.5)$$

- mit: $A_{Z,r,erf}$ = zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit
erforderliche Restspannstahlfläche
- $\varepsilon_{v,\infty}$ = Gesamtdehnung des Spannstahls
(Vordehnung zum Zeitpunkt $t = \infty$ + Zusatzdehnung)
- z_z = innerer Hebelarm (iterativ zu ermitteln)

In gering beanspruchten Querschnitten ist es möglich, dass die Betonzugfestigkeit bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche auch beim Ausfall aller Spannglieder nicht überschritten wird. Beim Nachweis der Restsicherheit ist nach [König u. a. 1996] in solchen Querschnitten das Rissmoment des jeweiligen Querschnittes anzusetzen, sofern dieses größer ist als das Biegemoment infolge der seltenen Einwirkungskombination. Das gleiche Konzept liegt dem vereinfachten Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Robustheitsbewehrung in [DIN-FB 102:2008-08] zugrunde, wo stets das Rissmoment durch Betonstahlbewehrung abgedeckt werden muss. Hierdurch wird ein sprödes Bauteilversagen in jedem Fall verhindert.

Wenn allerdings das Rissmoment in einem Querschnitt größer ist als das Moment infolge der seltenen Einwirkungskombination, dann sind starke Überlastungen der Brücke oder sonstige außergewöhnliche Ereignisse erforderlich, um eine Rissbildung in diesem Querschnitt zu verursachen. Die Häufigkeit solcher extremen Ereignisse mit gravierenden Auswirkungen auf die betroffenen Bauwerke ist jedoch sehr gering. Der unbemerkte Ausfall aller Spannglieder in einem Querschnitt ohne Ankündungsverhalten ist ebenfalls sehr unwahrscheinlich. Bei statisch unbestimmten Systemen sind außerdem in der Regel zusätzliche Systemreserven vorhanden [König u. a. 1998b]. Der Nachweis der Restsicherheit darf daher nach [BMV 2009] stets unter Ansatz des aus der seltenen Einwirkungskombination resultierenden Momentes geführt werden, auch wenn dies kleiner ist als das Rissmoment.

Im Allgemeinen darf beim Nachweis der Restsicherheit eine Momentenumlagerung ausgenutzt werden. Die durch Momentenumlagerung mobilisierbaren Systemreserven werden am Beispiel der Reussbrücke Wassen (Bild 5.1) deutlich. Bei dem Bauwerk senkte sich im Jahr 1987 ein Pfeiler infolge eines Hochwasserereignisses um ca. 1,20 m. Zwar bildeten sich Risse mit großen Rissbreiten, jedoch versagte der Überbau trotz dieser sehr großen unplanmäßigen Stützensenkung nicht. Im vorliegenden Fall ist dies wahrscheinlich auch auf das günstige Verhalten des statisch unbestimmten Systems zurückzuführen. Das Bauwerk konnte instandgesetzt und weiter genutzt werden [de Witte u. a. 1989], [Menn 1989]. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bruchdehnung des Spannstahls bei einer Versprödung abnimmt. Da hierdurch die Verformungsfähigkeit des Überbaus eingeschränkt ist, sollte die Momentenumlagerung beim Nachweis des Ankündungsverhaltens in der Regel nicht ausgenutzt werden. Bei Anwendung von stochastischen Verfahren ist der Ansatz einer Momentenumlagerung gemäß [BMV 2009] in keinem Fall zulässig.



Bild 5.1: Reussbrücke Wassen (Schweiz) nach einem Hochwasserereignis am 15.08.1987 [de Witte u. a. 1989]

5.2.3 Bauwerke mit Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten

Der Nachweis des Ankündigungsverhaltens nach den Gleichungen (5.1) bis (5.5) muss in jedem Untersuchungsquerschnitt erbracht werden. Wenn nicht in allen Querschnitten ein Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden kann, so waren bisher weitere Maßnahmen wie eine Untersuchung des verwendeten Spannstahls, Entlastungs- oder Verstärkungsmaßnahmen erforderlich. Zu diesen Maßnahmen ist anzumerken, dass die Aussagefähigkeit einer Untersuchung des Spannstahls wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben in der Regel gering ist. Eine Entlastung von betroffenen Bauwerken wäre theoretisch durch Verkehrsbeschränkungen und eine Abstufung des Bauwerkes in eine geringere Brückenklasse möglich. Aufgrund der hohen Auslastung des Straßennetzes und des Mangels an alternativen Routen ist eine Lastreduzierung in der Praxis jedoch kaum durchführbar. Hinsichtlich einer Verstärkung von betroffenen Bauwerken stellt sich die Frage nach der Restnutzungsdauer und damit nach der Wirtschaftlichkeit der Verstärkungsmaßnahme. Wird durch die Verstärkung das Ankündigungsverhalten des Bauwerks hergestellt, so kann im Falle einer nach der Verstärkung auftretenden Rissbildung dennoch ein Abriss des Bauwerks erforderlich werden, wenn nicht zweifelsfrei belegt wird, dass die Rissbildung nicht durch Spannstahlbrüche verursacht worden ist. Eine Abschätzung des zeitlichen Ablaufes der SRK bzw. des Zeitraumes bis zu einer möglichen Rissbildung ist mit aktuellem Kenntnisstand jedoch nicht möglich.

Beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens wird häufig festgestellt, dass in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten ein großer Teil des Spannstahls ausfallen muss, bevor es zu einem rechnerischen Versagen kommt. Eine Vorankündigung durch Rissbildung stellt sich in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten jedoch i. d. R. schon nach wenigen Spannstahlbrüchen ein. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung wird in diesen Fällen als gering eingeschätzt, konnte bislang aber nicht quantifiziert werden.

5.3 Annahmen für die rechnerische Untersuchung

5.3.1 Nachweisquerschnitte und Spanngliedausfälle

Der Nachweis des Ankündigungsverhaltens ist für einen Hauptträger des Tragwerkes zu führen. Nach [BMV 2009] dürfen einzellige Hohlkastenquerschnitte als ein Hauptträger angesehen werden. Bei Brücken mit Plattenbalkenquerschnitt ist die Untersuchung für einen einzelnen Steg durchzuführen. Bei Plattenbrücken ist ein gedachter Träger mit einer Breite von 5,0 m anzunehmen.

Aufgrund der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Charakteristika der SRK tritt ein Bruch des Spannstahls nicht zwangsläufig an der Stelle der maximalen Beanspruchung auf. Beim rechnerischen Nachweis des Ankündigungsverhaltens muss daher unterstellt werden, dass eine Vorschädigung und somit ein verzögertes Versagen des Spannstahls an jeder Stelle des Bauteils möglich ist. Der Nachweis des Ankündigungsverhaltens ist daher gemäß [BMV 2009] in den Zehntelpunkten eines Feldes zu führen.

Bei der Simulation des Spannstahlausfalls darf gemäß [BMV 2009] von einem kontinuierlichen Ausfall der Spannstahlfläche ausgegangen werden. Eine Abstufung der vorhandenen Restspannstahlfläche nach ganzen Spanngliedern oder nach Drähten ist nicht erforderlich. Dies führt zu günstigeren Ergebnissen, da für den Nachweis der Restsicherheit gegenüber der auf die nächste ganze Anzahl von Spanngliedern bzw. Drähten abgerundeten Restspannstahlfläche eine größere Restspannstahlfläche zur Verfügung steht.

5.3.2 Versagensankündigung

Im Rahmen der Untersuchung werden die Einwirkungen aus Biegung und Längskraft berücksichtigt. Als Ankündigungssignal werden daher in der Regel nur rechnerisch auftretende Biegerisse gewertet. Gemäß [König u. a. 1994] wird das Ankündigungsverhalten durch Ansatz der Hauptzugspannungen unter Berücksichtigung der Querkraftbeanspruchung nicht wesentlich verbessert, so dass auf die Ermittlung der Hauptzugspannungen verzichtet werden kann.

Beim rechnerischen Nachweis wird weiterhin davon ausgegangen, dass eine unter häufigen Einwirkungen erfolgte Rissbildung bei der Bauwerksuntersuchung erkennbar ist. Hierzu muss angemerkt werden, dass die Rissbreite und damit die Erkennbarkeit von Rissen durch Witterungseinflüsse beeinflusst werden kann. Zwar werden lineare Temperaturunterschiede zwischen der Bauteilober- und -unterseite bei der Berechnung berücksichtigt, jedoch können die ggf. abweichende Größe des tatsächlich vorhandenen Temperaturunterschiedes sowie unberücksichtigte Eigenspannungen (vgl. Kapitel 4.2.1) die Erkennbarkeit von Rissen stark beeinträchtigen [Ivanyi u. Buschmeyer 2002].

Sind in einem Bauwerk bereits Risse vorhanden, die mit Sicherheit nicht durch Spannstahlbrüche verursacht wurden, so muss geprüft werden, ob andere Parameter wie die Änderungen der Rissbreite oder der Risslänge als Ankündigungssignal gewertet werden können. Wenn dies nicht der Fall ist, dann ist der betreffende Querschnitt wie ein Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten zu behandeln.

Wenn auf den Bauteiloberflächen Beschichtungen oder Beläge vorhanden sind, ist eine visuelle Detektion von Rissen in der Regel nicht möglich. Solche Querschnitte sind daher ebenfalls wie Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten zu behandeln. Dies ist z. B. im Stützbereich der Fall, wo die Bauteiloberfläche an der Oberseite der Fahrbahnplatte durch die Abdichtung, den Fahrbahnbelag und die Kappen verdeckt ist. Bei der Berechnung darf diesem Fall die Restspannstahlfläche bei einer an der Unterseite der Fahrbahnplatte sichtbaren Rissbildung angesetzt werden. Eine ausreichende Restspannstahlfläche kann hierbei jedoch in der Regel nur bei Hohlkastenquerschnitten nachgewiesen werden, da bei diesen Querschnitten die Unterseite der Fahrbahnplatte weit genug von der Schwerachse des Querschnitts entfernt liegt.

Ergänzend zur visuellen Untersuchung auf Rissbildungen ist eine Detektion von Spannstahlbrüchen oder Rissbildungen mit allen geeigneten, in Kapitel 4.2 genannten Verfahren denkbar. Hierdurch könnten z. B. auch nicht einsehbare Bereiche überwacht werden. Die Berechnung der Restspannstahlfläche ist in diesem Fall auf die Detektionsmethode abzustimmen.

In jedem Fall sind regelmäßige Bauwerksprüfungen bzw. Monitoringmaßnahmen zur Erkennung eines Ankündigungsverhaltens ein unverzichtbarer Teil des Nachweiskonzeptes. Nach [BMV 1993] wurde bei betroffenen Bauwerken mit Ankündigungsverhalten eine jährliche Brückenprüfung nach [DIN 1076:1983-03] bzw. [DIN 1076:1999-11] aus besonderem Anlass gefordert. Nach [BMV 2009] ist das Intervall für die Bauwerksprüfung im Rahmen der Untersuchung des Bauwerkes individuell festzulegen. Der maximal zulässige Zeitraum zwischen zwei Bauwerksprüfungen wurde auf drei Jahre vergrößert.

5.3.3 Materialeigenschaften

Bei der Untersuchung des Ankündigungsverhaltens bei Spanngliedausfällen werden die Materialeigenschaften des verbleibenden Spannstahls unverändert angesetzt. Entsprechend der Bemessung wird beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens als rechnerische Streckgrenze des Spannstahls der 5 %-Quantilwert der Spannung an der 0,2 %-Dehngrenze angesetzt. Die Zusatzdehnung des Spannstahls infolge Biegung und Längskraft ist beim Nachweis auf maximal 5 % begrenzt. Aus Bauwerken entnommene Spannstahlproben, bei denen eine hohe Empfindlichkeit für SRK, aber keine Anrisse festgestellt wurden, wiesen in der Regel sogar höhere Bruchdehnungen auf [Nürnberger u. a. 1994]. Um einer möglichen Versprödung des Spannstahls dennoch Rechnung zu tragen, darf eine Nachverfestigung des Spannstahls nach Erreichen der 0,2 %-Dehngrenze jedoch nicht angesetzt werden.

Als rechnerische Streckgrenze des Betonstahls darf der Mittelwert der Streckgrenze angesetzt werden. Dieser ist nach [BMV 2009] durch Multiplikation des 5 %-Quantilwertes mit dem Faktor 1,1 abzuschätzen.

Für den Beton ist beim Nachweis eine parabel-rechteckförmige bzw. eine bilineare Spannungs-Dehnungslinie anzunehmen. Die Druckfestigkeit des Betons ist entsprechend dem Rechenwert der Druckfestigkeit der vorhandenen Betonfestigkeitsklasse anzusetzen. Dieser ermittelt sich aus dem Nennwert der Betondruckfestigkeit β_{WN} durch Abminderung mit dem Faktor 0,6. Hierdurch, sowie durch die Vernachlässigung der Nacherhärtung des Betons, ergibt sich eine zusätzliche Sicherheit für den Nachweis des Ankündigungsverhaltens.

Tabelle 5.1: Beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens rechnerisch anzusetzende Druck- und Zugfestigkeiten des Betons

Betonsorte	B 300	B 450	B 600	Bn 350	Bn 450	Bn 550
Regelwerk	DIN 4227:1953-10 bzw. TGL 0-4227:1963-05			DIN 4227:1973-06		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Anzusetzende Betonzugfestigkeit β_{bZ} [MPa]	2,7	2,9	3,6	2,7	3,2	3,6
Vergleichsrechnung gemäß Empfehlungen [BMV 1993]						
Mittelwert der Betondruckfestigkeit [MPa]	30	45	60	--	--	--
Nennfestigkeit β_{WN} [MPa]	25 *)	40 *)	55 *)	35	45	55
$\beta_{bZ} = 0,25 \cdot \beta_{WN}^{2/3}$ [MPa]	2,1	2,9	3,6	2,7	3,2	3,6
min β_{bZ} [MPa]	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
maßgebend β_{bZ} [MPa]	2,7	2,9	3,6	2,7	3,2	3,6
Vergleichsrechnung nach [DIN-FB 100:2005] und [BMV 2011]						
$f_{cm,cube200}$ [MPa]	30	45	60	--	--	--
$f_{ck,cube200} = 0,85 \cdot f_{cm,cube200}$ [MPa]	25,5	38,25	51	35	45	55
$f_{ck} = 0,92 \cdot 0,86 \cdot f_{ck,cube200}$ #) [MPa]	20	30	40	27,5	35,5	43,5
$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}$ [MPa]	2,2	2,9	3,5	2,7	3,2	3,7
$f_{ctk;0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm}$ [MPa]	2,9	3,8	4,6	3,5	4,2	4,8
Faktoren zur Berücksichtigung						
- der Nacherhärtung (50 Jahre)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
- des Dauerstandeinflusses	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
- der Eigenspannungen	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Rechnerische Zugfestigkeit ($\geq 2,7$) [MPa]	2,7	2,9	3,5	2,7	3,2	3,6
*) Angenommene Werte gemäß [14]						
#) Faktor 0,92 zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen Faktor 0,86 zur Umrechnung der Würfeldruckfestigkeit (200 mm) auf die Zylinderdruckfestigkeit						

Die gemäß [BMV 2009] beim Nachweis zu berücksichtigende Betonzugfestigkeit ist ebenfalls in Tabelle 5.1 angegeben. Hinsichtlich des Ankündigungsverhaltens bei Spannstahlausfällen ist

eine hohe Betonzugfestigkeit ungünstig, da hierdurch mehr Spannstahlbrüche erforderlich sind, um eine Rissbildung im Beton zu verursachen. Zum Vergleich zu den gemäß [BMV 2009] anzunehmenden Zugfestigkeiten wird in Tabelle 5.1 daher vom 95 %-Quantilwert der Betonzugfestigkeit nach [DIN-FB 100:2005] ausgegangen. Dieser wird aus dem nach [BMV 2011a] ermittelten charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit ermittelt und ist etwa 30 % größer als die in [BMV 2009] angegebenen Werte für β_{bz} . Zusätzlich wird die Nacherhärtung des Betons gemäß [CEB 1990] für Zementarten N/R berücksichtigt. Hiernach ergibt sich in 50 Jahren eine Nachverfestigung etwa um den Faktor 1,27. Der Nacherhärtung steht eine Abminderung der Zugfestigkeit unter Dauerstandeinfluss gegenüber. In [Kordina u. a. 2000] und [Rinder 2003] wird der Dauerstandbeiwert für eine Belastungsdauer von einem Jahr mit 0,75 bzw. für hochfesten Beton mit 0,65 angegeben. Zur Berücksichtigung von Eigenspannungen wird die Betonzugfestigkeit zusätzlich um den Faktor 0,8 abgemindert. Das Ergebnis zeigt, dass sich die rechnerische Nacherhärtung des Betons und der Dauerstandeinfluss nahezu aufheben. Bei Ansatz der 95 %-Quantile der Zugfestigkeit ergeben sich unter Berücksichtigung der Eigenspannungen rechnerische Zugfestigkeiten, die sehr gut mit dem Mittelwert der rechnerischen Zugfestigkeit β_{bz} nach [BMV 2009] sowie f_{ctm} nach [DIN-FB 100:2005] übereinstimmen. Da sich geringe Zugfestigkeiten günstig auf den Nachweis des Ankündigungsverhaltens auswirken erscheint es sinnvoll, die Zugfestigkeit mit einem Mindestwert von $\beta_{bz} = 2,70$ MPa anzusetzen.

5.3.4 Lastannahmen

Beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens gemäß [BMV 2009] sind die Einwirkungen aus folgenden Lastfällen zu berücksichtigen:

- **Ständige Lasten: Lastfall G**
Die Einwirkungen aus Eigen- und Ausbaulasten sind zu berücksichtigen.
- **Vorspannung: Lastfall V**
Die Schnittgrößen infolge der statisch bestimmten (M_{Az} , $M_{Az,r}$) und statisch unbestimmten ($M_{vx,\infty}$) Wirkung der Vorspannung sind getrennt zu berücksichtigen. Der statisch unbestimmte Anteil des Biegemomentes infolge Vorspannung wird im querschnittweisen Nachweis stets unabgemindert angesetzt, da lokale Spannstahlbrüche nur einen untergeordneten Einfluss auf $M_{vx,\infty}$ haben. Eine Beeinflussung von $M_{vx,\infty}$ durch Spannstahlbrüche ist erst dann zu erwarten, wenn in weiten Bereichen des Tragwerks ein großer Anteil der Vorspannung ausfällt.
- **Verkehrslasten: Lastfall P**
Die Verkehrslasten sind entsprechend der statischen Berechnung des Bestandes anzusetzen. Im Regelfall ist dies das Lastmodell der Brückenklasse 60 gemäß [DIN 1072:1952-06] bzw. [DIN 1072:1967-11]. Wurde das Bauwerk nachträglich in eine andere Brückenklasse eingestuft, so ist bei der Untersuchung des Ankündigungsverhaltens das Verkehrslastmodell der letzten Einstufungsberechnung anzusetzen. Der Ansatz von über die Brückenklasse hinausgehenden Verkehrslasten führt zu ungünstigeren Ergebnissen und ersetzt in keinem Fall die Berechnung zur Einstufung des Bauwerks in eine höhere Brückenklasse [BMV 2009].

- **Temperaturunterschied: Lastfall ΔT**

Zur Berücksichtigung der Temperatureinwirkungen ist ein Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterseite des Querschnittes mit linearem Temperaturverlauf anzusetzen. Hierbei ist zwischen folgenden Fällen zu unterscheiden:

- Oberseite wärmer als die Unterseite: $\Delta T = 7 \text{ K}$
- Unterseite wärmer als die Oberseite: $\Delta T = 3,5 \text{ K}$

Die Temperatureinwirkungen entsprechen denen gemäß [DIN 1072:1985-12] und sind um ca. 30 % geringer als jene nach [DIN-FB 101:2009-03]. Für betroffene Bauwerke stellt diese Lastannahme jedoch in der Regel eine Verschärfung dar, da lineare Temperaturunterschiede vor der Einführung von [DIN 4227:1979-12] nicht zu berücksichtigen waren.

Auf die Berücksichtigung der Einwirkungen infolge von Stützensenkungen kann im Allgemeinen verzichtet werden, da davon ausgegangen wird, dass die Stützensenkung weitgehend abgeschlossen ist. Die aus einer Stützensenkung resultierenden Beanspruchungen werden mit der Zeit durch Kriech- und Relaxationseinflüsse sowie ggf. durch Rissbildung reduziert, so dass in der Regel nicht mit großen Einwirkungen zu rechnen ist. Da die Stützensenkung außerdem sehr langsam stattfindet, wäre sowohl bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche als auch beim Nachweis der Restsicherheit die gleiche Einwirkung infolge Stützensenkung anzusetzen. Der Ansatz von zusätzlichen Einwirkungen führt einerseits zu einer größeren rechnerischen Restspannstahlfläche und andererseits zu kleineren Restsicherheiten. Beide Einflüsse heben sich näherungsweise auf, so dass der Fehler durch die Vernachlässigung der Stützensenkung gering ist.

Einwirkungen aus Wind werden beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens vernachlässigt, da das gleichzeitige Auftreten von extremen Wind- und Lasteinwirkungen sehr unwahrscheinlich ist. Horizontale Verkehrslasten aus Zentrifugallasten werden beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens in der Regel ebenfalls vernachlässigt. Lasten aus Seitenstoß sind nach [BMV 2009] nicht zu berücksichtigen. Ein Ansatz dieser Belastung ist hauptsächlich für den Nachweis des Überbaus in Querrichtung relevant. Bei Seitenstoßbelastungen ist in der Regel von zeitlich sehr kurz einwirkenden dynamischen Einwirkungen auszugehen, die schnell wieder abklingen. Aufgrund der Massenträgheit der Bauteile sowie großer Bruchflächen ist ein Bauteilversagen infolge dieser Einwirkung nur in ungünstigen Fällen zu erwarten, z. B. wenn bei sehr langen Kragarmen eine Hauptspur komplett auf einem Kragarm liegt. In diesem Fall wäre auch zu untersuchen, ob die Seitenstoßbelastung eine Schädigung verursacht, welche die Restsicherheit unter statischen Lasten gefährdet.

5.3.5 Einwirkungskombinationen

Ermittlung der Restspannstahlfläche

Die Festlegung der bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche anzusetzenden Einwirkungskombination ist abhängig von der Regelmäßigkeit der Bauwerksprüfung und der Erkennbarkeit

der angenommenen Art der Versagensankündigung. Je höher die bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche angesetzten Lasten sind, desto weniger Spannstahl muss ausfallen, um eine Rissbildung zu erzeugen. Entsprechend wird eine größere rechnerische Restspannstahlfläche und somit auch eine größere rechnerische Restsicherheit ermittelt. Andererseits soll sich ein mögliches Versagen unter normalem Gebrauch möglichst frühzeitig ankündigen. Dies wird durch Ansatz der häufig auftretenden Einwirkungskombination bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche erreicht. In Bild 5.2 wird deutlich, dass die häufigen Einwirkungen einen relativ hohen Anteil an der Aufsummierten relativen Lastdauer haben. Beim Ansatz größerer Einwirkungen ist außerdem zu erwarten, dass sich Risse, welche sich unter hohen Lasten ausbilden, unter den in der Regel geringeren Belastungen während der Bauwerksprüfung teilweise wieder schließen und daher schwer erkennbar sind. Bei einer rechnerischen Rissbildung unter geringeren Einwirkungen kann nach [König u. a. 1996] davon ausgegangen werden, dass die Risse auch bei der Bauwerksprüfung erkennbar sind.

Die häufige Einwirkungskombination gemäß [BMV 2009] ergibt sich aus den ständigen Lasten sowie der halben rechnerischen Verkehrslast und dem halben anzusetzenden linearen Temperaturunterschied. In Bild 5.2 zeigt sich, dass das Konzept des Nachweises des Ankündigungsverhaltens ohne Modifikationen nur bedingt auf Bauteile im Hochbau übertragbar ist, da hier größere Lasten seltener auftreten als im Brückenbau. Darüber hinaus werden im Hochbau in der Regel keine regelmäßigen Bauwerksprüfungen im Hinblick auf Ankündigungssignale durchgeführt.

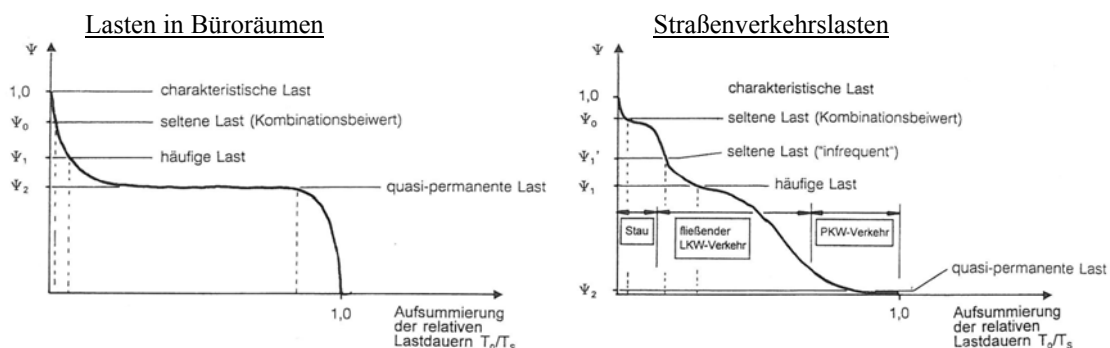


Bild 5.2: Relative Belastungsdauern und Abminderungsfaktoren gegenüber der charakteristischen Last für seltene, nicht häufige, häufige und quasi-ständige Einwirkungen, aus [Merzenich u. Sedlacek 1995]

Nach [BMV 1993] war zur Ermittlung der Restspannstahlfläche ebenfalls die häufige Einwirkungskombination anzusetzen. Diese sollte auf der sicheren Seite liegend so gewählt werden, dass sie mindestens einmal in 14 Tagen auftritt. Ein Ansatz von Einwirkungen aus Temperaturunterschieden war im Allgemeinen nicht vorgesehen. Zur Ermittlung der häufigen Einwirkungen bei Bauwerken der Brückenklasse 60 war als Richtwert für die Ermittlung der häufigen Einwirkungskombination eine Reduktion der Einwirkungen infolge Verkehr mit dem Faktor 0,4 vorgesehen. Unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse waren jedoch z. B. bei geringeren

Brückenklassen mit häufigem Schwerverkehr höhere Faktoren zur Berücksichtigung der häufig auftretenden Verkehrslast zulässig.

Der Ansatz von Kombinationsbeiwerten nach [DIN-FB 101:2009-03] in Verbindung mit den Lastmodellen gemäß [DIN 1072:1952-06] bzw. [DIN 1072:1967-11] ist beim Nachweis nach [BMV 1993] und [BMV 2009] nicht zulässig.

Nachweis der Restsicherheit

Beim Nachweis der Restsicherheit ist die seltene Einwirkungskombination anzusetzen. Diese ergibt sich sowohl nach [BMV 2009] als auch nach [BMV 1993] durch Ansatz aller zu berücksichtigenden 1,0-fachen ständigen und veränderlichen Lasten. Eine Reduktion der Lasten zur Berücksichtigung einer geringen Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von extremen Verkehrs- und Temperatureinwirkungen darf nicht angesetzt werden.

5.3.6 Einfluss der Querkraft auf das Ankündigungsverhalten

Die rechnerische Restsicherheit des Überbaus wird nach [BMV 2009] unter Berücksichtigung von Biegung und Längskraft ermittelt. Alternativ wäre bei der Ermittlung der Restspannliedanzahl die Ermittlung von Hauptzugspannungen unter Berücksichtigung der Querkraft möglich. Entsprechend könnte bei der Bestimmung der Restsicherheit hinsichtlich der Querkraftbeanspruchung die Neigung der Spannlieder berücksichtigt werden. Untersuchungen in [König u. a. 1996] zeigen jedoch, dass die Berücksichtigung der Querkraft bei Plattenbalken- und Hohlkastenquerschnitten insbesondere bei parabolisch geführten Spannliedern hinsichtlich der Ermittlung der Restsicherheit keinen maßgeblichen Einfluss hat. In der vorliegenden Arbeit wird die Auswirkung der Querkraft hinsichtlich des Ankündigungsverhaltens daher nicht weiter verfolgt.

6 Stochastisches Verfahren zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung

6.1 Ansatz für das stochastische Verfahren

Im Nachweiskonzept nach Kapitel 5 (Riss-vor-Bruch-Kriterium) wird das Ankündigungsverhalten der einzelnen Nachweisquerschnitte unabhängig voneinander mechanisch untersucht. In der Praxis wird hierbei häufig festgestellt, dass insbesondere in Bereichen mit geringen Beanspruchungen (z. B. Momentennullpunkte oder Trägerendbereiche) sehr viel Spannstahl ausfallen muss, bevor ein Riss auftritt. Teilweise wird selbst bei einem vollständigen Ausfall des Spannstahls die Betonzugspannung in diesen Querschnitten nicht erreicht. Wenn in diesem Bereich jedoch nur wenig Betonstahlbewehrung vorhanden ist, lässt sich die erforderliche Restsicherheit häufig nicht nachweisen.

Beim querschnittweisen Nachweis des Ankündigungsverhaltens geht jedoch die Anzahl der in einem Schnitt erforderlichen Spanngliedbrüche, ab der sich die Restsicherheit nicht mehr nachweisen lässt, nicht in die Beurteilung ein. Wenn z. B. in einem Tragwerk nur bereichsweise keine ausreichende Restsicherheit vorliegt, so kann es durch Spanngliedbrüche in den Bereichen mit ausreichender Restsicherheit dennoch zu einer Ankündigung des fortschreitenden Versagens kommen. Dies ist insbesondere dann wahrscheinlich, wenn in den Bereichen mit Ankündigungsverhalten nur wenige Spannglieder ausfallen müssen, um eine Rissbildung zu verursachen, in den begrenzten Bereichen ohne Ankündigungsverhalten jedoch zahlreiche Spannglieder ausfallen müssen, um ein rechnerisches Versagen zu verursachen. Außerdem werden beim querschnittweisen Nachweis die Einflüsse der Gesamtanzahl der Spannglieder und der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten nicht berücksichtigt.

Vor diesem Hintergrund konnte die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung bisher nicht quantifiziert werden. Im Folgenden wird daher ein stochastisches Verfahren vorgestellt, mit dem die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung in einer Systembetrachtung abgeschätzt werden kann. Anhand dieser Auftretenswahrscheinlichkeit ist eine mathematisch begründete Beurteilung des Ankündigungsverhaltens von Bauwerken möglich, bei denen mechanisch-querschnittweise kein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden kann. Auf diese Weise kann der Nachweis eines

ausreichenden Ankündigungsverhaltens am System auch dann gelingen, wenn nicht in allen Querschnitten ein Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden kann.

Hinsichtlich der Entwicklung eines stochastischen Modells zur Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung besteht die Schwierigkeit, dass eine spezifische Auftretenswahrscheinlichkeit für das Auftreten von Spannstahlbrüchen infolge von Spannungsrisskorrosion aufgrund der zahlreichen Einflussparameter hinsichtlich des Materials und der Umgebungsbedingungen nicht angegeben werden kann. Diese Wahrscheinlichkeit wäre jedoch als Eingangswert erforderlich, um eine mathematisch genaue Formulierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung zu entwickeln. Um dennoch ein stochastisches Modell aufstellen zu können, müssen einige Rechenannahmen getroffen werden. Die auf Grundlage dieser Annahmen ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeit wird im Folgenden „approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit“ genannt. Es ist zu beachten, dass die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung nicht mit einer Versagenswahrscheinlichkeit gemäß [DIN 1055-100:2001-03] gleichzusetzen ist.

6.2 Modellannahmen für das stochastische Verfahren

6.2.1 Grundsätzliche Randbedingungen

Für das stochastische Verfahren wird ein Modell aufgestellt, welches auf die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchung gemäß Kapitel 5 aufbaut. Eingangsgrößen sind dabei die Restspannstahlfläche bei Rissbildung $A_{Z,r}$ nach Gleichung (5.2) sowie die zur Sicherstellung einer ausreichenden Restsicherheit γ_p erforderliche Restspannstahlfläche $A_{Z,r,erf}$ nach Gleichung (5.5), jeweils für alle untersuchten Querschnitte.

Die Ergebnisse einer querschnittweisen rechnerischen Untersuchung sind als ein Szenario anzusehen, welches unter den hierfür getroffenen Annahmen und Randbedingungen (vgl. Kapitel 5.3) Gültigkeit hat. Da die Rechenannahmen für das Szenario und die Modellierung des Bauwerks im statischen System in der Regel mit Unsicherheiten behaftet sind, ist der Ansatz der in Kapitel 5 zugrunde gelegten Teilsicherheitsbeiwerte zwingend erforderlich.

Theoretisch ist mit dem stochastischen Verfahren die Untersuchung eines Bauteils für mehrere verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Materialeigenschaften, des statischen Systems oder z. B. einer Momentenumlagerung möglich. Da allerdings die Auftretenswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Szenarien in der Regel nicht bekannt sind, können die für die einzelnen Szenarien ermittelten approximierten Auftretenswahrscheinlichkeiten eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung nicht zutreffend gewichtet werden. Im

Folgendes wird das stochastische Verfahren daher immer nur auf ein Szenario angewendet. Hierfür gelten die Annahmen gemäß Kapitel 5.3. Auf der sicheren Seite liegend werden in diesem Szenario keine Momentenumlagerungen zugelassen. Über die in Kapitel 5.3 beschriebenen Annahmen hinaus werden für das stochastische Modell zusätzlich die nachfolgend beschriebenen Annahmen getroffen.

6.2.2 Annahme 1: Der Spannstahlausfall innerhalb eines Hüllrohres ist örtlich korreliert

Unter idealen Randbedingungen wie z. B. bei gleichmäßiger Vorschädigung über die gesamte Länge des Spannstahls und vollständiger Verpressung der Hüllrohre ohne Luftporen und ohne Verpressfehler ist es denkbar, dass SRK in allen Drähten unabhängig voneinander zufällig verteilte Spannstahlbrüche hervorruft. In der Realität ist das Vorliegen solcher idealen Randbedingungen jedoch nicht wahrscheinlich. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass innerhalb eines Hüllrohres lokale Störeinflüsse wie z. B. Verpressfehler oder lokal verstärkte Vorschädigungen vorhanden sein können, welche zu lokal günstigeren Bedingungen für SRK führen können. In solchen Bereichen ist daher mit örtlichen Häufungen von Spannstahlbrüchen zu rechnen. Die Spannstahlbrüche innerhalb eines Hüllrohres sind demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vollkommen zufällig über die Länge des Spannstahls verteilt. Stattdessen ist mit örtlichen Häufungen von Spannstahlbrüchen innerhalb eines Hüllrohres zu rechnen. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 6.1 dargestellt. In diesem Fall war im Bereich eines lokalen Verpressfehlers der Korrosionsschutz nicht gegeben, so dass eine Korrosion mit Wasserstoffentwicklung stattfinden konnte. In der Folge sind mehrere Drähte in diesem Bereich gebrochen.



Bild 6.1: Beispiel für Korrosion der Spanndrähte eines Spanngliedes im Bereich eines lokalen Verpressfehlers, aus [Nürnberger u. a 1994]

Im stochastischen Modell wird eine örtliche Korrelation des Spannstahlausfalls vereinfachend dadurch berücksichtigt, dass in den Untersuchungsquerschnitten stets ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer Drähte in einem Querschnitt anstatt eines drahtweisen Spannstahlausfalls simuliert wird. Zur Festlegung der Anzahl der in der Simulation gleichzeitig ausfallenden Drähte wird ein

Korrelationsfaktor $f_{\text{kor}}r$ eingeführt. Für den Korrelationsfaktor gilt $0 \leq f_{\text{kor}}r \leq 1,0$. Ein Korrelationsfaktor $f_{\text{kor}}r = 1,0$ bedeutet, dass die Spannstahlbrüche innerhalb eines Hüllrohres örtlich vollkommen korreliert sind. Ein beispielhafter Fall mit $f_{\text{kor}}r \approx 1,0$ im Bild 6.2 a) dargestellt. Die Drahtbrüche konzentrieren sich in diesem Fall in allen Drähten auf wenige Querschnitte. Im Vergleich dazu ist im Bild 6.2 b) ein Fall mit der gleichen Anzahl von Spanngliedbrüchen aber sehr geringer örtlicher Korrelation der Spannstahlbrüche ($f_{\text{kor}}r \approx 0$) dargestellt. Eine signifikante Häufung von Drahtbrüchen in bestimmten Querschnitten ist in diesem Fall nicht erkennbar.

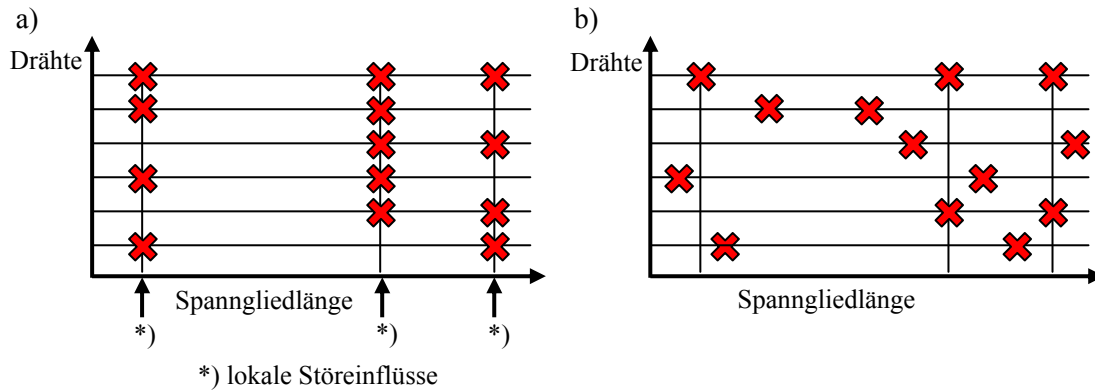


Bild 6.2: Beispiel für a) hohe Korrelation der Spannstahlbrüche innerhalb eines Hüllrohres (Häufung der Brüche im Bereich von lokalen Störungen) und b) geringe Korrelation der Spannstahlbrüche innerhalb eines Hüllrohres, bei jeweils gleicher Anzahl von Brüchen

In Bild 6.3 ist die in einem Schadensfall mit anschließendem Bauteilversagen beobachtete Verteilung von Brüchen und Anrissen im Spannstahl innerhalb eines 60 cm langen Abschnittes dargestellt. Hierin ist eine Häufung von Anrissen in einem Querschnitt bei etwa $x = -0,05$ m erkennbar. In diesem Querschnitt traten allerdings nur Brüche in den Drähten Nr. 1 und Nr. 16 auf. Bei den übrigen Drahtbrüchen ist in diesem Fall im betrachteten Bereich des Spanngliedes keine nennenswerte Korrelation erkennbar. Im betrachteten Bereich hatte die lokale Störung offensichtlich nur geringen Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit von Brüchen. Auf die ganze Spanngliedlänge bezogen wurde jedoch im Bereich des versagten Querschnittes in einem der beiden Hüllrohre eine Häufung von Drahtbrüchen festgestellt. Dies wurde auf einen hohen w/z-Wert des Verpressmörtels in diesem Bereich zurückgeführt, was eine erhöhte Porosität und Feuchtigkeit des Mörtels zur Folge hatte [Nürnberg u. a. 1994].

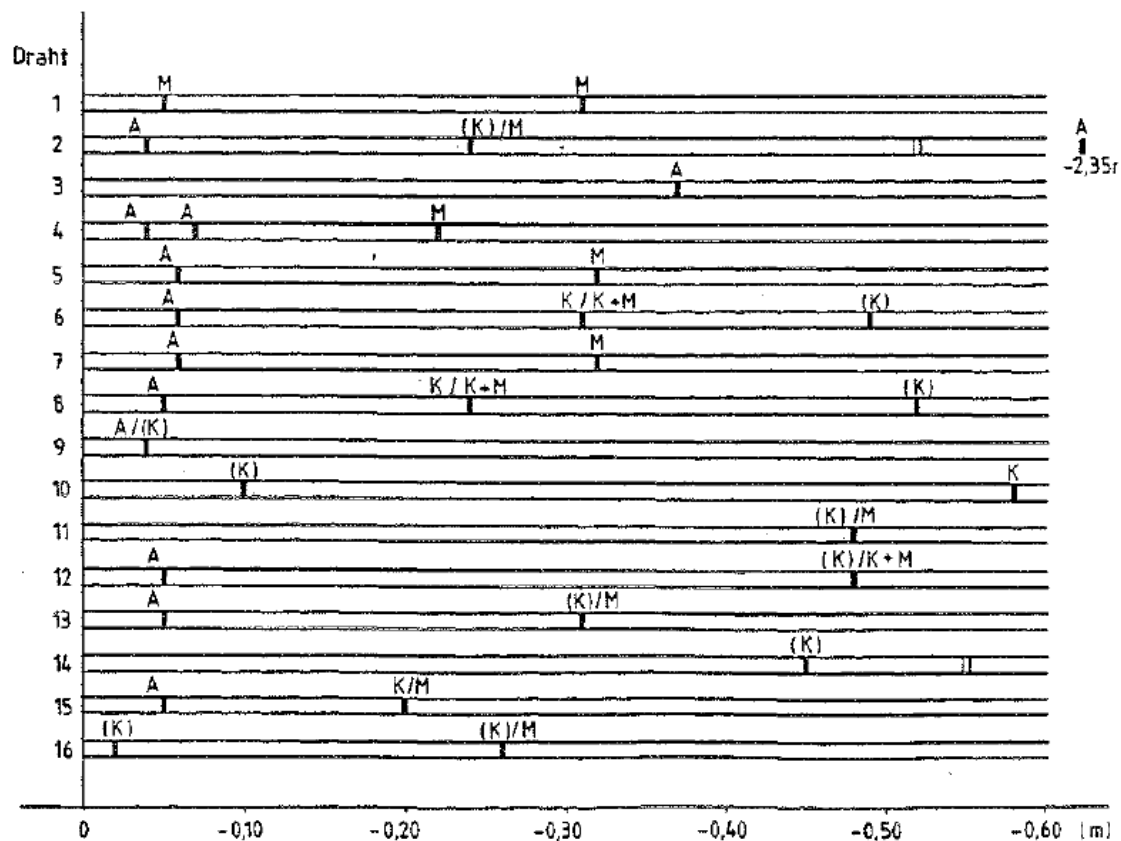


Bild 6.3: Verteilung von Anrissen (A), mit Mörtel belegten Bruchflächen (M) und mit Korrosionsprodukten belegten Bruchflächen (K) in einem Spannglied aus einem Schadensfall innerhalb eines Bereiches von 60 cm, aus [Nürnberger u. a. 1994]

Zur exakten analytischen Herleitung des Korrelationsfaktors $f_{\text{kor}}r$ wäre eine Auswertung zahlreicher entsprechender Daten zur Verteilung von Spannstahlbrüchen und Anrissen von Drähten innerhalb einzelner Hüllrohre in realen Bauteilen erforderlich. Da jedoch exakte Daten zur Korrelation von Drahtbrüchen innerhalb eines Hüllrohres nicht in ausreichendem Umfang vorliegen, ist eine exakte analytische Herleitung des Korrelationsfaktors nicht möglich. Stattdessen muss $f_{\text{kor}}r$ für das stochastische Verfahren ingenieurmäßig abgeschätzt werden. Hierbei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- In Bauteilen mit nur einem Spannglied ist es erforderlich, den Korrelationsfaktor mit $f_{\text{kor}}r = 1,0$ anzunehmen, da in jedem Querschnitt eine Häufung von Drahtbrüchen und somit ein Ausfall des gesamten Spannstahls im Querschnitt möglich ist, ohne dass in anderen Querschnitten eine nennenswerte Anzahl von Brüchen auftritt. In Bauteilen mit mehreren Spanngliedern ist es jedoch unwahrscheinlich, dass Verpressfehler in mehreren Hüllrohren im selben Querschnitt vorhanden sind. In diesem Fall wäre in Hüllrohren mit einem Verpressfehler ein höherer Korrelationsfaktor anzusetzen, während der Korrelationsfaktor in den ordnungsgemäß verpressten Hüllrohren deutlich kleiner ist. Im Hinblick auf die Längs-

träger von Brückenbauwerken, in denen i. d. R. eine relativ große Anzahl von Spanngliedern vorhanden ist, ist der Ansatz eines Korrelationsfaktors $f_{\text{kor}} < 1$ gerechtfertigt.

- Nicht alle lokalen Störeinflüsse betreffen den gesamten Spannstahl innerhalb eines Hüllrohres. In Bild 6.1 sind z. B. im Bereich eines lokalen Verpressfehlers einzelne Drähte stark korrodiert und gebrochen. Gleichzeitig sind aber auch zahlreiche augenscheinlich intakte Drähte vorhanden.
- Im Bereich von Verpressfehlern müssen nicht zwangsläufig korrosionsfördernde Bedingungen herrschen. Verpressfehler sind z. B. weniger kritisch, wenn der Lufteinschluss hermetisch abgeschlossen ist und die Feuchtigkeit im Bereich des Verpressfehlers gering ist.
- Treten lokale Störungen in Bereichen mit Ankündigungsverhalten auf, so begünstigen Sie das Ankündigungsverhalten, da sie die Rissbildung infolge eines Spannstahlausfalls beschleunigen. Nur wenn lokale Störungen ausschließlich in Bereichen ohne Ankündigungsverhalten vorhanden wären, würde das Ankündigungsverhalten negativ beeinflusst werden.

Unter Berücksichtigung der genannten Punkte wird der Korrelationsfaktor für das stochastische Verfahren mit $f_{\text{kor}} = 0,2$ gewählt. Die Drahtbrüche in 20 % = $\frac{1}{5}$ des Spannstahls innerhalb jedes Hüllrohres werden somit korreliert angenommen. Für das stochastische Verfahren wird daher jedes Spannglied in fünf effektive Teilspannglieder unterteilt, welche als unabhängig voneinander angesehen werden. Die Gesamtanzahl der effektiven Spannglieder ermittelt sich wie folgt:

$$s' = 5 \cdot s \quad (6.1)$$

mit. s' = Anzahl der effektiven Spannglieder
 s = Anzahl der Spannglieder (Hüllrohre)

Hinsichtlich der Ergebnisse der rechnerischen Untersuchung nach Kapitel 5 bedeutet dies, dass in jedem Querschnitt aus der Restspannstahlfläche bei Rissbildung $A_{Z,r}$ die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung n_{cr} zu ermitteln ist. Hierbei ist auf die nächste ganze Anzahl von effektiven Spanngliedern abzurunden. Außerdem ist aus der zur Sicherstellung einer ausreichenden Restsicherheit erforderlichen Restspannstahlfläche $A_{Z,r,erf}$ die erforderliche Restspanngliedanzahl n_{br} in jedem Querschnitt zu bestimmen. Hierbei muss auf die nächste ganze Anzahl von effektiven Spanngliedern aufgerundet werden.

Die Annahme von korrelierten Spannstahlbrüchen (Rundung auf effektive Spannglieder) ist auch im Hinblick auf die Erkennbarkeit einer Rissbildung infolge von Spannstahlbrüchen günstig, da für den Übergang von einer Vorankündigung durch Rissbildung zu einer Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit stets mehrere Drahtbrüche erforderlich sind. Wird hingegen ein drahtweiser Ausfall angenommen, so besteht die Möglichkeit dass ausgehend von einem Zustand, in dem eine Rissbildung infolge von Spannstahlbrüchen rechnerisch nachgewiesen wird, die erforderliche Restsicherheit bereits nach einem weiteren Drahtbruch unterschritten wird. Um die Versagensankündigung in diesem Fall rechtzeitig zu erkennen, müssten entsprechend höhere Anforderungen an die Sensitivität und das Intervall der Bauwerksuntersuchungen gestellt werden.

6.2.3 Annahme 2: Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Spanngliedbrüchen ist längs der Hüllrohre gleich verteilt

Spannungsrissskorrosion wird bei spannungsrissskorrosionsempfindlichem Spannstahl in der Regel durch Korrosion des Spannstahls vor dem Verpressen begünstigt. Für die Wasserstoffproduktion können minimale Korrosionsraten, z. B. infolge von Luftfeuchtigkeit bzw. Kondenswasser im Hüllrohr ausreichend sein. Diese Randbedingungen können im gesamten Hüllrohr vorliegen. Ein Bruch des Spannstahls tritt daher nicht zwangsläufig im Bereich der höchsten Beanspruchungen auf, sondern ist an jeder Stelle möglich. Dies wurde z. B. in [Nürnberger u. a. 1994] in zwei Fällen sowie in [Mietz u. a. 1998], [Mietz u. Isecke 2002], [Mietz u. Fischer 2005] beobachtet.

Auf Grundlage der Annahme 1 kann daher angenommen werden, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit von Spanngliedbrüchen längs jedes effektiven Spanngliedes gleich verteilt ist. Die Spanngliedbrüche in den einzelnen effektiven Spanngliedern sind somit örtlich nicht korreliert.

Zusätzlich zu den vorher genannten Einflüssen können verzögerte Spannstahlbrüche auch durch eine Korrosion des Spannstahls infolge der Einwirkung von Absetzwässern des Betons während der Bauzeit begünstigt werden. Auch bei diesen Schadensfällen traten Anrisse und Brüche nicht lokal, sondern über das Bauwerk verteilt auf [Nürnberger 1995], [Zilch u. Müller 1996]. Bei einigen Schadensfällen wurde im Zusammenhang mit der Einwirkung von Absetzwässern eine Häufung von Brüchen im Bereich der Tiefpunkte der Spannglieder festgestellt. Da die Tiefpunkte der Spannglieder in der Regel in Bereichen liegen, in denen sich das Ankündigungsverhalten bei der mechanisch-querschnittweisen Untersuchung gemäß Kapitel 5 nachweisen lässt, liegt die Annahme einer Gleichverteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit auch in diesen Fällen auf der sicheren Seite.

Beispielhaft sind in Bild 6.4 Spannstähle aus einem Schadensfall dargestellt. Die Stähle wiesen über weite Bereiche tiefe Anrisse im Abstand von wenigen Zentimetern auf, so dass sie mit der Hand in die dargestellten Abschnitte zerbrochen werden konnten. Im linken Foto sind auf den Bruchflächen deutlich die dunkel gefärbten Anrissbereiche zu erkennen. Die dargestellten Drähte wurden sowohl aus der Tieflage der Spannglieder im Feldbereich als auch aus den auflagnahen Bereichen entnommen, wo die Spannglieder zum Schwerpunkt des Trägers hoch geführt waren.

Aufgrund der zweiten Annahme ist das stochastische Verfahren nur dann anwendbar, wenn Korrosionseinflüsse in den einzelnen Hüllrohren örtlich nicht korreliert sind. Örtlich begrenzte Korrosionsangriffe z. B. infolge von systematischen Verpressfehlern, lokalen mechanischen Überbeanspruchungen, örtlichen Beaufschlagungen mit korrosiven Substanzen oder mangelhaften Abdichtungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit und können mit dem Modell ohne weitere Überlegungen nicht zutreffend abgebildet werden.

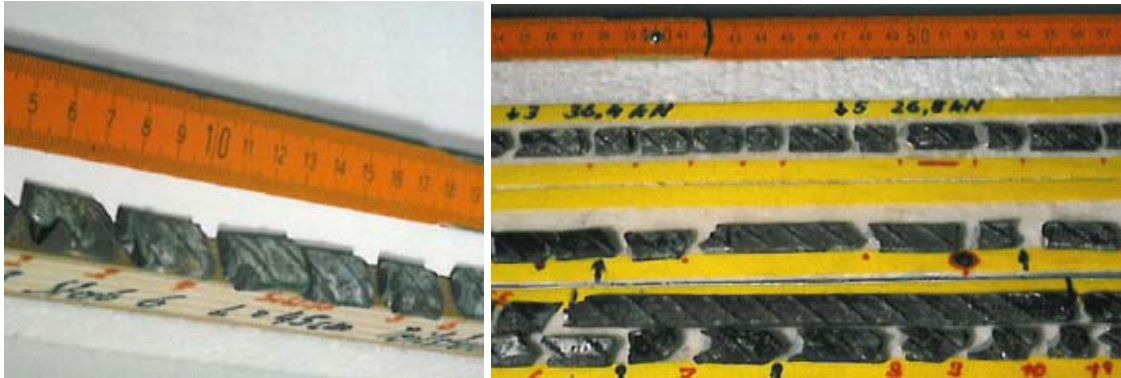


Bild 6.4: Drähte aus einem Schadensfall nach der Untersuchung auf Anrisse, aus [Zilch u. Müller 1996]

6.2.4 Annahme 3: Die Untersuchung des Ankündigungsverhaltens erfolgt in diskreten Nachweisquerschnitten

Im stochastischen Modell werden Spanngliedbrüche in den gewählten diskreten Untersuchungsquerschnitten simuliert. Im Rahmen der gewählten Modellbildung muss der Abstand zwischen den einzelnen Nachweisquerschnitten ein Mindestabstand mindestens eine Verankerungslänge der Spannglieder sein, damit ein Spanngliedbruch in einem Querschnitt keine Auswirkungen im benachbarten Querschnitt hat.

Die Verankerungslänge von gerippten Drähten im Fall von Spanngliedbrüchen wurde unter anderem in [Fastenau u. Delille 1972] untersucht. Hier wurde festgestellt, dass im ungünstigsten Fall eine Verankerungslänge von 75 cm erforderlich ist, um die Spannkraft eines Drahtes mit einer Querschnittsfläche von 120 mm² zu verankern. In neueren Untersuchungen an Bauteilen mit gerippten, ovalen Spannstähen vom Typ Sigma Oval 40 (Querschnittsfläche 40 mm²) wurde festgestellt, dass die im Bruchquerschnitt freiwerdende Kraft eines Drahtes auf einer Länge von weniger als 50 cm verankert wird [Vill 2005]. Hierbei wurden allerdings nicht vorgespannte Drähte untersucht. Dies könnte einerseits eine Vergrößerung der Verankerungslänge bedeuten, da sich bei nicht vorgespannten Drähten kein Hoyer-Effekt ausbilden kann. Andererseits ist zu vermuten, dass das schlagartige Freiwerden der Spanngliedkraft beim Bruch die erforderliche Verankerungslänge vergrößert. Da sich beide Effekte zumindest teilweise gegenseitig aufheben erscheint das Ergebnis daher zur Abschätzung der Verankerungslängen von ovalen, gerippten Spanngliedern näherungsweise geeignet zu sein. Auf Grundlage der nachgewiesenen Verankerungslängen der ovalen, gerippten Spannstähe von 50 cm wird in [Vill 2005] unter der Annahme einer im Verankerungsbereich konstanten Verbundspannung gezeigt, dass bei zufälliger Verteilung der Spanngliedbrüche sehr viele Drahtbrüche erforderlich sind, um einen lokalen Abfall der Restsicherheit unter 1,0 zu bewirken.

Zusätzlich zur Untersuchung der Beeinflussung des Tragverhaltens durch Spannstahlbrüche wurde in [Vill 2005] die aufnehmbare Verbundspannung in Pull-Out Versuchen nach RILEM

untersucht. Hierbei wurden aufnehmbare bezogene Verbundspannungen von $\tau_b/f_c = 0,16$ bis $0,30$ festgestellt. Der kleinere Wert deckt sich mit den Angaben in [Troost u. a. 1980], wo die maximal aufnehmbaren bezogenen Verbundspannungen von Bündelspanngliedern aus profilierten Drähten mit ca. $\tau_b/f_c = 0,15$ angegeben werden. Auch in diesen Werten ist der Hoyer-Effekt nicht berücksichtigt.

Im stochastischen Modell ist die Berücksichtigung der Verankerungslänge des Spannstahls durch die gewählte Anzahl der Untersuchungsquerschnitte im untersuchten Feld möglich. Diese wird als Variable q eingeführt. Zur Abschätzung des minimal zulässigen Abstandes zwischen den Nachweisquerschnitten bzw. der erforderlichen Verankerungslänge eines Spannglieds wird die maximal aufnehmbare bezogene Verbundspannung im Folgenden mit $\tau_b/f_c = 0,15$ angesetzt. Die Festigkeit des Verpressmörtels wird mit $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$ abgeschätzt. Hiermit ergibt sich die aufnehmbare Verbundspannung zu $\tau_b = 4,5 \text{ N/mm}^2$. In [DIN 4227:1979-12] ist für den Nachweis des Verbundes gerippter Spannglieder die zulässige Verbundspannung mit $\tau_b = 3,0 \text{ N/mm}^2$ angegeben. Der rechnerische Umfang der Verbundfläche eines Spannstahl-Bündels wird gemäß [DIN 4227:1979-12] bzw. [DIN-FB 102:2009-03] angesetzt. Zur Ermittlung der Spanngliedkraft beim Nachweis der Resttragsicherheit wird die $0,2\%$ -Dehngrenze des Spannstahls angesetzt. In Bild 6.5 sind die auf Grundlage von zulässigen Verbundspannungen von $\tau_b = 4,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelten erforderlichen Verankerungslängen für Bündelspannglieder aus ovalen Drähten mit einer Fläche von 40 mm^2 dargestellt. Zur leichteren Abschätzung der Verankerungslängen von Bündel-Spanngliedern aus Drähten mit Querschnitten von 40 mm^2 und damit der minimal zulässigen Abstände der Nachweisquerschnitte ist in Bild 6.5 ein Wurzel-Ansatz für Spanngliedbündel dargestellt. Als minimale Verankerungslänge eines Einzeldrahtes sind 50 cm anzusetzen. Der Abstand zwischen den Nachweisquerschnitten sollte darüber hinaus mindestens eine Bauteilhöhe betragen.

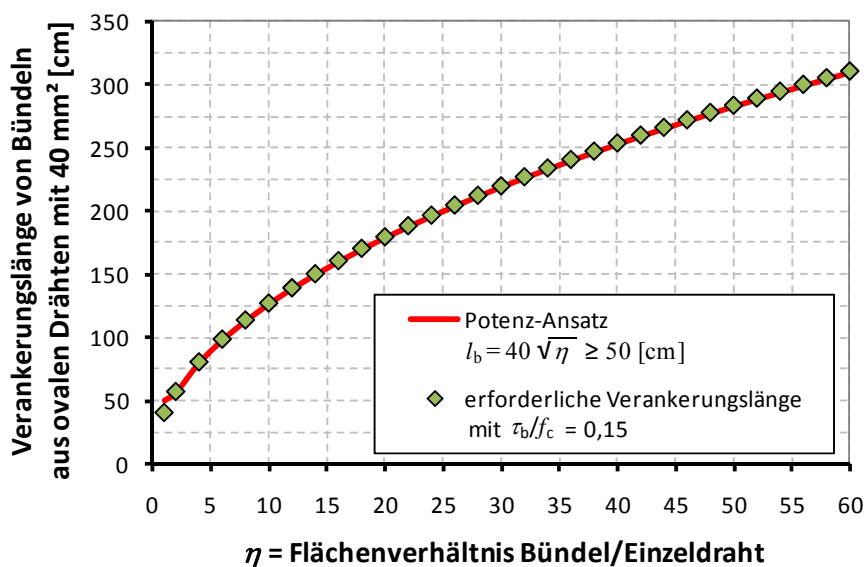


Bild 6.5: Erforderliche Verankerungslänge von Bündelspanngliedern aus ovalen Drähten mit Einzelquerschnitten von 40 mm^2 in Abhängigkeit der Anzahl der Einzeldrähte

Bei großen Bauwerken ergeben sich bei der Ausnutzung der minimal zulässigen Abstände zahlreiche Untersuchungsquerschnitte. Hierdurch jedoch würde der Rechenaufwand im stochastischen Verfahren deutlich ansteigen. In der Regel wird daher entsprechend [BMV 2009] von elf Nachweisquerschnitten je Feld ausgegangen. Die im Modell angenommene Anzahl von Spanngliedbrüchen ist daher eine rein rechnerische Größe. In Kapitel 6.3.6 wird gezeigt, dass mit abnehmender Anzahl von Nachweisquerschnitten zunehmend auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse erzielt werden.

6.3 Beschreibung des stochastischen Verfahrens

6.3.1 Abbildung von Bauwerken im stochastischen Modell

In Bild 6.6 ist das dem stochastischen Verfahren zugrundeliegende Modell des Untersuchungsbereiches eines Hauptträgers einer Brücke dargestellt. Der Untersuchungsbereich ist in der Regel ein Feld oder ein Bauabschnitt. Im Folgenden wird die Anzahl der Untersuchungsquerschnitte im Untersuchungsbereich allgemein mit q und die Anzahl der effektiven Spannglieder mit s' bezeichnet. Die Anzahl der effektiven Spannglieder wird gemäß Kapitel 6.2.2 ermittelt. Betrachtet man eine konstante Anzahl von s' effektiven Spanngliedern in q Nachweisquerschnitten, so ergibt sich im gezeigten Modell unter den getroffenen Annahmen eine maximale Anzahl von $i_{\max} = q \cdot s'$ möglichen Spanngliedbrüchen.

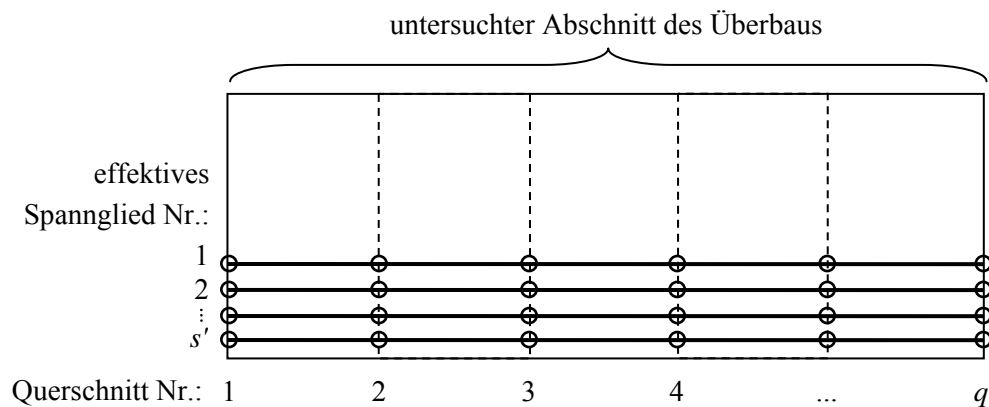


Bild 6.6: Modell eines Untersuchungsbereiches mit s' effektiven Spanngliedern und q Nachweisquerschnitten

Unter der Annahme, dass im betrachteten Abschnitt des Überbaus insgesamt i beliebig verteilte Spanngliedbrüche vorhanden sind (mit $0 \leq i \leq i_{\max}$), kann die Anzahl der Möglichkeiten, i Spanngliedbrüche auf i_{\max} Positionen zu verteilen, mit den Methoden der Kombinatorik ermittelt werden. Sie entspricht der Anzahl verschiedener Teilmengen mit i Elementen in beliebiger

Reihenfolge, die aus i_{\max} Elementen gebildet werden können. Die Teilmengen werden als Kombinationen i -ter Ordnung ohne Wiederholungen bezeichnet. Die Gesamtanzahl dieser Kombinationen ermittelt sich nach Gleichung (6.2). Zur Verteilungsfunktion der Auftretenswahrscheinlichkeit von bestimmten Bruchanzahlen in einem Querschnitt siehe Anhang B.

$$N(i) = \binom{i_{\max}}{i} = \frac{i_{\max}!}{i! \cdot (i_{\max} - i)!} \quad (6.2)$$

mit: $N(i)$ = Gesamtanzahl der möglichen Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen
 i_{\max} = maximale Anzahl von Spanngliedbrüchen
 i = Anzahl von Spanngliedbrüchen

Um die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung zu bestimmen, sind Unterscheidungskriterien für die einzelnen Kombinationen erforderlich. Für jede mögliche Kombination ist festzustellen, ob alle Querschnitte mit Ankündigungsverhalten ungerissen sind oder ob mindestens einer dieser Querschnitte gerissen ist. Ungerissen sind Querschnitte, bei denen die in der jeweiligen Kombination vorhandene Restspanngliedanzahl größer ist als die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung n_{cr} . Weiterhin ist für jede Kombination zu prüfen, ob in allen Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten eine ausreichende Restsicherheit vorliegt oder ob in mindestens einem dieser Querschnitte keine ausreichende Restsicherheit nachgewiesen werden kann. Zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit in einem Querschnitt muss die in der jeweiligen Kombination vorhandene Restspanngliedanzahl größer oder gleich der erforderlichen Restspanngliedanzahl n_{br} sein. Anhand dieser Kriterien lassen sich alle möglichen Kombinationen den vier verschiedenen Fällen gemäß Tabelle 6.1 zuordnen.

Tabelle 6.1: Kriterien zur Zuordnung der Kombinationen zu vier verschiedenen Fällen

		Querschnitte mit Ankündigungsverhalten:	
		mindestens einer gerissen	alle ungerissen
Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten:	ausreichende Restsicherheit in allen Querschnitten nachweisbar	Fall 1: $N_1(i)$ Kombinationen	Fall 2: $N_2(i)$ Kombinationen
	Restsicherheit in mindestens einem Querschnitt nicht nachweisbar	Fall 3: $N_3(i)$ Kombinationen	Fall 4: $N_4(i)$ Kombinationen
Gesamte Anzahl möglicher Kombinationen:		$N(i) = N_1(i) + N_2(i) + N_3(i) + N_4(i)$	

Der Fall 1 beinhaltet alle Kombinationen, bei denen eine Versagensankündigung durch Rissbildung, aber keine Unterschreitung der erforderlichen Restspanngliedanzahl (rechnerisches Versagen) eintritt.

Fall 2 stellt in der Regel die Ausgangssituation dar, in der keine Risse (oder alternative Versagensvorankündigungs-Merkmale) vorhanden sind und die rechnerische Restsicherheit überall gegeben ist. Für eine Brücke ohne Risse und mit ungeschädigten Spanngliedern beträgt die Auftretenswahrscheinlichkeit dieses Falles $P_2 = 1,0$.

Dem Fall 3 werden Kombinationen zugeordnet, in denen in mindestens einem Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten keine ausreichende Restsicherheit nachgewiesen werden kann und eine Ankündigung durch Rissbildung in mindestens einem Querschnitt mit Ankündigungsverhalten vorliegt. Dieser Fall beinhaltet somit alle Kombinationen mit rechnerischem Versagen nach vorheriger Vorankündigung. Er ist daher nur von theoretischem Interesse.

Der Fall 4 schließlich umfasst alle Kombinationen, in denen in mindestens einem Querschnitt keine ausreichende Restsicherheit nachgewiesen werden kann, eine Ankündigung durch eine Rissbildung in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten jedoch nicht vorliegt. In diesem Fall tritt ein rechnerisches Versagen ohne Vorankündigung ein.

In stochastischer Hinsicht kann jede mögliche Kombination von i Spanngliedbrüchen als ein Elementarereignis angesehen werden. Die Summe $N(i)$ aller Kombinationen stellt dann für die untersuchte Anzahl von Spanngliedbrüchen i einen Ereignisraum dar. Unter den genannten Annahmen ist bei gegebener Anzahl i von Spanngliedbrüchen das Auftreten jeder möglichen Kombination gleich wahrscheinlich. Durch die Unterscheidung der vier Fälle gemäß Tabelle 6.1 entstehen vier disjunkte Teilmengen des Ereignisraums. Die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines Falles kann daher im Sinne des klassischen Wahrscheinlichkeitsbegriffes als Anteil dieses Falles am gesamten Ereignisraum nach Gleichung (6.3) bestimmt werden.

$$P_1(i) = \frac{N_1(i)}{N(i)} \quad P_2(i) = \frac{N_2(i)}{N(i)} \quad P_3(i) = \frac{N_3(i)}{N(i)} \quad P_4(i) = \frac{N_4(i)}{N(i)} \quad (6.3)$$

mit: $P_k(i)$ = Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls k
 $N_k(i)$ = Anzahl der Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen im Fall k
 k = Fall-Nummer gemäß Tabelle 6.1 ($1 \leq k \leq 4$)
 $N(i)$ = Gesamtanzahl der möglichen Kombinationen mit i Spanngliedbrüchen

6.3.2 Beispiel mit Variation der erforderlichen sowie der Restspanngliedanzahlen

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse des stochastischen Verfahrens wird im Folgenden ein imaginäres Beispiel betrachtet. Das hier vorgestellte Beispiel repräsentiert keinen realistischen Fall, sondern dient nur zur Überprüfung der Einflüsse maßgebender Parameter. Bild 6.7 zeigt

das imaginäre Ergebnis der rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens eines Brückenüberbaus mit $s' = 10$ effektiven Spanngliedern. Vereinfachend werden in diesem Fall nur $q = 5$ Untersuchungsquerschnitte angenommen. Es sind somit maximal $i_{\max} = 50$ Spanngliedbrüche möglich. Bei abnehmender Spanngliedanzahl wird im Querschnitt 3 die erforderliche Restspanngliedanzahl $n_{br,3}$ unterschritten, bevor die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung $n_{cr,3}$ erreicht wird. Hier liegt daher kein Ankündigungsverhalten vor.

Die Anwendung des stochastischen Verfahrens auf dieses Ergebnis liefert die in Bild 6.8 dargestellten Kurven. Es zeigt sich, dass der Fall 2 (ungerissen und tragfähig) bei geringen Anzahlen von Spanngliedbrüchen erwartungsgemäß eine approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit von $P_2 = 1,0$ hat. Ab einer Gesamtanzahl von fünf Spanngliedbrüchen ist in den Schnitten 1, 2, 4 und 5 eine Rissbildung und damit ein Ankündigungsverhalten möglich. Die Kurve des Falls 1 beginnt daher bei fünf Spanngliedbrüchen. Für den Fall 4 beginnt die Kurve bei sechs Spanngliedbrüchen, da erst ab sechs Brüchen im Schnitt 3 keine Resttragsicherheit mehr nachgewiesen werden kann. Die Summe der Auftretenswahrscheinlichkeiten aller vier Fälle ergibt für jede Anzahl von Spanngliedbrüchen 1,0. Die maximale approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung (Fall 4) ergibt sich bei 18 Spanngliedbrüchen und beträgt in diesem Fall $P_4 = 0,048$.

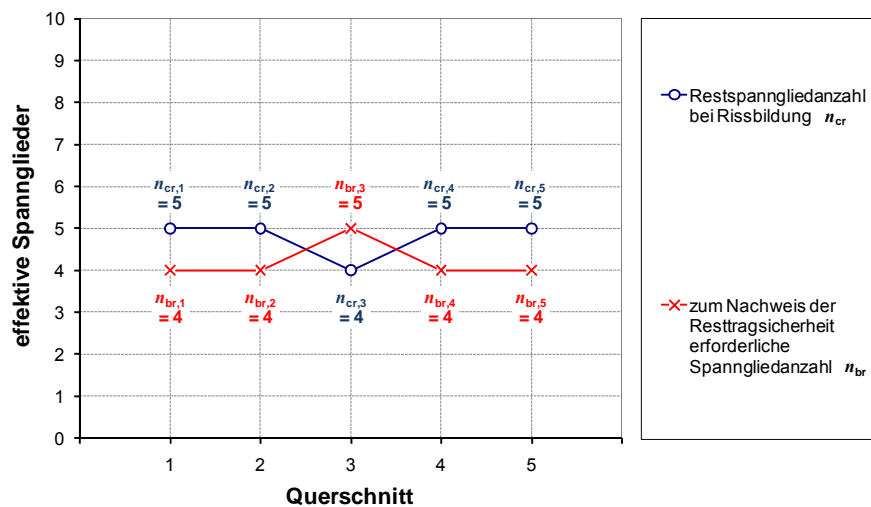


Bild 6.7: Imaginäres Ergebnis einer rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens an einem Feld mit $s' = 10$ effektiven Spanngliedern und $q = 5$ Nachweisschnitten

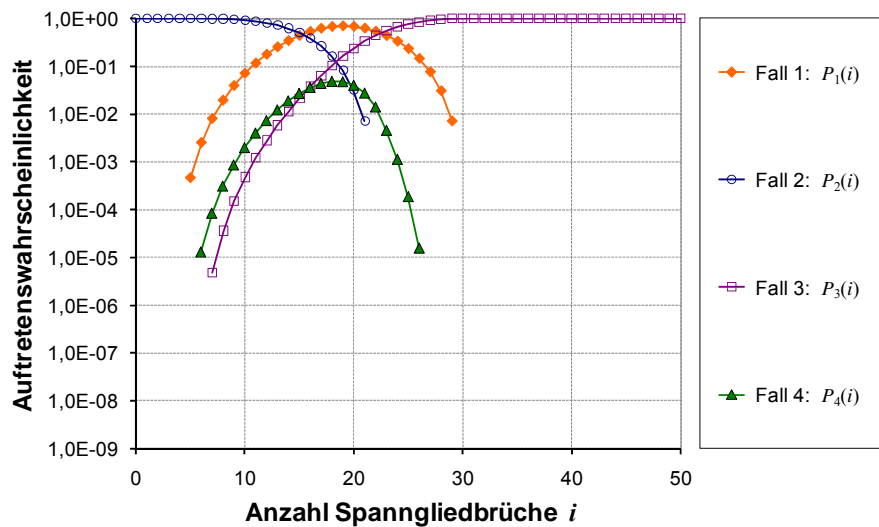


Bild 6.8: Approximierte Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fälle 1 (ausr. Restsicherheit und Ankündigung), 2 (ausr. Restsicherheit und keine Ankündigung), 3 (keine ausr. Restsicherheit und Ankündigung) und 4 (keine ausr. Restsicherheit und keine Ankündigung) für das in Bild 6.7 dargestellte Szenario

Um den Einfluss der Restspannliedanzahlen bei Rissbildung n_{cr} sowie der für den Nachweis der Restsicherheit erforderlichen Restspannliedanzahlen n_{br} zu überprüfen, wurde eine Variation dieser Parameter untersucht. Die Ergebnisse der Parametervariation sind in Bild 6.9 dargestellt. Wenn in den Schnitten mit Ankündigungsverhalten bei der Rissbildung noch $n_{cr} = 2$ Restspannlieder vorhanden und im Bereich ohne Ankündigungsverhalten $n_{br} = 8$ Spannlieder erforderlich sind, beträgt die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung nahezu $P_4 = 1,0$. Dieses Ergebnis erscheint plausibel, da bereits bei drei Spannliedbrüchen im Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten ein rechnerisches Versagen eintritt, während zur Vorankündigung in den übrigen Querschnitten acht Spannliedbrüche erforderlich sind. Umgekehrt stellt sich das Ergebnis dar, wenn in den Schnitten mit Ankündigungsverhalten bei Rissbildung noch $n_{cr} = 8$ Restspannlieder vorhanden sind, im Querschnitt 2 jedoch nur $n_{br} = 2$ Restspannlieder zum Nachweis der Restsicherheit erforderlich sind. In diesem Fall ist es unwahrscheinlich, dass im kritischen Bereich die Restsicherheit nicht mehr gegeben ist, ohne dass vorher ein Riss in den Schnitten mit Ankündigungsverhalten aufgetreten ist. Die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit beträgt für diesen Fall daher lediglich $P_4 = 3,34 \cdot 10^{-7}$.

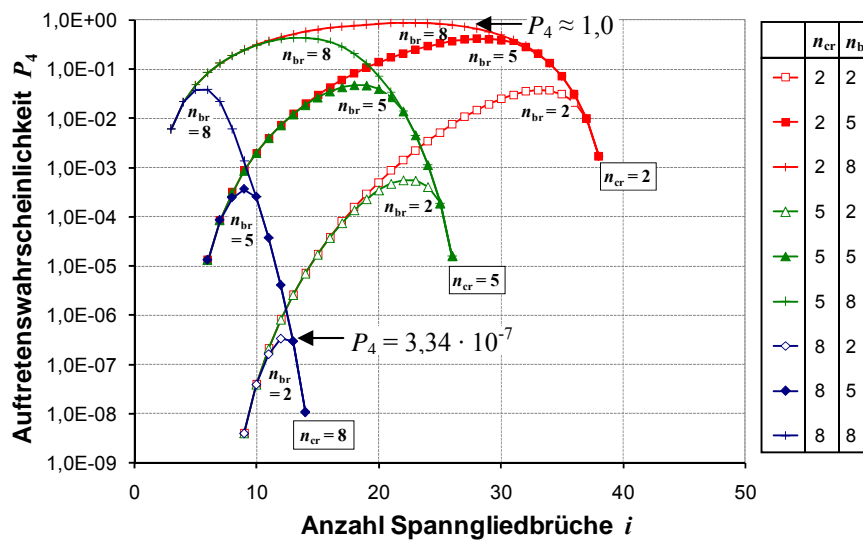


Bild 6.9: Approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls 4 bei verschiedenen Szenarien auf Grundlage von Bild 6.7:

- Rote Kurven: In 4 Schnitten ist $n_{cr} = 2$; im Schnitt 3 ist $n_{br} = 2, 5$ bzw. 8
- Grüne Kurven: In 4 Schnitten ist $n_{cr} = 5$; im Schnitt 3 ist $n_{br} = 2, 5$ bzw. 8
- Blaue Kurven: In 4 Schnitten ist $n_{cr} = 8$; im Schnitt 3 ist $n_{br} = 2, 5$ bzw. 8

6.3.3 Berücksichtigung der stetigen Zunahme der Bruchanzahl

Die Anzahl der möglichen Kombinationen von Spanngliedbrüchen $N(i)$ stellt für die jeweilige Anzahl von i Spanngliedbrüchen einen Ereignisraum dar. Für jede Anzahl von i Spanngliedbrüchen ergeben die approximierten Auftretenswahrscheinlichkeiten der vier Fälle gemäß Tabelle 6.1 daher in Summe 1,0. Die in Bild 6.8 angegebenen approximierten Auftretenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Fälle bei verschiedenen Anzahlen von Spanngliedbrüchen sind somit unabhängig voneinander.

In der Realität jedoch nimmt die Anzahl der Spanngliedbrüche mit der Zeit monoton zu. Bei einer gegebenen Anzahl von Spanngliedbrüchen besteht daher theoretisch die Möglichkeit, dass eine Vorankündigung oder sogar ein rechnerisches Versagen bereits bei einer geringeren Anzahl von Spanngliedbrüchen stattgefunden hat. In diesem Fall wären alle nachfolgenden Bruchanzahlen nicht mehr relevant, da im Falle einer Vorankündigung Entlastungs- bzw. Verstärkungsmaßnahmen eingeleitet werden mussten und im Falle eines rechnerischen Versagens in der Praxis mindestens von einer Ankündigung, ggf. sogar von einem Bauteilversagen auszugehen ist. Gesucht ist daher die Auftretenswahrscheinlichkeit für ein Auftreten des Falls 4 unter der Bedingung, dass vorher (Anzahl der Spanngliedbrüche um eins reduziert) der Fall 2 vorgelegen hat.

Hierfür werden zunächst die bei einer monoton zunehmenden Anzahl von Spanngliedbrüchen möglichen Entwicklungen der Fallzuordnungen gemäß Tabelle 6.1 ausgewertet. Bei geringen






Bruchanzahlen liegt zunächst i. d. R. der Fall 2 vor. Mit einer Zunahme der Anzahl von Spanngliedbrüchen kann sich hieraus der Fall 1 entwickeln (Rissbildung und ausreichende Restsicherheit), wenn in einem Querschnitt mit Ankündigungsverhalten die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung erreicht wird, oder der Fall 4 (keine Rissbildung und Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit), wenn in einem Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten die erforderliche Restspanngliedanzahl unterschritten wird. Falls infolge des zusätzlichen Spanngliedbruches weder eine Rissbildung noch eine Unterschreitung der erforderlichen Restspanngliedanzahl auftritt, liegt wieder der Fall 2 vor. Der Fall 3 kann nicht direkt aus dem Fall 2 erreicht werden, da ein zusätzlicher Bruch nur entweder eine Rissbildung oder eine Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit bewirken kann.

Liegt bei einer bestimmten Anzahl von Brüchen der Fall 1 (Rissbildung und ausreichende Restsicherheit) vor, so kann bei weiterer Zunahme der Bruchanzahl entweder wieder der Fall 1 oder aber der Fall 3 (Rissbildung und keine ausreichende Restsicherheit) erreicht werden. Fall 2 oder Fall 4 (keine Rissbildung und Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit) sind hingegen nicht mehr möglich, da es bereits zu einer Ankündigung gekommen ist. Entsprechend kann ein Untersuchungsbereich, der dem Fall 4 zugeordnet wurde, sich bei zunehmender Anzahl von Spanngliedbrüchen nur entweder wieder zu Fall 4 oder zum Fall 3 entwickeln.

Wenn dem Fall 3 vorliegt, kann hieraus kein anderer Fall mehr entstehen, da sowohl eine Rissbildung als auch eine Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit bereits eingetreten ist.

Die möglichen Entwicklungen der Fallzuordnung bei monoton steigender Anzahl von Spanngliedbrüchen ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Mögliche Entwicklung der Fallzuordnung bei Vergrößerung der Anzahl der Spanngliedbrüche

		Querschnitte mit Ankündigungsverhalten:	
		mindestens einer gerissen	alle ungerissen
Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten:	ausreichende Restsicherheit in allen Querschnitten nachweisbar	 Fall 1	 Fall 2
	Restsicherheit in mindestens einem Querschnitt nicht nachweisbar	 Fall 3	 Fall 4
Legende:  = Auswirkung einer Vergrößerung der Anzahl der Spanngliedbrüche um 1			

In Tabelle 6.2 wird deutlich, dass der Fall 4 bei i Spanngliedbrüchen nur dann auftreten kann, wenn bei $i-1$ Spanngliedbrüchen entweder bereits der Fall 4 oder der Fall 2 vorgelegen hat. Mit

dem Gesetz der totalen Wahrscheinlichkeit lässt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit für den Fall 4 daher gemäß Gleichung (6.4) ausdrücken:

$$P_4(i) = P(F(i) = 4) = P(F(i) = 4 | F(i-1) = 2) \cdot P(F(i-1) = 2) + P(F(i) = 4 | F(i-1) = 4) \cdot P(F(i-1) = 4) \quad (6.4)$$

mit: $P_4(i)$ = Auftretenswahrscheinlichkeit des Falls 4
 $P(F(i) = k)$ = Wahrscheinlichkeit, dass bei i Spanngliedbrüchen der Fall k vorliegt
 $= P_k(i)$
 $P(F(i) = k | F(i-1) = j)$ = Wahrscheinlichkeit, dass bei i Spanngliedbrüchen der Fall k vorliegt, unter der Bedingung, dass bei $(i-1)$ Spanngliedbrüchen der Fall j vorgelegen hat
 k, j = Fall-Nummern gemäß Tabelle 6.1

Die gesuchte Auftretenswahrscheinlichkeit für ein Auftreten des Falls 4 unter der Bedingung, dass vorher der Fall 2 vorgelegen hat, wird in Gleichung (6.4) durch den Term $P(F(i) = 4 | F(i-1) = 2) \cdot P(F(i-1) = 2)$ ausgedrückt. Vereinfachend wird dieser Term im Folgenden mit $P_4^*(i)$ bezeichnet. Die Gleichung (6.4) wird daher wie folgt umgestellt:

$$P_4^*(i) = P(F(i) = 4 | F(i-1) = 2) \cdot P(F(i-1) = 2) = P(F(i) = 4) - P(F(i) = 4 | F(i-1) = 4) \cdot P(F(i-1) = 4) \quad (6.5)$$

In Gleichung (6.5) sind die Ausdrücke $P(F(i-1) = 2)$, $P(F(i) = 4)$ und $P(F(i-1) = 4)$ bekannt. Sie lassen sich für jede betrachtete Anzahl von Spanngliedbrüchen i direkt nach Gleichung (6.3) bestimmen (vgl. Bild 6.8). Unbekannt sind die Terme $P(F(i) = 4 | F(i-1) = 2)$ und $P(F(i) = 4 | F(i-1) = 4)$. Zur Vereinfachung wird $P(F(i) = 4 | F(i-1) = 4)$ mit dem Satz von Bayes wie folgt ausgedrückt:

$$P(F(i) = 4 | F(i-1) = 4) = \frac{P(F(i-1) = 4 | F(i) = 4) \cdot P(F(i) = 4)}{P(F(i-1) = 4)} \quad (6.6)$$

Eingesetzt in die Gleichung (6.5) ergibt sich folgender Ausdruck:

$$P_4^*(i) = [1 - P(F(i-1) = 4 | F(i) = 4)] \cdot P(F(i) = 4) \quad (6.7)$$

Im Ausdruck in den eckigen Klammern steht die Wahrscheinlichkeit, dass bei $(i-1)$ Spanngliedbrüchen der Fall 4 vorlag, unter der Bedingung, dass auch bei i Spanngliedbrüchen der Fall 4 vorliegt. Da sich der Fall 4 nur aus einem vorangegangenen Fall 4 oder einem vorangegangenen Fall 2 entwickelt haben kann, lässt sich der Ausdruck wie folgt umschreiben:

$$P_4^*(i) = P(F(i-1) = 2 | F(i) = 4) \cdot P(F(i) = 4) \quad (6.8)$$

Bei der Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeit $P_4^*(i)$ ist zu beachten, dass die Reihenfolge der Spanngliedbrüche von Bedeutung ist. In Kapitel 6.3.1 wurden die Auftretenswahrschein-

lichkeiten als Verhältnis der Anzahlen von Kombinationen beschrieben. Kombinationen sind definiert als Teilmengen von z. B. i Elementen aus z. B. i_{\max} Elementen *in beliebiger Reihenfolge*. Im Unterschied zu Kombinationen sind Variationen Teilmengen (mit z. B. i Elementen) *unter Berücksichtigung der Reihenfolge* aus einer Menge von z. B. i_{\max} Elementen. Die Anzahl der möglichen Variationen ermittelt sich nach Gleichung (6.9).

$$N(i) = \frac{i_{\max}!}{(i_{\max} - i)!} \quad (6.9)$$

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Reihenfolge der Spanngliedbrüche wird ein theoretisches Beispiel mit zwei Nachweisquerschnitten und $s' = 3$ effektiven Spanngliedern betrachtet (vgl. Bild 6.10). Im Querschnitt 1 ist kein Ankündigungsverhalten nachweisbar. Hier kann nach dem Ausfall von drei Spanngliedern keine ausreichende Restsicherheit mehr nachgewiesen werden. Im Querschnitt 2 tritt bei zwei Spanngliedbrüchen eine Rissbildung auf. Hierbei ist eine ausreichende Restsicherheit nachweisbar. Alternativ lässt sich dieses Beispiel durch ein mit drei roten und drei grünen Kugeln gefülltes Gefäß abbilden. Die roten Kugeln bilden die drei Spannglieder im Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten ab. Die drei grünen Kugeln repräsentieren die drei Spannglieder im Querschnitt mit Ankündigungsverhalten. Spanngliedbrüche werden simuliert, indem in zufälliger Reihenfolge Kugeln aus dem Gefäß entnommen werden. Gemäß Bild 6.10 ist keine ausreichende Restsicherheit mehr nachweisbar, wenn sich keine rote Kugel mehr im Gefäß befindet. Ist nur noch eine grüne Kugel vorhanden, erfolgt eine Ankündigung durch Rissbildung.

