akademie
DER HOCHSCHULE BIBERACH

Tagungsband
39. Stahlbauseminar 2017

17. - 18. Februar 2017 in Wien
24. - 25. Februar 2017 in Neu-Ulm

WISSENSCHAFT & PRAXIS
Band: 188
ISSN: 1615-4266

akademie
DER HOCHSCHULE BIBERACH

Tagungsband
39. Stahlbauseminar 2017

Organisation, Programmkonzeption, Seminarleitung
und Herausgabe des Tagungsbandes:

Prof. Dr.-Ing. Heiko Rahm
Hochschule Biberach
Karlstraße 11
88400 Biberach

WISSENSCHAFT & PRAXIS
Band: 188
ISSN: 1615-4266

Inhalt Seite

Prof. Dr.-Ing. Christoph Seeßelberg 1-1

Kranbahnen im Bestand: Sanierung und Weiternutzung

Dipl.-Ing. (FH) Florian Eggert, M.Eng. 2-1

Verbunddeckensysteme
Bemessung nach Eurocode 4 und aktueller Stand der Technik

Dipl.-Ing. Rüdiger Knorr 3-1
Christof Bährle, B.Eng.
Nicolas Steimer, B.Eng.

Möglichkeiten im Stahlleichtbau
Anwendungsfelder, Normen, Berechnung, Ausführung, Besonderheiten

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Fink 4-1
Dipl.-Ing. Marlene Steurer
Dipl.-Ing. Patrik Takács

Die Beurteilung der Ermüdungsbeanspruchbarkeit der SCSC-Sandwichplatte
auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

Dipl.-Ing. Uwe Heiland 5-1
Dr.-Ing. Oliver Klostermann

Hochmoselquerung - Konstruktion und Besonderheiten bei der Bauausführung

Dipl.-Ing. Dr. techn. Ralph Timmers 6-1
Nachweise zum Plattenbeulen unter Verwendung der FEM nach EN 1993-1-5

Prof. Dr.-Ing. Casimir Katz 7-1
EDV-unterstützte Stabilitätsnachweise komplexer Tragstrukturen

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Unterweger 8-1
Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Kettler

Verbundstützen nach Eurocode 4
Vergleich zwischen allgemeinem und vereinfachten Bemessungsverfahren

Die Beurteilung der Ermüdungsbeanspruchbarkeit der SCSC-Sandwichplatte auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Fink
Dipl.-Ing. Marlene Steurer
Dipl.-Ing. Patrik Takács
TU Wien, Institut für Tragkonstruktionen
josef.fink@tuwien.ac.at

Die Beurteilung der Ermüdungsbeanspruchbarkeit der SCSC-Sandwichplatte

auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

Josef FINK, Marlene STEURER, Patrik TAKÁCS
TU Wien

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Inhalt

1. Trogbrücken mit extrem niedriger Bauhöhe
2. Herstellung und Tragmechanismus der SCSC-Platte
3. Tragfähigkeit der SCSC-Platte (ohne Ermüdung)
4. Grundlagen des Kerbdehnungskonzeptes für Ermüdungsanalysen
5. Treffgenauigkeit des Kerbdehnungskonzeptes
6. Rechnerische Ermittlung der Bauteilwöhlerlinie für die Lochdübelleiste der SCSC-Platte auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes
7. Bauteilwöhlerlinien für die Lochdübelleiste auf Basis verschiedener Rechenansätze

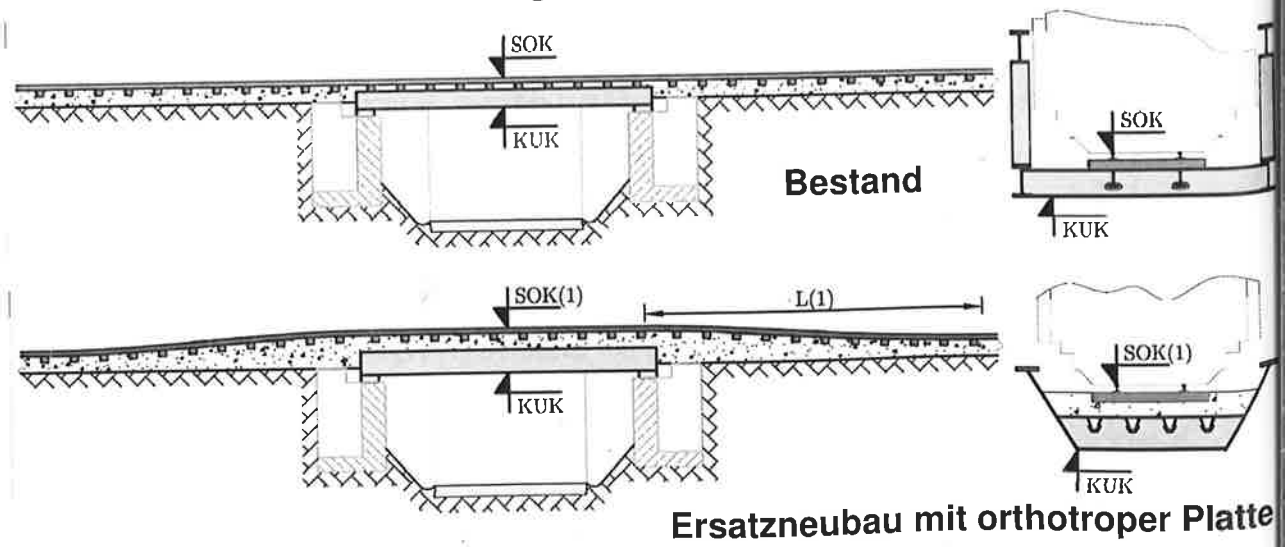
1.

Trogbrücken mit extrem niedriger Bauhöhe (schlanke Fahrbahnplatte)

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

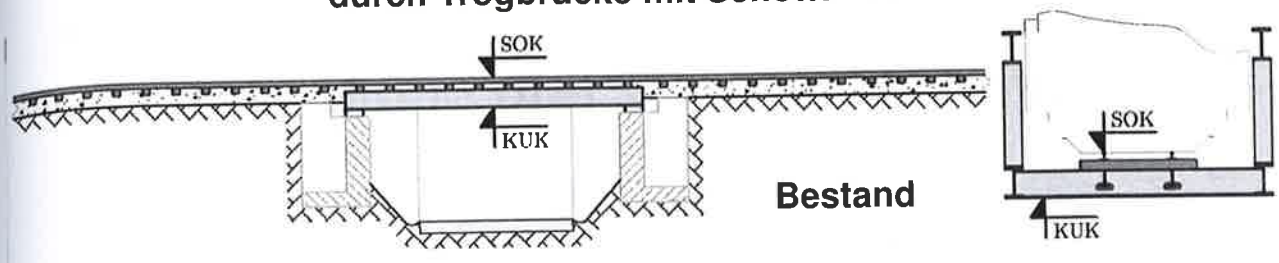
Warum Brücken mit extrem niedriger Bauhöhe?

Ersatzneubau Bestand (ohne Schotterbett) durch Trogbrücke mit Schotterbett

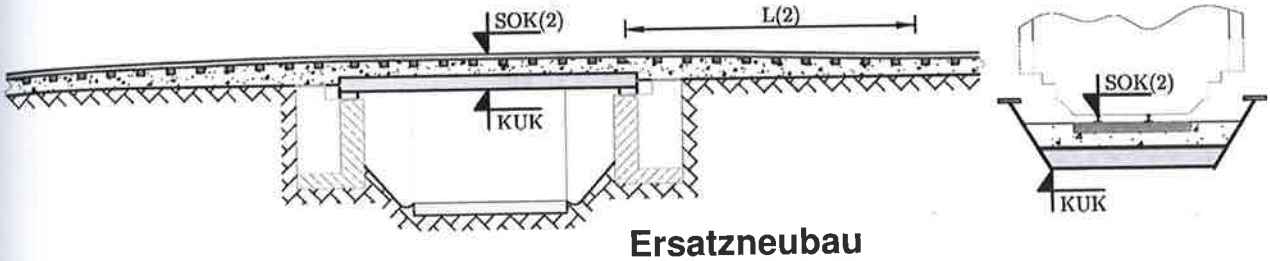


Warum Brücken mit extrem niedriger Bauhöhe?

Ersatzneubau Bestand (ohne Schotterbett)
durch Trogbrücke mit Schotterbett



Bestand

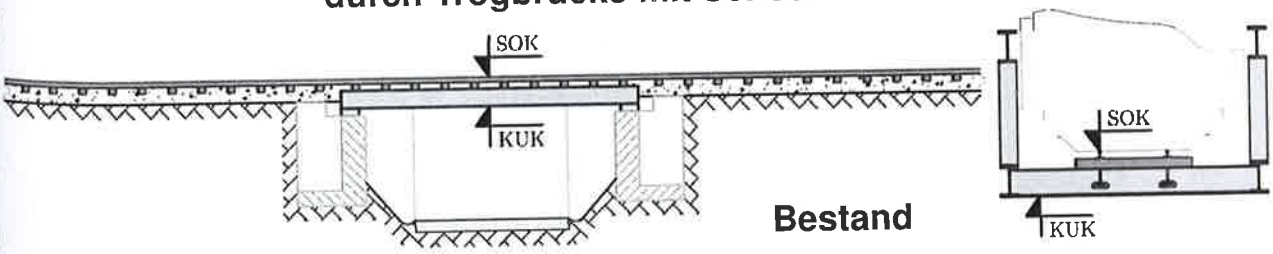


Ersatzneubau
mit querorientierter orthotroper Platte

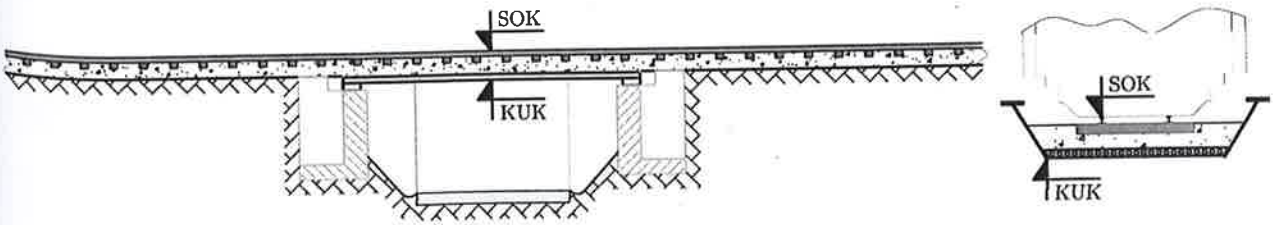
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Warum Brücken mit extrem niedriger Bauhöhe?

Ersatzneubau Bestand (ohne Schotterbett)
durch Trogbrücke mit Schotterbett



Bestand



Ersatzneubau mit Fahrbahnplatte
(extrem niedrige Bauhöhe)

Fahrbahnplatten mit extrem niedriger Bauhöhe

120 mm Grobblechplatte

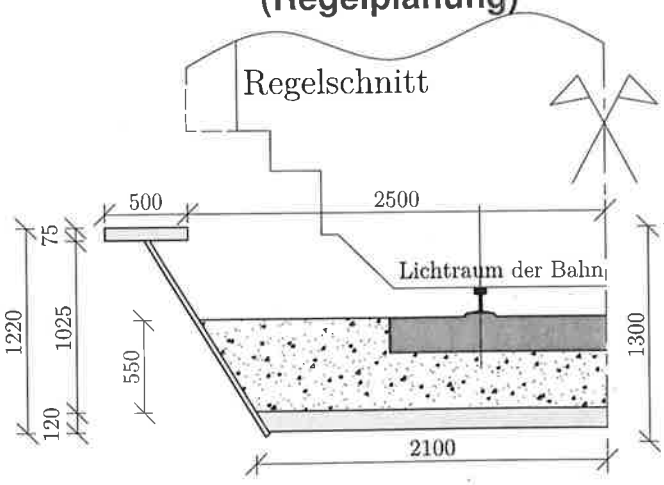
SCSC - Platte

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Fahrbahnplatten mit extrem niedriger Bauhöhe

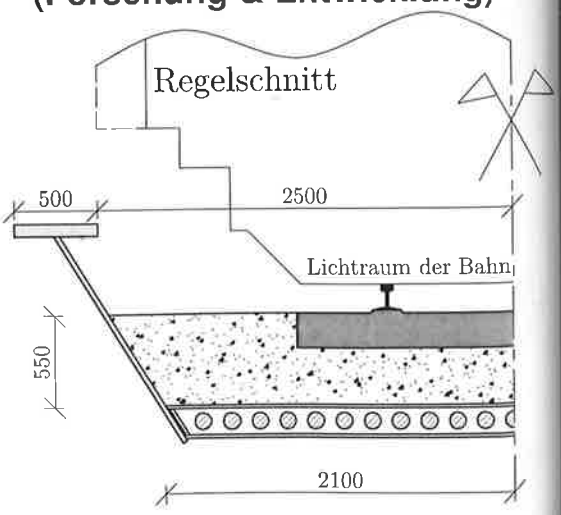
120 Grobblechplatte

(Regelplanung)



SCSC – Platte

(Forschung & Entwicklung)



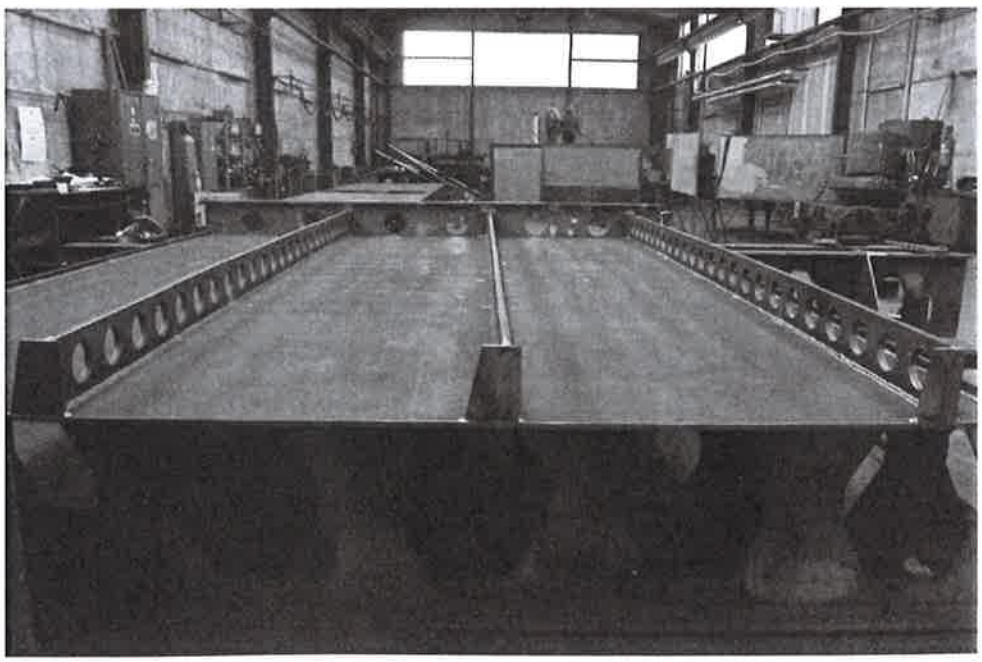
2.

Herstellung und Tragmechanismus der SCSC-Platte

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Fertigung – Phase 1

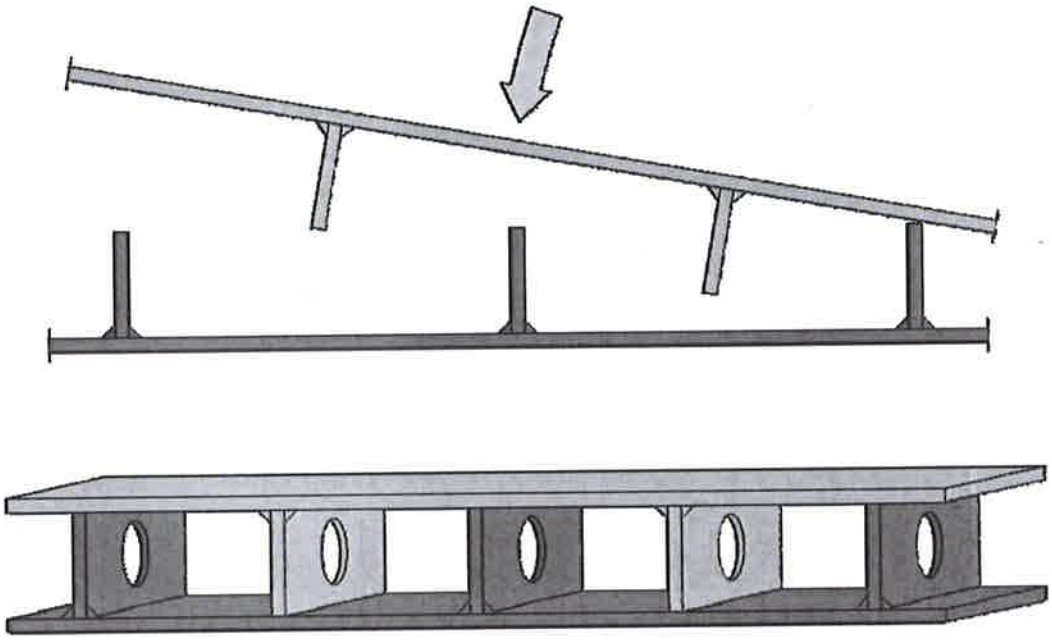
Anschweißen der Schubverbinder (Lochdübelleiste) jeweils am Deck- bzw. Bodenblech



Fertigungshalle Wilhelm Schmidt KG, Schwechat

Fertigung - Phase 2

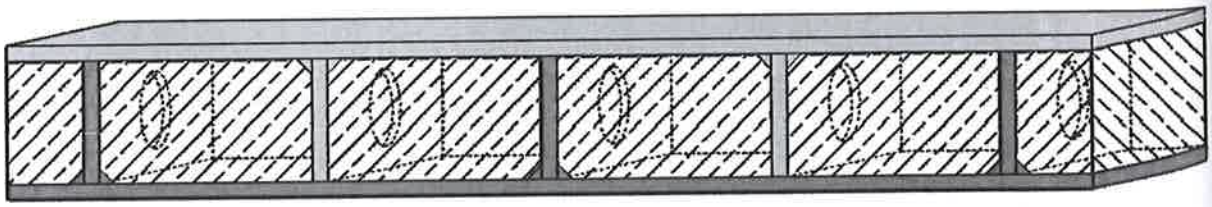
Zusammenbau Oberteil mit Unterteil



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Fertigung – Phase 3

Betonieren

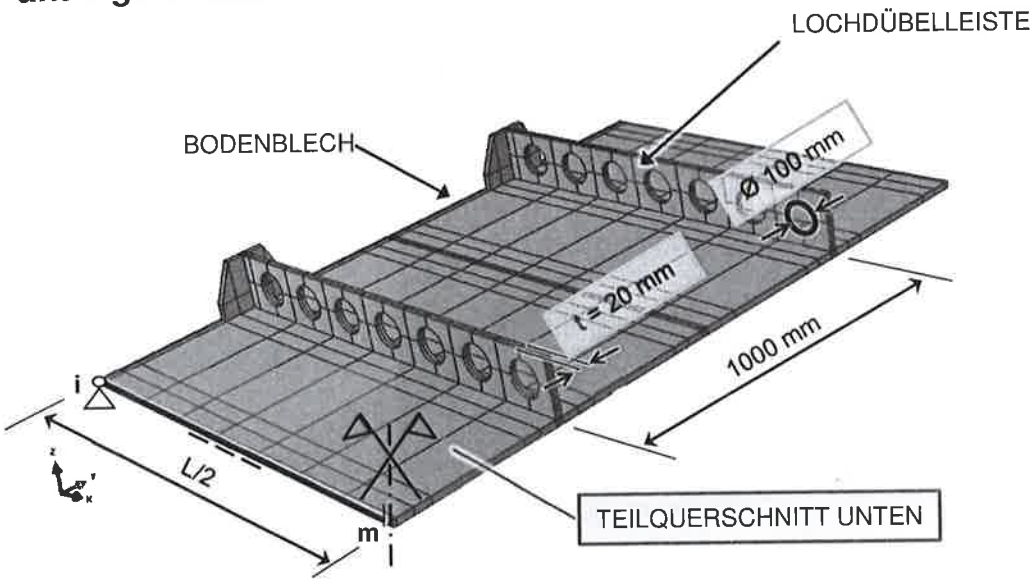


Sandwichlatte

SCSC: Steel – Concrete – Steel - Composite

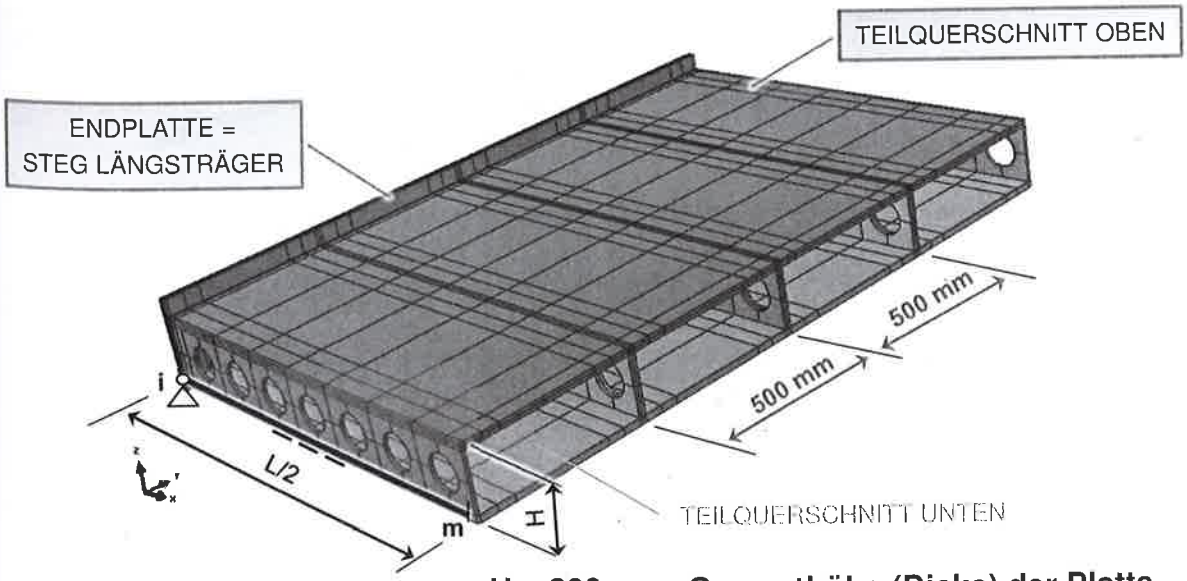
Bodenblech (t=15 mm) mit Lochdübelleisten (t=20 mm)

analog: Deckblech mit Lochdübelleisten



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Bodenblech und Deckblech mit Lochdübelleisten

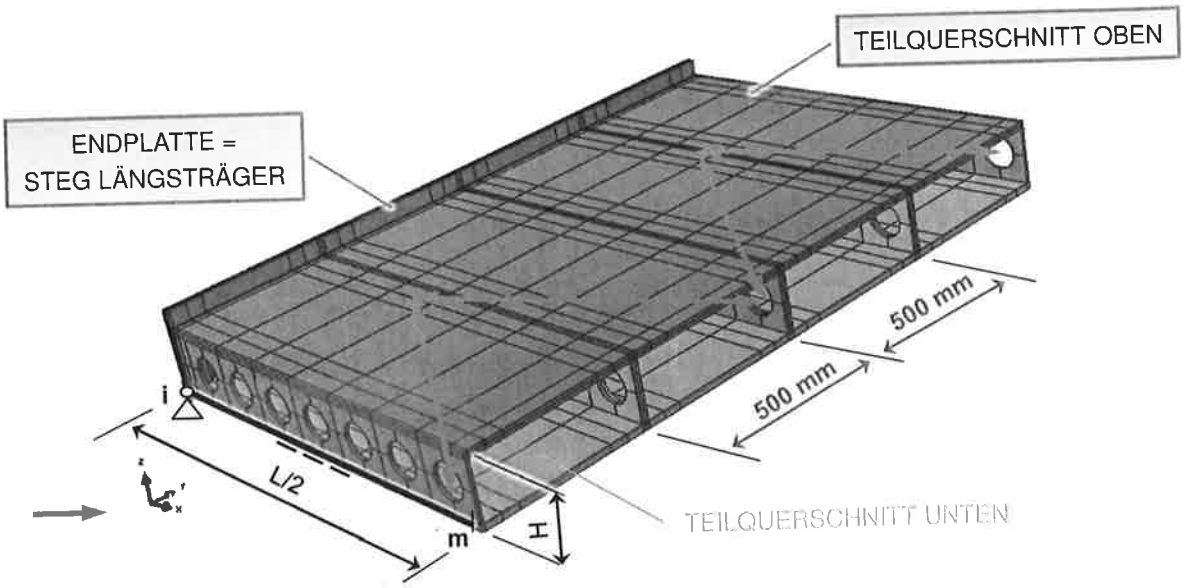


H = 200 mm: Gesamthöhe (Dicke) der Platte

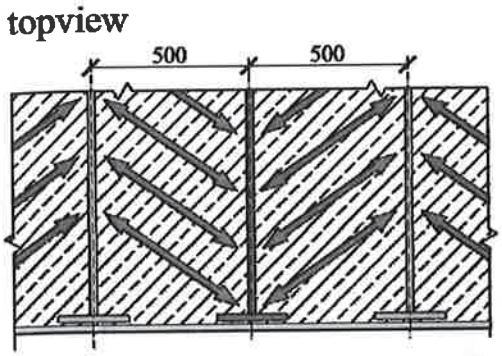
Tragmechanismus

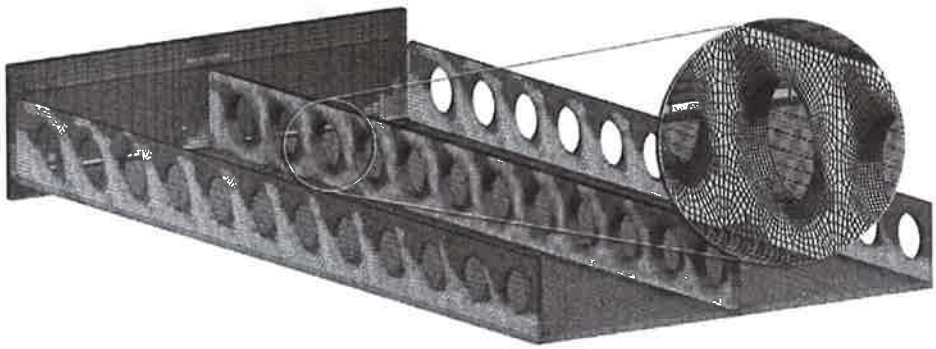
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Mechanismus Schubübertragung: „Betonstreben“ (Darstellung ohne Kernbeton)



Prinzip Tragmechanismus





Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

3.

