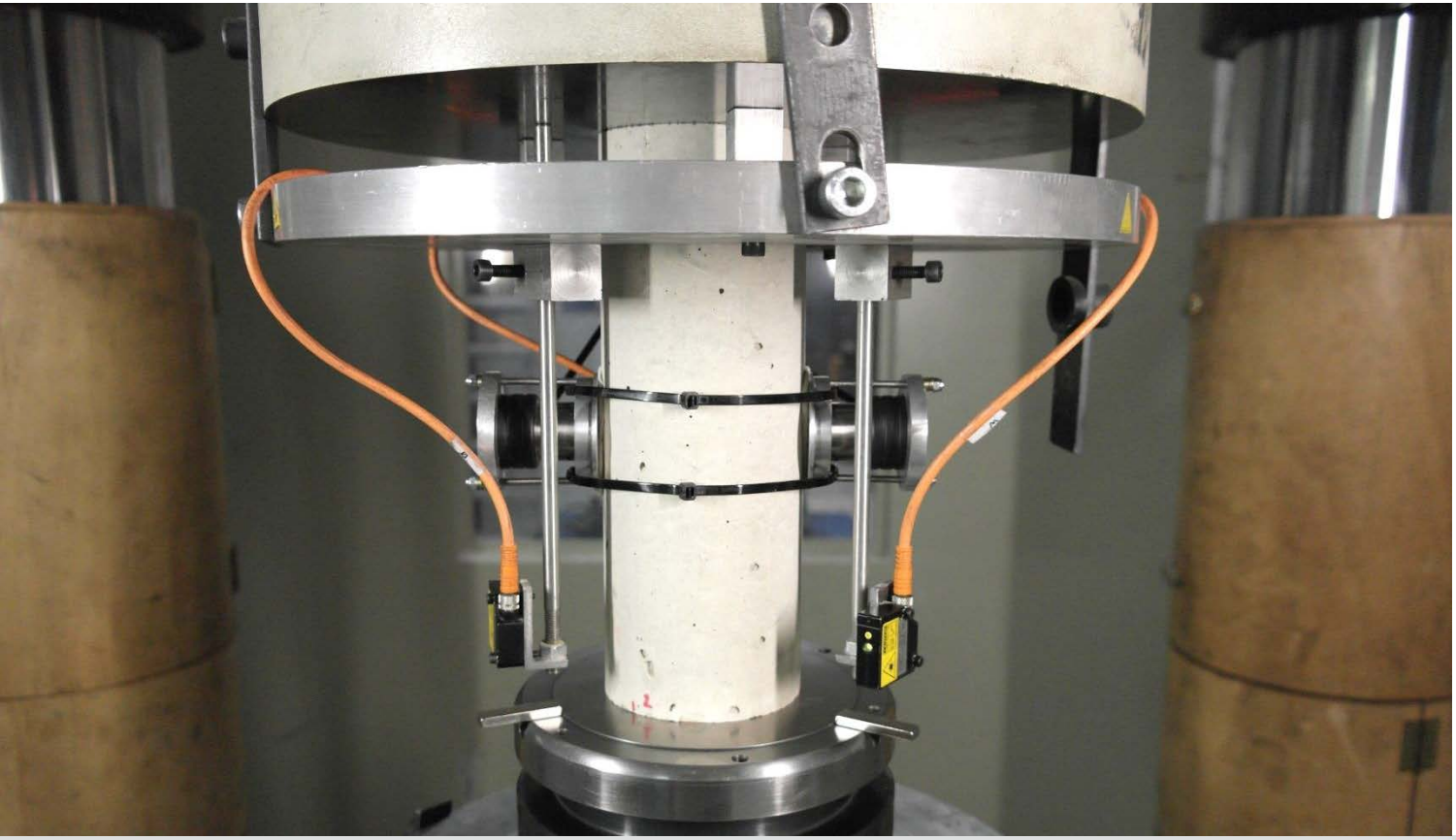
Institut für Massivbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Leibniz Universität Hannover

Sachstandbericht zur Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Betontragwerken



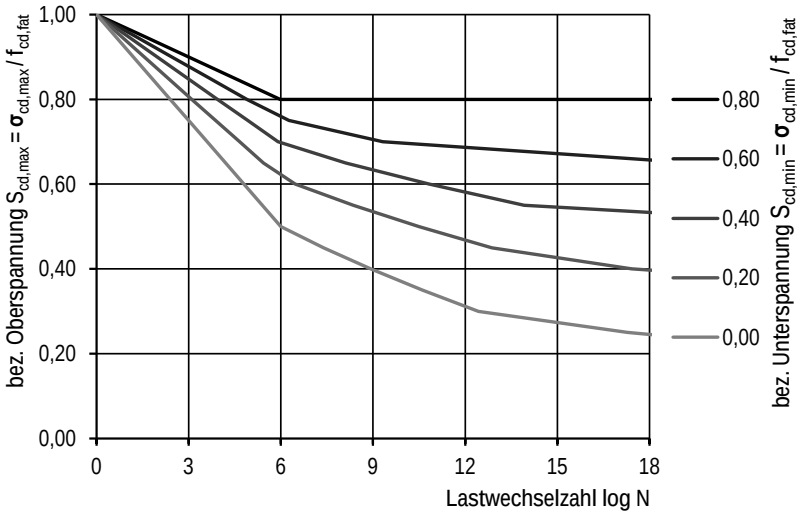
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Dipl.-Ing. Sebastian Schneider