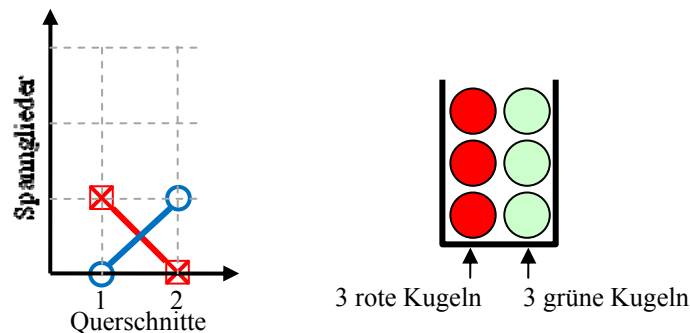


Bild 6.10: Beispiel mit $q = 2$ Querschnitten und $s' = 3$ Spanngliedern zur Verdeutlichung des Einflusses der stetig zunehmenden Anzahl von Spanngliedbrüchen

In Bild 6.11 sind alle möglichen Variationen aufgetragen, welche sich im Beispiel gemäß Bild 6.10 bei der Entnahme von bis zu vier Kugeln ergeben. Hierin wird deutlich, dass bei Entnahme einer einzigen Kugel weder eine Rissbildung, noch eine Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit auftritt. Bei einem Spanngliedbruch liegt somit immer Fall 2 vor.

Bei Entnahme von zwei Kugeln tritt in 6 von 30 möglichen Variationen der Fall 1 auf, also eine Versagensankündigung durch Rissbildung. In allen übrigen Variationen liegt Fall 2 vor. Die Auftretenswahrscheinlichkeit für den Fall 2 bei zwei Spanngliedbrüchen beträgt somit $P_2(2) = 24/30 = 4/5$.

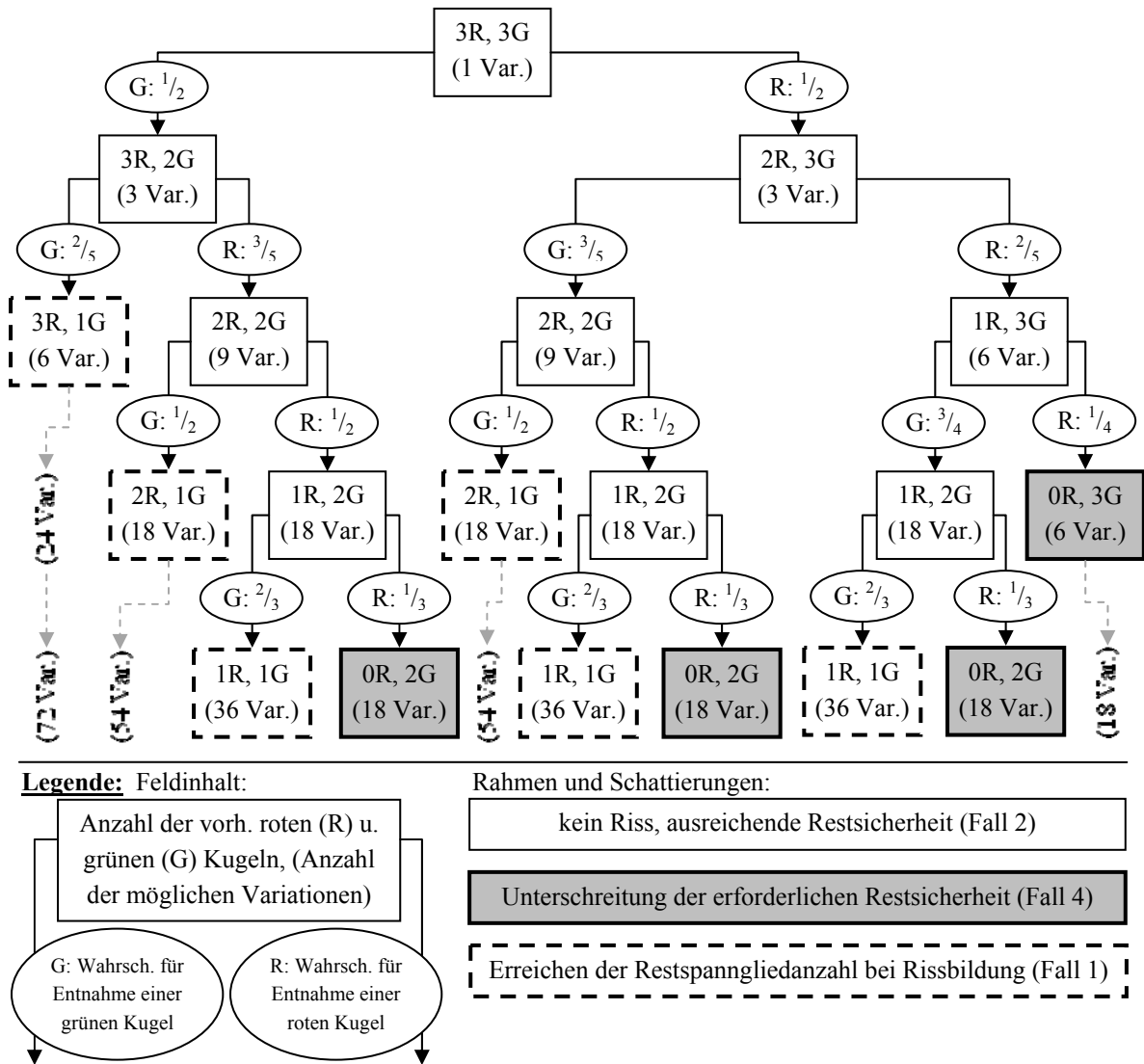


Bild 6.11: Darstellung der möglichen Kombinationen von bis zu vier Spanngliedbrüchen für das in Bild 6.10 dargestellte Beispiel

Wird die Anzahl der Spanngliedbrüche auf drei vergrößert, so wird nach Gleichung (6.3) $P_4(3) = \frac{6}{120} = \frac{1}{20}$ und $P_2(3) = \frac{9}{20}$ ermittelt. Für die Ermittlung von $P(F(3) = 4 | F(2) = 2)$ sind die sechs Variationen, welche dem Fall 4 zugeordnet werden, auf die Variationen zu beziehen, bei welchen mit zwei Spanngliedbrüchen der Fall 2 vorlag, also 96. Damit ergibt sich $P(F(3) = 4 | F(2) = 2) = \frac{6}{96} = \frac{1}{16}$. P_4^* ermittelt sich nach Gleichung (6.5) zu $P_4^*(3) = \frac{1}{16} \cdot \frac{4}{5} = \frac{1}{20}$. Da allen möglichen Variationen, welche dem Fall 4 zugeordnet werden, immer der Fall 2 vorausging, gilt $P_4^*(3) = P_4(3)$.

Bei vier Spanngliedbrüchen tritt ohne Berücksichtigung der Reihenfolge in $4 \cdot 18 = 72$ möglichen Variationen der Fall 4 auf. Unter Berücksichtigung aller 360 Möglichkeiten, vier Spanngliedbrüche anzuordnen, ergibt sich nach Gleichung (6.3) $P_4(3) = \frac{72}{360} = \frac{1}{5}$. Unter der Bedingung, dass bei drei Spanngliedbrüchen der Fall 2 vorlag, ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit für Fall 4 bei vier Spanngliedbrüchen zu $P(F(4) = 4 | F(3) = 2) =$

$(3 \cdot 18) / (3 \cdot (18 + 36)) = 54/162 = 1/3$. Nach Gleichung (6.5) beträgt die gesuchte Wahrscheinlichkeit $P_4^*(4) = 1/3 \cdot 9/20 = 3/20$.

Für eine Anzahl von bis zu vier Spanngliedbrüchen sind die ermittelten Wahrscheinlichkeiten für das in Bild 6.10 dargestellte Beispiel in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass unter Berücksichtigung der stetigen Zunahme der Spanngliedbrüche und der Bedingung, dass bei geringeren Anzahlen von Spanngliedbrüchen der Fall 2 vorgelegen haben muss, eine geringere Auftretenswahrscheinlichkeit $P_4^*(4)$ ermittelt wird als bei unabhängiger Berechnung.

Tabelle 6.3: Ermittelte Wahrscheinlichkeiten für das in Bild 6.10 dargestellte Beispiel

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
i	$P(F(i)=4)$ $= P_4(i)$	$P(F(i)=2)$ $= P_2(i)$	$P(F(i)=4 F(i-1)=2)$	$P_4^*(i)$
0	0	1,0	0	0
1	0	1,0	0	0
2	0	$24/30 = 4/5$	0	0
3	$6/120 = 1/20$	$54/120 = 9/20$	$6/96 = 1/16$	$1/16 \cdot 4/5 = 1/20$
4	$72/360 = 1/5$	0	$54/162 = 1/3$	$1/3 \cdot 9/20 = 3/20$

Für die praktische Anwendung des Verfahrens ist festzustellen, dass der zeitliche Ablauf der Korrosion gemäß Kapitel 2.2.2 in der Regel nicht bekannt ist. Auf das hier vorgestellte Beispiel übertragen bedeutet dies, dass die Geschwindigkeit des Fortschreitens im Ereignisbaum gemäß Bild 6.11 nicht bekannt ist. Außerdem ist die aktuelle Anzahl von Spanngliedbrüchen im Bauwerk in der Regel nicht bekannt, so dass die Einordnung des Bauwerkes in eine Zeile des Ereignisbaumes nicht möglich ist. Auf der sicheren Seite liegend wird daher die Wahrscheinlichkeit ermittelt, bei zufälligem Fortschreiten im Ereignisbaum (ausgehend vom Zustand ohne Spanngliedbrüche) zu einem Fall 4 zu kommen.

Bei der Darstellung des Beispiels im Ereignisbaum ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen einer Zelle durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der zugehörigen Äste. Die Wahrscheinlichkeit, irgendeinen Fall 4 zu erreichen, ergibt sich somit aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zellen, welche dem Fall 4 zugeordnet sind:

$$\sum P_4 = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} = 0,2 \quad (6.10)$$

Es lässt sich zeigen, dass das gleiche Ergebnis durch Addition der Wahrscheinlichkeiten $P_4^*(0)$ bis $P_4^*(4)$ erreicht wird (Gl. 6.11). Die Summe der Wahrscheinlichkeiten $P_4^*(i)$ über alle i wird im Folgenden mit $P_{4,con}$ bezeichnet.

$$P_{4,con} = \sum_{j=0}^{i_{max}} P_4^*(j) = \frac{1}{20} + \frac{3}{20} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (6.11)$$

In Bild 6.12 sind die Wahrscheinlichkeiten $P(F(i) = 4 | F(i-1) = 2)$, $P(F(i-1) = 2 | F(i) = 4)$ sowie $P_4^*(i)$ für das Beispiel aus Bild 6.7 graphisch dargestellt. Zum Vergleich mit Bild 6.8 sind zusätzlich $P(F(i) = 2)$ und $P(F(i) = 4)$ dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass sich unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Spanngliedbrüche kleinere maximale rechnerische Auftretenswahrscheinlichkeiten eines Versagens ohne Vorankündigung ergeben. In den nachfolgenden Untersuchungen wird für $P_{4,\text{con}}$ stets die über alle Werte von i aufsummierte Auftretenswahrscheinlichkeit $P_4^*(i)$ angesetzt.

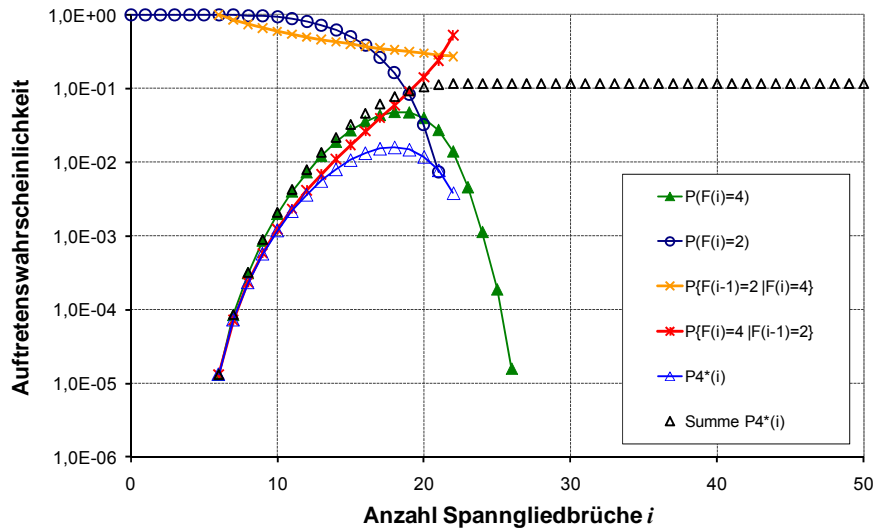


Bild 6.12: Bedingte Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung für das in Bild 6.7 dargestellte Szenario

6.3.4 Einfluss der statisch unbestimmten Wirkung der Vorspannung

Bei der querschnittweisen rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens wird der Spannstahlausfall nur im statisch bestimmten Anteil des Momentes infolge Vorspannung berücksichtigt. Der statisch unbestimmte Anteil $M_{vx,\infty}$ des Momentes infolge Vorspannung wird unverändert angesetzt. Hinsichtlich des stochastischen Verfahrens ist diese Annahme streng genommen nicht korrekt, da die Vorspannung beim Auftreten von zahlreichen, über ein Feld verteilten Spanngliedbrüchen in weiten Bereichen reduziert wird, was auch eine Reduktion des statisch unbestimmten Anteils des Momentes infolge Vorspannung zu Folge hat.

Zur Überprüfung des Einflusses eines reduzierten statisch unbestimmten Anteils des Momentes infolge Vorspannung werden in den Gleichungen (6.12) und (6.13) zunächst die Summen der einwirkenden Momente bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche (Schritt 1 des querschnittweisen Nachweises, vgl. Gleichung 5.2) sowie bei der Ermittlung der Restsicherheit (Schritt 2 des querschnittweisen Nachweises, vgl. Gleichung 5.4) ermittelt.

$$E_{\text{Schritt 1}} = M_g + 0,5 \cdot M_p + M_{v_{x,\infty}} + 0,5 \cdot M_{\Delta T} \quad (6.12)$$

$$E_{\text{Schritt 2}} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_p \cdot M_p + M_{v_{x,\infty}} + M_{\Delta T} = 1,1 \cdot M_g + 1,1 \cdot M_p + M_{v_{x,\infty}} + M_{\Delta T} \quad (6.13)$$

Um die Summen der Einwirkungen besser vergleichbar zu machen, wird das Biegemoment infolge Verkehr M_p mit $(0,5 \cdot M_g)$ abgeschätzt. Hiermit erhält man aus den Gleichungen (6.12) und (6.13) die Gleichungen (6.14) bis (6.17).

$$E_{\text{Schritt 1}} = M_g + 0,5 \cdot 0,5 \cdot M_g + M_{v_{x,\infty}} + 0,5 \cdot M_{\Delta T} = 1,25 \cdot M_g + M_{v_{x,\infty}} + 0,5 \cdot M_{\Delta T} \quad (6.14)$$

$$\Rightarrow \frac{M_{v_{x,\infty}}}{E_{\text{Schritt 1}}} = \frac{M_{v_{x,\infty}}}{1,25 \cdot M_g + M_{v_{x,\infty}} + 0,5 \cdot M_{\Delta T}} \quad (6.15)$$

$$E_{\text{Schritt 2}} = 1,1 \cdot M_g + 1,1 \cdot 0,5 \cdot M_g + M_{v_{x,\infty}} + M_{\Delta T} = 1,65 \cdot M_g + M_{v_{x,\infty}} + M_{\Delta T} \quad (6.16)$$

$$\Rightarrow \frac{M_{v_{x,\infty}}}{E_{\text{Schritt 2}}} = \frac{M_{v_{x,\infty}}}{1,65 \cdot M_g + M_{v_{x,\infty}} + M_{\Delta T}} \quad (6.17)$$

Bei der Gegenüberstellung der Gleichungen (6.15) und (6.17) wird deutlich, dass der Anteil des statisch unbestimmten Anteils des Momentes aus Vorspannung $M_{v_{x,\infty}}$ an den Einwirkungen $E_{\text{Schritt 1}}$ größer ist als an den Einwirkungen $E_{\text{Schritt 2}}$. Eine Reduzierung des Momentes $M_{v_{x,\infty}}$ wirkt sich daher im Schritt 1 stärker aus als im Schritt 2 des Nachweises.

Bei Betrachtung des Feldbereiches gehen M_g und $M_{v_{x,\infty}}$ mit gleichem Vorzeichen in den Nachweis ein [Zilch u. Zehetmaier 2006]. Bei der Berücksichtigung eines durch Spannstahlbrüche reduzierten $M_{v_{x,\infty}}$ nimmt daher das einwirkende Moment ab. Im Schritt 1 des Nachweises muss für eine Rissbildung somit mehr Spannstahl ausfallen. Hierdurch ergibt sich eine geringere Restspannstahlfläche. Im Schritt 2 hat eine Reduzierung von $M_{v_{x,\infty}}$ ebenfalls ein kleineres einwirkendes Moment zur Folge, wodurch sich eine höhere Restsicherheit ergibt. Da der Anteil von $M_{v_{x,\infty}}$ an der gesamten Einwirkung im Schritt 2 geringer ist als im Schritt 1, ist die Reduktion der Restspannstahlfläche gegenüber der Vergrößerung der ermittelten Restsicherheit maßgebend. Insgesamt werden bei einer Reduktion des statisch unbestimmten Anteils des Momentes infolge Vorspannung daher im Feldbereich etwas geringere Restspannstahlflächen und geringere Restsicherheiten ermittelt.

Im Stützbereich hat eine Reduktion des statisch unbestimmten Anteils des Momentes infolge Vorspannung den entgegengesetzten Effekt. Da M_g und $M_{v_{x,\infty}}$ hier unterschiedliche Vorzeichen haben, wirkt $M_{v_{x,\infty}}$ entlastend. Eine Reduktion von $M_{v_{x,\infty}}$ hat somit höhere Einwirkungen zur Folge. Im Schritt 1 resultiert hieraus eine höhere Restspannstahlfläche, während im Schritt 2 durch die höhere Einwirkung geringere Restsicherheiten ermittelt werden würden. Da die Abminderung von $M_{v_{x,\infty}}$ wiederum im Schritt 1 maßgebend ist, werden im Stützbereich bei Ansatz eines reduzierten statisch unbestimmten Anteils des Momentes infolge Vorspannung tendenziell größere Restspannstahlflächen und größere Restsicherheiten ermittelt.

Um den Einfluss von zahlreichen über das Bauwerk verteilten Spannstahlbrüchen zu berücksichtigen erscheint es angebracht, die statisch unbestimmte Wirkung der Vorspannung beim stochastischen Verfahren rechnerisch abzumindern. Bei der Größe der Abminderung ist zwischen beschränkt und voll vorgespannten Bauwerken zu unterscheiden.

Beim Nachweis von beschränkt vorgespannten Bauwerken wird häufig festgestellt, dass eine Ankündigung durch Rissbildung im Feldbereich bei einem Ausfall von ca. $1/3 = 33\%$ der vorhandenen Spannglieder stattfindet. Da die Spanngliederbrüche in der Regel nicht genau gleichmäßig sondern zufällig über die Bauwerkslänge verteilt sind, ist es wahrscheinlich, dass zum Zeitpunkt der Ankündigung im Mittel über alle Untersuchungsquerschnitte deutlich weniger Spanngliederbrüche vorliegen. Unter der Annahme, dass der Mittelwert der Anzahl von Spanngliederbrüchen über alle Untersuchungsquerschnitte etwa der Hälfte der maximalen Spanngliederbruchanzahl entspricht, ergibt sich eine Abminderung des statisch unbestimmten Anteils der Vorspannung um ca. $0,5 \cdot 33 = 16,5\%$.

Bei voll vorgespannten Bauwerken ist planmäßig in der Regel mehr Spannstahl vorhanden als in beschränkt vorgespannten Bauteilen, da unter Einwirkung der vollen Verkehrslast keine Zugspannung im Beton auftreten darf. Die bei einem voll vorgespannten Bauteil erforderliche Spannstahlfläche wird nachfolgend im Vergleich zu einem identischen, beschränkt vorgespannten Bauteil abgeschätzt. Hierfür wird zunächst der erforderliche Dekompressionsnachweis betrachtet (Gleichungen 6.18 und 6.19).

$$\frac{M_g}{W_b} + \frac{0,5 \cdot M_p}{W_b} + \frac{M_{vx,\infty}}{W_b} - A_{Z,r} \cdot \varepsilon_{v,\infty}^{(0)} \cdot E_Z \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{y_{bz}}{W_b} \right) \leq 0 \quad \text{für beschränkte Vorspannung} \quad (6.18)$$

$$\frac{M_g}{W_b} + \frac{M_p}{W_b} + \frac{M_{vx,\infty}}{W_b} - A_{Z,r} \cdot \varepsilon_{v,\infty}^{(0)} \cdot E_Z \cdot \left(\frac{1}{A_b} + \frac{y_{bz}}{W_b} \right) \leq 0 \quad \text{für volle Vorspannung} \quad (6.19)$$

Spannungsrissskorrosionsempfindlicher Spannstahl kam in Westdeutschland nur bis 1978 zum Einsatz. Entsprechend der damaligen Regelwerke werden Schnittgrößen infolge Temperatureinwirkung im Rahmen der Betrachtung nicht berücksichtigt.

Unter der Annahme, dass $M_p = 0,5 \cdot M_g$ gilt, betragen in Gleichung (6.18) die äußeren Einwirkungen $M_g + 0,5 \cdot 0,5 \cdot M_g = 1,25 \cdot M_g$. Unter der gleichen Annahme ergibt sich in Gleichung (6.19) für die äußeren Einwirkungen $M_g + 0,5 \cdot M_g = 1,5 \cdot M_g$. Im Verhältnis liegen dem Dekompressionsnachweis eines voll vorgespannten Bauwerks somit $1,50 / 1,25 = 1,20$ -fach höhere äußere Einwirkungen zugrunde. Wird vereinfachend angenommen, dass $M_{vx,\infty}$ infolge der höheren Vorspannung bei voll vorgespannten Bauwerken ebenfalls um den Faktor 1,20 größer ist, dann ergibt sich für voll vorgespannte Bauwerke gegenüber beschränkt vorgespannten Bauwerken eine 20% größere Spannstahlfläche (Bild 6.13).

Bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche $A_{Z,r}$ nach Gleichung (5.2) hat die planmäßig vorhandene Spannstahlfläche keinen Einfluss. Ein Unterschied bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche $A_{Z,r}$ bei beschränkt und voll vorgespannten Bauwerken ergibt sich daher nur

durch die unterschiedliche Größe von $M_{vx,\infty}$. Da in Gleichung (5.2) neben $M_{vx,\infty}$ auch die Einwirkungen infolge äußerer Lasten sowie Temperatureinwirkungen berücksichtigt werden, ist der Einfluss eines größeren $M_{vx,\infty}$ relativ gering. Wird dieser Einfluss vernachlässigt, so ergeben sich sowohl für beschränkt als auch für voll vorgespannte Bauwerke die gleichen Restspannstahlflächen.

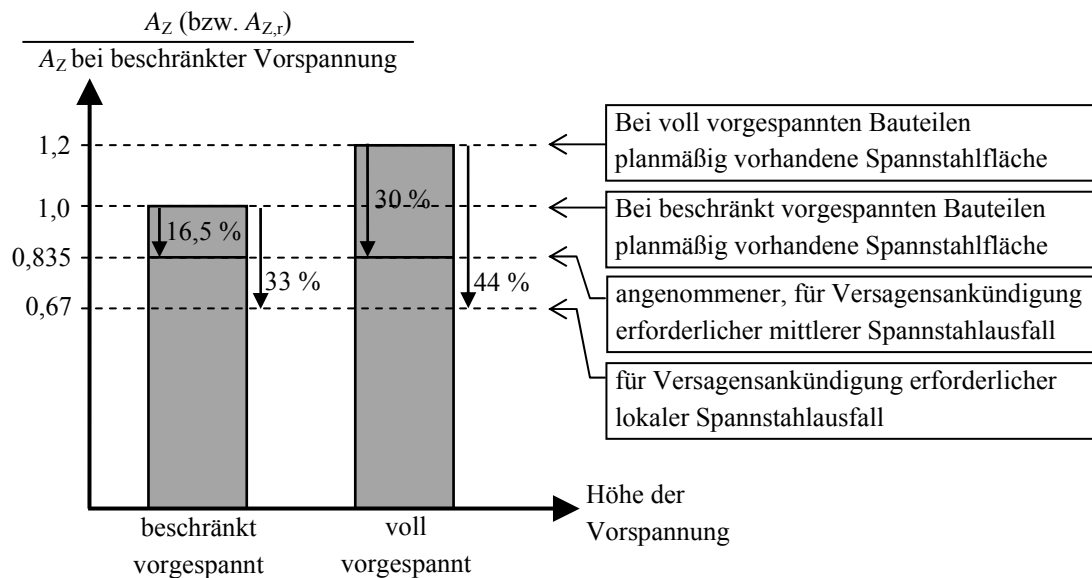


Bild 6.13: Vergleich der abgeschätzten planmäßig vorhandenen Spannstahlflächen sowie der Restspannstahlflächen bei Rissbildung von beschränkt und voll vorgespannten Bauteilen

Beim Nachweis des Ankündigungsverhaltens muss bei voll vorgespannten Bauteilen somit mehr Spannstahl ausfallen, um eine Rissbildung im Beton zu verursachen (Bild 6.13). Während der mittlere Ausfallgrad für beschränkt vorgespannte Bauteile mit den oben getroffenen Annahmen zu 16,5 % abgeschätzt wird, ist bei voll vorgespannten Bauwerken unter den getroffenen Annahmen ein mittlerer Ausfallgrad von ca. 30 % erforderlich, um die gleiche mittlere Restspannstahlfläche zu erhalten. Zur genauen Abbildung der statisch unbestimmten Wirkung der Vorspannung sollte $M_{vx,\infty}$ bei Anwendung des stochastischen Verfahrens daher entsprechend reduziert werden.

In der Handlungsanweisung des Verkehrsministeriums [BMV 2009] ist eine Reduktion des statisch unbestimmten Anteils für den Nachweis des Ankündigungsverhaltens jedoch nicht vorgesehen. Ein Grund hierfür ist, dass aufgrund des gegenläufigen Einflusses der Reduzierung vom $M_{vx,\infty}$ bei der Ermittlung der Restspannstahlfläche und der anschließenden Bestimmung der Restsicherheit der Einfluss hinsichtlich der Restsicherheiten insgesamt relativ gering ist. Häufig zeigen sich daher erst bei relativ starken Reduktionen des statisch unbestimmten Anteils des Momentes infolge Vorspannung um mehr als etwa 15 % nennenswerte Auswirkungen für den Nachweis des Ankündigungsverhaltens. Bei beschränkt vorgespannten Bauteilen hat die Reduktion der statisch unbestimmten Wirkung daher nur geringen Einfluss. Eine Abminderung

des statisch unbestimmten Anteils der Vorspannung könnte darüber hinaus zumindest teilweise durch eine Momentenumlagerung kompensiert werden. Auch wenn eine Momentenumlagerung wegen der möglichen Versprödung des Spannstahls rechnerisch nicht angesetzt werden sollte, so ist doch anzunehmen, dass eine gewisse Momentenumlagerung im realen Bauwerk möglich ist.

6.3.5 Einfluss von größeren Verpressfehlern auf das Ankündigungsverhalten

Das Tragverhalten eines Spannbetonbauteils mit nachträglichem Verbund wird durch die Verbundeigenschaften des Spannstahls maßgeblich beeinflusst. Bei einem z. B. durch größere Verpressfehler gestörten Verbund vergrößert sich im Falle eines Spannstahlbruches die Verankerungslänge des Spannstahls. Ein Spannstahlbruch wirkt sich somit auf eine größere Länge aus. Sind infolge einer mangelhaften Verpressung der Spannglieder vergrößerte Verankerungslängen zu erwarten, so ist die Anzahl der Nachweisquerschnitte so weit zu reduzieren, dass deren Abstand größer oder gleich der zu erwartenden Verankerungslänge ist. Solange die Verankerungslänge kleiner bleibt als der Abstand der Nachweisquerschnitte, liegt das Ergebnis des stochastischen Verfahrens auf der sicheren Seite.

Unsichere Ergebnisse wären mit dem stochastischen Verfahren zu erwarten, wenn die Verpressfehler in allen Hüllrohren ausschließlich auf die Bereiche ohne Ankündigungsverhalten beschränkt wären. In diesem Fall wäre es möglich, dass die Spanngliedbrüche in einem von zwei benachbarten Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten infolge eines mangelhaften Verbundes auch den anderen Querschnitt betreffen. Beide Querschnitte zusammen würden sich daher wie ein einzelner Querschnitt verhalten. Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Nachweisquerschnitte müsste die Auftretenswahrscheinlichkeit für Spanngliedbrüche in dem einzelnen Querschnitt jedoch doppelt gewichtet werden. Mit der gleichen Wahrscheinlichkeit, mit der in den Bereichen mit Ankündigungsverhalten ein Bruch auftritt, würden in dem einzelnen Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten daher zwei Brüche auftreten. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung würde somit ansteigen. Der Fall, dass genau in den Bereichen ohne Ankündigungsverhalten lokale Verpressfehler in allen Hüllrohren vorliegen, ist jedoch extrem unwahrscheinlich. Bei der Berechnung ist eine Berücksichtigung dieses Falls daher nicht erforderlich.

Wenn auf ganzer Länge vollständig unverpresste Hüllrohre vorhanden sind, so hat ein Spannstahlbruch hier einen Ausfall des Spannglieds auf der ganzen Länge zur Folge. In diesem Fall wird die Anzahl der noch intakten Spannglieder auf ganzer Länge um ein Spannglied reduziert. Da in den Bereichen mit Ankündigungsverhalten in der Regel weniger Spanngliedbrüche für eine Versagensankündigung erforderlich sind als in den Bereichen ohne Ankündigungsverhalten für ein Bauteilversagen, wird das Ankündigungsverhalten des Bauwerkes hierdurch nicht beeinträchtigt. Eine rechnerische Berücksichtigung dieses Falls ist daher nicht erforderlich.

6.3.6 Einfluss der Anzahl der Nachweisquerschnitte

Die Untersuchung des Ankündigungsverhaltens erfolgt in der Praxis in der Regel in den Zehntelpunkten eines Feldes. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da die Untersuchungsquerschnitte zur Abbildung aller möglichen Spannstahlbrüche im Abstand von weniger als einer Verankerungslänge angeordnet werden müssten. Im Folgenden wird daher der Einfluss der Anzahl der Nachweisquerschnitte auf das Ergebnis des stochastischen Verfahrens untersucht.

Bei einer Vergrößerung der Anzahl q der Nachweisquerschnitte ist es möglich, dass sich die Lage der einzelnen Nachweisquerschnitte ändert und somit unterschiedliche Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung bzw. erforderliche Restspanngliedanzahlen ermittelt werden. In der Konsequenz muss davon ausgegangen werden, dass sich je nach Anzahl und Lage der Nachweisquerschnitte für das gleiche Bauwerk in gewissem Maße Unterschiede hinsichtlich der ermittelten approximierten Auftretenswahrscheinlichkeiten ergeben können. Große Unterschiede hinsichtlich der Bewertung des Ankündigungsverhaltens sind jedoch nicht zu erwarten, da die Untersuchung eines Feldes in den Zehntelpunkten in der Regel ausreichend genau ist.

Eine Auswertung des Einflusses der Anzahl von Nachweisquerschnitten auf das Ergebnis des stochastischen Verfahrens ist nur möglich bei Betrachtung von Szenarien mit unterschiedlichen Anzahlen von Nachweisquerschnitten, aber gleichen Anzahlen von Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten sowie identischen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und erforderlichen Restspanngliedanzahlen. Zur Untersuchung werden zunächst beispielhafte Szenarien mit fünf Nachweisquerschnitten angenommen. Durch Verdoppelung der Nachweisquerschnitte sowie der zugehörigen Eingangswerte wird zu jedem Szenario ein entsprechendes Szenario mit zehn Nachweisquerschnitten gebildet. Auf die gleiche Art werden entsprechende Szenarien mit 15 Nachweisquerschnitten erzeugt. Für jedes dieser gleichartigen Szenarien wird die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung $P_{4,\text{con},n}$ ermittelt. Zum Vergleich werden alle Auftretenswahrscheinlichkeiten auf die mit zehn Untersuchungsquerschnitten ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,\text{con},10}$ bezogen.

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Bild 6.14 dargestellt. Es zeigt sich, dass die approximierten Auftretenswahrscheinlichkeiten $P_{4,\text{con}}$ mit zunehmender Anzahl an Nachweisquerschnitten unter sonst gleichen Bedingungen abnehmen. Dies ist sowohl bei einer über den Untersuchungsbereich konstanten Spanngliedanzahl s als auch bei Annahme von q_s Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl der Fall. Die vereinfachende Berücksichtigung von Spanngliedbrüchen in einer begrenzten Anzahl von Nachweisquerschnitten liegt daher auf der sicheren Seite (vgl. Annahme 3, Kapitel 6.2.4).

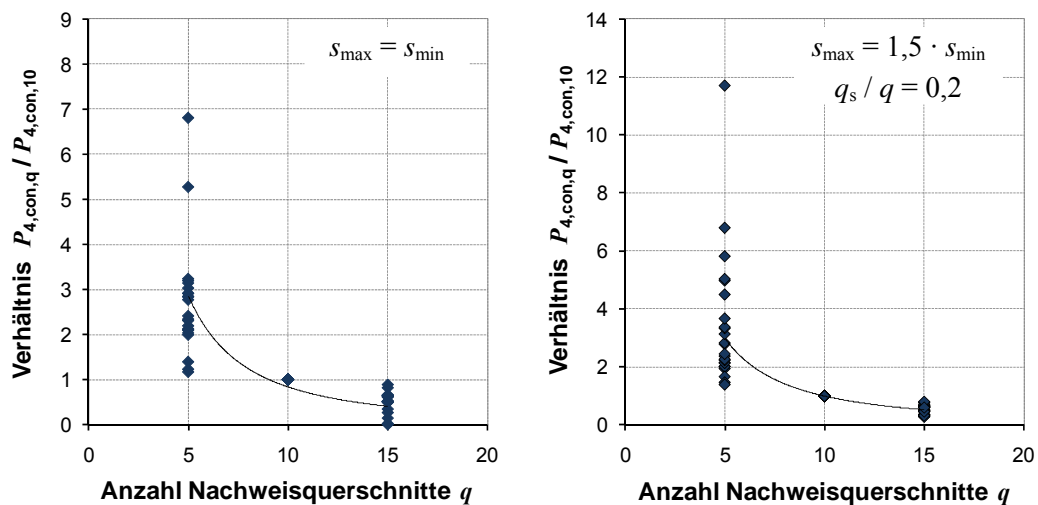


Bild 6.14: Verhältnis der approximierten Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung unter Annahme von q Nachweisquerschnitten zum Ergebnis unter Annahme von 10 Nachweisquerschnitten

6.4 Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung

Durch Anwendung des stochastischen Verfahrens wird die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung unter den getroffenen Annahmen quantifiziert. Der Vergleich von rechnerischen Wahrscheinlichkeitswerten mit zulässigen Werten hat den Vorteil, dass das Ankündigungsverhalten von Brückenbauwerken individuell bewertet werden kann. Es ist z. B. denkbar, dass an Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen andere Anforderungen gestellt werden als z. B. an Feldwegüberführungen. Auch ist die Berücksichtigung der geplanten Restnutzungsdauer eines Bauwerkes möglich. Das Verfahren lässt sich somit gut an die Anforderungen bei der Bewertung älterer Brückenbauwerke anpassen. Im Gegensatz hierzu werden bei semiprobabilistischen Verfahren Teilsicherheitsbeiwerte festgelegt, die das Erreichen eines geforderten Zuverlässigkeitsniveaus sicherstellen. Unter Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte erhält man beim Nachweis nur die Information „Nachweis erfüllt“ oder „Nachweis nicht erfüllt“. Im letzteren Fall erhält man jedoch keine Informationen über die tatsächlich erreichten Sicherheiten.

Die mit dem vorgestellten stochastischen Verfahren ermittelten approximierten Auftretenswahrscheinlichkeiten sind aufgrund der getroffenen Annahmen nicht direkt vergleichbar mit bayes'schen Versagenswahrscheinlichkeiten. Die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens stellen insbesondere im Hinblick auf folgende Punkte eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung dar:

- Das Auftreten von Spanngliedbrüchen ist die Voraussetzung für eine Versagensankündigung oder ein Versagen. Jedoch werden nicht bei allen SRK-empfindlichen Spannstählen tatsächlich Spanngliedbrüche beobachtet. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der erforderlichen Anzahl von Spanngliedbrüchen ist daher in der Regel kleiner als 1,0. Dies gilt insbesondere für Bauwerke mit großen Spanngliedanzahlen, wo die Möglichkeit besteht, dass sowohl sehr empfindliche als auch relativ unempfindliche Chargen des betroffenen Spannstahls eingebaut wurden. Der genaue Wert der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der erforderlichen Anzahl von Spanngliedbrüchen ist nicht bekannt. Im stochastischen Verfahren wird dieser Einfluss daher auf der sicheren Seite liegend nicht berücksichtigt. Stattdessen wird die Auftretenswahrscheinlichkeit für Spanngliedbrüche mit 1,0 angenommen.
- Die Unterschreitung der zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderlichen Restspanngliedanzahl wird im Modell als rechnerisches Versagen gewertet. Da bei der Untersuchung des Ankündigungsverhaltens jedoch Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden, ist auch bei einer Unterschreitung der rechnerisch erforderlichen Spanngliedanzahl nicht zwangsläufig mit einem Bauteilversagen zu rechnen.

Im Rahmen der Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, SRK-gefährdetem Spannstahl erstellt wurden [BMV 2009] wird der Schwellenwert einer akzeptablen Auftretenswahrscheinlichkeit vor diesem Hintergrund zunächst einheitlich mit $P_{4,\text{con}} \leq 10^{-4}$ (logarithmiert ausgedrückt: $P_L = \log_{10}(P_{4,\text{con}}) \leq -4,0$) festgelegt. Ist die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung geringer als dieser Wert, so kann das Ankündigungsverhalten als ausreichend angesehen werden.

7 Parametervariation und Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens

7.1 Zielsetzung und Ansatz

Mit dem in Kapitel 6 beschriebenen stochastischen Verfahren lässt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung unter den genannten Annahmen genau ermitteln. Hierbei werden rechnerisch mögliche Kombinationen von Spanngliedbrüchen simuliert und hinsichtlich der Versagensankündigung durch Rissbildung sowie hinsichtlich der rechnerischen Restsicherheit untersucht.

Mit zunehmender Anzahl von Spanngliedern und Untersuchungsquerschnitten nimmt die Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen exponentiell zu. Bei der Berechnung entsteht daher, insbesondere bei Systemen mit zahlreichen Untersuchungsquerschnitten, ein hoher Rechenaufwand. In der vorgestellten Form ist das Verfahren daher in der Praxis nur in Einzelfällen einsetzbar und für eine breite Anwendung nicht geeignet. Um dennoch eine Möglichkeit zu schaffen, Brückenbauwerke mit empfindlichem Spannstahl mit möglichst geringem Aufwand hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung beurteilen zu können, wird auf Grundlage des stochastischen Verfahrens ein vereinfachtes Verfahren entwickelt, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Zur Entwicklung des vereinfachten Verfahrens werden in einer Parameterstudie zahlreiche Szenarien mit dem stochastischen Verfahren gemäß Kapitel 6 untersucht. Für alle untersuchten Szenarien wird die approximierete Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung $P_L = \log(P_{4,\text{con}})$ ermittelt. Erstes Ziel der Untersuchung ist es, einen geeigneten Eingangsparameter x zu finden, mit dem sich die Auftretenswahrscheinlichkeit P_L möglichst gut durch eine mathematische Funktion beschreiben lässt. Anschließend ist die Funktion zur Beschreibung der Auftretenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Eingangsparameters in geeigneter Weise zu definieren.

7.2 Beschreibung der untersuchten Szenarien

Die Schwierigkeit bei der Auswertung der Parametervariation und der Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens besteht darin, dass die ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeit P_L von einer großen Anzahl von Eingangsparametern abhängig ist. Die Eingangsparameter sind die in jedem untersuchten Querschnitt planmäßig vorhandene Spanngliedanzahl sowie die jeweilige Restspanngliedanzahl bei Rissbildung und die erforderliche Restspanngliedanzahl. Für jeden Untersuchungsquerschnitt ergeben sich somit drei Eingangsparameter. Je nach Wahl dieser Parameter werden entweder sehr große oder sehr kleine Auftretenswahrscheinlichkeiten ermittelt. Eine Grenzfunktion der maximal zu erwartenden Auftretenswahrscheinlichkeit lässt sich nur finden, wenn die Untersuchung nur auf bestimmte, praxisrelevante Kombinationen beschränkt wird. Da jedoch nicht alle praxisrelevanten Kombinationen vorab bekannt sind, stellt die Wahl der zu untersuchenden Kombinationen eine Annahme dar.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Szenarien mit zehn Untersuchungsquerschnitten betrachtet. Das zu untersuchende Feld wird in fünf Feldquerschnitte, drei Stützquerschnitte und zwei Querschnitte in den Momentennullpunkten eingeteilt. Für alle Querschnitte innerhalb des Feld-, Stütz-, und Momentennullpunktbereiches werden bei der Variation jeweils die gleichen Restspanngliedanzahlen bzw. erforderlichen Spanngliedanzahlen angenommen (vgl. Bild 7.1).

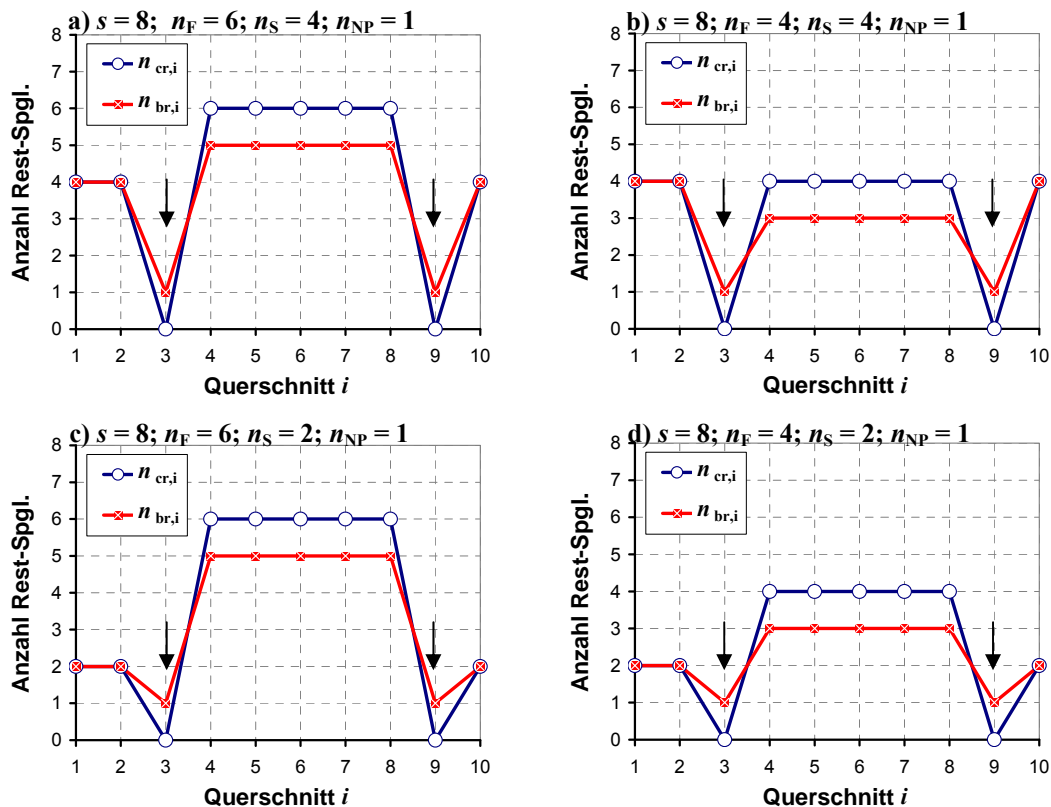


Bild 7.1: Variation der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und der erforderlichen Restspanngliedanzahlen bei jeweils zwei Querschnitten (Nr. 3 und Nr. 9) ohne Ankündigungsverhalten (mit Pfeil markiert)

Zur Beschreibung eines Szenarios ist daher die Angabe der Gesamtspanngliedanzahl sowie dreier Kennzahlen n_F , n_{St} und n_{NP} für den Feld-, den Stütz- und den Nullpunktbereich erforderlich. Die Kennzahlen für den Feld-, den Stütz- und den Nullpunktbereich beschreiben bei Querschnitten mit Ankündigungsverhalten die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und bei Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten die erforderlichen Restspanngliedanzahlen. Da die Reihenfolge der Querschnitte keine Rolle spielt, können mit diesen Szenarien Innenfelder und Endfelder von Durchlaufträgern sowie Einfeldträger abgebildet werden.

Zusätzlich zu den Restspanngliedanzahlen wurde auch die Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten variiert. Hierfür wurden die erforderlichen Restspanngliedanzahlen zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit unverändert beibehalten, während in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten reduzierte Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung angesetzt wurden. Das Vorgehen ist in Bild 7.2 für ein Szenario mit acht Spanngliedern und $n_F = 6$, $n_S = 4$ und $n_{NP} = 1$ und $q_k = 1$ bis 5 Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten dargestellt.

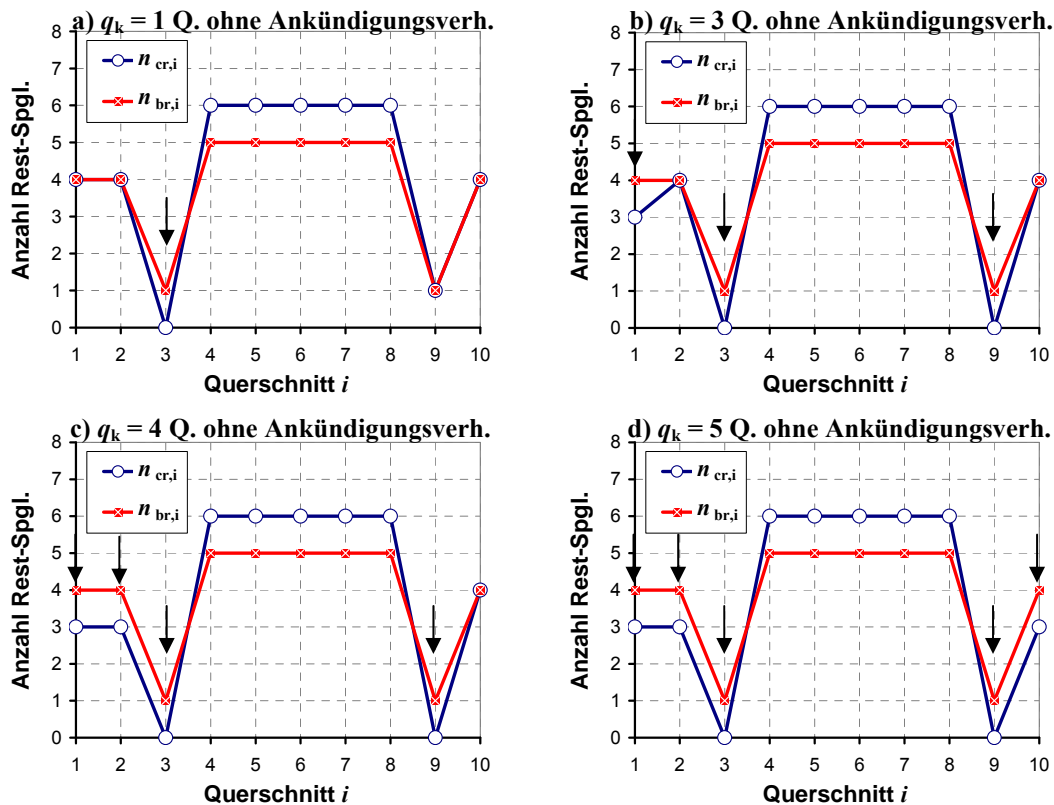


Bild 7.2: Szenario mit $s = 8$ Spanngliedern und $n_F = 6$; $n_S = 4$; $n_{NP} = 1$; Variation der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten (mit Pfeil markiert) bei unveränderten erforderlichen Restspanngliedanzahlen

Um auch Fälle mit zwischenverankerten Spanngliedern und somit unterschiedlichen Spann- gliedanzahlen in verschiedenen Querschnitten beurteilen zu können, wurden darüber hinaus

auch Szenarien mit vergrößerten Spanngliedanzahlen im Stützbereich sowie im Bereich des Momentennullpunktes untersucht (siehe Anhang C).

Aus Gründen der Handhabbarkeit beziehen sich die Eingangswerte s_i , $n_{cr,i}$ und $n_{br,i}$ für das vereinfachte Verfahren auf ganze Spannglieder (hüllrohrweise). Bei der Berechnung der einzelnen Szenarien mit dem stochastischen Verfahren wurden jedoch in allen Fällen die effektiven Spanngliedanzahlen s' gemäß Kapitel 6.2.2 angesetzt. Jedes Spannglied wurde somit für die Berechnung gemäß Gleichung (6.1) in fünf unabhängige effektive Spannglieder unterteilt. Neben der Vergrößerung der Anzahl der unabhängigen Spannglieder hat der Ansatz von effektiven Spanngliedern bei genauerer Betrachtung auch den Effekt, dass z. B. die Restspannstahlfläche bei Rissbildung nicht bis auf das nächste Spannglied, sondern nur bis zum nächsten effektiven Spannglied abgerundet werden muss. In der Berechnung kann somit eine größere Restspannstahlfläche bei Rissbildung und eine kleinere erforderliche Restspannstahlfläche angesetzt werden. Dies wurde berücksichtigt, indem die Eingangswerte (n_{cr} und n_{br} auf ganze Spannglieder bezogen, vgl. Bild 7.1 und Bild 7.2) zunächst in effektive Spanngliedanzahlen umgerechnet wurden und anschließend in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten die effektive Restspanngliedanzahl bei Rissbildung um ein effektives Spannglied vergrößert und in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten die erforderliche effektive Restspanngliedanzahl um ein effektives Spannglied verringert wurde.

Insgesamt wurden auf diese Art mehr als 12.000 Szenarien mit unterschiedlichen Gesamtspanngliedanzahlen, erforderlichen Restspanngliedanzahlen, Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung, Anzahlen von Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten sowie Anzahlen von Querschnitten mit vergrößerten Spanngliedanzahlen rechnerisch untersucht. Die untersuchten Szenarien sowie die ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten sind in Anhang C aufgeführt. Tabelle 7.1 enthält beispielhaft eine Übersicht über die untersuchten Szenarien mit über die Feldlänge konstanten Spanngliedanzahlen ($q_s = 0$) sowie die Bandbreite der Variation der einzelnen Parameter.

Tabelle 7.1: Im Rahmen der Parametervariation untersuchte Bandbreite der Parameter mit konstanter Spanngliedanzahl ($q_s = 0$) und mit $q_k = 1$ bis 5 Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten

s Anz. Spgl.	n_F Anzahl (% von s)	n_{St} Anzahl (% von s)	n_{NP} Anzahl (% von s)
4	1 bis 3 (25 % bis 75 %)	1 bis 3 (25 % bis 75 %)	1 bis 2 (25 % bis 50 %)
5	1 bis 4 (20 % bis 80 %)	1 bis 4 (20 % bis 80 %)	1 bis 2 (20 % bis 40 %)
6	2 bis 5 (33 % bis 83 %)	2 bis 5 (33 % bis 83 %)	1 bis 3 (17 % bis 50 %)
7	3 bis 5 (43 % bis 71 %)	3 bis 5 (43 % bis 71 %)	1 bis 3 (14 % bis 43 %)
8	3 bis 6 (38 % bis 75 %)	2 bis 6 (25 % bis 75 %)	1 bis 3 (13 % bis 38 %)
9	3 bis 7 (33 % bis 78 %)	3 bis 7 (33 % bis 78 %)	1 bis 4 (11 % bis 44 %)
10	2 bis 8 (20 % bis 80 %)	2 bis 8 (20 % bis 80 %)	1 bis 4 (10 % bis 40 %)
12	3 bis 9 (25 % bis 75 %)	3 bis 9 (25 % bis 75 %)	1 bis 4 (8 % bis 33 %)
15	3 bis 10 (20 % bis 67 %)	3 bis 10 (20 % bis 67 %)	1 bis 5 (7 % bis 33 %)

7.3 Identifikation maßgeblicher Eingangsparameter

Durch die Festlegung der zu untersuchenden Szenarien gemäß Kapitel 7.2 wird die Anzahl der Eingangsparameter zur Berechnung von $P_{4,\text{con}}$ bereits deutlich reduziert. Zur Auswertung der Parameterstudie und Entwicklung eines praxistauglichen vereinfachten Verfahrens zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,\text{con}}$ ist eine weitere Reduzierung der Anzahl der Eingangswerte erforderlich.

Hierfür wird zunächst die Möglichkeit untersucht, einen Ansatz zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung allein in Abhängigkeit von der Gesamtanzahl der Spannglieder s zu formulieren. In Bild 7.3 sind die Ergebnisse $P_{4,\text{con}}$ ausgewählter Fälle mit einer über die Feldlänge konstanten Spanngliedanzahl s sowie mit $q_k = 1$ bzw. mit $q_k = 5$ Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten über der Spanngliedanzahl aufgetragen. Es wird deutlich, dass bei dieser Herangehensweise kein ausreichend guter Zusammenhang zwischen der Spanngliedanzahl und der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung erkennbar ist. Die Spanngliedanzahl allein ist daher nicht als Eingangsparameter zur Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit geeignet.

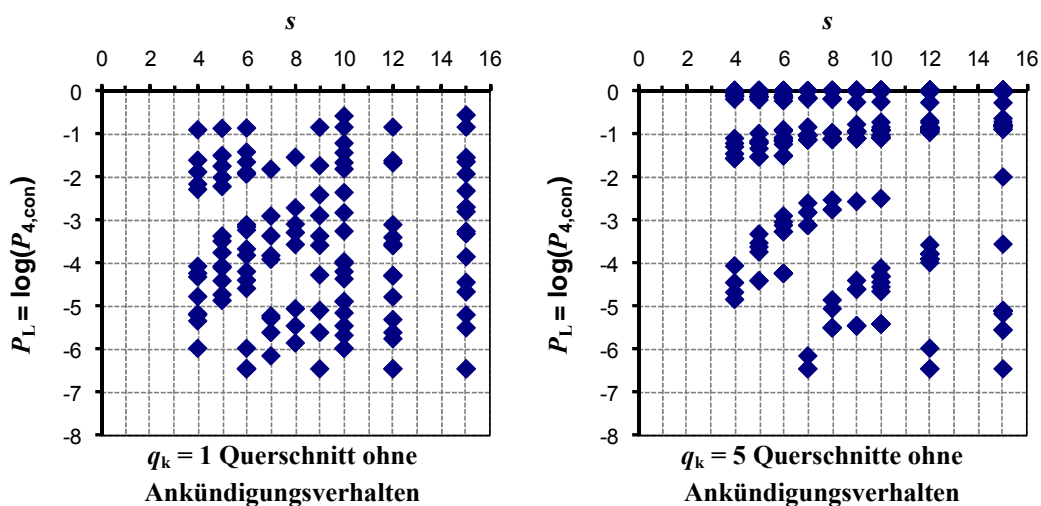


Bild 7.3: Approximierte Auftretenswahrscheinlichkeiten eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung über der Spanngliedanzahl s

Bei der Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung ist entscheidend, ob bei einer kontinuierlich zunehmenden Anzahl von stochastisch verteilten Spanngliederausfällen ein Ankündigungssignal vor dem Bauteilversagen auftritt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung wird kleiner, je weniger Spanngliedbrüche für eine Versagensankündigung erforderlich sind und je mehr Spanngliedbrüche lokal auftreten müssen, um ein rechnerisches Versagen herbeizuführen. Die Differenz zwischen der Restspanngliedanzahl bei Rissbildung n_{cr} und der erforderlichen Restspanngliedanzahl n_{br} ist daher ein wesentlicher Eingangsparameter für das vereinfachte Verfahren.

Im Folgenden wird der Eingangswert x' für das vereinfachte Verfahren daher als der Differenz des Mittelwertes der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung in den Untersuchungsquerschnitten mit Ankündigungsverhalten und dem Mittelwert der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten ohne Ankündigungsverhalten definiert. Um hierbei eine von der Spanngliedanzahl s unabhängige Formulierung zu erreichen, werden die Restspanngliedanzahlen n_{cr} und die erforderlichen Restspanngliedanzahlen n_{br} auf die im jeweiligen Querschnitt vorhandene Spanngliedanzahl s (hüllrohrweise) bezogen.

Im Beispiel gemäß Bild 7.2 a) ergibt sich der Mittelwert der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung $n_{cr,i}/s_i$ zu $(3 \cdot 4/8 + 5 \cdot 6/8 + 1/8) / 9 = 0,60$. Der Mittelwert der erforderlichen bezogenen Restspanngliedanzahlen $n_{br,i}/s_i$ ergibt sich aus der erforderlichen Restspanngliedanzahl im Querschnitt Nr. 3, geteilt durch die Spanngliedanzahl: $1/8 = 0,125$. Im Mittel tritt in diesem Szenario also eine Versagensankündigung bei einer Restspanngliedanzahl auf, die 60 % der ursprünglichen Spanngliedanzahl entspricht, während ein Versagen bei Unterschreiten von 12,5 % der ursprünglichen Spanngliedanzahl eintritt. Die Differenz ergibt sich zu $x' = 0,60 - 0,125 = 0,475$.

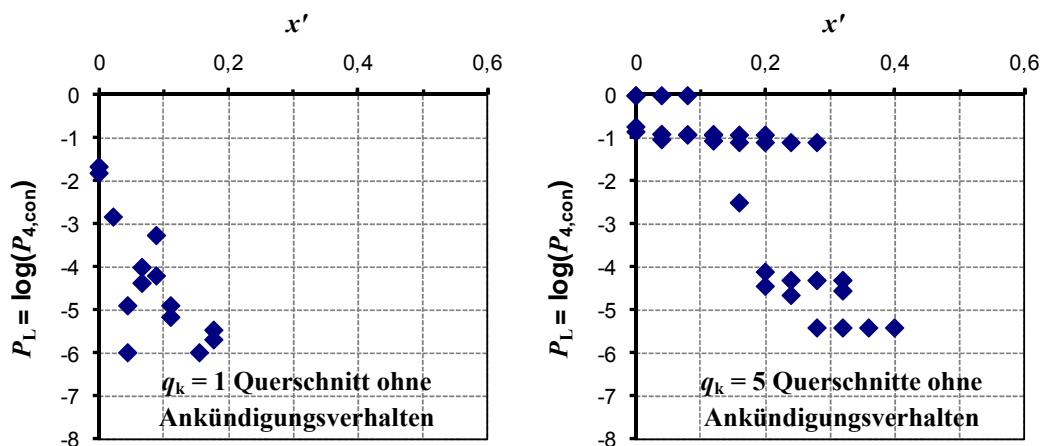


Bild 7.4: Auftretenswahrscheinlichkeiten eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bei Szenarien mit 10 Spanngliedern über der Differenz x' der mittleren bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und der mittleren bezogenen erforderlichen Restspanngliedanzahl

In Bild 7.4 sind die im Rahmen der Parameterstudie ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten $P_{4,con}$ für Szenarien mit zehn Spanngliedern über dem Eingangswert x' aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Ansatz des Mittelwertes der Differenzen der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und der erforderlichen bezogenen Restspanngliedanzahl als Eingangswert x' bei einem Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten zu einem relativ guten Zusammenhang zwischen dem Eingangswert und der maximal zu erwartenden Auftretenswahrscheinlichkeit führt. Bei höheren Anzahlen von Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten q_k nimmt die Streuung der über x' aufgetragenen Auftretenswahrscheinlichkeiten jedoch stark zu. Dies ist dadurch begründet, dass im Rahmen der Parametervariation ab zwei Querschnitten ohne

Ankündigungsverhalten neben den beiden Momentennullpunkten auch Querschnitte im Stützbereich kein Ankündigungsverhalten haben. Da die erforderlichen Restspanngliedanzahlen im Stützbereich in der Regel höher sind als jene im Nullpunktbereich, tritt ein rechnerisches Versagen in diesem Querschnitt bereits nach weniger Spanngliedbrüchen ein. Dementsprechend nimmt in diesem Fall die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung zu. Aufgrund der Mittelwertbildung ist der Einfluss auf die Ermittlung des Eingangswertes x jedoch relativ gering.

Ein besseres Ergebnis ergibt sich, wenn zur Ermittlung des Eingangswertes anstatt der Differenz der Mittelwerte der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung bzw. der erforderlichen bezogenen Restspanngliedanzahlen die Differenz der Maxima dieser Werte verwendet wird. Der so ermittelte Eingangswert wird nachfolgend mit x bezeichnet. Im Szenario gemäß Bild 7.2 a) ergibt sich der Maximalwert der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung $n_{cr,i}/s_i$ zu $\max\{4/8; 6/8; 1/8\} = 6/8 = 0,75$. Der Maximalwert der erforderlichen bezogenen Restspanngliedanzahlen $n_{br,i}/s_i$ ergibt sich aus der erforderlichen Restspanngliedanzahl im Querschnitt Nr. 3, geteilt durch die Spanngliedanzahl: $1/8 = 0,125$. Als Eingangswert ergibt sich $x = 0,75 - 0,125 = 0,625$.

In Bild 7.5 sind die im Rahmen der Parameterstudie an verschiedenen Szenarien mit zehn Spanngliedern ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten $P_{4,con}$ über dem Eingangswert x dargestellt. Hier zeigt sich ein sehr guter Zusammenhang zwischen dem Eingangswert x und den ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten $P_{4,con}$. Die Streuung der errechneten Wahrscheinlichkeiten ist außerdem geringer als in Bild 7.4.

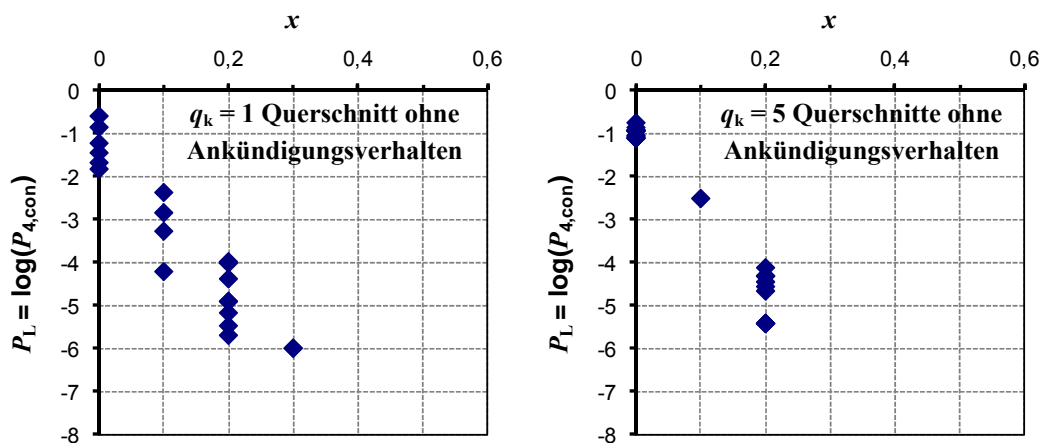


Bild 7.5: Auftretenswahrscheinlichkeiten eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bei Szenarien mit 10 Spanngliedern über der Differenz x der maximalen bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung und der maximalen bezogenen erforderlichen Restspanngliedanzahl

Auf Grundlage der vorhergehenden Betrachtungen wird für den Eingangswert x der Ansatz gemäß den Gleichungen (7.1) bis (7.6) gewählt. Bei der Auswertung der Parametervariation werden die Auftretenswahrscheinlichkeiten im Folgenden immer über dem so bestimmten Eingangswert x aufgetragen.

$$\kappa_i = \frac{s_i}{s_{\min}} \quad (7.1)$$

$$\kappa_{cr,i} = \frac{n_{cr,i}}{s_i}; \quad \kappa_{br,i} = \frac{n_{br,i}}{s_i} \quad (7.2); (7.3)$$

$$\kappa_{cr,max} = \max\{\kappa_{cr,i}\}; \quad \kappa_{br,max} = \max\{\kappa_{br,i}\} \quad (7.4); (7.5)$$

$$x = \kappa_{cr,max} - \kappa_{br,max} \quad (7.6)$$

- mit: s_i = Spanngliedanzahl im Querschnitt i (hüllrohrweise)
 s_{\min} = minimale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich
 (i. d. R. im Feldbereich)
 $n_{cr,i}$ = Restspanngliedanzahl bei Rissbildung im Querschnitt i ,
 abgerundet auf die nächste ganzzahlige Spanngliedanzahl (hüllrohrweise)
 $n_{br,i}$ = zum Nachweis einer ausreichenden rechnerischen Restsicherheit nach
 Gleichung (5.4) im Querschnitt i erforderliche Restspanngliedanzahl,
 aufgerundet auf die nächste ganzzahlige Spanngliedanzahl (hüllrohrweise)
 $\kappa_{cr,i}$ = bezogene Restspanngliedanzahl bei Rissbildung im Querschnitt i
 $\kappa_{br,i}$ = zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit im Querschnitt i
 erforderliche bezogene Restspanngliedanzahl
 $\kappa_{cr,max}$ = Maximum der bezogenen Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung
 in den Querschnitten mit $n_{br,i} \leq n_{cr,i}$
 $\kappa_{br,max}$ = Maximum der zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit
 in den Querschnitten mit $n_{br,i} > n_{cr,i}$ erforderlichen bezogenen
 Spanngliedanzahlen
 x = Eingangswert für das vereinfachte Verfahren zur Abschätzung der
 Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung

7.4 Auswertung der Parameterstudie

7.4.1 Vorgehensweise

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass ein guter Zusammenhang zwischen dem gewählten Eingangsparameter x und der Auftretenswahrscheinlichkeit $P_L = \log_{10}(P_{4,\text{con}})$ besteht. Im Folgenden wird daher die Entwicklung eines geeigneten linearen Ansatzes in Abhängigkeit des Eingangsparameters x zur vereinfachten Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung beschrieben.

Zur Entwicklung des Ansatzes werden die im Rahmen der Parameterstudie untersuchten Szenarien ausgewertet. Hierbei wird für die unterschiedlichen Spanngliedanzahlen und Anzahlen von Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten q_k jeweils ein linearer Ansatz der Form $P_L = a \cdot x + b$ gewählt, mit dem sich die maximal zu erwartenden Auftretenswahrscheinlichkeiten P_L beschreiben lassen (vgl. Anhang C). Aus den linearen Funktionen wird ein vereinfachter Ansatz zur Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit abgeleitet, indem die Geradenparameter a und b in Abhängigkeit der Eingangswerte s_{\min} , s_{\max} , q_s und q dargestellt werden.

Nachfolgend wird der Einfluss der Spanngliedanzahl s und der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten q_k ausgewertet. Alle Auswertungen der Parameterstudie sind im Anhang C zusammengefasst.

7.4.2 Einfluss der Spanngliedanzahl

Zur Untersuchung des Einflusses der Spanngliedanzahl werden die Ergebnisse der Parametervariation in Bild 7.6 für verschiedene Spanngliedanzahlen dargestellt. Bei der Darstellung der Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,\text{con}}$ über dem gewählten Eingangsparameter x zeigt sich, dass $P_{4,\text{con}}$ mit zunehmender Anzahl s der planmäßig vorhandenen Spannglieder abnimmt. Diese Tendenz ist unabhängig von der Anzahl q_k der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten. Der positive Einfluss von großen Spanngliedanzahlen ist dadurch begründet, dass mit zunehmender Spanngliedanzahl die absolute Größe der Differenz zwischen der Restspanngliedanzahl bei Rissbildung und der erforderlichen Restspanngliedanzahl bei sonst gleichen Verhältnissen zunimmt. Ein Versagen ohne Vorankündigung wird hierdurch unwahrscheinlicher.

Der Einfluss der Anzahl der Spannglieder bzw. der Spannstähle auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines unangekündigten Versagens infolge von Spanngliederausfällen wurde bereits früh erkannt. In [DIN 4227:1979-12] ist für Bündelspannglieder eine Mindestanzahl von sieben Drähten bzw. Stäben vorgeschrieben. Alternativ ist der Nachweis zu führen, dass die Einwirkungen beim Ausfall von vorgegebenen Anzahlen von Drähten mit einer Sicherheit von 1,0 aufgenommen werden können.

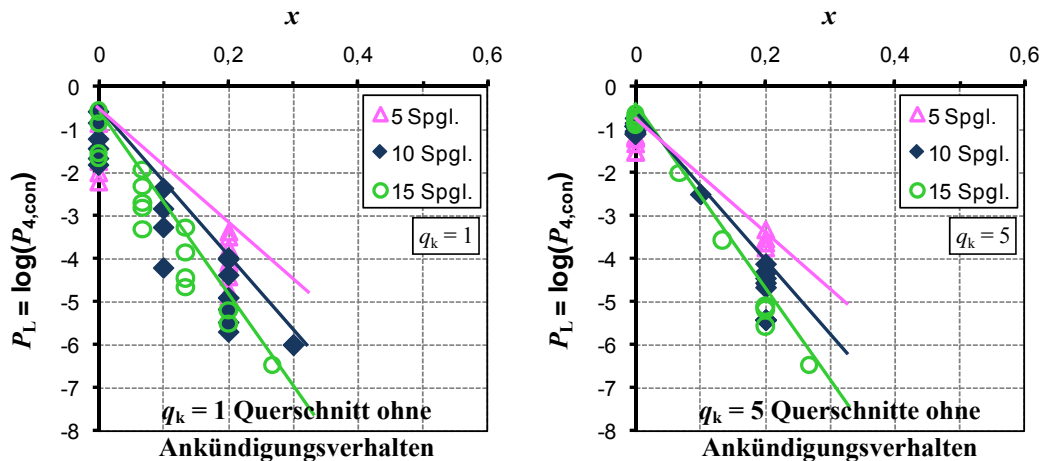


Bild 7.6: Auftretenswahrscheinlichkeiten eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung für verschiedene Spannliedanzahlen (Szenarien mit $q_s = 0$ Querschnitten mit vergrößerter Spannliedanzahl)

In den Gleichungen (7.2) und (7.3) wurden die Restspannliedanzahlen $n_{cr,i}$ und $n_{br,i}$ auf die Gesamtspannliedanzahl s_i im jeweiligen Querschnitt bezogen. Da hierdurch ein von der Spannliedanzahl unabhängiger Eingangswert x erhalten wird, ist der Einfluss der Spannliedanzahl bei der Entwicklung eines vereinfachten Ansatzes zur Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Dies erfolgt durch die Formulierung der Geradenparameter a und b in Abhängigkeit der Spannliedanzahl (siehe Kapitel 7.5).

7.4.3 Einfluss der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten

Das stochastische Verfahren nutzt die Möglichkeit, dass eine Vorankündigung in Querschnitten mit Ankündigungsverhalten auftreten kann, auch wenn einzelne Querschnitte kein Ankündigungsverhalten haben. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass die Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten einen Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung hat. Bei der Untersuchung der in Bild 7.2 dargestellten Beispiele wird dies prinzipiell bestätigt. In Bild 7.7 ist die Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,con}$ über der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten aufgetragen. Hier zeigt sich eine zunehmende Auftretenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten. Die Auftretenswahrscheinlichkeit steigt jedoch insbesondere bei der Steigerung von zwei auf drei bzw. von fünf auf sechs Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten deutlich an. Diese Anzahlen entsprechen der Anzahl der Querschnitte im Nullpunkt- sowie im Stützbereich. Sobald ein Querschnitt im Stützbereich kein Ankündigungsverhalten hat, steigt die Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,con}$ deutlich an.

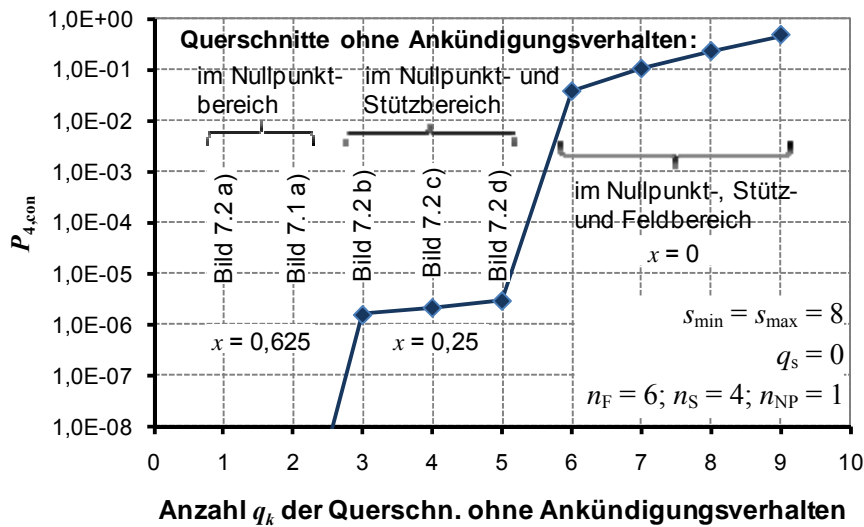


Bild 7.7: Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,con}$ in Abhängigkeit der Anzahl der Querschnitte ohne Vorankündigung q_k für die in Bild 7.2 dargestellten Szenarien

Das Ergebnis zeigt, dass die erforderlichen bzw. bei Rissbildung vorhandenen Restspanngliedanzahlen einen größeren Einfluss auf $P_{4,con}$ haben als die reine Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten. Bei Betrachtung der Eingangswerte x für das betrachtete Beispiel wird außerdem deutlich, dass sich mit der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten auch der Eingangswert x ändert. Der Einfluss der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten wird somit bereits durch den Eingangswert x berücksichtigt.

7.5 Vereinfachtes Verfahren

Bei Auswertung der im Rahmen der Parameterstudie untersuchten Szenarien wurden lineare Ansätze der Form $P_L = a \cdot x + b$ zur Beschreibung der maximal zu erwartenden Auftretenswahrscheinlichkeiten P_L gewählt. Zur Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens wurden die Geradenparameter a und b in Abhängigkeit von s , s_{min} , s_{max} und q_k ausgedrückt. Bei der Auswertung des Einflusses der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten q_k wurde zusätzlich ein Einfluss der Anzahl der Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl q_s festgestellt. Der hierfür entwickelte vereinfachte Ansatz ist in den Gleichungen (7.7) bis (7.9) dargestellt. Bei der Anwendung des Ansatzes sind die Anwendungsgrenzen gemäß Kapitel 7.6 zu beachten.

$$P_L = a \cdot x + b \quad (7.7)$$

$$a = \frac{47}{\left[s_{\min} + \frac{q_s}{q} \cdot (s_{\max} - s_{\min}) \right]^{0,10}} - 60 \quad (7.8)$$

$$b = \frac{25}{\left[s_{\min} + \frac{q_s}{q} \cdot (s_{\max} - s_{\min}) \right]^2} + 0,25 \quad (7.9)$$

- mit: P_L = logarithmierte Auftretenswahrscheinlichkeit einer Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit (rechnerisches Versagen) ohne Vorankündigung des betrachteten Hauptträgers im jeweiligen Feld, es gilt: $P_L = \log_{10}(P_{4,\text{con}})$; wenn $P_L > 0$ ermittelt wird, so ist $P_L = 0$ anzunehmen
- a, b = Parameter des linearen Ansatzes zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit einer Unterschreitung der erforderlichen Restsicherheit (rechnerisches Versagen) ohne Vorankündigung
- x = Eingangswert nach den Gleichungen (7.1) bis (7.6);
Das vereinfachte Verfahren ist nur anwendbar für $x > 0$
- q_s = Anzahl der Querschnitte mit Spanngliedanzahl s_{\max} . Bei konstanter Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich gilt $q_s = q$ bzw. $q_s/q = 1$
- q = Anzahl der Untersuchungsquerschnitte
- s_{\max} = maximale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich
(falls z. B. im Stützbereich eine größere Spanngliedanzahl vorhanden ist)
Bei konstanter Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich gilt $q_s = q$
- s_{\min} = minimale Spanngliedanzahl im untersuchten Bereich
(i. d. R. im Feldbereich)

7.6 Anwendungsgrenzen des vereinfachten Verfahrens

Bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens sind folgende Anwendungsgrenzen zu beachten:

- (1) Für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens müssen mindestens acht Untersuchungsquerschnitte vorliegen. Obwohl das Verfahren mit zehn Nachweisquerschnitten entwickelt wurde, ist der Fehler bei geringeren Anzahlen von Untersuchungsquerschnitten gering, wenn mindestens acht Querschnitte vorhanden sind. Wenn weniger Querschnitte vorhanden sind, liegt der Ansatz ggf. auf der unsicheren Seite.
- (2) In jedem Untersuchungsquerschnitt müssen mindestens vier Spannglieder vorhanden sein. Das stochastische Verfahren ist zwar auch bei geringeren Spanngliedanzahlen anwendbar,

in der Parameterstudie für das vereinfachte Verfahren wurden im Hinblick auf die im Brückenbau üblichen Spanngliedanzahlen jedoch nur Spanngliedanzahlen $s_{\min} \geq 4$ untersucht.

- (3) Beim vereinfachten Verfahren darf in höchstens 50 % der Querschnitte eine gegenüber dem Feldbereich vergrößerte Spanngliedanzahl vorhanden sein (entspricht $q_s/q \leq 0,5$). In diesen Querschnitten darf gegenüber dem Feldbereich maximal die doppelte Spanngliedanzahl vorliegen. Dies entspricht dem in der Parameterstudie überprüften Wertebereich.
- (4) Das Verfahren ist anwendbar wenn in maximal 50 % der Querschnitte $n_{br,i} > n_{cr,i}$ ist, also kein Ankündigungsverhalten vorliegt. In der zugrundeliegenden Parameterstudie wurden keine höheren Anzahlen von Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten vorgesehen, da hier nicht mit einem ausreichenden Ankündigungsverhalten zu rechnen ist.
- (5) Bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens in Bauwerkslängsrichtung müssen je Hüllrohr mindestens 20 Drähte vorhanden sein.

7.7 Parameteruntersuchung zum vereinfachten Verfahren

In Bild 7.8 ist der Parameter a des vereinfachten Verfahrens über der Differenz der maximalen und minimalen Spanngliedanzahl s_{\min} und dem Verhältnis der Querschnitte mit Vergrößerter Spanngliedanzahl zur Gesamtanzahl der Querschnitte aufgetragen. Es wird deutlich, dass der Parameter a mit zunehmender Differenz zwischen s_{\max} und s_{\min} betragsmäßig größer wird. Außerdem wird der Parameter a mit zunehmender Anzahl von Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl betragsmäßig größer. Beide Effekte sind auf die Formulierung im Nenner des Ausdrucks in Gleichung (7.8) zurückzuführen. Die Formulierung wurde so gewählt, dass sich das Ergebnis bei mehreren Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl dem Ergebnis annähert, welches sich unter Ansatz der vergrößerten Spanngliedanzahl in allen Querschnitten ergeben würde.

Bild 7.9 zeigt den Parameter b des vereinfachten Verfahrens über der Differenz der maximalen und minimalen Spanngliedanzahl s_{\min} und dem Verhältnis der Querschnitte mit Vergrößerter Spanngliedanzahl zur Gesamtanzahl der Querschnitte. Aufgrund der ähnlichen Formulierung wie für den Parameter a ergibt sich in Bild 7.9 ein ähnlicher Verlauf wie für den Parameter a in Bild 7.8.

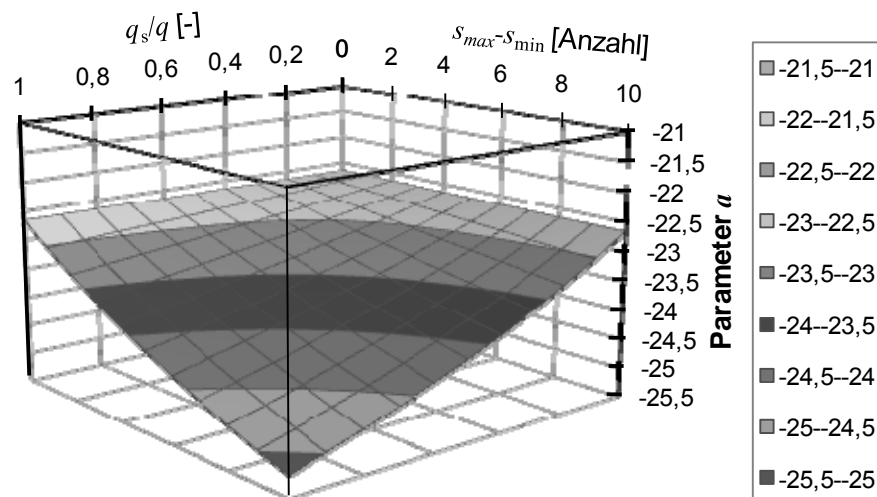


Bild 7.8: Parameter a des vereinfachten Verfahrens für $s_{\min} = 10$ Spannglieder in Abhängigkeit des Verhältnisses q_s/q und der Differenz $s_{\max}-s_{\min}$ (vgl. Gleichung 7.8)

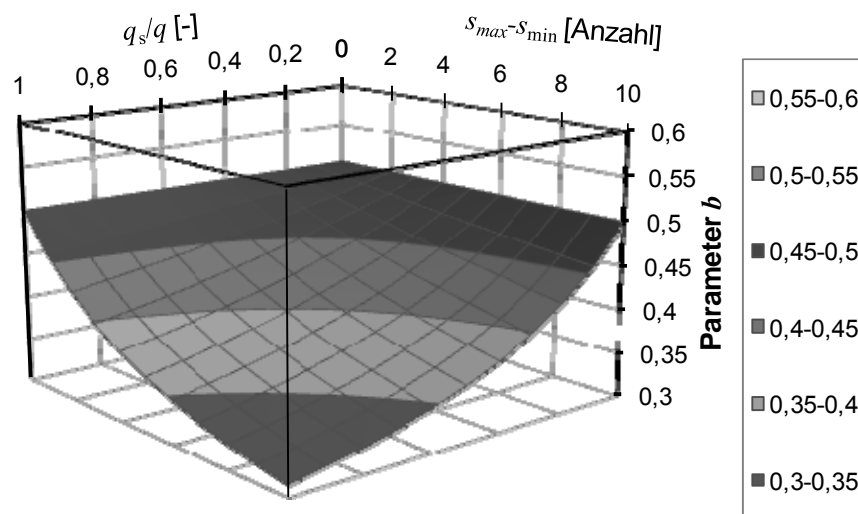


Bild 7.9: Parameter b des vereinfachten Verfahrens für $s_{\min} = 10$ Spannglieder in Abhängigkeit des Verhältnisses q_s/q und der Differenz $s_{\max}-s_{\min}$ (vgl. Gleichung 7.9)

In Bild 7.10 und Bild 7.11 sind die nach Gleichung (7.7) ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten P_L in Abhängigkeit von s_{\min} und x beispielhaft für $s_{\max}/s_{\min} = 1,0$ und $s_{\max}/s_{\min} = 2,0$ aufgetragen. In beiden Darstellungen zeigt sich, dass der Eingangswert x bei der Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit P_L den größten Einfluss hat. Der Einfluss der Spanngliedanzahl s_{\min} ist ebenfalls erkennbar. Der Zielwert der Auftretenswahrscheinlichkeit $P_L = -4$ ist in beiden Diagrammen gestrichelt dargestellt. In Bild 7.10 zeigt sich, dass bei geringen Spanngliedanzahlen ein Eingangswert $x = 0,3$ erforderlich ist, um den Zielwert der Auftretenswahrscheinlichkeit

einzuhalten, während der Zielwert bei großen Spanngliedanzahlen bereits bei $x < 0,2$ eingehalten wird. Bei $s_{\max}/s_{\min} = 1$ ist zur Einhaltung des Zielwertes ein größerer Eingangswert x erforderlich als bei $s_{\max}/s_{\min} = 2$.