Tragfähigkeit der SCSC-Platte

(ohne Ermüdung)

Vorversuche (Dübeltragfähigkeit)

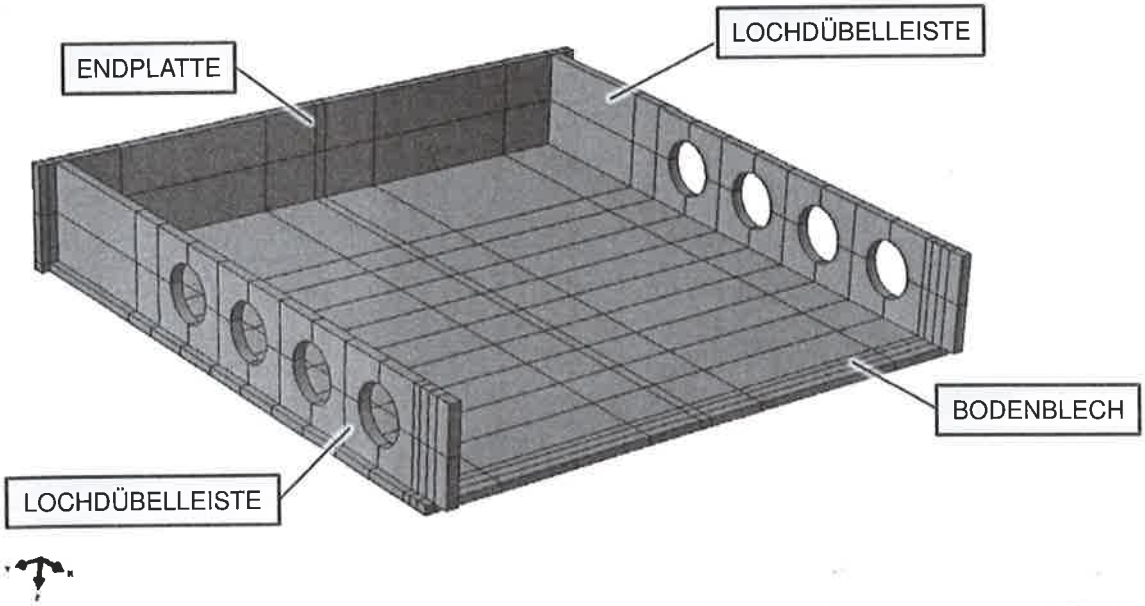
Hauptversuche (SCSC-Platte)

Maßstab 1:1

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Vorversuche zur Analyse der Dübeltragfähigkeit (ohne Ermüdung)

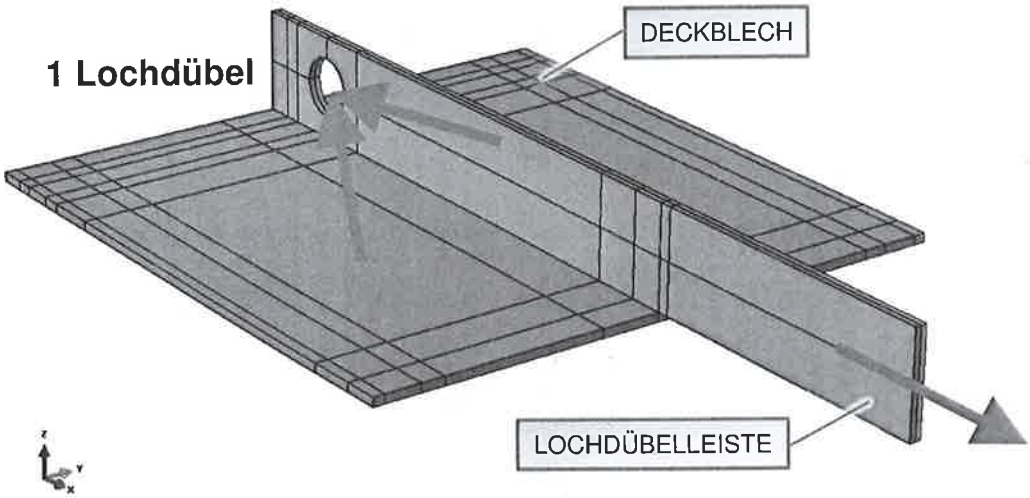
Aufbau Versuchskörper für Ausziehversuch



Unterer Teilquerschnitt des Versuchskörpers der Vorversuche der SCSC-Platte, QS-Typ 1

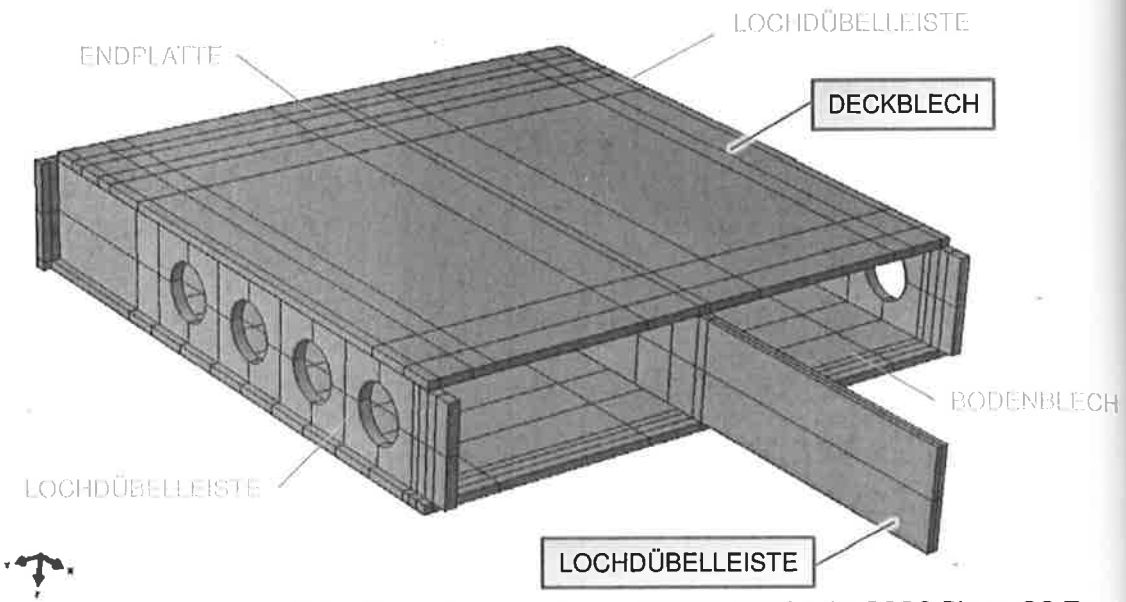
TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Aufbau Versuchskörper für Ausziehversuch



Oberer Teilquerschnitt des Versuchskörpers der Vorversuche der SCSC-Platte, QS-Typ 1

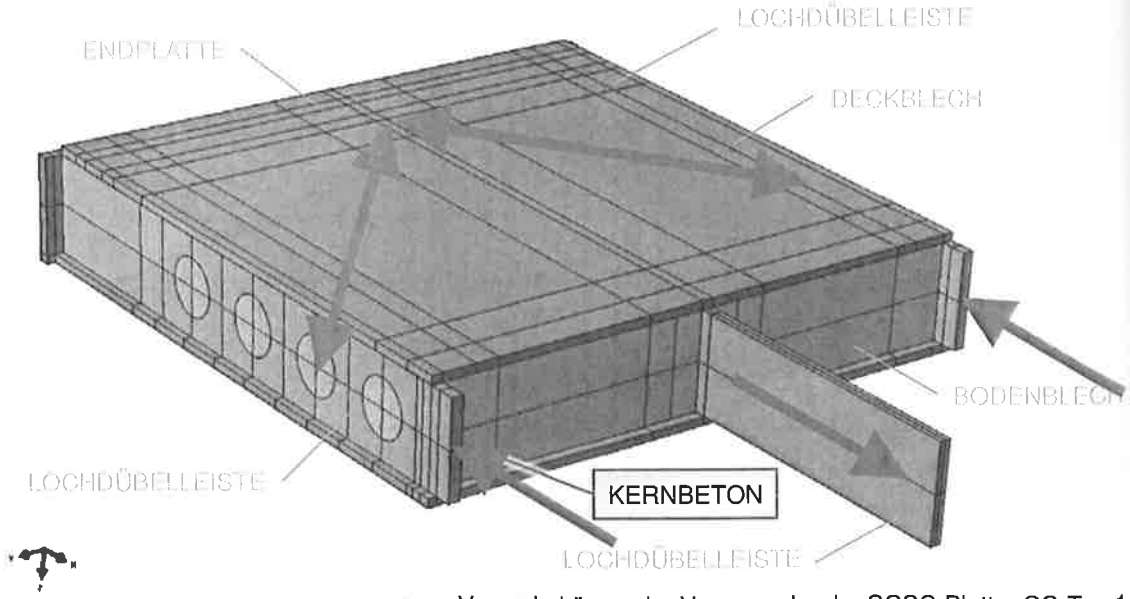
Aufbau Versuchskörper für Ausziehversuch



Stahlteile des Versuchskörpers der Vorversuche der SCSC-Platte, QS-Typ 1

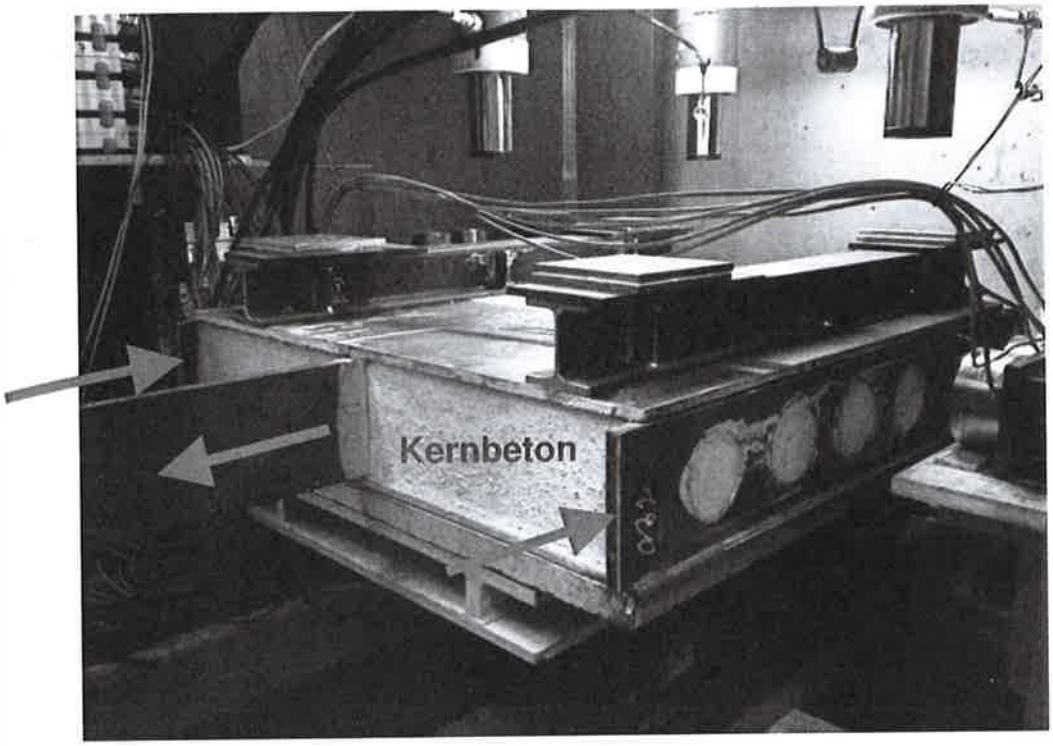
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Kraftmechanismus Ausziehversuch



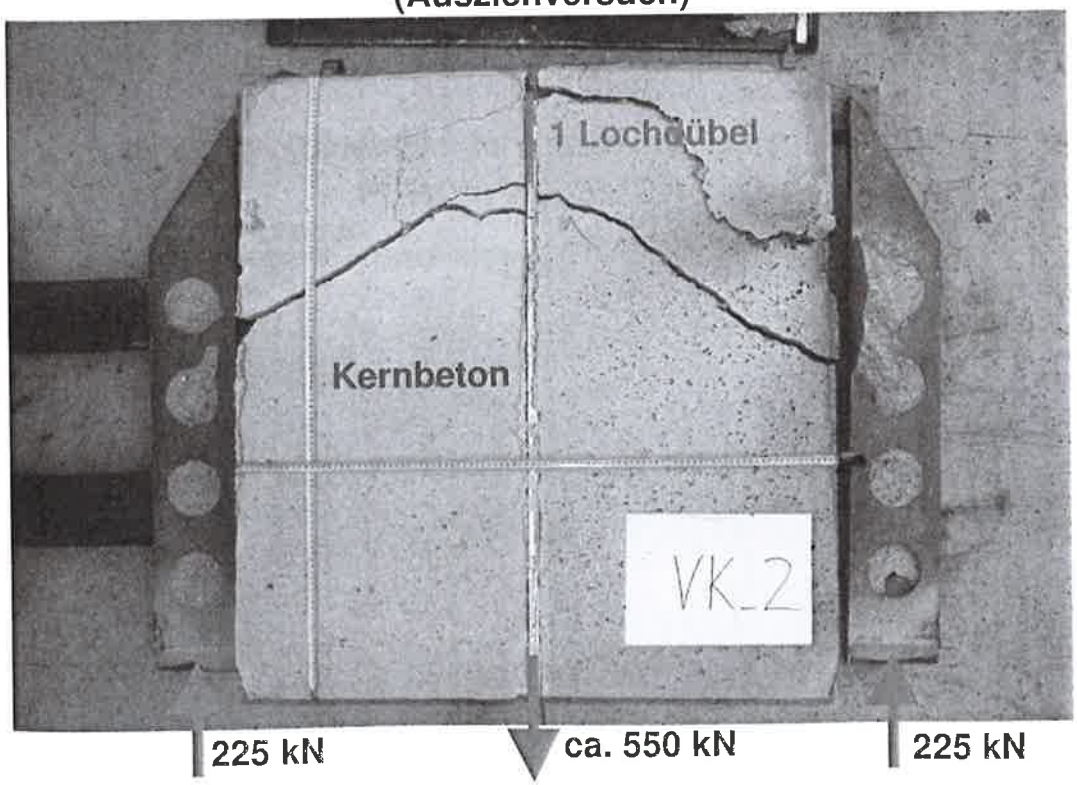
Versuchskörper der Vorversuche der SCSC-Platte, QS-Typ 1

Ausziehversuch

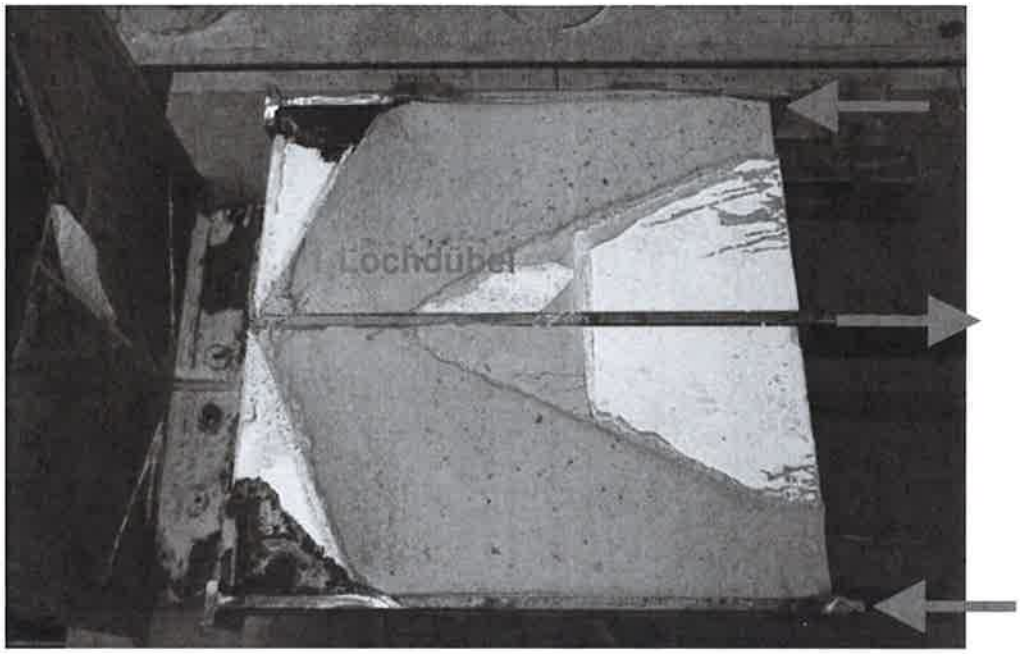


TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

geöffneter Versuchskörper (Ausziehversuch)



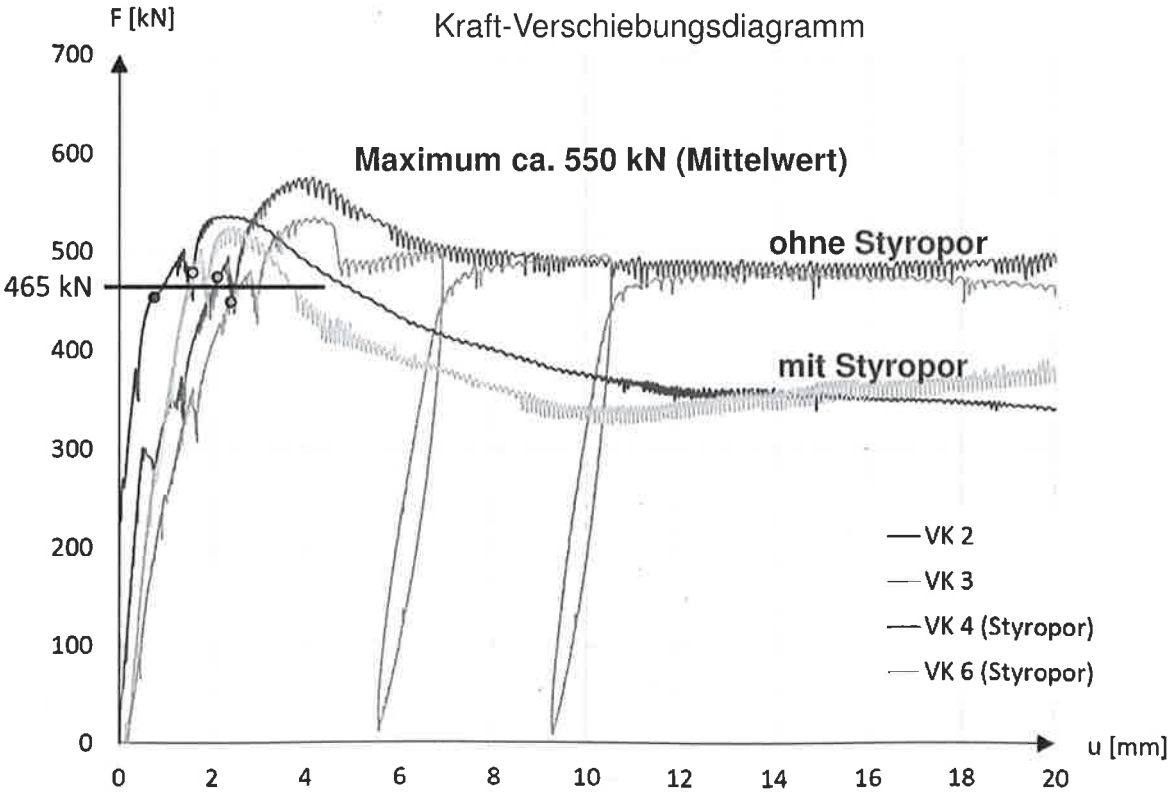
geöffneter Versuchskörper mit Styroporeinlage (Ausziehversuch)



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

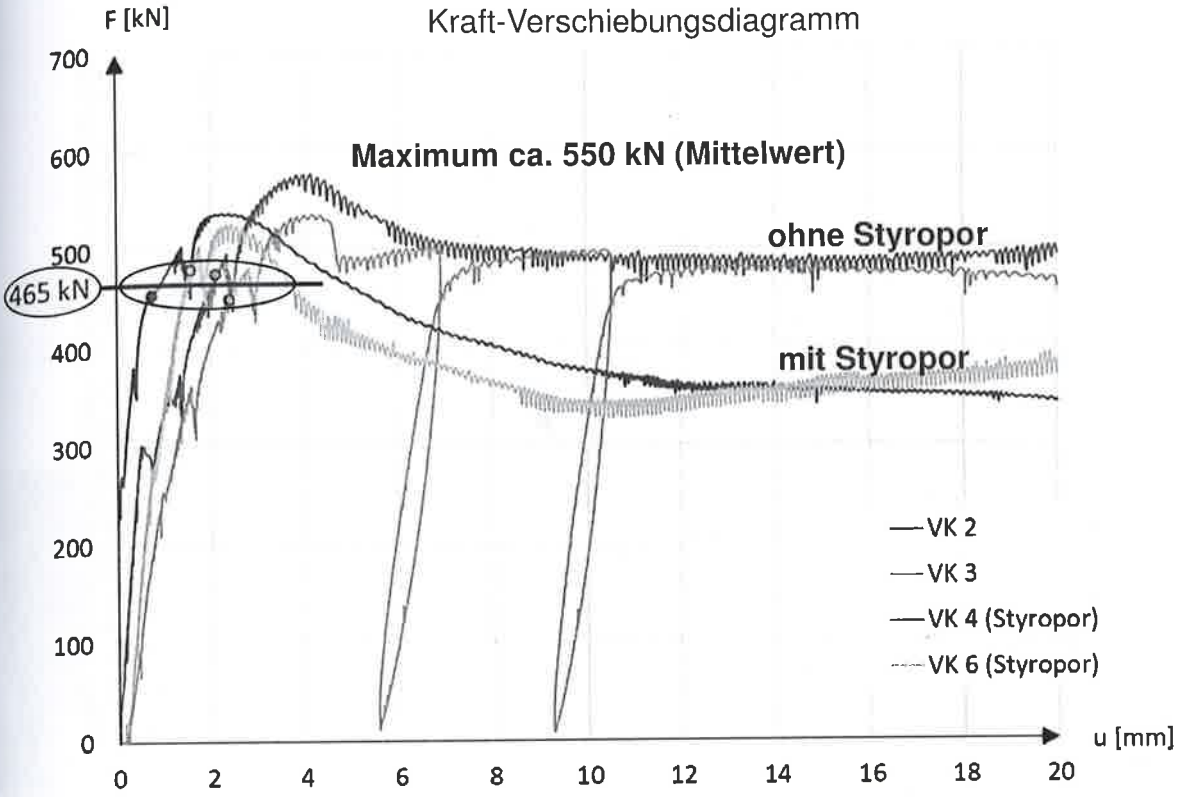
Arbeitslinien Ausziehversuche

Kraft-Verschiebungsdiagramm



Arbeitslinien Ausziehversuche

Kraft-Verschiebungsdiagramm



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

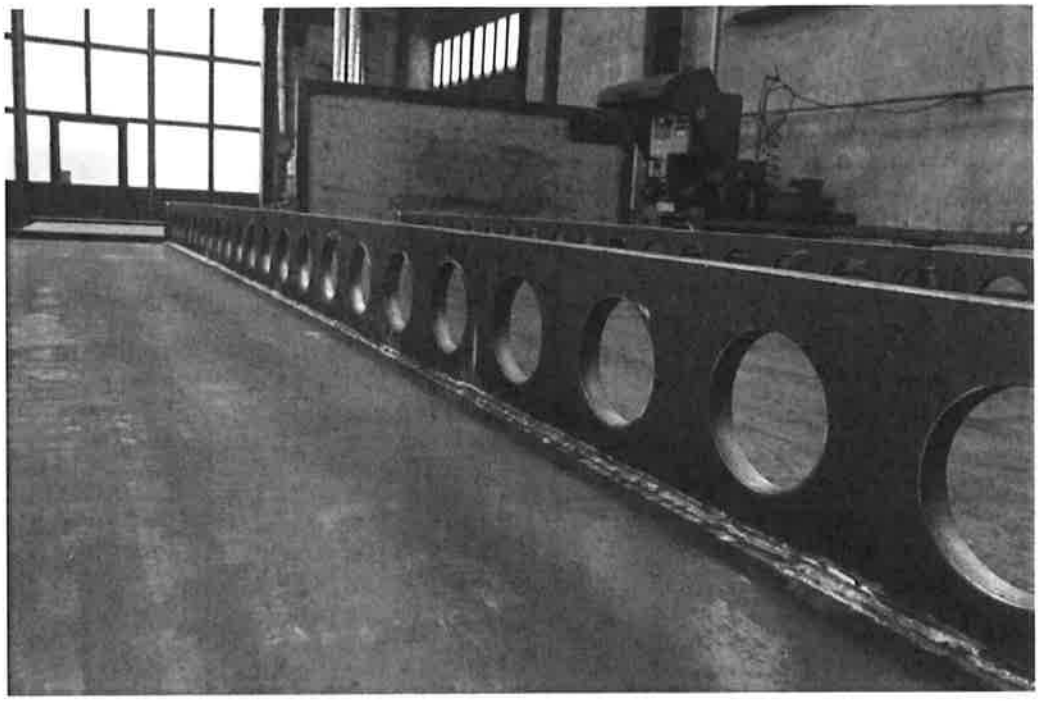
Hauptversuche
zur
Analyse der Tragfähigkeit der SCSC-Platte

Stützweite ca. 4,1 m (b = 3 m)

Maßstab 1:1

Herstellung einer SCSC-Platte

Anschweißen der Lochdübelleisten am Bodenblech

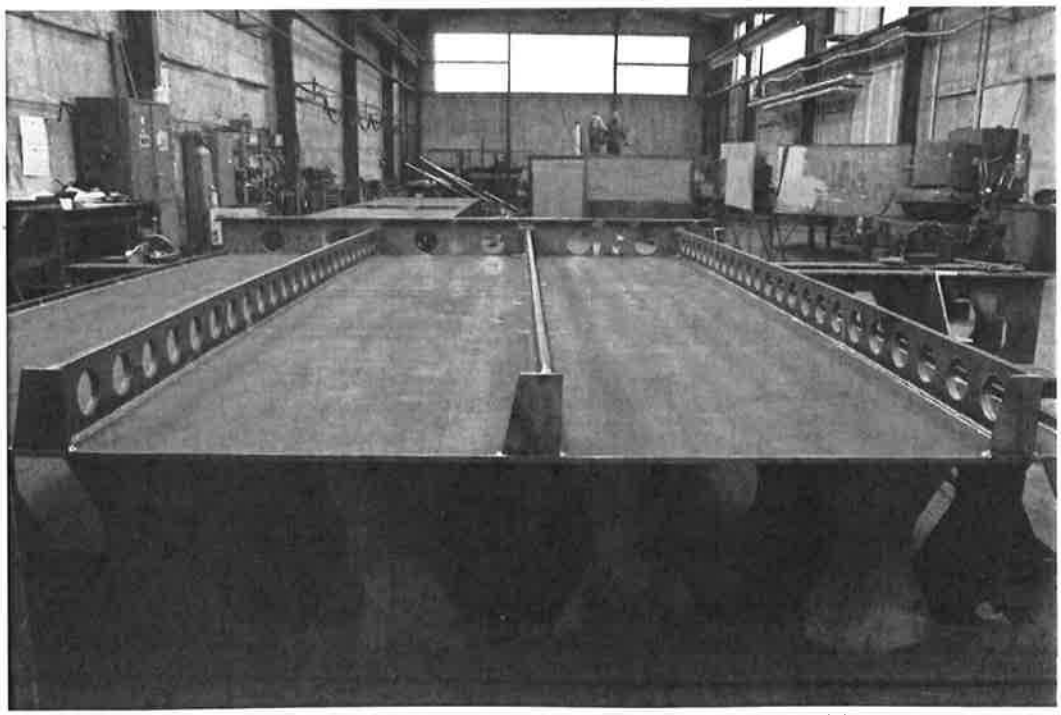


Fertigungshalle Wilhelm Schmidt KG, Schwechat

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Herstellung einer SCSC-Platte

Bodenblech mit Lochdübelleisten (analog Deckblech)



Fertigungshalle Wilhelm Schmidt KG, Schwechat

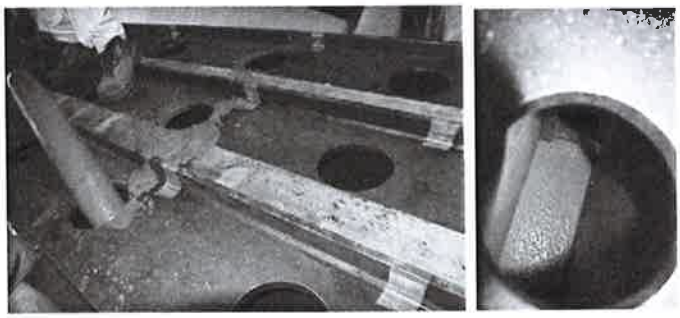
Herstellung einer SCSC-Platte

Stahlkonstruktion der Sandwich-Platte

Fertigungshalle Wilhelm Schmidt KG, Schwechat

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

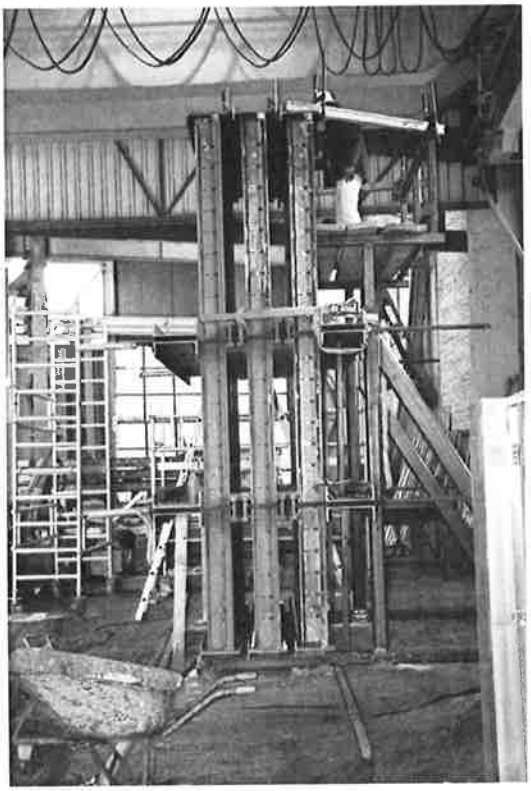
Herstellung einer SCSC-Platte



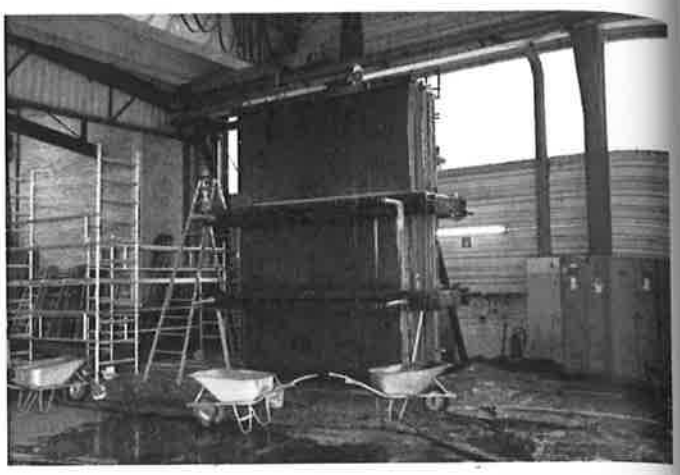
Betoniervorgang
(Füllung mit Kernbeton)

Fertigungshalle Wilhelm Schmidt KG, Schwechat

Herstellung einer SCSC-Platte



Aushärtung SCSC-Platte

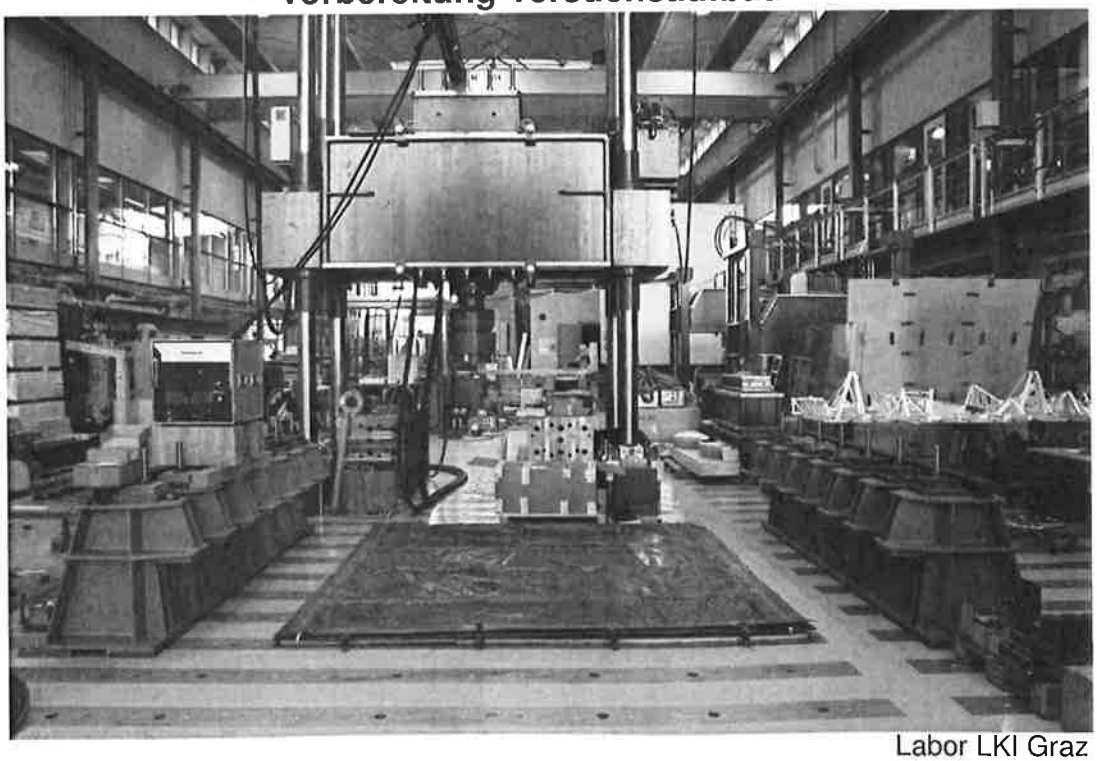


Fertigungshalle Wilhelm Schmidt KG, Schwechat

TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Traglastversuche SCSC-Platte

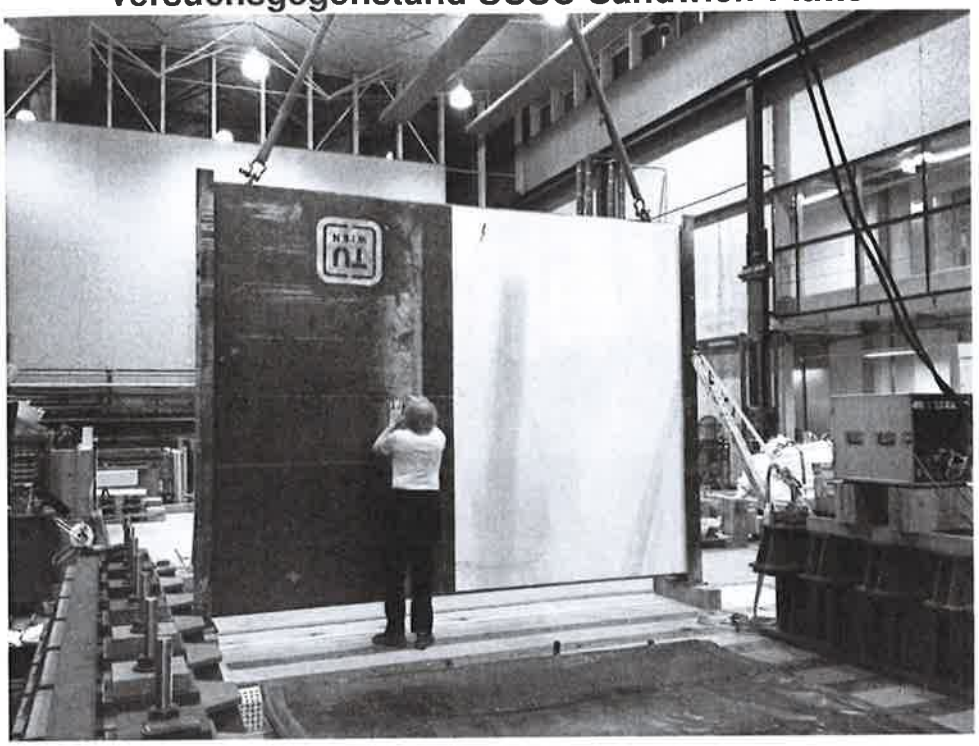
Vorbereitung Versuchsaufbau



Labor LKI Graz

Traglastversuche SCSC-Platte

Versuchsgegenstand SCSC-Sandwich-Platte

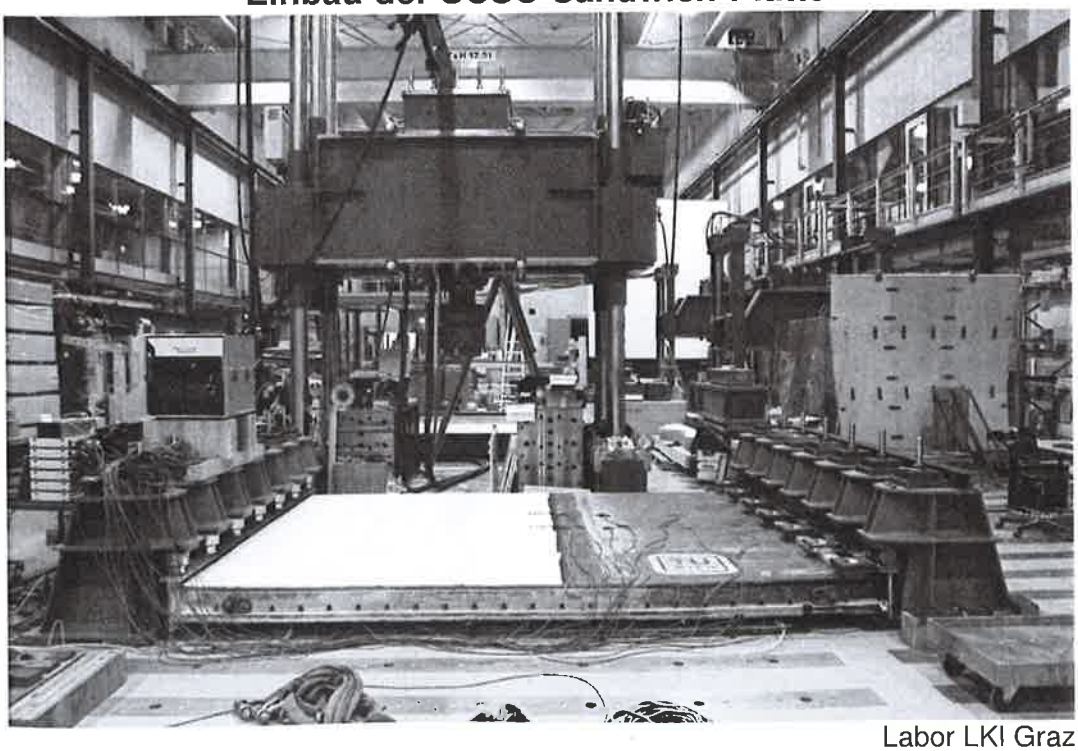


Labor LKI Graz

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Traglastversuche SCSC-Platte

Einbau der SCSC-Sandwich-Platte



Labor LKI Graz

Traglastversuche SCSC-Platte

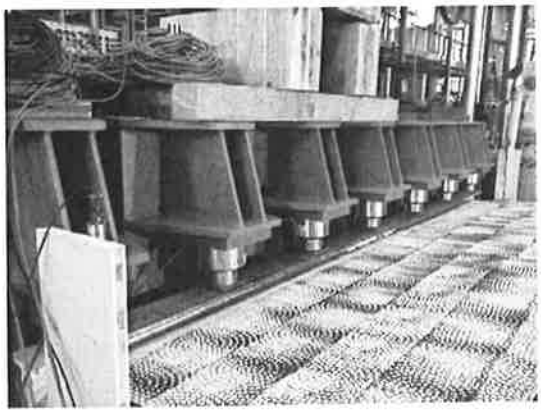
Kontrastmuster für 3D-photooptisches Messsystem

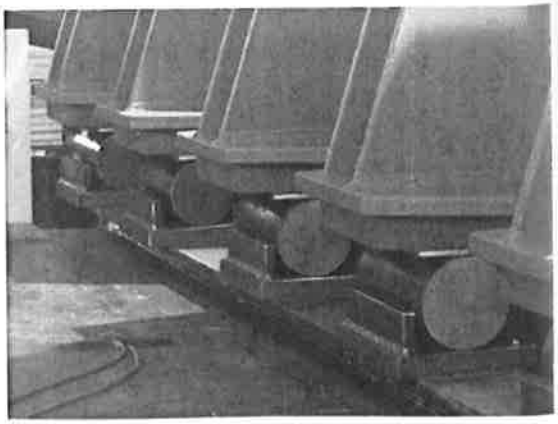
Labor LKI Graz

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

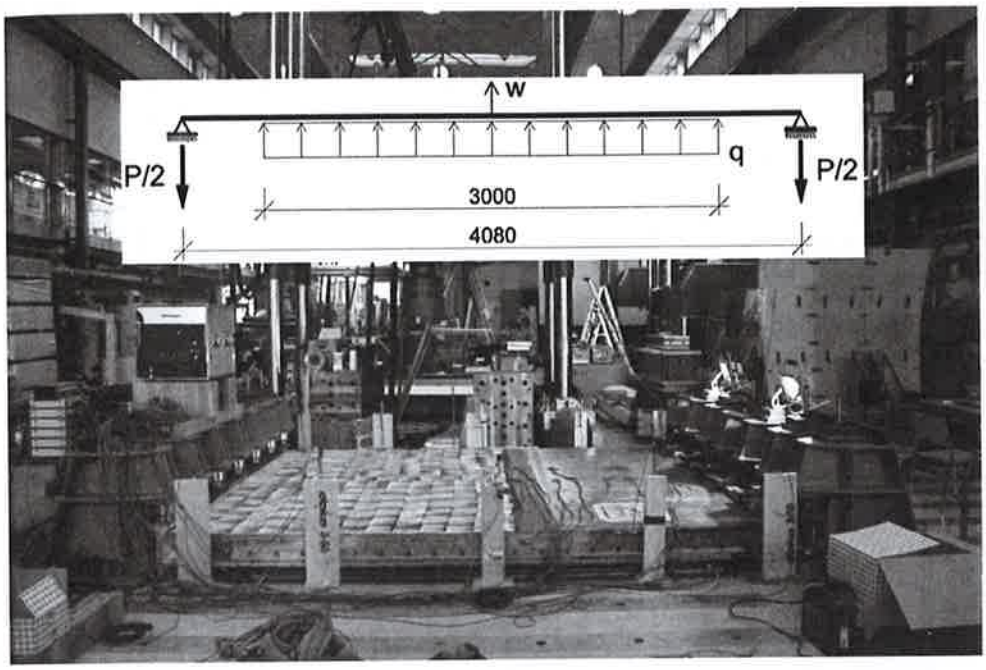
Traglastversuche SCSC-Platte

Lagerung der Platte
Kraftmessdosen, Rollenlager





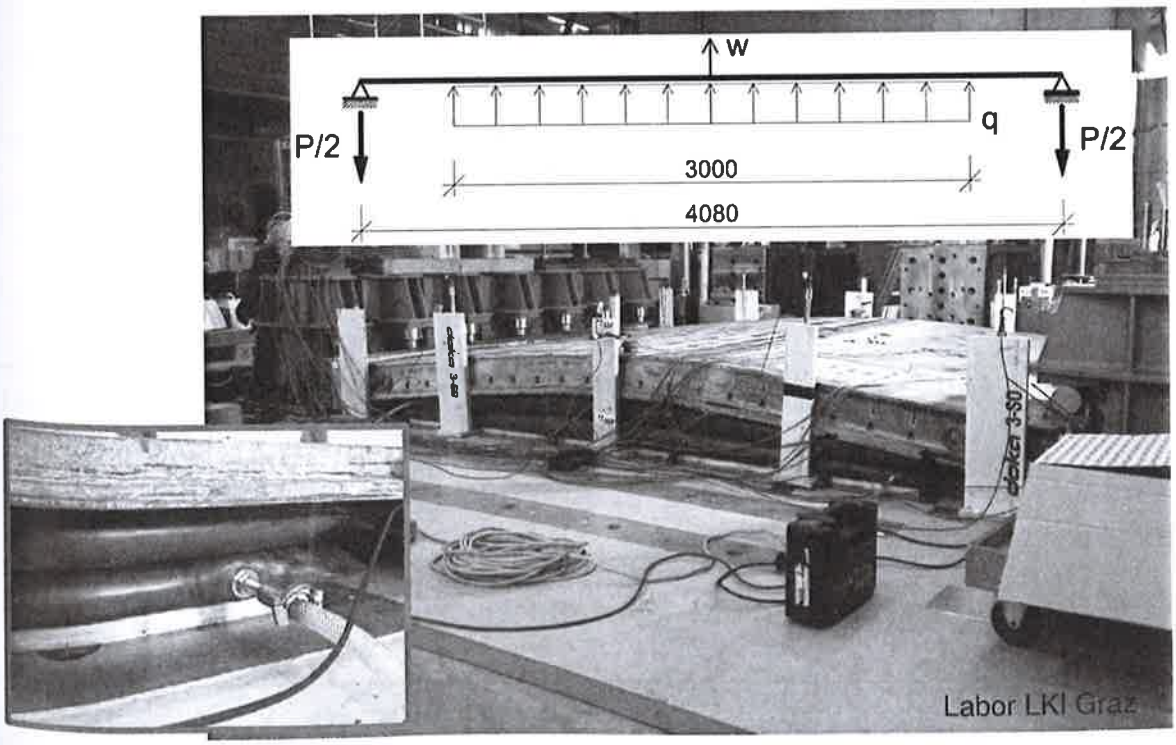
Traglastversuche SCSC-Platte
vor Versuchsdurchführung mit Instrumentierung



Labor LKI Graz

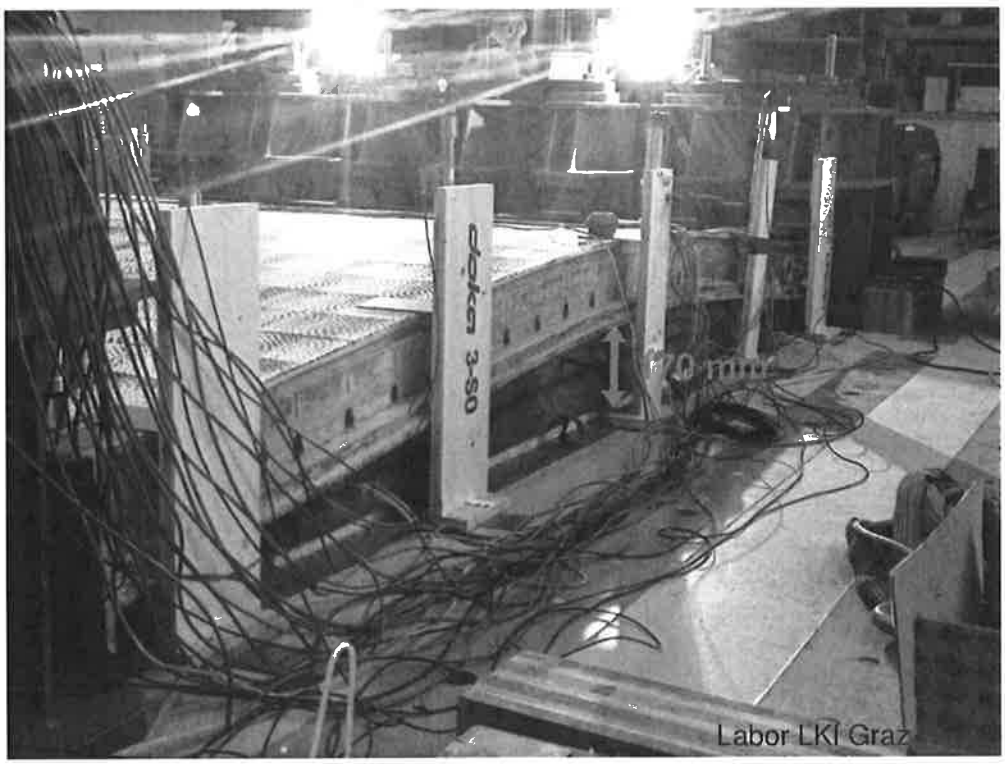
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Traglastversuche SCSC-Platte
nach Versuchsdurchführung

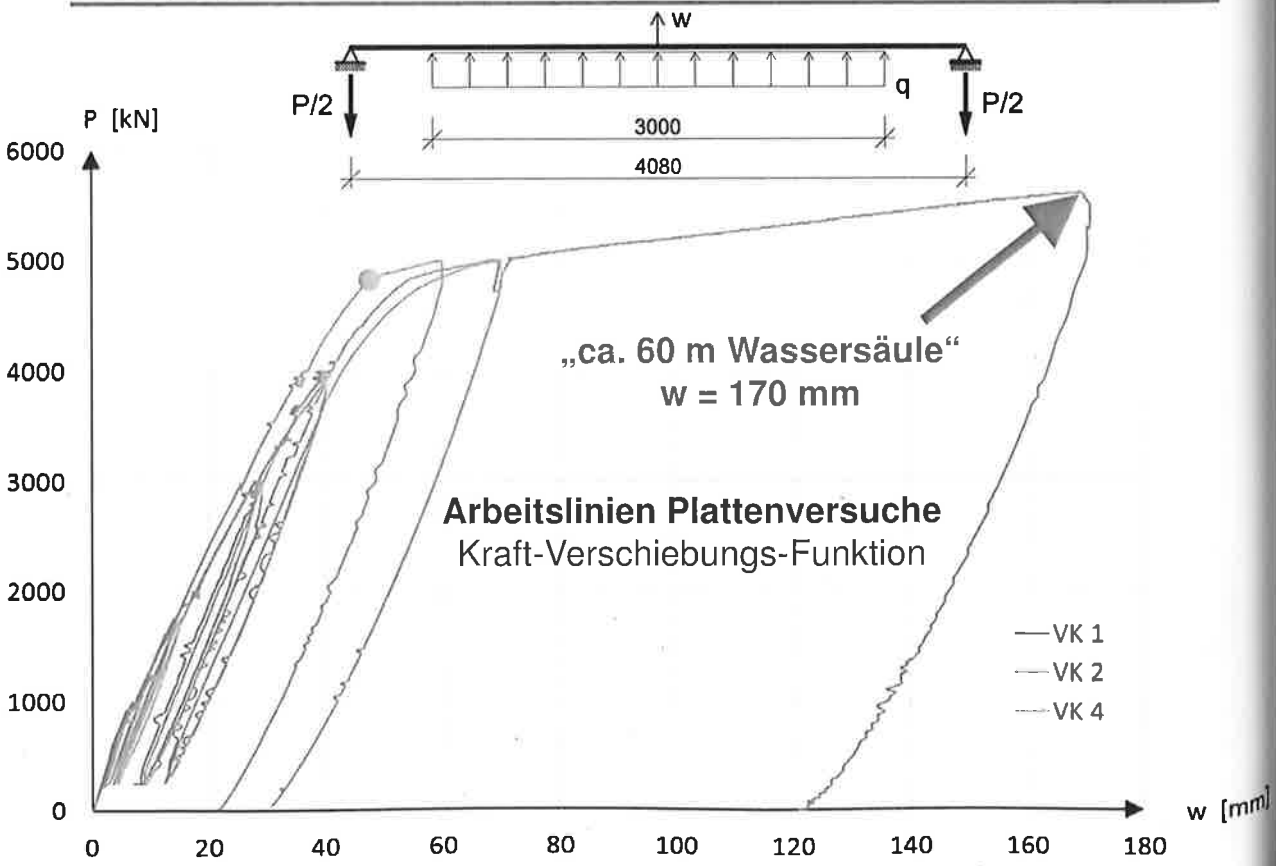


Traglastversuche SCSC-Platte

Durchbiegung in Feldmitte: 170 mm

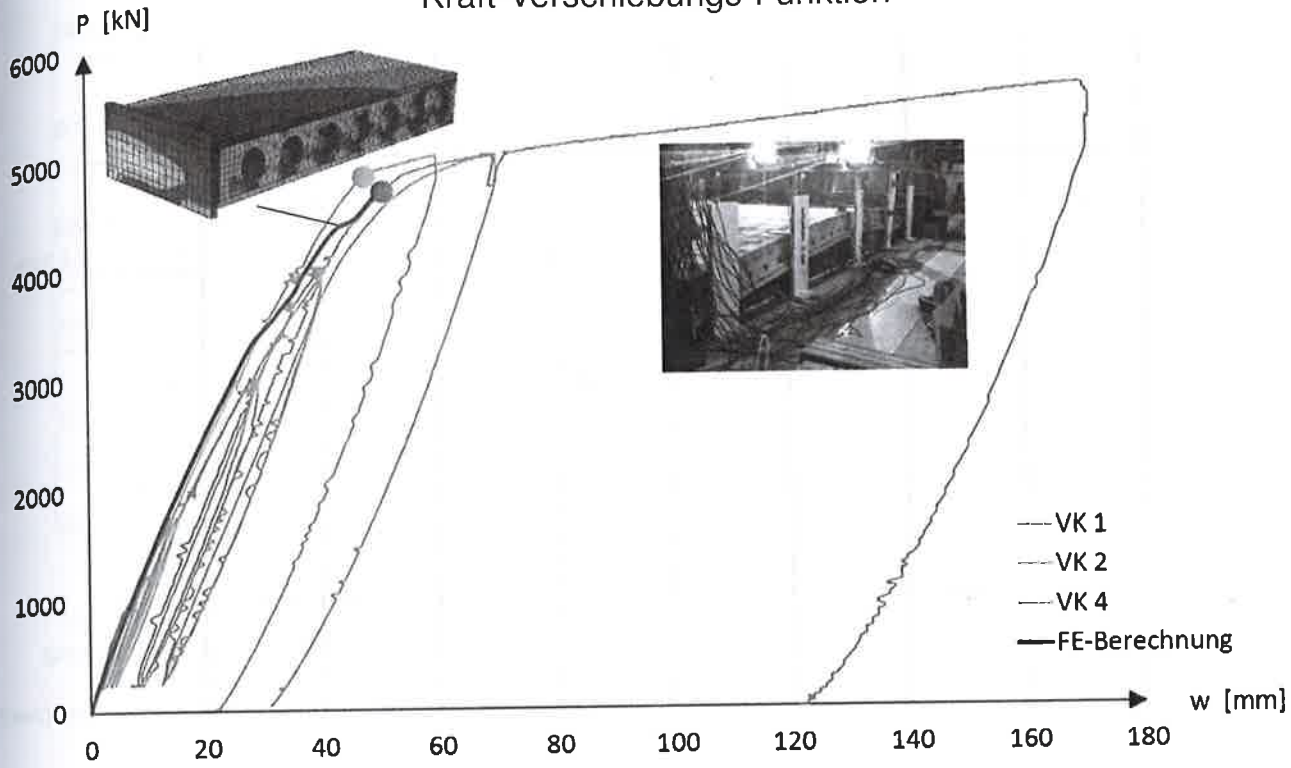


Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017



Arbeitslinien Plattenversuche + FE-Analyse

Kraft-Verschiebungs-Funktion

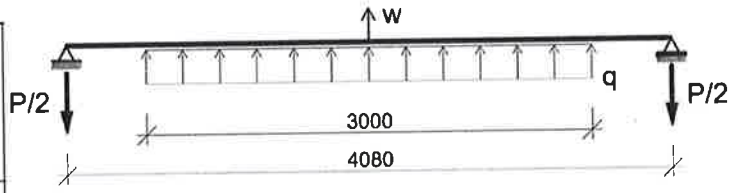


TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Vergleich Beanspruchung – Beanspruchbarkeit