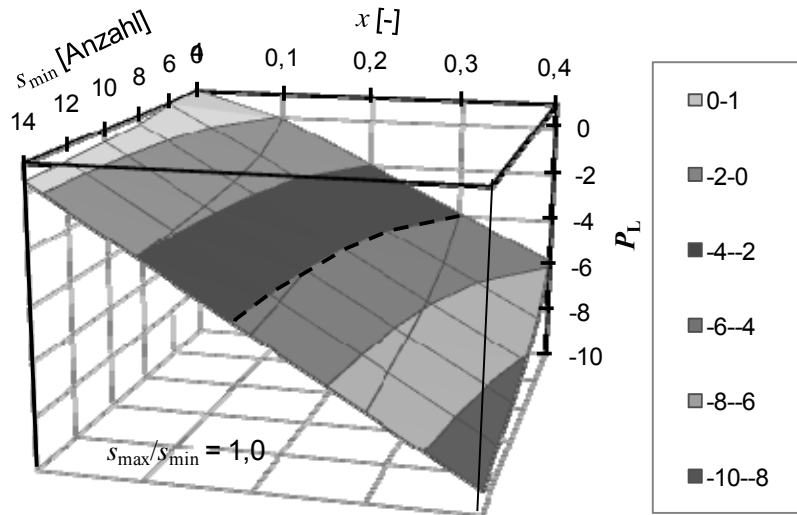


Bild 7.10: Nach Gleichung (7.7) ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeiten P_L in Abhängigkeit von der Spanngliedanzahl s_{\min} und dem Eingangswert x (für $s_{\max}/s_{\min} = 1$)

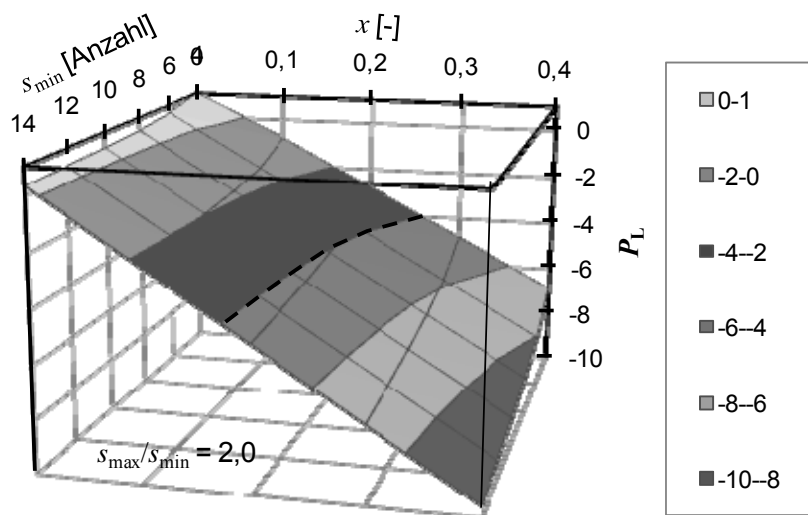


Bild 7.11: Nach Gleichung (7.7) ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeiten P_L in Abhängigkeit von der Spanngliedanzahl s_{\min} und dem Eingangswert x (für $s_{\max}/s_{\min} = 2$)

7.8 Vergleich des vereinfachten und des stochastischen Verfahrens

Zur Veranschaulichung des vereinfachten Ansatzes sind in den nachfolgenden Bildern ausgewählte Ergebnisse des stochastischen Verfahrens zusammen mit dem Geradenansatz des vereinfachten Verfahrens dargestellt. Neben dem linearen Ansatz des vereinfachten Verfahrens sind die Ergebnisse der Untersuchung der verschiedenen Szenarien mit dem stochastischen Verfahren dargestellt. Exemplarisch wurden für alle Darstellungen Szenarien mit zehn Spanngliedern im Feldbereich gewählt. Die beiden jeweils nebeneinander angeordneten Bilder zeigen die Ergebnisse bei $q_k = 1$ und $q_k = 4$ Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten.

Es zeigt sich, dass das vereinfachte Verfahren die mit dem stochastischen Verfahren ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten insbesondere im maßgebenden Bereich um $P_L = -4$ insgesamt gut abbildet. Die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens liegen gegenüber denen des stochastischen Verfahrens in der Regel auf der sicheren Seite. Lediglich in einzelnen Fällen wurden mit dem stochastischem Verfahren geringfügig größere Auftretenswahrscheinlichkeiten als mit dem vereinfachten Verfahren ermittelt. Dies wird hingenommen, da die Unterschiede der Ergebnisse beider Verfahren in diesen Fällen sehr gering sind und da die Effektivität des Verfahrens für die Mehrzahl der Fälle nicht eingeschränkt werden soll. Da die Annahmen des stochastischen Verfahrens auf der sicheren Seite liegen, ist dies nicht als kritisch einzustufen. Insgesamt stellt das vereinfachte Verfahren somit einen guten Kompromiss zwischen einer hohen Genauigkeit und einer möglichst einfachen Anwendbarkeit dar.

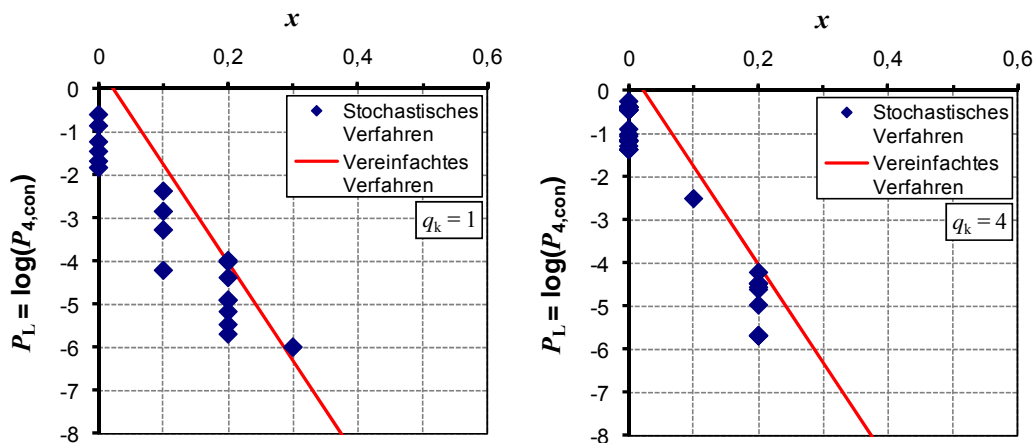


Bild 7.12: Ergebnisse der Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 10$ Spanngliedern ($q_s = 0$ Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl) und $q_k = 1$ bzw. 4 Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten

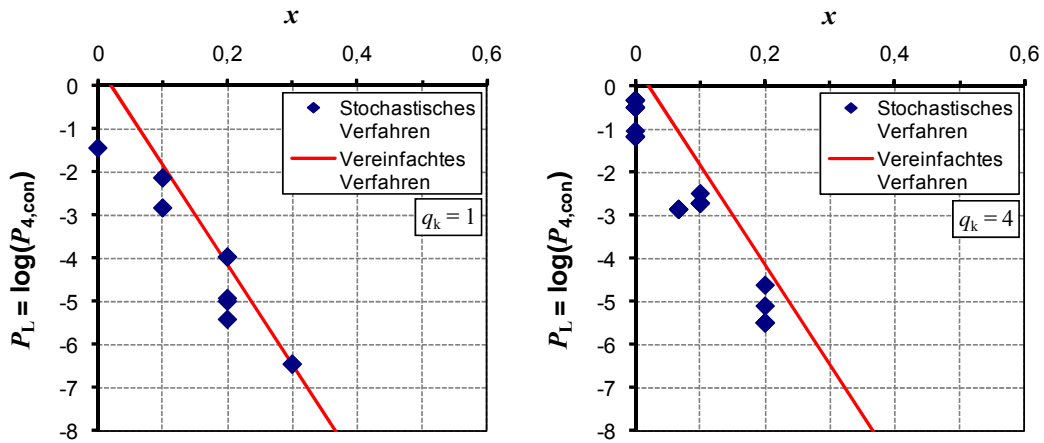


Bild 7.13: Ergebnisse der Szenarien mit $s_{min} = 10$ Spanngliedern und $q_s = 2$ Querschnitten mit $s_{max} = 15$ Spanngliedern und $q_k = 1$ bzw. 4 Querschnitten ohne Ankündungsverhalten

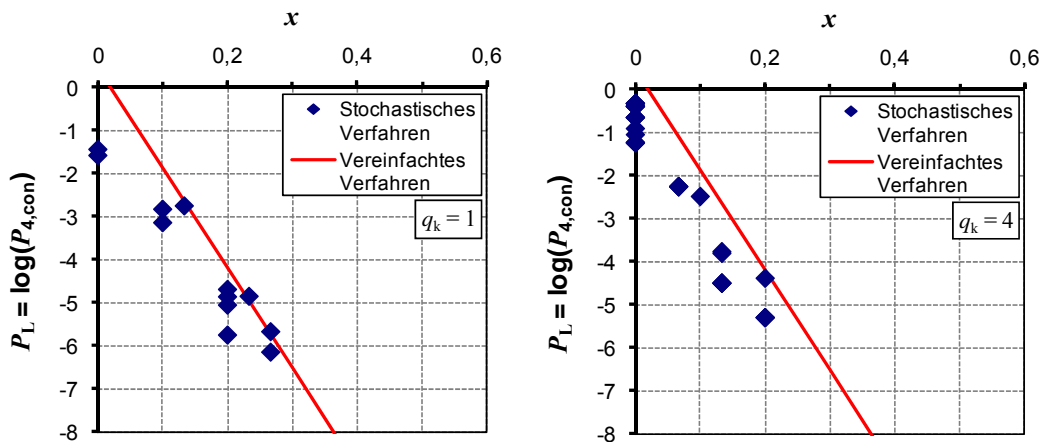


Bild 7.14: Ergebnisse der Szenarien mit $s_{min} = 10$ Spanngliedern und $q_s = 3$ Querschnitten mit $s_{max} = 15$ Spanngliedern und $q_k = 1$ bzw. 4 Querschnitten ohne Ankündungsverhalten

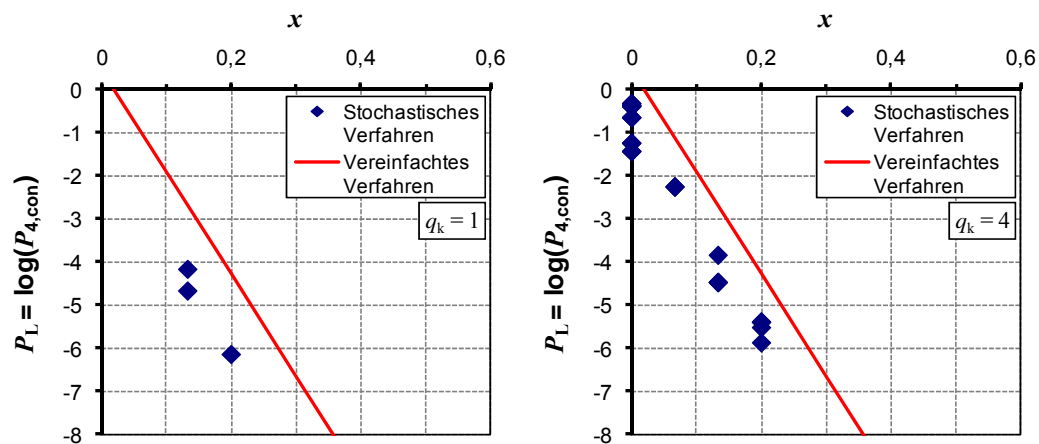


Bild 7.15: Ergebnisse der Szenarien mit $s_{min} = 10$ Spanngliedern und $q_s = 5$ Querschnitten mit $s_{max} = 15$ Spanngliedern und $q_k = 1$ bzw. 4 Querschnitten ohne Ankündungsverhalten

8 Beispielhafte Anwendungen der Verfahren

8.1 Beispiel einer mehrfeldrigen Hohlkastenbrücke

Zur Veranschaulichung des Vorgehens bei der Untersuchung des Ankündigungsverhaltens von Brückenbauwerken mit dem stochastischen und dem vereinfachten Verfahren wird im Folgenden das Ankündigungsverhalten eines siebenfeldrigen Brückenbauwerks bei Ausfall der Längsspannglieder untersucht. Die Spannweiten betragen $47,45\text{ m} - 5 \cdot 60,50\text{ m} - 53,58\text{ m}$. Der Querschnitt der Brücke ist ein zweizelliger Hohlkastenquerschnitt (Bild 8.1). Die Bauhöhe beträgt durchgehend $3,0\text{ m}$. In Längsrichtung sind in jedem Steg 14 Spannglieder mit Spannstahl St 145/160 vom Typ Sigma Oval 40 angeordnet. Jedes Spannglied hat eine Querschnittsfläche von $A_Z = 1320\text{ mm}^2 = 13,2\text{ cm}^2$.

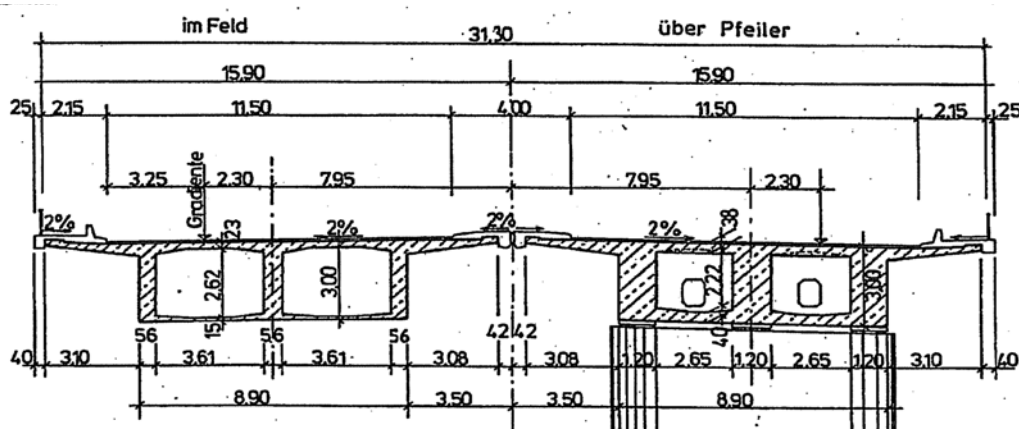


Bild 8.1: Querschnitt der untersuchten Hohlkastenbrücke

Bei der rechnerischen Untersuchung wurden die Innenfelder in 15 Querschnitten und die Endfelder in 13 Querschnitten untersucht. Die querschnittsweise Untersuchung erfolgt für die gesamte Brückenlänge. Die nach [BMV 2009] errechneten Restsicherheiten γ_p sind in Bild 8.2 dargestellt. In den Momentennullpunkten sowie in den Endbereichen der Randfelder ist kein ausreichendes Ankündigungsverhalten vorhanden. Die rechnerische Restsicherheit γ_p ist in diesen Punkten kleiner als 0. Das bedeutet, dass die Restspannstahlfläche bei Rissbildung zusammen mit der Querschnittsfläche der Betonstahlbewehrung nicht ausreicht, um die Einwirkungen aus den ständigen Lasten, dem linearen Temperaturunterschied und dem statisch unbestimmten Anteil des Momentes aus Vorspannung aufzunehmen (vgl. Gleichung 5.4). In

den Stützbereichen kann eine Rissbildung an der Oberseite des Querschnitts wegen des Fahrbahnbelags nicht detektiert werden. Die Berechnung zeigt jedoch, dass bei Detektion einer Rissbildung an der Unterseite der Fahrbahnplatte noch eine ausreichende Restsicherheit vorliegt. Dies ist möglich durch den beim Hohlkastenquerschnitt im Vergleich zum Plattenbalkenquerschnitt tiefer liegenden Schwerpunkt.

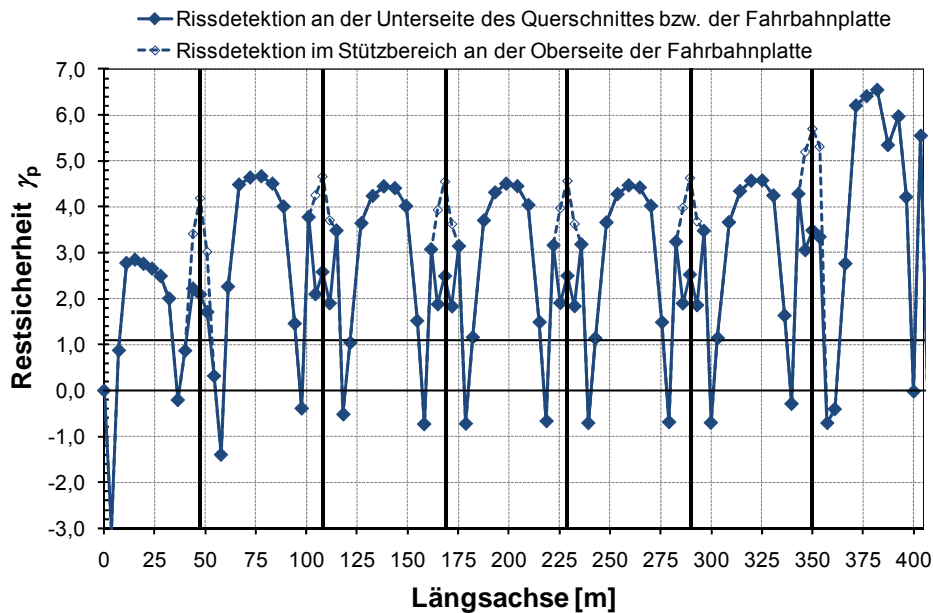


Bild 8.2: Nach [BMV 2009] ermittelte Restsicherheiten γ_p

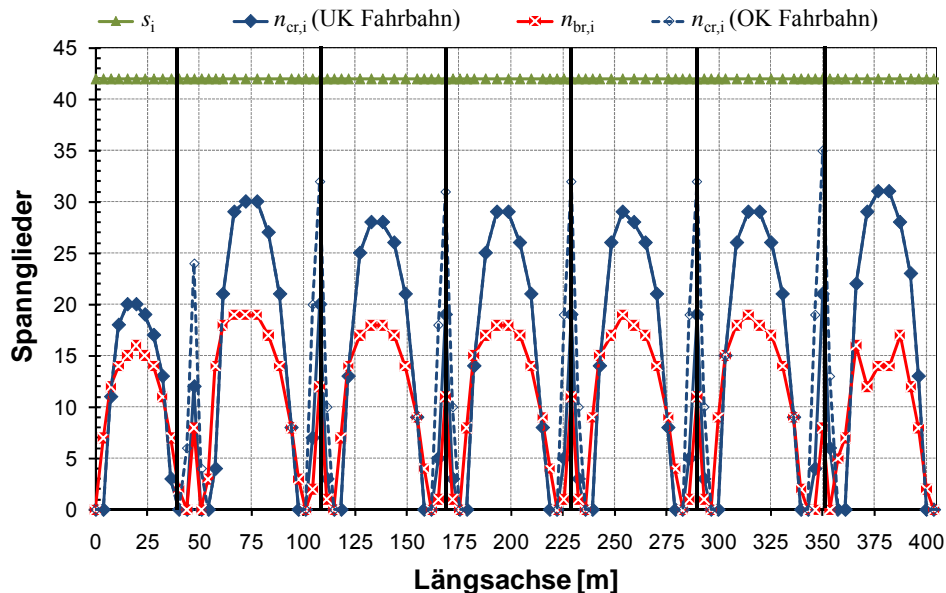


Bild 8.3: Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung $n_{cr,i}$ und erforderliche Restspanngliedanzahlen $n_{br,i}$ zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit

Bild 8.3 zeigt die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung $n_{cr,i}$ sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen $n_{br,i}$ zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit. Hier zeigt sich, dass in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten bei sukzessiv ausfallenden Spanngliedern zunächst die zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderliche Restspanngliedanzahl unterschritten wird, bevor die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung erreicht wird. Für eine Versagensankündigung in den Feldbereichen müssen allerdings deutlich weniger Spannglieder ausfallen als für ein rechnerisches Versagen in Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten.

In Tabelle 8.1 sind die Ergebnisse des Nachweises beispielhaft für einen Steg im vierten Feld dargestellt. Die Spalten (1) bis (3) enthalten Angaben zum jeweiligen Querschnitt sowie zur vorhandenen Spanngliedanzahl. In den Spalten (4) und (5) sind die Ergebnisse der querschnittweisen rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens zusammengefasst. Im Beispiel konnte in den Querschnitten 3 und 11 kein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden ($\gamma_p < 1,10$).

Tabelle 8.1: Ergebnisse der querschnittweisen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens im Feld 4 der Siebenfeldbrücke und Ermittlung der Werte $\kappa_{cr,max}$ und $\kappa_{br,max}$ (für einen Steg)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
i Quer- schnitt	Lage	s_i Anz. Spgl.	γ_p (nach Gl. 5.4)	$A_{Z,r}$ (nach Gl. 5.2)	$n_{cr,i}$	$A_{Z,r,erf}$ (nach Gl. 5.5)	$n_{br,i}$	$\kappa_{cr,i}$ (nach Gl. 7.2)	$\kappa_{br,i}$ (nach Gl. 7.3)
[Nr.]	[m]	[Anz.]	[-]	[cm ²]	[Anz.]	[cm ²]	[Anz.]	[-]	[-]
0	168,45	14	2,49	84,6	6	47,3	4	0,43	(0,29)
1	171,97	14	1,83	13,7	1	1,0	1	0,07	(0,07)
2	175,33	14	3,14	0	0	0	0	0	(0)
3	178,76	14	-0,72	0	0	35,0	3	(0)	0,21
4	182,20	14	1,16	64,8	4	63,6	5	(0,29)	0,36
5	187,70	14	3,70	114,4	8	73,9	6	0,57	(0,43)
6	193,20	14	4,31	128,3	9	79,0	6	0,64	(0,43)
7	198,70	14	4,50	128,2	9	77,9	6	0,64	(0,43)
8	204,20	14	4,45	118,7	8	71,9	6	0,57	(0,43)
9	209,70	14	4,04	95,0	7	59,0	5	0,50	(0,36)
10	215,20	14	1,49	39,6	2	35,6	3	(0,14)	0,21
11	218,64	14	-0,66	0	0	13,7	2	(0)	0,14
12	222,08	14	3,16	0	0	0	0	0	(0)
13	225,43	14	1,90	24,9	1	2,0	1	0,07	(0,07)
14	228,95	14	2,50	86,0	6	48,1	4	0,43	(0,29)

$\kappa_{cr,max} =$	$\kappa_{br,max} =$
0,64	0,36
(nach Gl. 7.4)	(nach Gl. 7.5)

Beim vereinfachten Verfahren werden die Ergebnisse der einzelnen Nachweisschnitte zur Ableitung einer Aussage für das Gesamtsystem in einem Eingangswert zusammengefasst. Der Eingangswert x ermittelt sich aus den Maximalwerten $\kappa_{cr,max}$ und $\kappa_{br,max}$ gemäß Gleichung (7.6) zu:

$$x = \kappa_{cr,max} - \kappa_{br,max} = 0,64 - 0,36 = 0,28$$

Die weiteren erforderlichen Eingangswerte ermitteln sich wie folgt:

Anzahl der Querschnitte:	$q = 15$
Anzahl der Querschnitte mit Spanngliedanzahl s_{max}	$q_s = 15$
Anzahl der Querschnitte mit $n_{br,i} > n_{cr,i}$:	$q_k = 4$
Maximale Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich:	$s_{max} = 14$
Minimale Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich:	$s_{min} = 14$
Parameter a (gemäß Gl. 7.8):	$a = 47/(14 + 15/15 \cdot 0)^{0,1} - 60 = -23,9$
Parameter b (gemäß Gl. 7.9):	$b = 25/(14 + 15/15 \cdot 0)^2 + 0,25 = 0,38$

Die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bestimmt sich hieraus wie folgt:

$$P_L = a \cdot x + b = -23,9 \cdot 0,28 + 0,38 = \underline{-6,31}$$

Die so ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeit liegt deutlich unter dem gemäß [BMV 2009] zulässigen Grenzwert von $P_L = -4,0$. Ein rechnerisches Versagen ohne Vorankündigung ist somit so unwahrscheinlich, dass das Ankündigungsverhalten des untersuchten Bereiches als ausreichend eingestuft wird. Unlogarithmiert ausgedrückt beträgt die Auftretenswahrscheinlichkeit $P_{4,con} = 4,9 \cdot 10^{-7}$.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen des vereinfachten Verfahrens sollte die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung zusätzlich mit dem stochastischen Verfahren ermittelt werden. Bei Anwendung des stochastischen Verfahrens sind in diesem Fall mehr als $1,5 \cdot 10^{51}$ Kombinationen von Spanngliedbrüchen zu untersuchen. Die hohe Anzahl an Kombinationen ergibt sich aus der relativ großen Spanngliedanzahl in Verbindung mit der sehr großen Anzahl von 15 Nachweisquerschnitten je Feld. Zur Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung wurde die Berechnung in 14 parallel durchzuführende Teilrechnungen aufgeteilt. Dennoch war es in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich, das Beispiel nach dem stochastischen Verfahren zu berechnen. Hier zeigt sich ein Vorteil des vereinfachten Verfahrens, mit dem die Untersuchung auch solcher umfangreichen Systeme möglich ist.

8.2 Beispiel einer zweifeldrigen Plattenbalkenbrücke

In diesem Beispiel wird eine Zweifeldbrücke mit Plattenbalkenquerschnitt untersucht (Bild 8.4). Das Bauwerk wurde als Einguss-System hergestellt. Die Felder haben eine Spannweite von jeweils 21,40 m. Die Steghöhe beträgt durchgehend 1,20 m. In Längsrichtung ist das Bauwerk mit Spannstahl St 145/160 vom Typ Sigma Oval 40 vorgespannt. Je Steg sind fünf Spannglieder von Widerlager zu Widerlager durchgeführt und von beiden Seiten vorgespannt. Zusätzlich sind in jedem Feld zwei Spannglieder vorhanden, die hinter der Mittelstütze verankert sind. Die verwendeten Spannglieder haben eine Querschnittsfläche von jeweils $A_z = 1760 \text{ mm}^2 = 17,6 \text{ cm}^2$.

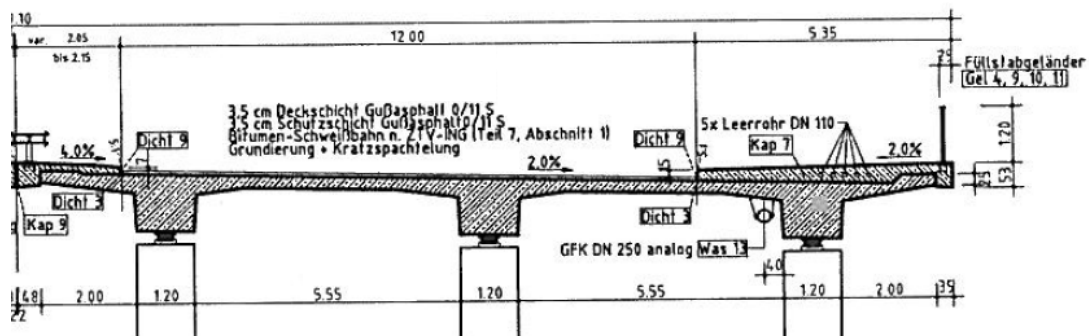


Bild 8.4: Querschnitt der untersuchten Plattenbalkenbrücke (nicht maßstäblich)

Die rechnerische Untersuchung erfolgte in elf Querschnitten je Feld. Bild 8.5 zeigt die nach [BMV 2009] ermittelten Restsicherheiten γ_p . In den Momentennullpunkten sowie im Stützquerschnitt hat das Bauwerk kein ausreichendes Ankündigungsverhalten. Wäre eine Rissbildung an der Oberseite des Bauwerks detektierbar, so wäre im Stützquerschnitt ein Ankündigungsverhalten nachweisbar (gestrichelte Linie).

In Bild 8.6 sind die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung n_{cr} sowie die zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderlichen Restspanngliedanzahlen n_{br} dargestellt. Aufgrund der Abrundung von n_{cr} und der Aufrundung von n_{br} auf ganze Spanngliedanzahlen ergibt sich im Vergleich zu Bild 8.5 in jedem Feld ein weiterer Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten kurz vor dem Widerlager.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Ankündigungsverhaltens eines Feldes sind in Tabelle 8.2 dargestellt. Die Spalten (1) bis (3) enthalten Angaben zum jeweiligen Querschnitt sowie zur vorhandenen Spanngliedanzahl. In den Spalten (4) und (5) sind die Ergebnisse der querschnittweisen rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens zusammengefasst. Im Beispiel konnte in den Querschnitten 9 und 10 kein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden ($\gamma_p < 1,10$).

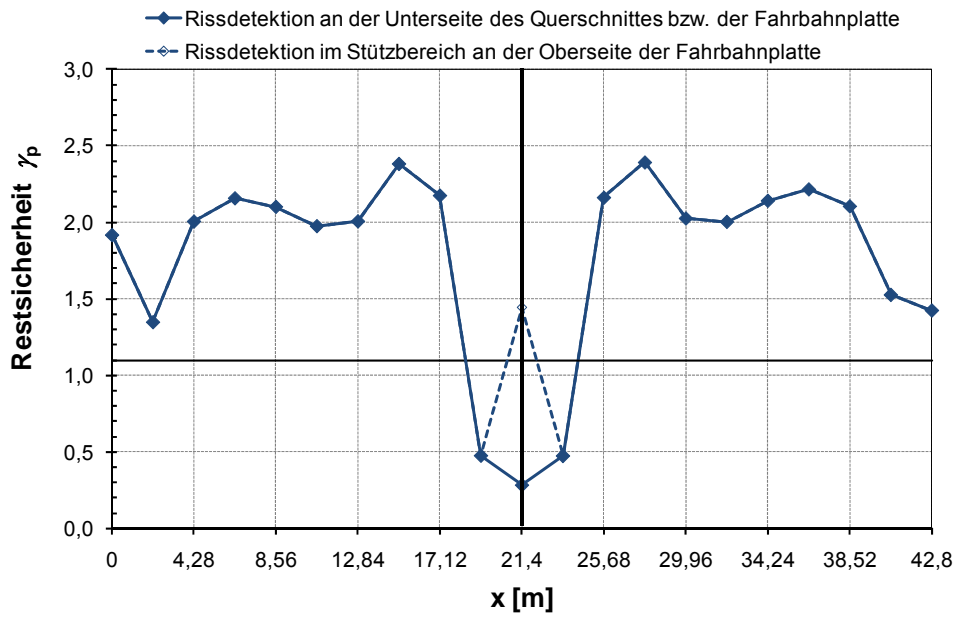


Bild 8.5: Im querschnittweisen rechnerischen Nachweis nach [BMV 2009] ermittelte Restsicherheiten γ_p

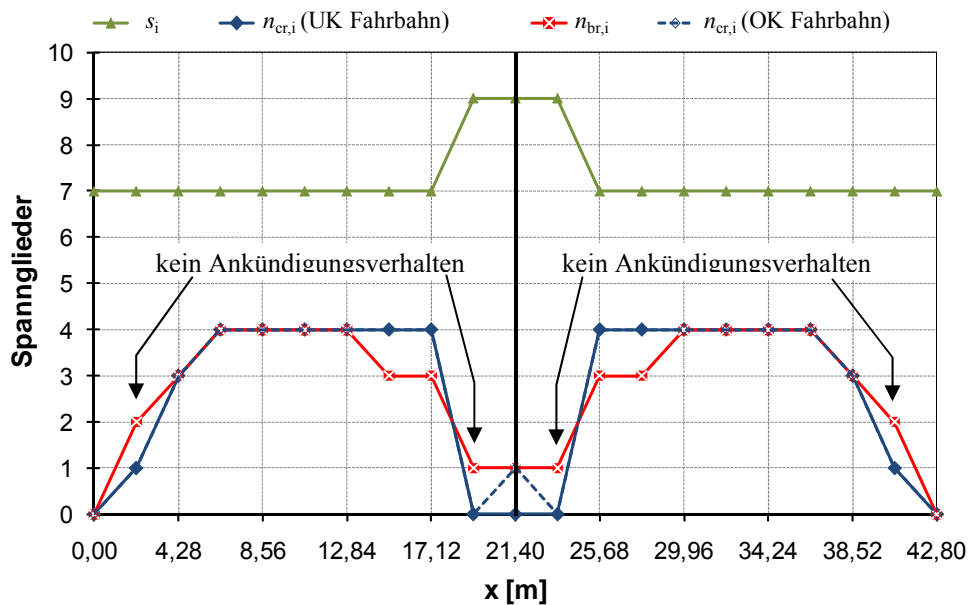


Bild 8.6: Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung $n_{cr,i}$ und erforderliche Restspanngliedanzahlen $n_{br,i}$ zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit für einen Steg

Tabelle 8.2: Ergebnisse der querschnittweisen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens in einem Feld der Zweifeldbrücke und Ermittlung der Werte $\kappa_{cr,max}$ und $\kappa_{br,max}$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
i Quer- schnitt	Lage	s_i Anz. Spgl.	γ_p (nach Gl. 5.4)	$A_{z,r}$ (nach Gl. 5.2)	$n_{cr,i}$	$A_{z,r,erf}$ (nach Gl. 5.5)	$n_{br,i}$	$\kappa_{cr,i}$ (nach Gl. 7.2)	$\kappa_{br,i}$ (nach Gl. 7.3)
[Nr.]	[m]	[Anz.]	[-]	[cm ²]	[Anz.]	[cm ²]	[Anz.]	[-]	[-]
0	0	7	1,92	0	0	0	0	0	(0)
1	2,14	7	1,35	28,6	1	25,4	2	(0,14)	0,29
2	4,28	7	2,01	66,0	3	46,4	3	0,43	(0,43)
3	6,42	7	2,16	79,2	4	53,1	4	0,57	(0,57)
4	8,56	7	2,10	82,5	4	56,8	4	0,57	(0,57)
5	10,70	7	1,98	81,6	4	59,7	4	0,57	(0,57)
6	12,84	7	2,01	80,4	4	58,4	4	0,57	(0,57)
7	14,98	7	2,38	84,3	4	51,2	3	0,57	(0,43)
8	17,12	7	2,18	74,9	4	46,6	3	0,57	(0,43)
9	19,26	9	0,47	0	0	7,6	1	(0)	0,11
10	21,40	9	0,28	0	0	17,4	1	(0)	0,11

$\kappa_{cr,max} =$	$\kappa_{br,max} =$
0,57	0,29
(nach	(nach
Gl. 7.4)	Gl. 7.5)

Der Eingangswert x ermittelt sich aus den Maximalwerten $\kappa_{cr,max}$ und $\kappa_{br,max}$ gemäß Gleichung (7.6) zu:

$$x = \kappa_{cr,max} - \kappa_{br,max} = 0,57 - 0,29 = 0,28$$

Die weiteren erforderlichen Eingangswerte ermitteln sich wie folgt:

Anzahl der Querschnitte: $q = 11$

Anzahl der Querschnitte mit maximaler Spanngliedanzahl: $q_s = 2$

Maximale Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich: $s_{max} = 9$

Minimale Spanngliedanzahl im Untersuchungsbereich: $s_{min} = 7$

Parameter a (gemäß Gl. 7.8): $a = 47/(7 + 2/11 \cdot 2)^{0,1} - 60 = -21,51$

Parameter b (gemäß Gl. 7.9): $b = 25/(7 + 2/11 \cdot 2)^2 + 0,25 = 0,71$

Die approximierte Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bestimmt sich hieraus wie folgt:

$$P_L = a \cdot x + b = -21,51 \cdot 0,28 + 0,71 = \underline{-5,31}$$

Die so ermittelte Auftretenswahrscheinlichkeit $P_L = -5,31$ ($P_{4,\text{con}} = 4,90 \cdot 10^{-6}$) liegt unter dem gemäß [BMV 2009] zulässigen Grenzwert von $P_L = -4,0$. Das Ankündigungsverhalten des Bauwerks kann daher als ausreichend eingestuft werden. Zum Vergleich wurde die Auftretenswahrscheinlichkeit ebenfalls mit dem stochastischen Verfahren bestimmt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit ergibt sich zu $P_L = -6,21$. Das Beispiel zeigt, dass das vereinfachte Verfahren gegenüber dem stochastischen Verfahren auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert. Der Nachweis des Ankündigungsverhaltens ist mit dem vereinfachten Verfahren dennoch möglich.

8.3 Bewertung der angewendeten Verfahren

Die hier vorgestellten Beispiele zeigen, dass sich das Ankündigungsverhalten von Brückenbauwerken mit dem stochastischen und dem vereinfachten Verfahren auch dann nachweisen lässt, wenn bei querschnittweiser Betrachtung einzelne Querschnitte kein Ankündigungsverhalten haben. Die Verfahren liefern bei Ein- und Mehrfeldbrücken sowohl mit Plattenbalken als auch mit Hohlkastenquerschnitten gute Ergebnisse, sofern die bei Rissbildung vorhandene Restspannliedanzahl im Feldbereich größer ist als die erforderliche Restspannliedanzahl zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten.

Das vereinfachte Verfahren liefert in der Regel auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Wenn der Nachweis mit dem vereinfachten Verfahren nicht gelingt, ist der Nachweis mit dem stochastischen Verfahren ggf. noch möglich. Wenn die Anwendungsgrenzen gemäß Kapitel 7.6 nicht eingehalten werden, ist der Nachweis mit dem stochastischen Verfahren zu führen.

Hinsichtlich großer Systeme mit vielen Spannliedern und zahlreichen Untersuchungsquerschnitten in einem Untersuchungsbereich ist das vereinfachte Verfahren jedoch auch dann anwendbar, wenn die Berechnung mit dem stochastischen Verfahren wegen des Berechnungsaufwandes sehr Umfangreich wird.

Unter speziellen, ungünstigen Randbedingungen ist es jedoch möglich, dass der Nachweis des Ankündigungsverhaltens mit dem stochastischen und dem vereinfachten Verfahren nicht gelingt. Nach bisheriger Erfahrung ist dies der Fall, wenn z. B. in einer zu großen Anzahl von Querschnitten kein Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden kann oder wenn der Unterschied zwischen der Restspannliedanzahl bei Rissbildung und der zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderlichen Restspannliedanzahl gering ist. Im letzteren Fall ist es möglich, dass die Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten durch das Auf- bzw. Abrunden der Spannliedanzahlen deutlich zunimmt.

9 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein stochastisches Verfahren zum Nachweis des Ankündigungsverhaltens von älteren Brückenbauwerken beim Ausfall von Spanngliedern infolge von Spannungsrisskorrosion (SRK) vorgestellt. Das Verfahren baut auf den Ergebnissen der querschnittweisen rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens gemäß der „Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrisskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden“ [BMV 2009] auf. Das vereinfachte Verfahren wird als Option für die Beurteilung von Bauwerken mit Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten in die Handlungsanweisung [BMV 2009] aufgenommen, welche zurzeit bearbeitet wird.

Das stochastische Verfahren wird benötigt, da der querschnittweise Nachweis des Ankündigungsverhaltens von älteren bestehenden Brückenbauwerken, welche mit SRK-empfindlichen vergüteten Spannstählen vorgespannt sind, oft nicht in allen Querschnitten gelingt. Ein rechnerisches Versagen tritt in diesen Fällen jedoch häufig erst dann auf, wenn in einem Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten lokal sehr viele Spannglieder ausfallen. Im Gegensatz dazu findet eine Versagensvorankündigung in den Bereichen mit Ankündigungsverhalten, z. B. durch eine Rissbildung im Beton, oft schon nach dem Ausfall weniger Spannglieder statt. Vor diesem Hintergrund erscheint ein plötzliches Versagen ohne Vorankündigung bei vielen betroffenen Bauwerken sehr unwahrscheinlich. Die Auftretenswahrscheinlichkeit konnte jedoch bisher nicht quantifiziert werden. Mit dem vorgestellten stochastischen und dem vereinfachten Verfahren lässt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bestimmen. Auf dieser Grundlage ist eine sichere und wirtschaftliche Beurteilung des Ankündigungsverhaltens von betroffenen Brückenbauwerken möglich.

In *Kapitel 2* wird das Phänomen Spannungsrisskorrosion zunächst aus Sicht der Materialwissenschaften erläutert. Hierbei ist zwischen anodischer und wasserstoffinduzierter (kathodischer) SRK zu unterscheiden. Anodische SRK tritt nur unter kritischen Kombinationen der Einwirkung eines spezifisch wirkenden Angriffsmittels (Promotoren) und eines unter diesen Bedingungen empfindlichen Werkstoffes auf. Aufgrund dieser spezifischen Randbedingungen ist das Auftreten von anodischer SRK in der Baupraxis selten. Aus Bereichen, in denen entsprechende Randbedingungen vorliegen, sind jedoch Schadensfälle bekannt (z. B. SRK-empfindlicher Spannstahl in Verbindung mit Tonerdeschmelzzement in Viehställen). Wesentlich unspezifischer sind die Randbedingungen für wasserstoffinduzierte (kathodische) SRK. Notwendig hierfür sind ein empfindlicher Werkstoff, eine aktive Korrosion oder Depassivierung der Stahloberfläche sowie eine mechanische Zugbeanspruchung des Werkstoffes. Das Ausschalten

einer dieser Randbedingungen reicht aus, um diese SRK zu verhindern. Bei sehr empfindlichen Spannstählen ist dies jedoch baupraktisch kaum möglich, da hier bereits geringste Korrosionsraten (z. B. infolge von Kondenswasser oder Luftfeuchtigkeit) für eine Vorschädigung ausreichen. Der bei der Korrosion entstehende Wasserstoff wird in diesem Fall vom Spannstahl absorbiert und kann zu einer Anrissbildung im Spannstahl führen. Dies kann an jeder Stelle des Spannstahls geschehen.

Für eine bauaufsichtliche Zulassung von Spannstählen sind in der Bundesrepublik Deutschland seit 1978 Korrosionsversuche erforderlich, mit denen die Empfindlichkeit des Spannstahls gegenüber SRK geprüft wird. Die Korrosionsversuche können in einer sehr aggressiven Prüflösung (FIP-Test) oder in einer der Zusammensetzung von Hüllrohrwässern angepassten Prüflösung (DIBt-Test) durchgeführt werden. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Prüflösungen werden in *Kapitel 2* gegenübergestellt.

In *Kapitel 3* werden baupraktische Aspekte der SRK erläutert. Zunächst werden bekannte Schadensfälle und Fälle von Anrissen oder Spannstahlbrüchen infolge von SRK vorgestellt. Die Anzahl der Fälle, bei denen verzögerte Spannstahlbrüche allein auf SRK zurückzuführen sind, ist gering. Aus dem Hochbau sind einige schwerwiegende Schadensfälle bekannt, die allein auf SRK zurückgeführt werden können. Im Brückenbau wurden zwar einzelne Spannstahlbrüche gefunden, schwerwiegendere Schadensfälle sind jedoch nicht bekannt.

Weiterhin werden in *Kapitel 3* die baupraktischen Randbedingungen erläutert, unter denen SRK auftritt oder gefördert wird. Es kann festgestellt werden, dass eine Vorschädigung bzw. Anrissbildung im Spannstahl in der Regel nur im nicht verpressten Zustand auftreten kann. Vorschädigungen können während des Transportes des Spannstahls, bei unsachgemäßer Lagerung auf der Baustelle, durch mechanische Beschädigungen beim Einbau oder im Zeitraum zwischen dem Vorspannen und dem Verpressen der Hüllrohre entstehen. Im verpressten Hüllrohr ist eine Anrissbildung ausgeschlossen, sofern der pH-Wert des Verpressmörtels über 12,6 liegt und sofern keine korrosionsfördernden Substanzen vorhanden sind. Bestehende Anrisse können jedoch auch unter ordnungsgemäßen Bedingungen langsam weiter wachsen und schließlich zum plötzlichen Bruch des Spannstahls führen.

Hinsichtlich der Sicherheit der Bauwerke mit SRK-empfindlichem Spannstahl ist es wichtig, evtl. Anrisse oder Spannstahlbrüche möglichst frühzeitig zu erfassen. In *Kapitel 4* werden bekannte Verfahren zur Detektion von Spannstahlschäden vorgestellt. Hierbei wird zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden. Während bei direkten Verfahren der Spannstahl selber untersucht wird, haben indirekte Verfahren die Detektion von sekundären Effekten zum Ziel, welche durch Spannstahlausfälle verursacht werden. Die gebräuchlichste Methode zur Detektion von Spannstahlschäden ist das Erfassen von sekundären Effekten wie z. B. einer Rissbildung im Beton. Bei den direkten zerstörungsfreien Detektionsverfahren konnten Spannstahlbrüche bislang lediglich mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren zuverlässig detektiert werden. Eine Erfassung von Anrissen ist mit diesem Verfahren jedoch in der Regel nicht möglich. Außerdem ist die Anwendbarkeit bei großen Bauwerken durch die beschränkte Messtiefe auf Bereiche beschränkt, in denen Spannglieder dicht an der Oberfläche verlaufen.

Bei allen Detektionsmethoden zur Erfassung von Spannstahlschäden ist davon auszugehen, dass für eine Detektion ein gewisser Schädigungsgrad erreicht werden muss. Daher ist in jedem Fall der Nachweis des Ankündigungsverhaltens zu führen. Hierbei ist nachzuweisen, dass zum Zeitpunkt der Detektion von Spannstahlbrüchen unter Anrechnung der verbleibenden Restspannstahlfläche eine ausreichende Restsicherheit vorhanden ist. Das Vorgehen beim Nachweis gemäß [BMV 2009] wird in *Kapitel 5* vorgestellt.

Da in älteren Brückenbauwerken im Vergleich zu heutigen Anforderungen häufig relativ wenig Betonstahl vorhanden ist, lässt sich das Ankündigungsverhalten oft nicht in allen Querschnitten nachweisen. Auf der Grundlage des querschnittweisen Nachweises wird in *Kapitel 6* ein stochastisches Verfahren vorgestellt, mit dem die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung für den Fall abgeschätzt werden kann, dass einzelne Querschnitte kein Ankündigungsverhalten haben. Da sich die Wahrscheinlichkeit für Spannstahlbrüche je Zeiteinheit und Längeneinheit angeben lässt, müssen für das stochastische Modell folgende Annahmen getroffen werden:

- 1) Der Spannstahlausfall innerhalb eines Hüllrohres kann örtlich korreliert sein. Hieraus ergibt sich, dass der Spannstahlausfall nicht drahtweise simuliert werden kann. Stattdessen wird der Spannstahlausfall in jeweils $\frac{1}{5}$ jedes Hüllrohres als korreliert angenommen. Für die stochastische Berechnung wird jedes Spannglied daher in fünf effektive Spannglieder unterteilt, welche als unabhängig betrachtet werden.
- 2) Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Spanngliedbrüchen ist längs allen effektiven Spanngliedern gleich verteilt. Die Spanngliedbrüche in den einzelnen effektiven Spanngliedern sind somit örtlich nicht korreliert.
- 3) Die Untersuchung des Ankündigungsverhaltens erfolgt in diskreten Nachweisschnitten.

Unter diesen Annahmen lässt sich durch Simulation von Spanngliedbrüchen die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung ermitteln. Bei der Anwendung des stochastischen Verfahrens entsteht jedoch ein großer Rechenaufwand. In *Kapitel 7* wird daher eine umfangreiche Parametervariation hinsichtlich der Eingangsparameter des stochastischen Verfahrens durchgeführt. Bei der Parametervariation wird festgestellt, dass das Modell u. a. folgende Effekte abbilden kann:

- Einfluss der Differenz zwischen Restspanngliedanzahl bei Rissbildung im Feldbereich und erforderlicher Restspanngliedanzahl zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten
- Abnehmende Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bei zunehmender Anzahl der Spannglieder
- Einfluss der Anzahl der Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten

Zur Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens werden die maßgebenden Eingangsgrößen identifiziert. Hieraus wird ein Eingangsparameter x bestimmt. Unter Berücksichtigung dieses Eingangsparameters lässt sich die maximal zu erwartende Auftretenswahrscheinlichkeit eines

rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung mit einem linearen Ansatz auf der sicheren Seite liegend abschätzen.

Im *Kapitel 8* wird der Nachweis des Ankündigungsverhaltens mit dem vereinfachten und dem stochastischen Verfahren an zwei realen Brückenbauwerken demonstriert. Es wird festgestellt, dass die Verfahren bei Mehrfeldbauwerken mit regelmäßigen Stützweiten in der Regel sehr gute Ergebnisse liefern. Die Grenzen des vereinfachten und des stochastischen Verfahrens werden erreicht, wenn zu viele Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten vorhanden sind oder wenn der Unterschied zwischen der Restspannliedanzahl bei Rissbildung und der zum Nachweis einer ausreichenden Restsicherheit erforderlichen Restspannliedanzahl gering ist.

Mit dem vereinfachten Verfahren wird die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Versagens ohne Vorankündigung in der Regel auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt. Wenn der Nachweis des Ankündigungsverhaltens mit diesem Verfahren nicht gelingt, dann kann mit dem stochastischen Verfahren ggf. dennoch ein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden. Sofern die Anwendungsgrenzen des vereinfachten Verfahrens überschritten werden, ist der Nachweis stets mit dem stochastischen Verfahren zu führen.

Abschließend ist zu bemerken, dass das Ankündigungsverhalten in der vorliegenden Arbeit speziell für Straßenbrücken ausgewertet wurde. Bei Eisenbahnbrücken sind hinsichtlich des querschnittweisen Nachweises ggf. angepasste Annahmen für den querschnittweisen Nachweis des Ankündigungsverhaltens zu treffen. Das gleiche gilt auch für Bauteile im Hochbau. Sofern hier von einer Gefährdung durch SRK auszugehen ist, ist eine regelmäßige Überprüfung der betroffenen Bauteile zur Erfassung eventueller Ankündigungssignale unumgänglich. Die Anwendung des stochastischen und des vereinfachten Verfahrens ist in beiden genannten Fällen jedoch ebenfalls möglich.

Die hier vorgestellten Überlegungen gelten in erster Linie für den Nachweis des Ankündigungsverhaltens bei Ausfall von Spannliedern in Längsrichtung. Hinsichtlich des Nachweises von Brückenbauwerken in Querrichtung sind i. d. R. gesonderte Überlegungen erforderlich, da eine Versagensankündigung hierbei nur an der Unterseite der Fahrbahnplatte detektiert werden kann.

10 Literatur

- [Bergmeister u. Santa 2004] Bergmeister, K.; Santa, U.: Brückeninspektion und -überwachung. In: Bergmeister, K.; Wörner, J.-D. (Hg.): Betonkalender 2004. Band 1, Kapitel VIII, Seiten 407-481. Berlin: Ernst und Sohn, 2004
- [Bertram u. a. 2002] Bertram, D.; Hartz, U.; Isecke, B.; Jungwirth, D.; Litzner, H.-U.; Manleitner, S.; Nürnberger, U.; Riedinger, H.; Rustler, G.; Schießl, P.: Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrisskorrosion an vergütetem Spannstahl in nachträglichem Verbund. In: DIBt-Mitteilungen, Heft 2, 2002
- [Beutel u. a. 2006] Beutel, R.; Hegger, J.; Goralski, C.: Gefährdung von Spannbetonbrücken durch Spannungsrisskorrosion. Erfahrungsbericht zur Untersuchungsmethodik – Dargestellt am Beispiel der Brücke „Bismarkstraße“ im Zuge der A1. In: Freunde des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt e.V. (Hg.): Sicherheitsgewinn durch Monitoring? 2006
- [BMV 1993] Der Bundesminister für Verkehr: Empfehlungen zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St 145/160 Neptun N40 bis 1965 erstellt wurden. Juli 1993, eingeführt mit Schreiben vom 30.07.1993
- [BMV 2009] Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Fassung 2009, zurzeit in Bearbeitung
- [BMV 2011] Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. Ausgabe 05/2011
- [Buba 2005] Buba, R.: Zur stochastischen Zuverlässigkeit bestehender Spannbetonbrücken gegen Ermüdung. Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2005
- [Casas u. Cruz 2003] Casas, J. R.; Cruz, P. J.: Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring. In: Journal of Bridge Engineering (ASCE) 8 (2003), Heft 6 (November-Dezember), Seiten 362-373
- [CEB 1990] CEB (Lausanne): CEB-FIP Model Code 1990. London: Telford, 1990
- [DAfStb 1992] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Entwurf eines Schreibens an die Bauaufsichtsbehörden Betreff: Spannstahlschäden. März 1992, nicht veröffentlicht
- [de Witte u. a. 1989] de Witte, H.J.; v. Lerber, A.: Rekonstruktion der unwettergeschädigten Reussbrücke der Gotthard-Zufahrt im Kanton Uri. In: Messtechnische Briefe 25 (1989), Heft 1, Seiten 1-7

- [DIBt 2004] Deutsches Institut für Bautechnik: Richtlinie für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen für Spannstähle. Berlin: Fassung 2004
- [DIN 1045:1959-11] DIN 1045: Bauwerke aus Stahlbeton. November 1959
- [DIN 1045:1988-07] DIN 1045: Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung. Juli 1988
- [DIN 1045-2:2008-08] DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206. August 2008
- [DIN 1045-3:2008-08] DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung. August 2008
- [DIN 1055-100:2001-03] DIN 1055: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. März 2001
- [DIN 1072:1952-06] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen. Juni 1952
- [DIN 1072:1967-11] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen. November 1967
- [DIN 1072:1985-12] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen. Dezember 1985
- [DIN 1076:1983-03] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung. März 1983
- [DIN 1076:1999-11] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung. November 1999
- [DIN 4227:1953-10] DIN 4227: Spannbeton, Richtlinien für die Bemessung und Ausführung. Oktober 1953
- [DIN 4227:1973-06] Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen. Juli 1973
- [DIN 4227:1979-12] DIN 4227: Spannbeton - Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung. Dezember 1979
- [DIN EN ISO 15630-3:2002-08] DIN EN ISO 15630-3: Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton, Prüfverfahren. Teil 3: Spannstähle (ISO 15630-3:2002), Deutsche Fassung EN ISO 15630-3:2002. August 2002
- [DIN-FB 100:2005] DIN-Fachbericht 100: Beton. 2. Auflage 2005
- [DIN-FB 101:2009-03] DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken. März 2009
- [DIN-FB 102:2009-03] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. März 2009
- [Dohrmann 1995] Dohrmann, B.: Überwachung einer Brücke in England unter Benutzung von Lichtwellenleiter-Sensoren. In: Beton- und Stahlbetonbau 90 (1995), Heft 7, Seiten 170-175
- [EN 206:2001-07] DIN EN 206: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206:2000. Juli 2001

-
- [EN 10138:2006-05] prEN 10138: Prestressing steels. Entwurfsfassung im Weißdruck. Mai 2006
- [Fastenau u. Delille 1972] Fastenau, W.; Delille, J.: Bruchverhalten von gerippten Spanndrähten. In: Beton- und Stahlbetonbau 67 (1972), Heft 9, Seiten 209-212
- [Frey 1988] Frey, R.: Spannungsrisskorrosion. In: Nürnberger, U.; Menzel, K.; Löhr, A.; Frey, R.: Korrosion von Stahl in Beton. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Heft 393, 1988
- [Fuzier u. a. 2005] Fuzier, J.-P.; Ganz, H.-R.; Matt, P.: Durability of post-tensioning tendons. FIB Bulletin Nr. 33, 2005
- [Grimme u. a. 1983] Grimme, D.; Isecke, B.; Nürnberger, U.; Riecke, E.M.; Uhlig, G.: Spannungsrisskorrosion in Spannbetonbauwerken. Düsseldorf: Stahleisen, 1983
- [Hillemeier u. a. 1997] Hillemeier, B.; Flohrer, C.; Schaab, A.: Die zerstörungsfreie Ortung von Spannstahlbrüchen in Spannbeton-Deckenträgern. In: Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), Heft 10, Seiten 268-270
- [Hunkeler u. a. 2005] Hunkeler, F.; Matt, P.; von Matt, U.; Werner, R.: Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. Bundesamt für Strassen. Bericht zum Forschungsauftrag AGB2000/470 (2005)
- [Holst u. a. 2007] Holst, A.; Budelmann, H.; Hariri, K.; Wichmann, H.-J.: Korrosionsmonitoring und Bruchortung in Spannbetonbauwerken – Möglichkeiten und Grenzen. In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 12, Seiten 835-847
- [IBt 1978] Institut für Bautechnik: Richtlinien für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen am Spannstählen. Berlin 1978
- [Isecke 1983] Isecke, B.: Neuartige Korrosionsprobleme an Bündelspanngliedern mit nachträglichem Verbund. In: Die Bautechnik 60 (1983), Heft 1, S. 1-7
- [Isecke u. a. 1995] Isecke, B.; Menzel, K.; Mietz, J. Nürnberger, U.: Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrisskorrosion. In: Beton- und Stahlbetonbau 90 (1995), Heft 5, Seiten 120-123
- [ISIS Canada 2009] www.isiscanada.com, aufgerufen im April 2009
- [Ivanyi u. Buschmeyer 2002] Ivanyi, G.; Buschmeyer, W.: Risse in Spannbetonüberbauten. In: Bautechnik 79 (2002), Heft 5, Seiten 297-305
- [König u. Fehling 1989] König, G., Fehling E.: Zur Rißbreitenbeschränkung bei voll oder beschränkt vorgespannten Betonbrücken. In: Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), Heft 7, Seiten 161-166, Heft 8, Seiten 203-207 und Heft 9, Seiten 238-241
- [König u. a. 1994] König, G.; Tue, V.; Bauer, T.; Pommerening, D.: Ankündigungsverhalten der Spannbetontragwerke. In: Beton- und Stahlbetonbau 89 (1994), Heft 2, Seiten 45-49 und Heft 3, Seiten 76-79

- [König u. a. 1996] König, G.; Tue, V.; Bauer, T.; Pommerening, D.: Schadensablauf bei Korrosion der Spannbewehrung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Schriftenreihe Heft 469, 1996
- [König u. a. 1998a] König, G.; Krumbach, R.; Heyn, A.: Spannungsrißkorrosion von Spannstahl - Vorstellung einer neuen Untersuchungsmethode. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege 6 (2000), Heft 1, Seiten 73-86
- [König u. a. 1998b] König, G.; Schießl, P.; Zilch, K.: Neue Erkenntnisse über die Sicherheit im Spannbetonbau. In: Der Prüfingenieur, Ausgabe 13, Seiten 46-56, Oktober 1998
- [Kordina u. a. 2000] Kordina, K.; Schubert, L.; Troitzsch, U.: Kriechen von Beton unter Zugbeanspruchung. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Schriftenreihe Heft 498, 2000
- [Krumbach u.a. 1997] Krumbach, R.; Meichsner, H.; Schubert, L.: Untersuchungen zur Dauerbeständigkeit von vorgefertigten Spannbeton-Brückenträgern. In: Beton- und Stahlbeton 92 (1997), Heft 12, Seiten 325-331
- [Lankau 1984] Lankau, G.: Produktion und Weiterentwicklung des vergüteten Spannstahls ST 140/160. In: Betontechnik (1984), Heft 2, Seiten 40-44
- [Lenz u. Zilch 2009] Lenz, P.; Zilch, K.: Evaluation of concrete bridges on bavarian state highways for 60 ton trucks. In: The 11th Annual International fib Symposium, London, 2009
- [Leonhardt 1962] Leonhardt, F.: Spannbeton für die Praxis. 2. Auflage. Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 1962
- [Little u. Staehle 2001] Little, B.; Staehle, R.: Fungal Influenced Corrosion in Post-Tension Structures. In: The Electrochemical Society: Interface, Winter 2001, Seiten 44-48 (<http://ecsd.org/>)
- [Macheleidt 2005] Macheleidt, W.: Vortrag beim VSVI-Mecklenburg-Vorpommern, Seminar Brückenbau am 03.03.2005 in Linstow und bei der Brückenprüfertagung am 26.27.04.2005 in Augsburg
- [Menn 1989] Menn, C.: Reussbrücke Wassen – Schadensanalyse und Rekonstruktionskonzept. In: Schweizer Ingenieur und Architekt 107 (1989), Heft 25, Seiten 678-684
- [Menzel u. Nürnberger 1998] Menzel, K.; Nürnberger, U.: Spannungsrissskorrosionsverhalten von Spannstählen mit überhöhter Festigkeit. In: Kurzberichte aus der Bauforschung 39 (1998), Heft 3, Seiten 153-156
- [Merzenich u. Sedlacek 1995] Merzenich, G.; Sedlacek, G.: Hintergrundbericht zum Eurocode 1 - Teil 3.2: „Verkehrslasten auf Straßenbrücken“. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 711, 1995
- [Mietz u. a. 1998] Mietz, J.; Fischer, J.; Isecke, B.: Spannstahlschäden an einem Brückenbauwerk infolge Spannungsrissskorrosion. In: Beton- und Stahlbetonbau 93 (1998), Heft 7, Seiten 195-200

-
- [Mietz 1999] Mietz, J.: Wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion an vergüteten Spannstählen. Bauingenieur, Bd. 74 (1999), Heft 9, Seiten 403-411
- [Mietz u. Isecke 2002] Mietz, J.; Isecke, B.: Analyse von Spannbetonschäden und Strategien zu deren Vermeidung. In: Lange, G.; Pohl, M.: Werkstoffprüfung - Schadensanalyse und Schadensvermeidung. Weinheim: Wiley-VCH, 2002, Seiten 153-158
- [Mietz u. Fischer 2005] Mietz, J.; Fischer, J.: Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Detektion von Spannstahlschäden an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund. In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 8, Seiten 656-663
- [Moersch u. Schießl 2000] Moersch, J.; Schießl, P.: Untersuchungen zum Rißkorrosionsverhalten von Spannstählen unter Betriebsbedingungen. In: Eligehausen, R.; Kordina, K.; Schießl, P.: Bewehrte Betonbauteile unter Betriebsbedingungen. DFG-Forschungsbericht. Weinheim: Wiley-VCH, 2000, Seiten 291-296
- [Moersch 2005] Moersch, J.: Zur wasserstoffinduzierten Spannungsrissskorrosion von hochfesten Spannstählen. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Heft 563, 2005
- [Naumann 1969] Naumann, F. K.: Korrosionsschäden an gespannten Stählen. In: Beton und Stahlbetonbau 64 (1969), Heft 1, Seiten 10-17
- [Naumann 2007] Naumann, J.: Brücken und Schwerverkehr – Wo sind die Grenzen? In: Bauingenieur 82 (2007), Heft 7/8, Seiten 326-332
- [Nürnberger 1980] Nürnberger, U.: Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 308, 1980
- [Nürnberger 1990] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz der Bewehrung im Massivbau. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Heft 405, 1990
- [Nürnberger 1992] Nürnberger, U.: Special corrosion problems in post-tensioned structures. In: Otto Graf Journal 3 (1992), S. 148-163
- [Nürnberger u. a. 1994] Nürnberger, U.; Mietz, J.; Beul, W.: Untersuchungen an Verkehrsbauten aus Spannbeton zur Abschätzung des Gefährdungspotentials infolge Spannungsrissskorrosion der Spannstähle. Abschlussbericht zum BMV-Forschungsvorhaben FE 15.209 R91D, 1994
- [Nürnberger 1995] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Berlin: Bauverlag, 1995
- [Nürnberger u. Beul 2000] Nürnberger, U.; Beul, W.: Wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion von zugschwellbeanspruchten Spannstählen. In: Eligehausen, R.; Kordina, K.; Schießl, P.: Bewehrte Betonbauteile unter Betriebsbedingungen. DFG-Forschungsbericht. Weinheim: Wiley-VCH, 2000, Seiten 304-309
- [Paulson u. a. 2001] Paulson P.; Elliot, J.; Youdan, D.: Continuous acoustic monitoring of bridges. In: Stahlbau 70 (2001), Heft 4, Seiten 245-250
-

- [Rehm u. a. 1981] Rehm, G.; Nürnberger, U.; Frey, R.: Zur Korrosion und Spannungsrißkorrosion von Spannstählen bei Bauwerken mit nachträglichem Verbund. In: Bauingenieur 56 (1981), S. 275-281
- [Rinder 2003] Rinder, T.: Hochfester Beton unter Dauerzuglast. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Schriftenreihe Heft 544, 2003
- [Sawade 1999] Sawade, G.: Anwendung der Methode der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen. In: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung: Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendung zerstörungsfreier Prüfungen (München). DGZfP-Berichtsband 66 CD, Vortrag 7, 1999
- [Scheel 1999] Scheel, H.: Bauwerkseinsatz des Remanenzmagnetismus-Verfahrens: Spanndrahtbruchortung in Spanngliedern einer Fahrbahnplatte der Autobahnbrücke bei Michelsrombach. In: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung: Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendung zerstörungsfreier Prüfungen (München). DGZfP-Berichtsband 66 CD, Plakat 16, 1999
- [Scheel 2006] Scheel, H.: Spanndrahtbruchortung mit der magnetischen Streufeldmethode. In: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 8, Seiten 614-621
- [Schlaich u. a. 1980] Schlaich, J.; Kordina, K.; Engell, H.-J.: Teileinsturz der Kongreßhalle Berlin – Schadensursachen. In: Beton- und Stahlbetonbau 75 (1980), Heft 12, Seiten 281-294
- [SIA 1985a] ohne Verfasser: Deckeneinsturz im Hallenbad Uster. In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1985), Nr. 21, Seiten 509-510
- [SIA 1985b] ohne Verfasser: Deckeneinsturz im Hallenbad Uster vom 9. Mai 1985. In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1985), Nr. 23, Seiten 566-568
- [Stolte 1963] Stolte, E.: Über die Spannungsrissskorrosion an Spannstählen. In: Beton- und Stahlbetonbau 63 (1968), Heft 5, Seiten 116-118
- [StraßenNRW 2009] Landesbetrieb Straßenbau NRW: Protokolle über die Sitzungen des Arbeitskreises „Versagensvorankündigung bei Spannstahlausfall“. Unveröffentlicht
- [Stratmann u. a. 2008] Stratmann, R.; Birtel, V.; Mark, P.; Neuß, H.; Niemeier, W.; Riedel, B.; Ziem, E.: Digitale Erfassung und Bewertung von Rissen. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 4, Seiten 252-261
- [TGL 0-4227:1963-05] DDR-Standard: Spannbeton, Berechnung und Ausführung. Mai 1963
- [Trost u. a. 1980] Trost, H.; Cordes, H.; Thormählen, U.; Hagen, H.: Verbundverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Schriftenreihe Heft 310, 1980
- [Vehovar u. a. 1998] Vehovar, L.; Kuhar, V.; Vehovar, A.: Hydrogen-Assisted Stress-Corrosion of Prestressing Wires in a Motorway Viaduct. In: Engineering Failure Analysis 5 (1998), Heft 1, Seiten 21-27

-
- [Vill 2005] Vill, M.: Zum Tragverhalten von Massivbrücken mit geschädigten Spanngliedern. Dissertation am Institut für Tragkonstruktionen, Technische Universität Wien, 2005
- [Wölfel 1992] Wölfel, E.: Einzelne Spannbetonbauwerke möglicherweise durch verzögerte Spannstahlbrüche gefährdet. Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), Heft 6, Seiten 155-156
- [Zichner 1976] Zichner, T.: Temperaturunterschied infolge Witterungseinfluss und Beheizung von massiven Brücken. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 212, 1976
- [Zilch u. Müller 1996] Zilch, K.; Müller, H.H.: Bericht über Untersuchungen an einem gebrochenen Spannbetonbinder. Bericht Nr. 1376 des Lehrstuhls für Massivbau, Technische Universität München, 1996
- [Zilch u. Müller 1999] Zilch, K.; Müller, H.H.: Unterschiedliches Spannungsrisssverhalten der verschiedenen Spannstähle. Abschlussbericht des Lehrstuhls für Massivbau, Technische Universität München zum DIBt-Forschungsvorhaben IV 1-5-831/97, 1999
- [Zilch u. Zehetmaier 2006] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Berlin: Springer-Verlag, 2006
- [Zilch u. a. 2008a] Zilch, K.; Weiher, H.; Gläser, Ch.: Monitoring im Betonbau. In: Bergmeister, K.; Wörner, J.-D. (Hg.): Betonkalender 2009. Band 2, Seiten 135-183. Berlin: Ernst & Sohn, 2009
- [Zilch u. a. 2008b] Zilch, K.; Penka, E.; Hennecke, M.; Willberg, U.; Wunderlich, T.; Schäfer, T.: Bridge monitoring while partial demolition under traffic. In: IABMAS 2008, The Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. 13. bis 17. Juli 2008, Seoul, Korea
- [ZTV-ING:2006-07] Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING. Teil 3: Massivbau. 2006

Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

A	Berechnungsablauf beim stochastischen Verfahren.....	117
B	Verteilungsfunktionen für Spanngliedbrüche in einem Querschnitt.....	122
C	Durchgeführte Parametervariation.....	126
C.1	Konstante Anzahl von Spanngliedern.....	126
C.1.1	Allgemeines	126
C.1.2	Ergebnisse	127
C.2	Ein Querschnitt mit vergrößerter Spanngliedanzahl.....	138
C.2.1	Allgemeines	138
C.2.2	Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert	139
C.2.3	Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert	147
C.3	Zwei Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl	154
C.3.1	Allgemeines	154
C.3.2	Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert	155
C.3.3	Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert	160
C.4	Drei Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl.....	167
C.4.1	Allgemeines	167
C.4.2	Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert	168
C.4.3	Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert	174
C.5	Vier Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl.....	181
C.5.1	Allgemeines	181
C.5.2	Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert	182
C.5.3	Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert	188
C.6	Fünf Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl	196
C.6.1	Allgemeines	196
C.6.2	Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert	197
C.6.3	Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert	203

A Berechnungsablauf beim stochastischen Verfahren

Zur Veranschaulichung des Ablaufes der Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung wird die Berechnung im Folgenden an dem Beispiel in Bild A.1 dargestellt. Auch das hier vorgestellte Beispiel bildet keine realen Verhältnisse ab, sondern dient lediglich zur Darstellung des Berechnungsgangs.

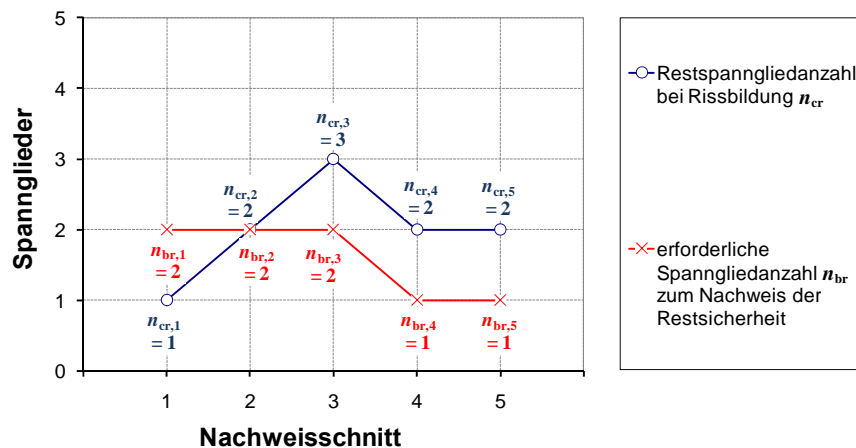


Bild A.1: Gedachtes Ergebnis einer rechnerischen Untersuchung des Ankündigungsverhaltens an einem Feld mit $s' = 4$ effektiven Spanngliedern in $q = 5$ Nachweisschnitten

Bei dem in Bild A.1 dargestellten Szenario ist im Querschnitt 1 kein Ankündigungsverhalten vorhanden. Bei einem sukzessiven Spanngliedausfall wird hier zuerst die erforderliche Restspanngliedanzahl $n_{br,1}$ unterschritten, bevor die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung $n_{cr,1}$ erreicht wird. Eine ausreichende Restsicherheit ist ab vier Spanngliedbrüchen nicht mehr gegeben. In den anderen Querschnitten ist ein ausreichendes Ankündigungsverhalten vorhanden. Hier tritt bei drei bzw. zwei verbleibenden Restspanngliedern eine Vorankündigung durch Rissbildung ein. Damit ein rechnerisches Versagen ohne Vorankündigung auftritt, darf in diesen Querschnitten die Restspanngliedanzahl bei Rissbildung nicht erreicht werden.

Die maximal mögliche Spanngliedbruchanzahl beträgt $i_{max} = q \cdot s = 5 \cdot 5 = 25$. Die im Rahmen des stochastischen Verfahrens durchzuführende Berechnung ist in Tabelle A.1 dargestellt. Bild A.2 zeigt die Ergebnisse im Diagramm.

Tabelle A.1: Zwischenergebnisse bei Anwendung des stochastischen Verfahrens

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
i	$N(i)$	$N_4(i)$	$P_4(i)$	$N_2(i)$	$P_2(i)$	Fall 4: Anz. Var. mit $i-1$ Brüchen	Fall 4: Anz. Var. mit Fall 2 bei $i-1$ Br.	$P(F(i-1)=2 F(i)=4)$
Anzahl Spgl.- Brüche	Anzahl mögl. Komb.	Anzahl Komb. Fall 4	$N_4(i)/N(i)$	Anzahl Komb. Fall 2	$N_2(i)/N(i)$			
0	1	0	0	1	1	0	0	0
1	25	0	0	25	1	0	0	0
2	300	0	0	290	0,9666667	0	0	0
3	2300	0	0	2060	0,8956522	0	0	0
4	12650	5	0,0003953	9925	0,784585	120	120	1
5	53130	101	0,001901	33925	0,6385281	12120	9600	0,792079208
6	177100	920	0,0051948	83500	0,471485	6,624E+05	4,320E+05	0,652173913
7	480700	4930	0,0102559	146750	0,305284	2,485E+07	1,368E+07	0,550565054
8	1081575	16825	0,015556	177500	0,1641125	6,784E+08	3,200E+08	0,471768202
9	2042975	36925	0,0180741	135000	0,0660801	1,340E+10	5,443E+09	0,406228964
10	3268760	49250	0,0150669	50000	0,0152963	1,787E+11	6,169E+10	0,345177665
11	4457400	33500	0,0075156	0	0	1,337E+12	3,629E+11	0,27137038
12	5200300	5000	0,0009615	0	0	--	0	
13	5200300	0	0	0	0	--	0	
14	4457400	0	0	0	0	--	0	
15	3268760	0	0	0	0	--	0	
16	2042975	0	0	0	0	--	0	
17	1081575	0	0	0	0	--	0	
18	480700	0	0	0	0	--	0	
19	177100	0	0	0	0	--	0	
20	53130	0	0	0	0	--	0	
21	12650	0	0	0	0	--	0	
22	2300	0	0	0	0	--	0	
23	300	0	0	0	0	--	0	
24	25	0	0	0	0	--	0	
25 = i_{\max}	1	0	0	0	0	--	0	

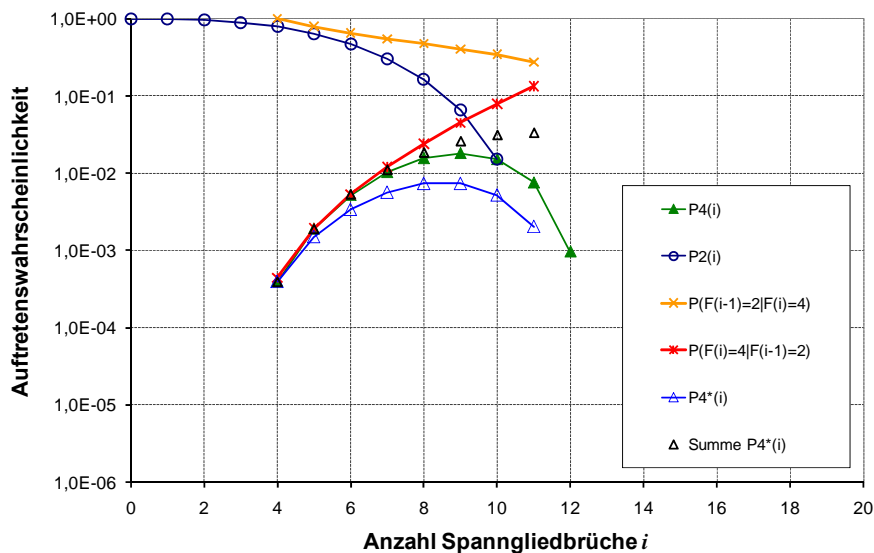


Bild A.2: Darstellung der Ergebnisse des stochastischen Verfahrens

In der ersten Spalte von Tabelle A.1 ist die Gesamtanzahl der Spanngliedbrüche aufgeführt. Die zweite Spalte enthält die nach Gleichung (6.2) ermittelte Gesamtanzahl der möglichen Kombinationen. Die Ergebnisse von Gleichung (6.2) lassen sich mit dem Pascal'schen Dreieck anschaulich darstellen. Sie entsprechen der Zeile i_{\max} des Pascal'schen Dreiecks. Im vorliegenden Beispiel gibt es 5.200.300 mögliche Kombinationen, um 12 bzw. 13 Spanngliedbrüche auf die $i_{\max} = 25$ möglichen Positionen zu verteilen.

Zur Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit P_4 sind für jede Anzahl von Spanngliedbrüchen die Anzahl der Kombinationen zu ermitteln, welche die Bedingungen des Falls 4 erfüllen. Eine Kombination wird dem Fall 4 zugeordnet, wenn keine Rissbildung in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten stattfindet und wenn die erforderliche Restspanngliedanzahl in mindestens einem Querschnitt ohne Ankündigungsverhalten unterschritten wird. Zur Ermittlung der Anzahl dieser Kombinationen liegt kein geschlossener mathematischer Ansatz vor. Es müssen daher alle möglichen Kombinationen untersucht und einem Fall gemäß Tabelle 6.1 zugeordnet werden.

Die Ermittlung der Anzahl der Kombinationen $N_4(i)$ in der Spalte 3 von Tabelle A.1 wird in Tabelle A.2 dargestellt. Hier werden in Zeile 1 zuerst Kombinationen mit vier Spanngliedbrüchen untersucht. Es wird mit vier Spanngliedbrüchen begonnen, da ein rechnerisches Versagen ab vier Spanngliedbrüchen möglich ist. Dies ist der Fall, wenn alle vier Brüche im Querschnitt 1 liegen und in den Querschnitten 2 bis 5 keine Spanngliedbrüche auftreten. Zur Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit ist die Anzahl der Kombinationen für diese Verteilung von Spanngliedbrüchen zu ermitteln. Hierfür wird berechnet, wie viele Möglichkeiten es gibt, die in einem Querschnitt auftretenden Spanngliedbrüche auf die in diesem Querschnitt vorhandenen Spannglieder zu verteilen. Die Anzahl dieser Möglichkeiten kann nach Gleichung (A.2) bestimmt werden.

$$N_i(i_i) = \binom{s_i}{i_i} = \frac{s_i!}{i_i! \cdot (s_i - i_i)!} \quad (\text{A.2})$$

mit $N_i(i_i)$ = Anzahl der möglichen Kombinationen mit i_i Spanngliedbrüchen im Querschnitt i
 s_i = Anzahl der Spannglieder im Querschnitt i
 i_i = Anzahl von Spanngliedbrüchen im Querschnitt i

Es gibt fünf Möglichkeiten, vier Spanngliedbrüche auf fünf Spannglieder zu verteilen. Die Anzahl der Möglichkeiten im ersten Querschnitt beträgt im vorliegenden Beispiel daher fünf. In den Querschnitten 2 bis 5 sind keine Spanngliedbrüche vorhanden. Wird $i_i = 0$ in Gleichung (A.2) eingesetzt, so ergibt sich rechnerisch jeweils eine Möglichkeit, null Spanngliedbrüche auf fünf Spannglieder zu verteilen. Da jede Verteilung von Spanngliedbrüchen in einem Querschnitt mit den Verteilungen von Spanngliedbrüchen in den anderen Querschnitten zusammen auftreten kann, sind die Anzahlen der Möglichkeiten in den einzelnen Querschnitten zur Ermittlung der Anzahl der möglichen Kombinationen zu multiplizieren. Im Vorliegenden Fall ergeben sich bei vier Spanngliedbrüchen somit $5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 5$ Kombinationen (vgl. Tabelle A.2, Spalte 14). Zusammen mit der Gesamtanzahl der $N_i(i) = 12650$ möglichen Kombinationen, vier Spann-

gliedbrüche auf $i_{\max} = 25$ Positionen zu verteilen, ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines rechnerischen Versagens ohne Vorankündigung bei vier Spanngliedbrüchen zu $P_4 = 5 / 12650 = 0,000395$ (vgl. Tabelle A.1, Spalte 4).

Tabelle A.2: Ermittlung der möglichen Kombinationen mit Fall 4

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
Zeile	$i_j =$ Bruchanzahl je Querschnitt					$i =$ Anzahl Spgl.- Brüche insges.	Anzahl Kombinationen innerhalb des jew. Querschnittes					Produkt = Anzahl mgl. Komb.	Summe
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
1	4	0	0	0	0	4	5	1	1	1	1	5	5
2	5	0	0	0	0	5	1	1	1	1	1	1	101
3	4	1	0	0	0	5	5	5	1	1	1	25	
4	4	0	1	0	0	5	5	1	5	1	1	25	
5	4	0	0	1	0	5	5	1	1	5	1	25	
6	4	0	0	0	1	5	5	1	1	1	5	25	
7	5	1	0	0	0	6	1	5	1	1	1	5	
8	5	0	1	0	0	6	1	1	5	1	1	5	
9	5	0	0	1	0	6	1	1	1	5	1	5	
10	5	0	0	0	1	6	1	1	1	1	5	5	
11	4	2	0	0	0	6	5	10	1	1	1	50	
12	4	0	0	2	0	6	5	1	1	10	1	50	
13	4	0	0	0	2	6	5	1	1	1	10	50	
14	4	1	1	0	0	6	5	5	5	1	1	125	
15	4	1	0	1	0	6	5	5	1	5	1	125	
16	4	1	0	0	1	6	5	5	1	1	5	125	
17	4	0	1	1	0	6	5	1	5	5	1	125	
18	4	0	1	0	1	6	5	1	5	1	5	125	
19	4	0	0	1	1	6	5	1	1	5	5	125	
20	5	2	0	0	0	7	1	10	1	1	1	10	4930
21	5	0	0	2	0	7	1	1	1	10	1	10	
22	5	0	0	0	2	7	1	1	1	1	10	10	
23	5	1	1	0	0	7	1	5	5	1	1	25	
24	5	1	0	1	0	7	1	5	1	5	1	25	
25	5	1	0	0	1	7	1	5	1	1	5	25	
26	5	0	1	1	0	7	1	1	5	5	1	25	
27	5	0	1	0	1	7	1	1	5	1	5	25	
28	5	0	0	1	1	7	1	1	1	5	5	25	
29	4	2	1	0	0	7	5	10	5	1	1	250	
30	4	2	0	1	0	7	5	10	1	5	1	250	
31	4	2	0	0	1	7	5	10	1	1	5	250	
32	4	1	0	2	0	7	5	5	1	10	1	250	
33	4	0	1	2	0	7	5	1	5	10	1	250	
34	4	0	0	2	1	7	5	1	1	10	5	250	
35	4	1	0	0	2	7	5	5	1	1	10	250	
36	4	0	1	0	2	7	5	1	5	1	10	250	
37	4	0	0	1	2	7	5	1	1	5	10	250	
38	4	1	1	1	0	7	5	5	5	5	1	625	
39	4	1	1	0	1	7	5	5	5	1	5	625	
40	4	1	0	1	1	7	5	5	1	5	5	625	
41	4	0	1	1	1	7	5	1	5	5	5	625	

In den Zeilen 2 bis 6 von Tabelle A.2 sind Kombinationen mit insgesamt fünf Spanngliedbrüchen aufgeführt. Hier ist zunächst der Fall zu untersuchen, dass alle fünf Brüche im Querschnitt 1 auftreten. Hier ergibt sich eine Möglichkeit, fünf Brüche auf fünf Spannglieder zu verteilen. In den übrigen Querschnitten gibt es jeweils auch eine Möglichkeit, null Spanngliedbrüche auf fünf Spannglieder zu verteilen. Das Produkt dieser Möglichkeiten ergibt eine Kombination. Wenn im Querschnitt 1 nur vier Brüche vorhanden sind, so kann ein weiterer Bruch an beliebiger Stelle in den übrigen Querschnitten auftreten. Es gibt jeweils fünf Möglichkeiten, einen oder vier Brüche auf fünf Spannglieder zu verteilen. Das Produkt der Möglichkeiten ist daher 25. Die Summe der Kombinationen mit insgesamt fünf Spanngliedbrüchen ergibt 101 mögliche Kombinationen. Gemäß Tabelle A.1 ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit P_4 bei fünf Spanngliedbrüchen zu 0,0019.

Auch für höhere Anzahlen von Spanngliedbrüchen entsprechen die in der letzten Spalte von Tabelle A.2 angegebenen Summen der möglichen Kombinationen den Werten in der Spalte $N_4(i)$ der Tabelle A.1. Die Anzahlen der $N_2(i)$ möglichen Kombinationen im Fall 2 sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit P_2 werden auf die gleiche Art ermittelt.

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit $P(F(i-1) = 2 | F(i) = 4)$ (Spalte 9 in Tabelle A.1) erfolgt durch Untersuchung der Bruchverteilungen, welche der jeweils aktuellen Bruchverteilung vorangegangen sind. Für die Zeilen 2 bis 6 der Tabelle A.2 ist die Ermittlung von $P(F(i-1) = 2 | F(i) = 4)$ in Tabelle A.3 dargestellt.

Tabelle A.3: Ermittlung der Wahrscheinlichkeit $P(F(i-1) = 2 | F(i) = 4)$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Zeile	$i_j =$ Bruchanzahl im Quer. j Bruchanz. im Quer. j bei Red. der Gesamtbruchanz. um 1					Anzahl Spgl.- Brüche insges.	Fall	Anzahl Variationen innerhalb des jew. Querschnittes					Anzahl mgl. Var. mit i Brüchen	Anzahl mgl. Var. mit $(i-1)$ Br.	Anzahl mgl. Var. mit i Brüchen:	
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			insges.	Fall 2
2	5	0	0	0	0	5		120	1	1	1	1	120			
	4	0	0	0	0	4	4	120	1	1	1	1		120	120	
3	4	1	0	0	0	5		120	5	1	1	1	3000			
	3	1	0	0	0	4	2	60	5	1	1	1		1200	2400	2400
	4	0	0	0	0	4	4	120	1	1	1	1		120	600	
4	4	0	1	0	0	5		120	1	5	1	1	3000			
	3	0	1	0	0	4	2	60	1	5	1	1		1200	2400	2400
	4	0	0	0	0	4	4	120	1	1	1	1		120	600	
5	4	0	0	1	0	5		120	1	1	5	1	3000			
	3	0	0	1	0	4	2	60	1	1	5	1		1200	2400	2400
	4	0	0	0	0	4	4	120	1	1	1	1		120	600	
6	4	0	0	0	1	5		120	1	1	1	5	3000			
	3	0	0	0	1	4	2	60	1	1	1	5		1200	2400	2400
	4	0	0	0	0	4	4	120	1	1	1	1		120	600	
														Summe:	12120	9600
														$P(F(i-1)=2 F(i)=4)$:	0,79208	

B Verteilungsfunktionen für Spanngliedbrüche in einem Querschnitt

Zur Veranschaulichung der rechnerischen Verteilung von Spanngliedbrüchen werden im Folgenden die Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmter Spanngliedbruchanzahlen in einem Querschnitt bestimmt. Anhand dieser Untersuchung lassen sich Verteilungsfunktionen für die Auftretenswahrscheinlichkeiten verschiedener Bruchanzahlen in einem Querschnitt angeben.