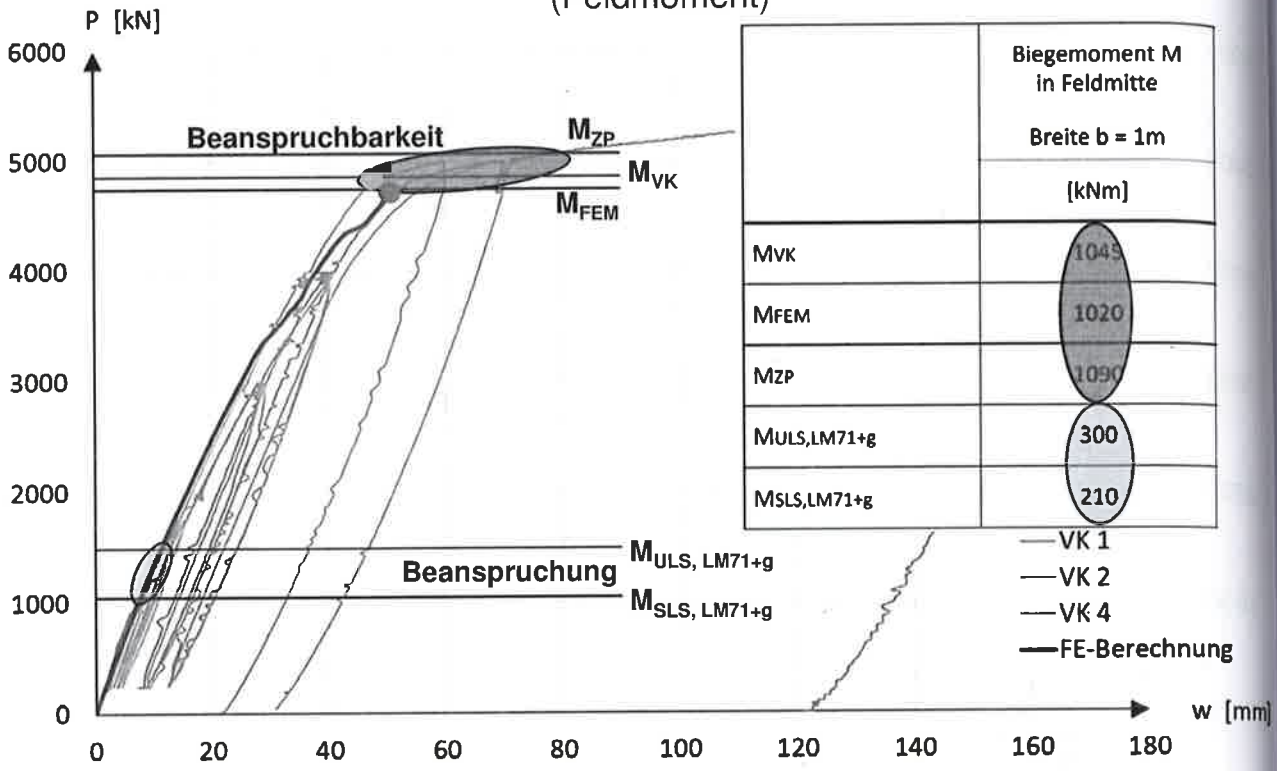
Biegemoment Feldmitte

	Biegemoment M in Feldmitte Breite b = 1m [kNm]	
M_{VK}	1045	Beanspruchbarkeit aus Plattenversuch
M_{FEM}	1020	Beanspruchbarkeit aus FE-Analyse
M_{ZP}	1090	Beanspruchbarkeit aus Zweipunktquerschnitt
$M_{ULS,LM71+g}$	300	**Beanspruchung ULS: LM71+g**
$M_{SLS,LM71+g}$	210	**Beanspruchung SLS: LM71+g**



Vergleichsbetrachtungen

(Feldmoment)



	Biegemoment M in Feldmitte Breite b = 1m [kNm]
M_{VK}	1045
M_{FEM}	1020
M_{ZP}	1090
$M_{ULS,LM71+g}$	300
$M_{SLS,LM71+g}$	210

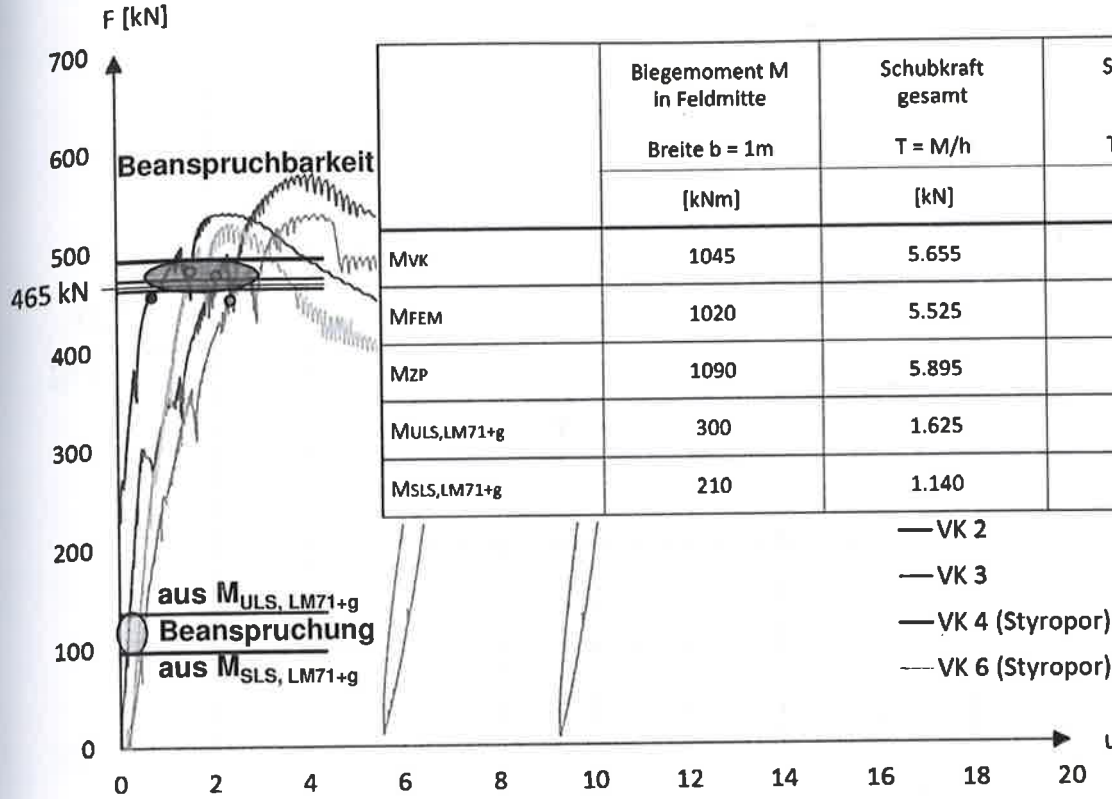
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Schubkräfte je Dübel

(Platte)

	Biegemoment M in Feldmitte Breite b = 1m [kNm]	Schubkraft gesamt T = M/h [kN]	Schubkraft je Dübel T_{12} = T/12 [kN]
M_{VK}	1045	5.655	470
M_{FEM}	1020	5.525	460
M_{ZP}	1090	5.895	490
$M_{ULS,LM71+g}$	300	1.625	135
$M_{SLS,LM71+g}$	210	1.140	95

Vergleich der Dübelkräfte mit Ausziehversuch



	Biegemoment M in Feldmitte Breite b = 1m	Schubkraft gesamt T = M/h	Schubkraft je Dübel $T_{12} = T/12$
	[kNm]	[kN]	[kN]
M_{VK}	1045	5.655	470
M_{FEM}	1020	5.525	460
M_{ZP}	1090	5.895	490
$M_{ULS,LM71+g}$	300	1.625	135
$M_{SLS,LM71+g}$	210	1.140	95

4.

Grundlagen des Kerbdehnungskonzeptes für Ermüdungsanalysen

Nachweiskonzepte der Lebensdauerberechnung

rechnerischer Betriebsfestigkeitsnachweis

experimenteller Betriebsfestigkeitsnachweis

Übersicht Nachweiskonzepte zur Lebensdauerberechnung

- Nennspannungskonzept
- Strukturspannungskonzept
- Kerbspannungskonzept
- Kerbdehnungskonzept

Versagenskriterium Anrissbeginn

- Bruchmechanikkonzept

Versagenskriterium Bruch

Quelle: [1]

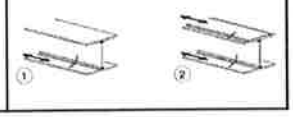
Grundidee zum Ermüdungsnachweis der Lochdübelleiste

Allgemeines Nachweisformat

$$E_d \leq R_d$$

Ermüdungsnachweis mit Nennspannungskonzept

$$\Delta\sigma_{Ed} \leq \Delta\sigma_{Rd} = f($$

Kerbfall	Konstruktionsdetail
125	

$$)$$

Alternative Formulierung des Nennspannungskonzeptes

$$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd} = f($$

Kerbfall	Konstruktionsdetail
125	

$$)$$

Quelle: ÖNORM EN 1993-1-9

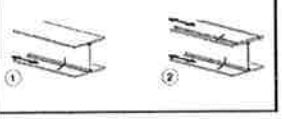
Grundidee zum Ermüdungsnachweis der Lochdübelleiste

Allgemeines Nachweisformat

$$E_d \leq R_d$$

Ermüdungsnachweis mit Nennspannungskonzept

$\Delta\sigma_{Ed} \leq \Delta\sigma_{Rd} = f($

Kerbfall	Konstruktionsdetail
125	

$)$

Alternative Formulierung des Nennspannungskonzeptes

$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd} = f($

Kerbfall	Konstruktionsdetail
125	

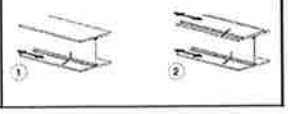
$)$

Quelle: ÖNORM EN 1993-1-9

Ermüdungsnachweis der Lochdübelleiste

Alternative Formulierung des Nennspannungskonzeptes

$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd} = f($

Kerbfall	Konstruktionsdetail
125	

$)$

Wöhlerlinie für Kerbdetail

Methode auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd} = f($ $)$

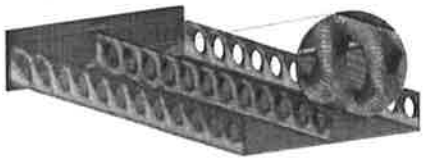
Wöhlerlinie für Konstruktionssystem

Quelle: ÖNORM EN 1993-1-9

Rechnerische Ermittlung der Wöhlerlinie auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

$$P_{LM71,\,Rd} = f(N)$$

Wöhlerlinie für die Lochdübelleiste
für das
Konstruktionssystem Sandwichplatte
(Stahl + Kernbeton)



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

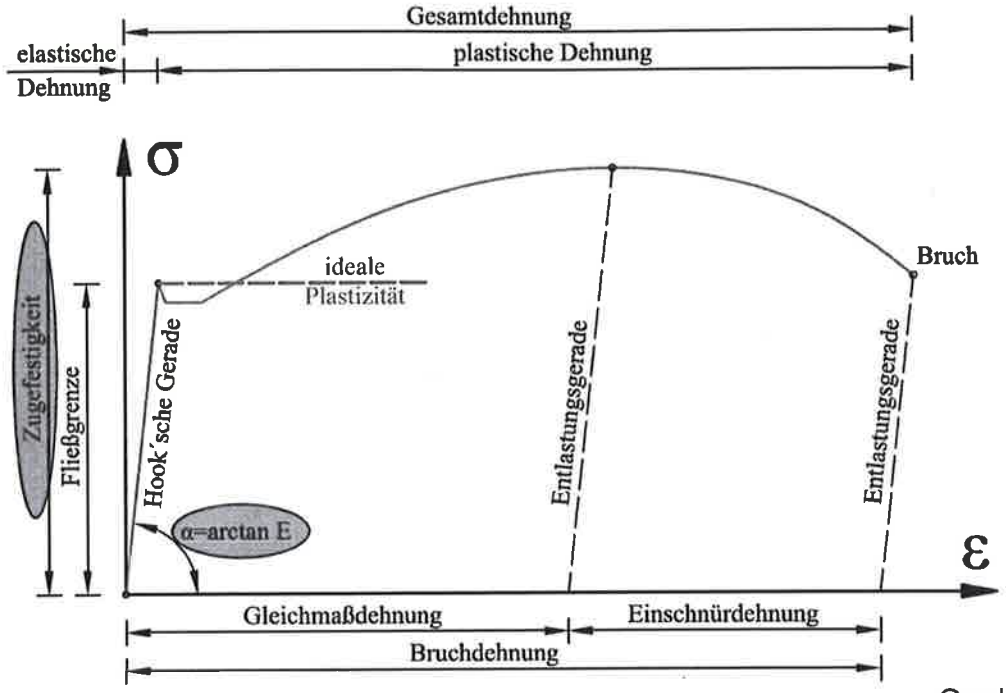
Spannungs-Dehnungsgrößen zur Schädigungsbewertung:

$$\sigma_a,\ \varepsilon_a,\ \sigma_m$$

für die maßgebliche Kerbstelle

auf Basis der <u>zyklischen Arbeitslinie</u> von Stahl

Statisches Spannungs-Dehnungsverhalten

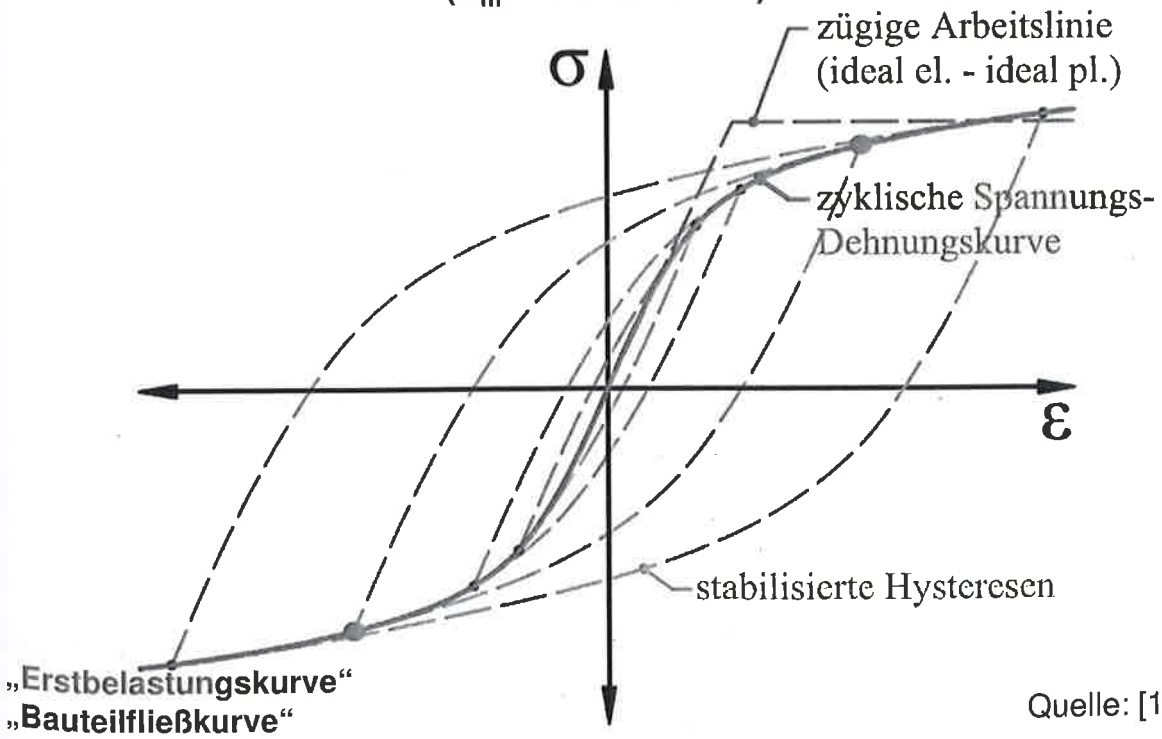


Quelle: [1]

TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

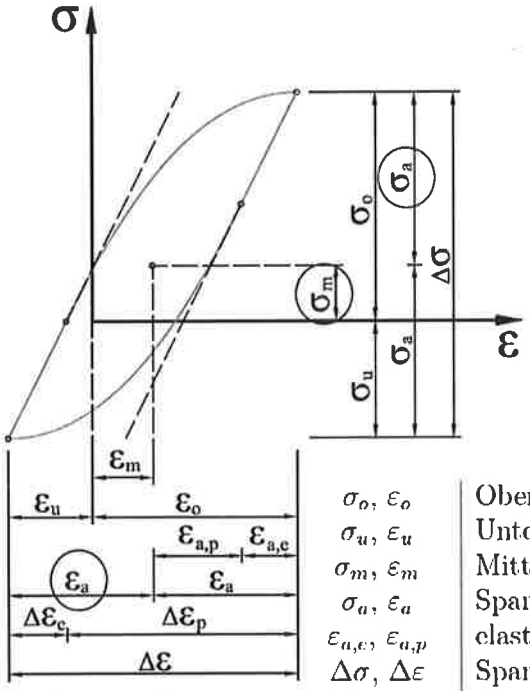
Materialgesetz für zyklische Beanspruchungen

(σ_m = 0 oder R = -1)



Quelle: [1], [2]

Zyklisches Spannungs-Dehnungsverhalten



Quelle: [1], [2]

Spannungs-Dehnungs-Hysterese ($\sigma_m \neq 0$)

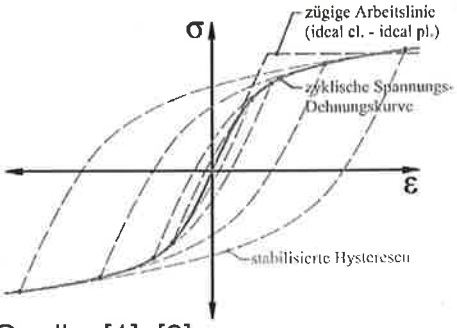
σ_o, ε_o	Oberspannung und -dehnung
σ_u, ε_u	Unterspannung und -dehnung
σ_m, ε_m	Mittelspannung und -dehnung
σ_a, ε_a	Spannungs- und Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,e}$, $\varepsilon_{a,p}$	elastischer und plastischer Anteil der Dehnungsamplitude
$\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$	Spannungs- und Dehnungsschwingbreite
$\Delta\varepsilon_e$, $\Delta\varepsilon_p$	elastischer und plastischer Anteil der Dehnungsschwingbreite

Analytische Formulierung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve ($\sigma_m = 0$)

***Coffin-Manson-Marrow*-Formulierung:**

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma_a}{E}}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f}\right)^{\frac{c}{b}} \varepsilon'_f}_{\varepsilon_{a,p}}$$

***Ramberg-Osgood*-Beziehung:**



Quelle: [1], [2]

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma_a}{E}}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}}_{\varepsilon_{a,p}}$$

E statischer E-Modul
K´ zyklischer Verfestigungskoeffizient
n´ zyklischer Verfestigungsexponent

„Uniform Material Law“ nach *Bäumel-Seeger (niedrig legierte Stähle)*

Zyklisches Werkstoffgesetz (*Ramberg-Osgood*) + **Zyklische Werkstoffparameter**

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma_a}{E}}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}}_{\varepsilon_{a,p}}$$

$$\begin{aligned} K' &= \sigma'_f \; \varepsilon'^{-n}_f \\ n' &= b/c \\ \sigma'_f &= 1,50 \; R_m \\ \epsilon'_f &= 0,59 \; \Psi \\ b &= -0,087 \\ c &= -0,58 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi &= 1,0 && \text{für} \quad R_m/E \leq 3 \cdot 10^{-3} \\ \Psi &= 1,375 - 125 \; R_m/E && \text{für} \quad R_m > 3 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Alleinige Eingangsgrößen für das Werkstoffgesetz:

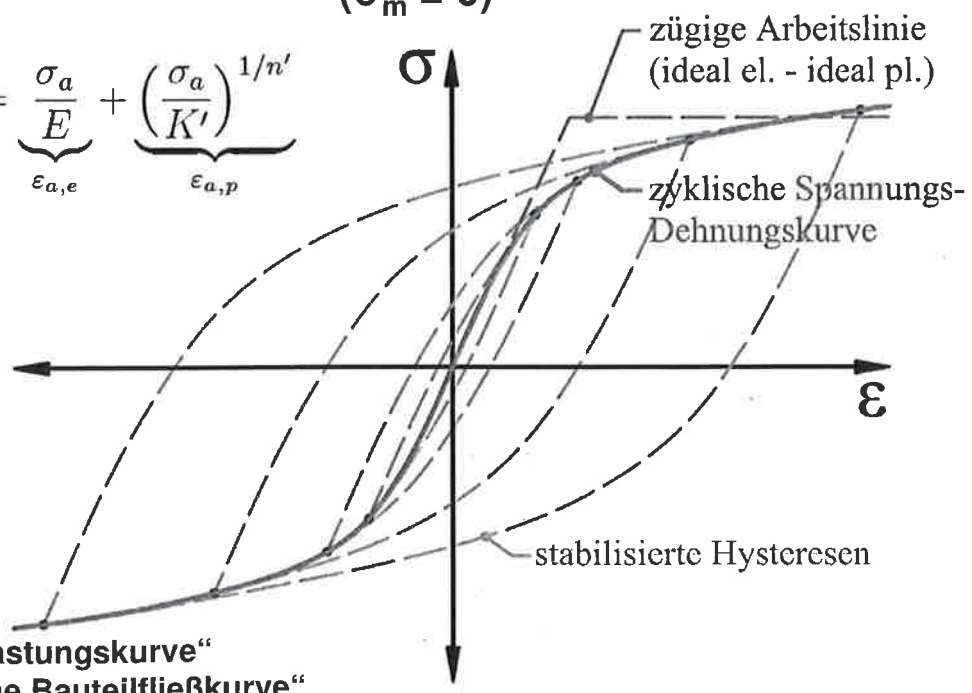
E statischer E-Modul

R_m statische Zugfestigkeit

Quelle: [1], [2]

Materialgesetz für zyklische Beanspruchungen ($\sigma_m = 0$)

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma_a}{E}}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}}_{\varepsilon_{a,p}}$$



„Erstbelastungskurve“
„zyklische Bauteilfließkurve“

Quelle: [1], [2]

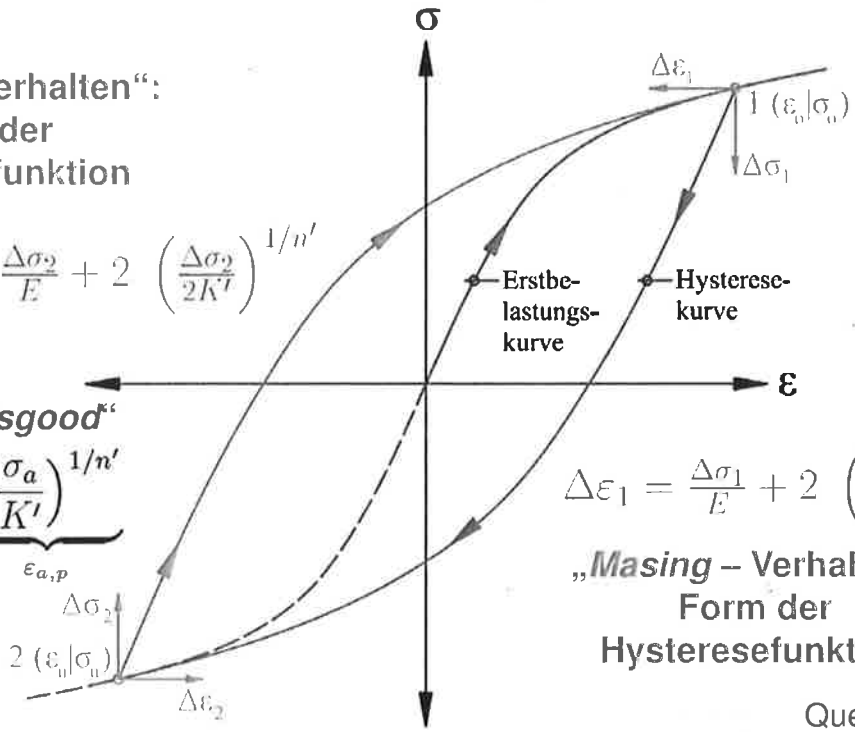
Gesetz für die Spannungs-Dehnungs-Hysterese bei reiner Wechselbeanspruchung