Für die Untersuchung wird das stochastische Modell gemäß Kapitel 6.3.1 verwendet. Gemäß Bild B.1 werden j Spanngliedbrüche in einem beliebigen Querschnitt sowie $(i - j)$ Spanngliedbrüche in den übrigen Querschnitten angenommen. Die Anzahl der N_j Möglichkeiten, bei denen von i Brüchen insgesamt j Brüche in einem bestimmten Querschnitt auftreten, ermittelt sich nach Gleichung (B.1). Die Anzahl ergibt sich aus der Anzahl der Möglichkeiten, $(i - j)$ Brüche auf $\{(q - 1) \cdot s\}$ verbleibende Spanngliedabschnitte zu verteilen, multipliziert mit der Anzahl der Möglichkeiten, j Risse innerhalb des untersuchten Querschnittes zu verteilen.

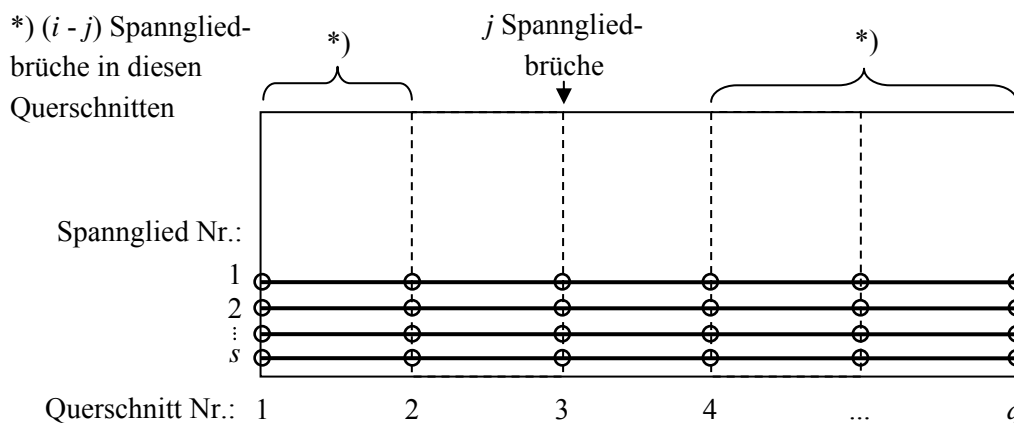


Bild B.1: Modell eines Untersuchungsbereiches mit s Spanngliedern und q Nachweisschnitten

$$N_j = \binom{(q-1) \cdot s}{(i-j)} \cdot \binom{s}{j} = \frac{\{(q-1) \cdot s\}!}{\{i-j\}! \cdot \{(q-1) \cdot s\} - \{i-j\}!} \cdot \frac{s!}{j! \cdot [s-j]!} \quad (\text{B.1})$$

mit: j = Anzahl der Brüche im betrachteten Querschnitt

Die Auftretenswahrscheinlichkeit, dass j Spanngliedbrüche im untersuchten Querschnitt auftreten, lässt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der Möglichkeiten N_j zur Anzahl aller Möglichkeiten N_i bestimmen (Gleichung B.2).

$$P_j = \frac{N_j}{N_i} \quad (\text{B.2})$$

mit: N_j gemäß Gleichung (B.1)
 N_i gemäß Gleichung (6.1)

Trägt man die Anzahl der in einem Querschnitt vorhandenen Spanngliedbrüche auf der x-Achse und die gemäß Gleichung (B.2) errechnete Auftretenswahrscheinlichkeit auf der y-Achse auf, so erhält man für jede Anzahl der Spanngliedbrüche im untersuchten Feld eine Verteilungsfunktion der Auftretenswahrscheinlichkeit (Bild B.2 und Bild B.3). Diese Kurven sind bekannt als *Hypergeometrische Verteilung*.

Bild B.2 zeigt die Auftretenswahrscheinlichkeiten von j Spanngliedbrüchen in einem Querschnitt bei Annahme von $q = 10$ Querschnitten mit $s = 14$ Spanngliedern. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von $j = 0$ Spanngliedbrüchen im untersuchten Querschnitt beträgt bei Annahme einer Gesamtanzahl von $i = 0$ Spanngliedbrüchen erwartungsgemäß $P = 1,0$. Bei Annahme einer Gesamtanzahl von $i = 1$ Spanngliedbrüchen beträgt die Auftretenswahrscheinlichkeit für $j = 1$ Spanngliedbrüche im untersuchten Querschnitt $P = 1/10 = 0,1$. Dies ergibt sich daraus, dass bei insgesamt $q = 10$ Untersuchungsquerschnitten eine Wahrscheinlichkeit von $P = 0,1$ besteht, dass der Spanngliedbruch in dem einen untersuchten Querschnitt auftritt. Entsprechend ergibt sich für $j = 0$ Spanngliedbrüche im untersuchten Querschnitt $P = 9/10 = 0,9$.

Bei höheren Gesamtanzahlen von Spanngliedbrüchen zeigt sich, dass es bei einer bestimmten gegebenen Gesamtanzahl von Spanngliedbrüchen jeweils eine bestimmte Anzahl von Spanngliedbrüchen im untersuchten Querschnitt gibt, welche die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit hat. Bei der beispielhaften Betrachtung eines Untersuchungsbereiches mit $s = 14$ Spanngliedern und $q = 10$ Untersuchungsquerschnitten sowie einer angenommenen Anzahl von $i = 60$ Spanngliedbrüchen ist es z. B. am wahrscheinlichsten, dass $j = 6$ Spanngliedbrüche je Querschnitt auftreten, was einer gleichmäßigen Verteilung der $i = 60$ Spanngliedbrüche auf die $q = 10$ Querschnitte entspricht. Unter den getroffenen Annahmen ist es also am wahrscheinlichsten, dass sich die Spanngliedbrüche gleichmäßig auf die Querschnitte verteilen. Hingegen ist die Wahrscheinlichkeit, dass in dem untersuchten Querschnitt bei gleicher Gesamtanzahl von Spanngliedbrüchen mehr bzw. weniger Spanngliedbrüche auftreten, deutlich geringer.

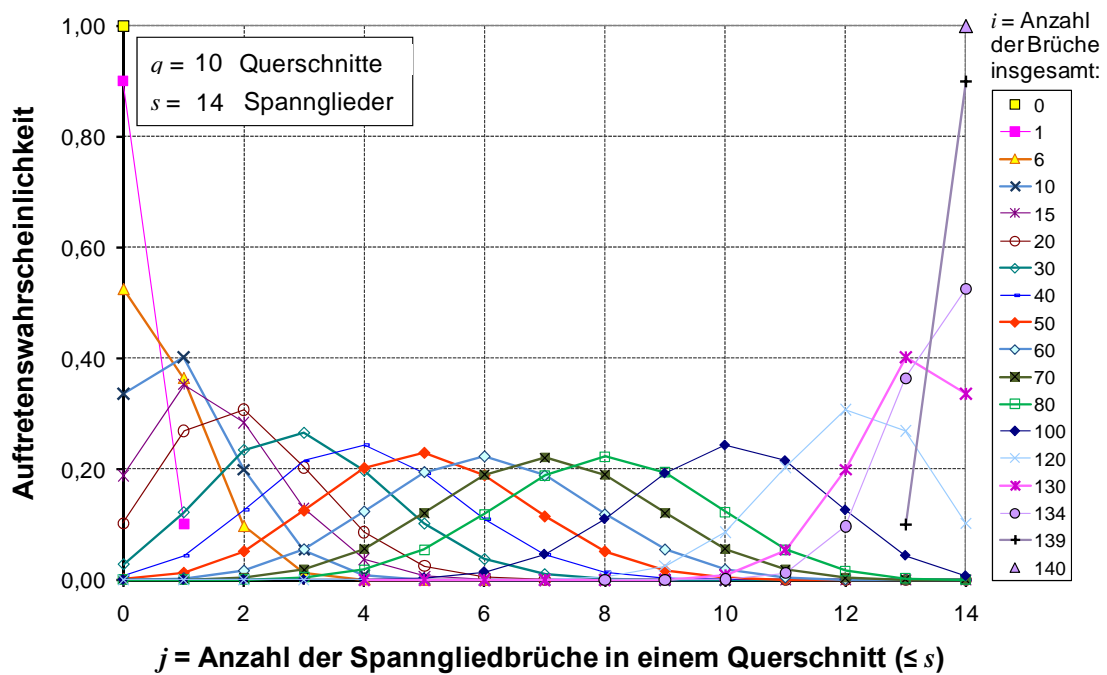


Bild B.2: Auftretenswahrscheinlichkeiten von verschiedenen Anzahlen von Spanngliedbrüchen in einem bestimmten Querschnitt in Abhängigkeit der Gesamtanzahl der Spanngliedbrüche (bei $q = 10$ Querschnitten mit $s = 14$ Spanngliedern)

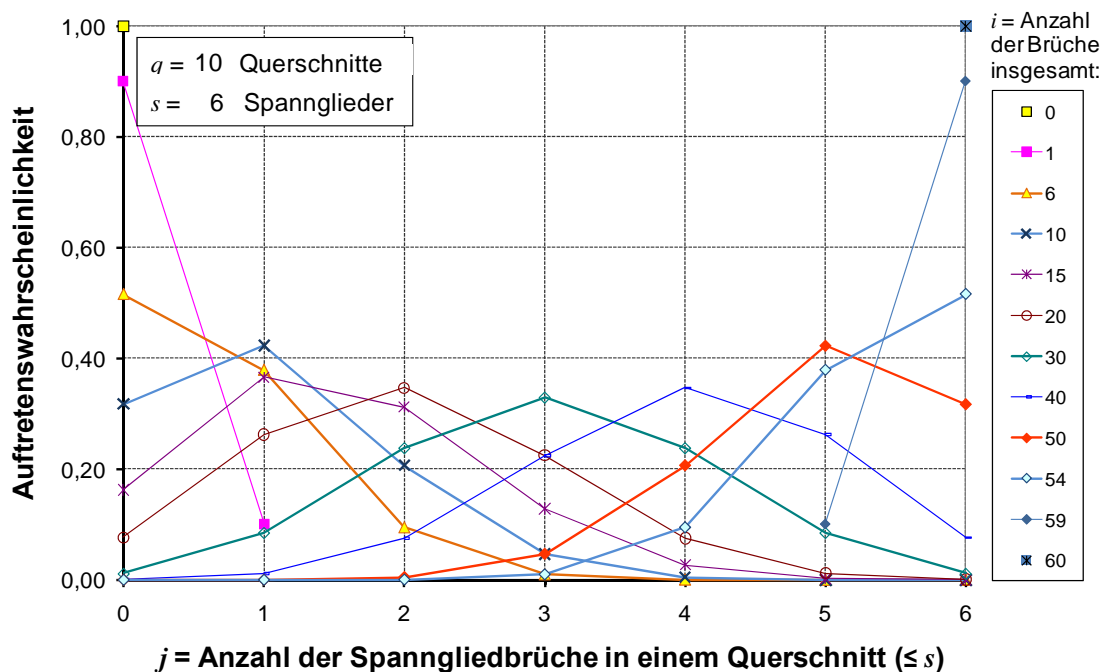


Bild B.3: Auftretenswahrscheinlichkeiten von verschiedenen Anzahlen von Spanngliedbrüchen in einem bestimmten Querschnitt in Abhängigkeit der Gesamtanzahl der Spanngliedbrüche (bei $q = 10$ Querschnitten mit $s = 6$ Spanngliedern)

Es ist allerdings anzumerken, dass dieser Effekt abhängig ist von der Anzahl der Spannglieder. Bei kleineren Spanngliedanzahlen ergeben sich geringere Unterschiede zwischen den Auftretenswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Bruchanzahlen j im untersuchten Querschnitt (vgl. Bild B.3, flachere Verteilungsfunktionen). Hierdurch ist das günstigere Verhalten von Bauwerken mit größeren Spanngliedanzahlen erklärbar, sofern die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung im Feld größer sind als die für den Nachweis der Restsicherheit erforderlichen Restspanngliedanzahlen. Die Summe der Auftretenswahrscheinlichkeiten aller möglichen Anzahlen von Spanngliedbrüchen in einem Querschnitt beträgt für jede Gesamtanzahl der Spanngliedbrüche immer 1,0.

Es ist zu beachten, dass bei dieser Untersuchung nur die Auftretenswahrscheinlichkeit einer bestimmten Anzahl von Spanngliedbrüchen in einem einzigen Querschnitt ermittelt wird. Eine Aussage über die Auftretenswahrscheinlichkeit verschiedener Anzahlen von Spanngliedbrüchen in den übrigen Querschnitten kann hiermit jedoch nicht getroffen werden. Insbesondere kann die Auftretenswahrscheinlichkeit unterschiedlicher Anzahlen von Spanngliedbrüchen in unterschiedlichen Querschnitten nicht durch Multiplikation der einzelnen Auftretenswahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Somit lässt sich aus dieser Untersuchung noch kein Rückschluss auf das Ankündigungsverhalten eines Bauwerkes ziehen. Anhand der Auswertung kann jedoch gezeigt werden, dass sich die Spanngliedbrüche mit hoher Wahrscheinlichkeit gleichmäßig über alle Blöcke verteilen und dass sehr stark abweichende Anzahlen von Spanngliedbrüchen in unterschiedlichen Blöcken eher unwahrscheinlich sind.

C Durchgeführte Parametervariation

C.1 Konstante Anzahl von Spanngliedern

C.1.1 Allgemeines

Im Rahmen der Parametervariation werden die vorhandenen Spanngliedanzahlen, die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten gemäß Tabelle C.1 angesetzt. Da $n_{br,i}$ in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten für die Berechnung nicht relevant ist, wird hier der Wert 0 eingesetzt. Entsprechend wird in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten für $n_{cr,i} = 0$ angesetzt. Die Werte für s_{min} , s_{max} , n_{NP} , n_{St} und n_F sowie die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens sind in den nachfolgenden Tabellen angegeben. In den Diagrammen werden die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens und des vereinfachten Verfahrens dargestellt.

Tabelle C.1: Ansatz der vorhandenen Spanngliedanzahlen, der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in der Parametervariation mit gleicher Spanngliedanzahl in allen Querschnitten ($q_s = 0$)

Querschnitt	Vorhandene Spanngliedanzahl s_i	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung $n_{cr,i}$	Erforderliche Restspanngliedanzahl $n_{br,i}$
1	$s_{min} (= s_{max})$	0	n_{NP}
2	$s_{min} (= s_{max})$	n_{NP} bzw. 0 bei $q_k \geq 2$ *)	n_{NP} bei $q_k \geq 2$ bzw. 0 **)
3	$s_{min} (= s_{max})$	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 3$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 3$ bzw. 0 **)
4	$s_{min} (= s_{max})$	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 4$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 4$ bzw. 0 **)
5	$s_{min} (= s_{max})$	n_{St} bzw. 0 bei $q_k = 5$ *)	n_{St} bei $q_k = 5$ bzw. 0 **)
6	$s_{min} (= s_{max})$	n_F	0
7	$s_{min} (= s_{max})$	n_F	0
8	$s_{min} (= s_{max})$	n_F	0
9	$s_{min} (= s_{max})$	n_F	0
10	$s_{min} (= s_{max})$	n_F	0
*) Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten: $n_{cr} = 0$ **) Querschnitte mit Ankündigungsverhalten: $n_{br} = 0$ Anmerkung: Die Reihenfolge der Querschnitte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis			

C.1.2 Ergebnisse

Tabelle C.2: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 4$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennull		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{min}	s_{max}	s_{max}/s_{min}	n_F	n_F/s_{min}	n_S	n_S/s_{min}	n_{NP}	n_{NP}/s_{min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	4	1,0	3	75%	3	75%	2	50%	0,25	-6,00	0,25	-5,57	0,00	-2,33	0,00	-1,90	0,00	-1,59
4	4	1,0	3	75%	3	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,91	0,00	-1,59
4	4	1,0	3	75%	2	50%	2	50%	0,25	-5,22	0,25	-4,90	0,25	-4,74	0,25	-4,57	0,25	-4,47
4	4	1,0	3	75%	2	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,30	0,25	-4,86	0,25	-4,70
4	4	1,0	3	75%	1	25%	2	50%	0,25	-5,20	0,25	-4,86	0,25	-4,86	0,25	-4,86	0,25	-4,86
4	4	1,0	3	75%	1	25%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	4	1,0	2	50%	3	75%	2	50%	0,25	-4,34	0,25	-4,05	0,00	-1,35	0,00	-0,72	-0,25	-0,13
4	4	1,0	2	50%	3	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,35	0,00	-0,73	-0,25	-0,13
4	4	1,0	2	50%	2	50%	2	50%	0,00	-2,18	0,00	-1,80	0,00	-1,54	0,00	-1,32	0,00	-1,12
4	4	1,0	2	50%	2	50%	1	25%	0,25	-5,36	0,25	-5,08	0,00	-2,00	0,00	-1,60	0,00	-1,32
4	4	1,0	2	50%	1	25%	2	50%	0,00	-1,90	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	4	1,0	2	50%	1	25%	1	25%	0,25	-4,80	0,25	-4,49	0,25	-4,31	0,25	-4,19	0,25	-4,08
4	4	1,0	1	25%	3	75%	2	50%	0,25	-4,25	0,25	-3,96	0,00	-1,32	0,00	-0,66	-0,50	0,00
4	4	1,0	1	25%	3	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,32	0,00	-0,66	-0,50	0,00
4	4	1,0	1	25%	2	50%	2	50%	0,00	-1,62	0,00	-1,17	0,00	-0,80	0,00	-0,45	-0,25	-0,08
4	4	1,0	1	25%	2	50%	1	25%	0,25	-4,09	0,25	-3,78	0,00	-1,20	0,00	-0,64	-0,25	-0,14
4	4	1,0	1	25%	1	25%	2	50%	0,00	-0,92	-0,25	-0,28	-0,25	-0,26	-0,25	-0,24	-0,25	-0,21
4	4	1,0	1	25%	1	25%	1	25%	0,00	-2,30	0,00	-1,93	0,00	-1,66	0,00	-1,44	0,00	-1,23

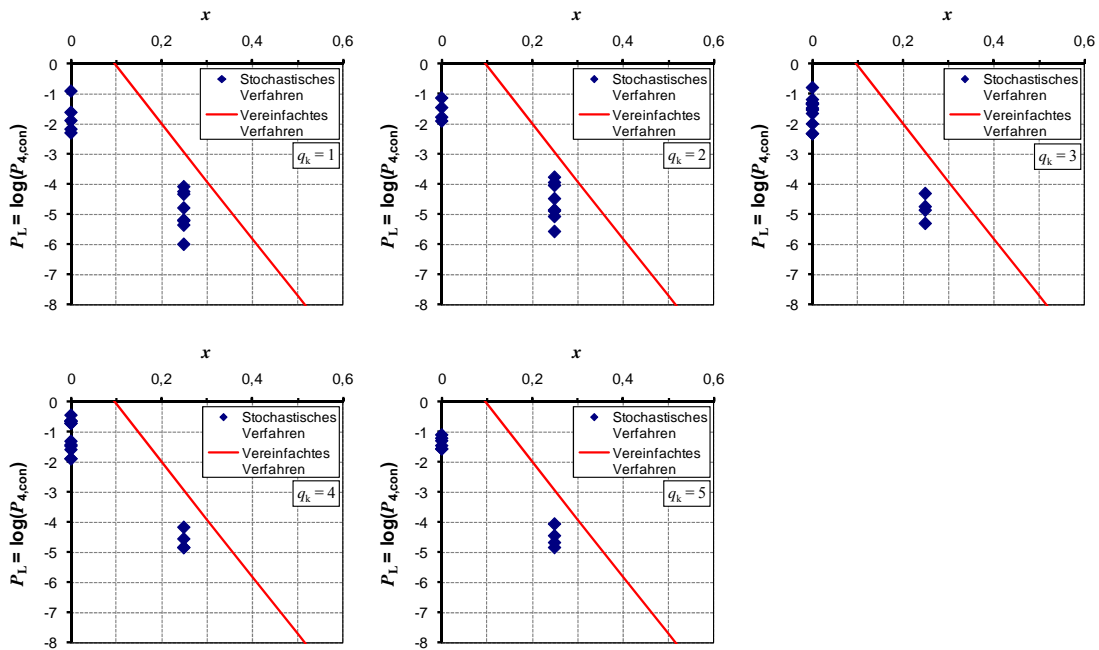


Bild C.1: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 4$ Spanngliedern

Tabelle C.3: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 5$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\min}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	5	1,0	4	80%	4	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,29	0,00	-1,86	0,00	-1,55
5	5	1,0	4	80%	4	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-2,29	0,00	-1,86	0,00	-1,55
5	5	1,0	4	80%	3	60%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,89	0,20	-4,60	0,20	-4,43
5	5	1,0	4	80%	3	60%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-4,89	0,20	-4,60	0,20	-4,43
5	5	1,0	4	80%	2	40%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	5	1,0	4	80%	2	40%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	5	1,0	3	60%	4	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,33	0,00	-0,71	-0,20	-0,14
5	5	1,0	3	60%	4	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,33	0,00	-0,71	-0,20	-0,14
5	5	1,0	3	60%	3	60%	2	40%	0,20	-4,75	0,20	-4,42	0,00	-1,90	0,00	-1,51	0,00	-1,23
5	5	1,0	3	60%	3	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,51	0,00	-1,23
5	5	1,0	3	60%	2	40%	2	40%	0,20	-4,12	0,20	-3,79	0,20	-3,59	0,20	-3,45	0,20	-3,34
5	5	1,0	3	60%	2	40%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,04	0,20	-3,74	0,20	-3,55
5	5	1,0	3	60%	1	20%	2	40%	0,20	-4,09	0,20	-3,76	0,20	-3,76	0,20	-3,76	0,20	-3,76
5	5	1,0	3	60%	1	20%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	5	1,0	2	40%	4	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,29	0,00	-0,64	-0,40	0,00
5	5	1,0	2	40%	4	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,29	0,00	-0,64	-0,40	0,00
5	5	1,0	2	40%	3	60%	2	40%	0,20	-3,51	0,20	-3,20	0,00	-1,14	0,00	-0,61	-0,20	-0,16
5	5	1,0	2	40%	3	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,15	0,00	-0,62	-0,20	-0,16
5	5	1,0	2	40%	2	40%	2	40%	0,00	-2,02	0,00	-1,65	0,00	-1,40	0,00	-1,19	0,00	-1,00
5	5	1,0	2	40%	2	40%	1	20%	0,20	-4,89	0,20	-4,58	0,00	-1,86	0,00	-1,47	0,00	-1,20
5	5	1,0	2	40%	1	20%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,35
5	5	1,0	2	40%	1	20%	1	20%	0,20	-4,43	0,20	-4,08	0,20	-3,88	0,20	-3,75	0,20	-3,64
5	5	1,0	1	20%	3	60%	2	40%	0,20	-3,39	0,20	-3,08	0,00	-1,08	0,00	-0,51	-0,40	0,00
5	5	1,0	1	20%	3	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,09	0,00	-0,52	-0,40	0,00
5	5	1,0	1	20%	2	40%	2	40%	0,00	-1,52	0,00	-1,07	0,00	-0,74	0,00	-0,42	-0,20	-0,09
5	5	1,0	1	20%	2	40%	1	20%	0,20	-3,77	0,20	-3,45	0,00	-1,13	0,00	-0,60	-0,20	-0,15
5	5	1,0	1	20%	1	20%	2	40%	0,00	-0,89	-0,20	-0,30	-0,20	-0,28	-0,20	-0,25	-0,20	-0,22
5	5	1,0	1	20%	1	20%	1	20%	0,00	-2,23	0,00	-1,86	0,00	-1,60	0,00	-1,38	0,00	-1,18

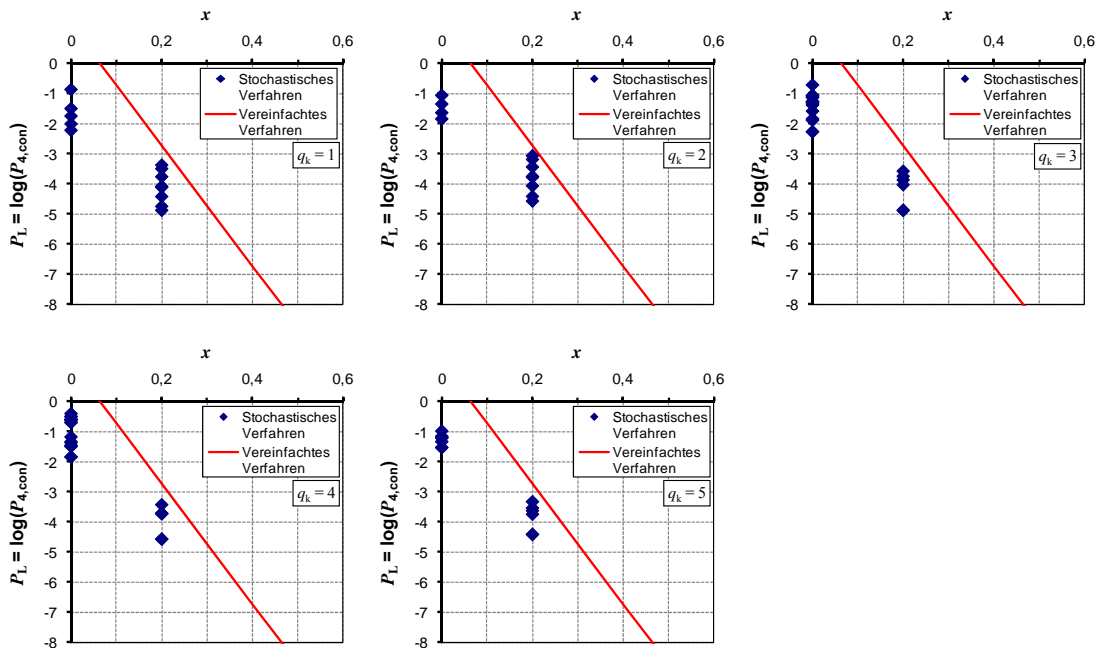


Bild C.2: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 5$ Spanngliedern

Tabelle C.4: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 6$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{min}	s_{max}	s_{max}/s_{min}	n_F	n_F/s_{min}	n_S	n_S/s_{min}	n_{NP}	n_{NP}/s_{min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	6	1,0	5	83%	5	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-2,26	0,00	-1,84	0,00	-1,52
6	6	1,0	5	83%	5	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,26	0,00	-1,84	0,00	-1,52
6	6	1,0	5	83%	5	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,26	0,00	-1,84	0,00	-1,52
6	6	1,0	5	83%	4	67%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,75	0,17	-4,42	0,17	-4,26
6	6	1,0	5	83%	4	67%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,75	0,17	-4,42	0,17	-4,26
6	6	1,0	5	83%	4	67%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,17	-4,75	0,17	-4,42	0,17	-4,26
6	6	1,0	5	83%	3	50%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	6	1,0	5	83%	3	50%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	6	1,0	5	83%	3	50%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	6	1,0	4	67%	5	83%	3	50%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-1,31	0,00	-0,70	0,00	-0,15
6	6	1,0	4	67%	5	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,31	0,00	-0,70	0,00	-0,15
6	6	1,0	4	67%	5	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,31	0,00	-0,70	0,00	-0,15
6	6	1,0	4	67%	4	67%	3	50%	0,17	-4,42	0,17	-4,10	0,00	-1,84	0,00	-1,46	0,00	-1,18
6	6	1,0	4	67%	4	67%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,46	0,00	-1,18
6	6	1,0	4	67%	4	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,46	0,00	-1,18
6	6	1,0	4	67%	3	50%	3	50%	0,17	-3,84	0,17	-3,50	0,17	-3,31	0,17	-3,18	0,17	-3,06
6	6	1,0	4	67%	3	50%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-3,79	0,17	-3,48	0,17	-3,29
6	6	1,0	4	67%	3	50%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-3,79	0,17	-3,48	0,17	-3,29
6	6	1,0	3	50%	5	83%	3	50%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,33	0,00
6	6	1,0	3	50%	5	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,33	0,00
6	6	1,0	3	50%	5	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,33	0,00
6	6	1,0	3	50%	4	67%	3	50%	0,17	-3,25	0,17	-2,93	0,00	-1,11	0,00	-0,60	-0,17	-0,17
6	6	1,0	3	50%	4	67%	2	33%	0,33	<-7	0,33	-6,00	0,00	-1,12	0,00	-0,61	-0,17	-0,18
6	6	1,0	3	50%	4	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,12	0,00	-0,61	-0,17	-0,18
6	6	1,0	3	50%	3	50%	3	50%	0,00	-1,91	0,00	-1,55	0,00	-1,30	0,00	-1,10	0,00	-0,92
6	6	1,0	3	50%	3	50%	2	33%	0,17	-4,21	0,17	-3,91	0,00	-1,75	0,00	-1,37	0,00	-1,10
6	6	1,0	3	50%	3	50%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,37	0,00	-1,11
6	6	1,0	3	50%	2	33%	3	50%	0,00	-1,67	0,00	-1,27	0,00	-1,27	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	6	1,0	3	50%	2	33%	2	33%	0,17	-3,69	0,17	-3,36	0,17	-3,17	0,17	-3,03	0,17	-2,92
6	6	1,0	3	50%	2	33%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,17	-3,64	0,17	-3,32	0,17	-3,14
6	6	1,0	2	33%	4	67%	3	50%	0,17	-3,12	0,17	-2,80	0,00	-1,04	0,00	-0,49	-0,33	-0,01
6	6	1,0	2	33%	4	67%	2	33%	0,33	-6,00	0,33	-5,48	0,00	-1,05	0,00	-0,50	-0,33	-0,01
6	6	1,0	2	33%	4	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,50	-0,33	-0,01
6	6	1,0	2	33%	3	50%	3	50%	0,00	-1,43	0,00	-1,01	0,00	-0,69	0,00	-0,40	-0,17	-0,11
6	6	1,0	2	33%	3	50%	2	33%	0,17	-3,18	0,17	-2,86	0,00	-1,07	0,00	-0,58	-0,17	-0,18
6	6	1,0	2	33%	3	50%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,00	0,00	-1,08	0,00	-0,59	-0,17	-0,18
6	6	1,0	2	33%	2	33%	3	50%	0,00	-0,87	-0,17	-0,35	-0,17	-0,32	-0,17	-0,28	-0,17	-0,25
6	6	1,0	2	33%	2	33%	2	33%	0,00	-1,95	0,00	-1,58	0,00	-1,33	0,00	-1,13	0,00	-0,95
6	6	1,0	2	33%	2	33%	1	17%	0,17	-4,61	0,17	-4,30	0,00	-1,79	0,00	-1,40	0,00	-1,13

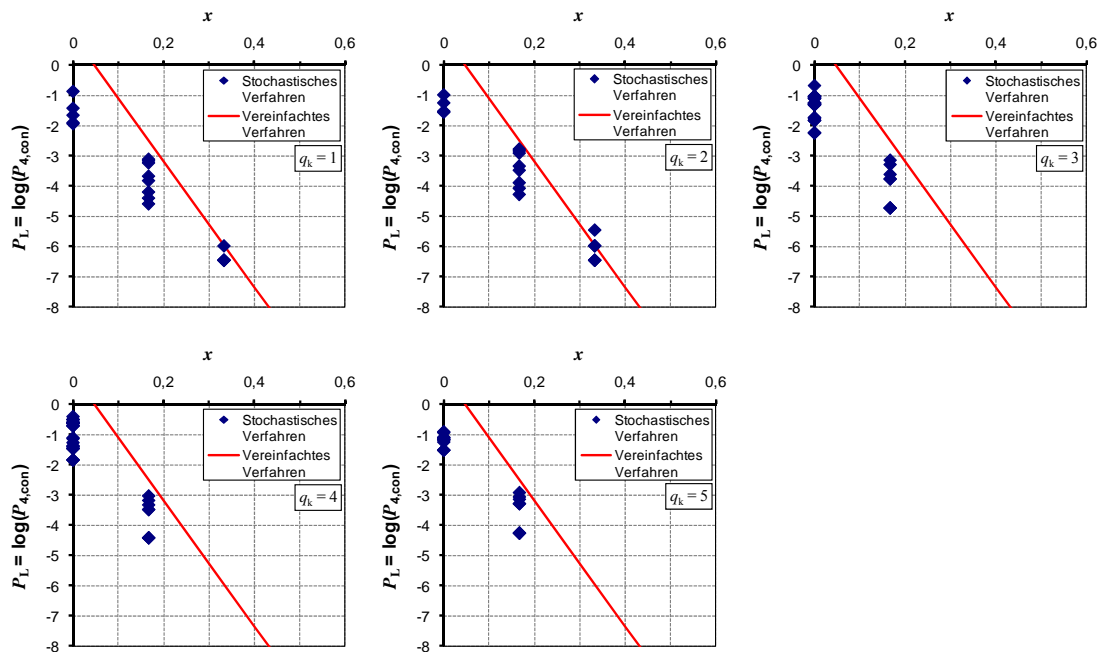


Bild C.3: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 6$ Spanngliedern

Tabelle C.5: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\min}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	7	1,0	5	71%	5	71%	3	43%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,00	-1,81	0,00	-1,43	0,00	-1,15
7	7	1,0	5	71%	5	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,81	0,00	-1,43	0,00	-1,15
7	7	1,0	5	71%	5	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,81	0,00	-1,43	0,00	-1,15
7	7	1,0	5	71%	4	57%	3	43%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,14	-3,62	0,14	-3,33	0,14	-3,14
7	7	1,0	5	71%	4	57%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,62	0,14	-3,33	0,14	-3,14
7	7	1,0	5	71%	4	57%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-3,62	0,14	-3,33	0,14	-3,14
7	7	1,0	5	71%	3	43%	3	43%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,18	0,29	-6,18
7	7	1,0	5	71%	3	43%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,29	-6,48
7	7	1,0	5	71%	3	43%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,29	-6,48
7	7	1,0	4	57%	5	71%	3	43%	0,29	-5,63	0,29	-5,44	0,00	-1,10	0,00	-0,60	-0,14	-0,18
7	7	1,0	4	57%	5	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,10	0,00	-0,60	-0,14	-0,18
7	7	1,0	4	57%	5	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,10	0,00	-0,60	-0,14	-0,18
7	7	1,0	4	57%	4	57%	3	43%	0,14	-3,84	0,14	-3,52	0,00	-1,69	0,00	-1,31	0,00	-1,05
7	7	1,0	4	57%	4	57%	2	29%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,00	-1,70	0,00	-1,32	0,00	-1,06
7	7	1,0	4	57%	4	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,70	0,00	-1,32	0,00	-1,06
7	7	1,0	4	57%	3	43%	3	43%	0,14	-3,38	0,14	-3,07	0,14	-2,87	0,14	-2,73	0,14	-2,62
7	7	1,0	4	57%	3	43%	2	29%	0,29	-6,18	0,29	-5,70	0,14	-3,34	0,14	-3,03	0,14	-2,84
7	7	1,0	4	57%	3	43%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,34	0,14	-3,04	0,14	-2,84
7	7	1,0	3	43%	5	71%	3	43%	0,29	-5,25	0,29	-4,99	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,29	-0,01
7	7	1,0	3	43%	5	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,29	-0,01
7	7	1,0	3	43%	5	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,29	-0,01
7	7	1,0	3	43%	4	57%	3	43%	0,14	-2,92	0,14	-2,59	0,00	-1,03	0,00	-0,57	-0,14	-0,19
7	7	1,0	3	43%	4	57%	2	29%	0,29	-5,30	0,29	-5,10	0,00	-1,05	0,00	-0,58	-0,14	-0,19
7	7	1,0	3	43%	4	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,58	-0,14	-0,19
7	7	1,0	3	43%	3	43%	3	43%	0,00	-1,83	0,00	-1,47	0,00	-1,23	0,00	-1,03	0,00	-0,86
7	7	1,0	3	43%	3	43%	2	29%	0,14	-3,93	0,14	-3,61	0,00	-1,67	0,00	-1,30	0,00	-1,04
7	7	1,0	3	43%	3	43%	1	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,68	0,00	-1,30	0,00	-1,04

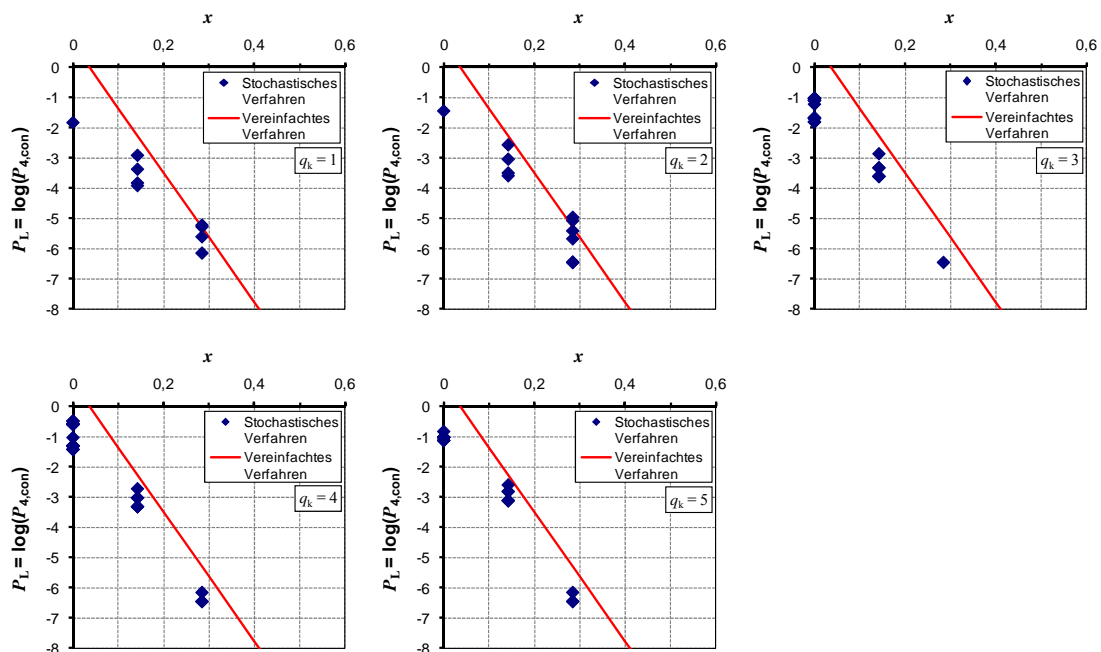


Bild C.4: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Tabelle C.6: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\min}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	8	1,0	6	75%	6	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,79	0,00	-1,41	0,00	-1,13
8	8	1,0	6	75%	6	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,79	0,00	-1,41	0,00	-1,13
8	8	1,0	6	75%	6	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,79	0,00	-1,41	0,00	-1,13
8	8	1,0	6	75%	4	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,70	0,25	-5,57	0,25	-5,52
8	8	1,0	6	75%	4	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,70	0,25	-5,57	0,25	-5,52
8	8	1,0	6	75%	4	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	-5,70	0,25	-5,57	0,25	-5,52
8	8	1,0	6	75%	2	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	8	1,0	6	75%	2	25%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	8	1,0	6	75%	2	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	8	1,0	4	50%	6	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,48	-0,25	-0,01
8	8	1,0	4	50%	6	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,48	-0,25	-0,01
8	8	1,0	4	50%	6	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,48	-0,25	-0,01
8	8	1,0	4	50%	4	50%	3	38%	0,13	-3,59	0,13	-3,26	0,00	-1,61	0,00	-1,24	0,00	-0,99
8	8	1,0	4	50%	4	50%	2	25%	0,25	-5,88	0,25	-5,78	0,00	-1,62	0,00	-1,24	0,00	-0,99
8	8	1,0	4	50%	4	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,62	0,00	-1,24	0,00	-0,99
8	8	1,0	4	50%	2	25%	3	38%	0,13	-3,11	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78
8	8	1,0	4	50%	2	25%	2	25%	0,25	-5,48	0,25	-5,30	0,25	-5,12	0,25	-4,97	0,25	-4,88
8	8	1,0	4	50%	2	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,57	0,25	-5,25	0,25	-5,08
8	8	1,0	3	38%	6	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,38	0,00
8	8	1,0	3	38%	6	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,38	0,00
8	8	1,0	3	38%	6	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,38	0,00
8	8	1,0	3	38%	4	50%	3	38%	0,13	-2,73	0,13	-2,41	0,00	-1,00	0,00	-0,55	-0,13	-0,20
8	8	1,0	3	38%	4	50%	2	25%	0,25	-5,08	0,25	-4,83	0,00	-1,02	0,00	-0,56	-0,13	-0,20
8	8	1,0	3	38%	4	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,02	0,00	-0,56	-0,13	-0,20
8	8	1,0	3	38%	2	25%	3	38%	0,00	-1,55	0,00	-1,17	0,00	-1,17	0,00	-1,16	0,00	-1,15
8	8	1,0	3	38%	2	25%	2	25%	0,13	-3,31	0,13	-2,99	0,13	-2,80	0,13	-2,66	0,13	-2,55
8	8	1,0	3	38%	2	25%	1	13%	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,13	-3,29	0,13	-2,97	0,13	-2,77

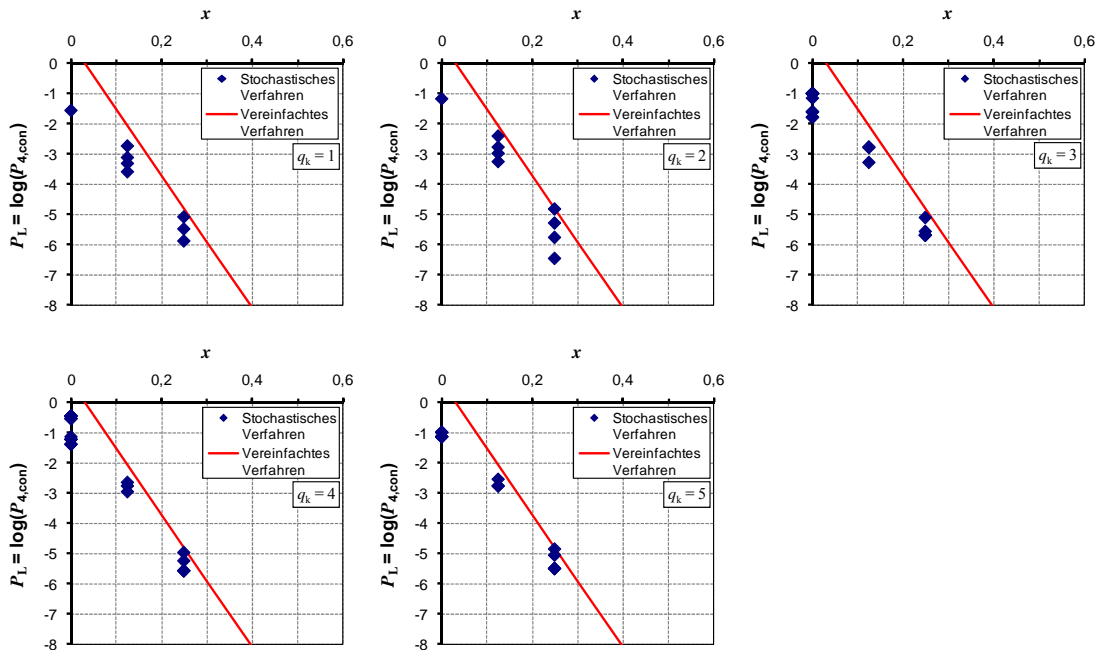


Bild C.5: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Tabelle C.7: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\min}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	9	1,0	7	78%	7	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,12
9	9	1,0	7	78%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,12
9	9	1,0	7	78%	7	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,12
9	9	1,0	7	78%	7	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,12
9	9	1,0	7	78%	5	56%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,70	0,22	-5,52	0,22	-5,48
9	9	1,0	7	78%	5	56%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,70	0,22	-5,52	0,22	-5,48
9	9	1,0	7	78%	5	56%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	-5,70	0,22	-5,52	0,22	-5,48
9	9	1,0	7	78%	5	56%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,22	-5,70	0,22	-5,52	0,22	-5,48
9	9	1,0	7	78%	3	33%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
9	9	1,0	7	78%	3	33%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	9	1,0	7	78%	3	33%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	9	1,0	7	78%	3	33%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	9	1,0	5	56%	7	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,22	-0,01
9	9	1,0	5	56%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,22	-0,01
9	9	1,0	5	56%	7	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,22	-0,01
9	9	1,0	5	56%	7	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,22	-0,01
9	9	1,0	5	56%	5	56%	4	44%	0,11	-3,39	0,11	-3,08	0,00	-1,57	0,00	-1,20	0,00	-0,95
9	9	1,0	5	56%	5	56%	3	33%	0,22	-5,63	0,22	-5,57	0,00	-1,58	0,00	-1,21	0,00	-0,96
9	9	1,0	5	56%	5	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,58	0,00	-1,21	0,00	-0,96
9	9	1,0	5	56%	5	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,58	0,00	-1,21	0,00	-0,96
9	9	1,0	5	56%	3	33%	4	44%	0,11	-2,91	0,11	-2,59	0,11	-2,59	0,11	-2,59	0,11	-2,59
9	9	1,0	5	56%	3	33%	3	33%	0,22	-5,12	0,22	-4,85	0,22	-4,69	0,22	-4,52	0,22	-4,42
9	9	1,0	5	56%	3	33%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,20	0,22	-4,79	0,22	-4,63
9	9	1,0	5	56%	3	33%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,20	0,22	-4,79	0,22	-4,63
9	9	1,0	3	33%	7	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-1,00	0,00	-0,46	-0,44	0,00
9	9	1,0	3	33%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,46	-0,44	0,00
9	9	1,0	3	33%	7	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,46	-0,44	0,00
9	9	1,0	3	33%	7	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,46	-0,44	0,00
9	9	1,0	3	33%	5	56%	4	44%	0,11	-2,43	0,11	-2,09	0,00	-0,86	0,00	-0,40	-0,22	-0,01
9	9	1,0	3	33%	5	56%	3	33%	0,22	-4,30	0,22	-4,04	0,00	-0,90	0,00	-0,41	-0,22	-0,02
9	9	1,0	3	33%	5	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,41	-0,22	-0,02
9	9	1,0	3	33%	5	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,41	-0,22	-0,02
9	9	1,0	3	33%	3	33%	4	44%	0,00	-0,86	-0,11	-0,40	-0,11	-0,36	-0,11	-0,32	-0,11	-0,28
9	9	1,0	3	33%	3	33%	3	33%	0,00	-1,75	0,00	-1,39	0,00	-1,15	0,00	-0,96	0,00	-0,79
9	9	1,0	3	33%	3	33%	2	22%	0,11	-3,60	0,11	-3,31	0,00	-1,59	0,00	-1,22	0,00	-0,97
9	9	1,0	3	33%	3	33%	1	11%	0,22	-6,48	0,22	-6,48	0,00	-1,60	0,00	-1,23	0,00	-0,98

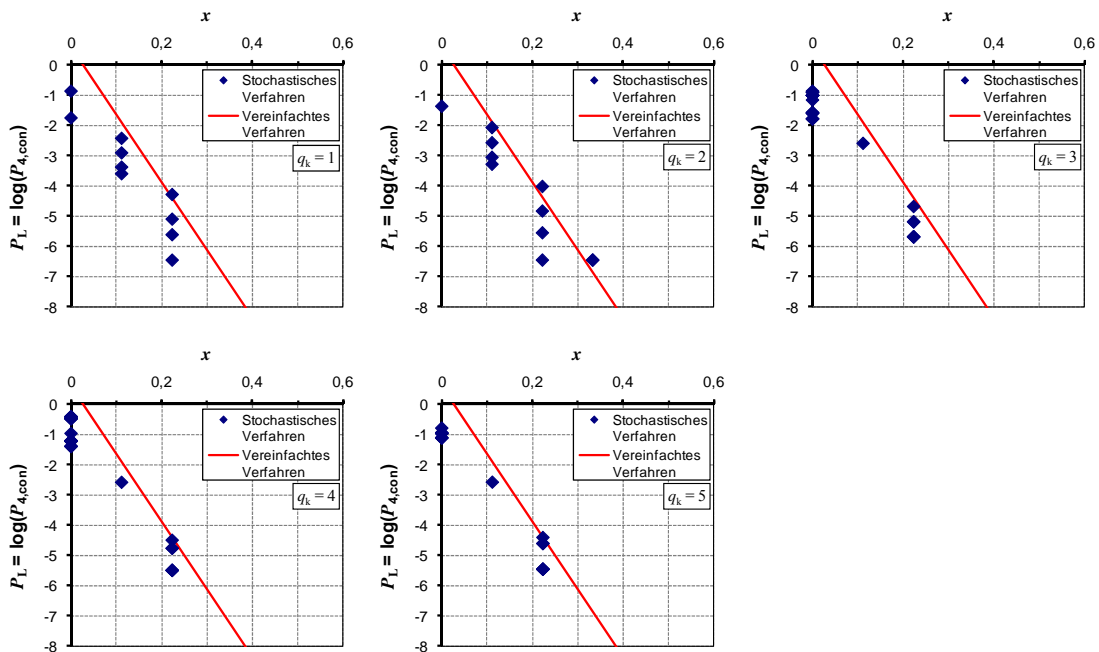


Bild C.6: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Tabelle C.8: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{min}	s_{max}	s_{max} / s_{min}	n_F	n_F / s_{min}	n_S	n_S / s_{min}	n_{NP}	n_{NP} / s_{min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	10	1,0	8	80%	8	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,38	0,00	-1,11
10	10	1,0	8	80%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,38	0,00	-1,11
10	10	1,0	8	80%	8	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,38	0,00	-1,11
10	10	1,0	8	80%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,38	0,00	-1,11
10	10	1,0	8	80%	6	60%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,70	0,20	-5,44
10	10	1,0	8	80%	6	60%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,70	0,20	-5,44
10	10	1,0	8	80%	6	60%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,70	0,20	-5,44
10	10	1,0	8	80%	6	60%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,70	0,20	-5,44
10	10	1,0	8	80%	4	40%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	10	1,0	8	80%	4	40%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	10	1,0	8	80%	4	40%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	10	1,0	8	80%	4	40%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	10	1,0	6	60%	8	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,47	-0,20	-0,01
10	10	1,0	6	60%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,47	-0,20	-0,01
10	10	1,0	6	60%	8	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,47	-0,20	-0,01
10	10	1,0	6	60%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,47	-0,20	-0,01
10	10	1,0	6	60%	6	60%	4	40%	0,20	-5,48	0,20	-5,20	0,00	-1,56	0,00	-1,19	0,00	-0,94
10	10	1,0	6	60%	6	60%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,56	0,00	-1,19	0,00	-0,94
10	10	1,0	6	60%	6	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,56	0,00	-1,19	0,00	-0,94
10	10	1,0	6	60%	6	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,56	0,00	-1,19	0,00	-0,94
10	10	1,0	6	60%	4	40%	4	40%	0,20	-4,91	0,20	-4,58	0,20	-4,39	0,20	-4,23	0,20	-4,13
10	10	1,0	6	60%	4	40%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-4,85	0,20	-4,49	0,20	-4,33
10	10	1,0	6	60%	4	40%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,85	0,20	-4,49	0,20	-4,33
10	10	1,0	6	60%	4	40%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-4,85	0,20	-4,49	0,20	-4,33
10	10	1,0	6	60%	2	20%	4	40%	0,20	-4,91	0,20	-4,57	0,20	-4,57	0,20	-4,57	0,20	-4,57
10	10	1,0	6	60%	2	20%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	10	1,0	6	60%	2	20%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	10	1,0	6	60%	2	20%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	10	1,0	4	40%	8	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
10	10	1,0	4	40%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
10	10	1,0	4	40%	8	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
10	10	1,0	4	40%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
10	10	1,0	4	40%	6	60%	4	40%	0,20	-4,02	0,20	-3,73	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,02
10	10	1,0	4	40%	6	60%	3	30%	0,30	-6,00	0,30	-6,00	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,02
10	10	1,0	4	40%	6	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,02
10	10	1,0	4	40%	6	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,02
10	10	1,0	4	40%	4	40%	4	40%	0,00	-1,68	0,00	-1,33	0,00	-1,09	0,00	-0,91	0,00	-0,74
10	10	1,0	4	40%	4	40%	3	30%	0,10	-3,28	0,10	-2,98	0,00	-1,52	0,00	-1,16	0,00	-0,92
10	10	1,0	4	40%	4	40%	2	20%	0,20	-5,70	0,20	-5,48	0,00	-1,54	0,00	-1,17	0,00	-0,92
10	10	1,0	4	40%	4	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,54	0,00	-1,17	0,00	-0,92
10	10	1,0	4	40%	2	20%	4	40%	0,00	-1,45	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07
10	10	1,0	4	40%	2	20%	3	30%	0,10	-2,85	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52
10	10	1,0	4	40%	2	20%	2	20%	0,20	-5,18	0,20	-4,89	0,20	-4,72	0,20	-4,63	0,20	-4,46
10	10	1,0	4	40%	2	20%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,22	0,20	-4,99	0,20	-4,68
10	10	1,0	2	20%	6	60%	4	40%	0,20	-3,98	0,20	-3,69	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	10	1,0	2	20%	6	60%	3	30%	0,30	-6,00	0,30	-6,00	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	10	1,0	2	20%	6	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	10	1,0	2	20%	6	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	10	1,0	2	20%	4	40%	4	40%	0,00	-1,23	0,00	-0,82	0,00	-0,52	0,00	-0,26	-0,20	-0,01
10	10	1,0	2	20%	4	40%	3	30%	0,10	-2,37	0,10	-2,04	0,00	-0,84	0,00	-0,39	-0,20	-0,01
10	10	1,0	2	20%	4	40%	2	20%	0,20	-4,38	0,20	-4,08	0,00	-0,87	0,00	-0,40	-0,20	-0,02
10	10	1,0	2	20%	4	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	-6,48	0,00	-0,87	0,00	-0,40	-0,20	-0,02
10	10	1,0	2	20%	2	20%	4	40%	0,00	-0,59	-0,20	-0,05	-0,20	-0,04	-0,20	-0,04	-0,20	-0,03
10	10	1,0	2	20%	2	20%	3	30%	0,00	-0,85	-0,10	-0,38	-0,10	-0,35	-0,10	-0,31	-0,10	-0,27
10	10	1,0	2	20%	2	20%	2	20%	0,00	-1,83	0,00	-1,47	0,00	-1,23	0,00	-1,03	0,00	-0,86
10	10	1,0	2	20%	2	20%	1	10%	0,10	-4,21	0,10	-3,91	0,00	-1,67	0,00	-1,30	0,00	-1,04

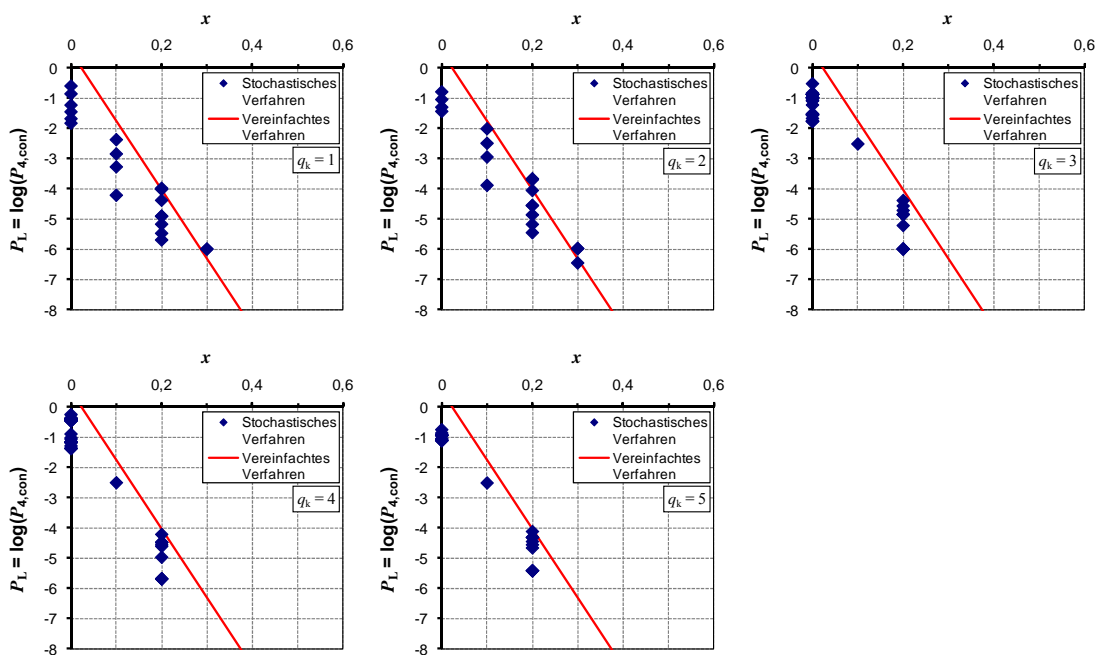


Bild C.7: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 10$ Spanngliedern

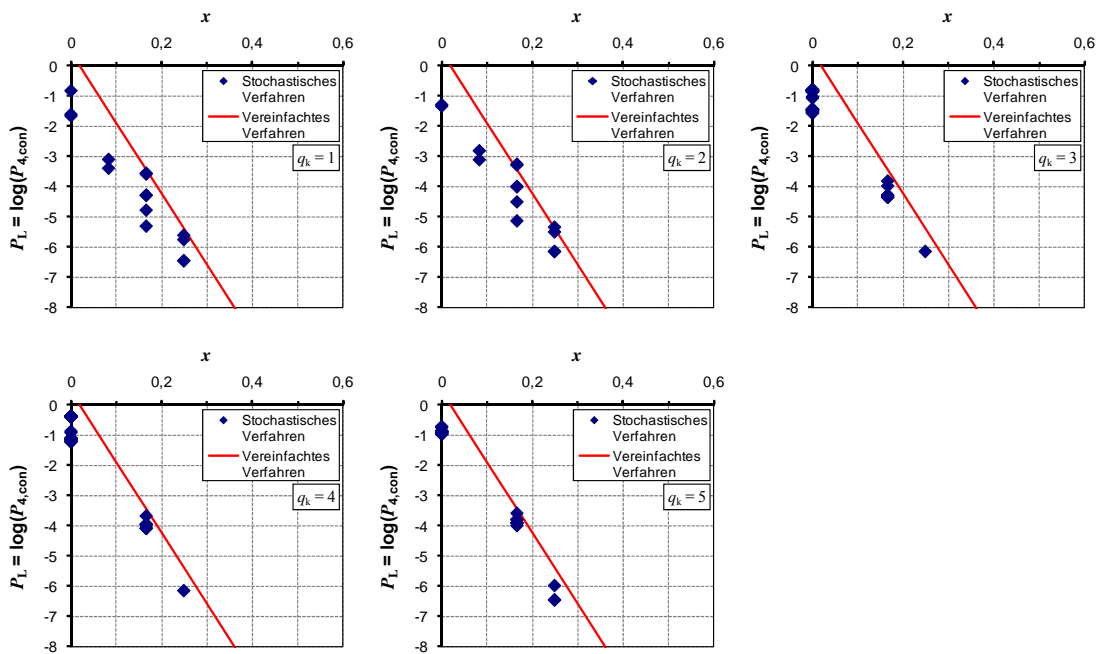


Bild C.8: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.9: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{min}	s_{max}	s_{max}/s_{min}	n_F	n_F/s_{min}	n_S	n_S/s_{min}	n_{NP}	n_{NP}/s_{min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
12	12	1,0	9	75%	9	75%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,59	0,00	-1,22	0,00	-0,97
12	12	1,0	9	75%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,59	0,00	-1,22	0,00	-0,97
12	12	1,0	9	75%	9	75%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,59	0,00	-1,22	0,00	-0,97
12	12	1,0	9	75%	9	75%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,59	0,00	-1,22	0,00	-0,97
12	12	1,0	9	75%	6	50%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	12	1,0	9	75%	6	50%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	12	1,0	9	75%	6	50%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	12	1,0	9	75%	6	50%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	12	1,0	9	75%	3	25%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
12	12	1,0	9	75%	3	25%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
12	12	1,0	9	75%	3	25%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
12	12	1,0	9	75%	3	25%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
12	12	1,0	8	67%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,15	0,00	-0,91
12	12	1,0	8	67%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,15	0,00	-0,91
12	12	1,0	8	67%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,15	0,00	-0,91
12	12	1,0	8	67%	8	67%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,15	0,00	-0,91
12	12	1,0	8	67%	6	50%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,38	0,17	-4,10	0,17	-3,92
12	12	1,0	8	67%	6	50%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,17	-4,38	0,17	-4,10	0,17	-3,92
12	12	1,0	8	67%	6	50%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,38	0,17	-4,10	0,17	-3,92
12	12	1,0	8	67%	6	50%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,17	-4,38	0,17	-4,10	0,17	-3,92
12	12	1,0	8	67%	4	33%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	12	1,0	8	67%	4	33%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	12	1,0	8	67%	4	33%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	12	1,0	8	67%	4	33%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	12	1,0	6	50%	9	75%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,25	0,00
12	12	1,0	6	50%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,25	0,00
12	12	1,0	6	50%	9	75%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,25	0,00
12	12	1,0	6	50%	9	75%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,25	0,00
12	12	1,0	6	50%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,86	0,00	-0,40	-0,17	-0,03
12	12	1,0	6	50%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,86	0,00	-0,40	-0,17	-0,03
12	12	1,0	6	50%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,86	0,00	-0,40	-0,17	-0,03
12	12	1,0	6	50%	8	67%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,86	0,00	-0,40	-0,17	-0,03
12	12	1,0	6	50%	6	50%	4	33%	0,17	-4,81	0,17	-4,52	0,00	-1,47	0,00	-1,11	0,00	-0,86
12	12	1,0	6	50%	6	50%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,47	0,00	-1,11	0,00	-0,86
12	12	1,0	6	50%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,47	0,00	-1,11	0,00	-0,86
12	12	1,0	6	50%	6	50%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,47	0,00	-1,11	0,00	-0,86
12	12	1,0	6	50%	4	33%	4	33%	0,17	-4,32	0,17	-4,02	0,17	-3,84	0,17	-3,69	0,17	-3,60
12	12	1,0	6	50%	4	33%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,18	0,17	-4,31	0,17	-3,97	0,17	-3,80
12	12	1,0	6	50%	4	33%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,32	0,17	-3,97	0,17	-3,81
12	12	1,0	6	50%	4	33%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,17	-4,32	0,17	-3,97	0,17	-3,81
12	12	1,0	6	50%	3	25%	4	33%	0,17	-4,30	0,17	-4,01	0,17	-4,01	0,17	-4,01	0,17	-4,01
12	12	1,0	6	50%	3	25%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,18	0,25	-6,18	0,25	-6,18	0,25	-6,00
12	12	1,0	6	50%	3	25%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,48
12	12	1,0	6	50%	3	25%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,48
12	12	1,0	4	33%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
12	12	1,0	4	33%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
12	12	1,0	4	33%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
12	12	1,0	4	33%	8	67%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
12	12	1,0	4	33%	6	50%	4	33%	0,17	-3,61	0,17	-3,30	0,00	-0,83	0,00	-0,38	-0,17	-0,03
12	12	1,0	4	33%	6	50%	3	25%	0,25	-5,78	0,25	-5,52	0,00	-0,83	0,00	-0,38	-0,17	-0,03
12	12	1,0	4	33%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,38	-0,17	-0,03
12	12	1,0	4	33%	6	50%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,38	-0,17	-0,03
12	12	1,0	4	33%	4	33%	4	33%	0,00	-1,63	0,00	-1,28	0,00	-1,05	0,00	-0,87	0,00	-0,71
12	12	1,0	4	33%	4	33%	3	25%	0,08	-3,12	0,08	-2,82	0,00	-1,47	0,00	-1,12	0,00	-0,88
12	12	1,0	4	33%	4	33%	2	17%	0,17	-5,33	0,17	-5,15	0,00	-1,49	0,00	-1,13	0,00	-0,89
12	12	1,0	4	33%	4	33%	1	8%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,49	0,00	-1,13	0,00	-0,89
12	12	1,0	3	25%	9	75%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,50	0,00
12	12	1,0	3	25%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,50	0,00
12	12	1,0	3	25%	9	75%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,50	0,00
12	12	1,0	3	25%	9	75%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,50	0,00
12	12	1,0	3	25%	6	50%	4	33%	0,17	-3,58	0,17	-3,27	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,25	0,00
12	12	1,0	3	25%	6	50%	3	25%	0,25	-5,63	0,25	-5,36	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,25	0,00
12	12	1,0	3	25%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,25	0,00
12	12	1,0	3	25%	6	50%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,25	0,00
12	12	1,0	3	25%	3	25%	4	33%	0,00	-0,85	-0,08	-0,42	-0,08	-0,38	-0,08	-0,33	-0,08	-0,29
12	12	1,0	3	25%	3	25%	3	25%	0,00	-1,69	0,00	-1,34	0,00	-1,10	0,00	-0,92	0,00	-0,75
12	12	1,0	3	25%	3	25%	2	17%	0,08	-3,42	0,08	-3,12	0,00	-1,53	0,00	-1,17	0,00	-0,93
12	12	1,0	3	25%	3	25%	1	8%	0,17	<-7	0,17	<-7	0,00	-1,55	0,00	-1,18	0,00	-0,93

Tabelle C.10: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = s_{max} = 15$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen		Feldbereich		Stützbereich		Momentennulip		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$		
s_{min}	s_{max}	s_{max} / s_{min}	n_F	n_F / s_{min}	n_S	n_S / s_{min}	n_{NP}	n_{NP} / s_{min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
15	15	1,0	10	67%	10	67%	5	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,44	0,00	-1,08	0,00	-0,84
15	15	1,0	10	67%	10	67%	4	27%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,44	0,00	-1,08	0,00	-0,84
15	15	1,0	10	67%	10	67%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-1,44	0,00	-1,08	0,00	-0,84
15	15	1,0	10	67%	10	67%	2	13%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-1,44	0,00	-1,08	0,00	-0,84
15	15	1,0	10	67%	10	67%	1	7%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,44	0,00	-1,08	0,00	-0,84
15	15	1,0	10	67%	5	33%	5	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
15	15	1,0	10	67%	5	33%	4	27%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
15	15	1,0	10	67%	5	33%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
15	15	1,0	10	67%	5	33%	2	13%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
15	15	1,0	10	67%	5	33%	1	7%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
15	15	1,0	9	60%	9	60%	5	33%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,06	0,00	-0,82
15	15	1,0	9	60%	9	60%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,06	0,00	-0,82
15	15	1,0	9	60%	9	60%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,06	0,00	-0,82
15	15	1,0	9	60%	9	60%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,06	0,00	-0,82
15	15	1,0	9	60%	9	60%	1	7%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,06	0,00	-0,82
15	15	1,0	9	60%	6	40%	5	33%	0,27	-6,48	0,27	-6,48	0,20	-5,57	0,20	-5,30	0,20	-5,12
15	15	1,0	9	60%	6	40%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,33	0,20	-5,13
15	15	1,0	9	60%	6	40%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,33	0,20	-5,13
15	15	1,0	9	60%	6	40%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,33	0,20	-5,13
15	15	1,0	9	60%	6	40%	1	7%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,33	0,20	-5,13
15	15	1,0	9	60%	3	20%	5	33%	0,27	-6,48	0,27	-6,48	0,27	-6,48	0,27	-6,48	0,27	-6,48
15	15	1,0	9	60%	3	20%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
15	15	1,0	9	60%	3	20%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
15	15	1,0	9	60%	3	20%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
15	15	1,0	9	60%	3	20%	1	7%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
15	15	1,0	6	40%	9	60%	5	33%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,35	-0,20	0,00
15	15	1,0	6	40%	9	60%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,35	-0,20	0,00
15	15	1,0	6	40%	9	60%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,35	-0,20	0,00
15	15	1,0	6	40%	9	60%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,35	-0,20	0,00
15	15	1,0	6	40%	9	60%	1	7%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,35	-0,20	0,00
15	15	1,0	6	40%	6	40%	5	33%	0,07	-2,72	0,07	-2,40	0,00	-1,36	0,00	-1,03	0,00	-0,80
15	15	1,0	6	40%	6	40%	4	27%	0,13	-4,46	0,13	-4,15	0,00	-1,40	0,00	-1,05	0,00	-0,81
15	15	1,0	6	40%	6	40%	3	20%	0,20	<-7	0,20	<-7	0,00	-1,40	0,00	-1,05	0,00	-0,81
15	15	1,0	6	40%	6	40%	2	13%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-1,40	0,00	-1,05	0,00	-0,81
15	15	1,0	6	40%	6	40%	1	7%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,40	0,00	-1,05	0,00	-0,81
15	15	1,0	6	40%	3	20%	5	33%	0,07	-2,34	0,07	-2,02	0,07	-2,01	0,07	-2,01	0,07	-2,01
15	15	1,0	6	40%	3	20%	4	27%	0,13	-3,87	0,13	-3,58	0,13	-3,58	0,13	-3,58	0,13	-3,58
15	15	1,0	6	40%	3	20%	3	20%	0,20	-5,52	0,20	-5,44	0,20	-5,44	0,20	-5,27	0,20	-5,20
15	15	1,0	6	40%	3	20%	2	13%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,20	<-7	0,20	-5,78	0,20	-5,57
15	15	1,0	6	40%	3	20%	1	7%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,20	<-7	0,20	-5,78	0,20	-5,57
15	15	1,0	5	33%	10	67%	5	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,33	0,00
15	15	1,0	5	33%	10	67%	4	27%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,33	0,00
15	15	1,0	5	33%	10	67%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,33	0,00
15	15	1,0	5	33%	10	67%	2	13%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,33	0,00
15	15	1,0	5	33%	10	67%	1	7%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,33	0,00
15	15	1,0	5	33%	5	33%	5	33%	0,00	-1,56	0,00	-1,21	0,00	-0,99	0,00	-0,81	0,00	-0,66
15	15	1,0	5	33%	5	33%	4	27%	0,07	-2,82	0,07	-2,50	0,00	-1,39	0,00	-1,05	0,00	-0,82
15	15	1,0	5	33%	5	33%	3	20%	0,13	-4,68	0,13	-4,41	0,00	-1,42	0,00	-1,07	0,00	-0,83
15	15	1,0	5	33%	5	33%	2	13%	0,20	<-7	0,20	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,07	0,00	-0,83
15	15	1,0	5	33%	5	33%	1	7%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-1,42	0,00	-1,07	0,00	-0,83
15	15	1,0	3	20%	9	60%	5	33%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,40	0,00
15	15	1,0	3	20%	9	60%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,40	0,00
15	15	1,0	3	20%	9	60%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,40	0,00
15	15	1,0	3	20%	9	60%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,40	0,00
15	15	1,0	3	20%	9	60%	1	7%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,40	0,00
15	15	1,0	3	20%	6	40%	5	33%	0,07	-1,94	0,07	-1,60	0,00	-0,72	0,00	-0,32	-0,20	0,00
15	15	1,0	3	20%	6	40%	4	27%	0,13	-3,28	0,13	-2,97	0,00	-0,78	0,00	-0,34	-0,20	0,00
15	15	1,0	3	20%	6	40%	3	20%	0,20	-5,22	0,20	-4,96	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,20	0,00
15	15	1,0	3	20%	6	40%	2	13%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,20	0,00
15	15	1,0	3	20%	6	40%	1	7%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,79	0,00	-0,34	-0,20	0,00
15	15	1,0	3	20%	3	20%	5	33%	0,00	-0,57	-0,13	-0,09	-0,13	-0,08	-0,13	-0,07	-0,13	-0,06
15	15	1,0	3	20%	3	20%	4	27%	0,00	-0,85	-0,07	-0,43	-0,07	-0,38	-0,07	-0,34	-0,07	-0,29
15	15	1,0	3	20%	3	20%	3	20%	0,00	-1,66	0,00	-1,31	0,00	-1,08	0,00	-0,89	0,00	-0,73
15	15	1,0	3	20%	3	20%	2	13%	0,07	-3,34	0,07	-3,01	0,00	-1,50	0,00	-1,15	0,00	-0,90
15	15	1,0	3	20%	3	20%	1	7%	0,13	<-7	0,13	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,16	0,00	-0,91

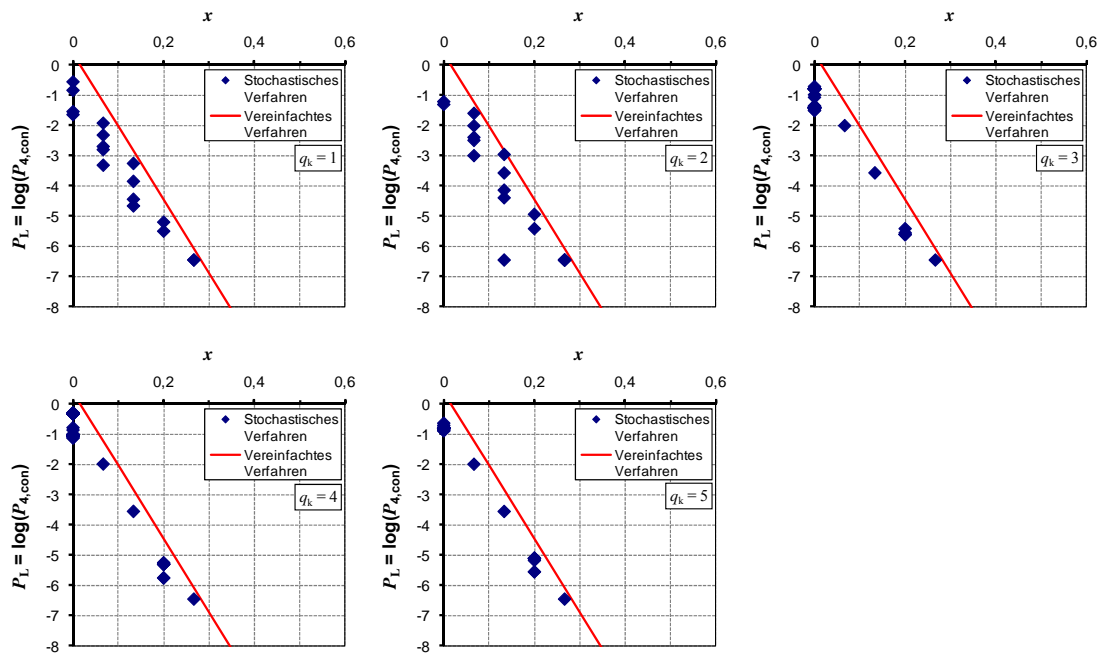


Bild C.9: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = s_{\max} = 15$ Spanngliedern

C.2 Ein Querschnitt mit vergrößerter Spanngliedanzahl

C.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der Parametervariation werden die vorhandenen Spanngliedanzahlen, die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten gemäß Tabelle C.11 angesetzt. Da $n_{br,i}$ in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten für die Berechnung nicht relevant ist, wird hier der Wert 0 eingesetzt. Entsprechend wird in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten für $n_{cr,i} = 0$ angesetzt. Die Werte für s_{min} , s_{max} , n_{NP} , n_{St} und n_F sind in den nachfolgenden Abschnitten in Tabellen angegeben. In den Querschnitten 3 und 4 werden die Eingangswerte n_{cr} bzw. n_{br} durch Multiplikation von n_{St} mit dem Verhältnis von s_{min} / s_{max} ermittelt. Das Ergebnis wird dabei auf die jeweils nächste ganze Spanngliedanzahl gerundet.

Die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens sind in den nachfolgenden Tabellen ebenfalls angegeben. In den Diagrammen werden die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens und des vereinfachten Verfahrens dargestellt.

Tabelle C.11: Ansatz der vorhandenen Spanngliedanzahlen, der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in der Parametervariation mit $q_s = 1$ Querschnitt mit vergrößerter Spanngliedanzahl

Querschnitt	Vorhandene Spanngliedanzahl	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung n_{cr}	Erforderliche Restspanngliedanzahl n_{br}
1	s_{min}	0	n_{NP}
2	s_{min}	n_{NP} bzw. 0 bei $q_k \geq 2$ *)	n_{NP} bei $q_k \geq 2$ bzw. 0 **)
3	s_{min}	Runden $\{n_{St} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bzw. 0 bei $q_k \geq 3$ *)	Runden $\{n_{St} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bei $q_k \geq 3$ bzw. 0 **)
4	s_{min}	Runden $\{n_{St} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bzw. 0 bei $q_k \geq 4$ *)	Runden $\{n_{St} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bei $q_k \geq 4$ bzw. 0 **)
5	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k = 5$ *)	n_{St} bei $q_k = 5$ bzw. 0 **)
6	s_{min}	n_F	0
7	s_{min}	n_F	0
8	s_{min}	n_F	0
9	s_{min}	n_F	0
10	s_{min}	n_F	0
*) Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten: $n_{cr} = 0$			
**) Querschnitte mit Ankündigungsverhalten: $n_{br} = 0$			
Anmerkung: Die Reihenfolge der Querschnitte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis			

C.2.2 Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert

Tabelle C.12: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	6	1,5	3	75%	5	83%	2	50%	0,33	<-7	0,33	-6,18	0,08	-2,52	0,08	-2,12	-0,08	-1,14
4	6	1,5	3	75%	5	83%	1	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,08	-2,52	0,08	-2,12	-0,08	-1,14
4	6	1,5	3	75%	4	67%	2	50%	0,25	-5,70	0,25	-5,36	0,00	-2,21	0,00	-1,77	0,00	-1,74
4	6	1,5	3	75%	4	67%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,21	0,00	-1,77	0,00	-1,74
4	6	1,5	3	75%	3	50%	2	50%	0,25	-5,44	0,25	-4,88	0,25	-4,74	0,25	-4,61	0,25	-4,60
4	6	1,5	3	75%	3	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,33	0,25	-4,97	0,25	-4,93
4	6	1,5	2	50%	4	67%	2	50%	0,25	-3,98	0,25	-3,65	0,00	-1,06	-0,08	-0,37	-0,25	-0,17
4	6	1,5	2	50%	4	67%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,06	-0,08	-0,37	-0,25	-0,17
4	6	1,5	2	50%	3	50%	2	50%	0,00	-2,14	0,00	-1,76	0,00	-1,49	0,00	-1,27	0,00	-1,14
4	6	1,5	2	50%	3	50%	1	25%	0,25	-5,52	0,25	-5,12	0,00	-1,95	0,00	-1,55	0,00	-1,35
4	6	1,5	2	50%	2	33%	2	50%	0,00	-1,90	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	6	1,5	2	50%	2	33%	1	25%	0,25	-4,78	0,25	-4,48	0,25	-4,24	0,25	-4,12	0,17	-3,75
4	6	1,5	1	25%	3	50%	2	50%	0,00	-1,56	0,00	-1,10	0,00	-0,73	0,00	-0,38	-0,25	-0,08
4	6	1,5	1	25%	3	50%	1	25%	0,25	-4,01	0,25	-3,70	0,00	-1,13	0,00	-0,57	-0,25	-0,13
4	6	1,5	1	25%	2	33%	2	50%	0,00	-0,93	-0,17	-0,30	-0,17	-0,28	-0,17	-0,26	-0,25	-0,20
4	6	1,5	1	25%	2	33%	1	25%	0,08	-2,36	0,08	-2,00	0,08	-1,75	0,08	-1,54	-0,08	-0,98
4	6	1,5	1	25%	1	17%	2	50%	0,00	-0,90	-0,25	-0,26	-0,25	-0,24	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21
4	6	1,5	1	25%	1	17%	1	25%	0,00	-2,22	0,00	-1,84	0,00	-1,57	0,00	-1,33	0,00	-1,32

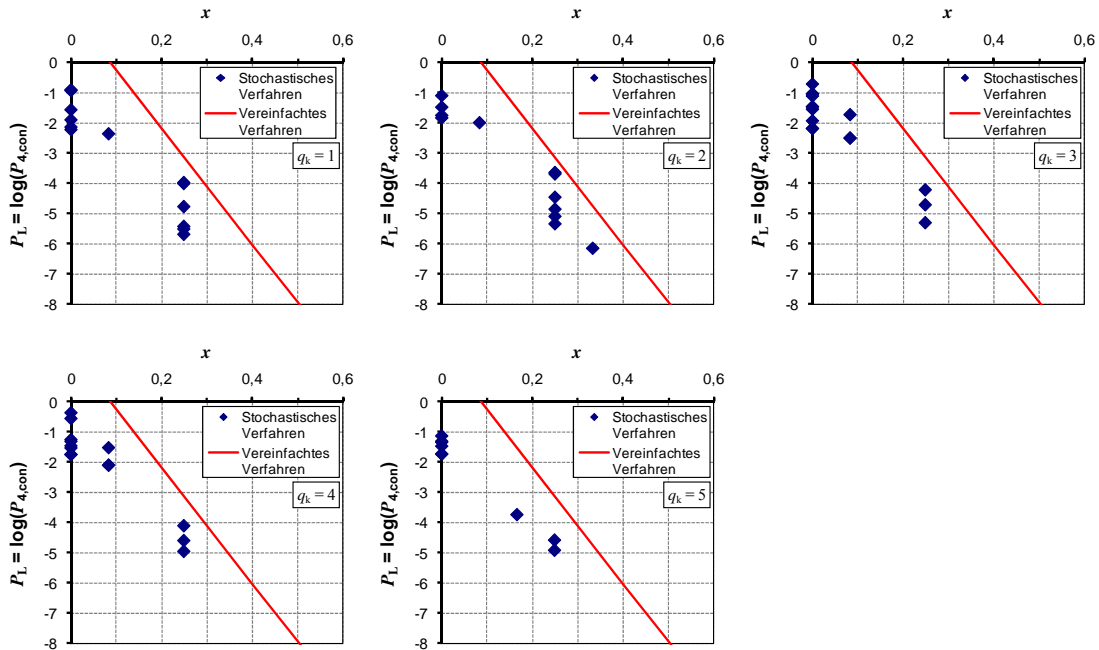


Bild C.10: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Tabelle C.13: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	7	1,4	4	80%	6	86%	2	40%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,06	-2,44	0,06	-2,03	-0,06	-1,21
5	7	1,4	4	80%	6	86%	1	20%	0,66	<-7	0,66	<-7	0,06	-2,44	0,06	-2,03	-0,06	-1,21
5	7	1,4	4	80%	4	57%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,93	0,20	-4,61	0,20	-4,60
5	7	1,4	4	80%	4	57%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-4,93	0,20	-4,61	0,20	-4,60
5	7	1,4	4	80%	2	29%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,51	<-7
5	7	1,4	3	60%	6	86%	2	40%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,06	-1,64	0,06	-1,08	-0,26	-0,07
5	7	1,4	3	60%	6	86%	1	20%	0,66	<-7	0,66	<-7	0,06	-1,64	0,06	-1,08	-0,26	-0,07
5	7	1,4	3	60%	4	57%	2	40%	0,20	-4,57	0,20	-4,29	0,00	-1,83	0,00	-1,43	0,00	-1,32
5	7	1,4	3	60%	4	57%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,83	0,00	-1,43	0,00	-1,32
5	7	1,4	3	60%	2	29%	2	40%	0,20	-4,03	0,20	-3,73	0,20	-3,73	0,20	-3,73	0,20	-3,73
5	7	1,4	3	60%	2	29%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,31	-6,18
5	7	1,4	2	40%	4	57%	2	40%	0,20	-3,35	0,20	-3,03	0,00	-1,01	-0,03	-0,47	-0,20	-0,18
5	7	1,4	2	40%	4	57%	1	20%	0,40	-6,48	0,40	-6,48	0,00	-1,02	-0,03	-0,48	-0,20	-0,18
5	7	1,4	2	40%	3	43%	2	40%	0,03	-2,02	0,03	-1,65	0,03	-1,40	0,03	-1,19	-0,03	-0,96
5	7	1,4	2	40%	3	43%	1	20%	0,23	-4,93	0,23	-4,56	0,03	-1,86	0,03	-1,47	-0,03	-1,13
5	7	1,4	2	40%	2	29%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,37	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,35
5	7	1,4	2	40%	2	29%	1	20%	0,20	-4,42	0,20	-4,08	0,20	-3,89	0,20	-3,73	0,11	-3,11
5	7	1,4	1	20%	3	43%	2	40%	0,03	-1,53	0,03	-1,09	0,03	-0,76	0,03	-0,46	-0,23	-0,07
5	7	1,4	1	20%	3	43%	1	20%	0,23	-3,83	0,23	-3,51	0,03	-1,16	0,03	-0,66	-0,23	-0,12
5	7	1,4	1	20%	2	29%	2	40%	0,00	-0,91	-0,11	-0,34	-0,11	-0,32	-0,11	-0,30	-0,20	-0,21
5	7	1,4	1	20%	2	29%	1	20%	0,09	-2,35	0,09	-1,98	0,09	-1,74	0,09	-1,54	-0,09	-0,85
5	7	1,4	1	20%	1	14%	2	40%	0,00	-0,87	-0,20	-0,28	-0,20	-0,25	-0,20	-0,22	-0,20	-0,22
5	7	1,4	1	20%	1	14%	1	20%	0,00	-2,17	0,00	-1,78	0,00	-1,52	0,00	-1,28	0,00	-1,26

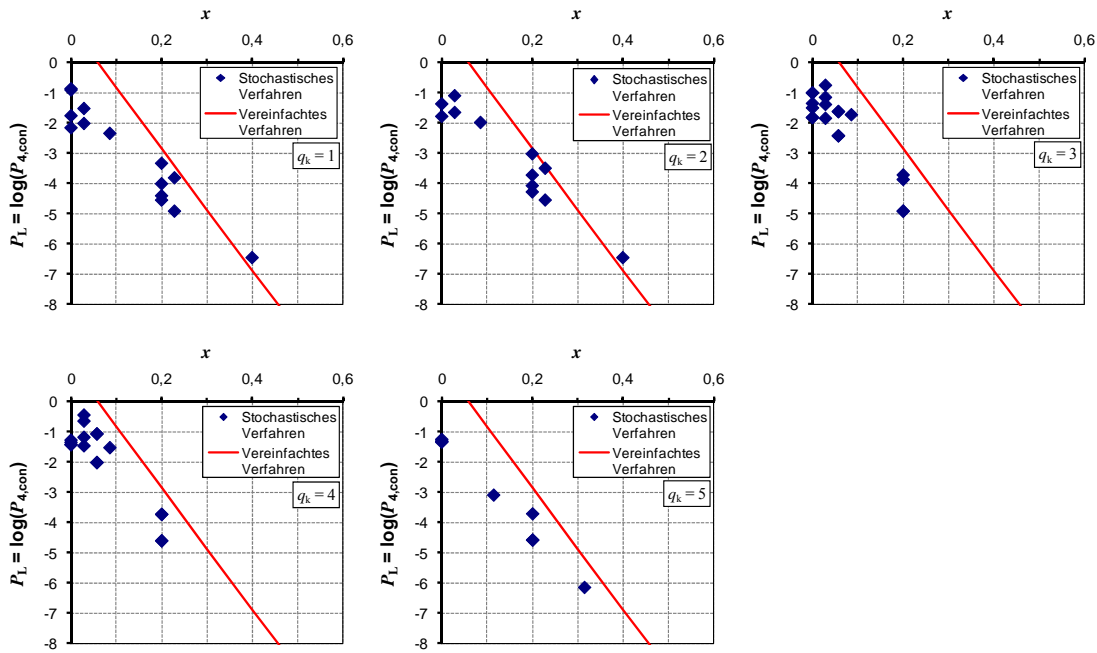


Bild C.11: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Tabelle C.14: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	9	1,5	5	83%	7	78%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-2,14	0,00	-1,70	0,00	-1,67
6	9	1,5	5	83%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,14	0,00	-1,70	0,00	-1,67
6	9	1,5	5	83%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,14	0,00	-1,70	0,00	-1,67
6	9	1,5	5	83%	5	56%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	4	67%	7	78%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,04	-0,06	-0,38	-0,17	-0,19
6	9	1,5	4	67%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,04	-0,06	-0,38	-0,17	-0,19
6	9	1,5	4	67%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,04	-0,06	-0,38	-0,17	-0,19
6	9	1,5	4	67%	5	56%	3	50%	0,17	-3,80	0,17	-3,49	0,17	-3,31	0,17	-3,17	0,11	-2,94
6	9	1,5	4	67%	5	56%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-3,79	0,17	-3,48	0,11	-3,10
6	9	1,5	4	67%	5	56%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-3,79	0,17	-3,48	0,11	-3,10
6	9	1,5	4	67%	3	33%	3	50%	0,17	-3,77	0,17	-3,45	0,17	-3,45	0,17	-3,45	0,17	-3,45
6	9	1,5	4	67%	3	33%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,33	-6,48
6	9	1,5	4	67%	3	33%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,33	-6,48
6	9	1,5	3	50%	7	78%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,97	-0,06	-0,26	-0,33	0,00
6	9	1,5	3	50%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,97	-0,06	-0,26	-0,33	0,00
6	9	1,5	3	50%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,97	-0,06	-0,26	-0,33	0,00
6	9	1,5	3	50%	5	56%	3	50%	0,06	-1,96	0,06	-1,60	0,06	-1,35	0,06	-1,16	-0,06	-0,80
6	9	1,5	3	50%	5	56%	2	33%	0,22	-4,31	0,22	-4,00	0,06	-1,81	0,06	-1,43	-0,06	-0,91
6	9	1,5	3	50%	5	56%	1	17%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,06	-1,81	0,06	-1,44	-0,06	-0,91
6	9	1,5	3	50%	3	33%	3	50%	0,00	-1,66	0,00	-1,27	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	9	1,5	3	50%	3	33%	2	33%	0,17	-3,68	0,17	-3,36	0,17	-3,17	0,17	-3,03	0,17	-3,00
6	9	1,5	3	50%	3	33%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,17	-3,63	0,17	-3,32	0,17	-3,27
6	9	1,5	2	33%	5	56%	3	50%	0,06	-1,52	0,06	-1,11	0,06	-0,81	0,06	-0,55	-0,22	-0,07
6	9	1,5	2	33%	5	56%	2	33%	0,22	-3,40	0,22	-3,08	0,06	-1,22	0,06	-0,76	-0,22	-0,11
6	9	1,5	2	33%	5	56%	1	17%	0,39	-6,48	0,39	-6,18	0,06	-1,23	0,06	-0,77	-0,22	-0,11
6	9	1,5	2	33%	3	33%	3	50%	0,00	-0,86	-0,17	-0,33	-0,17	-0,30	-0,17	-0,26	-0,17	-0,25
6	9	1,5	2	33%	3	33%	2	33%	0,00	-1,91	0,00	-1,54	0,00	-1,29	0,00	-1,09	0,00	-0,97
6	9	1,5	2	33%	3	33%	1	17%	0,17	-4,55	0,17	-4,27	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,17
6	9	1,5	2	33%	1	11%	3	50%	0,00	-0,82	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26
6	9	1,5	2	33%	1	11%	2	33%	0,00	-1,70	0,00	-1,30	0,00	-1,30	0,00	-1,29	0,00	-1,29
6	9	1,5	2	33%	1	11%	1	17%	0,17	-4,14	0,17	-3,81	0,17	-3,63	0,17	-3,49	0,17	-3,49

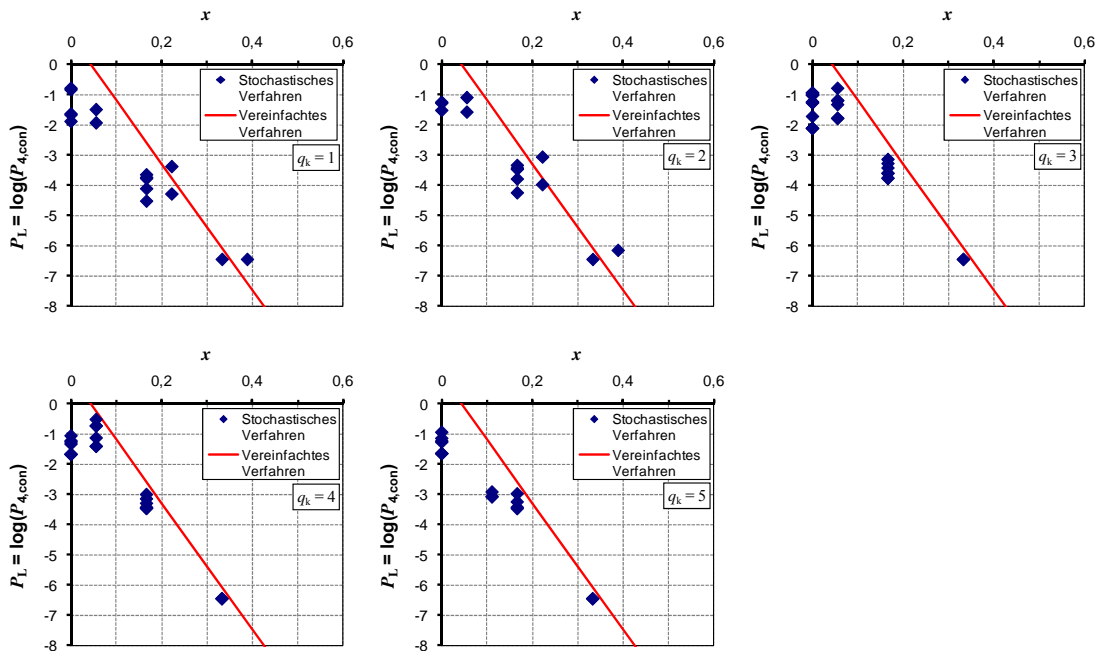


Bild C.12: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Tabelle C.15: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	10	1,4	5	71%	7	70%	3	43%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,37	0,00	-1,23
7	10	1,4	5	71%	7	70%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,37	0,00	-1,23
7	10	1,4	5	71%	7	70%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,37	0,00	-1,23
7	10	1,4	5	71%	6	60%	3	43%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,14	-3,61	0,14	-3,30	0,11	-3,09
7	10	1,4	5	71%	6	60%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,61	0,14	-3,30	0,11	-3,09
7	10	1,4	5	71%	6	60%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-3,61	0,14	-3,30	0,11	-3,09
7	10	1,4	5	71%	5	50%	3	43%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,14	-3,60	0,14	-3,29	0,14	-3,28
7	10	1,4	5	71%	5	50%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,60	0,14	-3,29	0,14	-3,28
7	10	1,4	5	71%	5	50%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-3,60	0,14	-3,29	0,14	-3,28
7	10	1,4	4	57%	6	60%	3	43%	0,17	-3,90	0,17	-3,60	0,03	-1,70	0,03	-1,33	-0,03	-0,97
7	10	1,4	4	57%	6	60%	2	29%	0,31	<-7	0,31	<-7	0,03	-1,71	0,03	-1,33	-0,03	-0,97
7	10	1,4	4	57%	6	60%	1	14%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,03	-1,71	0,03	-1,33	-0,03	-0,97
7	10	1,4	4	57%	5	50%	3	43%	0,14	-3,74	0,14	-3,43	0,00	-1,60	0,00	-1,22	0,00	-1,19
7	10	1,4	4	57%	5	50%	2	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,61	0,00	-1,22	0,00	-1,20
7	10	1,4	4	57%	5	50%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,61	0,00	-1,22	0,00	-1,20
7	10	1,4	4	57%	4	40%	3	43%	0,14	-3,36	0,14	-3,06	0,14	-2,87	0,14	-2,72	0,14	-2,71
7	10	1,4	4	57%	4	40%	2	29%	0,29	-6,00	0,29	-5,88	0,14	-3,34	0,14	-3,02	0,14	-3,00
7	10	1,4	4	57%	4	40%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,34	0,14	-3,02	0,14	-3,00
7	10	1,4	3	43%	5	50%	3	43%	0,14	-2,67	0,14	-2,34	0,00	-0,84	-0,07	-0,35	-0,14	-0,24
7	10	1,4	3	43%	5	50%	2	29%	0,29	-5,20	0,29	-4,81	0,00	-0,86	-0,07	-0,36	-0,14	-0,25
7	10	1,4	3	43%	5	50%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,86	-0,07	-0,36	-0,14	-0,25
7	10	1,4	3	43%	4	40%	3	43%	0,00	-1,78	0,00	-1,41	0,00	-1,17	0,00	-0,97	0,00	-0,91
7	10	1,4	3	43%	4	40%	2	29%	0,14	-3,85	0,14	-3,52	0,00	-1,61	0,00	-1,23	0,00	-1,14
7	10	1,4	3	43%	4	40%	1	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,62	0,00	-1,23	0,00	-1,14
7	10	1,4	3	43%	3	30%	3	43%	0,00	-1,59	0,00	-1,21	0,00	-1,20	0,00	-1,20	0,00	-1,19
7	10	1,4	3	43%	3	30%	2	29%	0,14	-3,43	0,14	-3,13	0,14	-2,94	0,14	-2,80	0,13	-2,73
7	10	1,4	3	43%	3	30%	1	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,14	-3,42	0,14	-3,10	0,13	-2,97

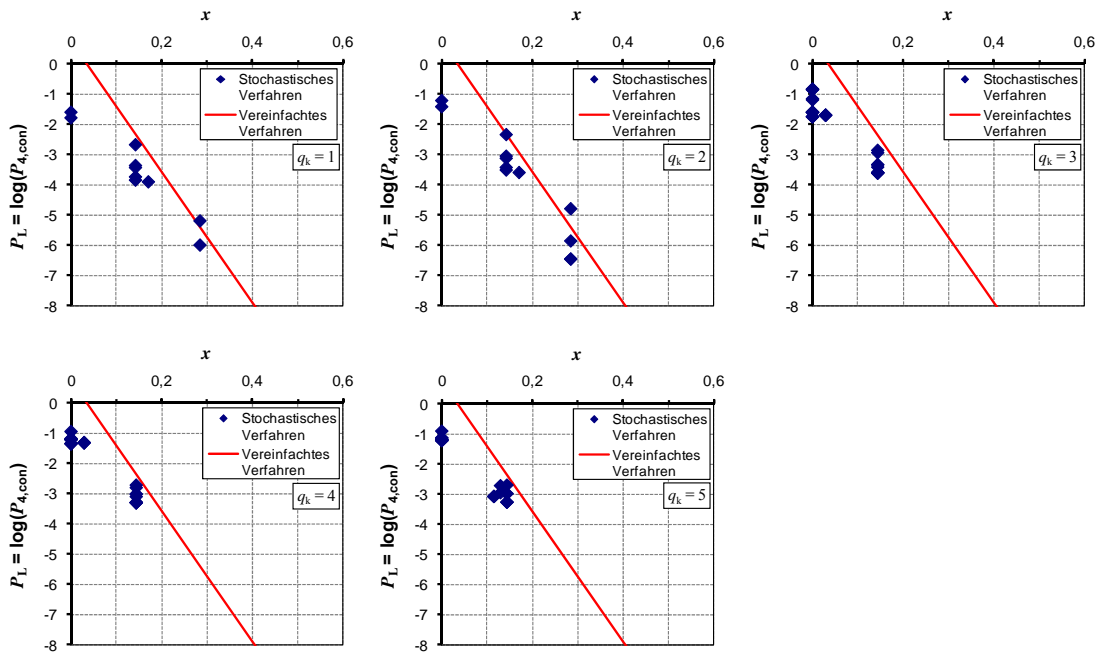


Bild C.13: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Tabelle C.16: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	12	1,5	6	75%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,16
8	12	1,5	6	75%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,16
8	12	1,5	6	75%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,16
8	12	1,5	6	75%	6	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-6,00	0,25	-5,70	0,25	-5,63
8	12	1,5	6	75%	6	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-6,00	0,25	-5,70	0,25	-5,63
8	12	1,5	6	75%	6	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	-6,00	0,25	-5,70	0,25	-5,63
8	12	1,5	6	75%	3	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	4	50%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,96	0,00	-0,43	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,96	0,00	-0,43	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,96	0,00	-0,43	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	6	50%	3	38%	0,13	-3,56	0,13	-3,23	0,00	-1,57	0,00	-1,20	0,00	-1,02
8	12	1,5	4	50%	6	50%	2	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,00	-1,58	0,00	-1,21	0,00	-1,02
8	12	1,5	4	50%	6	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,58	0,00	-1,21	0,00	-1,02
8	12	1,5	4	50%	3	25%	3	38%	0,13	-3,11	0,13	-2,79	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78
8	12	1,5	4	50%	3	25%	2	25%	0,25	-5,48	0,25	-5,30	0,25	-5,20	0,25	-5,01	0,25	-5,01
8	12	1,5	4	50%	3	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,33	0,25	-5,33
8	12	1,5	3	38%	6	50%	3	38%	0,13	-2,68	0,13	-2,36	0,00	-0,95	0,00	-0,50	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	2	25%	0,25	-4,99	0,25	-4,75	0,00	-0,97	0,00	-0,51	-0,13	-0,20
8	12	1,5	3	38%	6	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,51	-0,13	-0,20
8	12	1,5	3	38%	4	33%	3	38%	0,00	-1,72	0,00	-1,36	0,00	-1,12	0,00	-0,92	0,00	-0,88
8	12	1,5	3	38%	4	33%	2	25%	0,13	-3,65	0,13	-3,35	0,00	-1,55	0,00	-1,17	0,00	-1,12
8	12	1,5	3	38%	4	33%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,00	-1,56	0,00	-1,18	0,00	-1,13
8	12	1,5	3	38%	2	17%	3	38%	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16
8	12	1,5	3	38%	2	17%	2	25%	0,13	-3,26	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94
8	12	1,5	3	38%	2	17%	1	13%	0,25	<-7	0,25	-6,18	0,25	-5,78	0,25	-5,70	0,21	-5,52

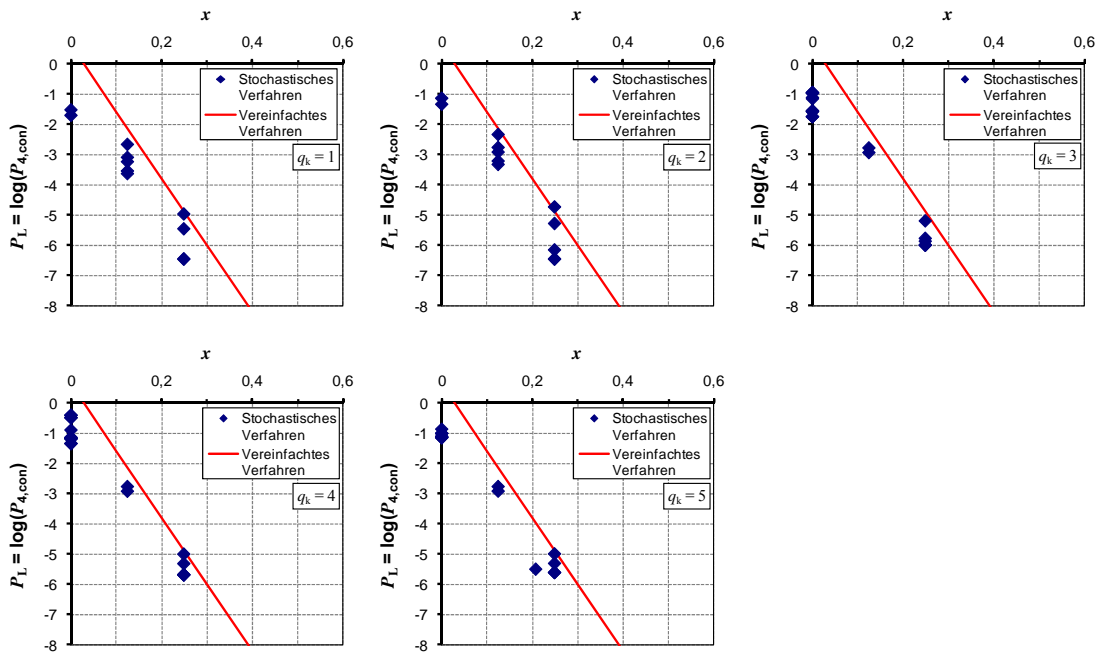


Bild C.14: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.17: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 13$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	13	1,4	7	78%	10	77%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,33	0,00	-1,18
9	13	1,4	7	78%	10	77%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,33	0,00	-1,18
9	13	1,4	7	78%	10	77%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,33	0,00	-1,18
9	13	1,4	7	78%	8	62%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,11	-3,41	0,11	-3,11	0,11	-3,10
9	13	1,4	7	78%	8	62%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,11	-3,41	0,11	-3,11	0,11	-3,10
9	13	1,4	7	78%	8	62%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,11	-3,41	0,11	-3,11	0,11	-3,10
9	13	1,4	7	78%	6	46%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,32	<-7
9	13	1,4	7	78%	6	46%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,32	<-7
9	13	1,4	7	78%	6	46%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,32	<-7
9	13	1,4	5	56%	10	77%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,91	-0,01	-0,38	-0,22	-0,01
9	13	1,4	5	56%	10	77%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,91	-0,01	-0,38	-0,22	-0,01
9	13	1,4	5	56%	10	77%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,91	-0,01	-0,38	-0,22	-0,01
9	13	1,4	5	56%	8	62%	3	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,86	-0,05	-0,38	-0,11	-0,26
9	13	1,4	5	56%	8	62%	2	22%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,86	-0,05	-0,38	-0,11	-0,26
9	13	1,4	5	56%	8	62%	1	11%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,86	-0,05	-0,38	-0,11	-0,26
9	13	1,4	5	56%	6	46%	3	33%	0,22	-5,27	0,22	-4,89	0,11	-2,93	0,11	-2,61	0,09	-2,45
9	13	1,4	5	56%	6	46%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,11	-2,94	0,11	-2,61	0,09	-2,45
9	13	1,4	5	56%	6	46%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,11	-2,94	0,11	-2,61	0,09	-2,45
9	13	1,4	3	33%	8	62%	3	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,00	0,00	-0,72	-0,05	-0,18	-0,33	0,00
9	13	1,4	3	33%	8	62%	2	22%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,72	-0,05	-0,18	-0,33	0,00
9	13	1,4	3	33%	8	62%	1	11%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,72	-0,05	-0,18	-0,33	0,00
9	13	1,4	3	33%	6	46%	3	33%	0,13	-2,64	0,13	-2,32	0,02	-0,99	0,02	-0,56	-0,13	-0,18
9	13	1,4	3	33%	6	46%	2	22%	0,24	-4,97	0,24	-4,67	0,02	-1,01	0,02	-0,58	-0,13	-0,18
9	13	1,4	3	33%	6	46%	1	11%	0,35	<-7	0,35	<-7	0,02	-1,02	0,02	-0,58	-0,13	-0,18
9	13	1,4	3	33%	4	31%	3	33%	0,00	-1,70	0,00	-1,34	0,00	-1,10	0,00	-0,90	0,00	-0,85
9	13	1,4	3	33%	4	31%	2	22%	0,11	-3,52	0,11	-3,23	0,00	-1,53	0,00	-1,16	0,00	-1,07
9	13	1,4	3	33%	4	31%	1	11%	0,22	<-7	0,22	<-7	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,08

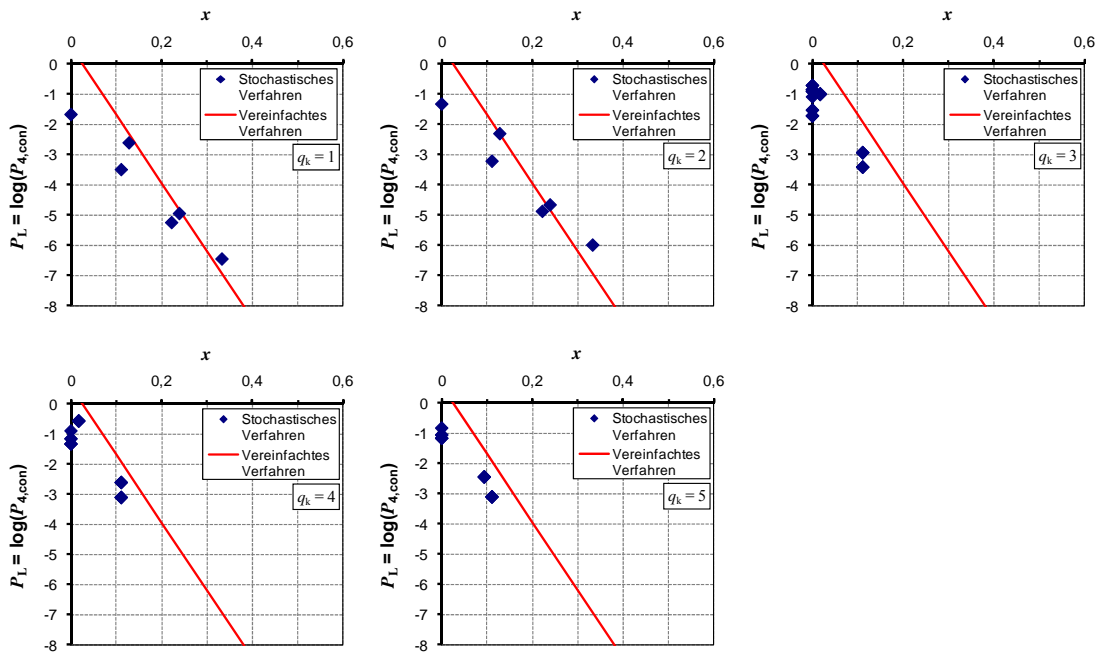


Bild C.15: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 13$ Spanngliedern

Tabelle C.18: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	15	1,5	8	80%	12	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,34	0,00	-1,14
10	15	1,5	8	80%	12	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,34	0,00	-1,14
10	15	1,5	8	80%	12	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,34	0,00	-1,14
10	15	1,5	8	80%	10	67%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-3,37	0,10	-3,05	0,10	-3,04
10	15	1,5	8	80%	10	67%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,10	-3,37	0,10	-3,05	0,10	-3,04
10	15	1,5	8	80%	10	67%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,10	-3,37	0,10	-3,05	0,10	-3,04
10	15	1,5	8	80%	8	53%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	6	60%	12	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,42	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	12	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,42	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	12	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,42	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	10	67%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,88	-0,03	-0,41	-0,10	-0,25
10	15	1,5	6	60%	10	67%	2	20%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	-0,03	-0,41	-0,10	-0,25
10	15	1,5	6	60%	10	67%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,88	-0,03	-0,41	-0,10	-0,25
10	15	1,5	6	60%	8	53%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,10	-2,82	0,10	-2,50	0,07	-2,22
10	15	1,5	6	60%	8	53%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-2,82	0,10	-2,50	0,07	-2,22
10	15	1,5	6	60%	8	53%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-2,82	0,10	-2,50	0,07	-2,22
10	15	1,5	4	40%	10	67%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,74	-0,03	-0,22	-0,30	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	2	20%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,74	-0,03	-0,22	-0,30	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,74	-0,03	-0,22	-0,30	0,00
10	15	1,5	4	40%	8	53%	3	30%	0,23	-4,59	0,23	-4,28	0,03	-1,07	0,03	-0,65	-0,13	-0,16
10	15	1,5	4	40%	8	53%	2	20%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,03	-1,07	0,03	-0,65	-0,13	-0,16
10	15	1,5	4	40%	8	53%	1	10%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,03	-1,07	0,03	-0,65	-0,13	-0,16
10	15	1,5	4	40%	4	27%	3	30%	0,10	-2,87	0,10	-2,56	0,10	-2,37	0,10	-2,23	0,10	-2,22
10	15	1,5	4	40%	4	27%	2	20%	0,20	-5,40	0,20	-5,08	0,10	-2,84	0,10	-2,53	0,10	-2,52
10	15	1,5	4	40%	4	27%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,10	-2,84	0,10	-2,53	0,10	-2,52

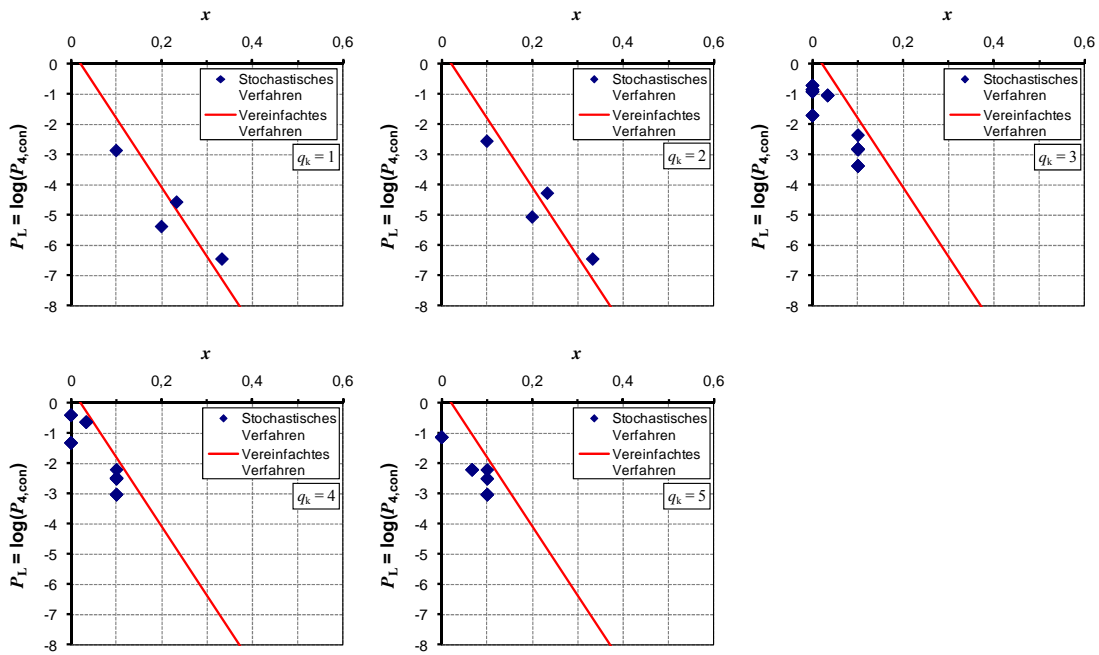


Bild C.16: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Tabelle C.19: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 12$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
12	18	1,5	9	75%	13	72%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,14	0,00	-1,08
12	18	1,5	9	75%	13	72%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,14	0,00	-1,08
12	18	1,5	9	75%	13	72%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,52	0,00	-1,14	0,00	-1,08
12	18	1,5	9	75%	10	56%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,78	0,17	-4,39	0,17	-4,39
12	18	1,5	9	75%	10	56%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,17	-4,78	0,17	-4,39	0,17	-4,39
12	18	1,5	9	75%	10	56%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,17	-4,78	0,17	-4,39	0,17	-4,39
12	18	1,5	9	75%	7	39%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	18	1,5	9	75%	7	39%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	18	1,5	9	75%	7	39%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
12	18	1,5	8	67%	13	72%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	-0,03	-0,41	-0,08	-0,26
12	18	1,5	8	67%	13	72%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,88	-0,03	-0,41	-0,08	-0,26
12	18	1,5	8	67%	13	72%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,88	-0,03	-0,41	-0,08	-0,26
12	18	1,5	8	67%	10	56%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,08	-2,65	0,08	-2,33	0,08	-2,31
12	18	1,5	8	67%	10	56%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-2,65	0,08	-2,33	0,08	-2,31
12	18	1,5	8	67%	10	56%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,08	-2,65	0,08	-2,33	0,08	-2,31
12	18	1,5	8	67%	7	39%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,18	0,25	-6,18
12	18	1,5	8	67%	7	39%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,18	0,25	-6,18
12	18	1,5	8	67%	7	39%	1	8%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,18	0,25	-6,18
12	18	1,5	6	50%	13	72%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,73	-0,03	-0,22	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	13	72%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,73	-0,03	-0,22	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	13	72%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,73	-0,03	-0,22	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	10	56%	3	25%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,86	-0,03	-0,42	-0,08	-0,28
12	18	1,5	6	50%	10	56%	2	17%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,86	-0,03	-0,42	-0,08	-0,28
12	18	1,5	6	50%	10	56%	1	8%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,86	-0,03	-0,42	-0,08	-0,28
12	18	1,5	6	50%	7	39%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,08	-2,54	0,08	-2,21	0,08	-2,19
12	18	1,5	6	50%	7	39%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,08	-2,54	0,08	-2,21	0,08	-2,19
12	18	1,5	6	50%	7	39%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,08	-2,54	0,08	-2,21	0,08	-2,19
12	18	1,5	4	33%	10	56%	3	25%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,69	-0,03	-0,21	-0,25	0,00
12	18	1,5	4	33%	10	56%	2	17%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,69	-0,03	-0,21	-0,25	0,00
12	18	1,5	4	33%	10	56%	1	8%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,69	-0,03	-0,21	-0,25	0,00
12	18	1,5	4	33%	7	39%	3	25%	0,17	-3,91	0,17	-3,62	0,00	-0,85	-0,03	-0,42	-0,08	-0,28
12	18	1,5	4	33%	7	39%	2	17%	0,25	-6,18	0,25	-6,18	0,00	-0,85	-0,03	-0,42	-0,08	-0,28
12	18	1,5	4	33%	7	39%	1	8%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,85	-0,03	-0,42	-0,08	-0,28
12	18	1,5	4	33%	5	28%	3	25%	0,08	-2,76	0,08	-2,44	0,08	-2,25	0,08	-2,11	0,06	-1,94
12	18	1,5	4	33%	5	28%	2	17%	0,17	-5,00	0,17	-4,72	0,08	-2,72	0,08	-2,40	0,06	-2,12
12	18	1,5	4	33%	5	28%	1	8%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,08	-2,73	0,08	-2,41	0,06	-2,12

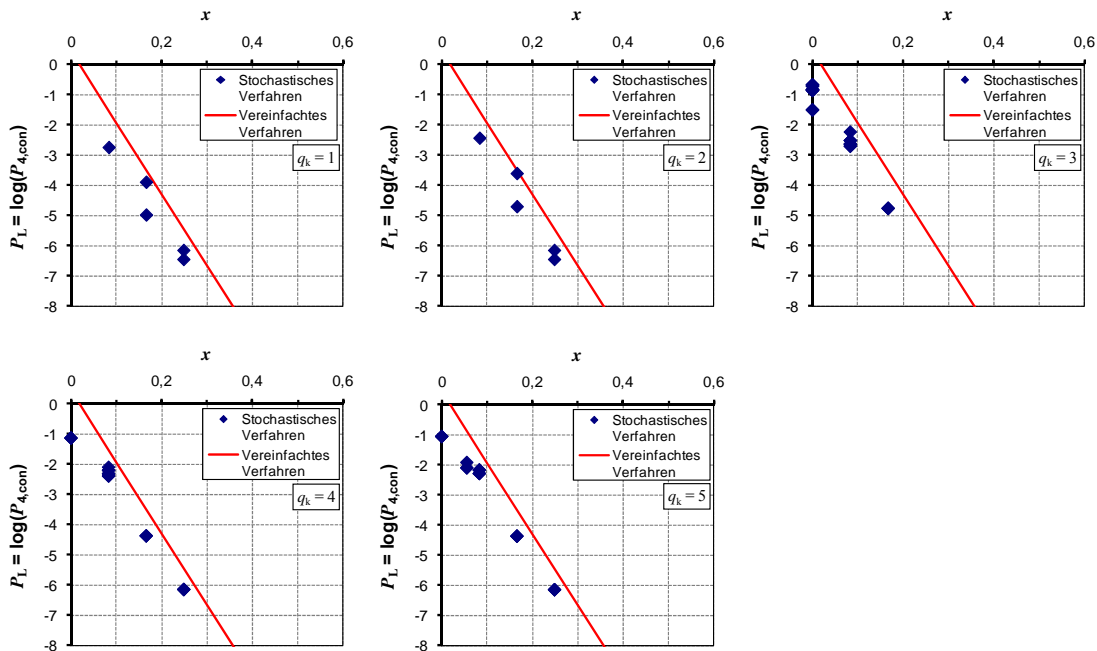


Bild C.17: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 12$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

C.2.3 Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert

Tabelle C.20: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	8	2,0	3	75%	6	75%	2	50%	0,25	-6,00	0,25	-5,63	0,00	-2,24	0,00	-1,81	0,00	-1,64
4	8	2,0	3	75%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,24	0,00	-1,81	0,00	-1,64
4	8	2,0	3	75%	4	50%	2	50%	0,25	-5,30	0,25	-4,99	0,25	-4,81	0,25	-4,66	0,25	-4,66
4	8	2,0	3	75%	4	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,27	0,25	-4,95	0,25	-4,95
4	8	2,0	3	75%	2	25%	2	50%	0,25	-5,27	0,25	-4,97	0,25	-4,97	0,25	-4,97	0,25	-4,97
4	8	2,0	3	75%	2	25%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	2	50%	6	75%	2	50%	0,25	-4,25	0,25	-3,91	0,00	-1,23	0,00	-0,60	-0,25	-0,11
4	8	2,0	2	50%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,23	0,00	-0,60	-0,25	-0,11
4	8	2,0	2	50%	4	50%	2	50%	0,00	-2,12	0,00	-1,74	0,00	-1,47	0,00	-1,25	0,00	-1,15
4	8	2,0	2	50%	4	50%	1	25%	0,25	-5,33	0,25	-5,05	0,00	-1,93	0,00	-1,53	0,00	-1,37
4	8	2,0	2	50%	2	25%	2	50%	0,00	-1,89	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	8	2,0	2	50%	2	25%	1	25%	0,25	-4,74	0,25	-4,45	0,25	-4,25	0,25	-4,11	0,25	-4,10
4	8	2,0	1	25%	6	75%	2	50%	0,25	-4,17	0,25	-3,84	0,00	-1,19	0,00	-0,54	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,20	0,00	-0,54	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	4	50%	2	50%	0,00	-1,53	0,00	-1,07	0,00	-0,70	0,00	-0,34	-0,25	-0,07
4	8	2,0	1	25%	4	50%	1	25%	0,25	-3,99	0,25	-3,68	0,00	-1,09	0,00	-0,54	-0,25	-0,12
4	8	2,0	1	25%	2	25%	2	50%	0,00	-0,90	-0,25	-0,26	-0,25	-0,24	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21
4	8	2,0	1	25%	2	25%	1	25%	0,00	-2,24	0,00	-1,86	0,00	-1,59	0,00	-1,36	0,00	-1,27

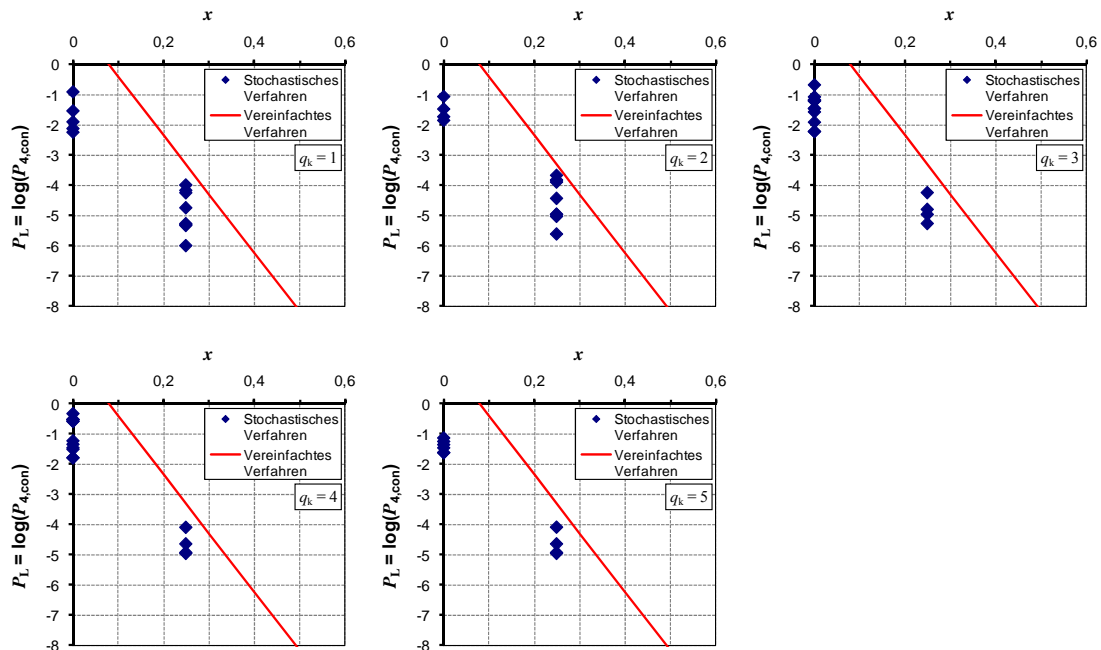


Bild C.18: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Tabelle C.21: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	10	2,0	4	80%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,19	0,00	-1,77	0,00	-1,60
5	10	2,0	4	80%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-2,19	0,00	-1,77	0,00	-1,60
5	10	2,0	4	80%	6	60%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,95	0,20	-4,63	0,20	-4,62
5	10	2,0	4	80%	6	60%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-4,95	0,20	-4,63	0,20	-4,62
5	10	2,0	4	80%	4	40%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	4	40%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	3	60%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,21	0,00	-0,59	-0,20	-0,12
5	10	2,0	3	60%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,21	0,00	-0,59	-0,20	-0,12
5	10	2,0	3	60%	6	60%	2	40%	0,20	-4,63	0,20	-4,29	0,00	-1,84	0,00	-1,44	0,00	-1,28
5	10	2,0	3	60%	6	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,84	0,00	-1,44	0,00	-1,28
5	10	2,0	3	60%	4	40%	2	40%	0,20	-4,11	0,20	-3,77	0,20	-3,58	0,20	-3,44	0,20	-3,43
5	10	2,0	3	60%	4	40%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,03	0,20	-3,72	0,20	-3,71
5	10	2,0	3	60%	2	20%	2	40%	0,20	-4,08	0,20	-3,75	0,20	-3,75	0,20	-3,75	0,20	-3,75
5	10	2,0	3	60%	2	20%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	2	40%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,17	0,00	-0,53	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,17	0,00	-0,53	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	6	60%	2	40%	0,20	-3,40	0,20	-3,09	0,00	-1,05	0,00	-0,52	-0,20	-0,15
5	10	2,0	2	40%	6	60%	1	20%	0,40	-6,18	0,40	-6,18	0,00	-1,05	0,00	-0,52	-0,20	-0,15
5	10	2,0	2	40%	4	40%	2	40%	0,00	-1,97	0,00	-1,59	0,00	-1,34	0,00	-1,13	0,00	-1,04
5	10	2,0	2	40%	4	40%	1	20%	0,20	-4,85	0,20	-4,52	0,00	-1,79	0,00	-1,40	0,00	-1,25
5	10	2,0	2	40%	2	20%	2	40%	0,00	-1,77	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,35	0,00	-1,35
5	10	2,0	2	40%	2	20%	1	20%	0,20	-4,31	0,20	-4,01	0,20	-3,83	0,20	-3,68	0,20	-3,68
5	10	2,0	1	20%	6	60%	2	40%	0,20	-3,29	0,20	-2,98	0,00	-0,99	0,00	-0,43	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	1	20%	0,40	-6,00	0,40	-6,00	0,00	-1,00	0,00	-0,44	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	4	40%	2	40%	0,00	-1,43	0,00	-0,99	0,00	-0,64	0,00	-0,32	-0,20	-0,08
5	10	2,0	1	20%	4	40%	1	20%	0,20	-3,68	0,20	-3,34	0,00	-1,03	0,00	-0,51	-0,20	-0,14
5	10	2,0	1	20%	2	20%	2	40%	0,00	-0,87	-0,20	-0,28	-0,20	-0,26	-0,20	-0,23	-0,20	-0,22
5	10	2,0	1	20%	2	20%	1	20%	0,00	-2,18	0,00	-1,80	0,00	-1,53	0,00	-1,31	0,00	-1,22

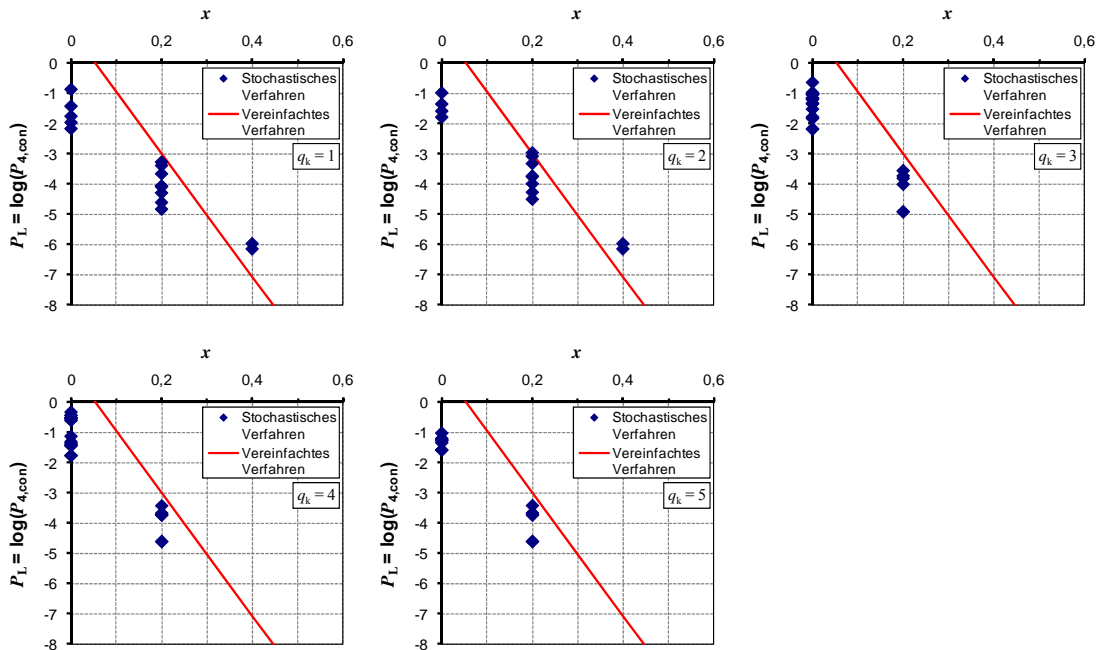


Bild C.19: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Tabelle C.22: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	12	2,0	5	83%	10	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-2,17	0,00	-1,74	0,00	-1,57
6	12	2,0	5	83%	10	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,17	0,00	-1,74	0,00	-1,57
6	12	2,0	5	83%	10	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,17	0,00	-1,74	0,00	-1,57
6	12	2,0	5	83%	8	67%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,74	0,17	-4,45	0,17	-4,44
6	12	2,0	5	83%	8	67%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,74	0,17	-4,45	0,17	-4,44
6	12	2,0	5	83%	8	67%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,17	-4,74	0,17	-4,45	0,17	-4,44
6	12	2,0	5	83%	6	50%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	10	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-1,19	0,00	-0,59	-0,17	-0,13
6	12	2,0	4	67%	10	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,59	-0,17	-0,13
6	12	2,0	4	67%	10	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,59	-0,17	-0,13
6	12	2,0	4	67%	8	67%	3	50%	0,17	-4,33	0,17	-4,00	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,24
6	12	2,0	4	67%	8	67%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,24
6	12	2,0	4	67%	8	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,78	0,00	-1,39	0,00	-1,24
6	12	2,0	4	67%	6	50%	3	50%	0,17	-3,81	0,17	-3,49	0,17	-3,30	0,17	-3,17	0,17	-3,16
6	12	2,0	4	67%	6	50%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-3,77	0,17	-3,47	0,17	-3,45
6	12	2,0	4	67%	6	50%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-3,77	0,17	-3,47	0,17	-3,45
6	12	2,0	3	50%	10	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-1,15	0,00	-0,52	-0,33	0,00
6	12	2,0	3	50%	10	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,15	0,00	-0,52	-0,33	0,00
6	12	2,0	3	50%	10	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,15	0,00	-0,52	-0,33	0,00
6	12	2,0	3	50%	8	67%	3	50%	0,17	-3,15	0,17	-2,83	0,00	-1,02	0,00	-0,51	-0,17	-0,16
6	12	2,0	3	50%	8	67%	2	33%	0,33	-6,00	0,33	-5,88	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,16
6	12	2,0	3	50%	8	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,16
6	12	2,0	3	50%	6	50%	3	50%	0,00	-1,86	0,00	-1,49	0,00	-1,24	0,00	-1,04	0,00	-0,95
6	12	2,0	3	50%	6	50%	2	33%	0,17	-4,16	0,17	-3,84	0,00	-1,69	0,00	-1,31	0,00	-1,16
6	12	2,0	3	50%	6	50%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,31	0,00	-1,16
6	12	2,0	3	50%	4	33%	3	50%	0,00	-1,67	0,00	-1,27	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	12	2,0	3	50%	4	33%	2	33%	0,17	-3,67	0,17	-3,35	0,17	-3,17	0,17	-3,03	0,17	-3,02
6	12	2,0	3	50%	4	33%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,17	-3,63	0,17	-3,32	0,17	-3,31
6	12	2,0	2	33%	8	67%	3	50%	0,17	-3,03	0,17	-2,71	0,00	-0,95	0,00	-0,41	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	8	67%	2	33%	0,33	-6,00	0,33	-5,88	0,00	-0,96	0,00	-0,42	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	8	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,96	0,00	-0,42	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	6	50%	3	50%	0,00	-1,36	0,00	-0,93	0,00	-0,60	0,00	-0,31	-0,17	-0,10
6	12	2,0	2	33%	6	50%	2	33%	0,17	-3,08	0,17	-2,76	0,00	-0,98	0,00	-0,49	-0,17	-0,16
6	12	2,0	2	33%	6	50%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,18	0,00	-0,99	0,00	-0,50	-0,17	-0,17
6	12	2,0	2	33%	4	33%	3	50%	0,00	-0,86	-0,17	-0,32	-0,17	-0,29	-0,17	-0,26	-0,17	-0,25
6	12	2,0	2	33%	4	33%	2	33%	0,00	-1,89	0,00	-1,53	0,00	-1,27	0,00	-1,07	0,00	-0,98
6	12	2,0	2	33%	4	33%	1	17%	0,17	-4,55	0,17	-4,30	0,00	-1,73	0,00	-1,34	0,00	-1,19

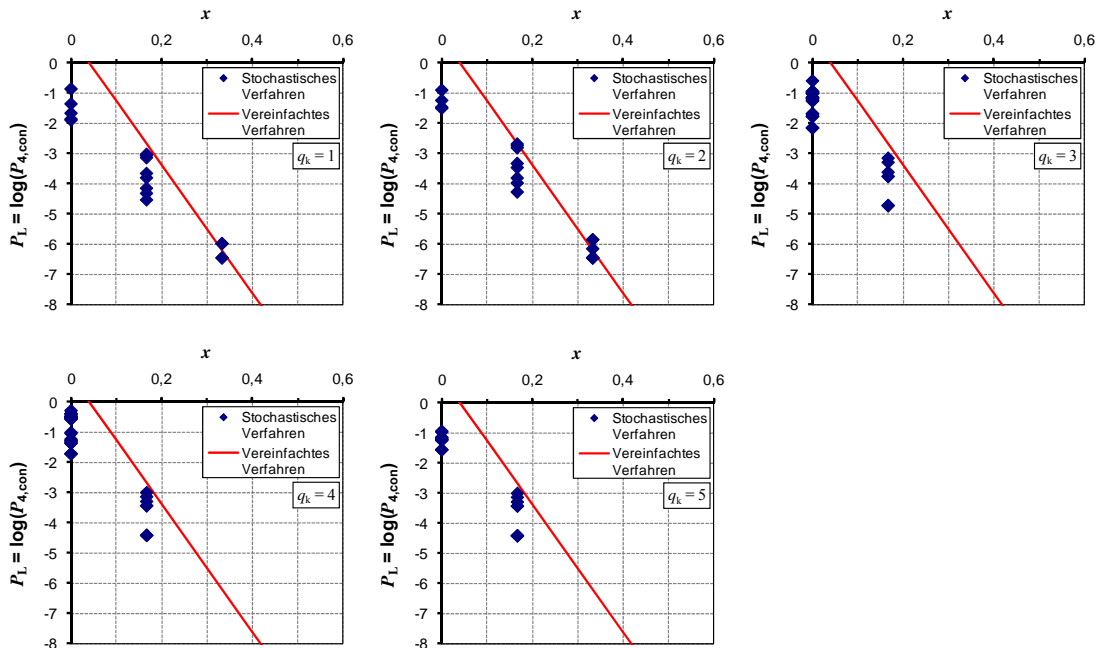


Bild C.20: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.23: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	14	2,0	5	71%	10	71%	3	43%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,21
7	14	2,0	5	71%	10	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,21
7	14	2,0	5	71%	10	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,36	0,00	-1,21
7	14	2,0	5	71%	8	57%	3	43%	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,14	-3,59	0,14	-3,28	0,14	-3,25
7	14	2,0	5	71%	8	57%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,59	0,14	-3,28	0,14	-3,25
7	14	2,0	5	71%	8	57%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-3,59	0,14	-3,28	0,14	-3,25
7	14	2,0	5	71%	6	43%	3	43%	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,18	0,29	-6,18
7	14	2,0	5	71%	6	43%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,29	-6,48
7	14	2,0	5	71%	6	43%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,29	-6,48
7	14	2,0	4	57%	10	71%	3	43%	0,29	-6,00	0,29	-5,33	0,00	-1,02	0,00	-0,51	-0,14	-0,17
7	14	2,0	4	57%	10	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,02	0,00	-0,51	-0,14	-0,17
7	14	2,0	4	57%	10	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,02	0,00	-0,51	-0,14	-0,17
7	14	2,0	4	57%	8	57%	3	43%	0,14	-3,79	0,14	-3,47	0,00	-1,63	0,00	-1,25	0,00	-1,11
7	14	2,0	4	57%	8	57%	2	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,64	0,00	-1,26	0,00	-1,11
7	14	2,0	4	57%	8	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,64	0,00	-1,26	0,00	-1,11
7	14	2,0	4	57%	6	43%	3	43%	0,14	-3,38	0,14	-3,06	0,14	-2,87	0,14	-2,73	0,14	-2,71
7	14	2,0	4	57%	6	43%	2	29%	0,29	-6,48	0,29	-5,88	0,14	-3,34	0,14	-3,03	0,14	-3,00
7	14	2,0	4	57%	6	43%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,34	0,14	-3,03	0,14	-3,00
7	14	2,0	3	43%	10	71%	3	43%	0,29	-5,70	0,29	-5,05	0,00	-0,94	0,00	-0,41	-0,29	-0,01
7	14	2,0	3	43%	10	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,41	-0,29	-0,01
7	14	2,0	3	43%	10	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,41	-0,29	-0,01
7	14	2,0	3	43%	8	57%	3	43%	0,14	-2,84	0,14	-2,51	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,14	-0,18
7	14	2,0	3	43%	8	57%	2	29%	0,29	-5,70	0,29	-5,33	0,00	-0,97	0,00	-0,50	-0,14	-0,18
7	14	2,0	3	43%	8	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,50	-0,14	-0,18
7	14	2,0	3	43%	6	43%	3	43%	0,00	-1,79	0,00	-1,42	0,00	-1,17	0,00	-0,97	0,00	-0,89
7	14	2,0	3	43%	6	43%	2	29%	0,14	-3,86	0,14	-3,54	0,00	-1,62	0,00	-1,24	0,00	-1,10
7	14	2,0	3	43%	6	43%	1	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,62	0,00	-1,24	0,00	-1,10

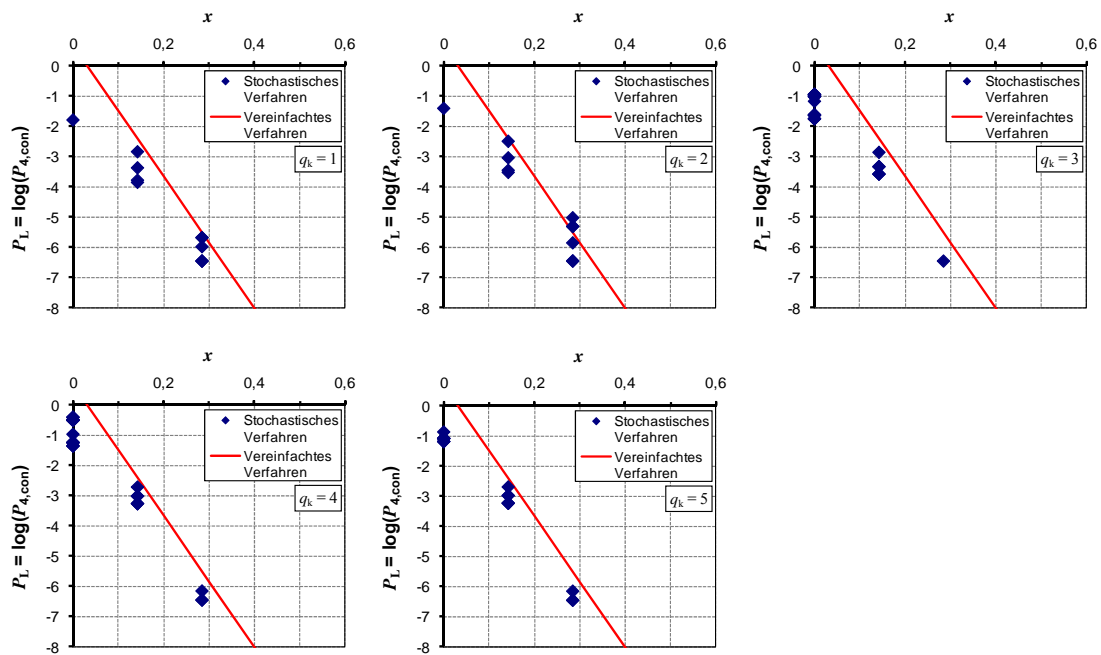


Bild C.21: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Tabelle C.24: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	16	2,0	6	75%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,34	0,00	-1,19
8	16	2,0	6	75%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,34	0,00	-1,19
8	16	2,0	6	75%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,34	0,00	-1,19
8	16	2,0	6	75%	8	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,63	0,25	-5,63
8	16	2,0	6	75%	8	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,63	0,25	-5,63
8	16	2,0	6	75%	8	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,63	0,25	-5,63
8	16	2,0	6	75%	4	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	4	50%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,40	-0,25	-0,01
8	16	2,0	4	50%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,40	-0,25	-0,01
8	16	2,0	4	50%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,40	-0,25	-0,01
8	16	2,0	4	50%	8	50%	3	38%	0,13	-3,52	0,13	-3,21	0,00	-1,55	0,00	-1,18	0,00	-1,04
8	16	2,0	4	50%	8	50%	2	25%	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,00	-1,56	0,00	-1,19	0,00	-1,05
8	16	2,0	4	50%	8	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,56	0,00	-1,19	0,00	-1,05
8	16	2,0	4	50%	4	25%	3	38%	0,13	-3,09	0,13	-2,77	0,13	-2,77	0,13	-2,77	0,13	-2,77
8	16	2,0	4	50%	4	25%	2	25%	0,25	-5,63	0,25	-5,25	0,25	-5,13	0,25	-5,03	0,25	-5,03
8	16	2,0	4	50%	4	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,78	0,25	-5,44	0,25	-5,44
8	16	2,0	3	38%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	8	50%	3	38%	0,13	-2,65	0,13	-2,32	0,00	-0,92	0,00	-0,48	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	2	25%	0,25	-5,00	0,25	-4,74	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,13	-0,20
8	16	2,0	3	38%	8	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,13	-0,20
8	16	2,0	3	38%	4	25%	3	38%	0,00	-1,55	0,00	-1,17	0,00	-1,16	0,00	-1,15	0,00	-1,15
8	16	2,0	3	38%	4	25%	2	25%	0,13	-3,27	0,13	-2,97	0,13	-2,79	0,13	-2,65	0,13	-2,64
8	16	2,0	3	38%	4	25%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,13	-3,29	0,13	-2,96	0,13	-2,93

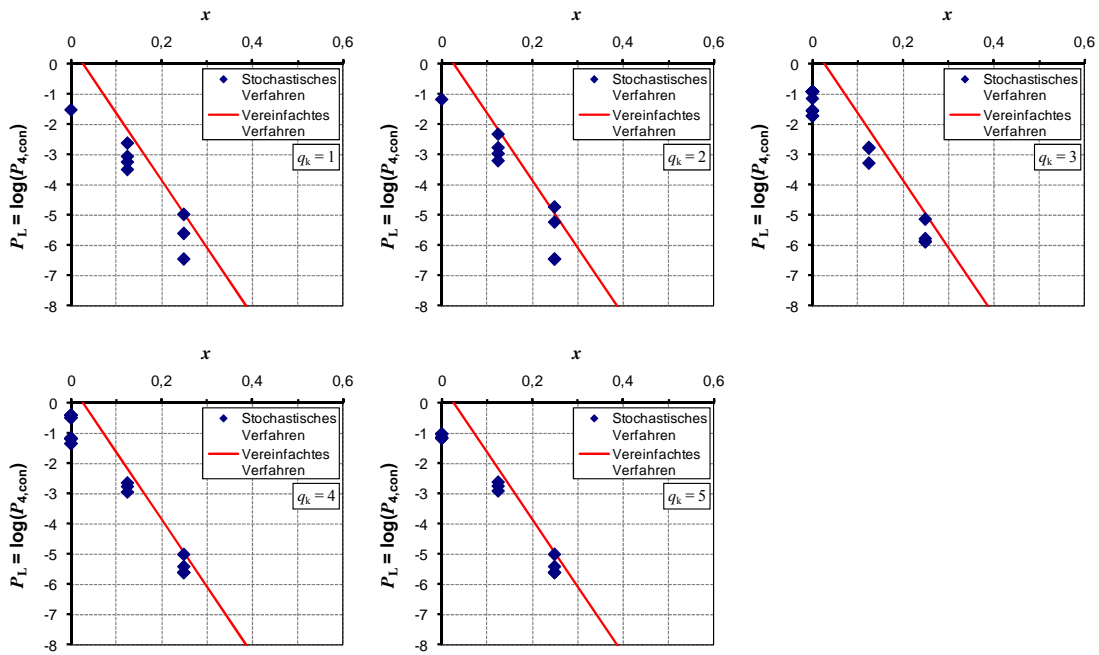


Bild C.22: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Tabelle C.25: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	18	2,0	7	78%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,33	0,00	-1,17
9	18	2,0	7	78%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,33	0,00	-1,17
9	18	2,0	7	78%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,33	0,00	-1,17
9	18	2,0	7	78%	10	56%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,52	0,22	-5,27	0,22	-5,27
9	18	2,0	7	78%	10	56%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	-5,52	0,22	-5,27	0,22	-5,27
9	18	2,0	7	78%	10	56%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,22	-5,52	0,22	-5,27	0,22	-5,27
9	18	2,0	7	78%	6	33%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	5	56%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,40	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,40	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,40	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	3	33%	0,22	-6,00	0,22	-5,78	0,00	-1,53	0,00	-1,15	0,00	-1,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,53	0,00	-1,15	0,00	-1,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,53	0,00	-1,15	0,00	-1,01
9	18	2,0	5	56%	6	33%	3	33%	0,22	-5,05	0,22	-4,76	0,22	-4,60	0,22	-4,48	0,22	-4,48
9	18	2,0	5	56%	6	33%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,10	0,22	-4,79	0,22	-4,79
9	18	2,0	5	56%	6	33%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,10	0,22	-4,79	0,22	-4,79
9	18	2,0	3	33%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,39	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,39	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,39	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	10	56%	3	33%	0,22	-4,29	0,22	-3,99	0,00	-0,83	0,00	-0,35	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,35	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,35	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	6	33%	3	33%	0,00	-1,70	0,00	-1,34	0,00	-1,10	0,00	-0,91	0,00	-0,83
9	18	2,0	3	33%	6	33%	2	22%	0,11	-3,57	0,11	-3,25	0,00	-1,54	0,00	-1,17	0,00	-1,03
9	18	2,0	3	33%	6	33%	1	11%	0,22	<-7	0,22	-6,48	0,00	-1,55	0,00	-1,17	0,00	-1,04

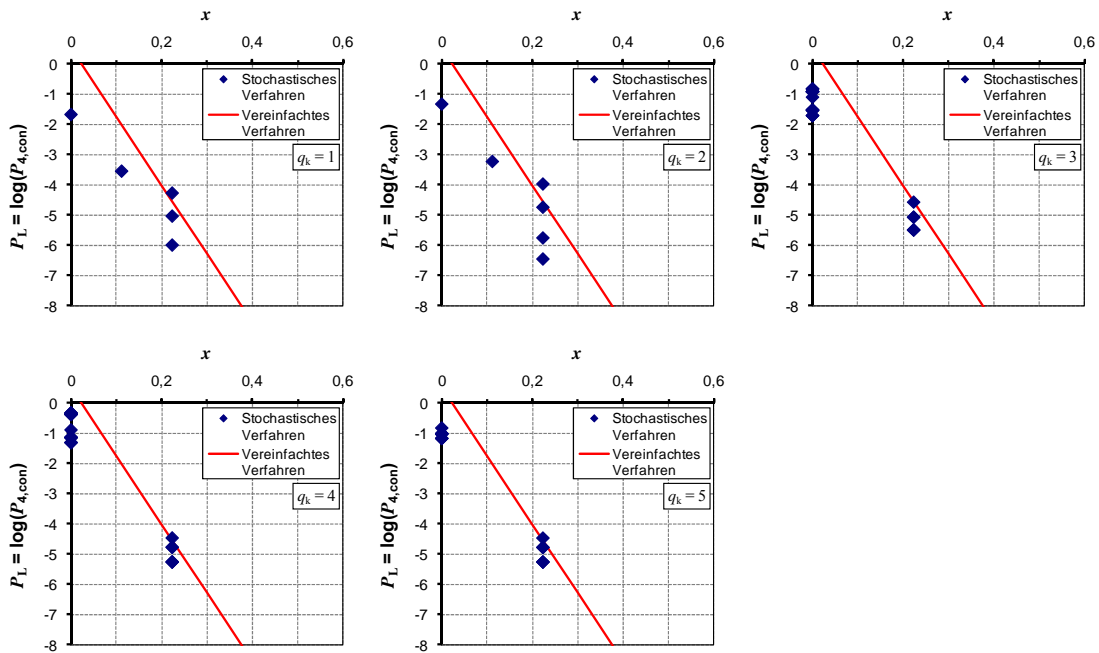


Bild C.23: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Tabelle C.26: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennulpp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	20	2,0	8	80%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,71	0,00	-1,32	0,00	-1,16
10	20	2,0	8	80%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,71	0,00	-1,32	0,00	-1,16
10	20	2,0	8	80%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,71	0,00	-1,32	0,00	-1,16
10	20	2,0	8	80%	12	60%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,27	0,20	-5,27
10	20	2,0	8	80%	12	60%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,27	0,20	-5,27
10	20	2,0	8	80%	12	60%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,27	0,20	-5,27
10	20	2,0	8	40%	8	40%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	8	80%	8	40%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	8	80%	8	40%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	12	60%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,50	0,00	-1,13	0,00	-0,99
10	20	2,0	6	60%	12	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,50	0,00	-1,13	0,00	-0,99
10	20	2,0	6	60%	12	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,50	0,00	-1,13	0,00	-0,99
10	20	2,0	6	60%	8	40%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,20	-4,77	0,20	-4,41	0,20	-4,40
10	20	2,0	6	60%	8	40%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,78	0,20	-4,41	0,20	-4,41
10	20	2,0	6	60%	8	40%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-4,78	0,20	-4,41	0,20	-4,41
10	20	2,0	6	60%	4	20%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,30	-6,48
10	20	2,0	6	60%	4	20%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	4	40%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	20	2,0	4	40%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	20	2,0	4	40%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,39	-0,40	0,00
10	20	2,0	4	40%	12	60%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,00	-0,82	0,00	-0,34	-0,20	-0,02
10	20	2,0	4	40%	12	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,34	-0,20	-0,02
10	20	2,0	4	40%	12	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,34	-0,20	-0,02
10	20	2,0	4	40%	8	40%	3	30%	0,10	-3,22	0,10	-2,91	0,00	-1,47	0,00	-1,11	0,00	-0,97
10	20	2,0	4	40%	8	40%	2	20%	0,20	-5,78	0,20	-5,63	0,00	-1,48	0,00	-1,12	0,00	-0,98
10	20	2,0	4	40%	8	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,49	0,00	-1,12	0,00	-0,98
10	20	2,0	4	40%	4	20%	3	30%	0,10	-2,84	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52
10	20	2,0	4	40%	4	20%	2	20%	0,20	-5,01	0,20	-4,82	0,20	-4,66	0,20	-4,53	0,20	-4,53
10	20	2,0	4	40%	4	20%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,18	0,20	-4,84	0,20	-4,84

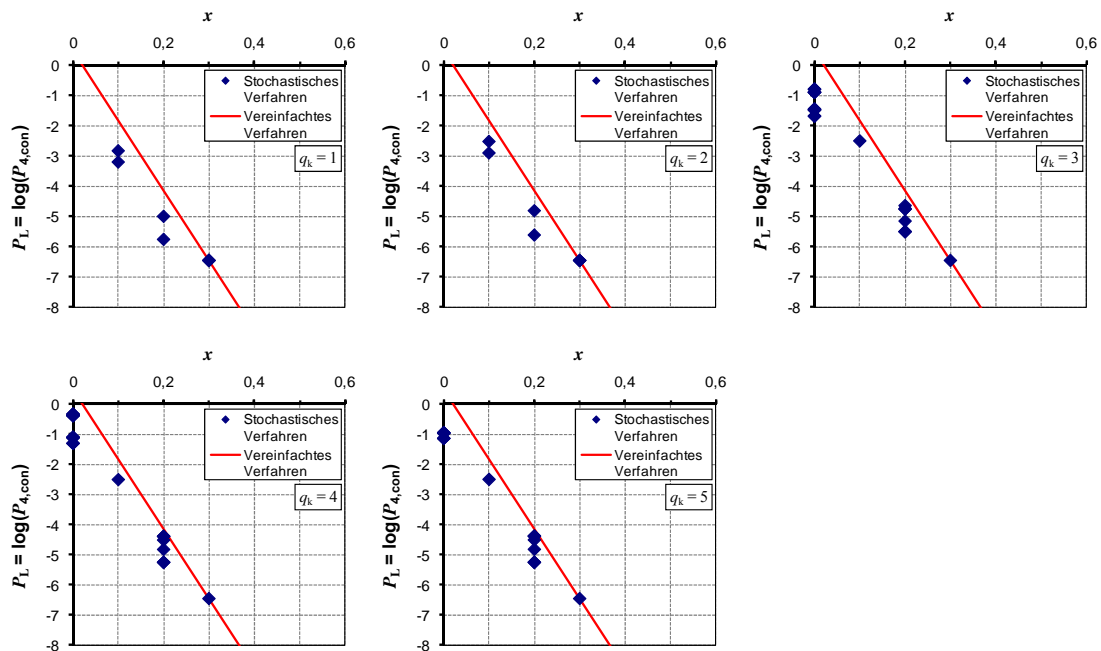


Bild C.24: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

C.3 Zwei Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl

C.3.1 Allgemeines

Im Rahmen der Parametervariation werden die vorhandenen Spanngliedanzahlen, die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten gemäß Tabelle C.27 angesetzt. Da $n_{br,i}$ in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten für die Berechnung nicht relevant ist, wird hier der Wert 0 eingesetzt. Entsprechend wird in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten für $n_{cr,i} = 0$ angesetzt. Die Werte für s_{min} , s_{max} , n_{NP} , n_{St} und n_F sind in den nachfolgenden Abschnitten in Tabellen angegeben. Im Querschnitt 3 werden die Eingangswerte n_{cr} bzw. n_{br} durch Multiplikation von n_{St} mit dem Verhältnis von s_{min} / s_{max} ermittelt. Das Ergebnis wird dabei auf die jeweils nächste ganze Spanngliedanzahl gerundet.

Die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens sind in den nachfolgenden Tabellen ebenfalls angegeben. In den Diagrammen werden die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens und des vereinfachten Verfahrens dargestellt.

Tabelle C.27: Ansatz der vorhandenen Spanngliedanzahlen, der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in der Parametervariation mit $q_s = 2$ Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl

Querschnitt	Vorhandene Spanngliedanzahl	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung n_{cr}	Erforderliche Restspanngliedanzahl n_{br}
1	s_{min}	0	n_{NP}
2	s_{min}	n_{NP} bzw. 0 bei $q_k \geq 2$ *)	n_{NP} bei $q_k \geq 2$ bzw. 0 **)
3	s_{min}	Runden $\{n_{St} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bzw. 0 bei $q_k \geq 3$ *)	Runden $\{n_{St} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bei $q_k \geq 3$ bzw. 0 **)
4	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 4$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 4$ bzw. 0 **)
5	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k = 5$ *)	n_{St} bei $q_k = 5$ bzw. 0 **)
6	s_{min}	n_F	0
7	s_{min}	n_F	0
8	s_{min}	n_F	0
9	s_{min}	n_F	0
10	s_{min}	n_F	0
*) Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten: $n_{cr} = 0$ **) Querschnitte mit Ankündigungsverhalten: $n_{br} = 0$ Anmerkung: Die Reihenfolge der Querschnitte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis			

C.3.2 Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert

Tabelle C.28: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennull		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	6	1,5	3	75%	4	67%	2	50%	0,25	-5,63	0,25	-5,25	0,00	-2,07	0,00	-2,03	0,00	-1,99
4	6	1,5	3	75%	4	67%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,07	0,00	-2,03	0,00	-1,99
4	6	1,5	3	75%	3	50%	2	50%	0,25	-5,27	0,25	-4,97	0,25	-4,79	0,25	-4,77	0,25	-4,76
4	6	1,5	3	75%	3	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,25	0,25	-5,20	0,25	-5,18
4	6	1,5	3	75%	2	33%	2	50%	0,25	-5,27	0,25	-4,97	0,25	-4,97	0,25	-4,97	0,25	-4,97
4	6	1,5	3	75%	2	33%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
4	6	1,5	2	50%	4	67%	2	50%	0,25	-3,50	0,25	-3,17	-0,08	-0,71	-0,08	-0,49	-0,25	-0,23
4	6	1,5	2	50%	4	67%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	-0,08	-0,72	-0,08	-0,49	-0,25	-0,23
4	6	1,5	2	50%	3	50%	2	50%	0,00	-2,09	0,00	-1,71	0,00	-1,44	0,00	-1,30	0,00	-1,16
4	6	1,5	2	50%	3	50%	1	25%	0,25	-5,30	0,25	-5,01	0,00	-1,90	0,00	-1,61	0,00	-1,38
4	6	1,5	2	50%	2	33%	2	50%	0,00	-1,90	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	6	1,5	2	50%	2	33%	1	25%	0,25	-4,77	0,25	-4,47	0,25	-4,27	0,17	-3,82	0,17	-3,60
4	6	1,5	1	25%	4	67%	2	50%	0,25	-3,35	0,25	-3,01	-0,08	-0,63	-0,08	-0,34	-0,50	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	-0,08	-0,63	-0,08	-0,35	-0,50	0,00
4	6	1,5	1	25%	3	50%	2	50%	0,00	-1,50	0,00	-1,04	0,00	-0,67	0,00	-0,38	-0,25	-0,07
4	6	1,5	1	25%	3	50%	1	25%	0,25	-3,94	0,25	-3,63	0,00	-1,06	0,00	-0,56	-0,25	-0,12
4	6	1,5	1	25%	2	33%	2	50%	0,00	-0,93	-0,17	-0,32	-0,17	-0,30	-0,17	-0,25	-0,25	-0,20
4	6	1,5	1	25%	2	33%	1	25%	0,08	-2,43	0,08	-2,07	0,08	-1,82	0,00	-1,21	-0,08	-0,84

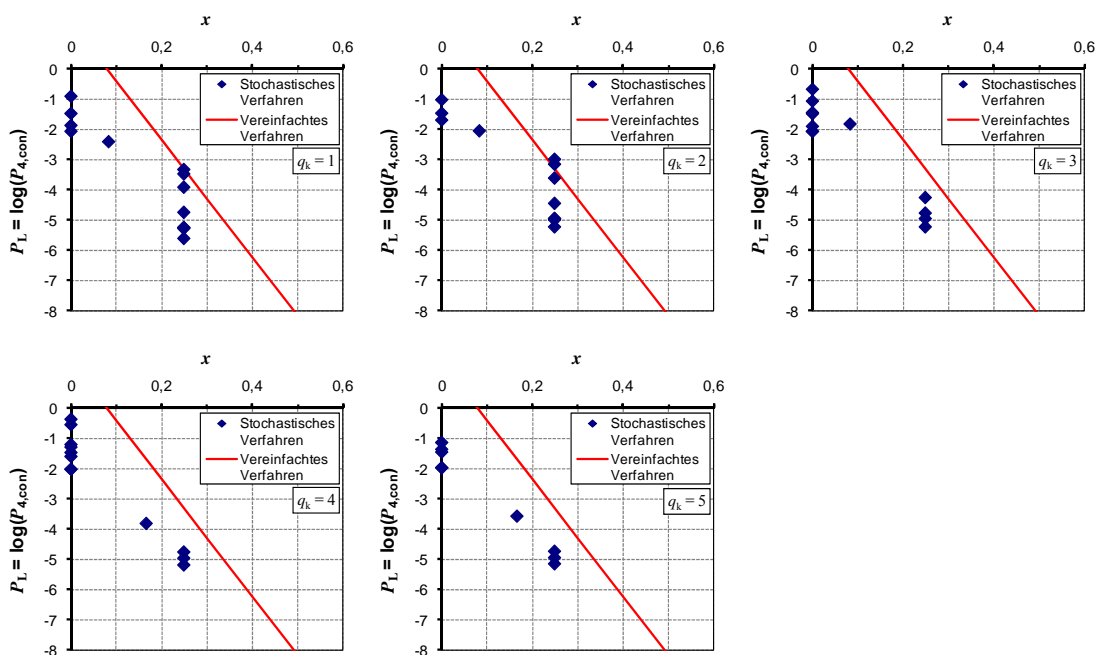


Bild C.25: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Tabelle C.29: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	9	1,5	5	83%	7	78%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-2,01	0,00	-1,96	0,00	-1,92
6	9	1,5	5	83%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,01	0,00	-1,96	0,00	-1,92
6	9	1,5	5	83%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,01	0,00	-1,96	0,00	-1,92
6	9	1,5	5	83%	5	56%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	4	67%	7	78%	3	50%	0,33	-6,18	0,33	-6,00	-0,06	-0,72	-0,06	-0,50	-0,17	-0,25
6	9	1,5	4	67%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	-0,06	-0,72	-0,06	-0,50	-0,17	-0,25
6	9	1,5	4	67%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	-0,06	-0,72	-0,06	-0,50	-0,17	-0,25
6	9	1,5	4	67%	5	56%	3	50%	0,17	-3,85	0,17	-3,52	0,17	-3,33	0,11	-3,04	0,11	-2,86
6	9	1,5	4	67%	5	56%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-3,80	0,11	-3,22	0,11	-2,97
6	9	1,5	4	67%	5	56%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-3,80	0,11	-3,22	0,11	-2,97
6	9	1,5	4	67%	3	33%	3	50%	0,17	-3,79	0,17	-3,47	0,17	-3,47	0,17	-3,47	0,17	-3,47
6	9	1,5	4	67%	3	33%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	4	67%	3	33%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	3	50%	7	78%	3	50%	0,33	-5,52	0,33	-5,40	-0,06	-0,62	-0,06	-0,34	-0,33	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	-0,06	-0,62	-0,06	-0,34	-0,33	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	-0,06	-0,62	-0,06	-0,34	-0,33	-0,01
6	9	1,5	3	50%	5	56%	3	50%	0,06	-2,00	0,06	-1,64	0,06	-1,40	0,00	-1,00	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	5	56%	2	33%	0,22	-4,37	0,22	-4,06	0,06	-1,86	0,00	-1,15	-0,06	-0,79
6	9	1,5	3	50%	5	56%	1	17%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,06	-1,86	0,00	-1,15	-0,06	-0,79
6	9	1,5	3	50%	3	33%	3	50%	0,00	-1,66	0,00	-1,27	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	9	1,5	3	50%	3	33%	2	33%	0,17	-3,66	0,17	-3,35	0,17	-3,16	0,17	-3,12	0,17	-3,09
6	9	1,5	3	50%	3	33%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,17	-3,62	0,17	-3,53	0,17	-3,45
6	9	1,5	3	50%	2	22%	3	50%	0,00	-1,66	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	9	1,5	3	50%	2	22%	2	33%	0,17	-3,65	0,17	-3,33	0,17	-3,33	0,17	-3,33	0,17	-3,33
6	9	1,5	3	50%	2	22%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,18	0,33	-6,18	0,28	-6,00	0,28	-6,00
6	9	1,5	2	33%	5	56%	3	50%	0,06	-1,60	0,06	-1,21	0,06	-0,92	0,00	-0,44	-0,22	-0,06
6	9	1,5	2	33%	5	56%	2	33%	0,22	-3,58	0,22	-3,25	0,06	-1,34	0,00	-0,55	-0,22	-0,08
6	9	1,5	2	33%	5	56%	1	17%	0,39	<-7	0,39	-6,48	0,06	-1,35	0,00	-0,55	-0,22	-0,08
6	9	1,5	2	33%	3	33%	3	50%	0,00	-0,85	-0,17	-0,31	-0,17	-0,28	-0,17	-0,27	-0,17	-0,25
6	9	1,5	2	33%	3	33%	2	33%	0,00	-1,87	0,00	-1,50	0,00	-1,25	0,00	-1,12	0,00	-0,99
6	9	1,5	2	33%	3	33%	1	17%	0,17	-4,53	0,17	-4,26	0,00	-1,70	0,00	-1,42	0,00	-1,21
6	9	1,5	2	33%	2	22%	3	50%	0,00	-0,82	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26
6	9	1,5	2	33%	2	22%	2	33%	0,00	-1,70	0,00	-1,31	0,00	-1,30	0,00	-1,30	0,00	-1,29
6	9	1,5	2	33%	2	22%	1	17%	0,17	-4,12	0,17	-3,84	0,17	-3,67	0,11	-3,26	0,11	-3,04

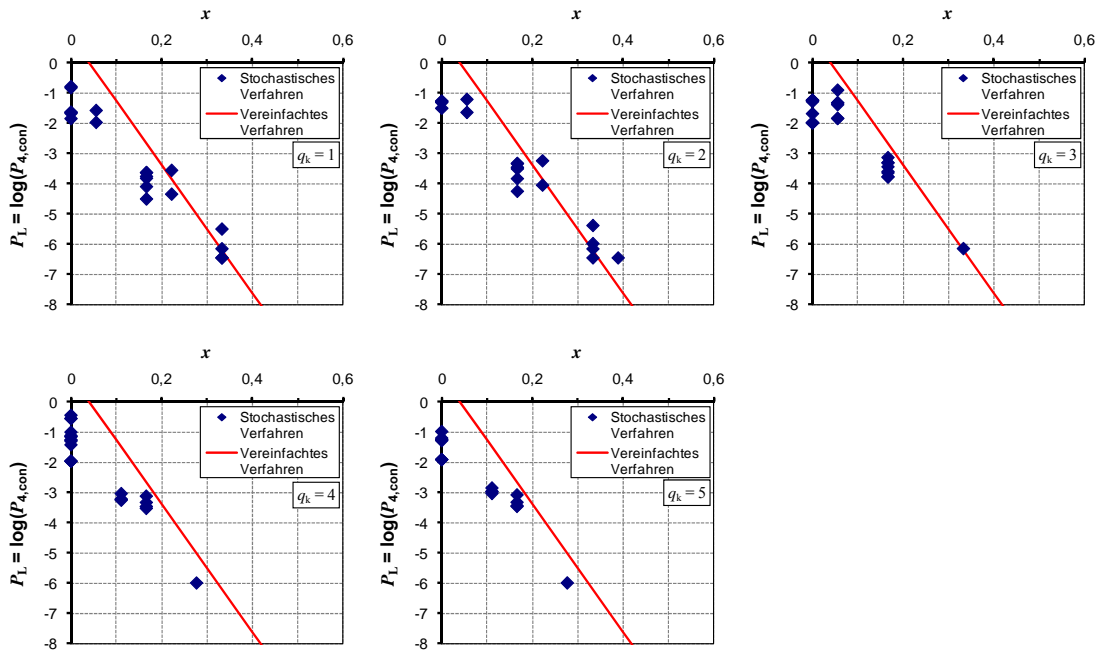


Bild C.26: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Tabelle C.30: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	12	1,5	6	75%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,71	0,00	-1,42	0,00	-1,20
8	12	1,5	6	75%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,71	0,00	-1,42	0,00	-1,20
8	12	1,5	6	75%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,71	0,00	-1,42	0,00	-1,20
8	12	1,5	6	75%	6	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,78	0,25	-5,78
8	12	1,5	6	75%	6	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,78	0,25	-5,78
8	12	1,5	6	75%	6	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	-5,88	0,25	-5,78	0,25	-5,78
8	12	1,5	6	75%	4	33%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	4	50%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,42	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,42	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,42	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	6	50%	3	38%	0,13	-3,49	0,13	-3,19	0,00	-1,53	0,00	-1,26	0,00	-1,05
8	12	1,5	4	50%	6	50%	2	25%	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,00	-1,54	0,00	-1,27	0,00	-1,06
8	12	1,5	4	50%	6	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,54	0,00	-1,27	0,00	-1,06
8	12	1,5	4	50%	4	33%	3	38%	0,13	-3,11	0,13	-2,79	0,13	-2,60	0,13	-2,60	0,13	-2,59
8	12	1,5	4	50%	4	33%	2	25%	0,25	-5,70	0,25	-5,33	0,13	-3,08	0,13	-3,06	0,13	-3,05
8	12	1,5	4	50%	4	33%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,13	-3,08	0,13	-3,07	0,13	-3,05
8	12	1,5	3	38%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,41	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,41	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,41	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	6	50%	3	38%	0,13	-2,62	0,13	-2,30	0,00	-0,90	0,00	-0,50	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	2	25%	0,25	-5,08	0,25	-4,76	0,00	-0,92	0,00	-0,51	-0,13	-0,20
8	12	1,5	3	38%	6	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,51	-0,13	-0,20
8	12	1,5	3	38%	4	33%	3	38%	0,00	-1,66	0,00	-1,29	0,00	-1,04	0,00	-1,00	0,00	-0,96
8	12	1,5	3	38%	4	33%	2	25%	0,13	-3,50	0,13	-3,21	0,00	-1,47	0,00	-1,38	0,00	-1,30
8	12	1,5	3	38%	4	33%	1	13%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,48	0,00	-1,39	0,00	-1,31