„*Masing* – Verhalten“:
Form der
Hysteresefunktion

$$\Delta\varepsilon_2 = \frac{\Delta\sigma_2}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma_2}{2K'}\right)^{1/n'}$$

„*Ramberg-Osgood*“

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma_a}{E}}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}}_{\varepsilon_{a,p}}$$



$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma_1}{2K'}\right)^{1/n'}$$

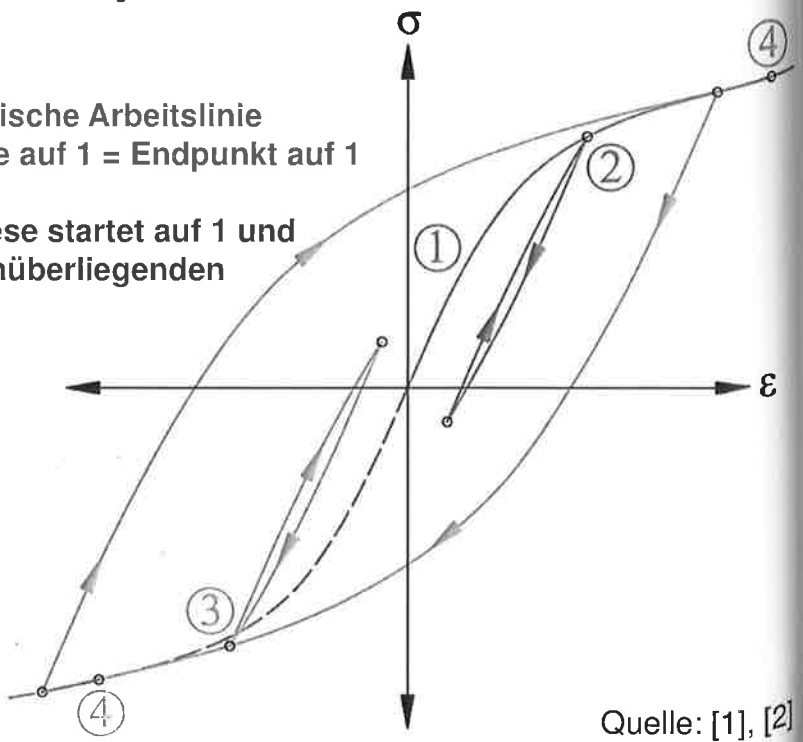
„*Masing* – Verhalten“:
Form der
Hysteresefunktion

Quelle: [1], [2]

Gesetz zur Beschreibung des Werkstoffgedächtnisses „Memory – Verhalten“

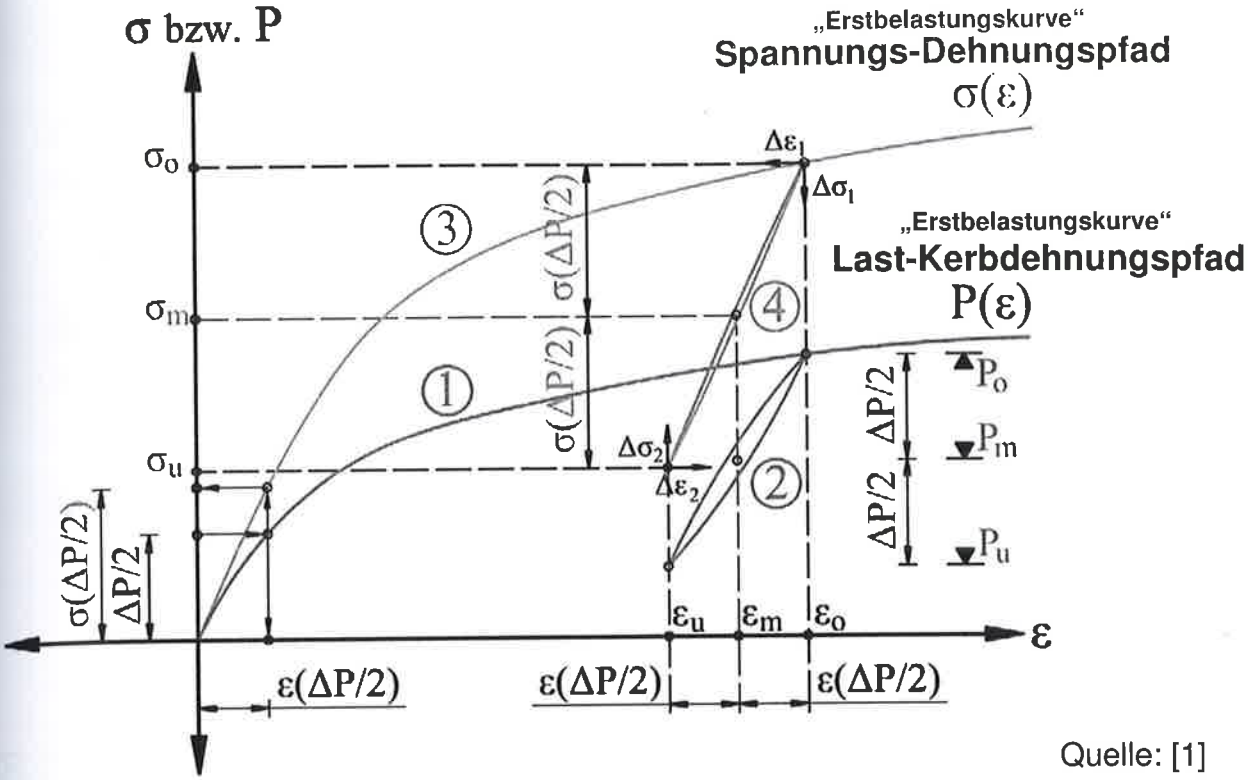
4 Regeln

Regel 1: Erstbelastung = zyklische Arbeitslinie
Regel 2: Startpunkt Hysterese auf 1 = Endpunkt auf 1
...
Regel 4: Vollständige Hysterese startet auf 1 und endet auf 1 im gegenüberliegenden Quadranten



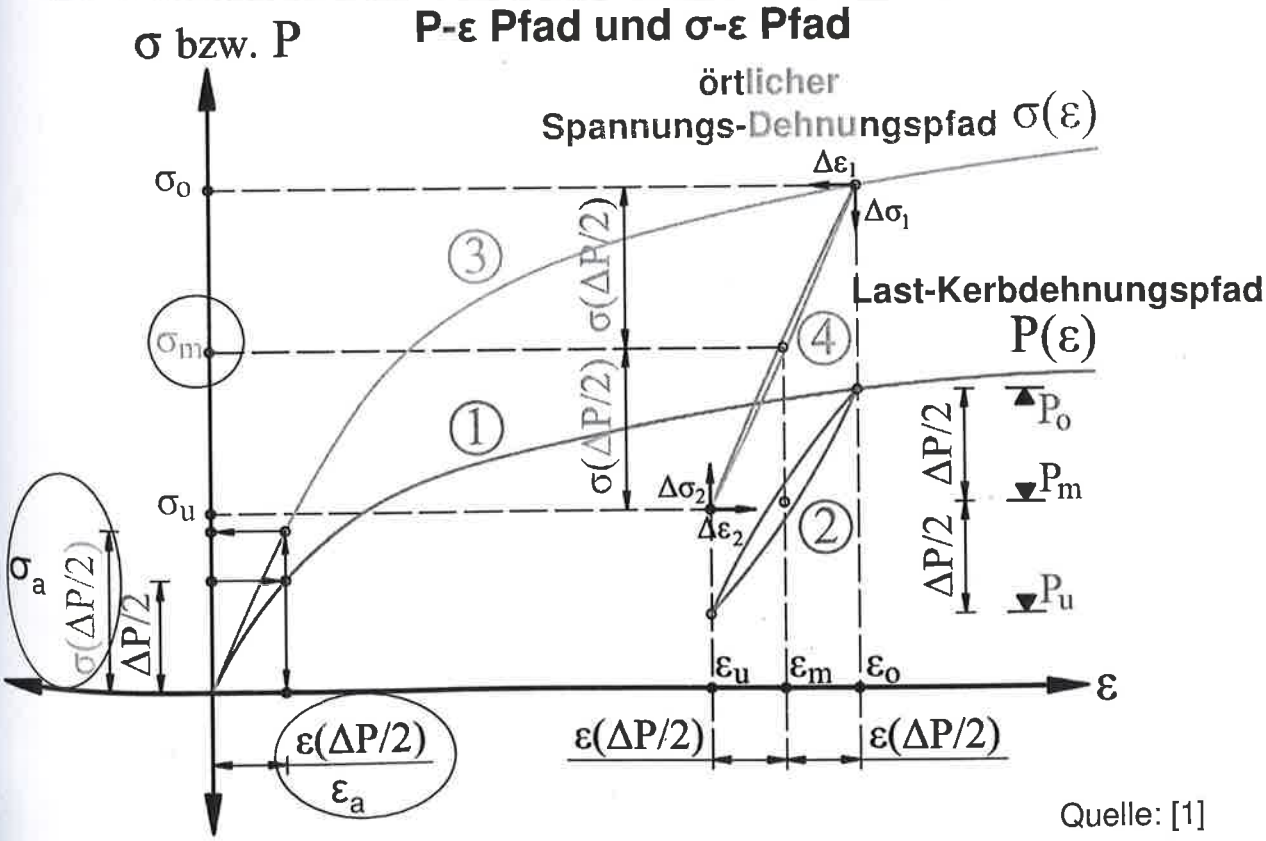
Quelle: [1], [2]

P-ε Pfad und σ-ε Pfad für eine Kerbstelle



Quelle: [1]

P-ε Pfad und σ-ε Pfad



Quelle: [1]

Schädigungsbewertung mit Berücksichtigung der Mittelspannung $\sigma_m \neq 0$

Dehnungs-Wöhlerlinie (für $\sigma_m = 0$) nach *Coffin, Manson und Marrow:*

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma'_f}{E}\,(2N)^b}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\varepsilon'_f\,(2N)^c}_{\varepsilon_{a,p}}$$

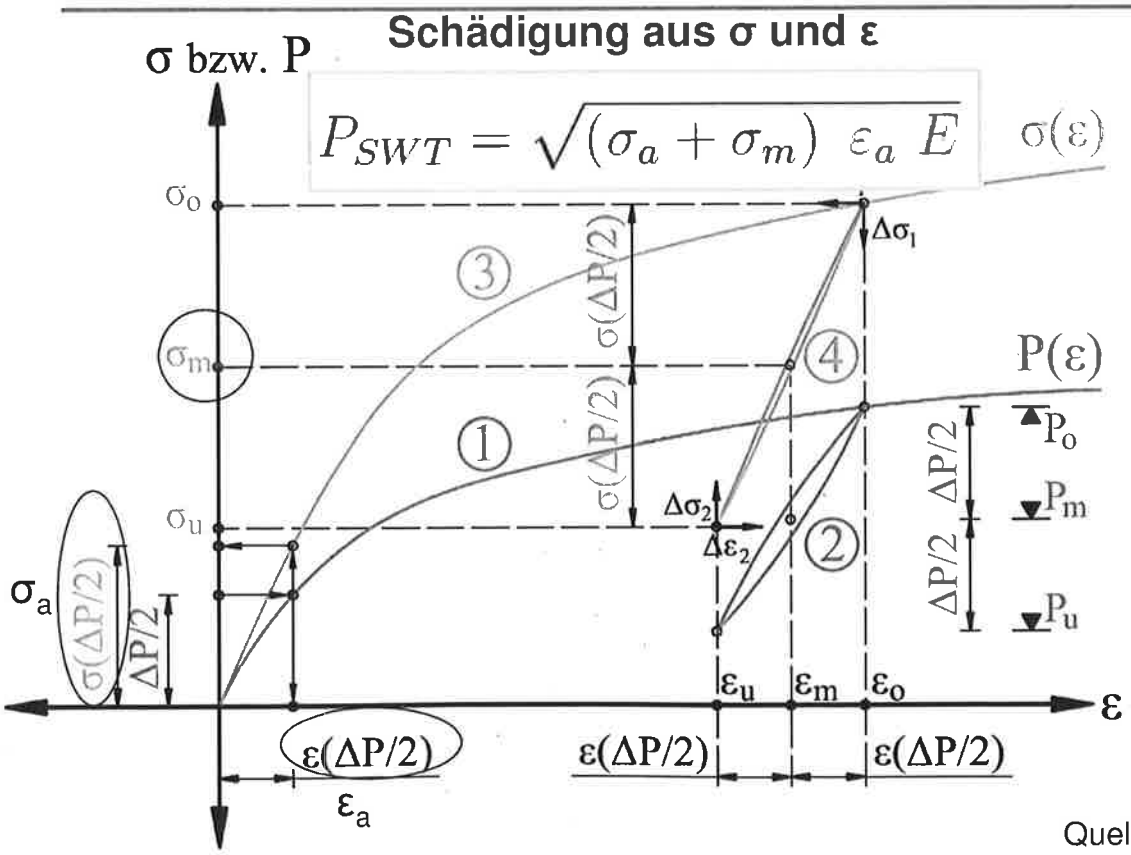
Schädigungsparameter P_{SWT} (für $\sigma_m \neq 0$) nach *Smith, Topper* und *Watson*:

$$P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\;\varepsilon_a\;E}$$

ohne Berücksichtigung der „Oberflächenkerbe"

Quelle: [1], [2]

Schädigung aus σ und ε



Quelle: [1], [2]

Schädigungsbewertung mit $\sigma_m \neq 0$ und Oberflächenkerbe

Dehnungs-Wöhlerlinie (für $\sigma_m = 0$) nach *Coffin, Manson und Marrow:*

$$\varepsilon_a = \underbrace{\frac{\sigma'_f}{E}\,(2N)^b}_{\varepsilon_{a,e}} + \underbrace{\varepsilon'_f\,(2N)^c}_{\varepsilon_{a,p}}$$

Schädigungsparameter P_{SWT} nach *Smith, Topper* und *Watson*:

$$P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\;\varepsilon_a\;E}$$

Dehnungswöhlerlinie mit Mittelspannung σ_m und Oberflächenkerbe κ:-

$$\sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\;\varepsilon_a\;E} = \kappa\,\sqrt{\sigma_f'^{\,2}\,(2N)^{2b} + \sigma'_f\,\varepsilon'_f\,(2N)^{b+c}\;E}$$

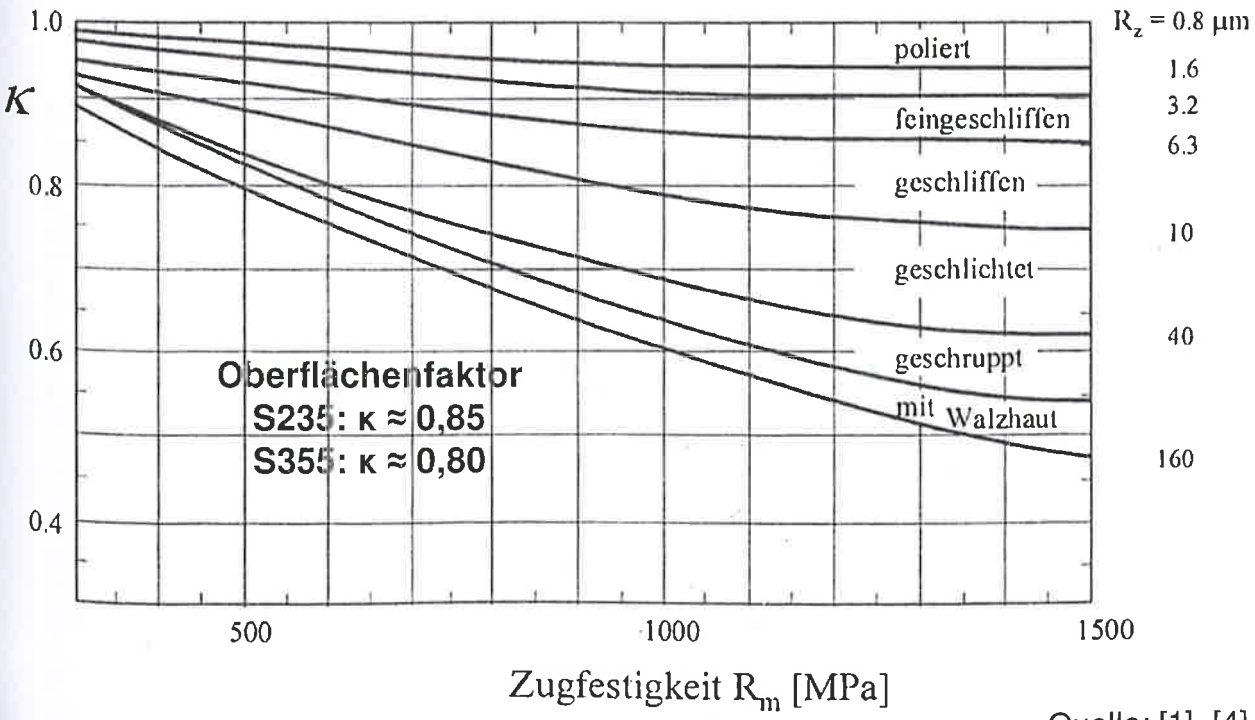
↑ **mit „Oberflächenkerbe“**

[2]

Quelle: [1], [2]

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

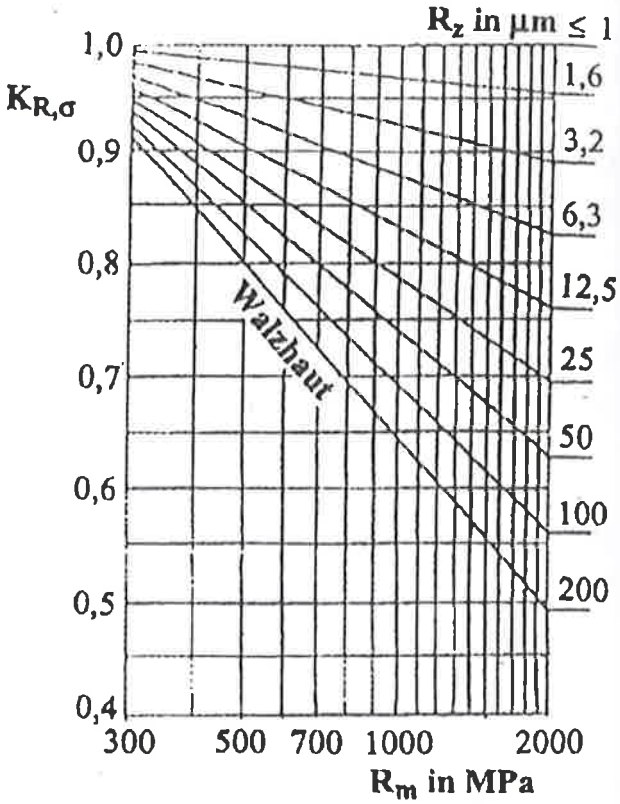
Kerbwirkung - Oberflächenfaktor



[2]

Quelle: [1], [4]

Kerbwirkung:
Rauhigkeitsfaktor $\kappa_{R\sigma}$



Rauhigkeitsfaktor
S235: $\kappa_{R\sigma} \approx 0{,}85$
S355: $\kappa_{R\sigma} \approx 0{,}80$

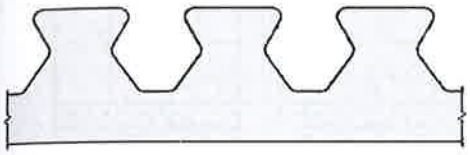
Quelle: [1], [5]

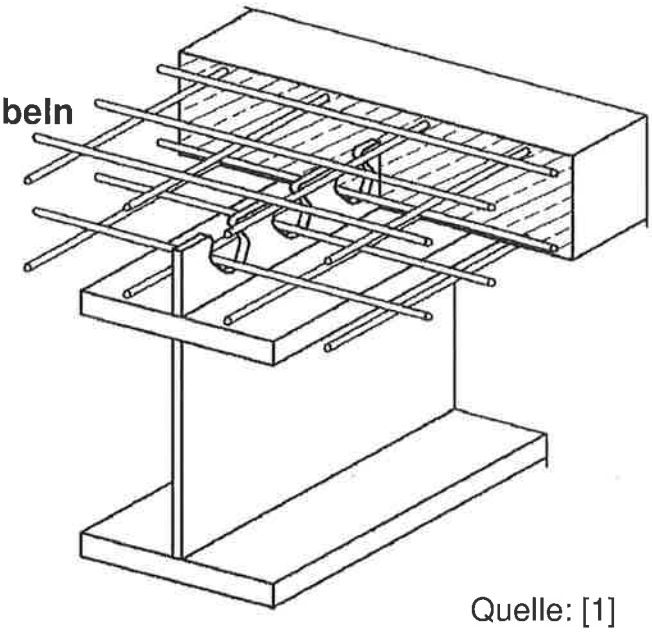
5.
Treffgenauigkeit des Kerbdehnungskonzeptes

Bisherige Erfahrungen Ermüdungsverhaltens des Kronendübels

Der Kronendübel:

- **Schubverbinder im Stahl-Beton-Verbundbau**
- **Alternative zu Kopfbolzendübeln**



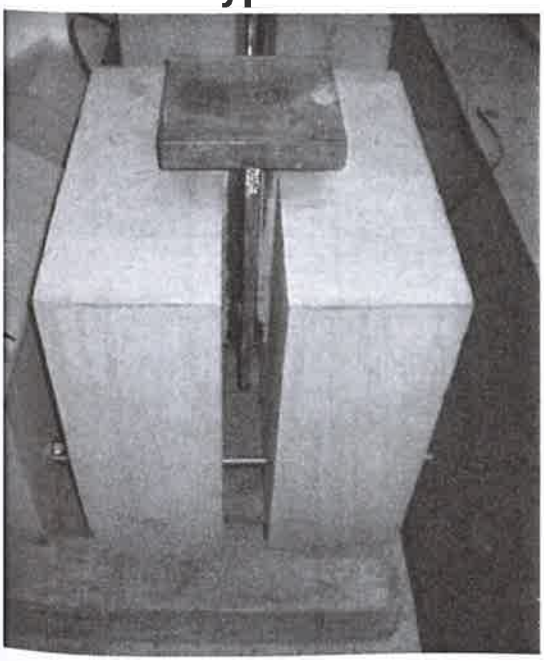


Quelle: [1]

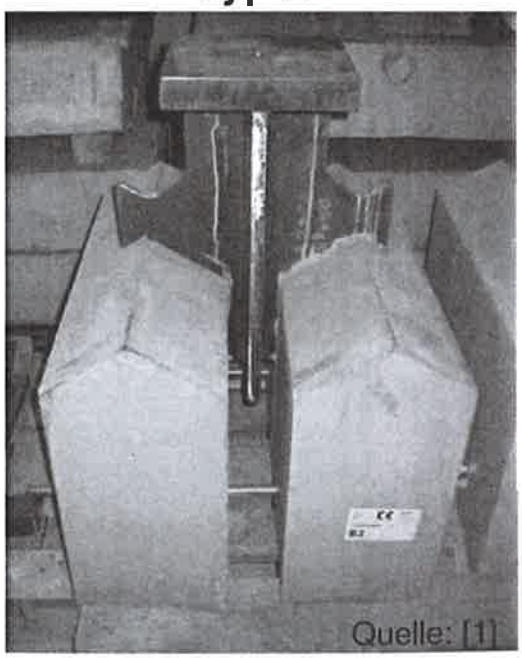
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Versuchskörper
Vergleich Typ A - Typ B

Typ A

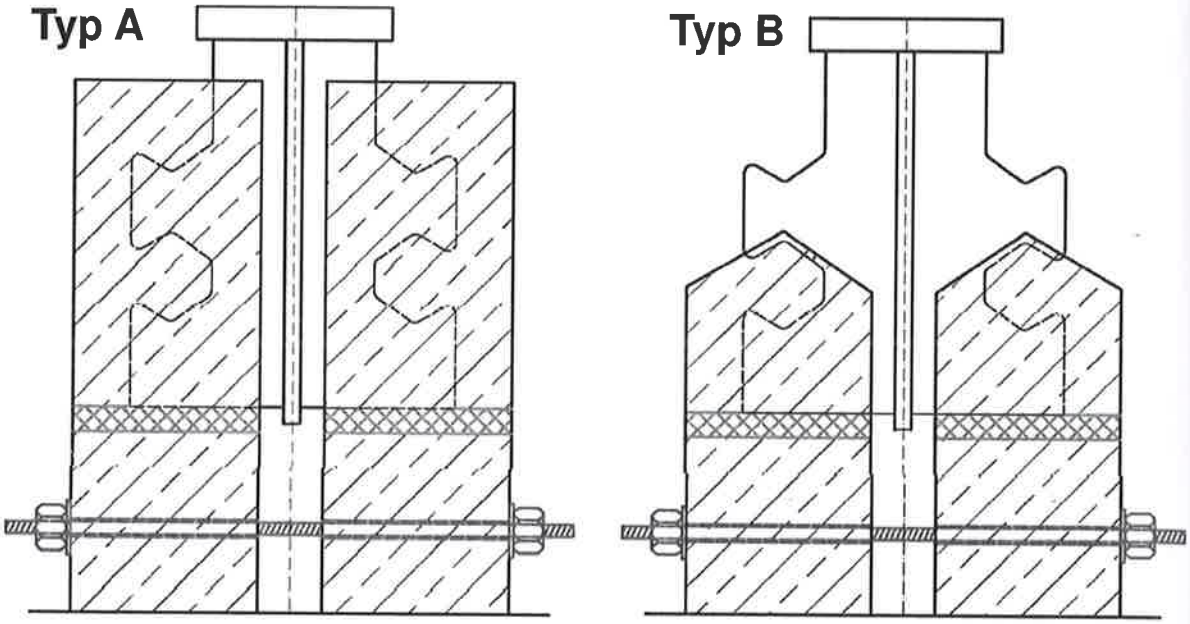


Typ B



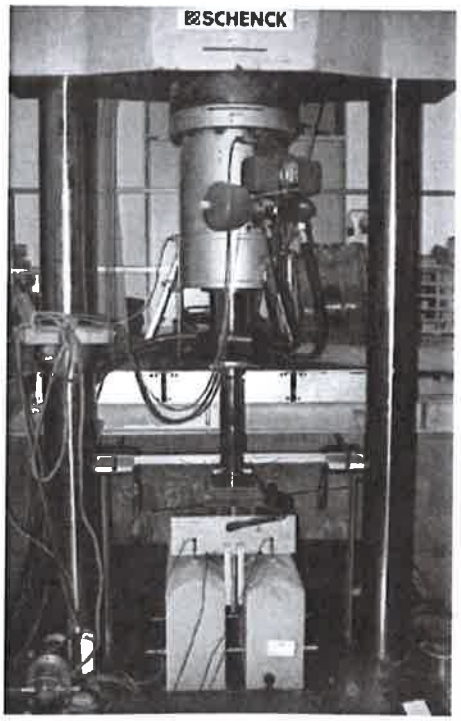
Quelle: [1]