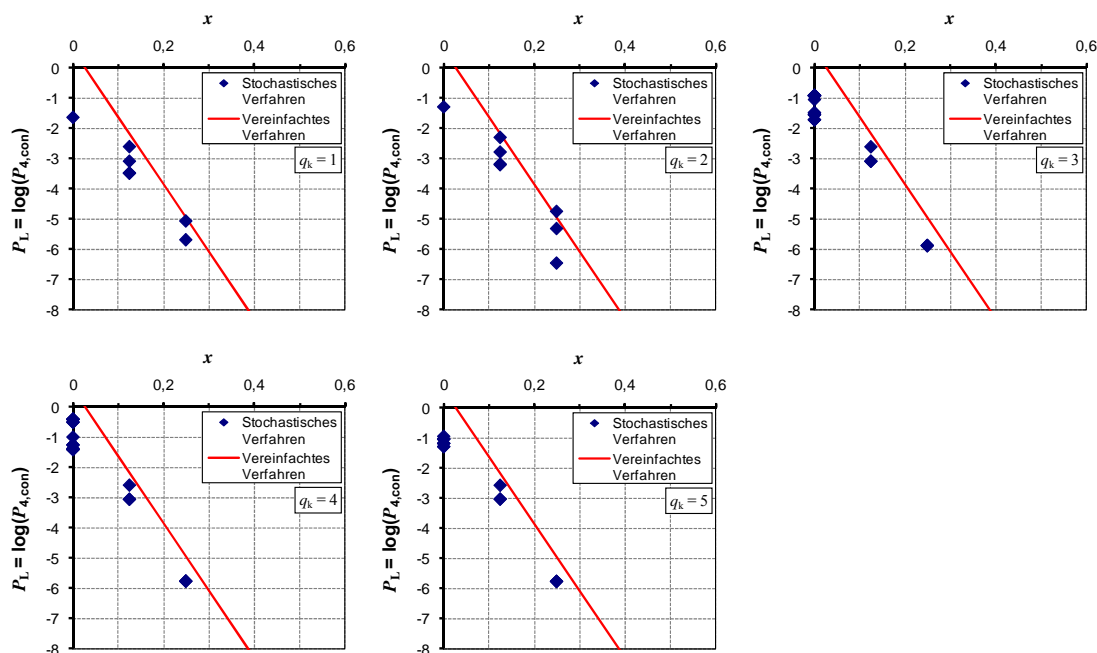


Bild C.27: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.31: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	15	1,5	8	80%	11	73%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-3,40	0,07	-2,89	0,07	-2,65
10	15	1,5	8	80%	11	73%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-3,40	0,07	-2,89	0,07	-2,65
10	15	1,5	8	80%	11	73%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,10	-3,40	0,07	-2,89	0,07	-2,65
10	15	1,5	8	80%	11	73%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,10	-3,40	0,07	-2,89	0,07	-2,65
10	15	1,5	8	80%	9	60%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,52	0,20	-5,52
10	15	1,5	8	80%	9	60%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,52	0,20	-5,52
10	15	1,5	8	80%	9	60%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,52	0,20	-5,52
10	15	1,5	8	80%	9	60%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,20	-5,52	0,20	-5,52	0,20	-5,52
10	15	1,5	8	80%	7	47%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	15	1,5	8	80%	7	47%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	15	1,5	8	80%	7	47%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	15	1,5	8	80%	7	47%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	15	1,5	6	60%	11	73%	4	40%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,03	-1,22	0,00	-0,53	-0,13	-0,11
10	15	1,5	6	60%	11	73%	3	30%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,03	-1,22	0,00	-0,53	-0,13	-0,11
10	15	1,5	6	60%	11	73%	2	20%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,03	-1,22	0,00	-0,53	-0,13	-0,11
10	15	1,5	6	60%	11	73%	1	10%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,03	-1,22	0,00	-0,53	-0,13	-0,11
10	15	1,5	6	60%	9	60%	4	40%	0,20	-5,44	0,20	-5,25	0,00	-1,48	0,00	-1,21	0,00	-1,00
10	15	1,5	6	60%	9	60%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,00	-1,48	0,00	-1,21	0,00	-1,00
10	15	1,5	6	60%	9	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,48	0,00	-1,21	0,00	-1,00
10	15	1,5	6	60%	9	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,48	0,00	-1,21	0,00	-1,00
10	15	1,5	6	60%	7	47%	4	40%	0,20	-4,95	0,20	-4,55	0,10	-2,77	0,10	-2,75	0,10	-2,72
10	15	1,5	6	60%	7	47%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,10	-2,78	0,10	-2,75	0,10	-2,73
10	15	1,5	6	60%	7	47%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-2,78	0,10	-2,75	0,10	-2,73
10	15	1,5	6	60%	7	47%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-2,78	0,10	-2,75	0,10	-2,73
10	15	1,5	4	40%	9	60%	4	40%	0,20	-3,98	0,20	-3,68	0,00	-0,79	0,00	-0,36	-0,20	-0,02
10	15	1,5	4	40%	9	60%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,36	-0,20	-0,02
10	15	1,5	4	40%	9	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,36	-0,20	-0,02
10	15	1,5	4	40%	9	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,36	-0,20	-0,02
10	15	1,5	4	40%	7	47%	4	40%	0,10	-2,14	0,10	-1,82	-0,03	-0,68	-0,03	-0,49	-0,10	-0,30
10	15	1,5	4	40%	7	47%	3	30%	0,20	-3,99	0,20	-3,70	-0,03	-0,73	-0,03	-0,51	-0,10	-0,32
10	15	1,5	4	40%	7	47%	2	20%	0,30	<-7	0,30	<-7	-0,03	-0,73	-0,03	-0,51	-0,10	-0,32
10	15	1,5	4	40%	7	47%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	-0,03	-0,73	-0,03	-0,51	-0,10	-0,32
10	15	1,5	4	40%	3	20%	4	40%	0,00	-1,45	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07
10	15	1,5	4	40%	3	20%	3	30%	0,10	-2,84	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52
10	15	1,5	4	40%	3	20%	2	20%	0,20	-5,01	0,20	-4,82	0,20	-4,66	0,20	-4,65	0,20	-4,64
10	15	1,5	4	40%	3	20%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,15	0,20	-5,13	0,20	-5,12

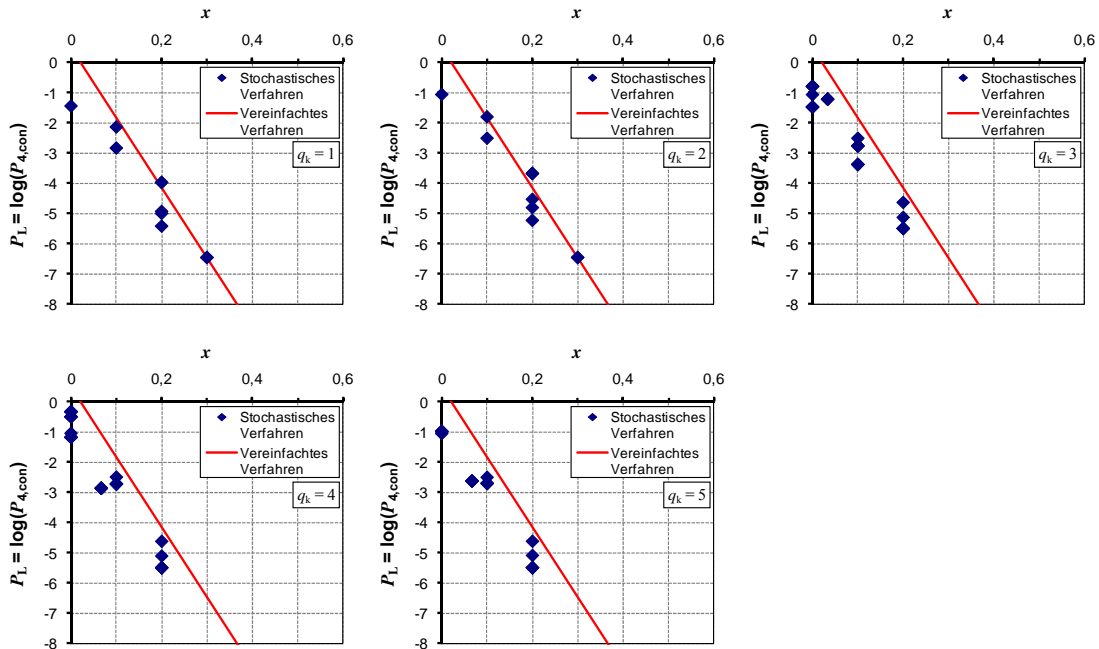


Bild C.28: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Tabelle C.32: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 12$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
12	18	1,5	9	75%	13	72%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,34	0,00	-1,25
12	18	1,5	9	75%	13	72%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,34	0,00	-1,25
12	18	1,5	9	75%	13	72%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,34	0,00	-1,25
12	18	1,5	9	75%	13	72%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,34	0,00	-1,25
12	18	1,5	9	75%	9	50%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	18	1,5	9	75%	9	50%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	18	1,5	9	75%	9	50%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	18	1,5	9	75%	9	50%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
12	18	1,5	9	75%	5	28%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
12	18	1,5	9	75%	5	28%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,47	<-7	0,47	<-7
12	18	1,5	9	75%	5	28%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,50	<-7	0,47	<-7	0,47	<-7
12	18	1,5	9	75%	5	28%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,47	<-7	0,47	<-7
12	18	1,5	6	50%	13	72%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	-0,03	-0,56	-0,03	-0,27	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	13	72%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	-0,03	-0,56	-0,03	-0,27	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	13	72%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	-0,03	-0,56	-0,03	-0,27	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	13	72%	1	8%	0,67	<-7	0,67	<-7	-0,03	-0,56	-0,03	-0,27	-0,25	0,00
12	18	1,5	6	50%	9	50%	4	33%	0,17	-4,75	0,17	-4,51	0,00	-1,40	0,00	-1,13	0,00	-0,93
12	18	1,5	6	50%	9	50%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,40	0,00	-1,13	0,00	-0,93
12	18	1,5	6	50%	9	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,40	0,00	-1,13	0,00	-0,93
12	18	1,5	6	50%	9	50%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,40	0,00	-1,13	0,00	-0,93
12	18	1,5	6	50%	5	28%	4	33%	0,17	-4,28	0,17	-3,98	0,17	-3,98	0,17	-3,98	0,17	-3,98
12	18	1,5	6	50%	5	28%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,18	0,25	-6,00	0,22	-6,00	0,22	-6,00
12	18	1,5	6	50%	5	28%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,25	-6,48	0,22	-6,48	0,22	-6,48
12	18	1,5	6	50%	5	28%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,25	-6,48	0,22	-6,48	0,22	-6,48
12	18	1,5	4	33%	9	50%	4	33%	0,17	-3,59	0,17	-3,28	0,00	-0,75	0,00	-0,34	-0,17	-0,03
12	18	1,5	4	33%	9	50%	3	25%	0,25	-5,63	0,25	-5,40	0,00	-0,76	0,00	-0,34	-0,17	-0,03
12	18	1,5	4	33%	9	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,34	-0,17	-0,03
12	18	1,5	4	33%	9	50%	1	8%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,34	-0,17	-0,03
12	18	1,5	4	33%	5	28%	4	33%	0,00	-1,43	0,00	-1,06	0,00	-1,05	0,00	-1,03	0,00	-1,01
12	18	1,5	4	33%	5	28%	3	25%	0,08	-2,76	0,08	-2,45	0,08	-2,26	0,06	-2,05	0,06	-1,90
12	18	1,5	4	33%	5	28%	2	17%	0,17	-5,08	0,17	-4,81	0,08	-2,73	0,06	-2,28	0,06	-2,05
12	18	1,5	4	33%	5	28%	1	8%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,08	-2,73	0,06	-2,28	0,06	-2,05
12	18	1,5	4	33%	3	17%	4	33%	0,00	-1,41	0,00	-1,04	0,00	-1,04	0,00	-1,04	0,00	-1,04
12	18	1,5	4	33%	3	17%	3	25%	0,08	-2,70	0,08	-2,39	0,08	-2,39	0,08	-2,39	0,08	-2,39
12	18	1,5	4	33%	3	17%	2	17%	0,17	-4,88	0,17	-4,65	0,17	-4,43	0,17	-4,41	0,17	-4,38
12	18	1,5	4	33%	3	17%	1	8%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,17	-4,84	0,17	-4,79	0,17	-4,72

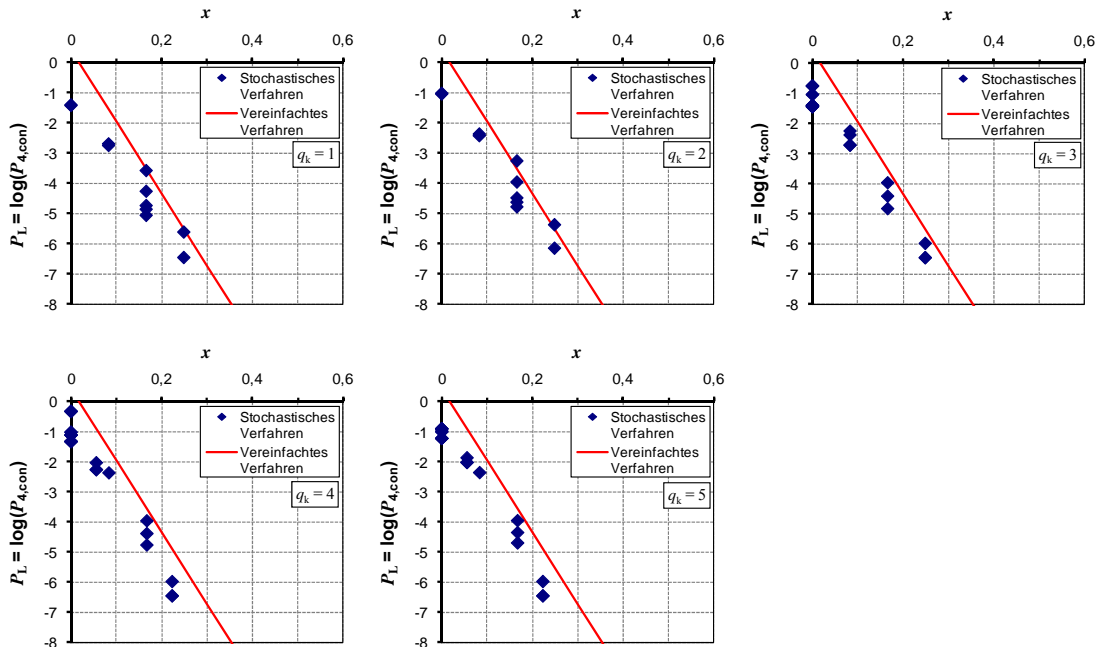


Bild C.29: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 12$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

C.3.3 Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert

Tabelle C.33: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	8	2,0	3	75%	6	75%	2	50%	0,25	-5,78	0,25	-5,40	0,00	-2,15	0,00	-1,90	0,00	-1,70
4	8	2,0	3	75%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,15	0,00	-1,91	0,00	-1,70
4	8	2,0	3	75%	4	50%	2	50%	0,25	-5,48	0,25	-4,92	0,25	-4,71	0,25	-4,71	0,25	-4,71
4	8	2,0	3	75%	4	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,15	0,25	-5,13	0,25	-5,13
4	8	2,0	3	75%	2	25%	2	50%	0,25	-5,48	0,25	-4,91	0,25	-4,91	0,25	-4,91	0,25	-4,91
4	8	2,0	3	75%	2	25%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	2	50%	6	75%	2	50%	0,25	-4,14	0,25	-3,81	0,00	-1,10	0,00	-0,56	-0,25	-0,10
4	8	2,0	2	50%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,10	0,00	-0,56	-0,25	-0,10
4	8	2,0	2	50%	4	50%	2	50%	0,00	-2,06	0,00	-1,67	0,00	-1,40	0,00	-1,30	0,00	-1,19
4	8	2,0	2	50%	4	50%	1	25%	0,25	-5,15	0,25	-4,97	0,00	-1,86	0,00	-1,63	0,00	-1,44
4	8	2,0	2	50%	2	25%	2	50%	0,00	-1,89	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	8	2,0	2	50%	2	25%	1	25%	0,25	-4,83	0,25	-4,49	0,25	-4,26	0,25	-4,25	0,25	-4,24
4	8	2,0	1	25%	6	75%	2	50%	0,25	-4,07	0,25	-3,75	0,00	-1,07	0,00	-0,50	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,07	0,00	-0,50	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	4	50%	2	50%	0,00	-1,44	0,00	-0,97	0,00	-0,59	0,00	-0,34	-0,25	-0,07
4	8	2,0	1	25%	4	50%	1	25%	0,25	-3,89	0,25	-3,56	0,00	-0,99	0,00	-0,51	-0,25	-0,11
4	8	2,0	1	25%	2	25%	2	50%	0,00	-0,89	-0,25	-0,24	-0,25	-0,22	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21
4	8	2,0	1	25%	2	25%	1	25%	0,00	-2,18	0,00	-1,79	0,00	-1,52	0,00	-1,41	0,00	-1,31

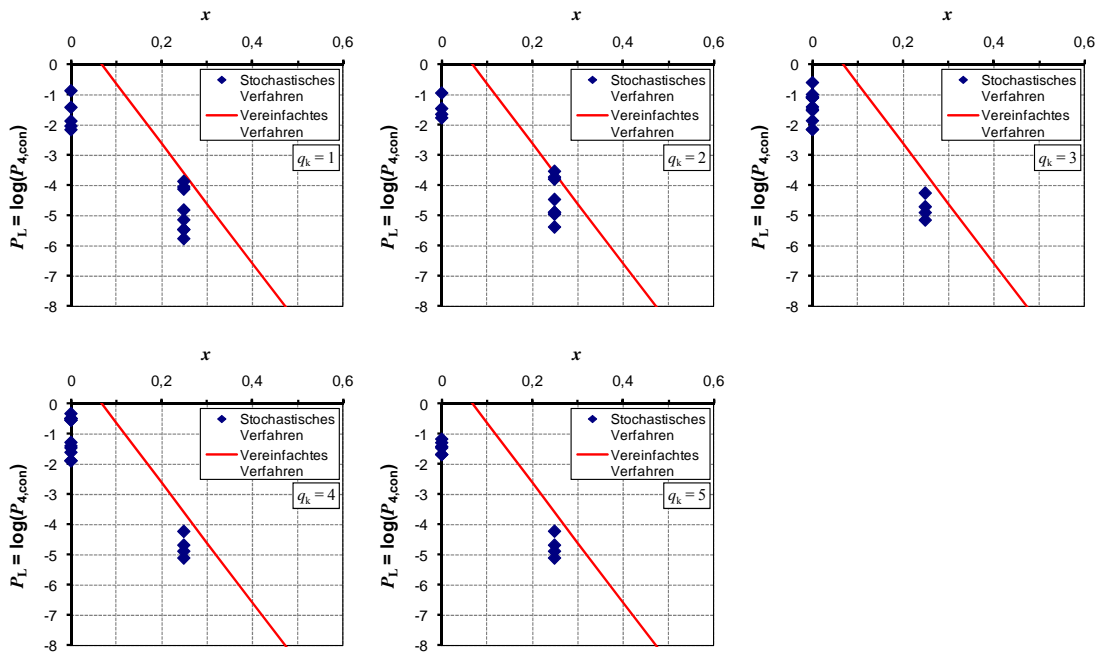


Bild C.30: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Tabelle C.34: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	10	2,0	4	80%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,11	0,00	-1,86	0,00	-1,66
5	10	2,0	4	80%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-2,11	0,00	-1,86	0,00	-1,66
5	10	2,0	4	80%	6	60%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,89	0,20	-4,88	0,20	-4,88
5	10	2,0	4	80%	6	60%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-4,89	0,20	-4,88	0,20	-4,88
5	10	2,0	4	80%	4	40%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	4	40%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	3	60%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,55	-0,20	-0,11
5	10	2,0	3	60%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,55	-0,20	-0,11
5	10	2,0	3	60%	6	60%	2	40%	0,20	-4,60	0,20	-4,26	0,00	-1,77	0,00	-1,53	0,00	-1,35
5	10	2,0	3	60%	6	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,54	0,00	-1,35
5	10	2,0	3	60%	4	40%	2	40%	0,20	-4,08	0,20	-3,75	0,20	-3,57	0,20	-3,56	0,20	-3,55
5	10	2,0	3	60%	4	40%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,04	0,20	-4,02	0,20	-3,99
5	10	2,0	3	60%	1	10%	2	40%	0,20	-4,07	0,20	-3,74	0,20	-3,74	0,20	-3,74	0,20	-3,74
5	10	2,0	3	60%	1	10%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	2	40%	6	60%	2	40%	0,20	-3,31	0,20	-2,99	0,00	-0,95	0,00	-0,50	-0,20	-0,14
5	10	2,0	2	40%	6	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	-6,48	0,00	-0,96	0,00	-0,50	-0,20	-0,14
5	10	2,0	2	40%	4	40%	2	40%	0,00	-1,91	0,00	-1,54	0,00	-1,28	0,00	-1,18	0,00	-1,07
5	10	2,0	2	40%	4	40%	1	20%	0,20	-4,73	0,20	-4,41	0,00	-1,73	0,00	-1,50	0,00	-1,32
5	10	2,0	2	40%	2	20%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36
5	10	2,0	2	40%	2	20%	1	20%	0,20	-4,29	0,20	-4,01	0,20	-3,84	0,20	-3,83	0,20	-3,82
5	10	2,0	2	40%	1	10%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36
5	10	2,0	2	40%	1	10%	1	20%	0,20	-4,29	0,20	-4,01	0,20	-3,84	0,20	-3,84	0,20	-3,84
5	10	2,0	1	20%	3	30%	2	40%	0,00	-1,16	0,00	-0,66	-0,10	-0,24	-0,10	-0,19	-0,20	-0,14
5	10	2,0	1	20%	3	30%	1	20%	0,20	-2,97	0,20	-2,65	-0,10	-0,54	-0,10	-0,43	-0,20	-0,31
5	10	2,0	1	20%	2	20%	2	40%	0,00	-0,86	-0,20	-0,26	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,20	-0,22
5	10	2,0	1	20%	2	20%	1	20%	0,00	-2,11	0,00	-1,73	0,00	-1,46	0,00	-1,36	0,00	-1,25
5	10	2,0	1	20%	1	10%	2	40%	0,00	-0,85	-0,20	-0,25	-0,20	-0,22	-0,20	-0,22	-0,20	-0,22
5	10	2,0	1	20%	1	10%	1	20%	0,00	-2,06	0,00	-1,67	0,00	-1,38	0,00	-1,38	0,00	-1,38

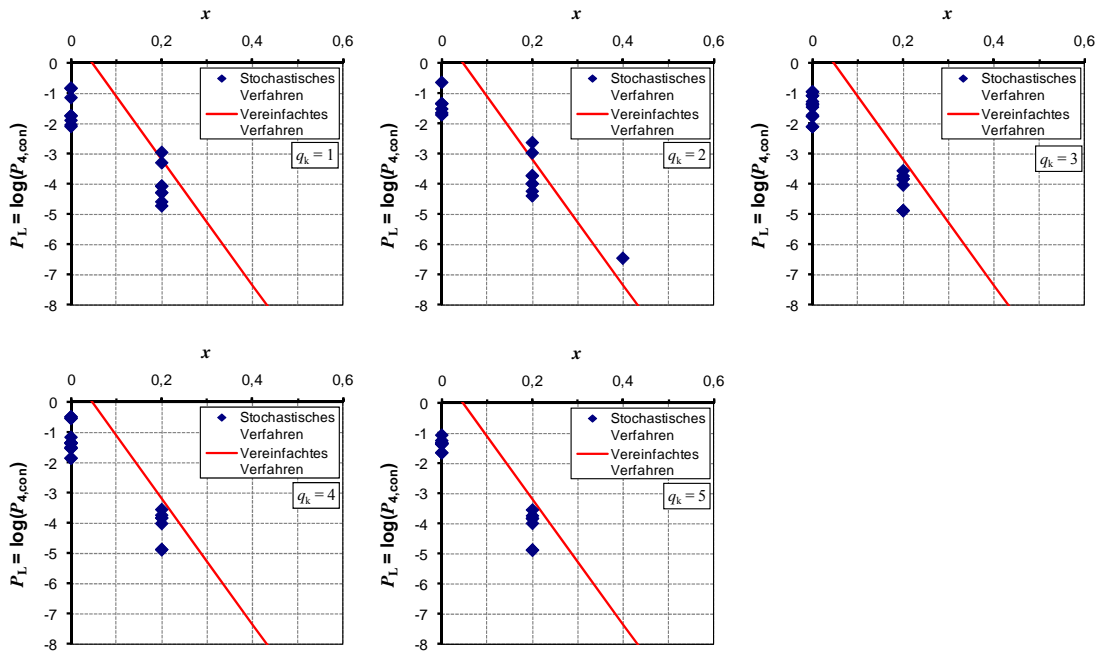


Bild C.31: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Tabelle C.35: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	12	2,0	5	83%	10	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-2,08	0,00	-1,84	0,00	-1,63
6	12	2,0	5	83%	10	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,08	0,00	-1,84	0,00	-1,63
6	12	2,0	5	83%	10	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,08	0,00	-1,84	0,00	-1,63
6	12	2,0	5	83%	8	67%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,74	0,17	-4,73	0,17	-4,71
6	12	2,0	5	83%	8	67%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,74	0,17	-4,73	0,17	-4,71
6	12	2,0	5	83%	8	67%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,17	-4,74	0,17	-4,73	0,17	-4,71
6	12	2,0	5	83%	6	50%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	10	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-1,07	0,00	-0,55	-0,17	-0,11
6	12	2,0	4	67%	10	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,07	0,00	-0,55	-0,17	-0,11
6	12	2,0	4	67%	10	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,07	0,00	-0,55	-0,17	-0,11
6	12	2,0	4	67%	8	67%	3	50%	0,17	-4,24	0,17	-3,94	0,00	-1,72	0,00	-1,48	0,00	-1,30
6	12	2,0	4	67%	8	67%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,49	0,00	-1,30
6	12	2,0	4	67%	8	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,49	0,00	-1,30
6	12	2,0	4	67%	6	50%	3	50%	0,17	-3,79	0,17	-3,48	0,17	-3,28	0,17	-3,27	0,17	-3,25
6	12	2,0	4	67%	6	50%	2	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,17	-3,73	0,17	-3,70	0,17	-3,67
6	12	2,0	4	67%	6	50%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-3,73	0,17	-3,70	0,17	-3,67
6	12	2,0	3	50%	10	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,33	0,00
6	12	2,0	3	50%	10	83%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,33	0,00
6	12	2,0	3	50%	10	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,33	0,00
6	12	2,0	3	50%	8	67%	3	50%	0,17	-3,07	0,17	-2,74	0,00	-0,93	0,00	-0,50	-0,17	-0,15
6	12	2,0	3	50%	8	67%	2	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,18	0,00	-0,94	0,00	-0,50	-0,17	-0,15
6	12	2,0	3	50%	8	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,50	-0,17	-0,15
6	12	2,0	3	50%	6	50%	3	50%	0,00	-1,81	0,00	-1,44	0,00	-1,18	0,00	-1,08	0,00	-0,99
6	12	2,0	3	50%	6	50%	2	33%	0,17	-4,02	0,17	-3,69	0,00	-1,63	0,00	-1,40	0,00	-1,22
6	12	2,0	3	50%	6	50%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,63	0,00	-1,41	0,00	-1,23
6	12	2,0	3	50%	4	33%	3	50%	0,00	-1,66	0,00	-1,27	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	12	2,0	3	50%	4	33%	2	33%	0,17	-3,67	0,17	-3,35	0,17	-3,16	0,17	-3,15	0,17	-3,13
6	12	2,0	3	50%	4	33%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-3,63	0,17	-3,60	0,17	-3,57
6	12	2,0	2	33%	6	50%	3	50%	0,00	-1,28	0,00	-0,85	0,00	-0,52	0,00	-0,31	-0,17	-0,10
6	12	2,0	2	33%	6	50%	2	33%	0,17	-2,99	0,17	-2,67	0,00	-0,89	0,00	-0,48	-0,17	-0,16
6	12	2,0	2	33%	6	50%	1	17%	0,33	-6,18	0,33	-5,88	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,17	-0,16
6	12	2,0	2	33%	4	33%	3	50%	0,00	-0,84	-0,17	-0,30	-0,17	-0,27	-0,17	-0,26	-0,17	-0,25
6	12	2,0	2	33%	4	33%	2	33%	0,00	-1,84	0,00	-1,47	0,00	-1,21	0,00	-1,12	0,00	-1,02
6	12	2,0	2	33%	4	33%	1	17%	0,17	-4,52	0,17	-4,20	0,00	-1,66	0,00	-1,44	0,00	-1,26
6	12	2,0	2	33%	2	17%	3	50%	0,00	-0,82	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26
6	12	2,0	2	33%	2	17%	2	33%	0,00	-1,69	0,00	-1,30	0,00	-1,29	0,00	-1,29	0,00	-1,29
6	12	2,0	2	33%	2	17%	1	17%	0,17	-4,14	0,17	-3,84	0,17	-3,63	0,17	-3,62	0,17	-3,61

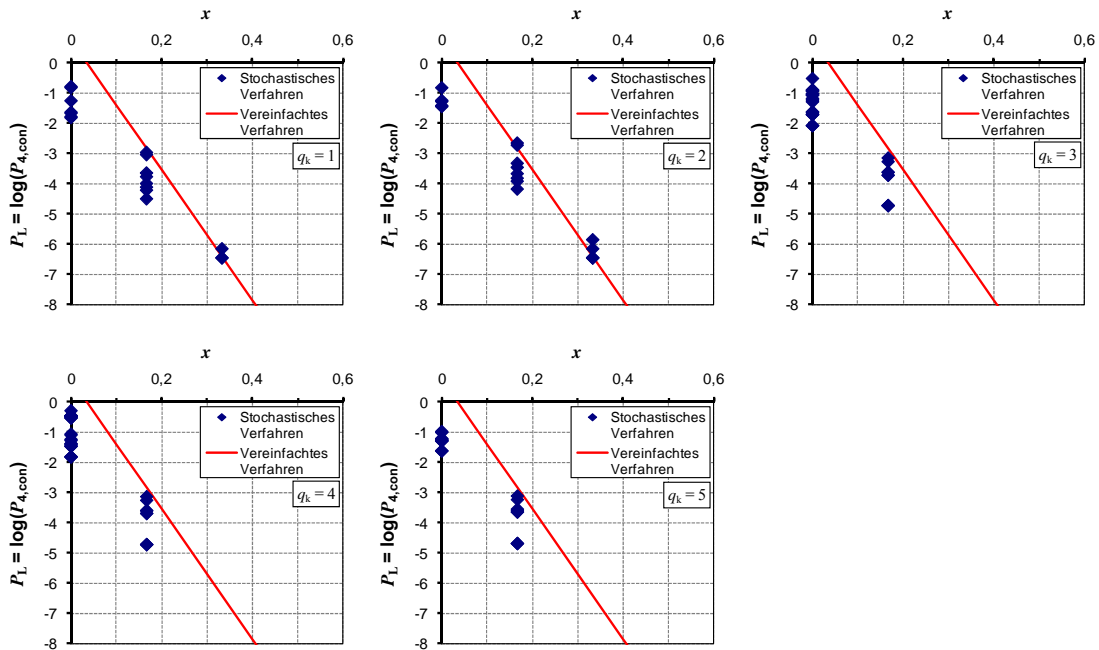


Bild C.32: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.36: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	14	2,0	5	71%	10	71%	3	43%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,45	0,00	-1,27
7	14	2,0	5	71%	10	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,45	0,00	-1,27
7	14	2,0	5	71%	10	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,45	0,00	-1,27
7	14	2,0	5	71%	8	57%	3	43%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,14	-3,57	0,14	-3,54	0,14	-3,50
7	14	2,0	5	71%	8	57%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,57	0,14	-3,54	0,14	-3,50
7	14	2,0	5	71%	8	57%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-3,57	0,14	-3,54	0,14	-3,50
7	14	2,0	5	71%	6	43%	3	43%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,48
7	14	2,0	5	71%	6	43%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	5	71%	6	43%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	4	57%	10	71%	3	43%	0,29	-5,57	0,29	-5,30	0,00	-0,93	0,00	-0,50	-0,14	-0,16
7	14	2,0	4	57%	10	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,50	-0,14	-0,16
7	14	2,0	4	57%	10	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,93	0,00	-0,50	-0,14	-0,16
7	14	2,0	4	57%	8	57%	3	43%	0,14	-3,71	0,14	-3,40	0,00	-1,57	0,00	-1,35	0,00	-1,17
7	14	2,0	4	57%	8	57%	2	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,58	0,00	-1,35	0,00	-1,17
7	14	2,0	4	57%	8	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,58	0,00	-1,35	0,00	-1,17
7	14	2,0	4	57%	6	43%	3	43%	0,14	-3,34	0,14	-3,03	0,14	-2,84	0,14	-2,83	0,14	-2,81
7	14	2,0	4	57%	6	43%	2	29%	0,29	-5,78	0,29	-5,57	0,14	-3,31	0,14	-3,27	0,14	-3,23
7	14	2,0	4	57%	6	43%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-3,31	0,14	-3,27	0,14	-3,23
7	14	2,0	3	43%	10	71%	3	43%	0,29	-5,52	0,29	-5,30	0,00	-0,86	0,00	-0,39	-0,29	0,00
7	14	2,0	3	43%	10	71%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,86	0,00	-0,39	-0,29	0,00
7	14	2,0	3	43%	10	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,86	0,00	-0,39	-0,29	0,00
7	14	2,0	3	43%	8	57%	3	43%	0,14	-2,73	0,14	-2,41	0,00	-0,87	0,00	-0,48	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	2	29%	0,29	-5,30	0,29	-5,00	0,00	-0,89	0,00	-0,49	-0,14	-0,18
7	14	2,0	3	43%	8	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,49	-0,14	-0,18
7	14	2,0	3	43%	6	43%	3	43%	0,00	-1,73	0,00	-1,37	0,00	-1,12	0,00	-1,02	0,00	-0,93
7	14	2,0	3	43%	6	43%	2	29%	0,14	-3,81	0,14	-3,47	0,00	-1,56	0,00	-1,34	0,00	-1,16
7	14	2,0	3	43%	6	43%	1	14%	0,29	<-7	0,29	-6,48	0,00	-1,56	0,00	-1,34	0,00	-1,16

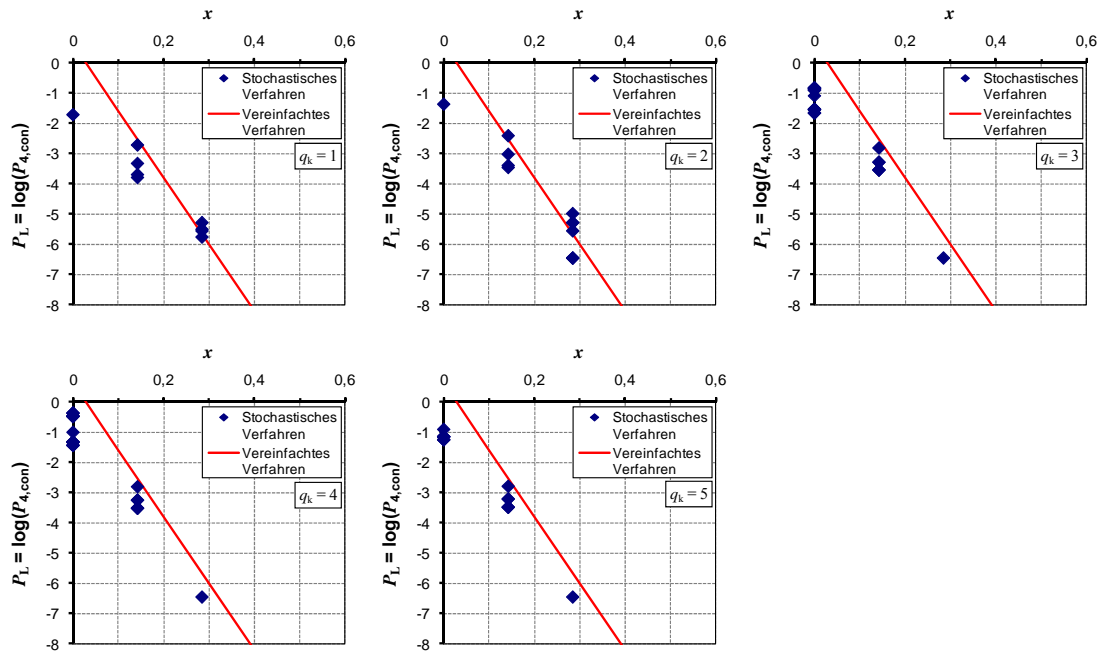


Bild C.33: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Tabelle C.37: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	16	2,0	6	75%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,67	0,00	-1,43	0,00	-1,25
8	16	2,0	6	75%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,67	0,00	-1,43	0,00	-1,25
8	16	2,0	6	75%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,67	0,00	-1,43	0,00	-1,25
8	16	2,0	6	75%	8	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	4	50%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,25	-0,01
8	16	2,0	4	50%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,25	-0,01
8	16	2,0	4	50%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,25	-0,01
8	16	2,0	4	50%	8	50%	3	38%	0,13	-3,44	0,13	-3,13	0,00	-1,50	0,00	-1,28	0,00	-1,11
8	16	2,0	4	50%	8	50%	2	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,00	0,00	-1,51	0,00	-1,29	0,00	-1,11
8	16	2,0	4	50%	8	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,51	0,00	-1,29	0,00	-1,11
8	16	2,0	4	50%	4	25%	3	38%	0,13	-3,10	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78
8	16	2,0	4	50%	4	25%	2	25%	0,25	-5,70	0,25	-5,40	0,25	-5,22	0,25	-5,22	0,25	-5,22
8	16	2,0	4	50%	4	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70
8	16	2,0	3	38%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	8	50%	3	38%	0,13	-2,56	0,13	-2,24	0,00	-0,84	0,00	-0,47	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	2	25%	0,25	-4,89	0,25	-4,64	0,00	-0,87	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,87	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	4	25%	3	38%	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,15	0,00	-1,15	0,00	-1,15
8	16	2,0	3	38%	4	25%	2	25%	0,13	-3,28	0,13	-2,96	0,13	-2,77	0,13	-2,76	0,13	-2,74
8	16	2,0	3	38%	4	25%	1	13%	0,25	-6,00	0,25	-5,88	0,13	-3,26	0,13	-3,22	0,13	-3,17

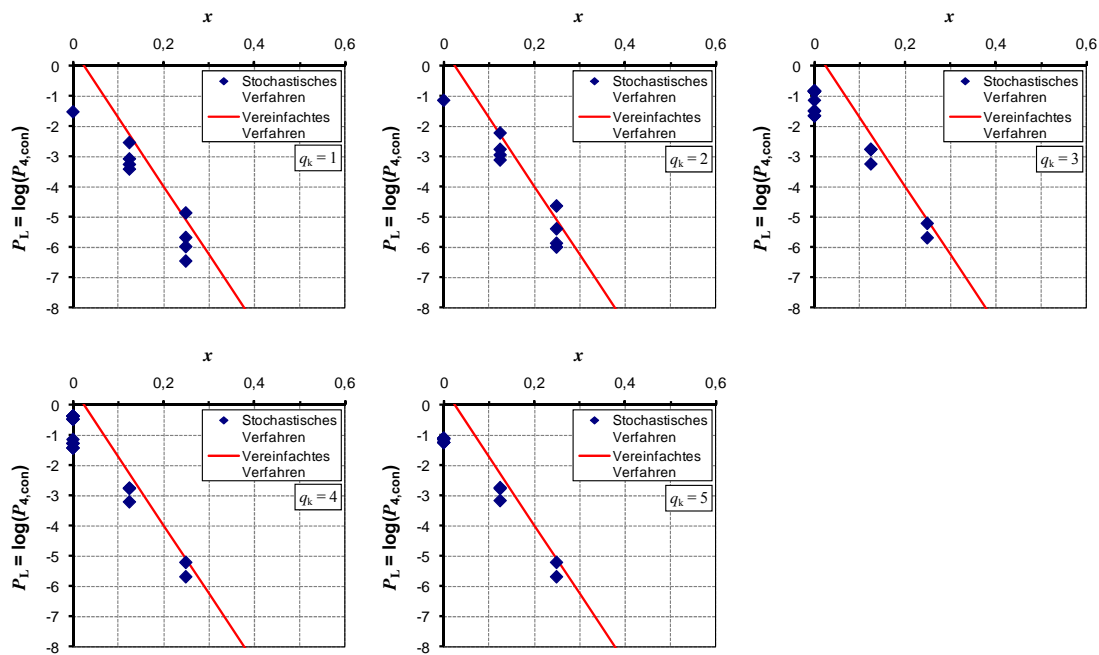


Bild C.34: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Tabelle C.38: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	18	2,0	7	78%	14	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,65	0,00	-1,42	0,00	-1,23
9	18	2,0	7	78%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,65	0,00	-1,42	0,00	-1,23
9	18	2,0	7	78%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,65	0,00	-1,42	0,00	-1,23
9	18	2,0	7	78%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,65	0,00	-1,42	0,00	-1,23
9	18	2,0	7	78%	10	56%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,88	0,22	-5,88	0,22	-5,88
9	18	2,0	7	78%	10	56%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,88	0,22	-5,88	0,22	-5,88
9	18	2,0	7	78%	10	56%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	-5,88	0,22	-5,88	0,22	-5,88
9	18	2,0	7	78%	10	56%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,22	-5,88	0,22	-5,88	0,22	-5,88
9	18	2,0	7	78%	6	33%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	5	56%	14	78%	4	44%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-0,84	0,00	-0,38	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,38	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,38	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,38	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	4	44%	0,11	-3,26	0,11	-2,94	0,00	-1,45	0,00	-1,24	0,00	-1,07
9	18	2,0	5	56%	10	56%	3	33%	0,22	-5,70	0,22	-5,40	0,00	-1,47	0,00	-1,25	0,00	-1,08
9	18	2,0	5	56%	10	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,47	0,00	-1,25	0,00	-1,08
9	18	2,0	5	56%	10	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,47	0,00	-1,25	0,00	-1,08
9	18	2,0	5	56%	6	33%	4	44%	0,11	-2,92	0,11	-2,60	0,11	-2,60	0,11	-2,60	0,11	-2,60
9	18	2,0	5	56%	6	33%	3	33%	0,22	-5,27	0,22	-4,85	0,22	-4,64	0,22	-4,64	0,22	-4,64
9	18	2,0	5	56%	6	33%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,06	0,22	-5,06	0,22	-5,05
9	18	2,0	5	56%	6	33%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,06	0,22	-5,06	0,22	-5,05
9	18	2,0	3	33%	14	78%	4	44%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-0,84	0,00	-0,37	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,37	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,37	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,37	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	10	56%	4	44%	0,11	-2,28	0,11	-1,95	0,00	-0,72	0,00	-0,32	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	3	33%	0,22	-4,24	0,22	-3,96	0,00	-0,76	0,00	-0,34	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,34	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,34	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	6	33%	4	44%	0,00	-0,82	-0,11	-0,35	-0,11	-0,31	-0,11	-0,30	-0,11	-0,28
9	18	2,0	3	33%	6	33%	3	33%	0,00	-1,65	0,00	-1,29	0,00	-1,05	0,00	-0,96	0,00	-0,87
9	18	2,0	3	33%	6	33%	2	22%	0,11	-3,49	0,11	-3,17	0,00	-1,48	0,00	-1,27	0,00	-1,10
9	18	2,0	3	33%	6	33%	1	11%	0,22	-6,48	0,22	-6,48	0,00	-1,49	0,00	-1,27	0,00	-1,10

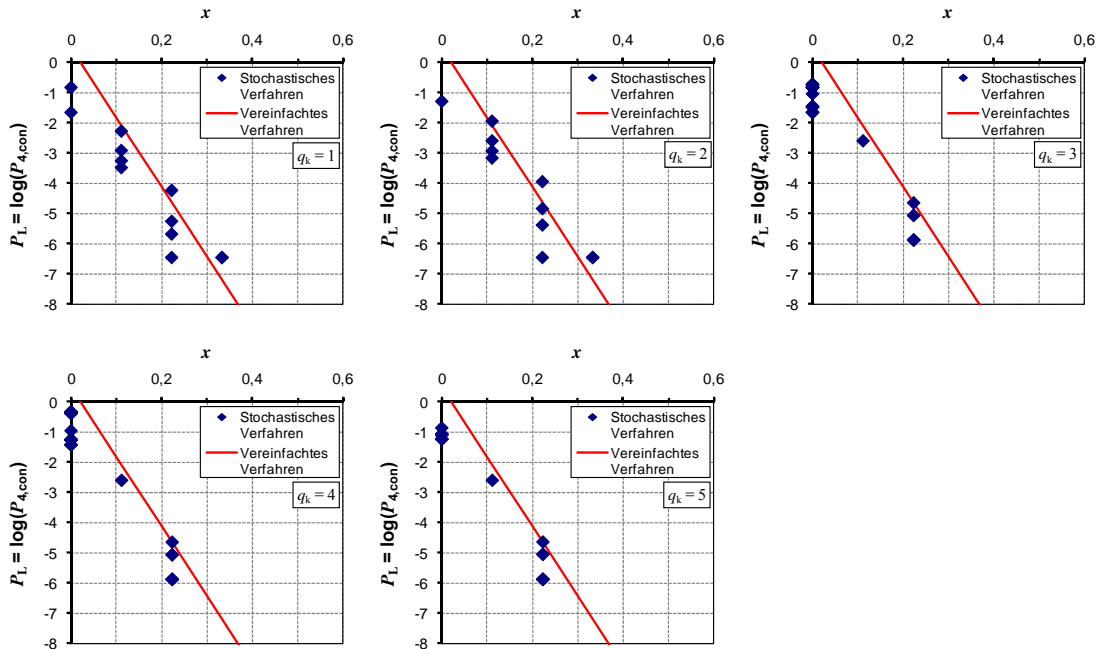


Bild C.35: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Tabelle C.39: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	20	2,0	8	80%	16	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,64	0,00	-1,41	0,00	-1,22
10	20	2,0	8	80%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,64	0,00	-1,41	0,00	-1,22
10	20	2,0	8	80%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,64	0,00	-1,41	0,00	-1,22
10	20	2,0	8	80%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,64	0,00	-1,41	0,00	-1,22
10	20	2,0	8	80%	12	60%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,70	0,20	-5,70	0,20	-5,70
10	20	2,0	8	80%	12	60%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-5,70	0,20	-5,70	0,20	-5,70
10	20	2,0	8	80%	12	60%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-5,70	0,20	-5,70	0,20	-5,70
10	20	2,0	8	80%	12	60%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,20	-5,70	0,20	-5,70	0,20	-5,70
10	20	2,0	8	80%	8	40%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	8	80%	8	40%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	8	80%	8	40%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	8	80%	8	40%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	16	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	12	60%	4	40%	0,20	-5,48	0,20	-5,22	0,00	-1,45	0,00	-1,23	0,00	-1,05
10	20	2,0	6	60%	12	60%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,23	0,00	-1,05
10	20	2,0	6	60%	12	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,23	0,00	-1,05
10	20	2,0	6	60%	12	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,45	0,00	-1,23	0,00	-1,05
10	20	2,0	6	60%	8	40%	4	40%	0,20	-4,83	0,20	-4,52	0,20	-4,34	0,20	-4,34	0,20	-4,34
10	20	2,0	6	60%	8	40%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-4,81	0,20	-4,81	0,20	-4,81
10	20	2,0	6	60%	8	40%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-4,81	0,20	-4,81	0,20	-4,81
10	20	2,0	6	60%	8	40%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-4,81	0,20	-4,81	0,20	-4,81
10	20	2,0	4	40%	12	60%	4	40%	0,20	-3,95	0,20	-3,66	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,48	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	8	40%	4	40%	0,00	-1,59	0,00	-1,23	0,00	-0,99	0,00	-0,90	0,00	-0,81
10	20	2,0	4	40%	8	40%	3	30%	0,10	-3,15	0,10	-2,84	0,00	-1,41	0,00	-1,20	0,00	-1,04
10	20	2,0	4	40%	8	40%	2	20%	0,20	-5,70	0,20	-5,36	0,00	-1,43	0,00	-1,22	0,00	-1,04
10	20	2,0	4	40%	8	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,43	0,00	-1,22	0,00	-1,04
10	20	2,0	4	40%	4	20%	4	40%	0,00	-1,45	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07
10	20	2,0	4	40%	4	20%	3	30%	0,10	-2,85	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52
10	20	2,0	4	40%	4	20%	2	20%	0,20	-5,22	0,20	-4,85	0,20	-4,70	0,20	-4,70	0,20	-4,70
10	20	2,0	4	40%	4	20%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,22	0,20	-5,22	0,20	-5,22

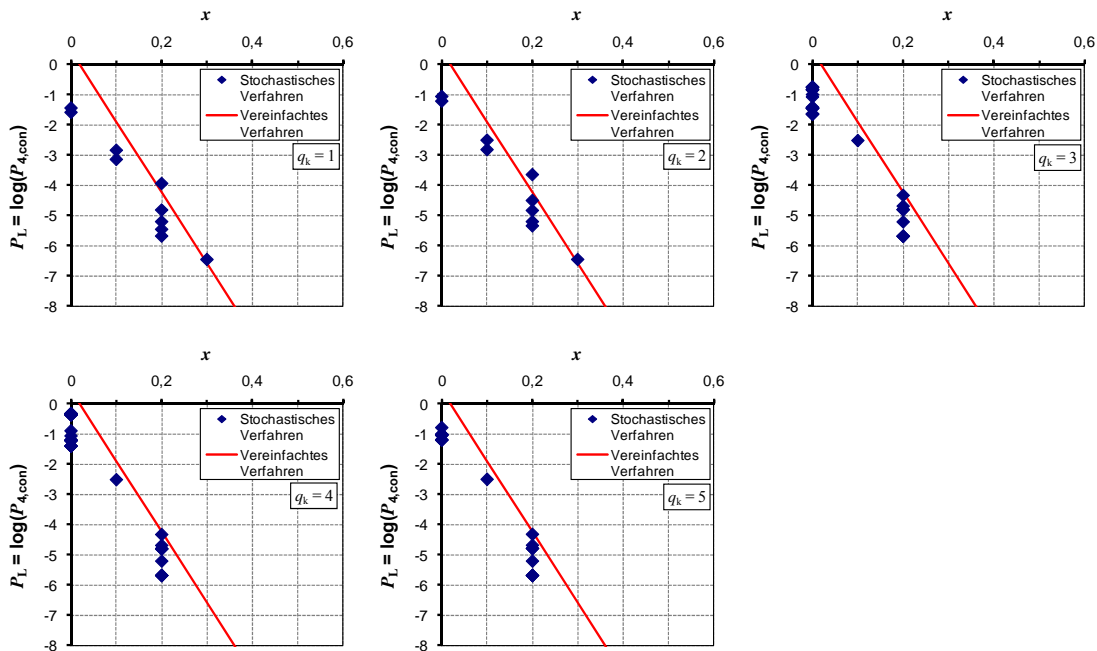


Bild C.36: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

C.4 Drei Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl

C.4.1 Allgemeines

Im Rahmen der Parametervariation werden die vorhandenen Spanngliedanzahlen, die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten gemäß Tabelle C.40 angesetzt. Da $n_{br,i}$ in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten für die Berechnung nicht relevant ist, wird hier der Wert 0 eingesetzt. Entsprechend wird in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten für $n_{cr,i} = 0$ angesetzt. Die Werte für s_{min} , s_{max} , n_{NP} , n_{St} und n_F sowie die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens sind in den nachfolgenden Tabellen angegeben. In den Diagrammen werden die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens und des vereinfachten Verfahrens dargestellt.

Tabelle C.40: Ansatz der vorhandenen Spanngliedanzahlen, der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in der Parametervariation mit $q_s = 3$ Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl

Querschnitt	Vorhandene Spanngliedanzahl	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung $n_{cr,i}$	Erforderliche Restspanngliedanzahl $n_{br,i}$
1	s_{min}	0	n_{NP}
2	s_{min}	n_{NP} bzw. 0 bei $q_k \geq 2$ *)	n_{NP} bei $q_k \geq 2$ bzw. 0 **)
3	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 3$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 3$ bzw. 0 **)
4	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 4$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 4$ bzw. 0 **)
5	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k = 5$ *)	n_{St} bei $q_k = 5$ bzw. 0 **)
6	s_{min}	n_F	0
7	s_{min}	n_F	0
8	s_{min}	n_F	0
9	s_{min}	n_F	0
10	s_{min}	n_F	0
*) Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten: $n_{cr} = 0$			
**) Querschnitte mit Ankündigungsverhalten: $n_{br} = 0$			
Anmerkung: Die Reihenfolge der Querschnitte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis			

C.4.2 Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert

Tabelle C.41: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	6	1,5	3	75%	5	83%	2	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,74	0,00	-1,24	-0,08	-0,83
4	6	1,5	3	75%	5	83%	1	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,74	0,00	-1,24	-0,08	-0,83
4	6	1,5	3	75%	4	67%	2	50%	0,25	-5,40	0,25	-4,99	0,08	-3,31	0,08	-2,98	0,08	-2,77
4	6	1,5	3	75%	4	67%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-3,32	0,08	-2,98	0,08	-2,78
4	6	1,5	3	75%	3	50%	2	50%	0,25	-5,30	0,25	-4,91	0,25	-4,89	0,25	-4,82	0,25	-4,79
4	6	1,5	3	75%	3	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-6,18	0,25	-5,57	0,25	-5,40
4	6	1,5	3	75%	2	33%	2	50%	0,25	-5,30	0,25	-4,91	0,25	-4,91	0,25	-4,91	0,25	-4,91
4	6	1,5	3	75%	2	33%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
4	6	1,5	3	75%	1	17%	2	50%	0,25	-5,30	0,25	-4,91	0,25	-4,91	0,25	-4,91	0,25	-4,91
4	6	1,5	3	75%	1	17%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	6	1,5	2	50%	5	83%	2	50%	0,33	-5,78	0,33	-5,33	0,00	-1,27	0,00	-0,63	-0,33	-0,02
4	6	1,5	2	50%	5	83%	1	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,63	-0,33	-0,02
4	6	1,5	2	50%	4	67%	2	50%	0,17	-3,04	0,17	-2,69	0,00	-1,20	0,00	-0,72	-0,17	-0,32
4	6	1,5	2	50%	4	67%	1	25%	0,42	-6,48	0,42	-6,18	0,00	-1,22	0,00	-0,73	-0,17	-0,33
4	6	1,5	2	50%	3	50%	2	50%	0,00	-2,05	0,00	-1,66	0,00	-1,49	0,00	-1,33	0,00	-1,18
4	6	1,5	2	50%	3	50%	1	25%	0,25	-5,20	0,25	-4,96	0,00	-2,05	0,00	-1,68	0,00	-1,42
4	6	1,5	2	50%	2	33%	2	50%	0,00	-1,90	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,47
4	6	1,5	2	50%	2	33%	1	25%	0,25	-4,74	0,25	-4,47	0,17	-3,87	0,17	-3,62	0,17	-3,46
4	6	1,5	2	50%	1	17%	2	50%	0,00	-1,89	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	6	1,5	2	50%	1	17%	1	25%	0,25	-4,73	0,25	-4,46	0,25	-4,46	0,25	-4,46	0,25	-4,46
4	6	1,5	1	25%	5	83%	2	50%	0,25	-5,70	0,33	-5,30	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,58	0,00
4	6	1,5	1	25%	5	83%	1	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,58	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	2	50%	0,17	-2,82	0,17	-2,48	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,42	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	1	25%	0,42	-6,00	0,42	-6,00	0,00	-1,05	0,00	-0,50	-0,42	0,00
4	6	1,5	1	25%	3	50%	2	50%	0,00	-1,44	0,00	-0,97	0,00	-0,67	0,00	-0,38	-0,25	-0,07
4	6	1,5	1	25%	3	50%	1	25%	0,25	-3,92	0,25	-3,58	0,00	-1,05	0,00	-0,54	-0,25	-0,11
4	6	1,5	1	25%	2	33%	2	50%	0,00	-0,94	-0,17	-0,33	-0,17	-0,29	-0,17	-0,25	-0,25	-0,19
4	6	1,5	1	25%	2	33%	1	25%	0,08	-2,48	0,08	-2,13	0,00	-1,41	0,00	-1,04	-0,08	-0,75
4	6	1,5	1	25%	1	17%	2	50%	0,00	-0,87	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21
4	6	1,5	1	25%	1	17%	1	25%	0,00	-2,05	0,00	-1,64	0,00	-1,62	0,00	-1,60	0,00	-1,58

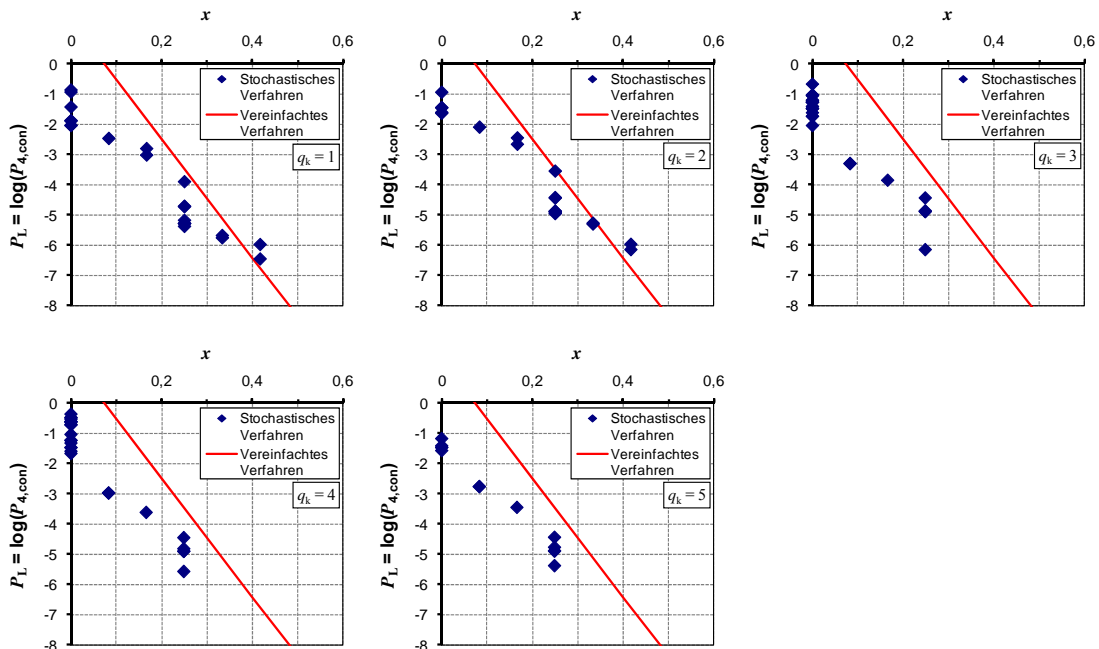


Bild C.37: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Tabelle C.42: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	7	1,4	4	80%	5	71%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,09	-3,48	0,09	-3,13	0,09	-2,93
5	7	1,4	4	80%	5	71%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,09	-3,48	0,09	-3,13	0,09	-2,93
5	7	1,4	4	80%	4	57%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,23	-6,00	0,23	-5,52	0,23	-5,44
5	7	1,4	4	80%	4	57%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,23	-6,00	0,23	-5,52	0,23	-5,44
5	7	1,4	4	80%	3	43%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	3	43%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,51	<-7	0,51	<-7	0,51	<-7
5	7	1,4	3	60%	5	71%	2	40%	0,31	-5,70	0,31	-5,36	0,00	-1,27	0,00	-0,81	-0,11	-0,43
5	7	1,4	3	60%	5	71%	1	20%	0,51	<-7	0,51	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,81	-0,11	-0,43
5	7	1,4	3	60%	4	57%	2	40%	0,20	-4,45	0,20	-4,09	0,03	-2,20	0,03	-1,84	0,03	-1,61
5	7	1,4	3	60%	4	57%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,03	-2,20	0,03	-1,85	0,03	-1,61
5	7	1,4	3	60%	3	43%	2	40%	0,20	-4,10	0,20	-3,79	0,17	-3,62	0,17	-3,50	0,17	-3,41
5	7	1,4	3	60%	3	43%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,17	-4,11	0,17	-3,83	0,17	-3,66
5	7	1,4	3	60%	2	29%	2	40%	0,20	-4,08	0,20	-3,77	0,20	-3,77	0,20	-3,77	0,20	-3,77
5	7	1,4	3	60%	2	29%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,31	-6,48	0,31	-6,48	0,31	-6,18
5	7	1,4	3	60%	1	14%	2	40%	0,20	-4,08	0,20	-3,77	0,20	-3,77	0,20	-3,77	0,20	-3,77
5	7	1,4	3	60%	1	14%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	7	1,4	2	40%	5	71%	2	40%	0,31	-5,12	0,31	-4,89	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,31	-0,01
5	7	1,4	2	40%	5	71%	1	20%	0,51	<-7	0,51	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,31	-0,01
5	7	1,4	2	40%	4	57%	2	40%	0,17	-3,01	0,17	-2,69	0,00	-1,06	0,00	-0,59	-0,17	-0,21
5	7	1,4	2	40%	4	57%	1	20%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,00	-1,07	0,00	-0,60	-0,17	-0,22
5	7	1,4	2	40%	3	43%	2	40%	0,03	-2,02	0,03	-1,65	0,00	-1,34	0,00	-1,10	-0,03	-0,90
5	7	1,4	2	40%	3	43%	1	20%	0,23	-4,83	0,23	-4,54	0,00	-1,68	0,00	-1,29	-0,03	-1,02
5	7	1,4	2	40%	2	29%	2	40%	0,00	-1,77	0,00	-1,37	0,00	-1,37	0,00	-1,35	0,00	-1,34
5	7	1,4	2	40%	2	29%	1	20%	0,20	-4,37	0,20	-4,08	0,11	-3,25	0,11	-2,95	0,11	-2,76
5	7	1,4	2	40%	1	14%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36
5	7	1,4	2	40%	1	14%	1	20%	0,20	-4,32	0,20	-4,01	0,20	-4,01	0,20	-4,01	0,20	-4,01
5	7	1,4	1	20%	5	71%	2	40%	0,31	-5,08	0,31	-4,86	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,51	0,00
5	7	1,4	1	20%	5	71%	1	20%	0,51	<-7	0,51	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,51	0,00
5	7	1,4	1	20%	3	43%	2	40%	0,03	-1,55	0,03	-1,12	0,00	-0,72	0,00	-0,38	-0,23	-0,06
5	7	1,4	1	20%	3	43%	1	20%	0,23	-3,94	0,23	-3,63	0,00	-0,99	0,00	-0,50	-0,23	-0,08
5	7	1,4	1	20%	2	29%	2	40%	0,00	-0,96	-0,11	-0,41	-0,11	-0,35	-0,11	-0,28	-0,20	-0,19
5	7	1,4	1	20%	2	29%	1	20%	0,09	-2,54	0,09	-2,19	0,00	-1,31	0,00	-0,91	-0,09	-0,60
5	7	1,4	1	20%	1	14%	2	40%	0,00	-0,84	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,20	-0,22
5	7	1,4	1	20%	1	14%	1	20%	0,00	-2,01	0,00	-1,61	0,00	-1,57	0,00	-1,54	0,00	-1,50

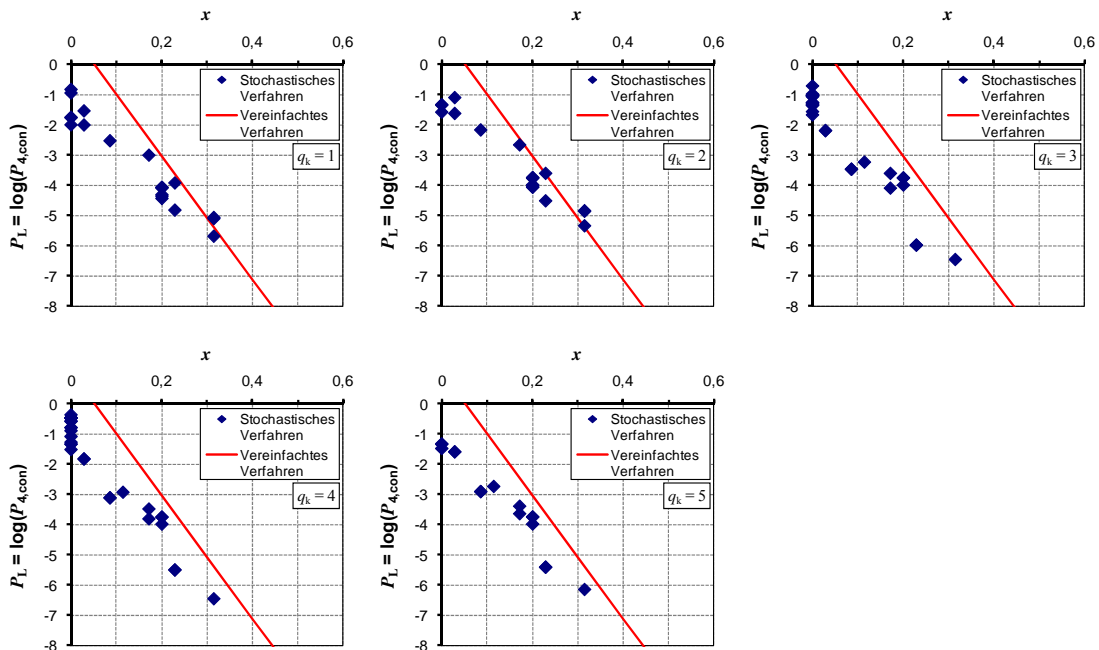


Bild C.38: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Tabelle C.43: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	9	1,5	5	83%	7	78%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,06	-3,16	0,06	-2,82	0,06	-2,60
6	9	1,5	5	83%	7	78%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,06	-3,16	0,06	-2,82	0,06	-2,60
6	9	1,5	5	83%	7	78%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,06	-3,16	0,06	-2,82	0,06	-2,60
6	9	1,5	5	83%	5	56%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	4	67%	7	78%	3	50%	0,28	-5,63	0,28	-5,30	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	7	78%	2	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	7	78%	1	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	5	56%	3	50%	0,17	-3,80	0,17	-3,48	0,11	-3,12	0,11	-2,92	0,11	-2,77
6	9	1,5	4	67%	5	56%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,11	-3,37	0,11	-3,06	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	5	56%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,11	-3,37	0,11	-3,06	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	4	44%	3	50%	0,17	-3,76	0,17	-3,44	0,17	-3,44	0,17	-3,43	0,17	-3,43
6	9	1,5	4	67%	4	44%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,44	0,22	-5,18	0,22	-4,99
6	9	1,5	4	67%	4	44%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,22	-5,44	0,22	-5,18	0,22	-4,99
6	9	1,5	4	67%	3	33%	3	50%	0,17	-3,76	0,17	-3,44	0,17	-3,44	0,17	-3,44	0,17	-3,44
6	9	1,5	4	67%	3	33%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	4	67%	3	33%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	3	50%	7	78%	3	50%	0,28	-5,18	0,28	-4,92	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	2	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	1	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	5	56%	3	50%	0,06	-2,03	0,06	-1,68	0,00	-1,19	0,00	-0,89	-0,06	-0,65
6	9	1,5	3	50%	5	56%	2	33%	0,22	-4,42	0,22	-4,11	0,00	-1,39	0,00	-0,99	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	5	56%	1	17%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,00	-1,39	0,00	-0,99	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	4	44%	3	50%	0,00	-1,71	0,00	-1,32	0,00	-1,28	0,00	-1,23	0,00	-1,19
6	9	1,5	3	50%	4	44%	2	33%	0,17	-3,82	0,17	-3,49	0,06	-2,39	0,06	-2,08	0,06	-1,87
6	9	1,5	3	50%	4	44%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,06	-2,43	0,06	-2,10	0,06	-1,88
6	9	1,5	3	50%	3	33%	3	50%	0,00	-1,66	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	9	1,5	3	50%	3	33%	2	33%	0,17	-3,68	0,17	-3,35	0,17	-3,31	0,17	-3,25	0,17	-3,21
6	9	1,5	3	50%	3	33%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,17	-4,30	0,17	-3,96	0,17	-3,79
6	9	1,5	3	50%	2	22%	3	50%	0,00	-1,66	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	9	1,5	3	50%	2	22%	2	33%	0,17	-3,66	0,17	-3,34	0,17	-3,34	0,17	-3,34	0,17	-3,34
6	9	1,5	3	50%	2	22%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,28	-6,48	0,28	-6,48	0,28	-6,48
6	9	1,5	2	33%	4	44%	3	50%	0,00	-1,03	-0,06	-0,55	-0,06	-0,44	-0,06	-0,31	-0,17	-0,17
6	9	1,5	2	33%	4	44%	2	33%	0,11	-2,45	0,11	-2,11	0,00	-1,07	0,00	-0,67	-0,11	-0,36
6	9	1,5	2	33%	4	44%	1	17%	0,28	-5,57	0,28	-5,30	0,00	-1,12	0,00	-0,69	-0,11	-0,37
6	9	1,5	2	33%	3	33%	3	50%	0,00	-0,84	-0,17	-0,30	-0,17	-0,28	-0,17	-0,27	-0,17	-0,25
6	9	1,5	2	33%	3	33%	2	33%	0,00	-1,84	0,00	-1,47	0,00	-1,30	0,00	-1,15	0,00	-1,01
6	9	1,5	2	33%	3	33%	1	17%	0,17	-4,49	0,17	-4,19	0,00	-1,86	0,00	-1,49	0,00	-1,25
6	9	1,5	2	33%	2	22%	3	50%	0,00	-0,82	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26
6	9	1,5	2	33%	2	22%	2	33%	0,00	-1,70	0,00	-1,31	0,00	-1,30	0,00	-1,29	0,00	-1,29
6	9	1,5	2	33%	2	22%	1	17%	0,17	-4,14	0,17	-3,83	0,11	-3,31	0,11	-3,08	0,11	-2,92

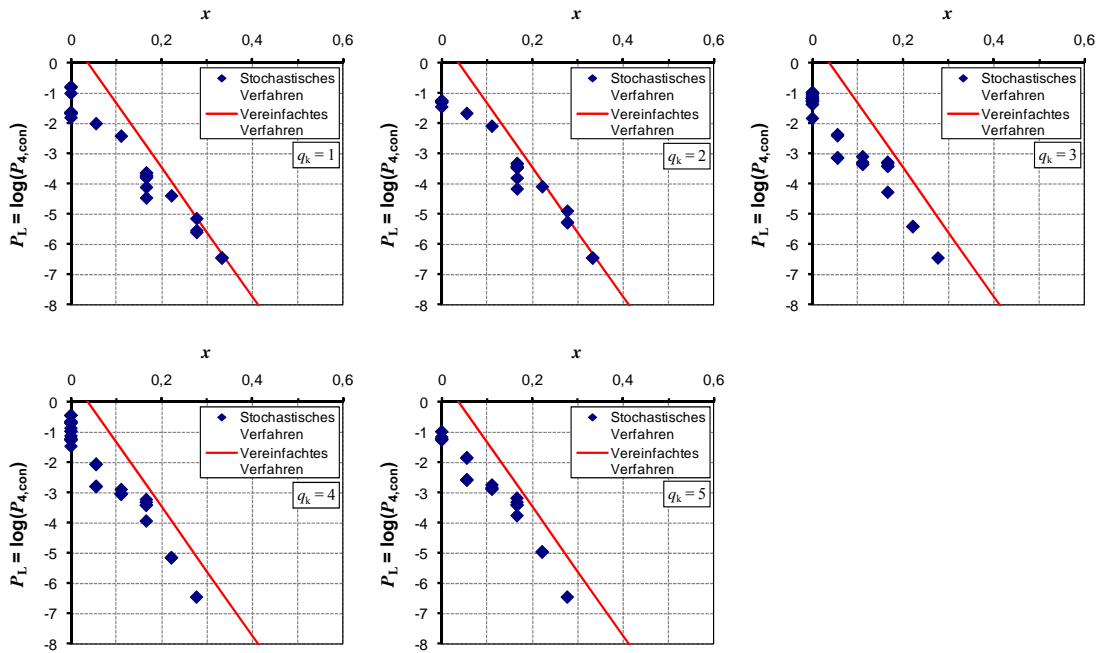


Bild C.39: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

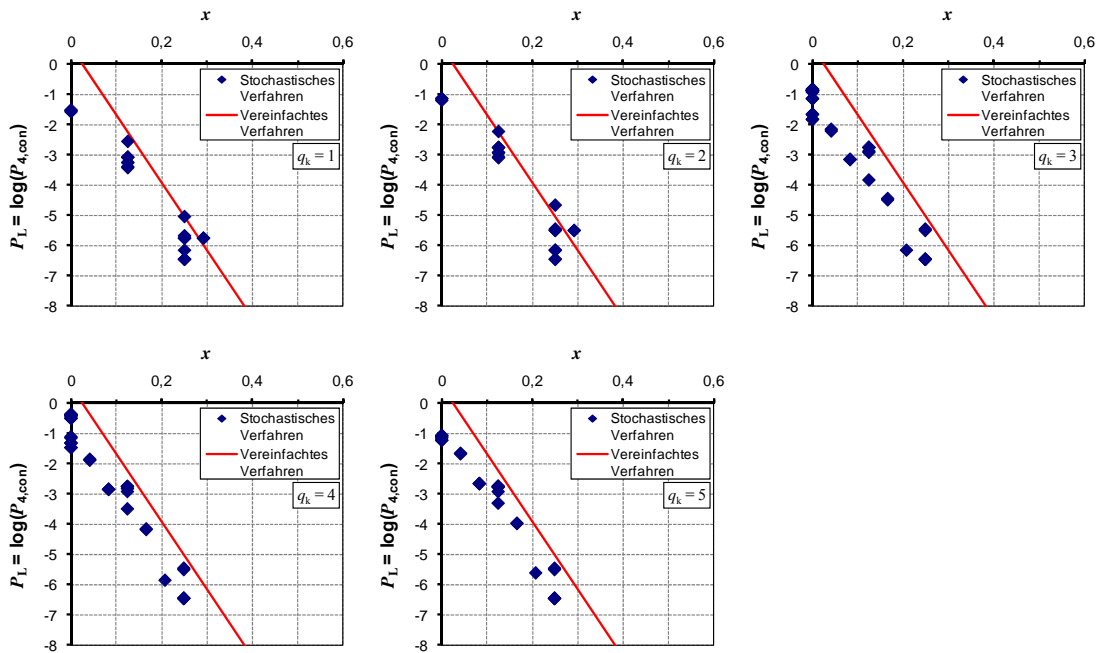


Bild C.40: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.44: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	12	1,5	6	75%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	8	67%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,08	-3,17	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	8	67%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-3,17	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	8	67%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,08	-3,17	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	6	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	6	75%	6	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	6	75%	6	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	6	75%	4	33%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7
8	12	1,5	4	50%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	8	67%	3	38%	0,29	-5,78	0,29	-5,52	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	8	67%	2	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	8	67%	1	13%	0,54	<-7	0,54	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	6	50%	3	38%	0,13	-3,44	0,13	-3,12	0,00	-1,67	0,00	-1,33	0,00	-1,09
8	12	1,5	4	50%	6	50%	2	25%	0,25	-6,18	0,25	-6,18	0,00	-1,69	0,00	-1,33	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	6	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,33	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	4	33%	3	38%	0,13	-3,10	0,13	-2,78	0,13	-2,77	0,13	-2,76	0,13	-2,75
8	12	1,5	4	50%	4	33%	2	25%	0,25	-5,70	0,25	-5,48	0,17	-4,47	0,17	-4,18	0,17	-3,98
8	12	1,5	4	50%	4	33%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,17	-4,51	0,17	-4,20	0,17	-4,00
8	12	1,5	4	50%	3	25%	3	38%	0,13	-3,10	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78
8	12	1,5	4	50%	3	25%	2	25%	0,25	-5,78	0,25	-5,52	0,25	-5,48	0,25	-5,48	0,25	-5,48
8	12	1,5	4	50%	3	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	4	50%	2	17%	3	38%	0,13	-3,10	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78
8	12	1,5	4	50%	2	17%	2	25%	0,25	-5,78	0,25	-5,52	0,25	-5,52	0,25	-5,52	0,25	-5,52
8	12	1,5	4	50%	2	17%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
8	12	1,5	3	38%	9	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	3	38%	0,29	-5,78	0,29	-5,52	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	2	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	1	13%	0,54	<-7	0,54	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	6	50%	3	38%	0,13	-2,57	0,13	-2,25	0,00	-0,92	0,00	-0,50	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	2	25%	0,25	-5,06	0,25	-4,68	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	4	33%	3	38%	0,00	-1,59	0,00	-1,22	0,00	-1,17	0,00	-1,12	0,00	-1,07
8	12	1,5	3	38%	4	33%	2	25%	0,13	-3,41	0,13	-3,09	0,04	-2,17	0,04	-1,87	0,04	-1,67
8	12	1,5	3	38%	4	33%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-6,18	0,04	-2,23	0,04	-1,90	0,04	-1,69
8	12	1,5	3	38%	3	25%	3	38%	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,15
8	12	1,5	3	38%	3	25%	2	25%	0,13	-3,28	0,13	-2,95	0,13	-2,90	0,13	-2,84	0,13	-2,79
8	12	1,5	3	38%	3	25%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,13	-3,85	0,13	-3,51	0,13	-3,32
8	12	1,5	3	38%	2	17%	3	38%	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16
8	12	1,5	3	38%	2	17%	2	25%	0,13	-3,27	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94
8	12	1,5	3	38%	2	17%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,21	-6,18	0,21	-5,88	0,21	-5,63

Tabelle C.45: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	15	1,5	8	80%	10	67%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,13	-4,76	0,13	-4,50	0,13	-4,31
10	15	1,5	8	80%	10	67%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,13	-4,76	0,13	-4,50	0,13	-4,31
10	15	1,5	8	80%	10	67%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,13	-4,76	0,13	-4,50	0,13	-4,31
10	15	1,5	8	80%	10	67%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,13	-4,76	0,13	-4,50	0,13	-4,31
10	15	1,5	8	80%	8	53%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	6	40%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	15	1,5	8	80%	6	40%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	15	1,5	8	80%	6	40%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	15	1,5	8	80%	6	40%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	15	1,5	6	60%	10	67%	4	40%	0,27	-6,18	0,27	-5,88	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	3	30%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	2	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	1	10%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	8	53%	4	40%	0,20	-4,89	0,20	-4,59	0,07	-2,59	0,07	-2,27	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	8	53%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,07	-2,59	0,07	-2,27	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	8	53%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,07	-2,59	0,07	-2,27	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	8	53%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,07	-2,59	0,07	-2,27	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	6	40%	4	40%	0,20	-4,71	0,20	-4,45	0,20	-4,42	0,20	-4,39	0,20	-4,38
10	15	1,5	6	60%	6	40%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,30	0,20	-5,20
10	15	1,5	6	60%	6	40%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,30	0,20	-5,20
10	15	1,5	6	60%	6	40%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,30	0,20	-5,20
10	15	1,5	4	40%	10	67%	4	40%	0,27	-5,70	0,27	-5,52	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	3	30%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	2	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	1	10%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	8	53%	4	40%	0,13	-2,77	0,13	-2,44	0,00	-0,83	0,00	-0,41	-0,13	-0,10
10	15	1,5	4	40%	8	53%	3	30%	0,23	-4,88	0,23	-4,60	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,10
10	15	1,5	4	40%	8	53%	2	20%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,11
10	15	1,5	4	40%	8	53%	1	10%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,11
10	15	1,5	4	40%	6	40%	4	40%	0,00	-1,59	0,00	-1,23	0,00	-1,07	0,00	-0,93	0,00	-0,81
10	15	1,5	4	40%	6	40%	3	30%	0,10	-3,16	0,10	-2,84	0,00	-1,59	0,00	-1,25	0,00	-1,02
10	15	1,5	4	40%	6	40%	2	20%	0,20	-5,78	0,20	-5,44	0,00	-1,62	0,00	-1,26	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	6	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,62	0,00	-1,26	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	4	27%	4	40%	0,00	-1,45	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07
10	15	1,5	4	40%	4	27%	3	30%	0,10	-2,84	0,10	-2,52	0,10	-2,51	0,10	-2,50	0,10	-2,49
10	15	1,5	4	40%	4	27%	2	20%	0,20	-5,08	0,20	-4,84	0,13	-4,05	0,13	-3,78	0,13	-3,61
10	15	1,5	4	40%	4	27%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,13	-4,13	0,13	-3,82	0,13	-3,64

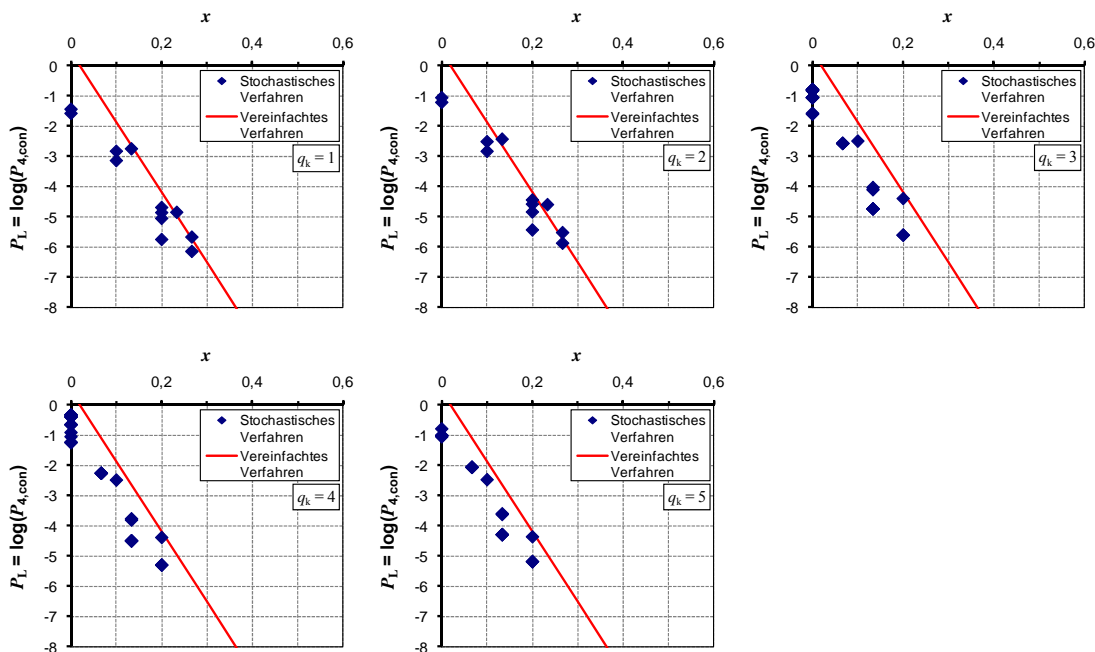


Bild C.41: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

C.4.3 Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert

Tabelle C.46: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	8	2,0	3	75%	6	75%	2	50%	0,25	-6,18	0,25	-5,48	0,00	-2,40	0,00	-2,03	0,00	-1,77
4	8	2,0	3	75%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,40	0,00	-2,03	0,00	-1,77
4	8	2,0	3	75%	4	50%	2	50%	0,25	-5,36	0,25	-4,89	0,25	-4,88	0,25	-4,88	0,25	-4,88
4	8	2,0	3	75%	4	50%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
4	8	2,0	3	75%	3	38%	2	50%	0,25	-5,36	0,25	-4,89	0,25	-4,89	0,25	-4,89	0,25	-4,89
4	8	2,0	3	75%	3	38%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	3	75%	2	25%	2	50%	0,25	-5,36	0,25	-4,89	0,25	-4,89	0,25	-4,89	0,25	-4,89
4	8	2,0	3	75%	2	25%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	3	75%	1	13%	2	50%	0,25	-5,36	0,25	-4,89	0,25	-4,89	0,25	-4,89	0,25	-4,89
4	8	2,0	3	75%	1	13%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	2	50%	6	75%	2	50%	0,25	-3,96	0,25	-3,66	0,00	-1,05	0,00	-0,53	-0,25	-0,09
4	8	2,0	2	50%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,53	-0,25	-0,09
4	8	2,0	2	50%	4	50%	2	50%	0,00	-1,99	0,00	-1,60	0,00	-1,47	0,00	-1,35	0,00	-1,23
4	8	2,0	2	50%	4	50%	1	25%	0,25	-5,08	0,25	-4,75	0,00	-2,12	0,00	-1,76	0,00	-1,52
4	8	2,0	2	50%	3	38%	2	50%	0,00	-1,90	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,47
4	8	2,0	2	50%	3	38%	1	25%	0,25	-4,86	0,25	-4,54	0,13	-3,64	0,13	-3,37	0,13	-3,20
4	8	2,0	2	50%	2	25%	2	50%	0,00	-1,89	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	8	2,0	2	50%	2	25%	1	25%	0,25	-4,81	0,25	-4,50	0,25	-4,48	0,25	-4,48	0,25	-4,47
4	8	2,0	2	50%	1	13%	2	50%	0,00	-1,89	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48	0,00	-1,48
4	8	2,0	2	50%	1	13%	1	25%	0,25	-4,81	0,25	-4,50	0,25	-4,50	0,25	-4,50	0,25	-4,50
4	8	2,0	1	25%	6	75%	2	50%	0,25	-3,91	0,25	-3,60	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	6	75%	1	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	4	50%	2	50%	0,00	-1,34	0,00	-0,87	0,00	-0,59	0,00	-0,33	-0,25	-0,07
4	8	2,0	1	25%	4	50%	1	25%	0,25	-3,77	0,25	-3,43	0,00	-0,97	0,00	-0,49	-0,25	-0,10
4	8	2,0	1	25%	3	38%	2	50%	0,00	-0,96	-0,13	-0,36	-0,13	-0,31	-0,13	-0,25	-0,25	-0,18
4	8	2,0	1	25%	3	38%	1	25%	0,13	-2,62	0,13	-2,28	0,00	-1,23	0,00	-0,83	-0,13	-0,51
4	8	2,0	1	25%	2	25%	2	50%	0,00	-0,88	-0,25	-0,22	-0,25	-0,22	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21
4	8	2,0	1	25%	2	25%	1	25%	0,00	-2,11	0,00	-1,72	0,00	-1,59	0,00	-1,47	0,00	-1,35
4	8	2,0	1	25%	1	13%	2	50%	0,00	-0,87	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21	-0,25	-0,21
4	8	2,0	1	25%	1	13%	1	25%	0,00	-2,02	0,00	-1,61	0,00	-1,60	0,00	-1,60	0,00	-1,60

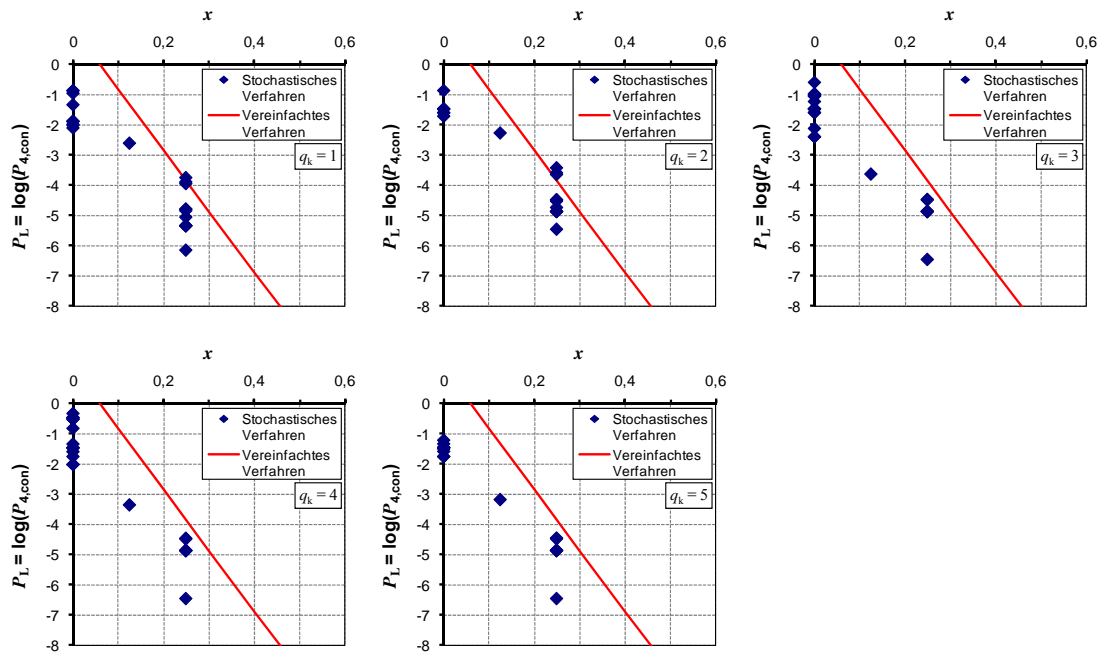


Bild C.42: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Tabelle C.47: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	10	2,0	4	80%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,35	0,00	-1,98	0,00	-1,73
5	10	2,0	4	80%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-2,35	0,00	-1,98	0,00	-1,73
5	10	2,0	4	80%	6	60%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,88	0,20	-5,78
5	10	2,0	4	80%	6	60%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,88	0,20	-5,78
5	10	2,0	4	80%	4	40%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	4	40%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	3	30%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	3	30%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
5	10	2,0	4	80%	2	20%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	2	20%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
5	10	2,0	3	60%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,04	0,00	-0,52	-0,20	-0,10
5	10	2,0	3	60%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,04	0,00	-0,52	-0,20	-0,10
5	10	2,0	3	60%	6	60%	2	40%	0,20	-4,41	0,20	-4,11	0,00	-2,02	0,00	-1,66	0,00	-1,42
5	10	2,0	3	60%	6	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,02	0,00	-1,66	0,00	-1,42
5	10	2,0	3	60%	4	40%	2	40%	0,20	-4,14	0,20	-3,79	0,20	-3,77	0,20	-3,76	0,20	-3,75
5	10	2,0	3	60%	4	40%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,40	0,20	-5,08	0,20	-4,83
5	10	2,0	3	60%	3	30%	2	40%	0,20	-4,14	0,20	-3,78	0,20	-3,78	0,20	-3,78	0,20	-3,78
5	10	2,0	3	60%	3	30%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	3	60%	2	20%	2	40%	0,20	-4,14	0,20	-3,78	0,20	-3,78	0,20	-3,78	0,20	-3,78
5	10	2,0	3	60%	2	20%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	3	60%	1	10%	2	40%	0,20	-4,14	0,20	-3,78	0,20	-3,78	0,20	-3,78	0,20	-3,78
5	10	2,0	3	60%	1	10%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	2	40%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	6	60%	2	40%	0,20	-3,21	0,20	-2,88	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,20	-0,13
5	10	2,0	2	40%	6	60%	1	20%	0,40	-6,48	0,40	-6,48	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,20	-0,13
5	10	2,0	2	40%	4	40%	2	40%	0,00	-1,86	0,00	-1,47	0,00	-1,35	0,00	-1,23	0,00	-1,12
5	10	2,0	2	40%	4	40%	1	20%	0,20	-4,60	0,20	-4,32	0,00	-1,99	0,00	-1,64	0,00	-1,41
5	10	2,0	2	40%	3	30%	2	40%	0,00	-1,77	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,35	0,00	-1,35
5	10	2,0	2	40%	3	30%	1	20%	0,20	-4,34	0,20	-4,05	0,10	-3,30	0,10	-3,04	0,10	-2,86
5	10	2,0	2	40%	2	20%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36
5	10	2,0	2	40%	2	20%	1	20%	0,20	-4,30	0,20	-4,00	0,20	-3,98	0,20	-3,97	0,20	-3,96
5	10	2,0	2	40%	1	10%	2	40%	0,00	-1,76	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36	0,00	-1,36
5	10	2,0	2	40%	1	10%	1	20%	0,20	-4,30	0,20	-4,00	0,20	-4,00	0,20	-4,00	0,20	-4,00
5	10	2,0	1	20%	8	80%	2	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,60	0,00
5	10	2,0	1	20%	8	80%	1	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,60	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	2	40%	0,20	-3,10	0,20	-2,78	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	1	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	3	30%	2	40%	0,00	-0,93	-0,10	-0,37	-0,10	-0,32	-0,10	-0,26	-0,20	-0,19
5	10	2,0	1	20%	3	30%	1	20%	0,10	-2,50	0,10	-2,16	0,00	-1,20	0,00	-0,82	-0,10	-0,52
5	10	2,0	1	20%	2	20%	2	40%	0,00	-0,84	-0,20	-0,24	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,20	-0,22
5	10	2,0	1	20%	2	20%	1	20%	0,00	-2,05	0,00	-1,66	0,00	-1,53	0,00	-1,42	0,00	-1,30
5	10	2,0	1	20%	1	10%	2	40%	0,00	-0,84	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23	-0,20	-0,23
5	10	2,0	1	20%	1	10%	1	20%	0,00	-1,96	0,00	-1,55	0,00	-1,55	0,00	-1,55	0,00	-1,55

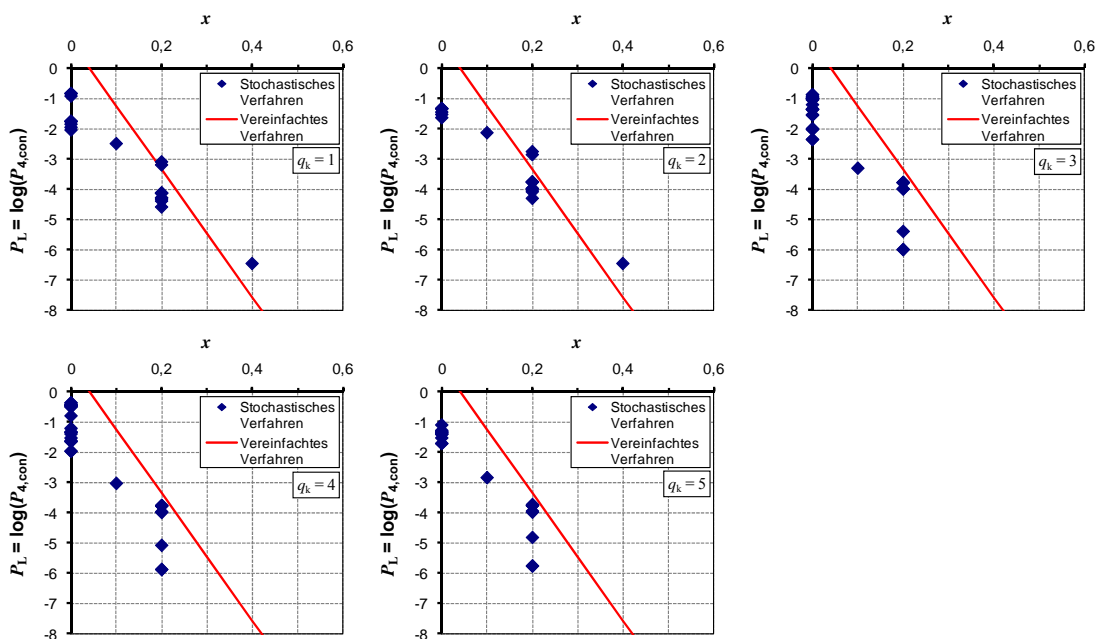


Bild C.43: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Tabelle C.48: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	12	2,0	5	83%	9	75%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,08	-3,97	0,08	-3,66	0,08	-3,47
6	12	2,0	5	83%	9	75%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-3,97	0,08	-3,66	0,08	-3,47
6	12	2,0	5	83%	9	75%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,08	-3,97	0,08	-3,66	0,08	-3,47
6	12	2,0	5	83%	6	50%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	3	25%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	3	25%	2	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	5	83%	3	25%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7
6	12	2,0	4	67%	9	75%	3	50%	0,25	-4,95	0,25	-4,69	0,00	-1,25	0,00	-0,83	-0,08	-0,52
6	12	2,0	4	67%	9	75%	2	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,25	0,00	-0,83	-0,08	-0,52
6	12	2,0	4	67%	9	75%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,25	0,00	-0,83	-0,08	-0,52
6	12	2,0	4	67%	6	50%	3	50%	0,17	-3,80	0,17	-3,47	0,17	-3,46	0,17	-3,44	0,17	-3,43
6	12	2,0	4	67%	6	50%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,99	0,17	-4,64	0,17	-4,47
6	12	2,0	4	67%	6	50%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,99	0,17	-4,64	0,17	-4,47
6	12	2,0	4	67%	3	25%	3	50%	0,17	-3,80	0,17	-3,47	0,17	-3,47	0,17	-3,47	0,17	-3,47
6	12	2,0	4	67%	3	25%	2	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	3	25%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
6	12	2,0	3	50%	9	75%	3	50%	0,25	-4,49	0,25	-4,15	0,00	-0,90	0,00	-0,41	-0,25	-0,02
6	12	2,0	3	50%	9	75%	2	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,42	-0,25	-0,02
6	12	2,0	3	50%	9	75%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,42	-0,25	-0,02
6	12	2,0	3	50%	6	50%	3	50%	0,00	-1,76	0,00	-1,38	0,00	-1,25	0,00	-1,14	0,00	-1,03
6	12	2,0	3	50%	6	50%	2	33%	0,17	-3,96	0,17	-3,65	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,30
6	12	2,0	3	50%	6	50%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
6	12	2,0	3	50%	3	25%	3	50%	0,00	-1,65	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26	0,00	-1,26
6	12	2,0	3	50%	3	25%	2	33%	0,17	-3,63	0,17	-3,32	0,17	-3,32	0,17	-3,32	0,17	-3,32
6	12	2,0	3	50%	3	25%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
6	12	2,0	2	33%	9	75%	3	50%	0,25	-4,50	0,25	-4,14	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,42	0,00
6	12	2,0	2	33%	9	75%	2	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,42	0,00
6	12	2,0	2	33%	9	75%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,42	0,00
6	12	2,0	2	33%	6	50%	3	50%	0,00	-1,20	0,00	-0,77	0,00	-0,53	0,00	-0,31	-0,17	-0,10
6	12	2,0	2	33%	6	50%	2	33%	0,17	-2,88	0,17	-2,57	0,00	-0,91	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	6	50%	1	17%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-0,92	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	3	25%	3	50%	0,00	-0,82	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26	-0,17	-0,26
6	12	2,0	2	33%	3	25%	2	33%	0,00	-1,70	0,00	-1,31	0,00	-1,30	0,00	-1,29	0,00	-1,28
6	12	2,0	2	33%	3	25%	1	17%	0,17	-4,12	0,17	-3,81	0,08	-3,15	0,08	-2,89	0,08	-2,71

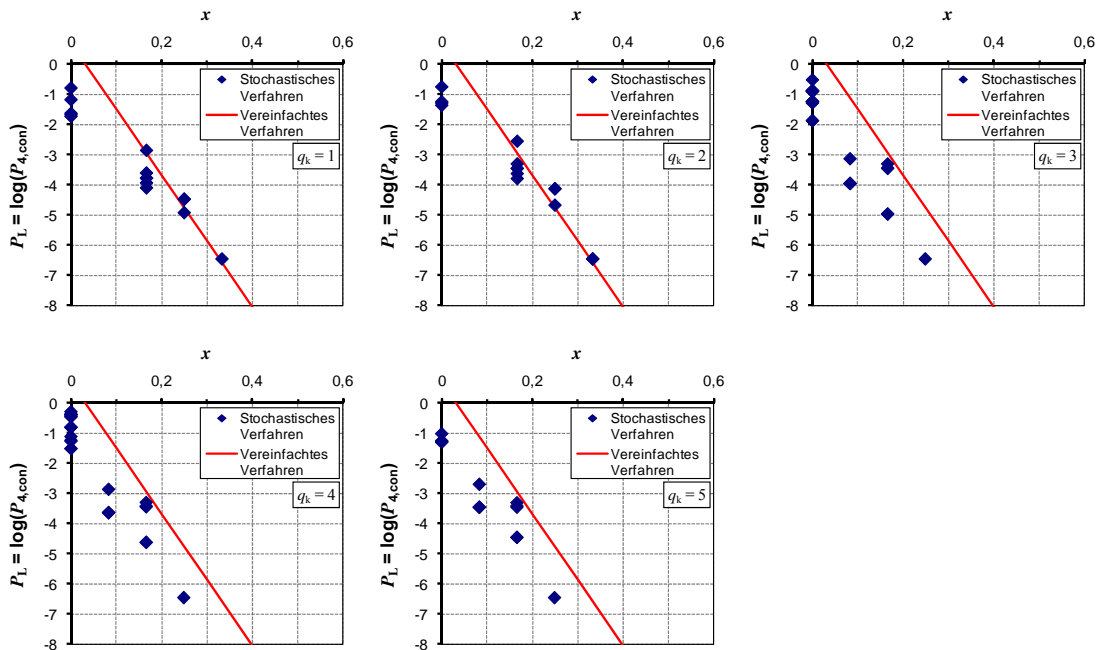


Bild C.44: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.49: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	14	2,0	5	71%	12	86%	3	43%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,02	0,00	-0,52	-0,14	-0,10
7	14	2,0	5	71%	12	86%	2	29%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,02	0,00	-0,52	-0,14	-0,10
7	14	2,0	5	71%	12	86%	1	14%	0,71	<-7	0,71	<-7	0,00	-1,02	0,00	-0,52	-0,14	-0,10
7	14	2,0	5	71%	8	57%	3	43%	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,14	-4,71	0,14	-4,38	0,14	-4,19
7	14	2,0	5	71%	8	57%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-4,71	0,14	-4,39	0,14	-4,19
7	14	2,0	5	71%	8	57%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-4,71	0,14	-4,39	0,14	-4,19
7	14	2,0	5	71%	4	29%	3	43%	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,29	-6,48
7	14	2,0	5	71%	4	29%	2	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	5	71%	4	29%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	4	57%	12	86%	3	43%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,45	-0,29	0,00
7	14	2,0	4	57%	12	86%	2	29%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,45	-0,29	0,00
7	14	2,0	4	57%	12	86%	1	14%	0,71	<-7	0,71	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,45	-0,29	0,00
7	14	2,0	4	57%	8	57%	3	43%	0,14	-3,64	0,14	-3,32	0,00	-1,82	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	8	57%	2	29%	0,29	-6,48	0,29	-6,48	0,00	-1,83	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	8	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,83	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	4	29%	3	43%	0,14	-3,33	0,14	-3,00	0,14	-3,00	0,14	-3,00	0,14	-3,00
7	14	2,0	4	57%	4	29%	2	29%	0,29	-5,78	0,29	-5,70	0,29	-5,70	0,29	-5,70	0,29	-5,70
7	14	2,0	4	57%	4	29%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	3	43%	12	86%	3	43%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,45	-0,43	0,00
7	14	2,0	3	43%	12	86%	2	29%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,45	-0,43	0,00
7	14	2,0	3	43%	12	86%	1	14%	0,71	<-7	0,71	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,45	-0,43	0,00
7	14	2,0	3	43%	8	57%	3	43%	0,14	-2,64	0,14	-2,33	0,00	-0,89	0,00	-0,48	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	2	29%	0,29	-5,18	0,29	-5,03	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	4	29%	3	43%	0,00	-1,58	0,00	-1,20	0,00	-1,20	0,00	-1,20	0,00	-1,20
7	14	2,0	3	43%	4	29%	2	29%	0,14	-3,39	0,14	-3,08	0,14	-3,06	0,14	-3,04	0,14	-3,02
7	14	2,0	3	43%	4	29%	1	14%	0,29	<-7	0,29	-6,18	0,14	-4,44	0,14	-4,13	0,14	-3,95
7	14	2,0	3	43%	2	14%	3	43%	0,00	-1,58	0,00	-1,20	0,00	-1,20	0,00	-1,20	0,00	-1,20
7	14	2,0	3	43%	2	14%	2	29%	0,14	-3,39	0,14	-3,08	0,14	-3,08	0,14	-3,08	0,14	-3,08
7	14	2,0	3	43%	2	14%	1	14%	0,29	<-7	0,29	-6,18	0,29	-6,18	0,29	-6,18	0,29	-6,18

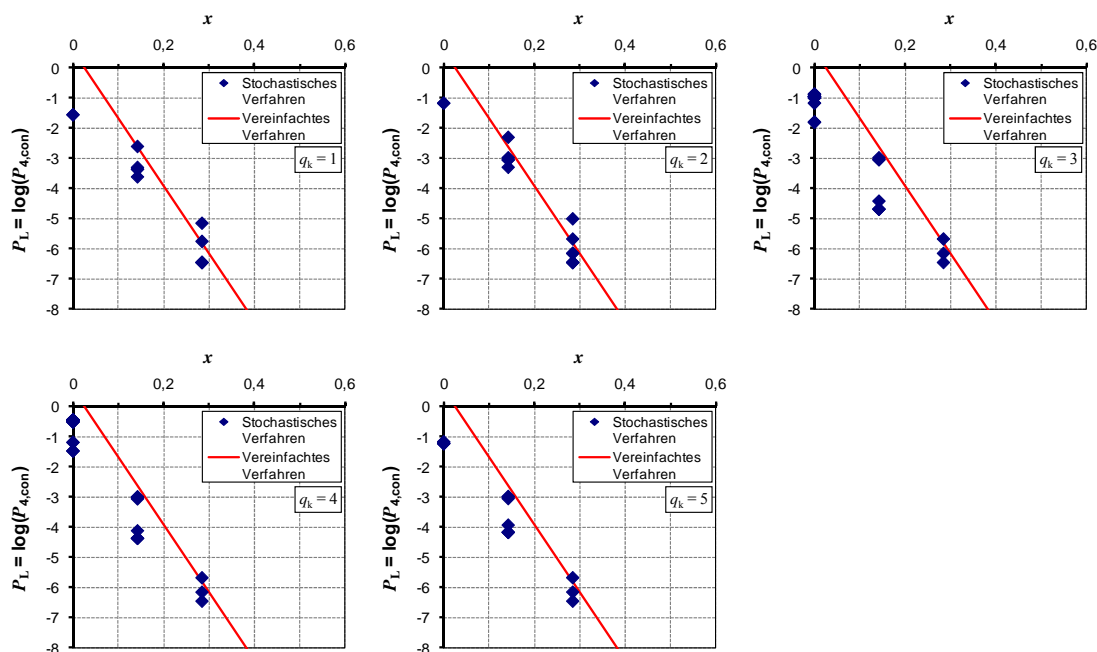


Bild C.45: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Tabelle C.50: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen				Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$		
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F / s_{\min}	n_F	n_S / s_{\max}	n_S	n_{NP} / s_{\min}	n_{NP}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	16	2,0	6	75%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	8	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	4	50%	12	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00	0,00	0,00
8	16	2,0	4	50%	12	75%	2	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00	0,00	
8	16	2,0	4	50%	12	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00	0,00	
8	16	2,0	4	50%	8	50%	3	38%	0,13	-3,39	0,13	-3,06	0,00	-1,74	0,00	-1,41	0,00	-1,19	0,00	
8	16	2,0	4	50%	8	50%	2	25%	0,25	-6,48	0,25	-5,78	0,00	-1,76	0,00	-1,42	0,00	-1,19	0,00	
8	16	2,0	4	50%	8	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,42	0,00	-1,19	0,00	
8	16	2,0	4	50%	4	25%	3	38%	0,13	-3,09	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78	0,13	-2,78
8	16	2,0	4	50%	4	25%	2	25%	0,25	-5,52	0,25	-5,33	0,25	-5,33	0,25	-5,33	0,25	-5,33	0,25	-5,33
8	16	2,0	4	50%	4	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	3	38%	8	50%	3	38%	0,13	-2,48	0,13	-2,16	0,00	-0,87	0,00	-0,48	-0,13	-0,19	0,00	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	2	25%	0,25	-5,00	0,25	-4,63	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19	0,00	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19	0,00	-0,19
8	16	2,0	3	38%	4	25%	3	38%	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16
8	16	2,0	3	38%	4	25%	2	25%	0,13	-3,27	0,13	-2,95	0,13	-2,92	0,13	-2,90	0,13	-2,88	0,13	-2,88
8	16	2,0	3	38%	4	25%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-5,88	0,13	-4,22	0,13	-3,94	0,13	-3,76	0,13	-3,76
8	16	2,0	3	38%	2	13%	3	38%	0,00	-1,54	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16	0,00	-1,16
8	16	2,0	3	38%	2	13%	2	25%	0,13	-3,26	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94	0,13	-2,94
8	16	2,0	3	38%	2	13%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-5,88	0,25	-5,88	0,25	-5,88	0,25	-5,88	0,25	-5,88

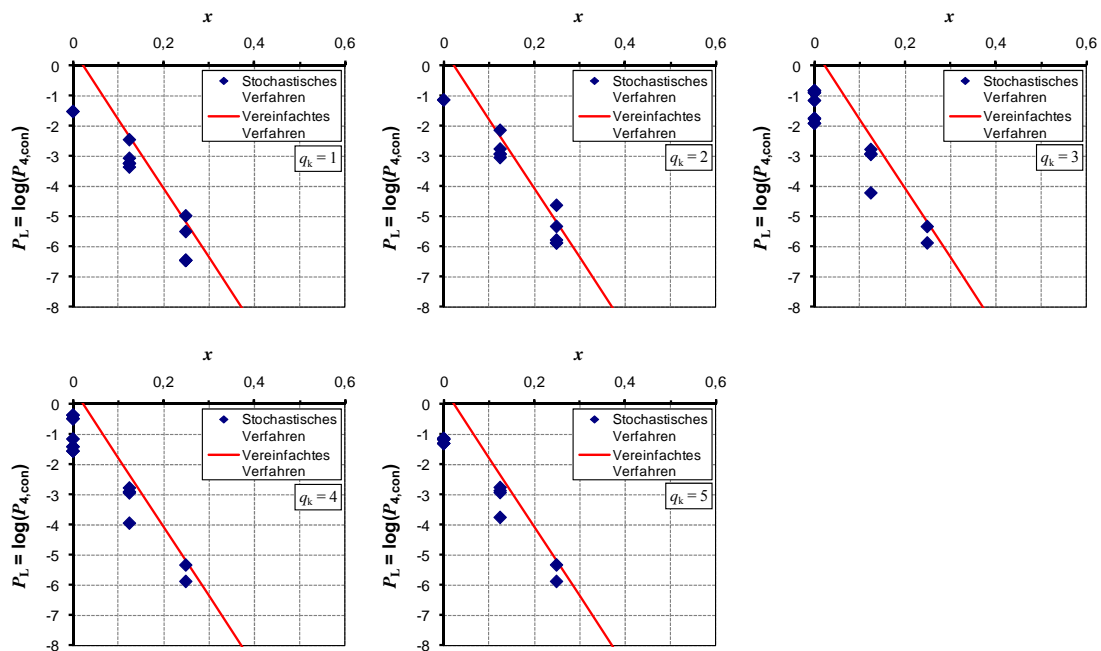


Bild C.46: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Tabelle C.51: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	18	2,0	7	78%	14	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	10	56%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	5	56%	14	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	1	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	4	44%	0,11	-3,17	0,11	-2,86	0,00	-1,69	0,00	-1,36	0,00	-1,15
9	18	2,0	5	56%	10	56%	3	33%	0,22	-5,57	0,22	-5,40	0,00	-1,72	0,00	-1,38	0,00	-1,16
9	18	2,0	5	56%	10	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,38	0,00	-1,16
9	18	2,0	5	56%	10	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,72	0,00	-1,38	0,00	-1,16
9	18	2,0	5	56%	6	33%	4	44%	0,11	-2,92	0,11	-2,60	0,11	-2,60	0,11	-2,60	0,11	-2,60
9	18	2,0	5	56%	6	33%	3	33%	0,22	-5,20	0,22	-4,92	0,22	-4,92	0,22	-4,92	0,22	-4,92
9	18	2,0	5	56%	6	33%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	5	56%	6	33%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	3	33%	10	56%	4	44%	0,11	-2,20	0,11	-1,87	0,00	-0,72	0,00	-0,32	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	3	33%	0,22	-4,21	0,22	-3,89	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	-6,48	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	1	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	6	33%	4	44%	0,00	-0,80	-0,11	-0,32	-0,11	-0,31	-0,11	-0,30	-0,11	-0,29
9	18	2,0	3	33%	6	33%	3	33%	0,00	-1,60	0,00	-1,24	0,00	-1,12	0,00	-1,01	0,00	-0,91
9	18	2,0	3	33%	6	33%	2	22%	0,11	-3,40	0,11	-3,10	0,00	-1,74	0,00	-1,40	0,00	-1,18
9	18	2,0	3	33%	6	33%	1	11%	0,22	<-7	0,22	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,41	0,00	-1,19
9	18	2,0	3	33%	3	17%	4	44%	0,00	-0,78	-0,11	-0,30	-0,11	-0,30	-0,11	-0,30	-0,11	-0,30
9	18	2,0	3	33%	3	17%	3	33%	0,00	-1,51	0,00	-1,13	0,00	-1,13	0,00	-1,13	0,00	-1,13
9	18	2,0	3	33%	3	17%	2	22%	0,11	-3,16	0,11	-2,85	0,11	-2,85	0,11	-2,84	0,11	-2,84
9	18	2,0	3	33%	3	17%	1	11%	0,22	-6,18	0,22	-6,18	0,17	-5,88	0,17	-5,78	0,17	-5,70

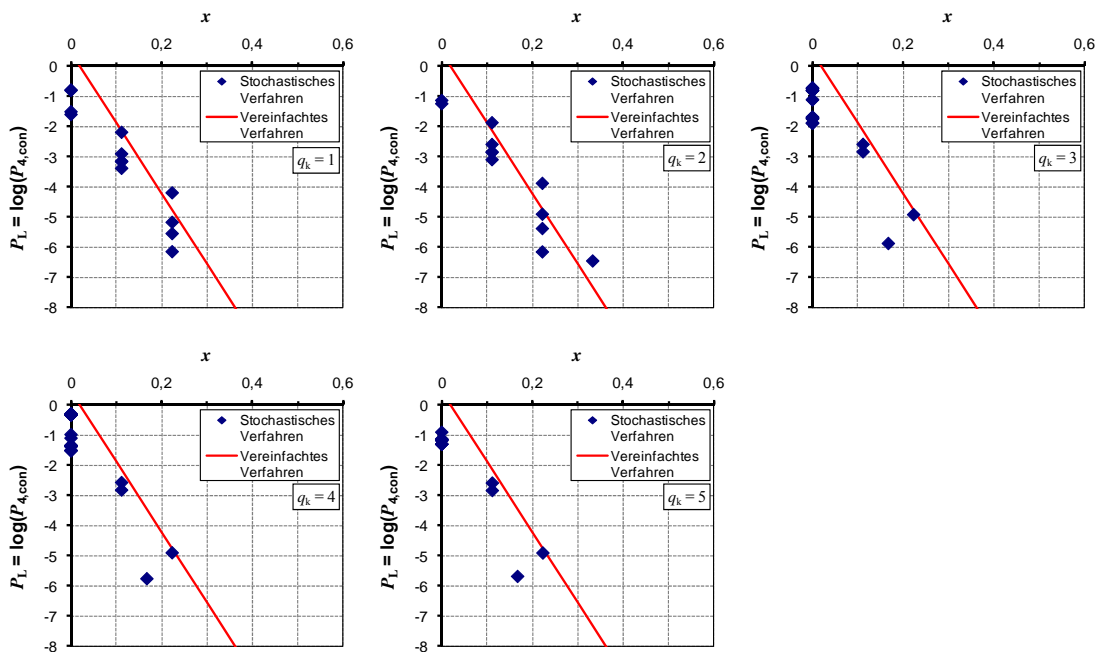


Bild C.47: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Tabelle C.52: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\min}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	20	2,0	8	80%	16	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	10	50%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	6	60%	16	80%	4	40%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	2	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	10	50%	4	40%	0,20	-4,81	0,20	-4,50	0,10	-3,54	0,10	-3,25	0,10	-3,08
10	20	2,0	6	60%	10	50%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,10	-3,59	0,10	-3,28	0,10	-3,10
10	20	2,0	6	60%	10	50%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-3,59	0,10	-3,28	0,10	-3,10
10	20	2,0	6	60%	10	50%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-3,59	0,10	-3,28	0,10	-3,10
10	20	2,0	6	60%	4	20%	4	40%	0,20	-4,79	0,20	-4,47	0,20	-4,47	0,20	-4,47	0,20	-4,47
10	20	2,0	6	60%	4	20%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	4	40%	12	60%	4	40%	0,20	-3,91	0,20	-3,59	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,00	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	2	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	8	40%	4	40%	0,00	-1,54	0,00	-1,18	0,00	-1,06	0,00	-0,96	0,00	-0,85
10	20	2,0	4	40%	8	40%	3	30%	0,10	-3,09	0,10	-2,78	0,00	-1,66	0,00	-1,33	0,00	-1,12
10	20	2,0	4	40%	8	40%	2	20%	0,20	-5,40	0,20	-5,22	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	8	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	4	20%	4	40%	0,00	-1,45	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07	0,00	-1,07
10	20	2,0	4	40%	4	20%	3	30%	0,10	-2,83	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52	0,10	-2,52
10	20	2,0	4	40%	4	20%	2	20%	0,20	-5,15	0,20	-4,86	0,20	-4,86	0,20	-4,86	0,20	-4,86
10	20	2,0	4	40%	4	20%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	<-7	0,20	<-7	0,20	<-7

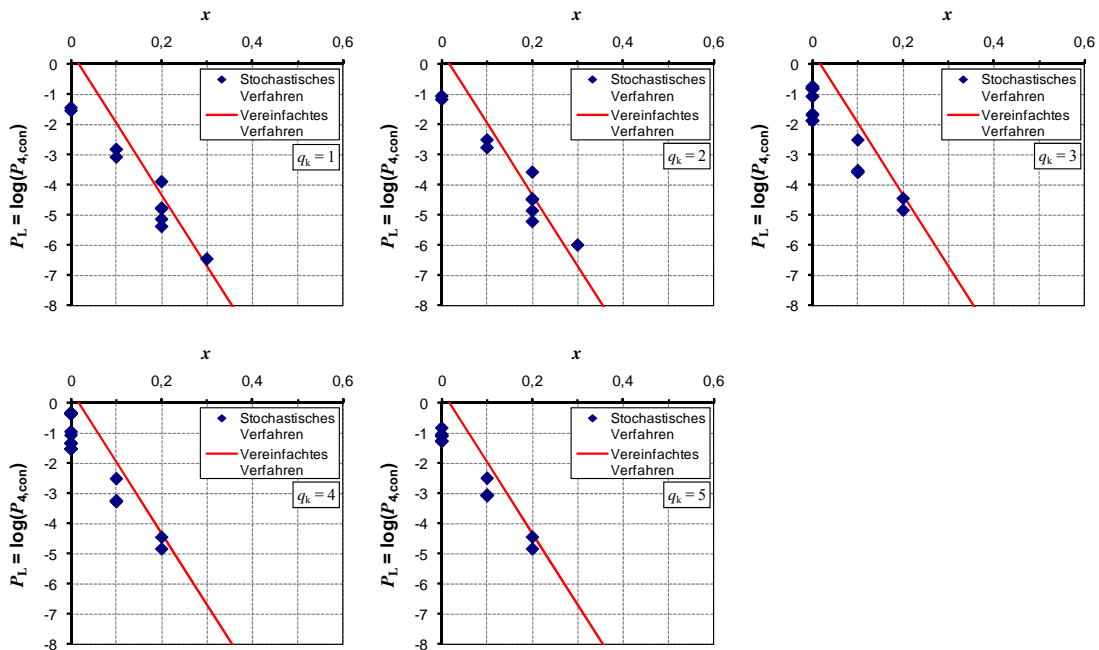


Bild C.48: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

C.5 Vier Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl

C.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der Parametervariation werden die vorhandenen Spanngliedanzahlen, die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten gemäß Tabelle C.53 angesetzt. Da $n_{br,i}$ in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten für die Berechnung nicht relevant ist, wird hier der Wert 0 eingesetzt. Entsprechend wird in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten für $n_{cr,i} = 0$ angesetzt. Die Werte für s_{min} , s_{max} , n_{NP} , n_{St} und n_F sind in den nachfolgenden Abschnitten in Tabellen angegeben. Im Querschnitt 1 werden die Eingangswerte n_{cr} bzw. n_{br} durch Multiplikation von n_{NP} mit dem Verhältnis von s_{min} / s_{max} ermittelt. Das Ergebnis wird dabei auf die jeweils nächste ganze Spanngliedanzahl gerundet.

Die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens sind in den nachfolgenden Tabellen ebenfalls angegeben. In den Diagrammen werden die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens und des vereinfachten Verfahrens dargestellt.

Tabelle C.53: Ansatz der vorhandenen Spanngliedanzahlen, der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in der Parametervariation mit $q_s = 4$ Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl

Querschnitt	Vorhandene Spanngliedanzahl s_i	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung n_{cr}	Erforderliche Restspanngliedanzahl n_{br}
1	s_{min}	0 ^{*)}	Runden $\{n_{NP} \cdot s_{min} / s_{max}\}$ bzw. 0 ^{**)}
2	s_{max}	n_{NP} bzw. 0 bei $q_k \geq 2$ ^{*)}	n_{NP} bei $q_k \geq 2$ bzw. 0 ^{**)}
3	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 3$ ^{*)}	n_{St} bei $q_k \geq 3$ bzw. 0 ^{**)}
4	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 4$ ^{*)}	n_{St} bei $q_k \geq 4$ bzw. 0 ^{**)}
5	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k = 5$ ^{*)}	n_{St} bei $q_k = 5$ bzw. 0 ^{**)}
6	s_{min}	n_F	0
7	s_{min}	n_F	0
8	s_{min}	n_F	0
9	s_{min}	n_F	0
10	s_{min}	n_F	0
^{*)} Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten: $n_{cr} = 0$ ^{**)} Querschnitte mit Ankündigungsverhalten: $n_{br} = 0$ Anmerkung: Die Reihenfolge der Querschnitte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis			

C.5.2 Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert

Tabelle C.54: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	6	1,5	3	75%	5	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,74	0,00	-1,24	-0,08	-0,83
4	6	1,5	3	75%	5	83%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,74	0,00	-1,24	-0,08	-0,83
4	6	1,5	3	75%	4	67%	3	50%	0,25	-5,78	0,25	-5,70	0,08	-3,32	0,08	-2,97	0,08	-2,76
4	6	1,5	3	75%	4	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-3,32	0,08	-2,98	0,08	-2,76
4	6	1,5	3	75%	3	50%	3	50%	0,25	-5,44	0,25	-5,33	0,25	-5,20	0,25	-5,13	0,25	-5,05
4	6	1,5	3	75%	3	50%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	-5,78	0,25	-5,63	0,25	-5,40
4	6	1,5	3	75%	2	33%	3	50%	0,25	-5,44	0,25	-5,30	0,25	-5,30	0,25	-5,30	0,25	-5,30
4	6	1,5	3	75%	2	33%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
4	6	1,5	3	75%	1	17%	3	50%	0,25	-5,44	0,25	-5,30	0,25	-5,30	0,25	-5,30	0,25	-5,30
4	6	1,5	3	75%	1	17%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	6	1,5	2	50%	5	83%	3	50%	0,33	-6,00	0,33	-6,00	0,00	-1,27	0,00	-0,63	-0,33	-0,02
4	6	1,5	2	50%	5	83%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,63	-0,33	-0,02
4	6	1,5	2	50%	4	67%	3	50%	0,17	-3,00	0,17	-2,84	0,00	-1,21	0,00	-0,72	-0,17	-0,33
4	6	1,5	2	50%	4	67%	1	17%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,22	0,00	-0,73	-0,17	-0,33
4	6	1,5	2	50%	3	50%	3	50%	0,00	-2,01	0,00	-1,74	0,00	-1,54	0,00	-1,36	0,00	-1,20
4	6	1,5	2	50%	3	50%	1	17%	0,25	-5,15	0,25	-5,15	0,00	-2,04	0,00	-1,68	0,00	-1,42
4	6	1,5	2	50%	2	33%	3	50%	0,00	-1,85	0,00	-1,53	0,00	-1,53	0,00	-1,53	0,00	-1,52
4	6	1,5	2	50%	2	33%	1	17%	0,25	-4,88	0,25	-4,88	0,17	-3,95	0,17	-3,68	0,17	-3,51
4	6	1,5	2	50%	1	17%	3	50%	0,00	-1,84	0,00	-1,53	0,00	-1,53	0,00	-1,53	0,00	-1,53
4	6	1,5	2	50%	1	17%	1	17%	0,25	-4,82	0,25	-4,82	0,25	-4,82	0,25	-4,82	0,25	-4,82
4	6	1,5	1	25%	5	83%	3	50%	0,33	-6,00	0,33	-6,00	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,58	0,00
4	6	1,5	1	25%	5	83%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,58	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	3	50%	0,17	-2,80	0,17	-2,61	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,42	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	1	17%	0,42	-6,48	0,42	-6,48	0,00	-1,05	0,00	-0,50	-0,42	0,00
4	6	1,5	1	25%	3	50%	3	50%	0,00	-1,38	0,00	-0,98	0,00	-0,67	0,00	-0,37	-0,25	-0,07
4	6	1,5	1	25%	3	50%	1	17%	0,25	-3,87	0,25	-3,87	0,00	-1,05	0,00	-0,54	-0,25	-0,11
4	6	1,5	1	25%	2	33%	3	50%	0,00	-0,87	-0,17	-0,31	-0,17	-0,27	-0,17	-0,22	-0,25	-0,17
4	6	1,5	1	25%	2	33%	1	17%	0,08	-2,43	0,08	-2,42	0,00	-1,46	0,00	-1,07	-0,08	-0,76
4	6	1,5	1	25%	1	17%	3	50%	0,00	-0,81	-0,25	-0,19	-0,25	-0,19	-0,25	-0,19	-0,25	-0,19
4	6	1,5	1	25%	1	17%	1	17%	0,00	-1,94	0,00	-1,92	0,00	-1,89	0,00	-1,86	0,00	-1,83

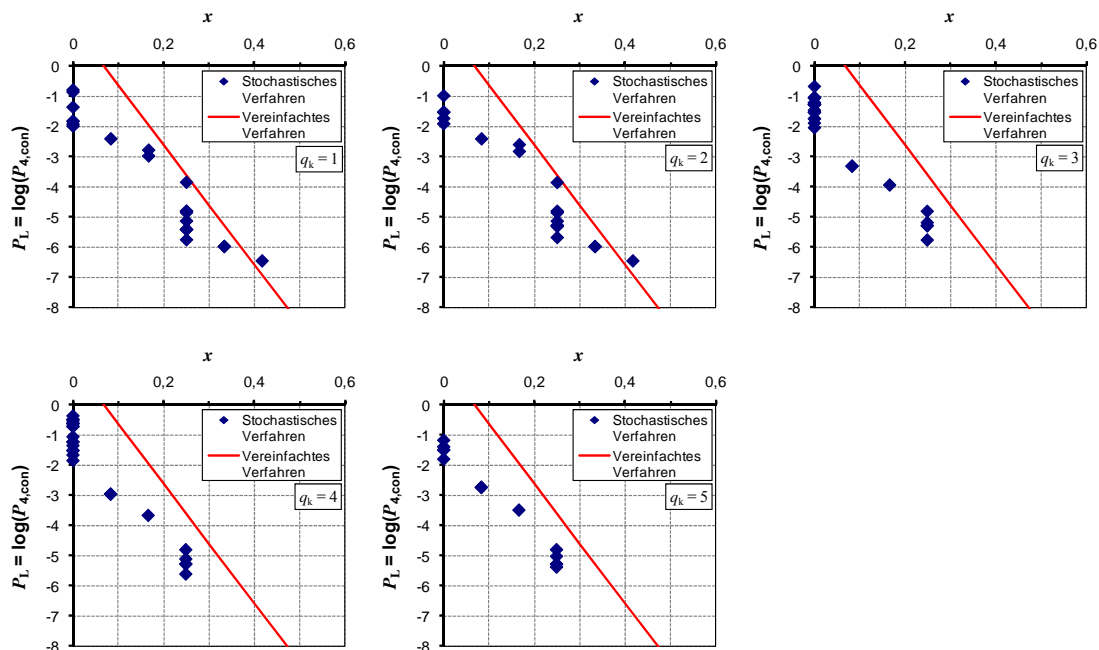


Bild C.49: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Tabelle C.55: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	7	1,4	4	80%	5	71%	3	43%	0,40	<-7	0,37	<-7	0,09	-3,49	0,09	-3,15	0,09	-2,93
5	7	1,4	4	80%	5	71%	1	14%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,09	-3,49	0,09	-3,15	0,09	-2,93
5	7	1,4	4	80%	4	57%	3	43%	0,40	<-7	0,37	<-7	0,23	-5,70	0,23	-5,63	0,23	-5,52
5	7	1,4	4	80%	4	57%	1	14%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,23	-5,70	0,23	-5,63	0,23	-5,52
5	7	1,4	4	80%	3	43%	3	43%	0,40	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	3	43%	1	14%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	3	43%	0,40	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	1	14%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,51	<-7	0,51	<-7	0,51	<-7
5	7	1,4	3	60%	5	71%	3	43%	0,31	-5,57	0,29	-5,44	0,00	-1,27	0,00	-0,81	-0,11	-0,44
5	7	1,4	3	60%	5	71%	1	14%	0,51	<-7	0,51	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,81	-0,11	-0,44
5	7	1,4	3	60%	4	57%	3	43%	0,20	-4,36	0,17	-4,12	0,03	-2,20	0,03	-1,85	0,03	-1,61
5	7	1,4	3	60%	4	57%	1	14%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,03	-2,21	0,03	-1,85	0,03	-1,62
5	7	1,4	3	60%	3	43%	3	43%	0,20	-4,08	0,17	-3,81	0,17	-3,63	0,17	-3,50	0,17	-3,40
5	7	1,4	3	60%	3	43%	1	14%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,17	-4,12	0,17	-3,80	0,17	-3,62
5	7	1,4	3	60%	2	29%	3	43%	0,20	-4,06	0,17	-3,79	0,17	-3,79	0,17	-3,79	0,17	-3,79
5	7	1,4	3	60%	2	29%	1	14%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,31	<-7	0,31	<-7	0,31	<-7
5	7	1,4	3	60%	1	14%	3	43%	0,20	-4,06	0,17	-3,79	0,17	-3,79	0,17	-3,79	0,17	-3,79
5	7	1,4	3	60%	1	14%	1	14%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	7	1,4	2	40%	5	71%	3	43%	0,31	-5,22	0,29	-4,95	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,31	-0,01
5	7	1,4	2	40%	5	71%	1	14%	0,51	<-7	0,51	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,31	-0,01
5	7	1,4	2	40%	4	57%	3	43%	0,17	-3,01	0,14	-2,65	0,00	-1,06	0,00	-0,59	-0,17	-0,21
5	7	1,4	2	40%	4	57%	1	14%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,60	-0,17	-0,22
5	7	1,4	2	40%	3	43%	3	43%	0,03	-2,02	0,00	-1,56	0,00	-1,28	0,00	-1,06	-0,03	-0,87
5	7	1,4	2	40%	3	43%	1	14%	0,23	-4,91	0,23	-4,91	0,00	-1,67	0,00	-1,29	-0,03	-1,02
5	7	1,4	2	40%	2	29%	3	43%	0,03	-1,78	-0,03	-1,27	-0,03	-1,26	-0,03	-1,25	-0,03	-1,24
5	7	1,4	2	40%	2	29%	1	14%	0,20	-4,42	0,20	-4,42	0,11	-3,24	0,11	-2,94	0,11	-2,76
5	7	1,4	2	40%	1	14%	3	43%	0,03	-1,76	-0,03	-1,25	-0,03	-1,25	-0,03	-1,25	-0,03	-1,25
5	7	1,4	2	40%	1	14%	1	14%	0,20	-4,33	0,20	-4,33	0,20	-4,33	0,20	-4,32	0,20	-4,32
5	7	1,4	1	20%	5	71%	3	43%	0,31	-5,20	0,29	-4,92	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,51	0,00
5	7	1,4	1	20%	5	71%	1	14%	0,51	<-7	0,51	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,51	0,00
5	7	1,4	1	20%	3	43%	3	43%	0,03	-1,56	0,00	-1,02	0,00	-0,66	0,00	-0,36	-0,23	-0,05
5	7	1,4	1	20%	3	43%	1	14%	0,23	-3,98	0,23	-3,97	0,00	-0,99	0,00	-0,50	-0,23	-0,08
5	7	1,4	1	20%	2	29%	3	43%	0,03	-1,00	-0,14	-0,32	-0,14	-0,27	-0,14	-0,21	-0,23	-0,15
5	7	1,4	1	20%	2	29%	1	14%	0,09	-2,50	0,09	-2,48	0,00	-1,34	0,00	-0,93	-0,09	-0,61
5	7	1,4	1	20%	1	14%	3	43%	0,03	-0,90	-0,23	-0,17	-0,23	-0,17	-0,23	-0,17	-0,23	-0,16
5	7	1,4	1	20%	1	14%	1	14%	0,00	-1,92	0,00	-1,87	0,00	-1,82	0,00	-1,77	0,00	-1,71

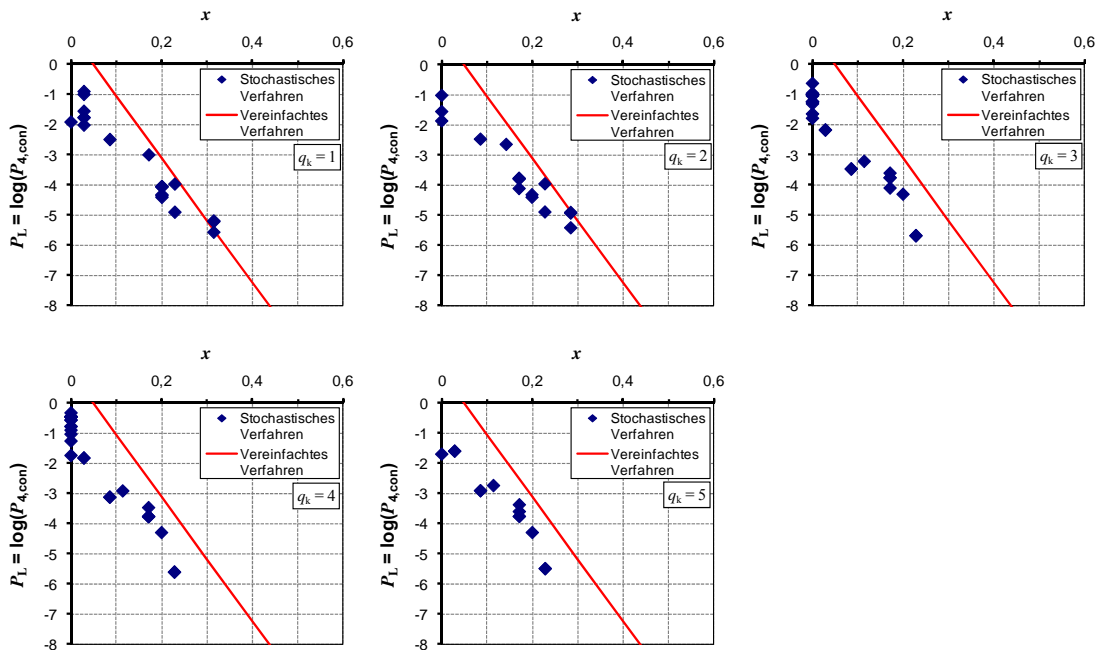


Bild C.50: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Tabelle C.56: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = 6$ und $s_{max} = 9$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{min}	s_{max}	s_{max}/s_{min}	n_F	n_F/s_{min}	n_S	n_S/s_{max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	9	1,5	5	83%	7	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,06	-3,17	0,06	-2,83	0,06	-2,61
6	9	1,5	5	83%	7	78%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,06	-3,17	0,06	-2,83	0,06	-2,61
6	9	1,5	5	83%	7	78%	2	22%	0,67	<-7	0,61	<-7	0,06	-3,17	0,06	-2,83	0,06	-2,61
6	9	1,5	5	83%	5	56%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	2	22%	0,67	<-7	0,61	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	2	22%	0,67	<-7	0,61	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	2	22%	0,67	<-7	0,61	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	4	67%	7	78%	4	44%	0,28	-5,44	0,28	-5,44	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	7	78%	2	22%	0,61	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	4	44%	4	44%	0,17	-3,83	0,17	-3,82	0,11	-3,22	0,11	-2,98	0,11	-2,82
6	9	1,5	4	67%	5	56%	3	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,11	-3,36	0,11	-3,05	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	5	56%	2	22%	0,50	<-7	0,44	<-7	0,11	-3,36	0,11	-3,05	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	4	44%	4	44%	0,17	-3,77	0,17	-3,76	0,17	-3,74	0,17	-3,73	0,17	-3,72
6	9	1,5	4	67%	4	44%	3	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,22	-5,27	0,22	-5,00	0,22	-4,89
6	9	1,5	4	67%	4	44%	2	22%	0,50	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,30	0,22	-5,01	0,22	-4,90
6	9	1,5	4	67%	3	33%	4	44%	0,17	-3,76	0,17	-3,75	0,17	-3,75	0,17	-3,75	0,17	-3,75
6	9	1,5	4	67%	3	33%	3	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,33	-6,48
6	9	1,5	4	67%	3	33%	2	22%	0,50	<-7	0,44	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	3	50%	7	78%	4	44%	0,28	-5,05	0,28	-5,05	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	2	22%	0,61	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	5	56%	4	44%	0,06	-1,98	0,06	-1,94	0,00	-1,27	0,00	-0,94	-0,06	-0,68
6	9	1,5	3	50%	5	56%	3	33%	0,22	-4,48	0,22	-4,44	0,00	-1,39	0,00	-0,99	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	5	56%	2	22%	0,39	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,39	0,00	-0,99	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	4	44%	4	44%	0,00	-1,62	0,00	-1,55	0,00	-1,49	0,00	-1,42	0,00	-1,36
6	9	1,5	3	50%	4	44%	3	33%	0,17	-3,80	0,17	-3,71	0,06	-2,40	0,06	-2,08	0,06	-1,88
6	9	1,5	3	50%	4	44%	2	22%	0,33	<-7	0,28	<-7	0,06	-2,43	0,06	-2,09	0,06	-1,88
6	9	1,5	3	50%	3	33%	4	44%	0,00	-1,57	0,00	-1,49	0,00	-1,49	0,00	-1,49	0,00	-1,48
6	9	1,5	3	50%	3	33%	3	33%	0,17	-3,65	0,17	-3,56	0,17	-3,48	0,17	-3,40	0,17	-3,34
6	9	1,5	3	50%	3	33%	2	22%	0,33	<-7	0,28	<-7	0,17	-4,23	0,17	-3,93	0,17	-3,75
6	9	1,5	3	50%	2	22%	4	44%	0,00	-1,57	0,00	-1,49	0,00	-1,49	0,00	-1,49	0,00	-1,49
6	9	1,5	3	50%	2	22%	3	33%	0,17	-3,65	0,17	-3,55	0,17	-3,55	0,17	-3,55	0,17	-3,55
6	9	1,5	3	50%	2	22%	2	22%	0,33	<-7	0,28	<-7	0,28	-6,48	0,28	-6,48	0,28	-6,18
6	9	1,5	2	33%	4	44%	4	44%	-0,06	-0,87	-0,06	-0,71	-0,06	-0,54	-0,06	-0,38	-0,17	-0,21
6	9	1,5	2	33%	4	44%	3	33%	0,11	-2,42	0,11	-2,24	0,00	-1,08	0,00	-0,67	-0,11	-0,36
6	9	1,5	2	33%	4	44%	2	22%	0,28	-5,63	0,22	-5,03	0,00	-1,12	0,00	-0,69	-0,11	-0,37
6	9	1,5	2	33%	3	33%	4	44%	-0,06	-0,63	-0,17	-0,39	-0,17	-0,37	-0,17	-0,35	-0,17	-0,33
6	9	1,5	2	33%	3	33%	3	33%	0,00	-1,80	0,00	-1,54	0,00	-1,35	0,00	-1,18	0,00	-1,04
6	9	1,5	2	33%	3	33%	2	22%	0,17	-4,55	0,11	-3,83	0,00	-1,85	0,00	-1,49	0,00	-1,25
6	9	1,5	2	33%	2	22%	4	44%	-0,06	-0,60	-0,17	-0,34	-0,17	-0,34	-0,17	-0,34	-0,17	-0,34
6	9	1,5	2	33%	2	22%	3	33%	0,00	-1,65	0,00	-1,36	0,00	-1,35	0,00	-1,35	0,00	-1,34
6	9	1,5	2	33%	2	22%	2	22%	0,17	-4,17	0,11	-3,42	0,11	-3,17	0,11	-2,99	0,11	-2,85

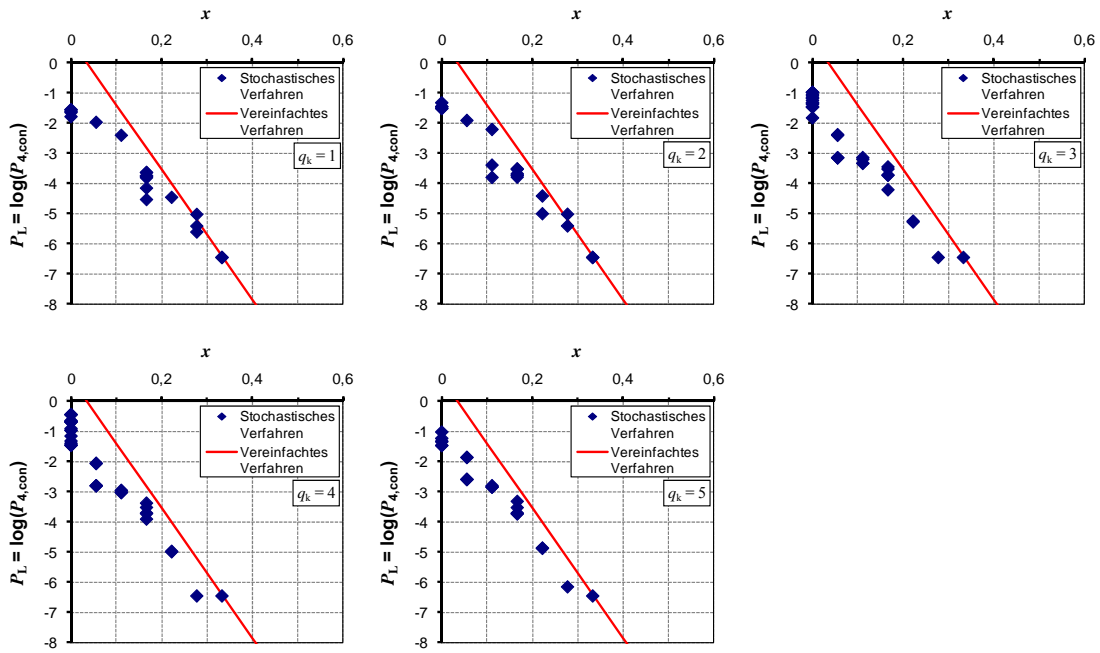


Bild C.51: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{min} = 6$ und $s_{max} = 9$ Spanngliedern

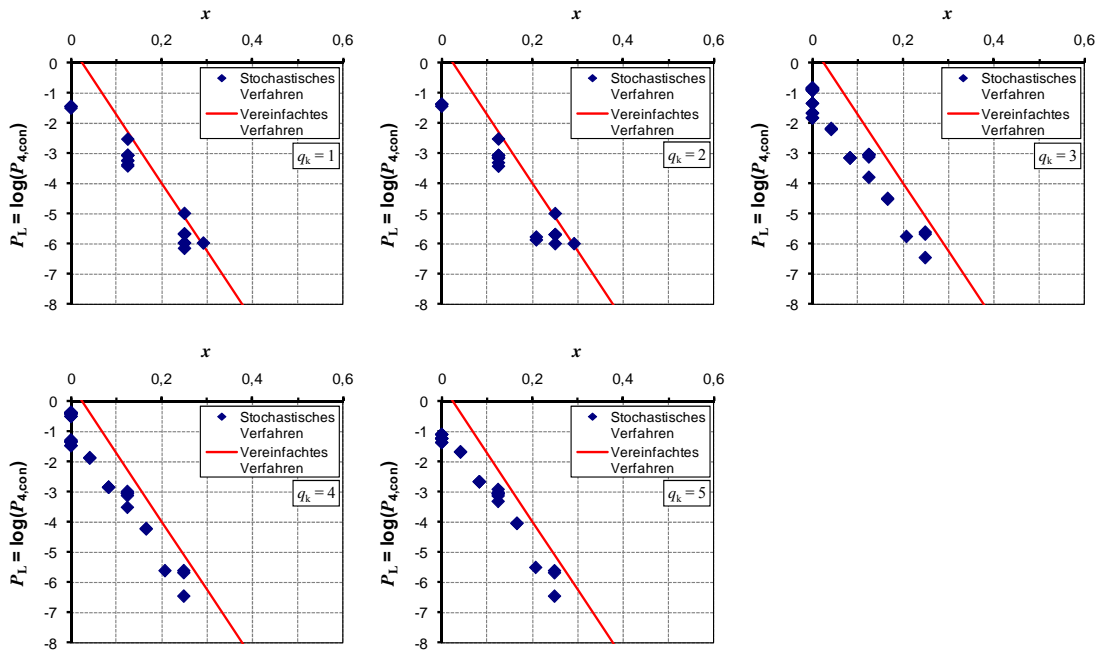


Bild C.52: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{min} = 8$ und $s_{max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.57: Untersuchte Szenarien mit $s_{min} = 8$ und $s_{max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{min}	s_{max}	s_{max} / s_{min}	n_F	n_F / s_{min}	n_S	n_S / s_{max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	12	1,5	6	75%	9	75%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	9	75%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	8	67%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,08	-3,17	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	8	67%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-3,17	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	8	67%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,08	-3,17	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	6	50%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	6	75%	6	50%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	6	75%	6	50%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7
8	12	1,5	4	50%	9	75%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	8	67%	4	33%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	8	67%	2	17%	0,54	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	6	50%	4	33%	0,13	-3,44	0,13	-3,43	0,00	-1,68	0,00	-1,33	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	6	50%	3	25%	0,25	-6,00	0,25	-6,00	0,00	-1,69	0,00	-1,34	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	6	50%	2	17%	0,38	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,34	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	4	33%	4	33%	0,13	-3,09	0,13	-3,07	0,13	-3,06	0,13	-3,04	0,13	-3,03
8	12	1,5	4	50%	4	33%	3	25%	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,17	-4,51	0,17	-4,23	0,17	-4,05
8	12	1,5	4	50%	4	33%	2	17%	0,38	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,54	0,17	-4,25	0,17	-4,06
8	12	1,5	4	50%	3	25%	4	33%	0,13	-3,08	0,13	-3,07	0,13	-3,07	0,13	-3,07	0,13	-3,07
8	12	1,5	4	50%	3	25%	3	25%	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,63	0,25	-5,63	0,25	-5,63
8	12	1,5	4	50%	3	25%	2	17%	0,38	<-7	0,33	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	4	50%	2	17%	4	33%	0,13	-3,08	0,13	-3,07	0,13	-3,07	0,13	-3,07	0,13	-3,07
8	12	1,5	4	50%	2	17%	3	25%	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70
8	12	1,5	4	50%	2	17%	2	17%	0,38	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
8	12	1,5	3	38%	9	75%	4	33%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	2	17%	0,63	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	4	33%	0,29	-6,00	0,29	-6,00	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	2	17%	0,54	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	6	50%	4	33%	0,13	-2,55	0,13	-2,53	0,00	-0,93	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	3	25%	0,25	-5,01	0,25	-5,00	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	2	17%	0,38	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	4	33%	4	33%	0,00	-1,52	0,00	-1,44	0,00	-1,36	0,00	-1,29	0,00	-1,22
8	12	1,5	3	38%	4	33%	3	25%	0,13	-3,40	0,13	-3,31	0,04	-2,19	0,04	-1,88	0,04	-1,67
8	12	1,5	3	38%	4	33%	2	17%	0,25	<-7	0,21	<-7	0,04	-2,23	0,04	-1,90	0,04	-1,68
8	12	1,5	3	38%	3	25%	4	33%	0,00	-1,46	0,00	-1,37	0,00	-1,37	0,00	-1,37	0,00	-1,36
8	12	1,5	3	38%	3	25%	3	25%	0,13	-3,27	0,13	-3,16	0,13	-3,07	0,13	-3,00	0,13	-2,93
8	12	1,5	3	38%	3	25%	2	17%	0,25	-6,18	0,21	-5,88	0,13	-3,82	0,13	-3,53	0,13	-3,33
8	12	1,5	3	38%	2	17%	4	33%	0,00	-1,46	0,00	-1,37	0,00	-1,37	0,00	-1,37	0,00	-1,37
8	12	1,5	3	38%	2	17%	3	25%	0,13	-3,25	0,13	-3,14	0,13	-3,14	0,13	-3,14	0,13	-3,14
8	12	1,5	3	38%	2	17%	2	17%	0,25	-6,00	0,21	-5,78	0,21	-5,78	0,21	-5,63	0,21	-5,52

Tabelle C.58: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	15	1,5	8	80%	12	80%	4	27%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,82	0,00	-1,46	0,00	-1,21
10	15	1,5	8	80%	12	80%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,82	0,00	-1,46	0,00	-1,21
10	15	1,5	8	80%	12	80%	2	13%	0,70	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,82	0,00	-1,46	0,00	-1,21
10	15	1,5	8	80%	10	67%	4	27%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,13	-4,83	0,13	-4,51	0,13	-4,34
10	15	1,5	8	80%	10	67%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,13	-4,83	0,13	-4,51	0,13	-4,34
10	15	1,5	8	80%	10	67%	2	13%	0,70	<-7	0,67	<-7	0,13	-4,83	0,13	-4,51	0,13	-4,34
10	15	1,5	8	80%	8	53%	4	27%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	2	13%	0,70	<-7	0,67	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	6	60%	12	80%	4	27%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	12	80%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	12	80%	2	13%	0,70	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	10	67%	4	27%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	2	13%	0,57	<-7	0,53	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	8	53%	4	27%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,07	-2,60	0,07	-2,28	0,07	-2,09
10	15	1,5	6	60%	8	53%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,07	-2,60	0,07	-2,28	0,07	-2,09
10	15	1,5	6	60%	8	53%	2	13%	0,50	<-7	0,47	<-7	0,07	-2,60	0,07	-2,28	0,07	-2,09
10	15	1,5	6	60%	6	40%	4	27%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,78	0,20	-5,36	0,20	-5,25
10	15	1,5	6	60%	6	40%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,78	0,20	-5,36	0,20	-5,25
10	15	1,5	6	60%	6	40%	2	13%	0,50	<-7	0,47	<-7	0,20	-5,78	0,20	-5,36	0,20	-5,25
10	15	1,5	4	40%	10	67%	4	27%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	2	13%	0,57	<-7	0,53	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	8	53%	4	27%	0,23	-4,90	0,23	-4,90	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,11
10	15	1,5	4	40%	8	53%	3	20%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,11
10	15	1,5	4	40%	8	53%	2	13%	0,43	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,11
10	15	1,5	4	40%	6	40%	4	27%	0,10	-3,15	0,10	-3,13	0,00	-1,60	0,00	-1,26	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	6	40%	3	20%	0,20	-5,70	0,20	-5,63	0,00	-1,62	0,00	-1,27	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	6	40%	2	13%	0,30	<-7	0,27	<-7	0,00	-1,62	0,00	-1,27	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	3	20%	4	27%	0,10	-2,83	0,10	-2,81	0,10	-2,81	0,10	-2,81	0,10	-2,81
10	15	1,5	4	40%	3	20%	3	20%	0,20	-5,22	0,20	-5,20	0,20	-5,20	0,20	-5,18	0,20	-5,12
10	15	1,5	4	40%	3	20%	2	13%	0,30	<-7	0,27	<-7	0,20	<-7	0,20	-6,48	0,20	-5,88

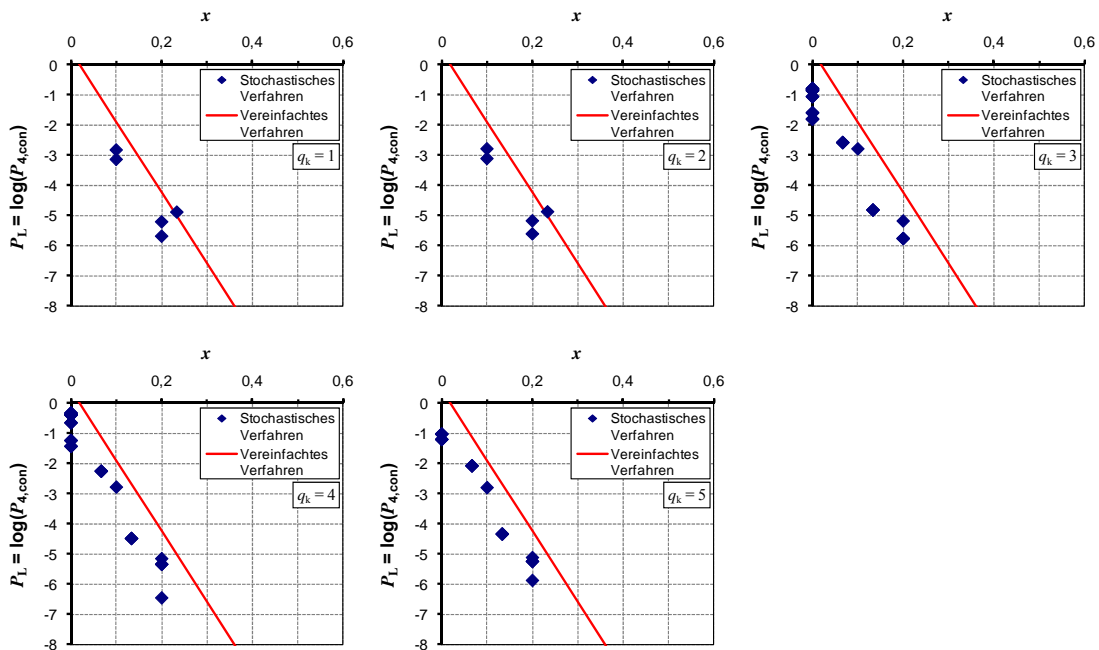


Bild C.53: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

C.5.3 Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert

Tabelle C.59: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	8	2,0	3	75%	6	75%	3	38%	0,25	-5,88	0,25	-5,88	0,00	-2,40	0,00	-2,03	0,00	-1,77
4	8	2,0	3	75%	6	75%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,40	0,00	-2,03	0,00	-1,77
4	8	2,0	3	75%	4	50%	3	38%	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,33	0,25	-5,27
4	8	2,0	3	75%	4	50%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,00
4	8	2,0	3	75%	3	38%	3	38%	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36
4	8	2,0	3	75%	3	38%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	3	75%	2	25%	3	38%	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36
4	8	2,0	3	75%	2	25%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	3	75%	1	13%	3	38%	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36	0,25	-5,36
4	8	2,0	3	75%	1	13%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	2	50%	6	75%	3	38%	0,25	-3,95	0,25	-3,95	0,00	-1,05	0,00	-0,53	0,00	-0,25
4	8	2,0	2	50%	6	75%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,53	0,00	-0,25
4	8	2,0	2	50%	4	50%	3	38%	0,00	-1,89	0,00	-1,89	0,00	-1,67	0,00	-1,50	0,00	-1,34
4	8	2,0	2	50%	4	50%	1	13%	0,25	-5,12	0,25	-5,12	0,00	-2,12	0,00	-1,76	0,00	-1,52
4	8	2,0	2	50%	3	38%	3	38%	0,00	-1,77	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,75	0,00	-1,74
4	8	2,0	2	50%	3	38%	1	13%	0,25	-4,85	0,25	-4,85	0,13	-3,68	0,13	-3,37	0,13	-3,18
4	8	2,0	2	50%	2	25%	3	38%	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,76
4	8	2,0	2	50%	2	25%	1	13%	0,25	-4,83	0,25	-4,83	0,25	-4,82	0,25	-4,81	0,25	-4,80
4	8	2,0	2	50%	1	13%	3	38%	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,76	0,00	-1,76
4	8	2,0	2	50%	1	13%	1	13%	0,25	-4,83	0,25	-4,83	0,25	-4,83	0,25	-4,83	0,25	-4,83
4	8	2,0	1	25%	6	75%	3	38%	0,25	-3,88	0,25	-3,88	0,00	-1,01	0,00	-0,47	0,00	0,00
4	8	2,0	1	25%	6	75%	1	13%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	0,00	0,00
4	8	2,0	1	25%	4	50%	3	38%	0,00	-1,14	0,00	-1,13	0,00	-0,72	0,00	-0,39	0,00	-0,08
4	8	2,0	1	25%	4	50%	1	13%	0,25	-3,79	0,25	-3,79	0,00	-0,97	0,00	-0,49	0,00	-0,10
4	8	2,0	1	25%	3	38%	3	38%	-0,13	-0,62	-0,13	-0,55	-0,13	-0,46	-0,13	-0,37	-0,25	-0,25
4	8	2,0	1	25%	3	38%	1	13%	0,13	-2,57	0,13	-2,57	0,00	-1,25	0,00	-0,84	0,00	-0,52
4	8	2,0	1	25%	2	25%	3	38%	-0,13	-0,48	-0,25	-0,35	-0,25	-0,34	-0,25	-0,34	-0,25	-0,33
4	8	2,0	1	25%	2	25%	1	13%	0,00	-2,01	0,00	-2,01	0,00	-1,80	0,00	-1,63	0,00	-1,47
4	8	2,0	1	25%	1	13%	3	38%	-0,13	-0,47	-0,25	-0,33	-0,25	-0,33	-0,25	-0,33	-0,25	-0,33
4	8	2,0	1	25%	1	13%	1	13%	0,00	-1,90	0,00	-1,89	0,00	-1,89	0,00	-1,89	0,00	-1,89

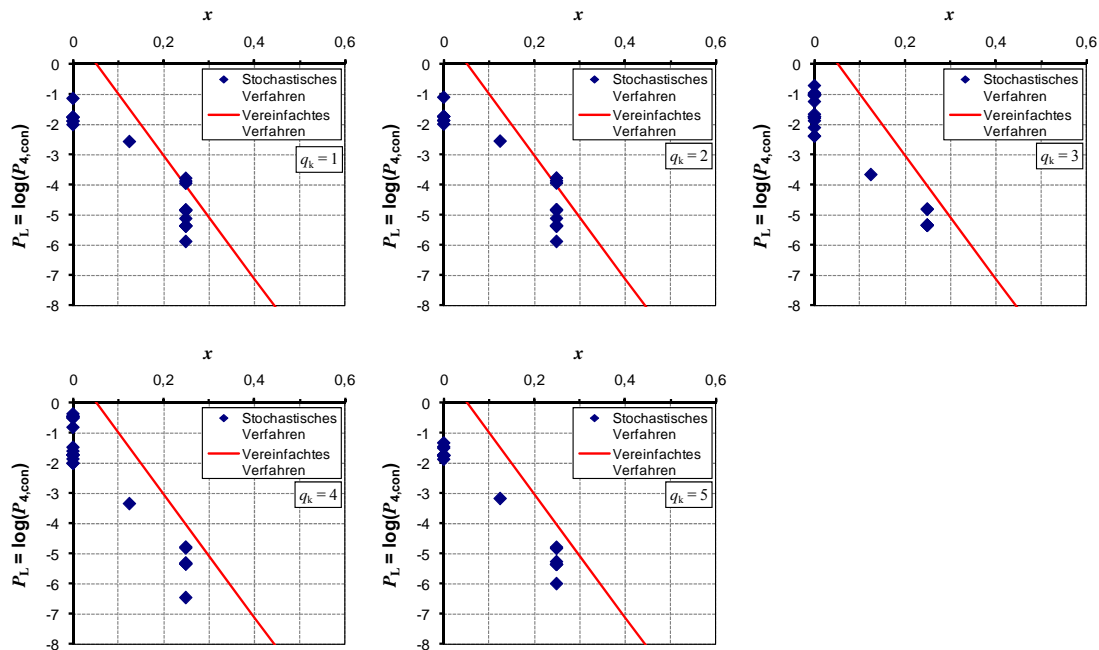


Bild C.54: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Tabelle C.60: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	10	2,0	4	80%	8	80%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,36	0,00	-1,99	0,00	-1,73
5	10	2,0	4	80%	8	80%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-2,36	0,00	-1,99	0,00	-1,73
5	10	2,0	4	80%	6	60%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-6,48	0,20	-5,88	0,20	-5,78
5	10	2,0	4	80%	6	60%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,20	-6,48	0,20	-5,88	0,20	-5,78
5	10	2,0	4	80%	4	40%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	4	40%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	3	30%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	3	30%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
5	10	2,0	4	80%	2	20%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	2	20%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
5	10	2,0	3	60%	8	80%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,04	0,00	-0,52	-0,20	-0,10
5	10	2,0	3	60%	8	80%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,04	0,00	-0,52	-0,20	-0,10
5	10	2,0	3	60%	6	60%	3	30%	0,20	-4,46	0,20	-4,46	0,00	-2,02	0,00	-1,66	0,00	-1,42
5	10	2,0	3	60%	6	60%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-2,02	0,00	-1,67	0,00	-1,43
5	10	2,0	3	60%	4	40%	3	30%	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,04	0,20	-4,03	0,20	-4,01
5	10	2,0	3	60%	4	40%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,30	0,20	-5,08	0,20	-4,95
5	10	2,0	3	60%	3	30%	3	30%	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07
5	10	2,0	3	60%	3	30%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	3	60%	2	20%	3	30%	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07
5	10	2,0	3	60%	2	20%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	3	60%	1	10%	3	30%	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07	0,20	-4,07
5	10	2,0	3	60%	1	10%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	2	40%	8	80%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	8	80%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	6	60%	3	30%	0,20	-3,17	0,20	-3,17	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,20	-0,13
5	10	2,0	2	40%	6	60%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,20	-0,13
5	10	2,0	2	40%	4	40%	3	30%	0,00	-1,77	0,00	-1,76	0,00	-1,55	0,00	-1,38	0,00	-1,23
5	10	2,0	2	40%	4	40%	1	10%	0,20	-4,69	0,20	-4,69	0,00	-2,00	0,00	-1,64	0,00	-1,40
5	10	2,0	2	40%	3	30%	3	30%	0,00	-1,65	0,00	-1,64	0,00	-1,63	0,00	-1,62	0,00	-1,61
5	10	2,0	2	40%	3	30%	1	10%	0,20	-4,33	0,20	-4,33	0,10	-3,36	0,10	-3,07	0,10	-2,88
5	10	2,0	2	40%	2	20%	3	30%	0,00	-1,64	0,00	-1,63	0,00	-1,63	0,00	-1,63	0,00	-1,63
5	10	2,0	2	40%	2	20%	1	10%	0,20	-4,31	0,20	-4,31	0,20	-4,29	0,20	-4,26	0,20	-4,25
5	10	2,0	2	40%	1	10%	3	30%	0,00	-1,64	0,00	-1,63	0,00	-1,63	0,00	-1,63	0,00	-1,63
5	10	2,0	2	40%	1	10%	1	10%	0,20	-4,31	0,20	-4,31	0,20	-4,31	0,20	-4,31	0,20	-4,31
5	10	2,0	1	20%	8	80%	3	30%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,60	0,00
5	10	2,0	1	20%	8	80%	1	10%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,60	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	3	30%	0,20	-3,09	0,20	-3,09	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	1	10%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	3	30%	3	30%	-0,10	-0,64	-0,10	-0,56	-0,10	-0,47	-0,10	-0,37	-0,20	-0,26
5	10	2,0	1	20%	3	30%	1	10%	0,10	-2,46	0,10	-2,45	0,00	-1,23	0,00	-0,83	-0,10	-0,53
5	10	2,0	1	20%	2	20%	3	30%	-0,10	-0,50	-0,20	-0,37	-0,20	-0,36	-0,20	-0,35	-0,20	-0,34
5	10	2,0	1	20%	2	20%	1	10%	0,00	-1,96	0,00	-1,96	0,00	-1,75	0,00	-1,58	0,00	-1,42
5	10	2,0	1	20%	1	10%	3	30%	-0,10	-0,48	-0,20	-0,35	-0,20	-0,35	-0,20	-0,35	-0,20	-0,35
5	10	2,0	1	20%	1	10%	1	10%	0,00	-1,84	0,00	-1,84	0,00	-1,84	0,00	-1,83	0,00	-1,83

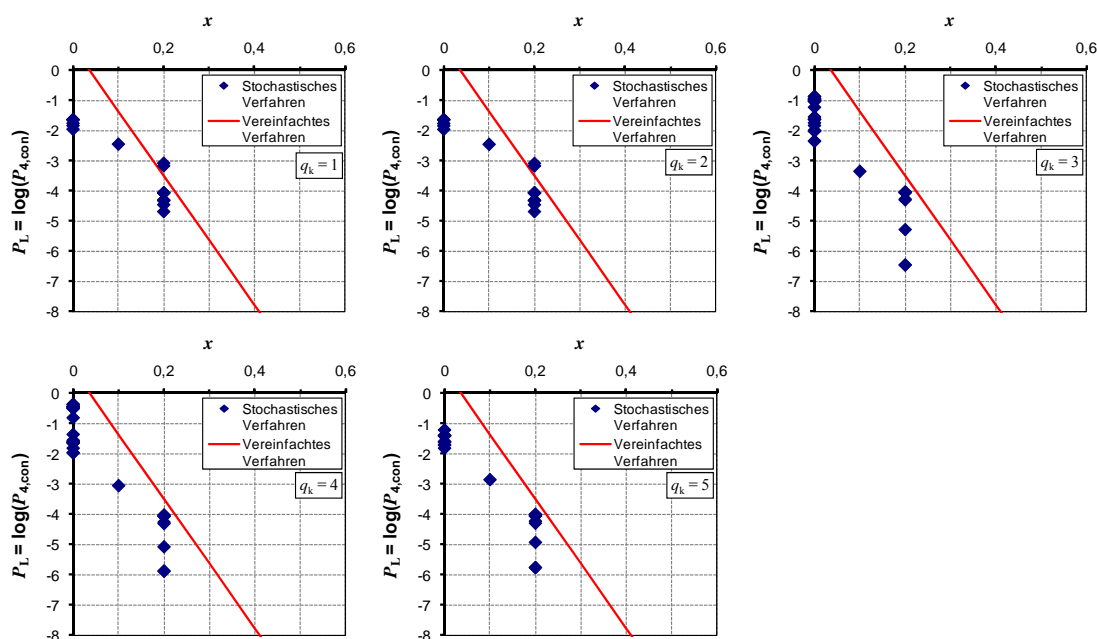


Bild C.55: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Tabelle C.61: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennulpp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	12	2,0	5	83%	10	83%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,96	0,00	-1,70
6	12	2,0	5	83%	10	83%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,96	0,00	-1,70
6	12	2,0	5	83%	10	83%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,96	0,00	-1,70
6	12	2,0	5	83%	8	67%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-6,18	0,17	-5,88	0,17	-5,78
6	12	2,0	5	83%	8	67%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-6,18	0,17	-5,88	0,17	-5,78
6	12	2,0	5	83%	8	67%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,17	-6,18	0,17	-5,88	0,17	-5,78
6	12	2,0	5	83%	6	50%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	4	33%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	5	83%	4	33%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	5	83%	4	33%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	4	67%	10	83%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,10
6	12	2,0	4	67%	10	83%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,10
6	12	2,0	4	67%	10	83%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,10
6	12	2,0	4	67%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,97	0,00	-1,61	0,00	-1,37
6	12	2,0	4	67%	8	67%	3	25%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,97	0,00	-1,61	0,00	-1,37
6	12	2,0	4	67%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,97	0,00	-1,61	0,00	-1,37
6	12	2,0	4	67%	6	50%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-5,01	0,17	-4,69	0,17	-4,55
6	12	2,0	4	67%	6	50%	3	25%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-5,01	0,17	-4,69	0,17	-4,55
6	12	2,0	4	67%	6	50%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-5,01	0,17	-4,69	0,17	-4,55
6	12	2,0	4	67%	4	33%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	4	33%	3	25%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	4	33%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	3	50%	8	67%	4	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,17	-0,14
6	12	2,0	3	50%	8	67%	3	25%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,17	-0,14
6	12	2,0	3	50%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,17	-0,14
6	12	2,0	3	50%	6	50%	4	33%	0,17	-3,92	0,17	-3,91	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,30
6	12	2,0	3	50%	6	50%	3	25%	0,17	-3,92	0,17	-3,92	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,30
6	12	2,0	3	50%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
6	12	2,0	3	50%	4	33%	4	33%	0,17	-3,64	0,17	-3,60	0,17	-3,57	0,17	-3,54	0,17	-3,50
6	12	2,0	3	50%	4	33%	3	25%	0,17	-3,64	0,17	-3,64	0,17	-3,61	0,17	-3,57	0,17	-3,53
6	12	2,0	3	50%	4	33%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,76	0,17	-4,44	0,17	-4,22
6	12	2,0	3	50%	2	17%	4	33%	0,17	-3,63	0,17	-3,59	0,17	-3,59	0,17	-3,59	0,17	-3,59
6	12	2,0	3	50%	2	17%	3	25%	0,17	-3,63	0,17	-3,63	0,17	-3,63	0,17	-3,63	0,17	-3,63
6	12	2,0	3	50%	2	17%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	2	33%	8	67%	4	33%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	8	67%	3	25%	0,33	-6,48	0,33	-6,48	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	6	50%	4	33%	0,17	-2,87	0,17	-2,82	0,00	-0,91	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	6	50%	3	25%	0,17	-2,87	0,17	-2,87	0,00	-0,91	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	6	50%	2	17%	0,33	-6,18	0,33	-6,18	0,00	-0,92	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	4	33%	4	33%	0,00	-1,73	0,00	-1,53	0,00	-1,37	0,00	-1,24	0,00	-1,11
6	12	2,0	2	33%	4	33%	3	25%	0,00	-1,70	0,00	-1,70	0,00	-1,49	0,00	-1,32	0,00	-1,18
6	12	2,0	2	33%	4	33%	2	17%	0,17	-4,43	0,17	-4,42	0,00	-1,93	0,00	-1,58	0,00	-1,35
6	12	2,0	2	33%	2	17%	4	33%	0,00	-1,62	0,00	-1,39	0,00	-1,39	0,00	-1,39	0,00	-1,39
6	12	2,0	2	33%	2	17%	3	25%	0,00	-1,58	0,00	-1,57	0,00	-1,57	0,00	-1,57	0,00	-1,57
6	12	2,0	2	33%	2	17%	2	17%	0,17	-4,10	0,17	-4,08	0,17	-4,05	0,17	-4,03	0,17	-4,01

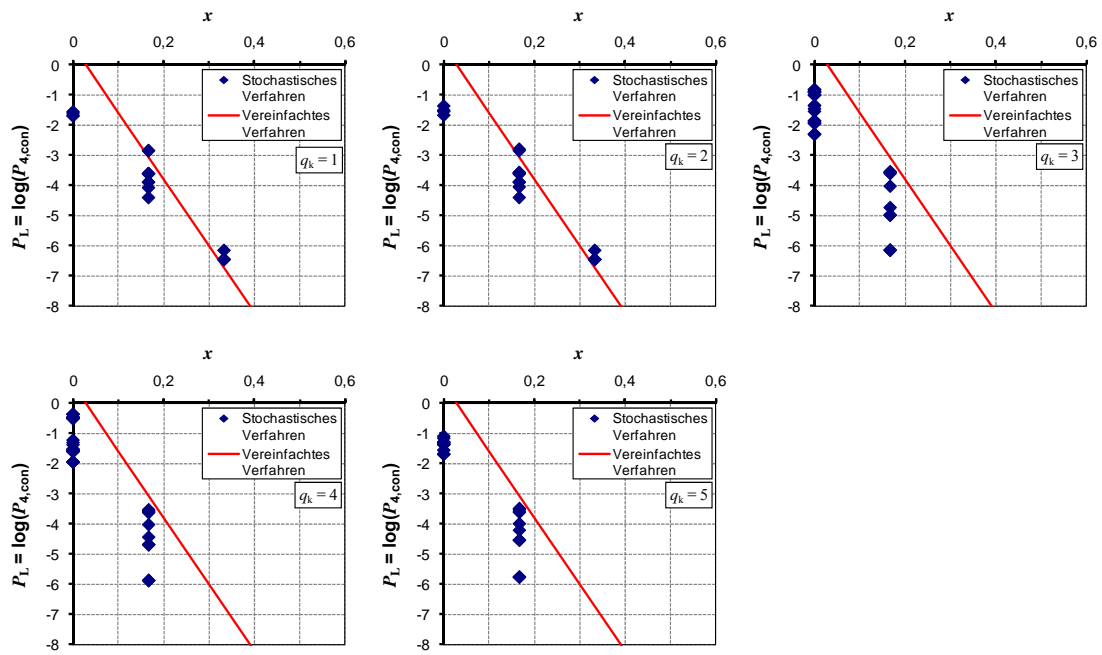


Bild C.56: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.62: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennulpp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	14	2,0	5	71%	11	79%	4	29%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,24	0,00	-0,83	-0,07	-0,52
7	14	2,0	5	71%	11	79%	3	21%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,24	0,00	-0,83	-0,07	-0,52
7	14	2,0	5	71%	11	79%	2	14%	0,64	<-7	0,64	<-7	0,00	-1,24	0,00	-0,83	-0,07	-0,52
7	14	2,0	5	71%	8	57%	4	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-4,70	0,14	-4,35	0,14	-4,16
7	14	2,0	5	71%	8	57%	3	21%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-4,70	0,14	-4,35	0,14	-4,16
7	14	2,0	5	71%	8	57%	2	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-4,70	0,14	-4,35	0,14	-4,16
7	14	2,0	5	71%	4	29%	4	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	5	71%	4	29%	3	21%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	5	71%	4	29%	2	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	4	57%	11	79%	4	29%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,21	-0,02
7	14	2,0	4	57%	11	79%	3	21%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,21	-0,02
7	14	2,0	4	57%	11	79%	2	14%	0,64	<-7	0,64	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,21	-0,02
7	14	2,0	4	57%	8	57%	4	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,84	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	8	57%	3	21%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,84	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	8	57%	2	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,84	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	4	29%	4	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	4	57%	4	29%	3	21%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	4	57%	4	29%	2	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	3	43%	11	79%	4	29%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,36	0,00
7	14	2,0	3	43%	11	79%	3	21%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,36	0,00
7	14	2,0	3	43%	11	79%	2	14%	0,64	<-7	0,64	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,36	0,00
7	14	2,0	3	43%	8	57%	4	29%	0,29	-5,20	0,29	-5,20	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	3	21%	0,29	-5,20	0,29	-5,20	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	2	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	4	29%	4	29%	0,14	-3,40	0,14	-3,36	0,14	-3,32	0,14	-3,29	0,14	-3,25
7	14	2,0	3	43%	4	29%	3	21%	0,14	-3,40	0,14	-3,40	0,14	-3,36	0,14	-3,32	0,14	-3,29
7	14	2,0	3	43%	4	29%	2	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,14	-4,39	0,14	-4,12	0,14	-3,94