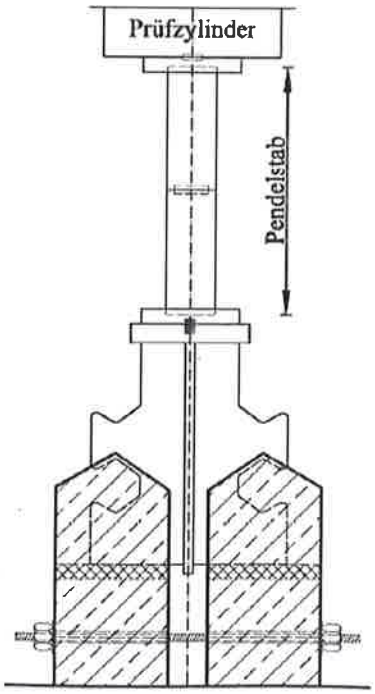
Versuchskörper
Vergleich Typ A - Typ B



Quelle: [1]

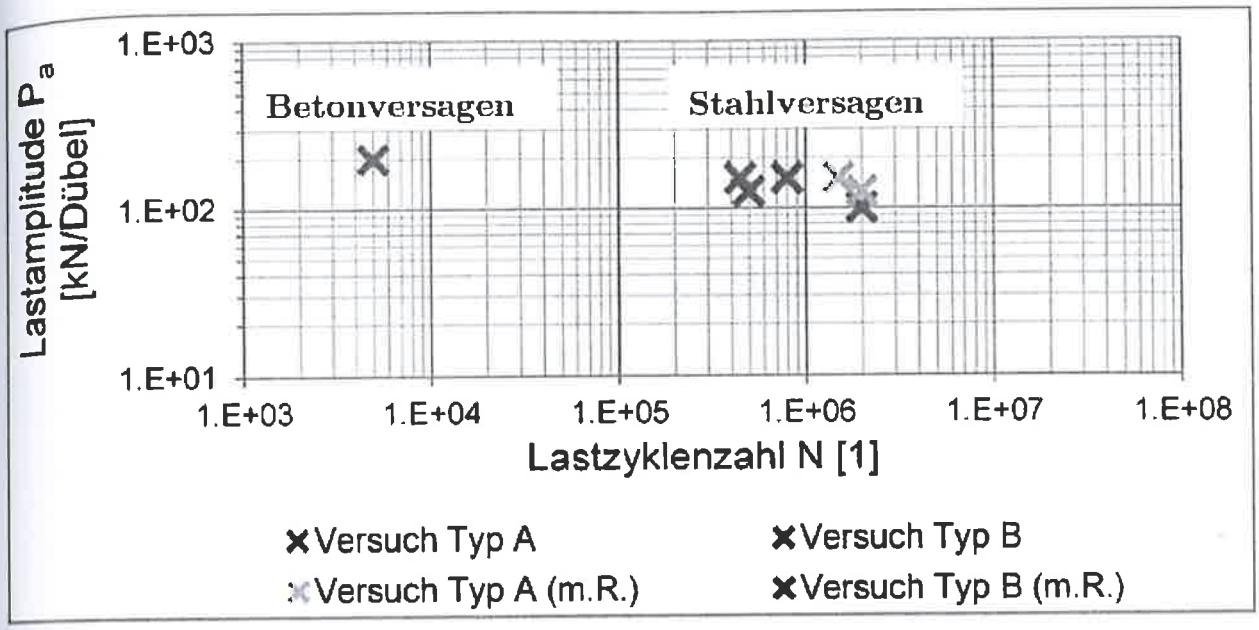
Versuchsaufbau für die Ermüdungsversuche





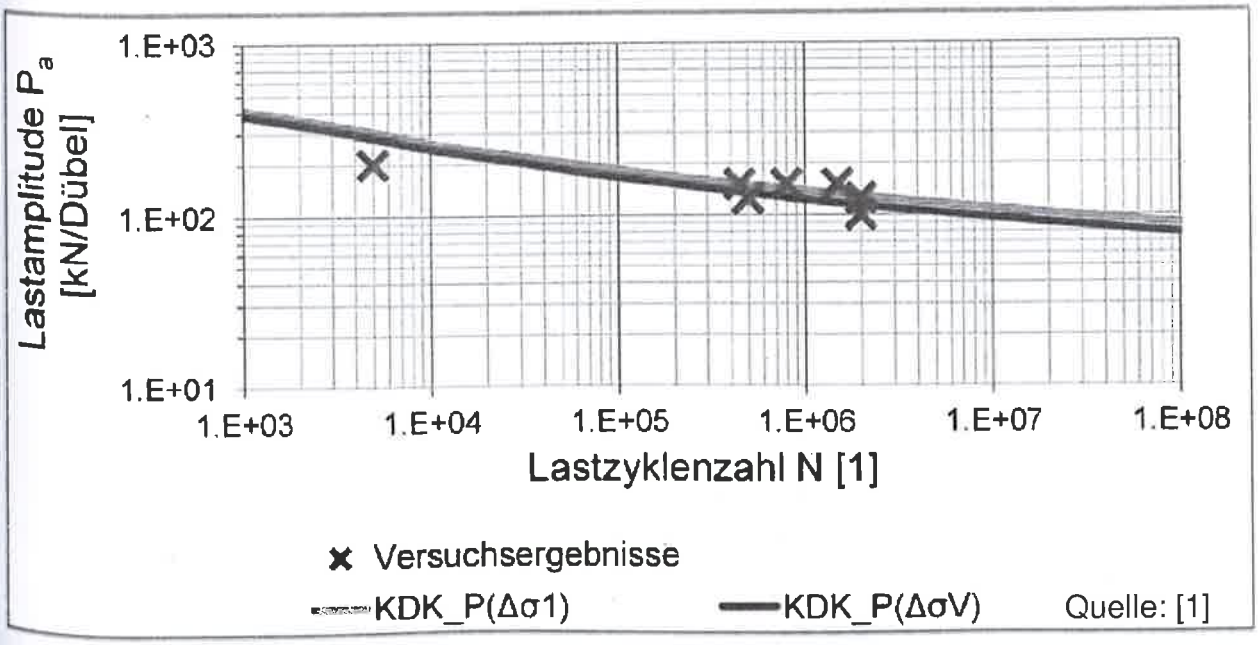
Quelle: [1]

Experimentelle Ergebnisse



Quelle: [1]

Ergebnisse nach dem Kerbdehnungskonzept mit Schädigungsparameter



Quelle: [1]

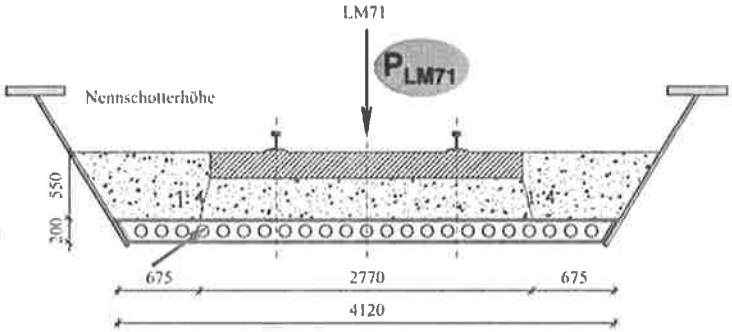
6.
Rechnerische Ermittlung der Bauteilwöhlerlinie

für die Lochdübelleiste der SCSC-Platte auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Rechenschritte zur Ermittlung der Bauteil-Wöhlerlinie

1.



$\Rightarrow$ σ_a, ε_a, σ_m

2. $$\sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\ \varepsilon_a\ E} = \kappa \sqrt{\sigma_f'^{\,2}\ (2N)^{2b} + \sigma_f'\ \varepsilon_f'\ (2N)^{b+c}\ E}$$

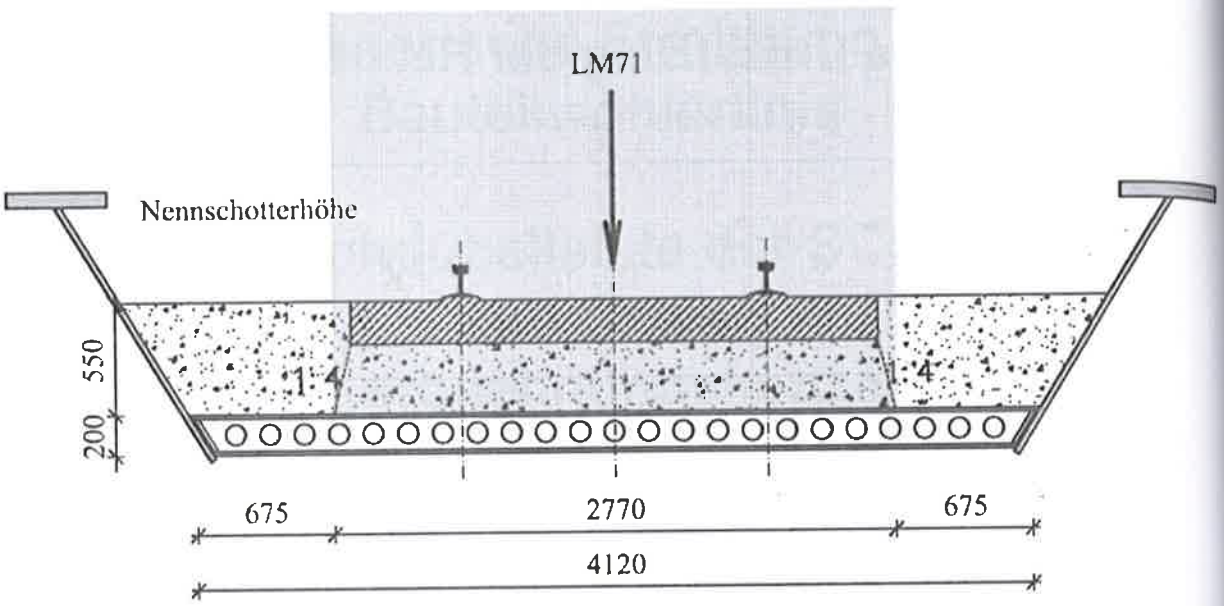
3. **Punkt der Wöhlerlinie (N, P_{LM71})**

Praktische Umsetzung der Rechenschritte

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Modellbildung LM 71
(Lasten auf die SCSC-Platte)

Modellbildung LM 71
(Lasten auf die SCSC-Platte)

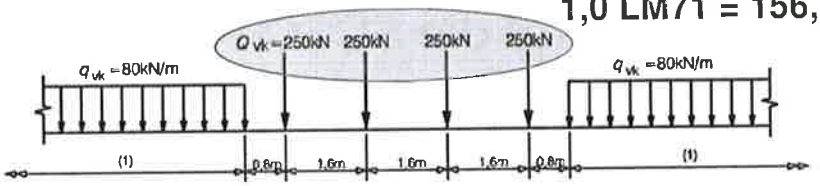


Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Belastung mit LM 71
Aufteilung der Verkehrslast

VERKEHRSLAST LM71:

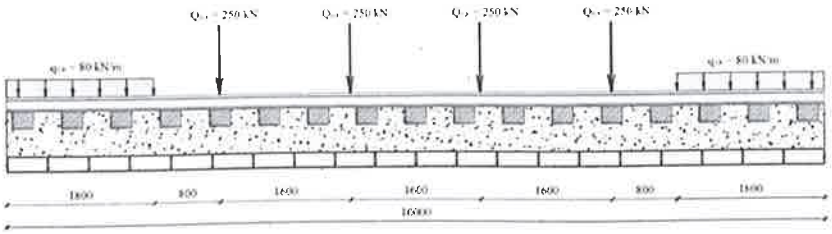
1,0 LM71 = 156,25 kN/m



→ *LM71 ohne Längswirkung: 4 * 250kN / 6,4m = 156,25kN/m*

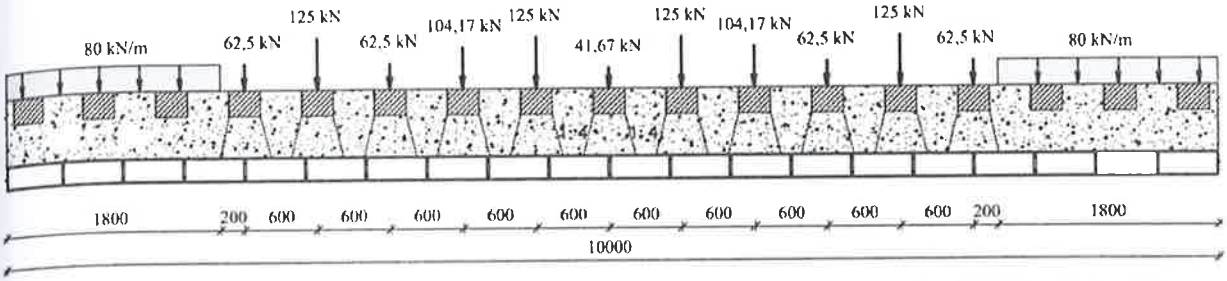
BRÜCKENLÄNGSSCHNITT

- Verkehrslast LM71 in Längsrichtung:

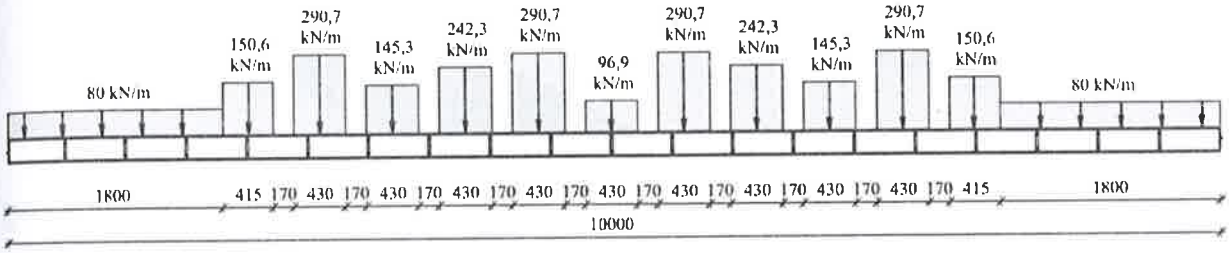


Belastung mit LM 71
Aufteilung der Verkehrslast

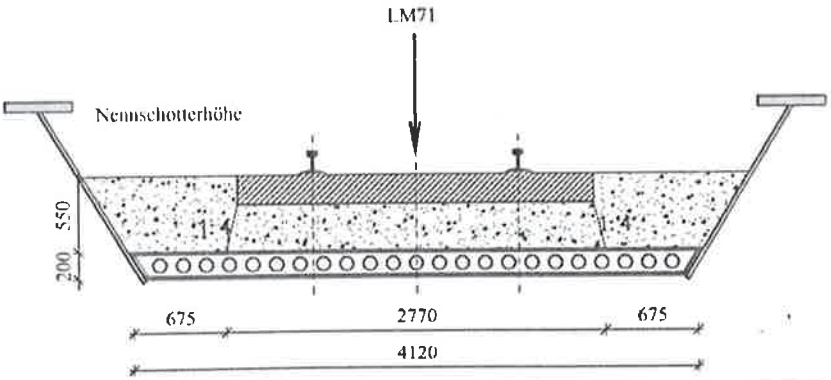
- LM71 nach Aufteilung in Längsrichtung durch die Schiene:

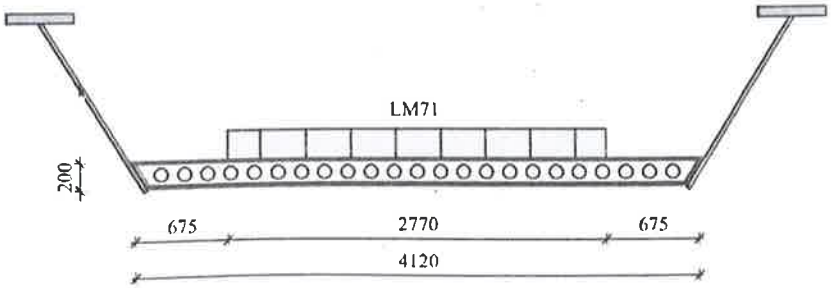


- LM71 nach Aufteilung in Längsrichtung durch die Schiene, Schwellen und Schotterbett:



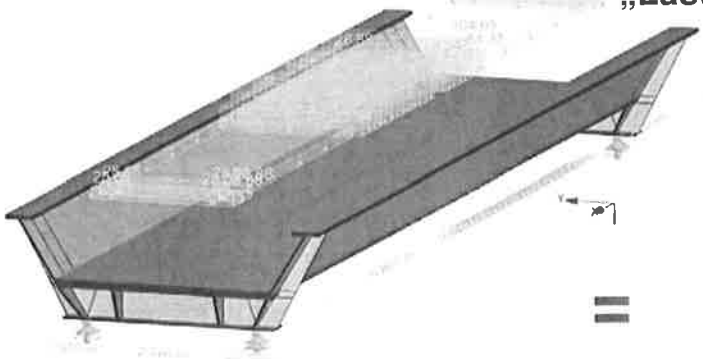
Belastung mit LM 71
Aufteilung der Verkehrslast





Belastung mit LM 71
momentenäquivalente Gleichlast

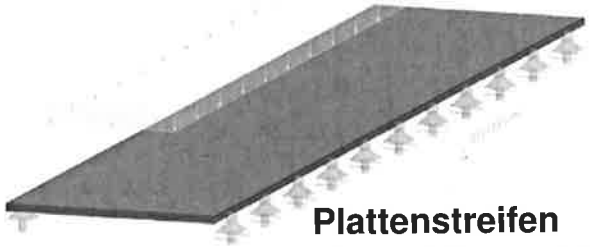
„Lastgebirge“



Gleichlast = 54 kN/m²
≙ 149,58 kN/m

=

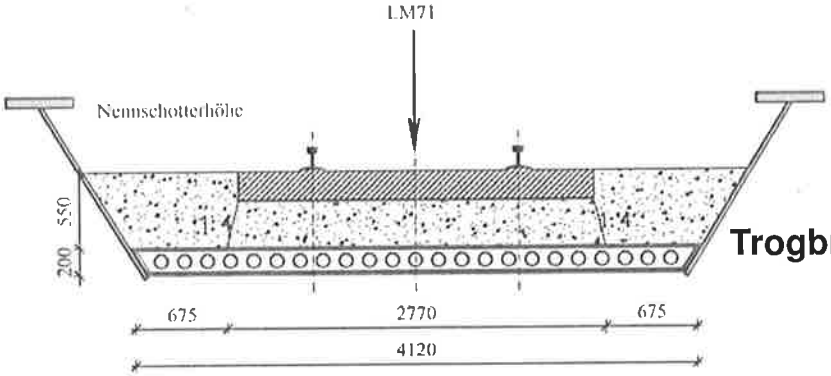
Trogbrücke L = 20 m
mit „Längswirkung“



Plattenstreifen
ohne „Längswirkung“

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Belastung mit LM 71
Einfluss der „Längstragwirkung“



Trogbrücke L = 20 m

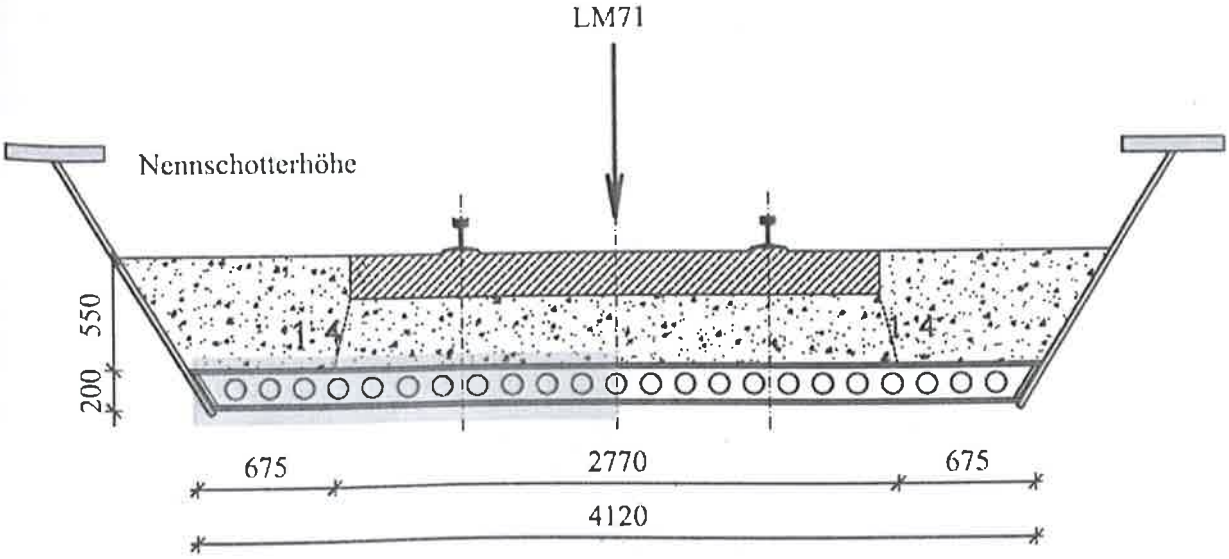
mit „Längswirkung“ für Einzellasten: 149,58 kN/m
ohne „Längswirkung für Einzellasten: 156,25 kN/m = 1 LM71

Fazit: geringer Einfluss bei L = 20 m

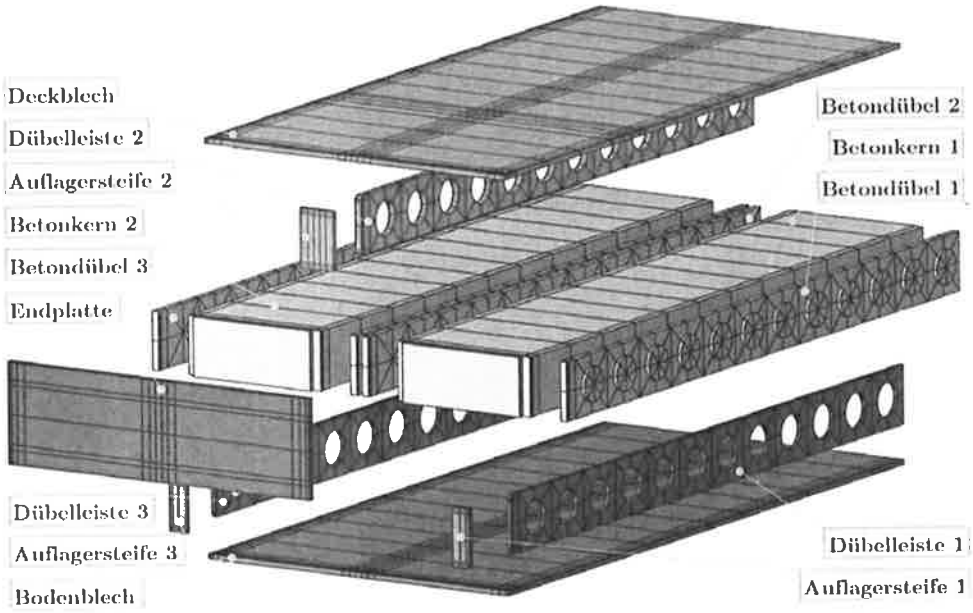
Modellbildung SCSC-Platte

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Modellbildung SCSC-Platte



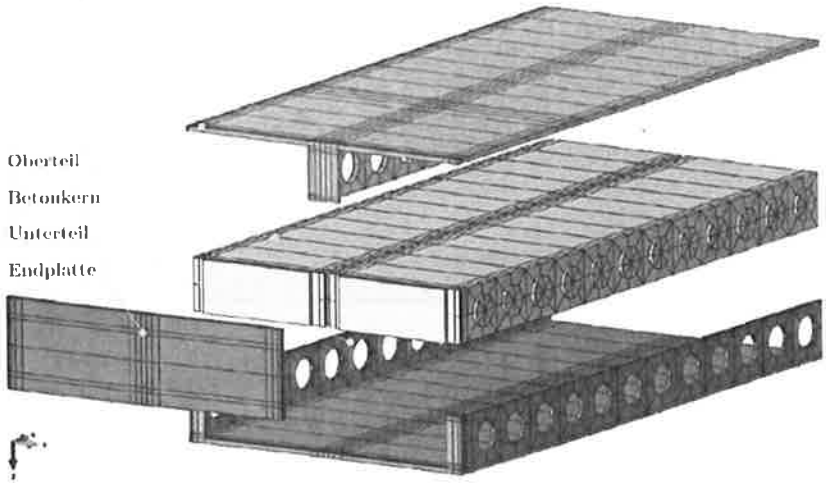
FE-Modell: Platte (L/2)



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Elementierung lokal/global

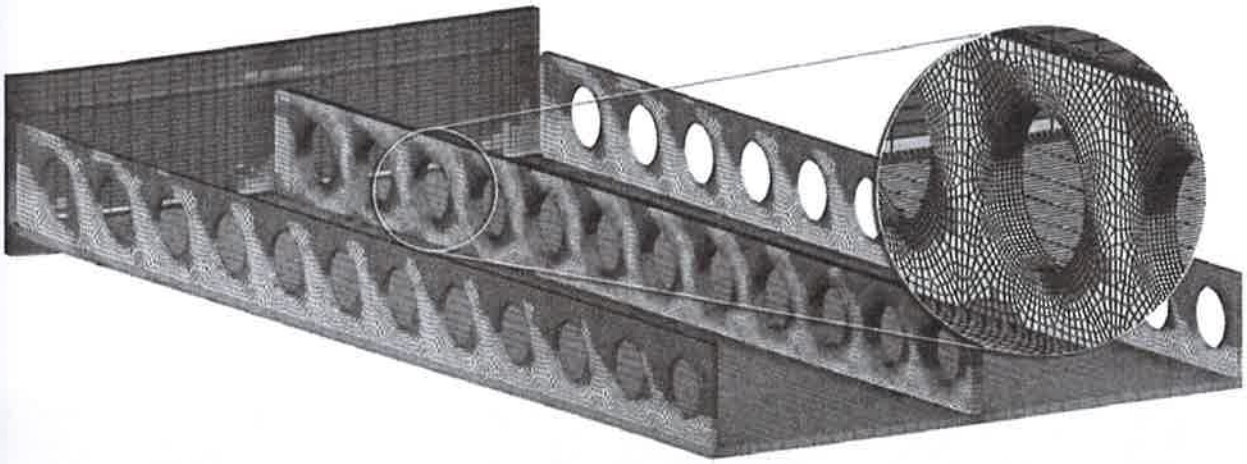
	Kantenlänge im Dübelbereich [mm]		Globale Kantenlänge [mm]	
	Dübeltiefe	Dübelkante	Stahlteile	Betonteile
TYPI 1	5,0	5,0	~ 5-56	~ 10-56
TYPI 2	3,3	3,1		
TYPI 3	2,5	2,2		
TYPI 4	3,3	3,1	~ 4-41	~ 8-41
TYPI 5	2,5	2,2		

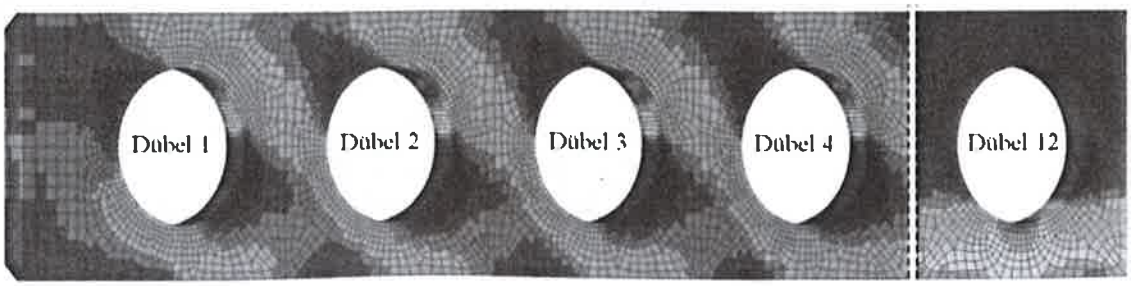


Kritische Kerbstellen der Lochdübelleiste

Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

FEM – Spannungsanalyse (max. σ_1) mit zyklischem Werkstoffgesetz





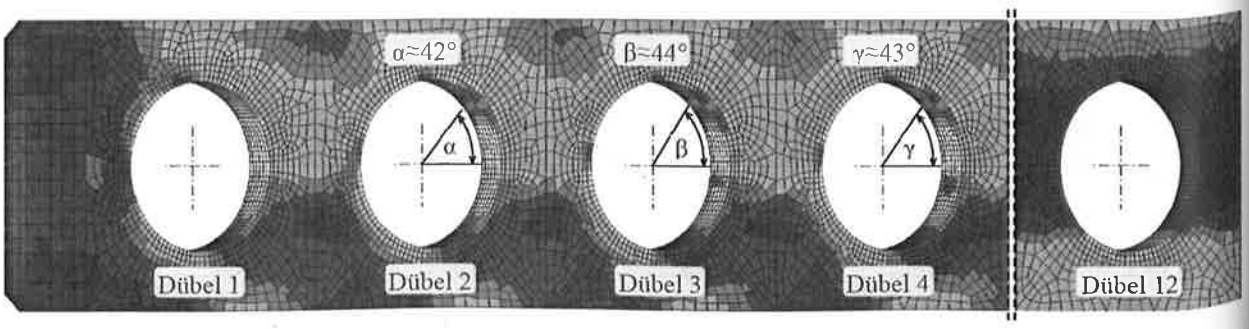
Abhängigkeit der Lage der kritischen Dübel von der Laststufe

Step	*Frame*	Belastung		Lage $\sigma_{1,max}$	Lage $\sigma_{V,max}$
1	1	0,2 * Ständige Belastung		Dübel 2	Dübel 2
	2	0,4 * Ständige Belastung			
	3	0.6 * Ständige Belastung			
	4	0,8 * Ständige Belastung			
	5	1.0 * Ständige Belastung			
Step	*Frame*	Belastungsdifferenz		Lage $\sigma_{1,zyk,max}$	Lage $\sigma_{V,zyk,max}$
2	1	0,1 * LM71☐☐		Dübel 3	Dübel 2
	2	0.2 * LM71☐☐			
	3	0,3 * LM71☐☐			
	4	0.4 * LM71☐☐			
	5	0.5 * LM71☐☐			
	6	0.6 * LM71☐☐			
	7	0.7 * LM71☐☐			Dübel 3
	8	0.8 * LM71☐☐			
	9	0,9 * LM71☐☐	≈ 1 * LM71: Längsw.☑, Beiw.☐		
	10	**1,0** * LM71☐☐	= 1 * LM71: Längsw.☐, Beiw.☐		
	11	1,1 * LM71☐☐		Dübel 4	Dübel 4
	12	1.2 * LM71☐☐			
	13	1,3 * LM71☐☐			
	14	1.4 * LM71☐☐	≈ 1 * LM71: Längsw.☑, Beiw.☑		
	15	1.5 * LM71☐☐	≈ 1 * LM71: Längsw.☐, Beiw.☑		
	16	1,6 * LM71☐☐		Dübel 12	
	17	1,7 * LM71☐☐			
	18	1.8 * LM71☐☐			
	19	1.9 * LM71☐☐			
	20	**2,0** * LM71☐☐			
	⋮	⋮		⋮	⋮

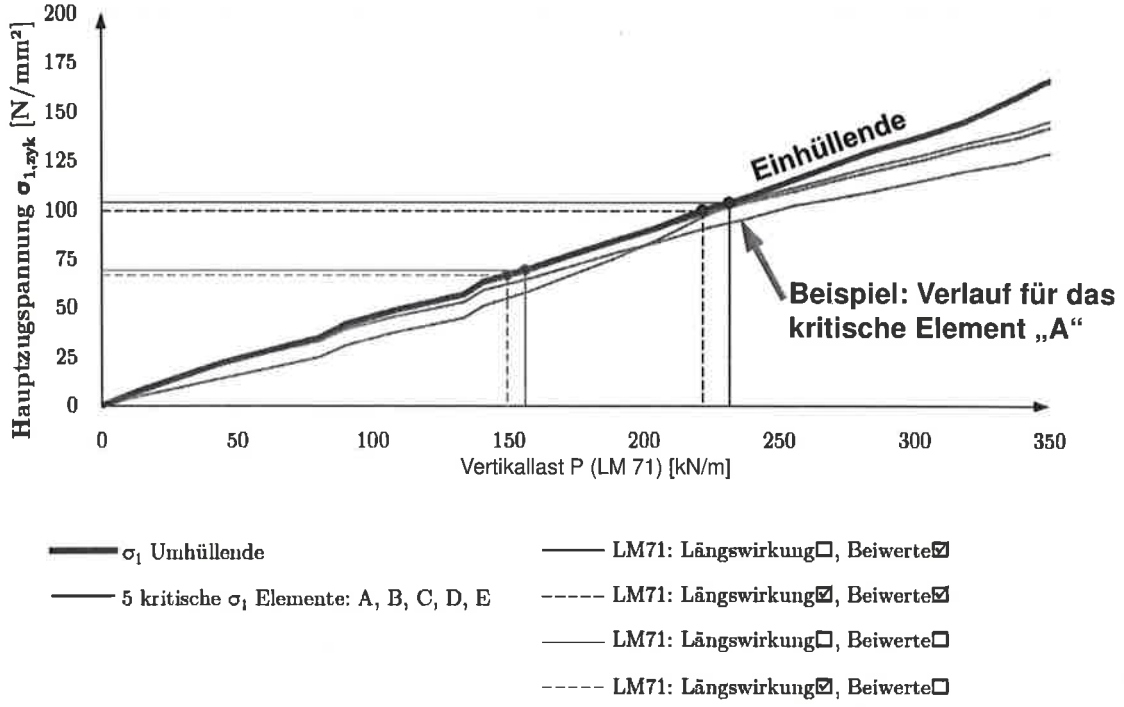
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Lokalisierung der kritischen finiten Elemente:

1. Ermittlung max. σ_1 für 5 Laststufen (g + 0 LM71 bis g + 2 LM71)
2. Identifikation der meistbeanspruchten Dübel
3. Identifikation des <u>kritischen finiten Elementes für jede Laststufe</u>
4. Definition der Lage dieser Elemente: A, B, C, D, E



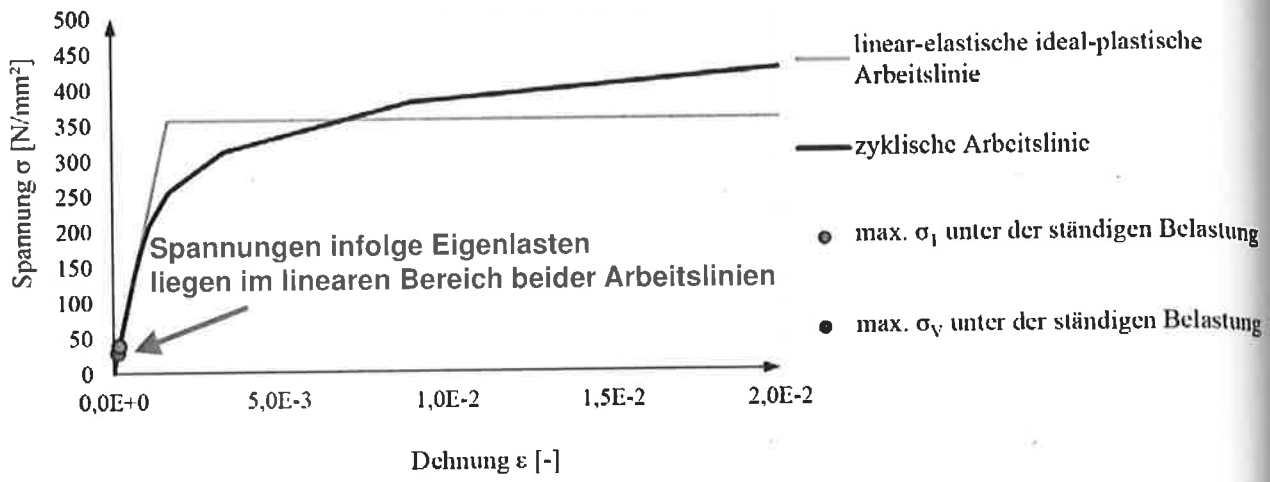
σ_1- P_{zyk} Einhüllende für die 5 kritischen finiten Elemente
Grundlage für die Bauteil-Erstbelastungskurve



Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

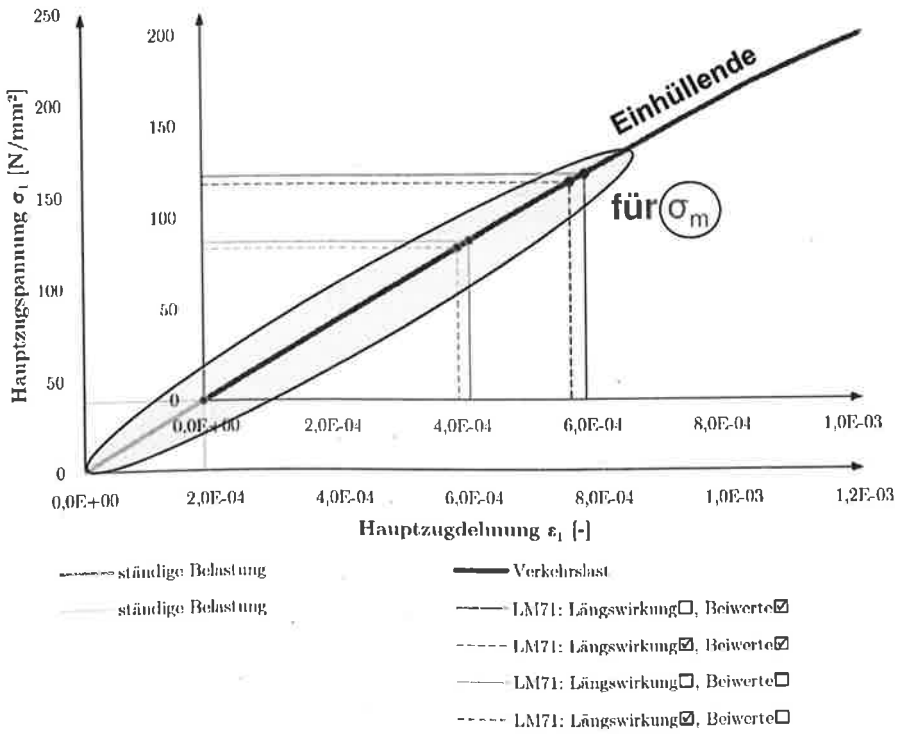
Konzept zur Überlagerung der Spannungen „g“ (statisch) + „LM71“ (zyklisch)

Berücksichtigung der Spannungen infolge Eigenlasten „g“

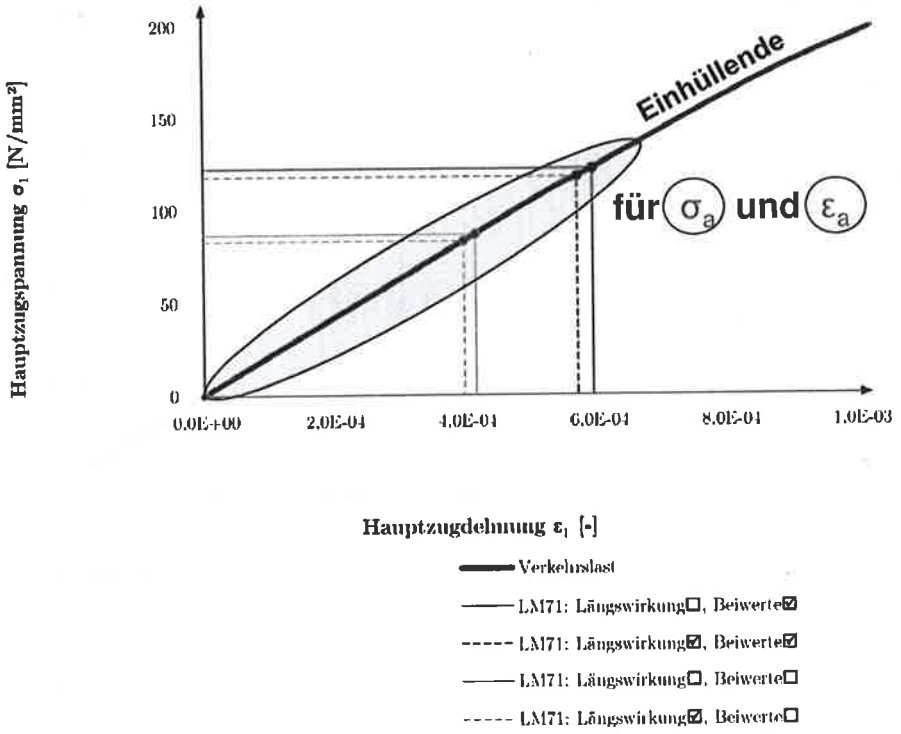


Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

σ_1- ε Pfad für „g + LM71“
Erstbelastung

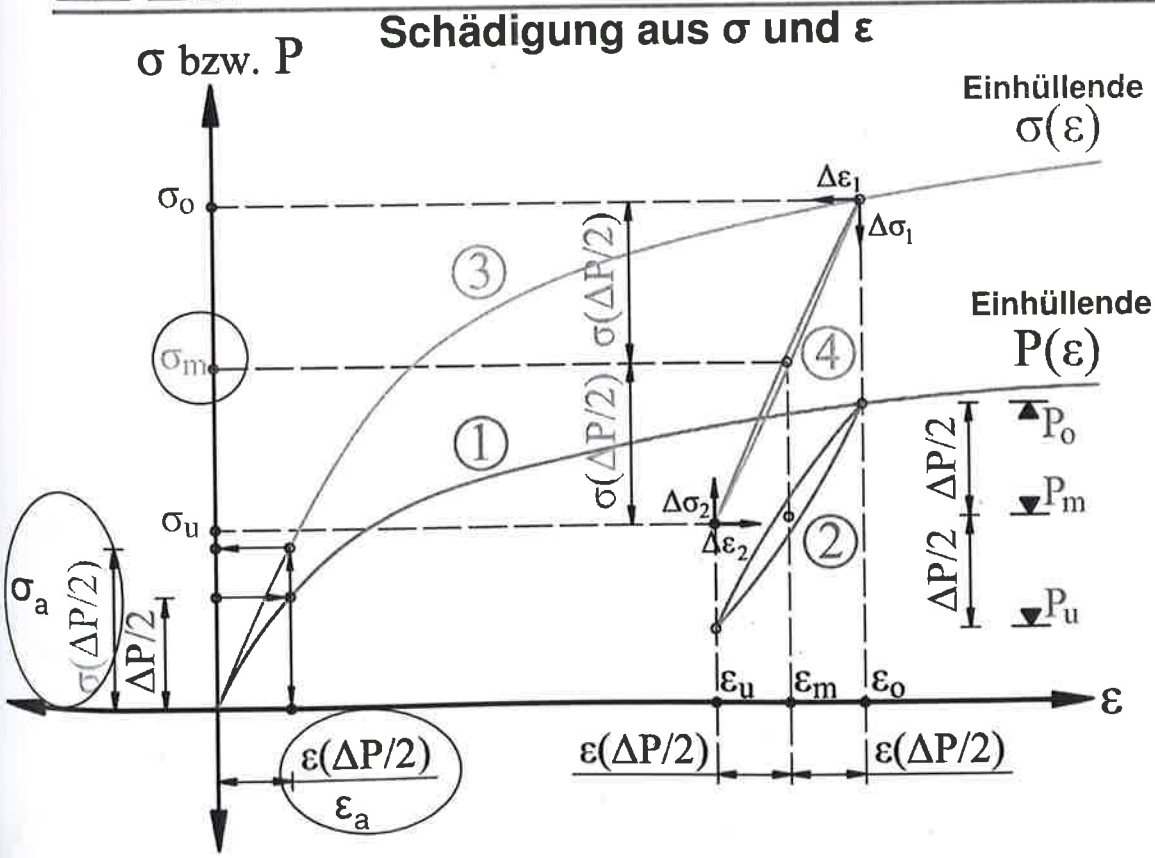


σ_1- ε Pfad für den zyklischen Anteil „LM71“
Erstbelastung



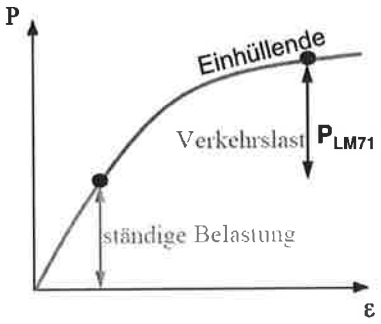
Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Schädigung aus σ und ε

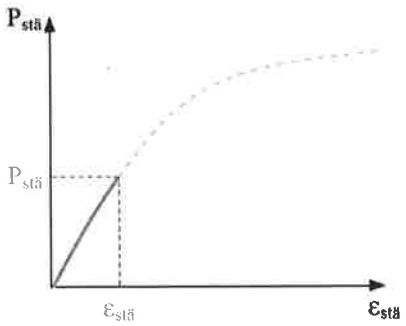


Zusammenfassung der Methode

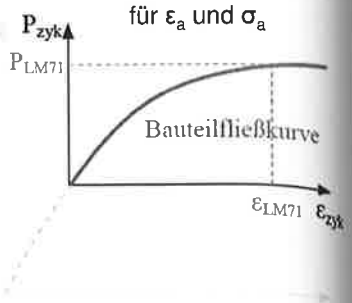
Erstbelastungskurve:



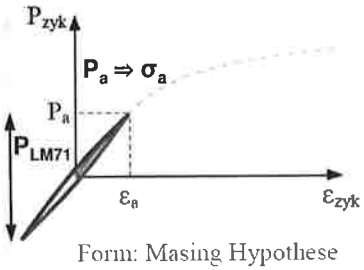
ständiger Teil



zyklischer Teil
für ε_a und σ_a

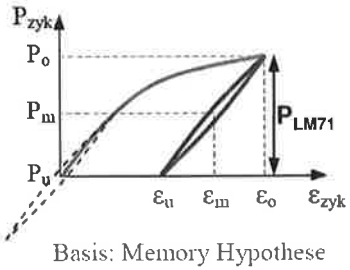


P-ε-Hysterese ohne P_m (R=-1)



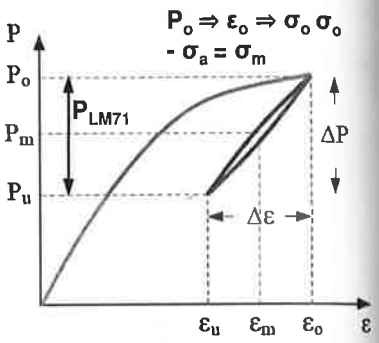
Form: Masing Hypothese

P-ε-Hysterese mit P_m (R=0)



Basis: Memory Hypothese

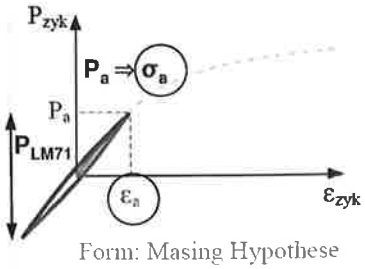
Zusammengelegtes Diagramm



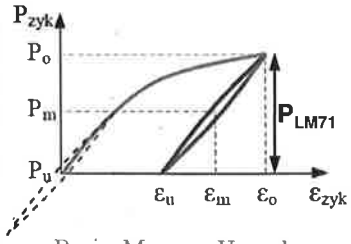
Wie entsteht ein Punkt der Wöhlerlinie?

$$\sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\ \varepsilon_a\ E} = \kappa \sqrt{\sigma_f'^{\,2}\ (2N)^{2b} + \sigma_f'\ \varepsilon_f'\ (2N)^{b+c}\ E}$$

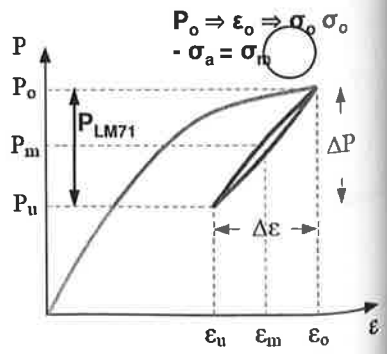
$$\Rightarrow N$$



Form: Masing Hypothese



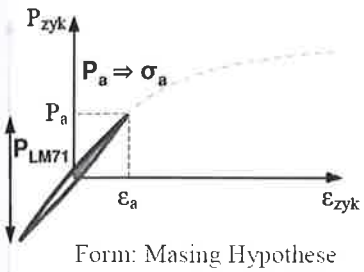
Basis: Memory Hypothese



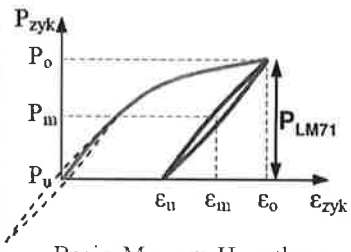
Wie entsteht ein Punkt der Wöhlerlinie?

$$\sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\ \varepsilon_a\ E} = \kappa \sqrt{\sigma_f'^{\,2}\ (2N)^{2b} + \sigma_f'\ \varepsilon_f'\ (2N)^{b+c}\ E}$$

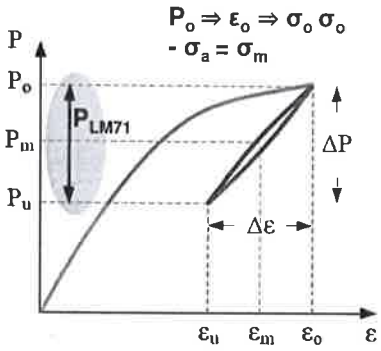
⇒ Punkt (N, P_{LM71})



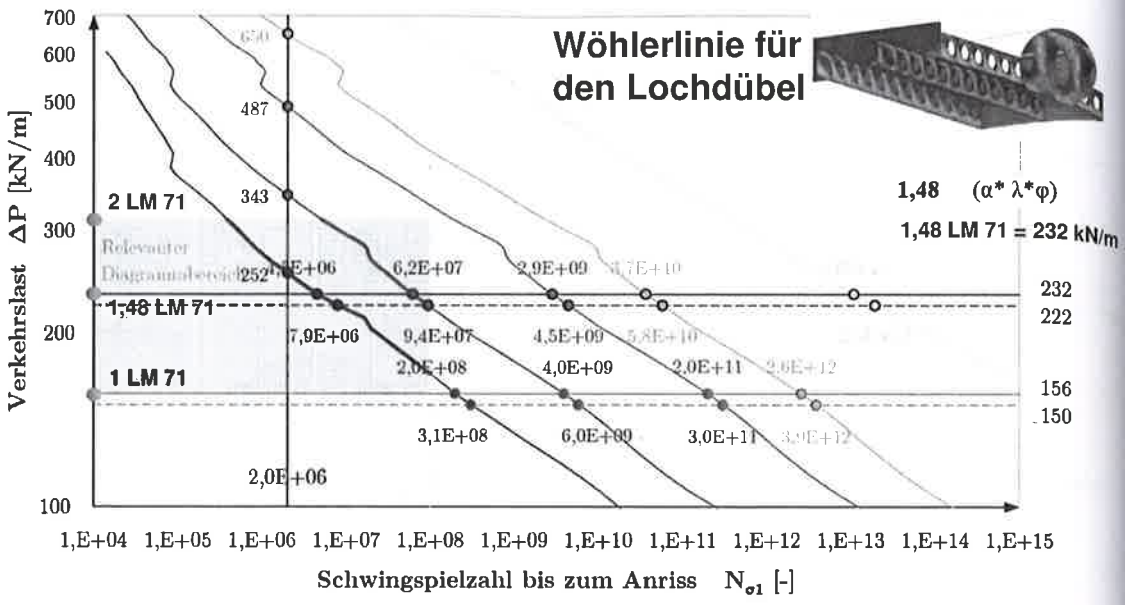
Form: Masing Hypothese



Basis: Memory Hypothese

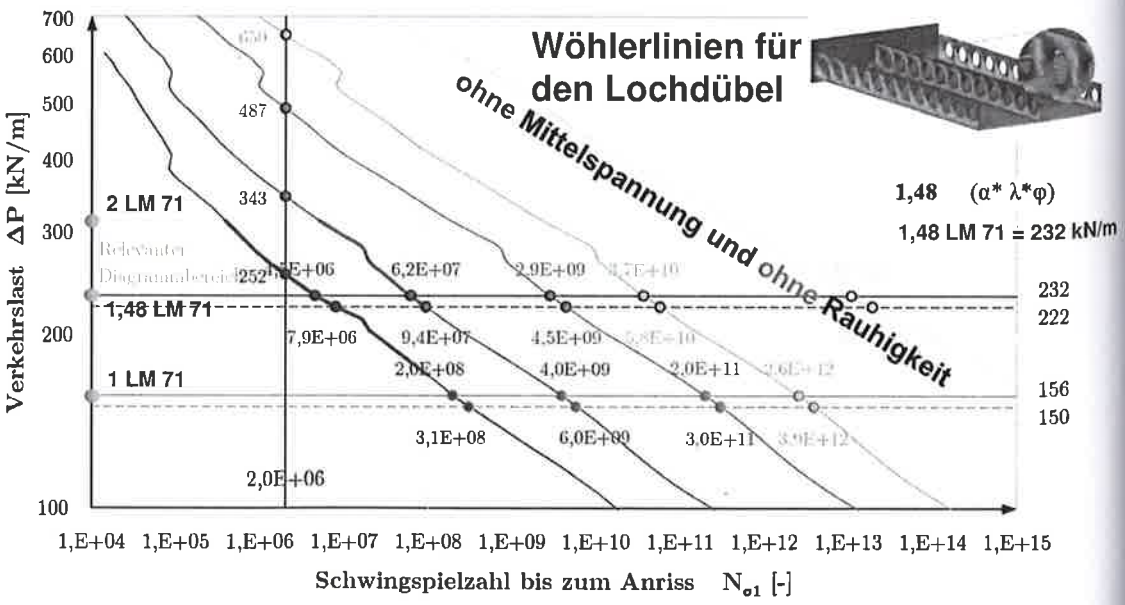


7.
Bauteilwöhlerlinien für die Lochdübelleiste auf Basis verschiedener Rechenansätze

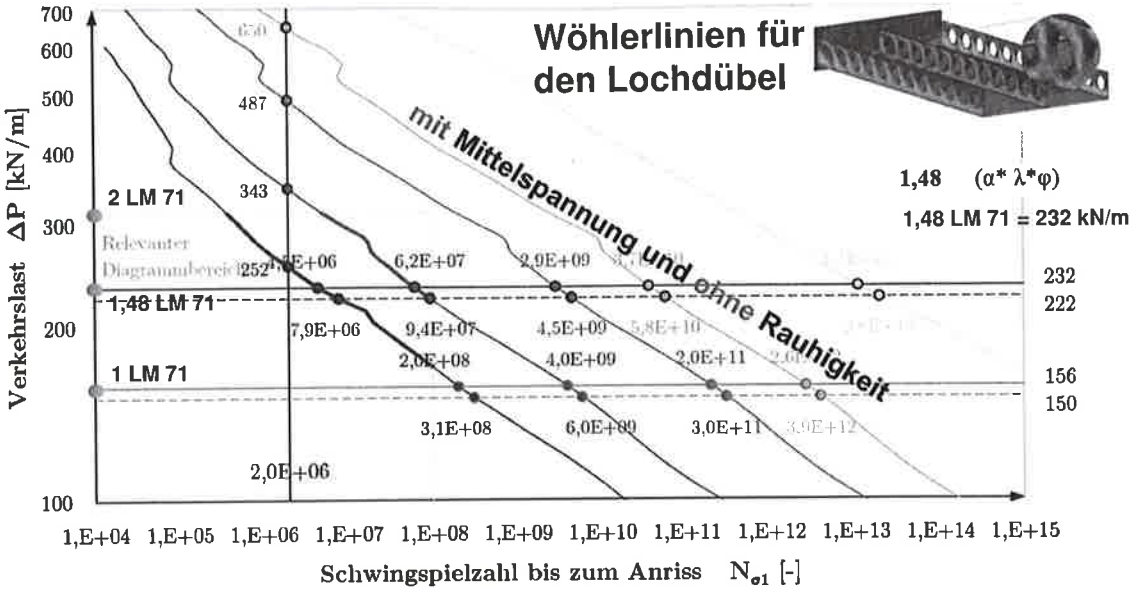


Wöhlerkurve $N_{\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☐, Beiwerte☑
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☑, Beiwerte☑
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☐, Beiwerte☐
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☑, Beiwerte☐
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$	$N = 2*10^6$