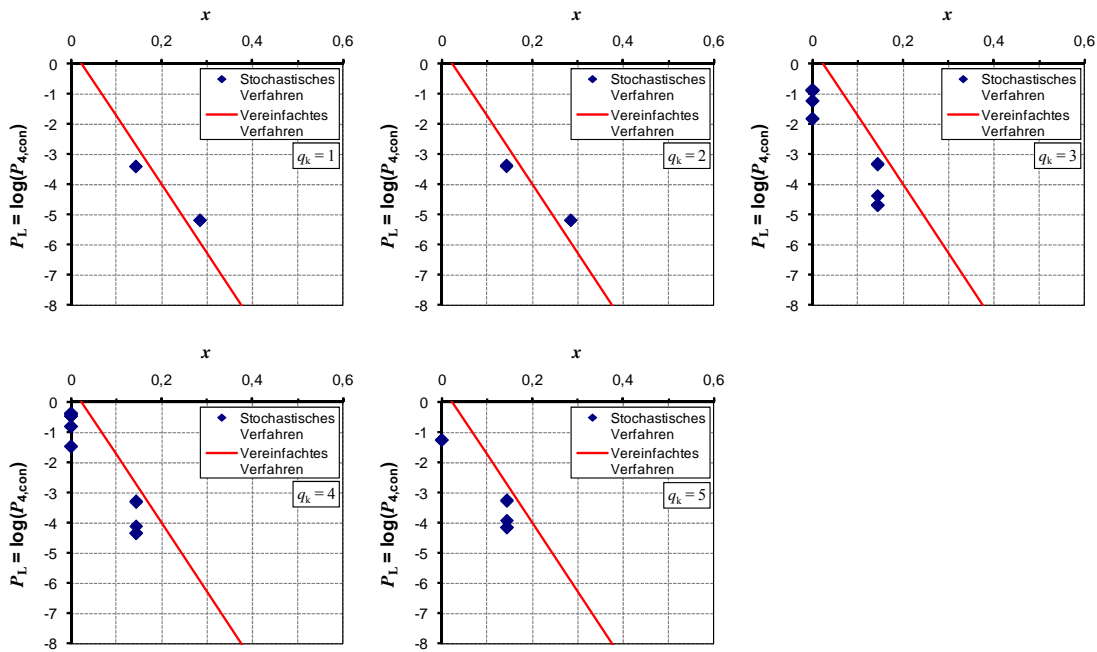


Bild C.57: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Tabelle C.63: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennulpp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	16	2,0	6	75%	12	75%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	12	75%	3	19%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	12	75%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	8	50%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	3	19%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	3	19%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	4	50%	12	75%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00
8	16	2,0	4	50%	12	75%	3	19%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00
8	16	2,0	4	50%	12	75%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00
8	16	2,0	4	50%	8	50%	4	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,42	0,00	-1,19
8	16	2,0	4	50%	8	50%	3	19%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,42	0,00	-1,19
8	16	2,0	4	50%	8	50%	2	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,77	0,00	-1,42	0,00	-1,19
8	16	2,0	4	50%	4	25%	4	25%	0,25	-5,78	0,25	-5,78	0,25	-5,78	0,25	-5,70	0,25	-5,70
8	16	2,0	4	50%	4	25%	3	19%	0,25	-5,78	0,25	-5,78	0,25	-5,78	0,25	-5,70	0,25	-5,70
8	16	2,0	4	50%	4	25%	2	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	16	2,0	3	38%	12	75%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,36	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	3	19%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,36	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,36	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	8	50%	4	25%	0,25	-4,92	0,25	-4,92	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	3	19%	0,25	-4,92	0,25	-4,92	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	2	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	4	25%	4	25%	0,13	-3,26	0,13	-3,26	0,13	-3,18	0,13	-3,15	0,13	-3,11
8	16	2,0	3	38%	4	25%	3	19%	0,13	-3,26	0,13	-3,26	0,13	-3,21	0,13	-3,18	0,13	-3,14
8	16	2,0	3	38%	4	25%	2	13%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,13	-4,27	0,13	-3,97	0,13	-3,79

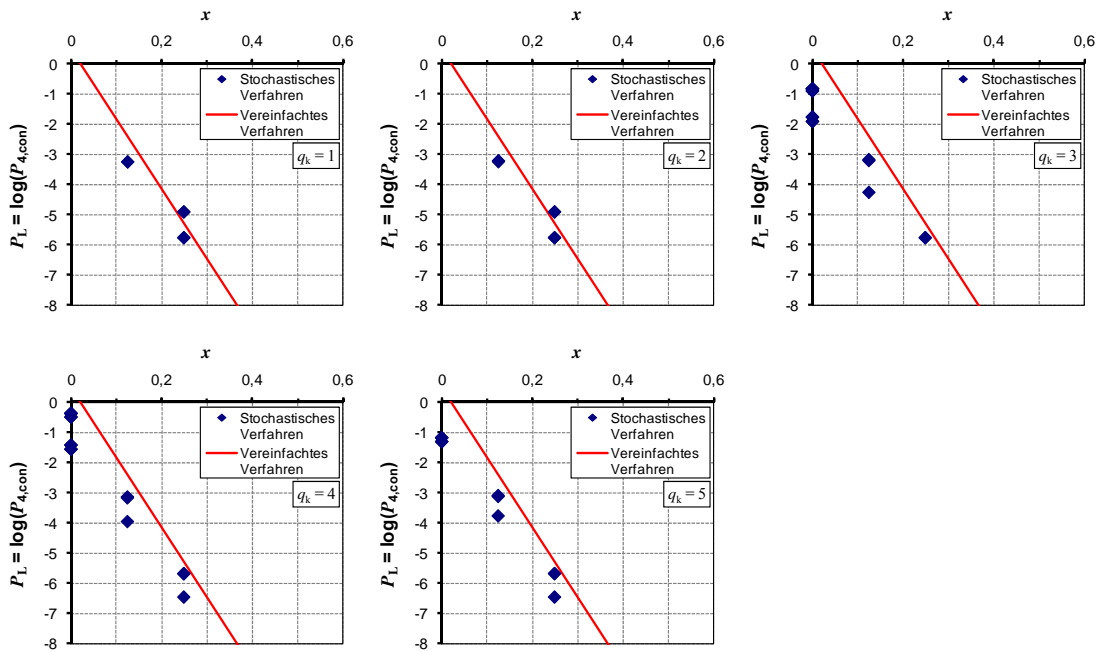


Bild C.58: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Tabelle C.64: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	18	2,0	7	78%	14	78%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	3	17%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	10	56%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	3	17%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	3	17%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	5	56%	14	78%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	3	17%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	4	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,38	0,00	-1,15
9	18	2,0	5	56%	10	56%	3	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,38	0,00	-1,15
9	18	2,0	5	56%	10	56%	2	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,38	0,00	-1,15
9	18	2,0	5	56%	6	33%	4	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	<-7	0,22	-6,48	0,22	-6,48
9	18	2,0	5	56%	6	33%	3	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	<-7	0,22	-6,48	0,22	-6,48
9	18	2,0	5	56%	6	33%	2	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	<-7	0,22	-6,48	0,22	-6,48
9	18	2,0	3	33%	14	78%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	3	17%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	10	56%	4	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	3	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	2	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	6	33%	4	22%	0,11	-3,44	0,11	-3,41	0,00	-1,74	0,00	-1,41	0,00	-1,18
9	18	2,0	3	33%	6	33%	3	17%	0,11	-3,44	0,11	-3,44	0,00	-1,74	0,00	-1,41	0,00	-1,18
9	18	2,0	3	33%	6	33%	2	11%	0,22	<-7	0,22	<-7	0,00	-1,75	0,00	-1,41	0,00	-1,19
9	18	2,0	3	33%	3	17%	4	22%	0,11	-3,15	0,11	-3,10	0,11	-3,10	0,11	-3,10	0,11	-3,10
9	18	2,0	3	33%	3	17%	3	17%	0,11	-3,15	0,11	-3,15	0,11	-3,15	0,11	-3,15	0,11	-3,15
9	18	2,0	3	33%	3	17%	2	11%	0,22	-6,18	0,22	-6,18	0,17	-5,70	0,17	-5,57	0,17	-5,52

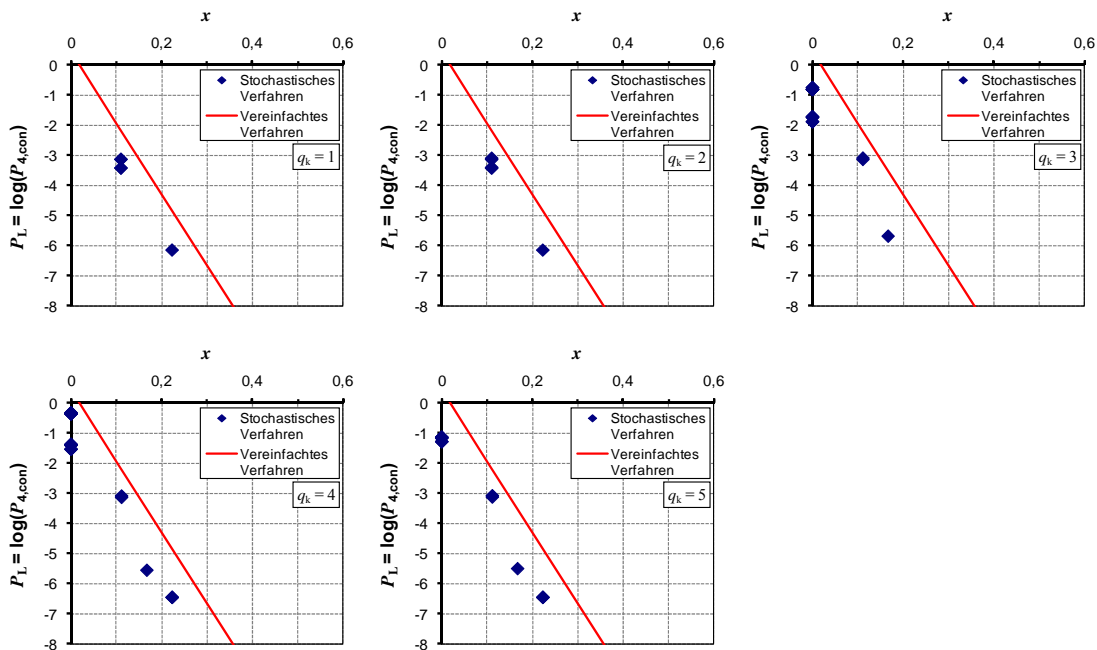


Bild C.59: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Tabelle C.65: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	20	2,0	8	80%	16	80%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,30
10	20	2,0	8	80%	16	80%	3	15%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,30
10	20	2,0	8	80%	16	80%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,30
10	20	2,0	8	80%	10	50%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	3	15%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	3	15%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	6	60%	16	80%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	3	15%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	10	50%	4	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-3,60	0,10	-3,29	0,10	-3,11
10	20	2,0	6	60%	10	50%	3	15%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-3,60	0,10	-3,29	0,10	-3,11
10	20	2,0	6	60%	10	50%	2	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-3,60	0,10	-3,29	0,10	-3,11
10	20	2,0	6	60%	4	20%	4	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	3	15%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	2	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	4	40%	12	60%	4	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	3	15%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	2	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	8	40%	4	20%	0,20	-5,57	0,20	-5,57	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	8	40%	3	15%	0,20	-5,57	0,20	-5,57	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	8	40%	2	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	4	20%	4	20%	0,20	-5,18	0,20	-5,18	0,20	-5,18	0,20	-5,18	0,20	-5,18
10	20	2,0	4	40%	4	20%	3	15%	0,20	-5,18	0,20	-5,18	0,20	-5,18	0,20	-5,18	0,20	-5,18
10	20	2,0	4	40%	4	20%	2	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	<-7	0,20	<-7	0,20	<-7

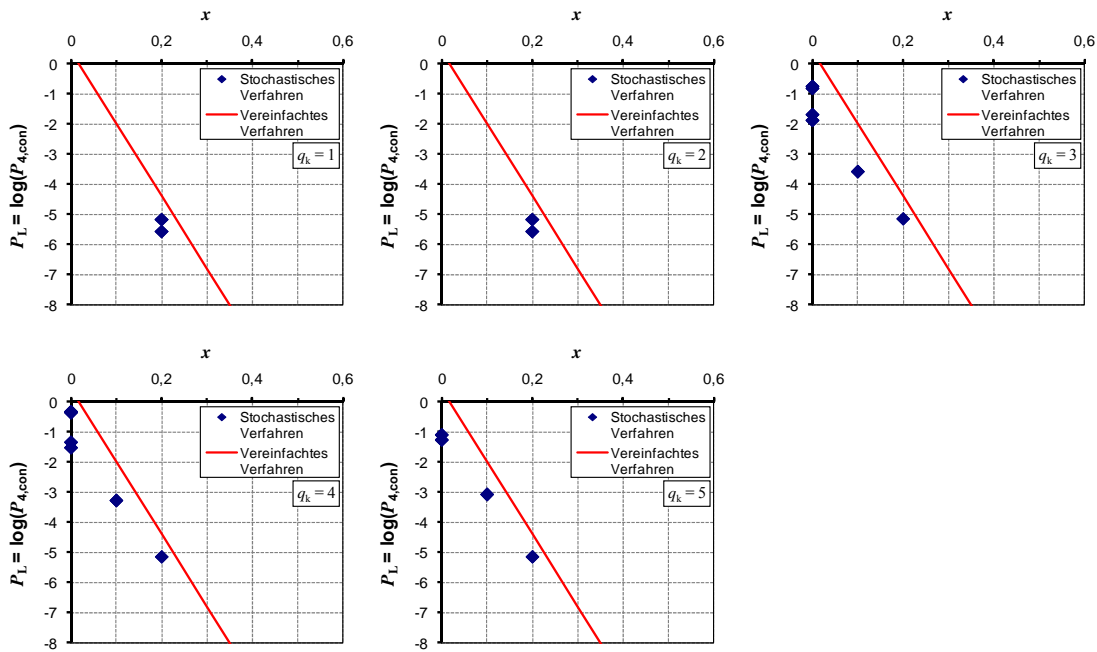


Bild C.60: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

C.6 Fünf Querschnitte mit vergrößerter Spanngliedanzahl

C.6.1 Allgemeines

Im Rahmen der Parametervariation werden die vorhandenen Spanngliedanzahlen, die Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie die erforderlichen Restspanngliedanzahlen in den Untersuchungsquerschnitten gemäß Tabelle C.66 angesetzt. Da $n_{br,i}$ in den Querschnitten mit Ankündigungsverhalten für die Berechnung nicht relevant ist, wird hier der Wert 0 eingesetzt. Entsprechend wird in den Querschnitten ohne Ankündigungsverhalten für $n_{cr,i} = 0$ angesetzt. Die Werte für s_{min} , s_{max} , n_{NP} , n_{St} und n_F sowie die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens sind in den nachfolgenden Tabellen angegeben. In den Diagrammen werden die Ergebnisse des stochastischen Verfahrens und des vereinfachten Verfahrens dargestellt.

Tabelle C.66: Ansatz der vorhandenen Spanngliedanzahlen, der Restspanngliedanzahlen bei Rissbildung sowie der erforderlichen Restspanngliedanzahlen in der Parametervariation mit $q_s = 5$ Querschnitten mit vergrößerter Spanngliedanzahl

Querschnitt	Vorhandene Spanngliedanzahl	Restspanngliedanzahl bei Rissbildung $n_{cr,i}$	Erforderliche Restspanngliedanzahl $n_{br,i}$
1	s_{max}	0	n_{NP}
2	s_{max}	n_{NP} bzw. 0 bei $q_k \geq 2$ *)	n_{NP} bei $q_k \geq 2$ bzw. 0 **)
3	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 3$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 3$ bzw. 0 **)
4	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k \geq 4$ *)	n_{St} bei $q_k \geq 4$ bzw. 0 **)
5	s_{max}	n_{St} bzw. 0 bei $q_k = 5$ *)	n_{St} bei $q_k = 5$ bzw. 0 **)
6	s_{min}	n_F	0
7	s_{min}	n_F	0
8	s_{min}	n_F	0
9	s_{min}	n_F	0
10	s_{min}	n_F	0
*) Querschnitte ohne Ankündigungsverhalten: $n_{cr} = 0$			
**) Querschnitte mit Ankündigungsverhalten: $n_{br} = 0$			
Anmerkung: Die Reihenfolge der Querschnitte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis			

C.6.2 Spanngliedanzahl um den Faktor 1,5 vergrößert

Tabelle C.67: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	6	1,5	3	75%	5	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,74	0,00	-1,24	-0,08	-0,83
4	6	1,5	3	75%	5	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,74	0,00	-1,24	-0,08	-0,83
4	6	1,5	3	75%	4	67%	3	50%	0,25	-6,48	0,25	-6,18	0,08	-3,32	0,08	-2,98	0,08	-2,77
4	6	1,5	3	75%	4	67%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,08	-3,32	0,08	-2,98	0,08	-2,77
4	6	1,5	3	75%	3	50%	3	50%	0,25	-6,18	0,25	-5,70	0,25	-5,36	0,25	-5,33	0,25	-5,27
4	6	1,5	3	75%	3	50%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,25	-5,63	0,25	-5,57	0,25	-5,48
4	6	1,5	3	75%	2	33%	3	50%	0,25	-6,18	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70
4	6	1,5	3	75%	2	33%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
4	6	1,5	3	75%	1	17%	3	50%	0,25	-6,18	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70	0,25	-5,70
4	6	1,5	3	75%	1	17%	1	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7
4	6	1,5	2	50%	5	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,63	-0,33	-0,02
4	6	1,5	2	50%	5	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,63	-0,33	-0,02
4	6	1,5	2	50%	4	67%	3	50%	0,17	-3,41	0,17	-3,09	0,00	-1,21	0,00	-0,73	-0,17	-0,33
4	6	1,5	2	50%	4	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,22	0,00	-0,73	-0,17	-0,33
4	6	1,5	2	50%	3	50%	3	50%	0,00	-2,19	0,00	-1,83	0,00	-1,59	0,00	-1,40	0,00	-1,23
4	6	1,5	2	50%	3	50%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-2,05	0,00	-1,68	0,00	-1,42
4	6	1,5	2	50%	2	33%	3	50%	0,00	-1,97	0,00	-1,59	0,00	-1,58	0,00	-1,58	0,00	-1,57
4	6	1,5	2	50%	2	33%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,00	0,17	-3,68	0,17	-3,50
4	6	1,5	2	50%	1	17%	3	50%	0,00	-1,97	0,00	-1,58	0,00	-1,58	0,00	-1,58	0,00	-1,58
4	6	1,5	2	50%	1	17%	1	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
4	6	1,5	1	25%	5	83%	3	50%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,58	0,00
4	6	1,5	1	25%	5	83%	1	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,62	-0,58	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	3	50%	0,17	-3,13	0,17	-2,80	0,00	-1,04	0,00	-0,49	-0,42	0,00
4	6	1,5	1	25%	4	67%	1	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,50	-0,42	0,00
4	6	1,5	1	25%	3	50%	3	50%	0,00	-1,43	0,00	-1,00	0,00	-0,67	0,00	-0,37	-0,25	-0,07
4	6	1,5	1	25%	3	50%	1	17%	0,33	-6,48	0,33	-6,18	0,00	-1,05	0,00	-0,54	-0,25	-0,11
4	6	1,5	1	25%	2	33%	3	50%	0,00	-0,83	-0,17	-0,28	-0,17	-0,25	-0,17	-0,21	-0,25	-0,16
4	6	1,5	1	25%	2	33%	1	17%	0,17	-4,26	0,17	-3,93	0,00	-1,52	0,00	-1,10	-0,08	-0,78
4	6	1,5	1	25%	1	17%	3	50%	0,00	-0,76	-0,25	-0,17	-0,25	-0,17	-0,25	-0,17	-0,25	-0,17
4	6	1,5	1	25%	1	17%	1	17%	0,08	-3,38	0,08	-3,06	0,08	-2,85	0,08	-2,70	0,08	-2,56

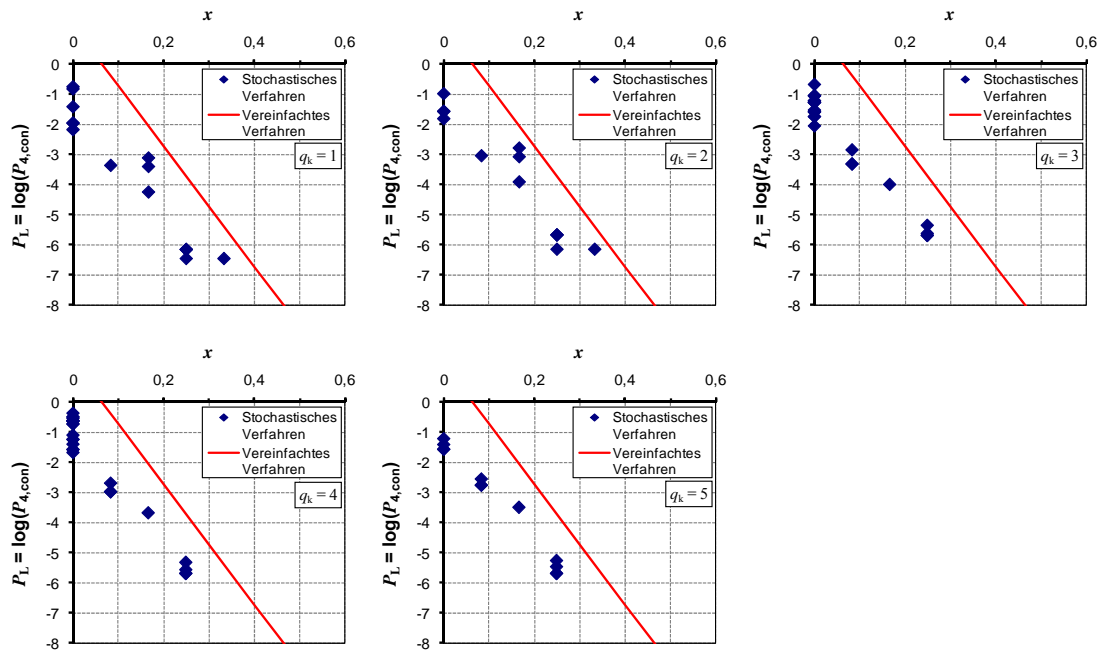


Bild C.61: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 6$ Spanngliedern

Tabelle C.68: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	7	1,4	4	80%	5	71%	3	43%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,09	-3,47	0,09	-3,14	0,09	-2,93
5	7	1,4	4	80%	5	71%	1	14%	0,66	<-7	0,66	<-7	0,09	-3,47	0,09	-3,14	0,09	-2,93
5	7	1,4	4	80%	4	57%	3	43%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,23	-6,00	0,23	-5,78	0,23	-5,70
5	7	1,4	4	80%	4	57%	1	14%	0,66	<-7	0,66	<-7	0,23	-6,00	0,23	-5,78	0,23	-5,70
5	7	1,4	4	80%	3	43%	3	43%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	3	43%	1	14%	0,66	<-7	0,66	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	3	43%	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7	0,37	<-7
5	7	1,4	4	80%	2	29%	1	14%	0,66	<-7	0,66	<-7	0,51	<-7	0,51	<-7	0,51	<-7
5	7	1,4	3	60%	5	71%	3	43%	0,29	-6,18	0,29	-5,70	0,00	-1,27	0,00	-0,81	-0,11	-0,43
5	7	1,4	3	60%	5	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,27	0,00	-0,81	-0,11	-0,43
5	7	1,4	3	60%	4	57%	3	43%	0,17	-4,50	0,17	-4,18	0,03	-2,20	0,03	-1,85	0,03	-1,61
5	7	1,4	3	60%	4	57%	1	14%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,03	-2,21	0,03	-1,85	0,03	-1,61
5	7	1,4	3	60%	3	43%	3	43%	0,17	-4,15	0,17	-3,85	0,17	-3,65	0,17	-3,52	0,17	-3,41
5	7	1,4	3	60%	3	43%	1	14%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,17	-4,11	0,17	-3,81	0,17	-3,63
5	7	1,4	3	60%	2	29%	3	43%	0,17	-4,12	0,17	-3,82	0,17	-3,82	0,17	-3,82	0,17	-3,82
5	7	1,4	3	60%	2	29%	1	14%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,31	<-7	0,31	<-7	0,31	-6,48
5	7	1,4	3	60%	1	14%	3	43%	0,17	-4,12	0,17	-3,82	0,17	-3,82	0,17	-3,82	0,17	-3,82
5	7	1,4	3	60%	1	14%	1	14%	0,46	<-7	0,46	<-7	0,46	<-7	0,46	<-7	0,46	<-7
5	7	1,4	2	40%	5	71%	3	43%	0,29	-5,57	0,29	-5,08	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,31	-0,01
5	7	1,4	2	40%	5	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,49	-0,31	-0,01
5	7	1,4	2	40%	4	57%	3	43%	0,14	-2,95	0,14	-2,61	0,00	-1,06	0,00	-0,59	-0,17	-0,21
5	7	1,4	2	40%	4	57%	1	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,60	-0,17	-0,22
5	7	1,4	2	40%	3	43%	3	43%	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23	0,00	-1,03	-0,03	-0,84
5	7	1,4	2	40%	3	43%	1	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,68	0,00	-1,29	-0,03	-1,02
5	7	1,4	2	40%	2	29%	3	43%	0,00	-1,59	-0,03	-1,19	-0,03	-1,18	-0,03	-1,17	-0,03	-1,16
5	7	1,4	2	40%	2	29%	1	14%	0,26	<-7	0,26	-6,48	0,11	-3,30	0,11	-2,97	0,11	-2,78
5	7	1,4	2	40%	1	14%	3	43%	0,00	-1,57	-0,03	-1,17	-0,03	-1,17	-0,03	-1,17	-0,03	-1,17
5	7	1,4	2	40%	1	14%	1	14%	0,26	<-7	0,26	-6,48	0,26	-6,48	0,26	-6,48	0,26	-6,18
5	7	1,4	1	20%	5	71%	3	43%	0,29	-5,52	0,29	-5,05	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,51	0,00
5	7	1,4	1	20%	5	71%	1	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,48	-0,51	0,00
5	7	1,4	1	20%	3	43%	3	43%	0,00	-1,36	0,00	-0,93	0,00	-0,62	0,00	-0,33	-0,23	-0,05
5	7	1,4	1	20%	3	43%	1	14%	0,29	<-7	0,29	-6,00	0,00	-0,99	0,00	-0,50	-0,23	-0,08
5	7	1,4	1	20%	2	29%	3	43%	0,00	-0,79	-0,14	-0,26	-0,14	-0,22	-0,14	-0,17	-0,23	-0,12
5	7	1,4	1	20%	2	29%	1	14%	0,14	-3,95	0,14	-3,61	0,00	-1,38	0,00	-0,95	-0,09	-0,62
5	7	1,4	1	20%	1	14%	3	43%	0,00	-0,71	-0,23	-0,13	-0,23	-0,13	-0,23	-0,13	-0,23	-0,13
5	7	1,4	1	20%	1	14%	1	14%	0,06	-3,06	0,06	-2,72	0,06	-2,51	0,06	-2,34	0,06	-2,20

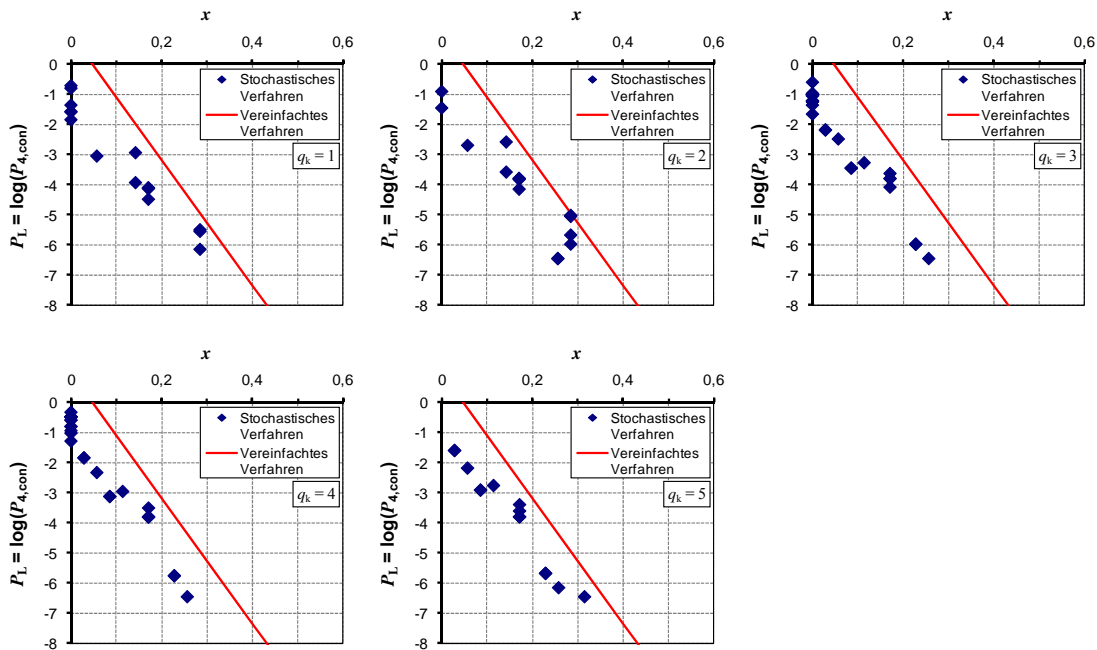


Bild C.62: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 7$ Spanngliedern

Tabelle C.69: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennulip		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	9	1,5	5	83%	7	78%	4	44%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,06	-3,17	0,06	-2,83	0,06	-2,61
6	9	1,5	5	83%	7	78%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,06	-3,17	0,06	-2,83	0,06	-2,61
6	9	1,5	5	83%	7	78%	2	22%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,06	-3,17	0,06	-2,83	0,06	-2,61
6	9	1,5	5	83%	5	56%	4	44%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	5	56%	2	22%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7	0,28	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	4	44%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	4	44%	2	22%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	4	44%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7	0,39	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	3	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	5	83%	3	33%	2	22%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	9	1,5	4	67%	7	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	7	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,19	0,00	-0,72	-0,11	-0,34
6	9	1,5	4	67%	5	56%	4	44%	0,22	-5,78	0,22	-5,52	0,11	-3,37	0,11	-3,06	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	5	56%	3	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,11	-3,38	0,11	-3,06	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	5	56%	2	22%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,11	-3,38	0,11	-3,06	0,11	-2,87
6	9	1,5	4	67%	4	44%	4	44%	0,22	-5,70	0,22	-5,44	0,22	-5,10	0,22	-4,99	0,22	-4,85
6	9	1,5	4	67%	4	44%	3	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	-5,36	0,22	-5,18	0,22	-5,00
6	9	1,5	4	67%	4	44%	2	22%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	-5,36	0,22	-5,18	0,22	-5,00
6	9	1,5	4	67%	3	33%	4	44%	0,22	-5,70	0,22	-5,40	0,22	-5,40	0,22	-5,40	0,22	-5,40
6	9	1,5	4	67%	3	33%	3	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	4	67%	3	33%	2	22%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	9	1,5	3	50%	7	78%	4	44%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	3	33%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	7	78%	2	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,00	0,00	-0,47	-0,28	-0,01
6	9	1,5	3	50%	5	56%	4	44%	0,11	-3,10	0,11	-2,78	0,00	-1,37	0,00	-0,98	-0,06	-0,70
6	9	1,5	3	50%	5	56%	3	33%	0,22	-5,30	0,22	-4,96	0,00	-1,39	0,00	-0,99	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	5	56%	2	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,39	0,00	-0,99	-0,06	-0,71
6	9	1,5	3	50%	4	44%	4	44%	0,06	-2,51	0,06	-2,18	0,06	-1,97	0,06	-1,81	0,06	-1,68
6	9	1,5	3	50%	4	44%	3	33%	0,17	-4,50	0,17	-4,16	0,06	-2,43	0,06	-2,09	0,06	-1,88
6	9	1,5	3	50%	4	44%	2	22%	0,28	<-7	0,28	<-7	0,06	-2,44	0,06	-2,10	0,06	-1,88
6	9	1,5	3	50%	3	33%	4	44%	0,06	-2,40	0,06	-2,06	0,06	-2,05	0,06	-2,05	0,06	-2,05
6	9	1,5	3	50%	3	33%	3	33%	0,17	-4,29	0,17	-3,94	0,17	-3,77	0,17	-3,64	0,17	-3,53
6	9	1,5	3	50%	3	33%	2	22%	0,28	<-7	0,28	<-7	0,17	-4,27	0,17	-3,94	0,17	-3,74
6	9	1,5	3	50%	2	22%	4	44%	0,06	-2,40	0,06	-2,05	0,06	-2,05	0,06	-2,05	0,06	-2,05
6	9	1,5	3	50%	2	22%	3	33%	0,17	-4,28	0,17	-3,93	0,17	-3,93	0,17	-3,93	0,17	-3,93
6	9	1,5	3	50%	2	22%	2	22%	0,28	-6,48	0,28	-6,48	0,28	-6,48	0,28	-6,48	0,28	-6,48
6	9	1,5	2	33%	4	44%	4	44%	0,00	-1,38	0,00	-0,99	0,00	-0,72	0,00	-0,48	-0,11	-0,26
6	9	1,5	2	33%	4	44%	3	33%	0,11	-2,77	0,11	-2,45	0,00	-1,09	0,00	-0,68	-0,11	-0,36
6	9	1,5	2	33%	4	44%	2	22%	0,22	-5,10	0,22	-4,78	0,00	-1,12	0,00	-0,69	-0,11	-0,37
6	9	1,5	2	33%	3	33%	4	44%	0,00	-0,99	-0,11	-0,55	-0,11	-0,52	-0,11	-0,48	-0,11	-0,45
6	9	1,5	2	33%	3	33%	3	33%	0,00	-1,98	0,00	-1,64	0,00	-1,40	0,00	-1,22	0,00	-1,06
6	9	1,5	2	33%	3	33%	2	22%	0,11	-3,94	0,11	-3,62	0,00	-1,85	0,00	-1,49	0,00	-1,25
6	9	1,5	2	33%	2	22%	4	44%	0,00	-0,94	-0,11	-0,47	-0,11	-0,47	-0,11	-0,47	-0,11	-0,47
6	9	1,5	2	33%	2	22%	3	33%	0,00	-1,79	0,00	-1,42	0,00	-1,41	0,00	-1,41	0,00	-1,40
6	9	1,5	2	33%	2	22%	2	22%	0,11	-3,54	0,11	-3,21	0,11	-3,02	0,11	-2,88	0,11	-2,77

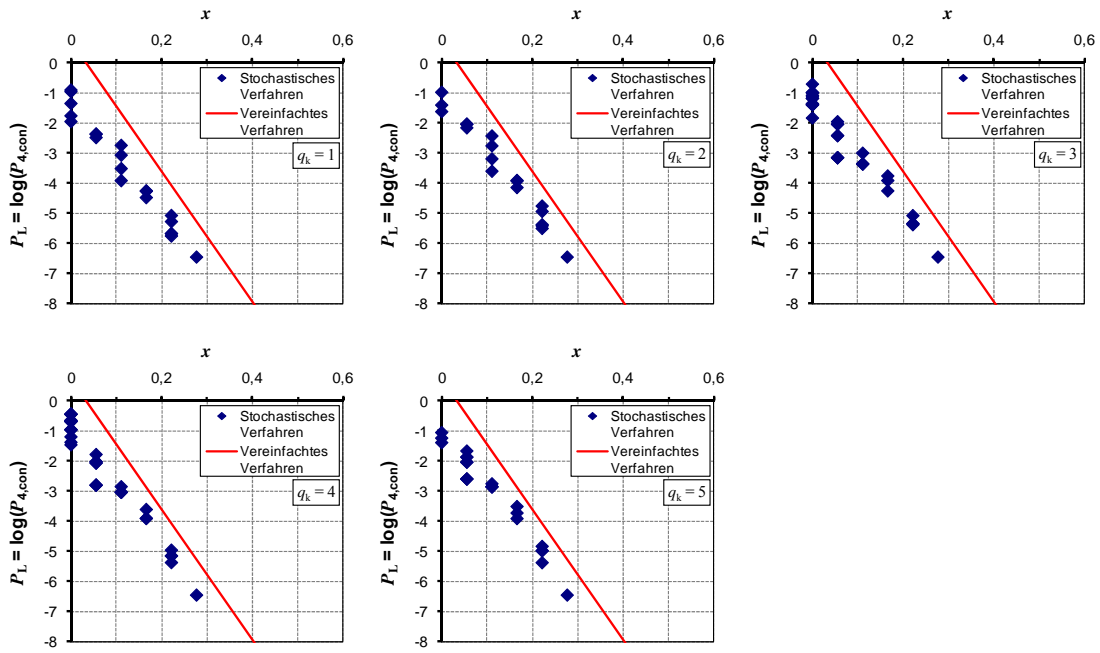


Bild C.63: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 9$ Spanngliedern

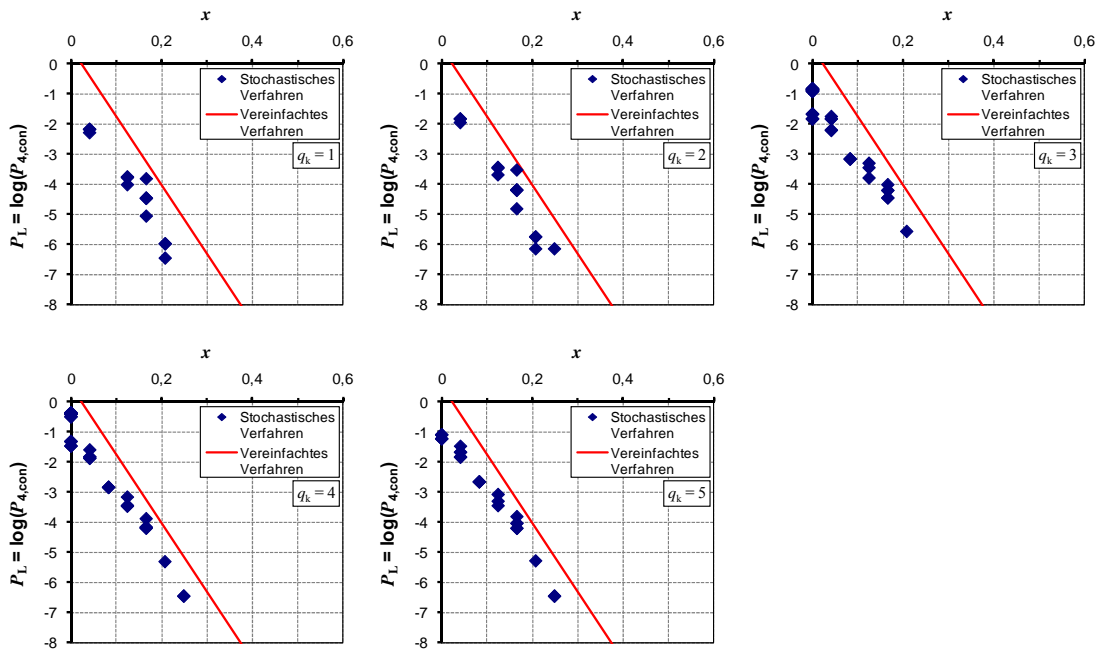


Bild C.64: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.70: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	12	1,5	6	75%	9	75%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	9	75%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,85	0,00	-1,48	0,00	-1,23
8	12	1,5	6	75%	8	67%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,08	-3,18	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	8	67%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,08	-3,18	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	8	67%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,08	-3,18	0,08	-2,86	0,08	-2,67
8	12	1,5	6	75%	6	50%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	6	75%	6	50%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	6	75%	6	50%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	4	33%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	3	25%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7	0,42	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	12	1,5	6	75%	2	17%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7	0,58	<-7
8	12	1,5	4	50%	9	75%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	9	75%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,25	-0,01
8	12	1,5	4	50%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,43	-0,17	-0,08
8	12	1,5	4	50%	6	50%	4	33%	0,17	-5,08	0,17	-4,84	0,00	-1,69	0,00	-1,33	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	6	50%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,33	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,33	0,00	-1,10
8	12	1,5	4	50%	4	33%	4	33%	0,17	-4,49	0,17	-4,23	0,17	-4,03	0,17	-3,90	0,17	-3,83
8	12	1,5	4	50%	4	33%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,17	-4,46	0,17	-4,18	0,17	-4,05
8	12	1,5	4	50%	4	33%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,46	0,17	-4,18	0,17	-4,05
8	12	1,5	4	50%	3	25%	4	33%	0,17	-4,48	0,17	-4,22	0,17	-4,22	0,17	-4,21	0,17	-4,21
8	12	1,5	4	50%	3	25%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	4	50%	3	25%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,25	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48
8	12	1,5	4	50%	2	17%	4	33%	0,17	-4,48	0,17	-4,22	0,17	-4,22	0,17	-4,22	0,17	-4,22
8	12	1,5	4	50%	2	17%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	12	1,5	4	50%	2	17%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
8	12	1,5	3	38%	9	75%	4	33%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	3	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	9	75%	2	17%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,40	-0,38	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,29	0,00
8	12	1,5	3	38%	6	50%	4	33%	0,17	-3,84	0,17	-3,55	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	3	25%	0,25	<-7	0,25	-6,18	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,51	-0,13	-0,19
8	12	1,5	3	38%	4	33%	4	33%	0,04	-2,31	0,04	-1,98	0,04	-1,77	0,04	-1,61	0,04	-1,48
8	12	1,5	3	38%	4	33%	3	25%	0,13	-4,04	0,13	-3,72	0,04	-2,22	0,04	-1,89	0,04	-1,68
8	12	1,5	3	38%	4	33%	2	17%	0,21	-6,48	0,21	-6,18	0,04	-2,23	0,04	-1,90	0,04	-1,68
8	12	1,5	3	38%	3	25%	4	33%	0,04	-2,20	0,04	-1,86	0,04	-1,85	0,04	-1,84	0,04	-1,84
8	12	1,5	3	38%	3	25%	3	25%	0,13	-3,80	0,13	-3,49	0,13	-3,32	0,13	-3,18	0,13	-3,09
8	12	1,5	3	38%	3	25%	2	17%	0,21	-6,00	0,21	-5,78	0,13	-3,80	0,13	-3,49	0,13	-3,32
8	12	1,5	3	38%	2	17%	4	33%	0,04	-2,19	0,04	-1,85	0,04	-1,85	0,04	-1,85	0,04	-1,85
8	12	1,5	3	38%	2	17%	3	25%	0,13	-3,77	0,13	-3,47	0,13	-3,47	0,13	-3,46	0,13	-3,46
8	12	1,5	3	38%	2	17%	2	17%	0,21	-6,00	0,21	-5,78	0,21	-5,57	0,21	-5,33	0,21	-5,30

Tabelle C.71: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	15	1,5	8	80%	12	80%	4	27%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-1,82	0,00	-1,46	0,00	-1,21
10	15	1,5	8	80%	12	80%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,82	0,00	-1,46	0,00	-1,21
10	15	1,5	8	80%	12	80%	2	13%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,82	0,00	-1,46	0,00	-1,21
10	15	1,5	8	80%	10	67%	4	27%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,13	-4,82	0,13	-4,48	0,13	-4,30
10	15	1,5	8	80%	10	67%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,13	-4,82	0,13	-4,48	0,13	-4,30
10	15	1,5	8	80%	10	67%	2	13%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,13	-4,82	0,13	-4,48	0,13	-4,30
10	15	1,5	8	80%	8	53%	4	27%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	8	80%	8	53%	2	13%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7	0,27	<-7
10	15	1,5	6	60%	12	80%	4	27%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	12	80%	3	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	12	80%	2	13%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,20	-0,01
10	15	1,5	6	60%	10	67%	4	27%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	10	67%	2	13%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-1,08	0,00	-0,68	-0,07	-0,39
10	15	1,5	6	60%	8	53%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,07	-2,60	0,07	-2,28	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	8	53%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,07	-2,60	0,07	-2,28	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	8	53%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,07	-2,60	0,07	-2,28	0,07	-2,08
10	15	1,5	6	60%	6	40%	4	27%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,40	0,20	-5,33
10	15	1,5	6	60%	6	40%	3	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,40	0,20	-5,33
10	15	1,5	6	60%	6	40%	2	13%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,20	-5,63	0,20	-5,40	0,20	-5,33
10	15	1,5	4	40%	10	67%	4	27%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	3	20%	0,47	<-7	0,47	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	10	67%	2	13%	0,53	<-7	0,53	<-7	0,00	-0,80	0,00	-0,35	-0,27	0,00
10	15	1,5	4	40%	8	53%	4	27%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,10
10	15	1,5	4	40%	8	53%	3	20%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,10
10	15	1,5	4	40%	8	53%	2	13%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,84	0,00	-0,42	-0,13	-0,10
10	15	1,5	4	40%	6	40%	4	27%	0,13	-4,70	0,13	-4,42	0,00	-1,62	0,00	-1,27	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	6	40%	3	20%	0,20	<-7	0,20	-6,48	0,00	-1,62	0,00	-1,27	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	6	40%	2	13%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,00	-1,62	0,00	-1,27	0,00	-1,03
10	15	1,5	4	40%	3	20%	4	27%	0,13	-4,20	0,13	-3,86	0,13	-3,85	0,13	-3,85	0,13	-3,85
10	15	1,5	4	40%	3	20%	3	20%	0,20	-6,18	0,20	-5,78	0,20	-5,57	0,20	-5,52	0,20	-5,44
10	15	1,5	4	40%	3	20%	2	13%	0,27	<-7	0,27	<-7	0,20	-6,00	0,20	-5,88	0,20	-5,70

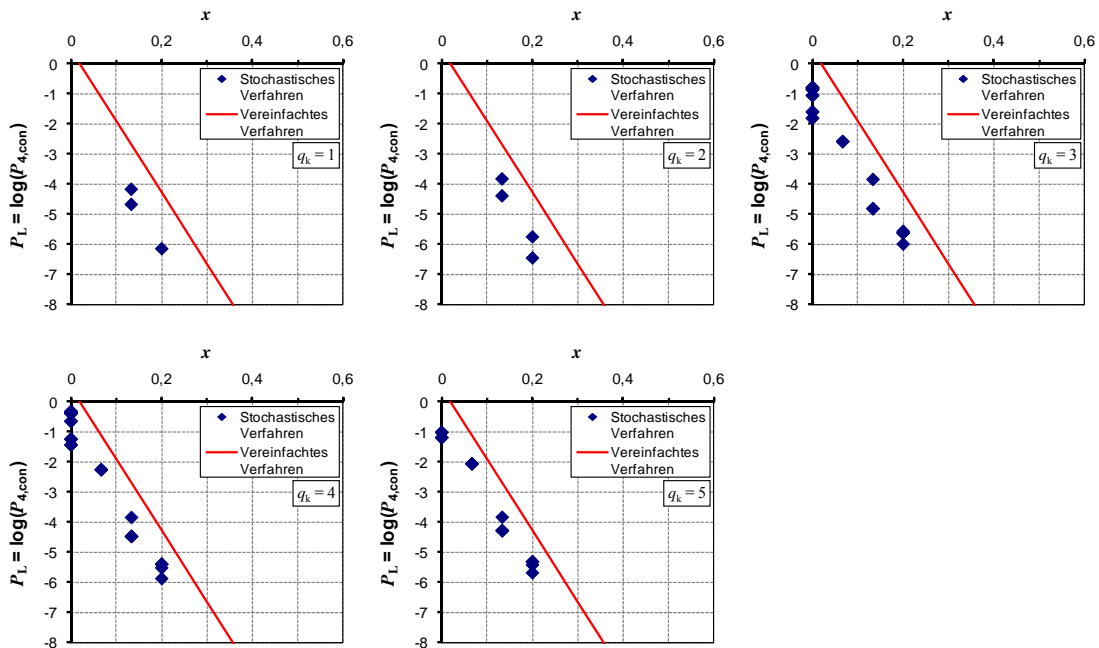


Bild C.65: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 15$ Spanngliedern

C.6.3 Spanngliedanzahl um den Faktor 2,0 vergrößert

Tabelle C.72: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
4	8	2,0	3	75%	6	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-2,40	0,00	-2,03	0,00	-1,77
4	8	2,0	3	75%	6	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-2,40	0,00	-2,03	0,00	-1,77
4	8	2,0	3	75%	4	50%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,18
4	8	2,0	3	75%	4	50%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,18
4	8	2,0	3	75%	3	38%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	3	75%	3	38%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	3	75%	2	25%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	3	75%	2	25%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
4	8	2,0	3	75%	1	13%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	3	75%	1	13%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,63	<-7	0,63	<-7	0,63	<-7
4	8	2,0	2	50%	6	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,53	-0,25	-0,09
4	8	2,0	2	50%	6	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,05	0,00	-0,53	-0,25	-0,09
4	8	2,0	2	50%	4	50%	3	38%	0,13	-4,20	0,13	-3,85	0,00	-2,11	0,00	-1,76	0,00	-1,52
4	8	2,0	2	50%	4	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-2,12	0,00	-1,76	0,00	-1,52
4	8	2,0	2	50%	3	38%	3	38%	0,13	-3,77	0,13	-3,45	0,13	-3,25	0,13	-3,10	0,13	-2,98
4	8	2,0	2	50%	3	38%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,13	-3,71	0,13	-3,38	0,13	-3,18
4	8	2,0	2	50%	2	25%	3	38%	0,13	-3,72	0,13	-3,39	0,13	-3,39	0,13	-3,39	0,13	-3,39
4	8	2,0	2	50%	2	25%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-5,88
4	8	2,0	2	50%	1	13%	3	38%	0,13	-3,72	0,13	-3,39	0,13	-3,39	0,13	-3,39	0,13	-3,39
4	8	2,0	2	50%	1	13%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7	0,38	<-7
4	8	2,0	1	25%	6	75%	3	38%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	6	75%	1	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,01	0,00	-0,47	-0,50	0,00
4	8	2,0	1	25%	4	50%	3	38%	0,13	-2,65	0,13	-2,32	0,00	-0,94	0,00	-0,48	-0,25	-0,10
4	8	2,0	1	25%	4	50%	1	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,97	0,00	-0,49	-0,25	-0,10
4	8	2,0	1	25%	3	38%	3	38%	0,00	-1,53	0,00	-1,14	0,00	-0,87	0,00	-0,63	-0,13	-0,41
4	8	2,0	1	25%	3	38%	1	13%	0,25	-6,48	0,25	-6,18	0,00	-1,28	0,00	-0,85	-0,13	-0,53
4	8	2,0	1	25%	2	25%	3	38%	0,00	-1,15	-0,13	-0,70	-0,13	-0,68	-0,13	-0,65	-0,13	-0,63
4	8	2,0	1	25%	2	25%	1	13%	0,13	-5,03	0,13	-4,77	0,00	-2,26	0,00	-1,90	0,00	-1,65
4	8	2,0	1	25%	1	13%	3	38%	0,00	-1,10	-0,13	-0,64	-0,13	-0,64	-0,13	-0,64	-0,13	-0,64
4	8	2,0	1	25%	1	13%	1	13%	0,13	-4,61	0,13	-4,28	0,13	-4,12	0,13	-3,99	0,13	-3,87

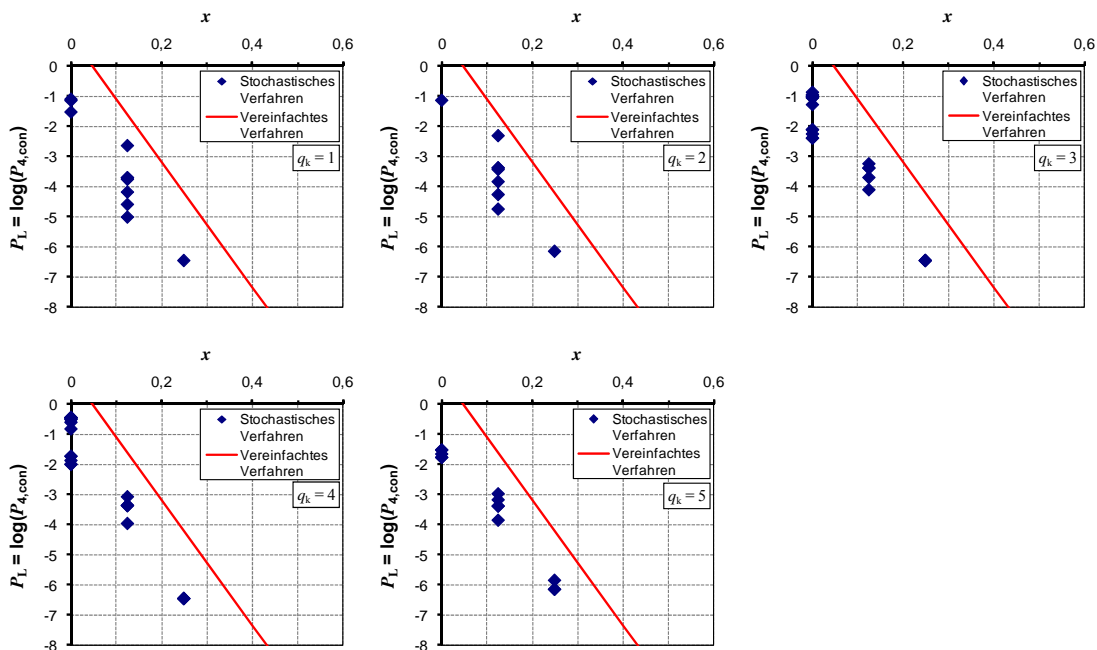


Bild C.66: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 4$ und $s_{\max} = 8$ Spanngliedern

Tabelle C.73: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	10	2,0	4	80%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,35	0,00	-1,98	0,00	-1,73
5	10	2,0	4	80%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-2,35	0,00	-1,98	0,00	-1,73
5	10	2,0	4	80%	6	60%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-6,00	0,20	-6,00	0,20	-5,88
5	10	2,0	4	80%	6	60%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,20	-6,00	0,20	-6,00	0,20	-5,88
5	10	2,0	4	80%	4	40%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	4	40%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	4	80%	3	30%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
5	10	2,0	4	80%	3	30%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
5	10	2,0	4	80%	2	20%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
5	10	2,0	4	80%	2	20%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
5	10	2,0	3	60%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,04	0,00	-0,52	-0,20	-0,10
5	10	2,0	3	60%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,04	0,00	-0,52	-0,20	-0,10
5	10	2,0	3	60%	6	60%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-2,02	0,00	-1,66	0,00	-1,42
5	10	2,0	3	60%	6	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,02	0,00	-1,66	0,00	-1,42
5	10	2,0	3	60%	4	40%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-5,27	0,20	-5,00	0,20	-4,86
5	10	2,0	3	60%	4	40%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,20	-5,27	0,20	-5,00	0,20	-4,86
5	10	2,0	3	60%	3	30%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	3	60%	3	30%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	3	60%	2	20%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	3	60%	2	20%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
5	10	2,0	3	60%	1	10%	3	30%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	3	60%	1	10%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
5	10	2,0	2	40%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,40	0,00
5	10	2,0	2	40%	6	60%	3	30%	0,30	<-7	0,30	-6,18	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,20	-0,13
5	10	2,0	2	40%	6	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,95	0,00	-0,49	-0,20	-0,13
5	10	2,0	2	40%	4	40%	3	30%	0,10	-3,77	0,10	-3,48	0,00	-1,98	0,00	-1,63	0,00	-1,40
5	10	2,0	2	40%	4	40%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-2,00	0,00	-1,64	0,00	-1,40
5	10	2,0	2	40%	3	30%	3	30%	0,10	-3,45	0,10	-3,14	0,10	-2,94	0,10	-2,80	0,10	-2,68
5	10	2,0	2	40%	3	30%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,10	-3,41	0,10	-3,08	0,10	-2,89
5	10	2,0	2	40%	2	20%	3	30%	0,10	-3,40	0,10	-3,08	0,10	-3,08	0,10	-3,08	0,10	-3,08
5	10	2,0	2	40%	2	20%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-6,18	0,20	-5,44	0,20	-5,20
5	10	2,0	2	40%	1	10%	3	30%	0,10	-3,39	0,10	-3,08	0,10	-3,08	0,10	-3,08	0,10	-3,08
5	10	2,0	2	40%	1	10%	1	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
5	10	2,0	1	20%	8	80%	3	30%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,60	0,00
5	10	2,0	1	20%	8	80%	1	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,99	0,00	-0,46	-0,60	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	3	30%	0,30	-6,48	0,30	-6,00	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	6	60%	1	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,87	0,00	-0,39	-0,40	0,00
5	10	2,0	1	20%	3	30%	3	30%	0,00	-1,50	0,00	-1,12	0,00	-0,85	0,00	-0,62	-0,10	-0,41
5	10	2,0	1	20%	3	30%	1	10%	0,20	-5,70	0,20	-5,63	0,00	-1,26	0,00	-0,84	-0,10	-0,53
5	10	2,0	1	20%	2	20%	3	30%	0,00	-1,14	-0,10	-0,71	-0,10	-0,68	-0,10	-0,66	-0,10	-0,63
5	10	2,0	1	20%	2	20%	1	10%	0,10	-4,82	0,10	-4,56	0,00	-2,20	0,00	-1,84	0,00	-1,60
5	10	2,0	1	20%	1	10%	3	30%	0,00	-1,10	-0,10	-0,65	-0,10	-0,65	-0,10	-0,65	-0,10	-0,65
5	10	2,0	1	20%	1	10%	1	10%	0,10	-4,37	0,10	-4,10	0,10	-3,92	0,10	-3,79	0,10	-3,67

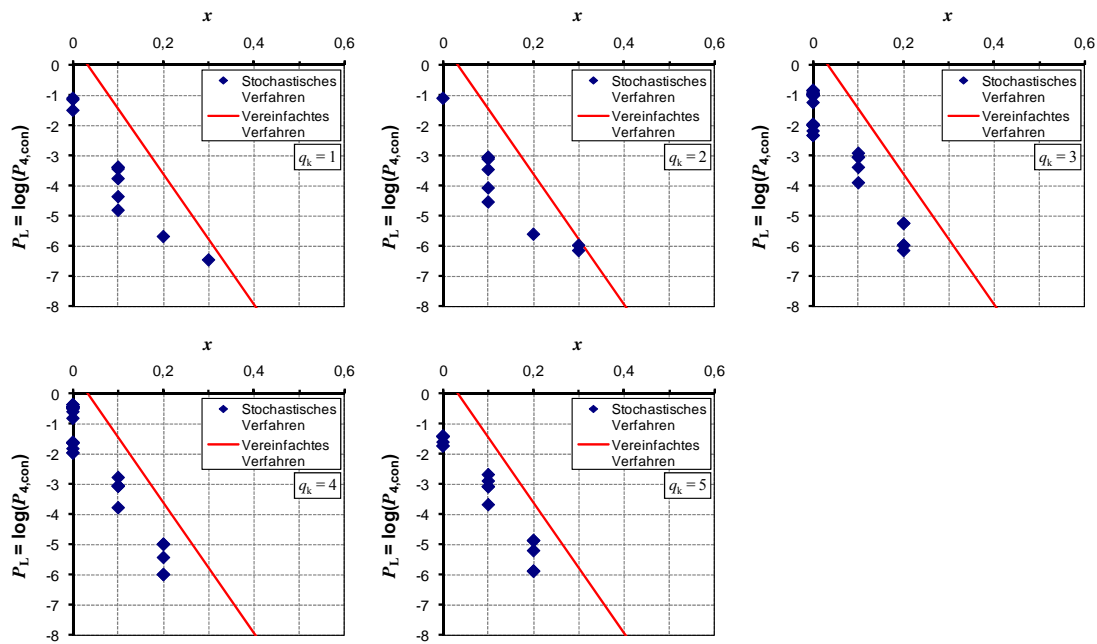


Bild C.67: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 5$ und $s_{\max} = 10$ Spanngliedern

Tabelle C.74: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
6	12	2,0	5	83%	10	83%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,96	0,00	-1,70
6	12	2,0	5	83%	10	83%	3	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,96	0,00	-1,70
6	12	2,0	5	83%	10	83%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-2,33	0,00	-1,96	0,00	-1,70
6	12	2,0	5	83%	8	67%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-6,00	0,17	-5,88	0,17	-5,70
6	12	2,0	5	83%	8	67%	3	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,17	-6,00	0,17	-5,88	0,17	-5,70
6	12	2,0	5	83%	8	67%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,17	-6,00	0,17	-5,88	0,17	-5,70
6	12	2,0	5	83%	6	50%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	3	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	6	50%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	5	83%	4	33%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	5	83%	4	33%	3	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	5	83%	4	33%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
6	12	2,0	4	67%	10	83%	4	33%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,10
6	12	2,0	4	67%	10	83%	3	25%	0,58	<-7	0,58	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,10
6	12	2,0	4	67%	10	83%	2	17%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,03	0,00	-0,52	-0,17	-0,10
6	12	2,0	4	67%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,97	0,00	-1,61	0,00	-1,37
6	12	2,0	4	67%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-1,97	0,00	-1,61	0,00	-1,37
6	12	2,0	4	67%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,97	0,00	-1,61	0,00	-1,37
6	12	2,0	4	67%	6	50%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,88	0,17	-4,54	0,17	-4,40
6	12	2,0	4	67%	6	50%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,17	-4,88	0,17	-4,54	0,17	-4,40
6	12	2,0	4	67%	6	50%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,17	-4,88	0,17	-4,54	0,17	-4,40
6	12	2,0	4	67%	4	33%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	4	33%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	4	67%	4	33%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	3	50%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,17	-0,14
6	12	2,0	3	50%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,17	-0,14
6	12	2,0	3	50%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,94	0,00	-0,49	-0,17	-0,14
6	12	2,0	3	50%	6	50%	4	33%	0,17	-5,27	0,17	-5,08	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
6	12	2,0	3	50%	6	50%	3	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
6	12	2,0	3	50%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,89	0,00	-1,54	0,00	-1,31
6	12	2,0	3	50%	4	33%	4	33%	0,17	-4,78	0,17	-4,41	0,17	-4,24	0,17	-4,11	0,17	-4,04
6	12	2,0	3	50%	4	33%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,17	-4,72	0,17	-4,41	0,17	-4,28
6	12	2,0	3	50%	4	33%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,17	-4,73	0,17	-4,41	0,17	-4,28
6	12	2,0	3	50%	2	17%	4	33%	0,17	-4,77	0,17	-4,40	0,17	-4,40	0,17	-4,40	0,17	-4,40
6	12	2,0	3	50%	2	17%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48	0,25	-6,48
6	12	2,0	3	50%	2	17%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7	0,33	<-7
6	12	2,0	2	33%	8	67%	4	33%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	8	67%	3	25%	0,42	<-7	0,42	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	8	67%	2	17%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,85	0,00	-0,38	-0,33	0,00
6	12	2,0	2	33%	6	50%	4	33%	0,17	-3,80	0,17	-3,49	0,00	-0,92	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	6	50%	3	25%	0,25	-6,48	0,25	-6,00	0,00	-0,92	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	6	50%	2	17%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,92	0,00	-0,48	-0,17	-0,15
6	12	2,0	2	33%	4	33%	4	33%	0,00	-2,05	0,00	-1,71	0,00	-1,49	0,00	-1,32	0,00	-1,17
6	12	2,0	2	33%	4	33%	3	25%	0,08	-3,65	0,08	-3,34	0,00	-1,92	0,00	-1,58	0,00	-1,34
6	12	2,0	2	33%	4	33%	2	17%	0,17	<-7	0,17	-6,18	0,00	-1,94	0,00	-1,59	0,00	-1,35
6	12	2,0	2	33%	2	17%	4	33%	0,00	-1,87	0,00	-1,50	0,00	-1,50	0,00	-1,50	0,00	-1,50
6	12	2,0	2	33%	2	17%	3	25%	0,08	-3,24	0,08	-2,93	0,08	-2,92	0,08	-2,92	0,08	-2,92
6	12	2,0	2	33%	2	17%	2	17%	0,17	-5,33	0,17	-5,10	0,17	-4,99	0,17	-4,84	0,17	-4,71

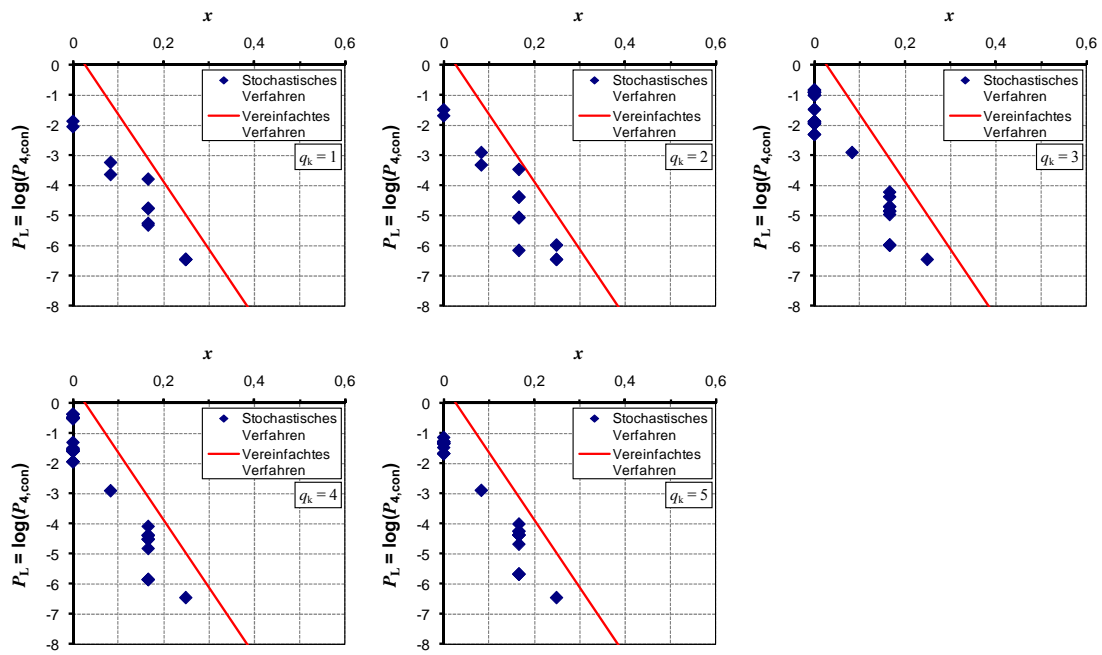


Bild C.68: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 6$ und $s_{\max} = 12$ Spanngliedern

Tabelle C.75: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
7	14	2,0	5	71%	11	79%	4	29%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,24	0,00	-0,83	-0,07	-0,52
7	14	2,0	5	71%	11	79%	3	21%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-1,24	0,00	-0,83	-0,07	-0,52
7	14	2,0	5	71%	11	79%	2	14%	0,64	<-7	0,64	<-7	0,00	-1,24	0,00	-0,83	-0,07	-0,52
7	14	2,0	5	71%	8	57%	4	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,14	-4,58	0,14	-4,32	0,14	-4,15
7	14	2,0	5	71%	8	57%	3	21%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,14	-4,58	0,14	-4,32	0,14	-4,15
7	14	2,0	5	71%	8	57%	2	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,14	-4,58	0,14	-4,32	0,14	-4,15
7	14	2,0	5	71%	4	29%	4	29%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	5	71%	4	29%	3	21%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	5	71%	4	29%	2	14%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7	0,43	<-7
7	14	2,0	4	57%	11	79%	4	29%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,21	-0,02
7	14	2,0	4	57%	11	79%	3	21%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,21	-0,02
7	14	2,0	4	57%	11	79%	2	14%	0,64	<-7	0,64	<-7	0,00	-0,89	0,00	-0,41	-0,21	-0,02
7	14	2,0	4	57%	8	57%	4	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-1,83	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	8	57%	3	21%	0,36	<-7	0,36	<-7	0,00	-1,83	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	8	57%	2	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-1,83	0,00	-1,48	0,00	-1,25
7	14	2,0	4	57%	4	29%	4	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	4	57%	4	29%	3	21%	0,36	<-7	0,36	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	4	57%	4	29%	2	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7	0,29	<-7
7	14	2,0	3	43%	11	79%	4	29%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,36	0,00
7	14	2,0	3	43%	11	79%	3	21%	0,57	<-7	0,57	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,36	0,00
7	14	2,0	3	43%	11	79%	2	14%	0,64	<-7	0,64	<-7	0,00	-0,88	0,00	-0,40	-0,36	0,00
7	14	2,0	3	43%	8	57%	4	29%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	3	21%	0,36	<-7	0,36	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	8	57%	2	14%	0,43	<-7	0,43	<-7	0,00	-0,91	0,00	-0,49	-0,14	-0,17
7	14	2,0	3	43%	4	29%	4	29%	0,14	-4,48	0,14	-4,16	0,14	-3,98	0,14	-3,84	0,14	-3,74
7	14	2,0	3	43%	4	29%	3	21%	0,21	-6,48	0,21	-6,00	0,14	-4,44	0,14	-4,13	0,14	-3,95
7	14	2,0	3	43%	4	29%	2	14%	0,29	<-7	0,29	<-7	0,14	-4,45	0,14	-4,13	0,14	-3,95

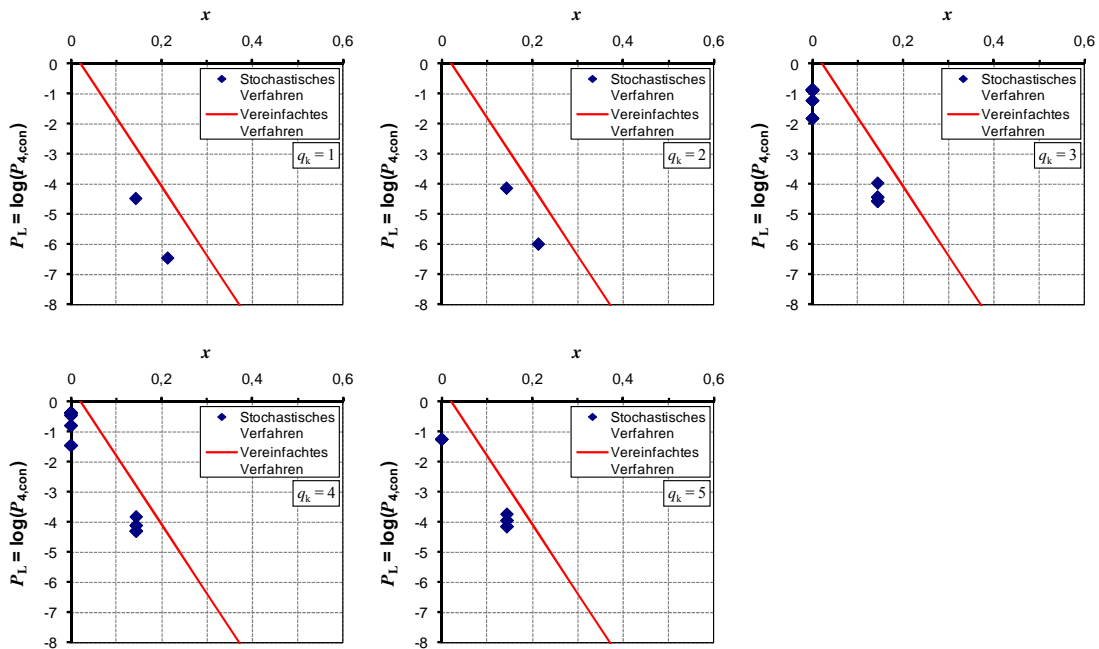


Bild C.69: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 7$ und $s_{\max} = 14$ Spanngliedern

Tabelle C.76: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
8	16	2,0	6	75%	12	75%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	12	75%	3	19%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	12	75%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-1,91	0,00	-1,56	0,00	-1,32
8	16	2,0	6	75%	8	50%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	3	19%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	8	50%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	3	19%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	6	75%	4	25%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7	0,50	<-7
8	16	2,0	4	50%	12	75%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00
8	16	2,0	4	50%	12	75%	3	19%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00
8	16	2,0	4	50%	12	75%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,37	-0,25	0,00
8	16	2,0	4	50%	8	50%	4	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,42	0,00	-1,19
8	16	2,0	4	50%	8	50%	3	19%	0,31	<-7	0,31	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,42	0,00	-1,19
8	16	2,0	4	50%	8	50%	2	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,42	0,00	-1,19
8	16	2,0	4	50%	4	25%	4	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	4	50%	4	25%	3	19%	0,31	<-7	0,31	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	4	50%	4	25%	2	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7	0,25	<-7
8	16	2,0	3	38%	12	75%	4	25%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,36	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	3	19%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,36	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	12	75%	2	13%	0,63	<-7	0,63	<-7	0,00	-0,83	0,00	-0,36	-0,38	0,00
8	16	2,0	3	38%	8	50%	4	25%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	3	19%	0,31	<-7	0,31	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	8	50%	2	13%	0,38	<-7	0,38	<-7	0,00	-0,90	0,00	-0,49	-0,13	-0,19
8	16	2,0	3	38%	4	25%	4	25%	0,13	-4,21	0,13	-3,97	0,13	-3,80	0,13	-3,65	0,13	-3,56
8	16	2,0	3	38%	4	25%	3	19%	0,19	-6,48	0,19	-6,48	0,13	-4,31	0,13	-3,95	0,13	-3,78
8	16	2,0	3	38%	4	25%	2	13%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,13	-4,31	0,13	-3,95	0,13	-3,78

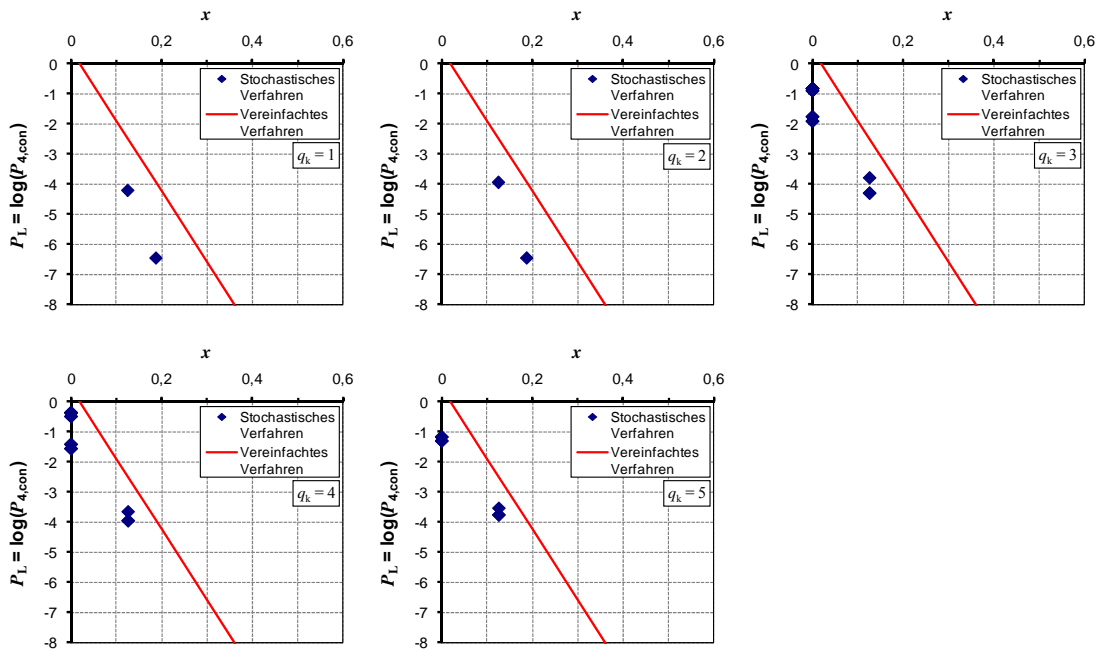


Bild C.70: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 8$ und $s_{\max} = 16$ Spanngliedern

Tabelle C.77: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max} / s_{\min}	n_F	n_F / s_{\min}	n_S	n_S / s_{\max}	n_{NP}	n_{NP} / s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9	18	2,0	7	78%	14	78%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	3	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	14	78%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-1,90	0,00	-1,54	0,00	-1,31
9	18	2,0	7	78%	10	56%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	3	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	10	56%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	3	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	7	78%	6	33%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7	0,44	<-7
9	18	2,0	5	56%	14	78%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	3	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	14	78%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,22	-0,01
9	18	2,0	5	56%	10	56%	4	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,38	0,00	-1,16
9	18	2,0	5	56%	10	56%	3	17%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,38	0,00	-1,16
9	18	2,0	5	56%	10	56%	2	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-1,73	0,00	-1,38	0,00	-1,16
9	18	2,0	5	56%	6	33%	4	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	5	56%	6	33%	3	17%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	5	56%	6	33%	2	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7	0,22	<-7
9	18	2,0	3	33%	14	78%	4	22%	0,56	<-7	0,56	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	3	17%	0,61	<-7	0,61	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	14	78%	2	11%	0,67	<-7	0,67	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,44	0,00
9	18	2,0	3	33%	10	56%	4	22%	0,33	<-7	0,33	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	3	17%	0,39	<-7	0,39	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	10	56%	2	11%	0,44	<-7	0,44	<-7	0,00	-0,76	0,00	-0,33	-0,22	-0,01
9	18	2,0	3	33%	6	33%	4	22%	0,11	-4,76	0,11	-4,42	0,00	-1,76	0,00	-1,41	0,00	-1,19
9	18	2,0	3	33%	6	33%	3	17%	0,17	-6,48	0,17	-6,48	0,00	-1,76	0,00	-1,41	0,00	-1,19
9	18	2,0	3	33%	6	33%	2	11%	0,22	<-7	0,22	<-7	0,00	-1,76	0,00	-1,41	0,00	-1,19
9	18	2,0	3	33%	3	17%	4	22%	0,11	-4,17	0,11	-3,81	0,11	-3,81	0,11	-3,81	0,11	-3,81
9	18	2,0	3	33%	3	17%	3	17%	0,17	-5,78	0,17	-5,57	0,17	-5,57	0,17	-5,48	0,17	-5,40
9	18	2,0	3	33%	3	17%	2	11%	0,22	<-7	0,22	<-7	0,17	<-7	0,17	-6,18	0,17	-5,88

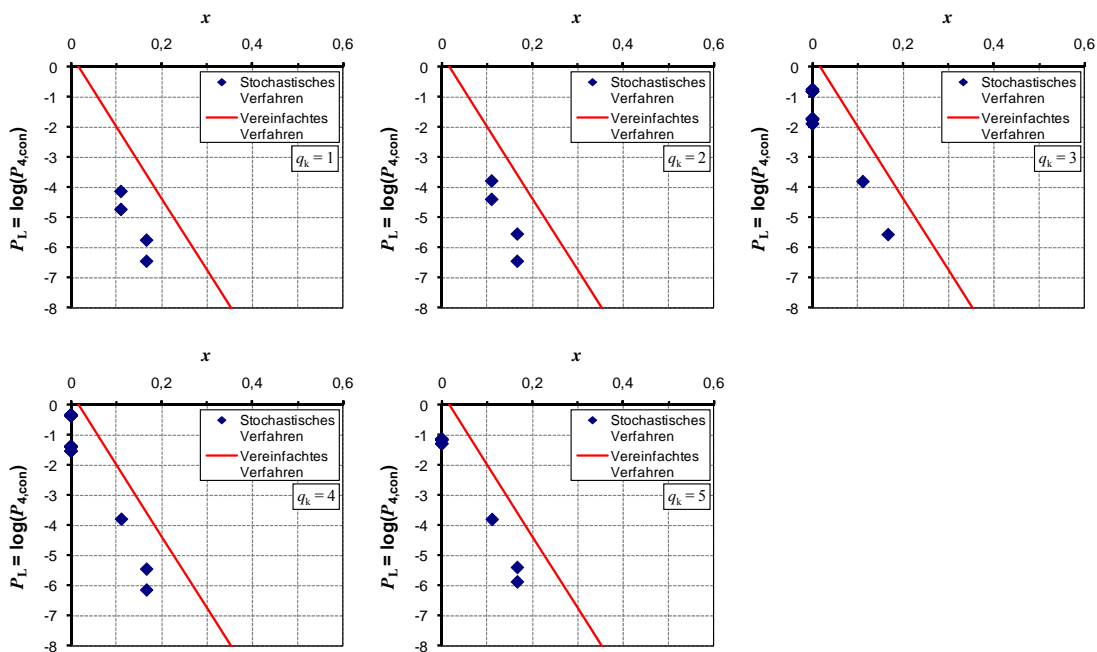


Bild C.71: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 9$ und $s_{\max} = 18$ Spanngliedern

Tabelle C.78: Untersuchte Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern

Spanngliedanzahlen			Feldbereich		Stützbereich		Momentennullp		$q_k = 1$		$q_k = 2$		$q_k = 3$		$q_k = 4$		$q_k = 5$	
s_{\min}	s_{\max}	s_{\max}/s_{\min}	n_F	n_F/s_{\min}	n_S	n_S/s_{\max}	n_{NP}	n_{NP}/s_{\max}	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L	x	P_L
[Anzahl]	[Anzahl]	[-]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[Anzahl]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	20	2,0	8	80%	16	80%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	16	80%	3	15%	0,65	<-7	0,65	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	16	80%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-1,88	0,00	-1,53	0,00	-1,29
10	20	2,0	8	80%	10	50%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	3	15%	0,65	<-7	0,65	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	10	50%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7	0,30	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	3	15%	0,65	<-7	0,65	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	8	80%	4	20%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7	0,60	<-7
10	20	2,0	6	60%	16	80%	4	20%	0,60	<-7	0,60	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	3	15%	0,65	<-7	0,65	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	16	80%	2	10%	0,70	<-7	0,70	<-7	0,00	-0,82	0,00	-0,36	-0,20	-0,01
10	20	2,0	6	60%	10	50%	4	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,10	-3,59	0,10	-3,29	0,10	-3,11
10	20	2,0	6	60%	10	50%	3	15%	0,45	<-7	0,45	<-7	0,10	-3,59	0,10	-3,29	0,10	-3,11
10	20	2,0	6	60%	10	50%	2	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,10	-3,59	0,10	-3,29	0,10	-3,11
10	20	2,0	6	60%	4	20%	4	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	3	15%	0,45	<-7	0,45	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	6	60%	4	20%	2	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7	0,40	<-7
10	20	2,0	4	40%	12	60%	4	20%	0,40	<-7	0,40	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	3	15%	0,45	<-7	0,45	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	12	60%	2	10%	0,50	<-7	0,50	<-7	0,00	-0,75	0,00	-0,33	-0,20	-0,01
10	20	2,0	4	40%	8	40%	4	20%	0,20	<-7	0,20	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	8	40%	3	15%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	8	40%	2	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,00	-1,69	0,00	-1,35	0,00	-1,13
10	20	2,0	4	40%	4	20%	4	20%	0,20	<-7	0,20	<-7	0,20	-6,48	0,20	-6,48	0,20	-6,48
10	20	2,0	4	40%	4	20%	3	15%	0,25	<-7	0,25	<-7	0,20	-6,48	0,20	-6,48	0,20	-6,48
10	20	2,0	4	40%	4	20%	2	10%	0,30	<-7	0,30	<-7	0,20	-6,48	0,20	-6,48	0,20	-6,48

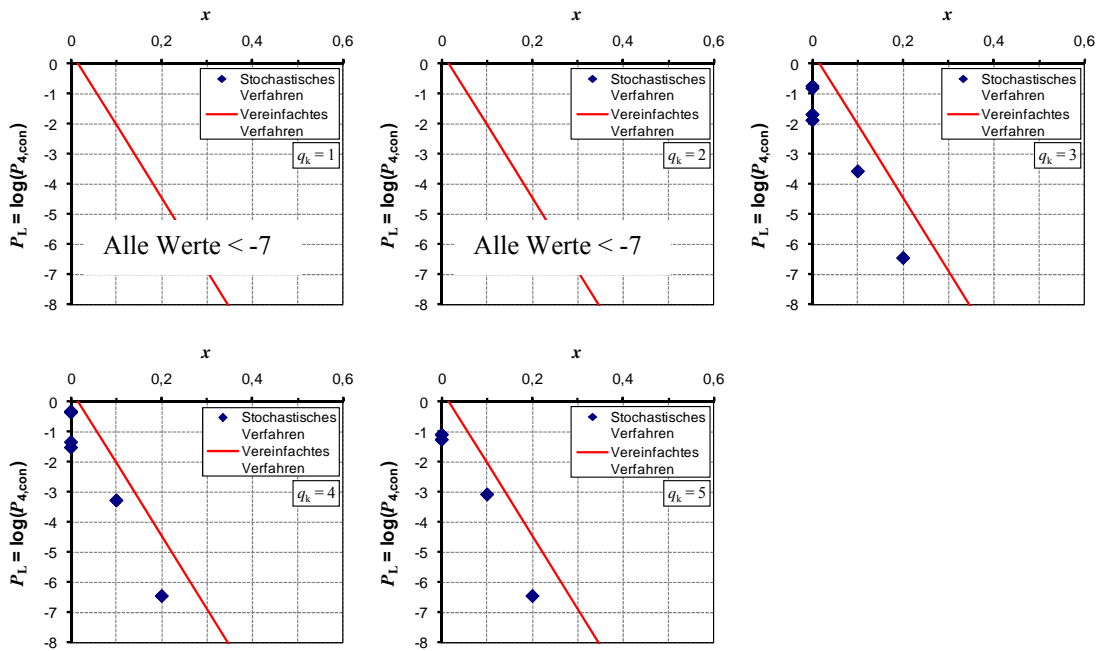


Bild C.72: Darstellung der Ergebnisse für Szenarien mit $s_{\min} = 10$ und $s_{\max} = 20$ Spanngliedern