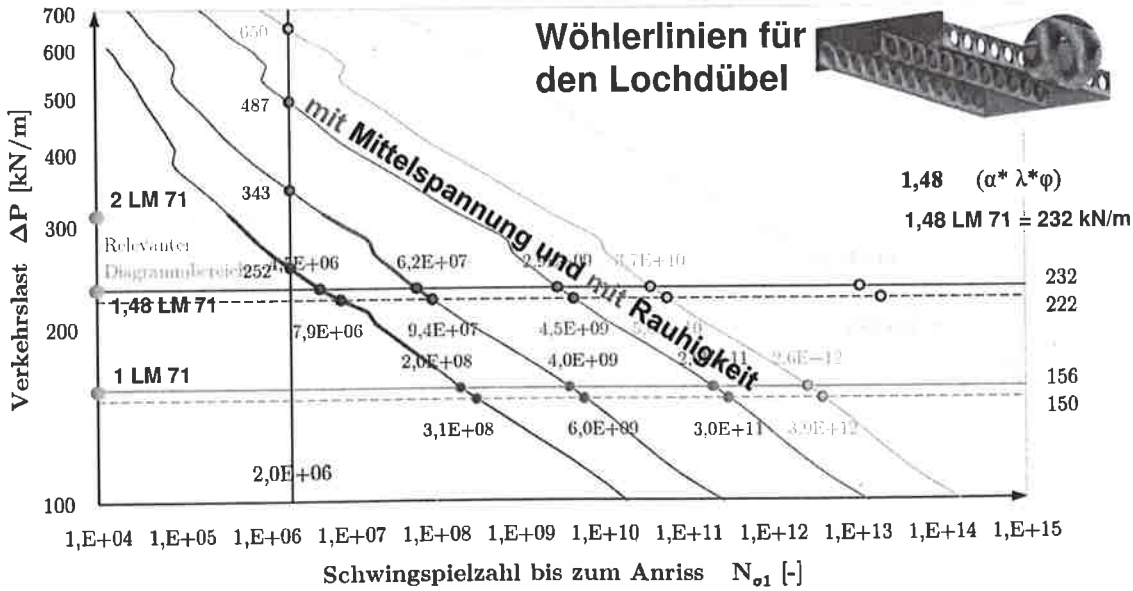
TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

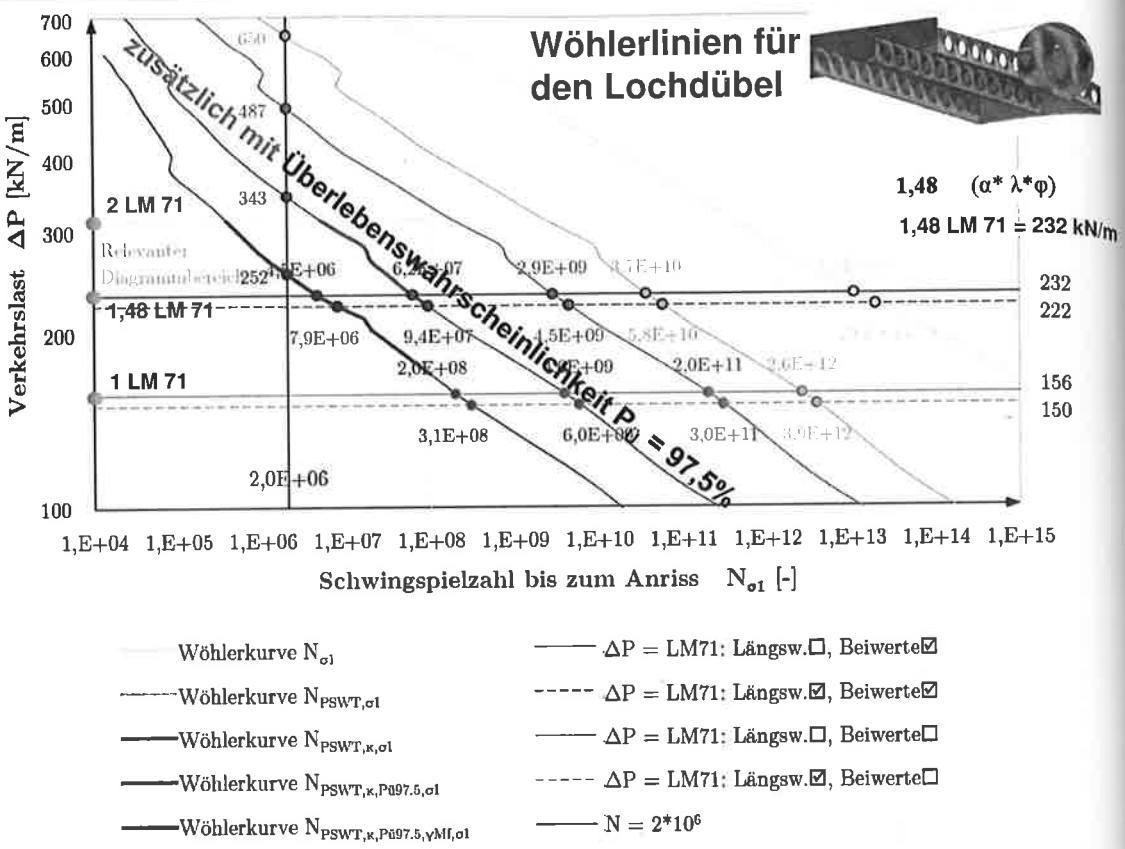


Wöhlerkurve $N_{\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☐, Beiwerte☑
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☑, Beiwerte☑
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☐, Beiwerte☐
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\sigma 1}$	ΔP = LM71: Längsw.☑, Beiwerte☐
Wöhlerkurve $N_{PSWT,\kappa,P\ddot{u}97.5,\gamma Mf,\sigma 1}$	$N = 2*10^6$

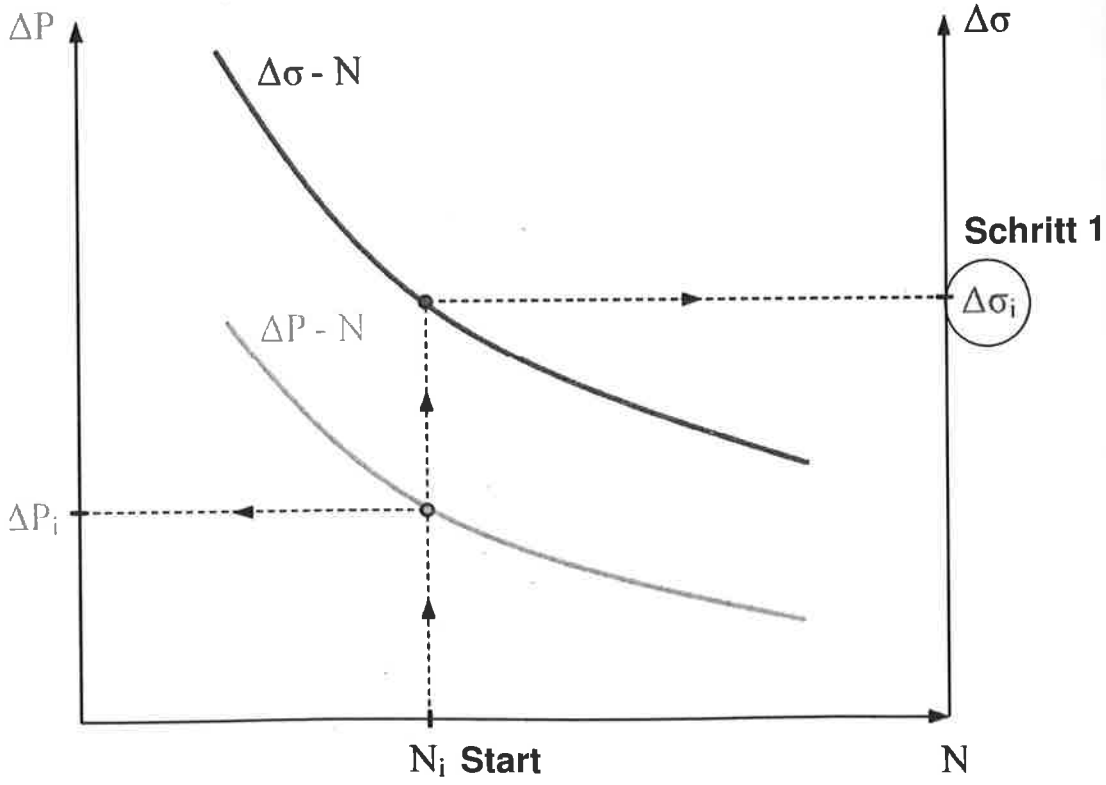


TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

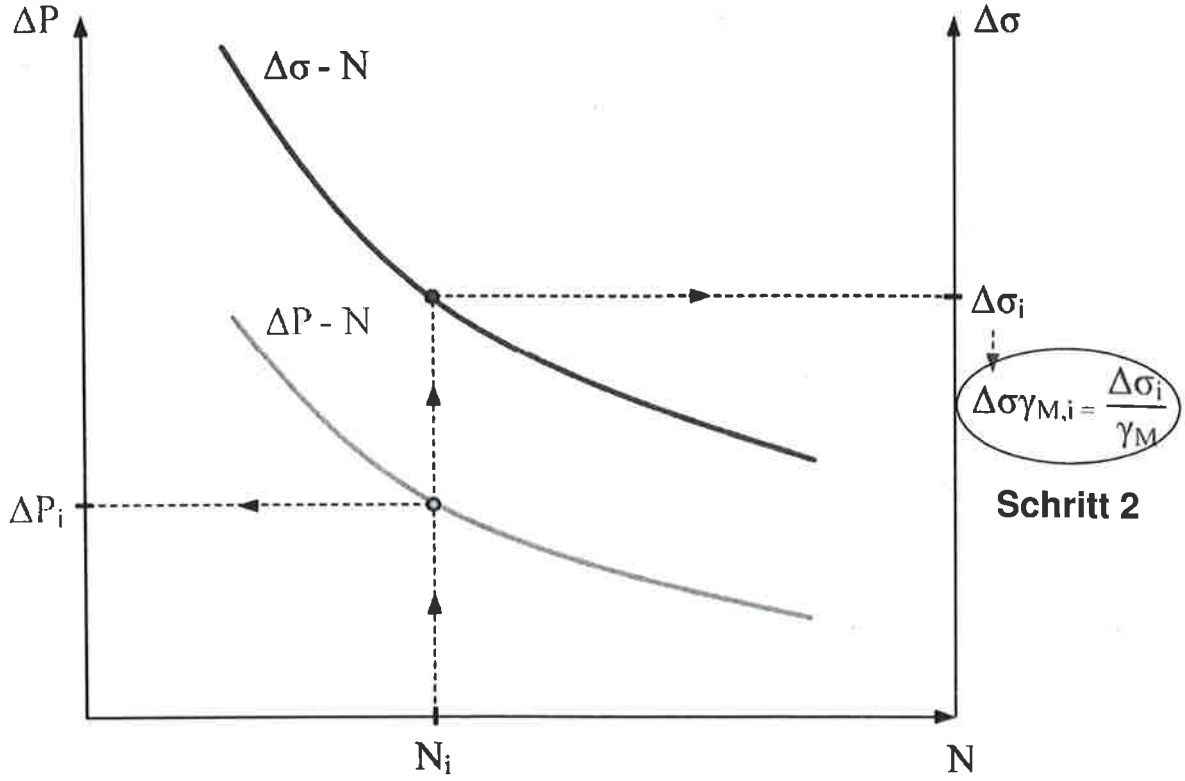




Methodik zur Berücksichtigung von γ_{Mf}

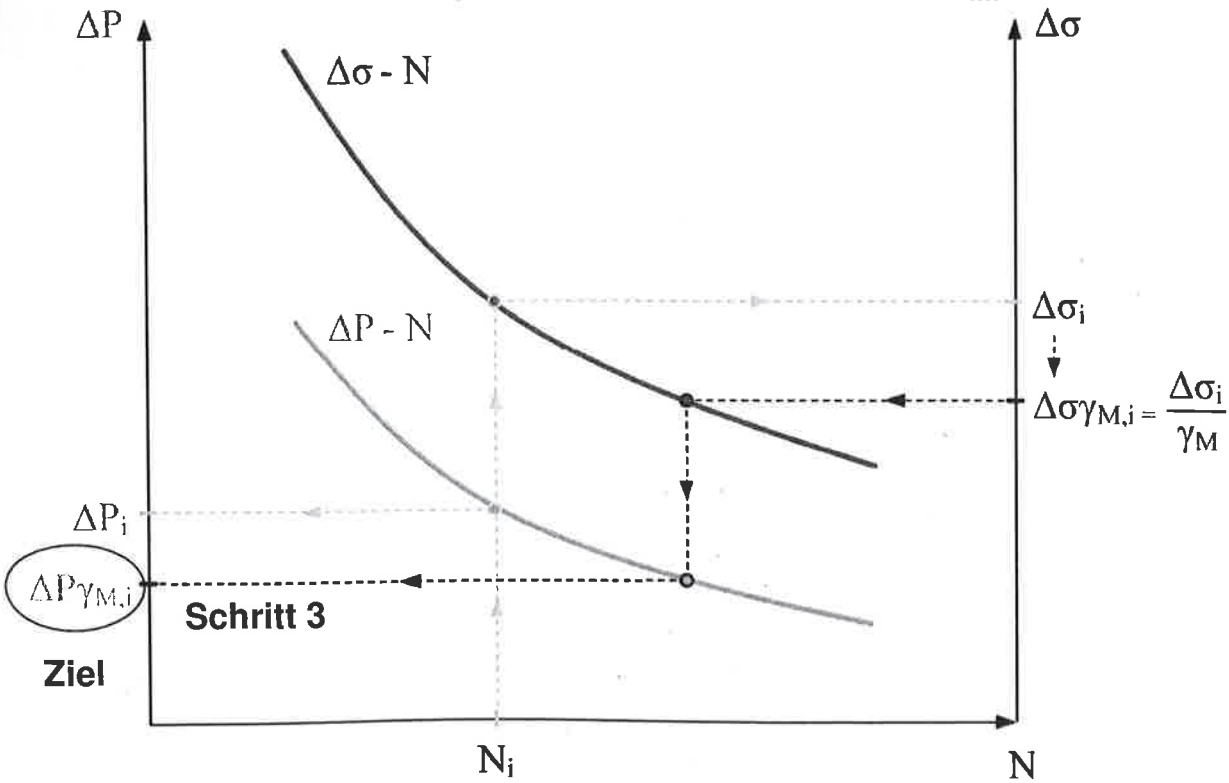


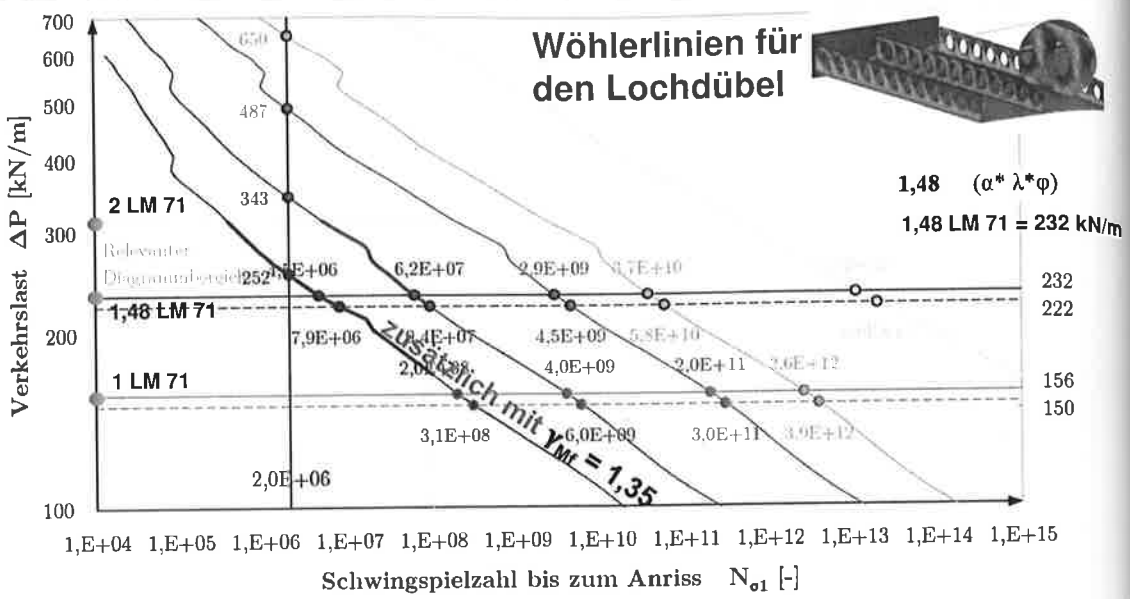
Methodik zur Berücksichtigung von γ_{Mf}



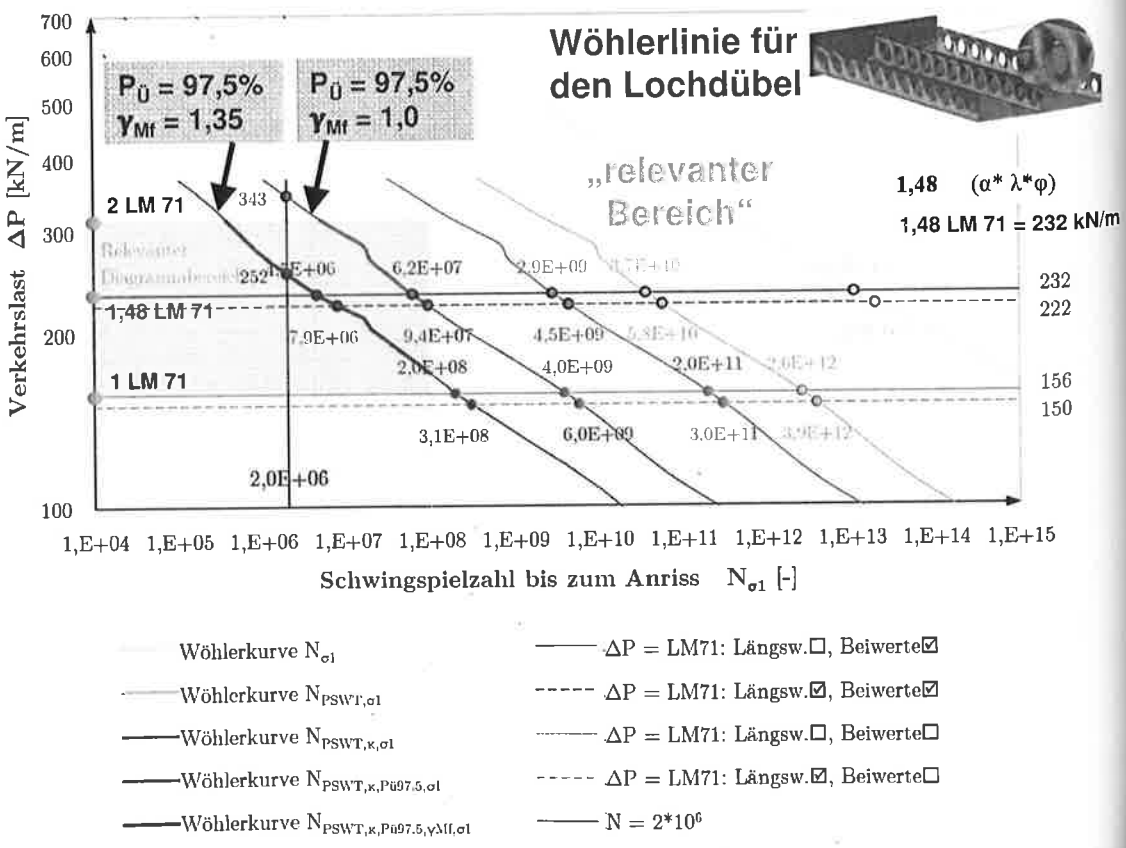
TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017

Methodik zur Berücksichtigung von γ_{Mf}





TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017



Ermüdungsnachweis der Lochdübelleiste

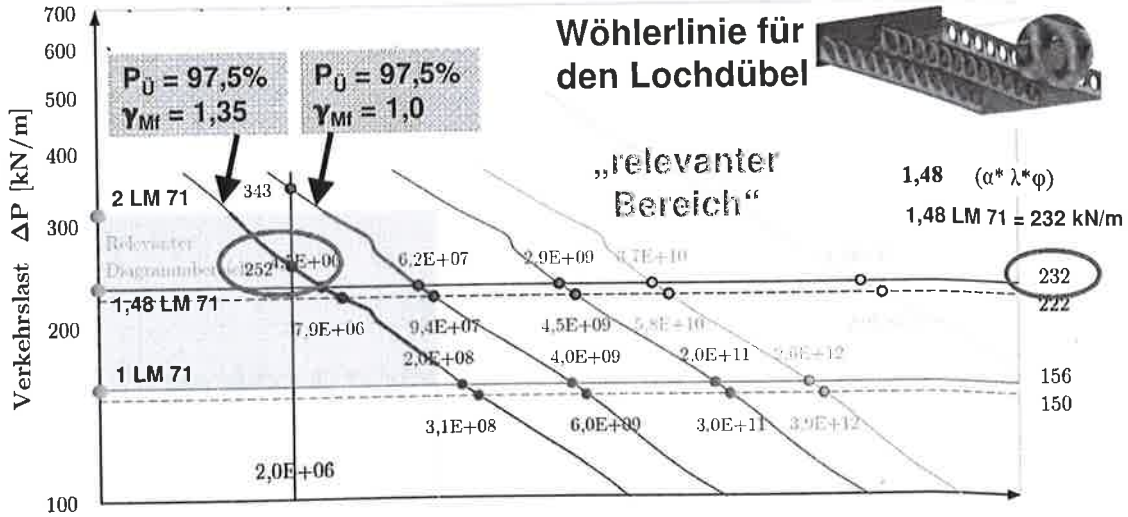
Methode auf Basis des Kerbdehnungskonzeptes

$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd} = f($ $)$

Wöhlerlinie für Konstruktionssystem

$$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd}$$

TU WIEN bi. Stahlbauseminar Wien & Neu-Ulm 2017



Rechnerischer Ermüdungsnachweis der Lochdübelleiste:

$$P_{LM71,\,Ed} \leq P_{LM71,\,Rd}$$

$$P_{LM71,\,Ed} = 232\ \text{kN/m} < P_{LM71,\,Rd} = 252\ \text{kN/m}\ \checkmark$$

noch offen: Verifikation mit Versuchsergebnissen

Literaturverzeichnis

[1] **Juen, L.**: Analyse des Ermüdungsverhaltens von Kronendübeln als alternative Schubverbinder. Dissertation am Institut für Stahlbau, TU Wien, 2013.

[2] **Haibach, E.**: Betriebsfestigkeit. Springer Verlag, 2. Ausgabe, 2002.

[3] **Song, J.**: Untersuchung der Anrisslebensdauer von Betondübeln mit Hilfe des Örtlichen Konzepts. Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt, Heft 67, 2002.

[4] **Siebel, E. ; Gaier, M.**: Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerfestigkeit metallischer Bauteile. VDI-Z. 98, S. 1715-1723, 1956.

[5] **Hanel, B. ; Haibach, E. ; Seeger, T. ; Wirthgen, G. ; Zenner, H.**: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. FKM Forschungskuratorium Maschinenbau, VDMA Verlag,5. Ausgabe, 2003.

Danke
für Ihre Aufmerksamkeit!