3. Jahrestagung des DAfStb, 12.11.2015

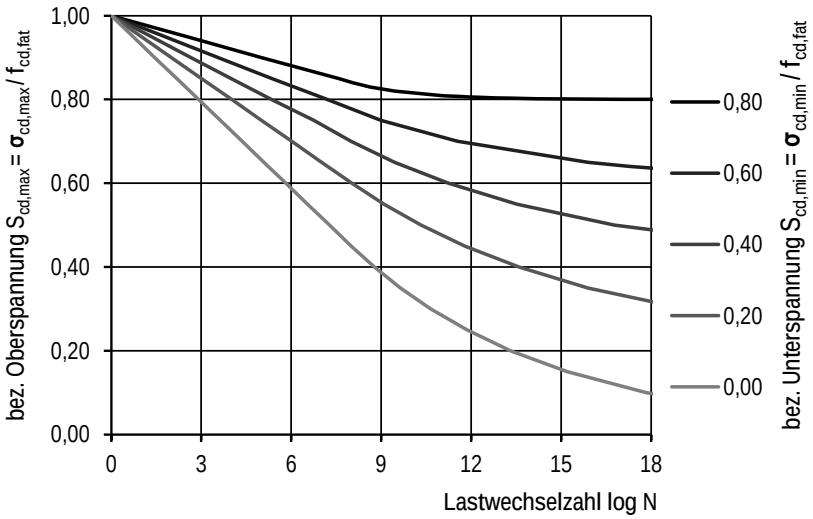
Dynamisch beanspruchte Bauwerke

Wöhlerlinien für druckschwellbeanspruchten Beton

CEB-FIP Model Code 1990



fib Model Code 2010



Bezogene Oberspannung: $S_{cd,max} = \sigma_{cd,max} / f_{cd,fat}$

Bezogene Unterspannung: $S_{cd,min} = \sigma_{cd,min} / f_{cd,fat}$

Bemessungsdruckfestigkeit unter Ermüdungsbeanspruchungen $f_{cd,fat}$

$f_{cd,fat}$ nach Model Code 1990:

$$f_{cd,fat} = 0{,}85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)}_{\alpha_{cd,fat}}$$

$f_{cd,fat}$ nach Model Code 2010:

$$f_{cd,fat} = 0{,}85 \cdot \beta_{cc}(t) \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,fat}} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right)}_{\alpha_{cd,fat}}$$

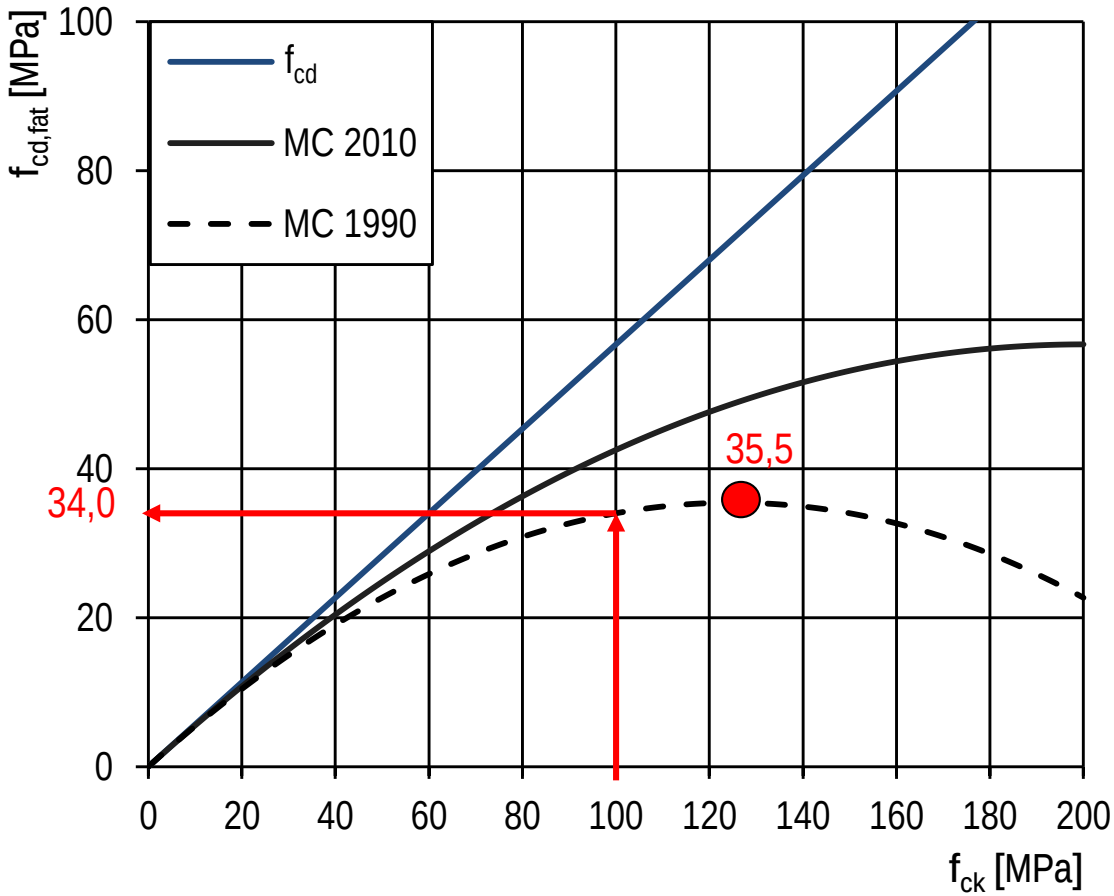
0,85 : Berücksichtigung der abweichenden Belastungsfrequenz

f_{ck} : Charakteristische Betondruckfestigkeit

$\gamma_c = \gamma_{c,fat} = 1{,}5$: Teilsicherheitsbeiwert für Beton

$\alpha_{cd,fat}$: Beiwert zur Berücksichtigung des Festigkeitseinflusses

Auswirkung von $\alpha_{cd,fat}$ auf $f_{cd,fat}$



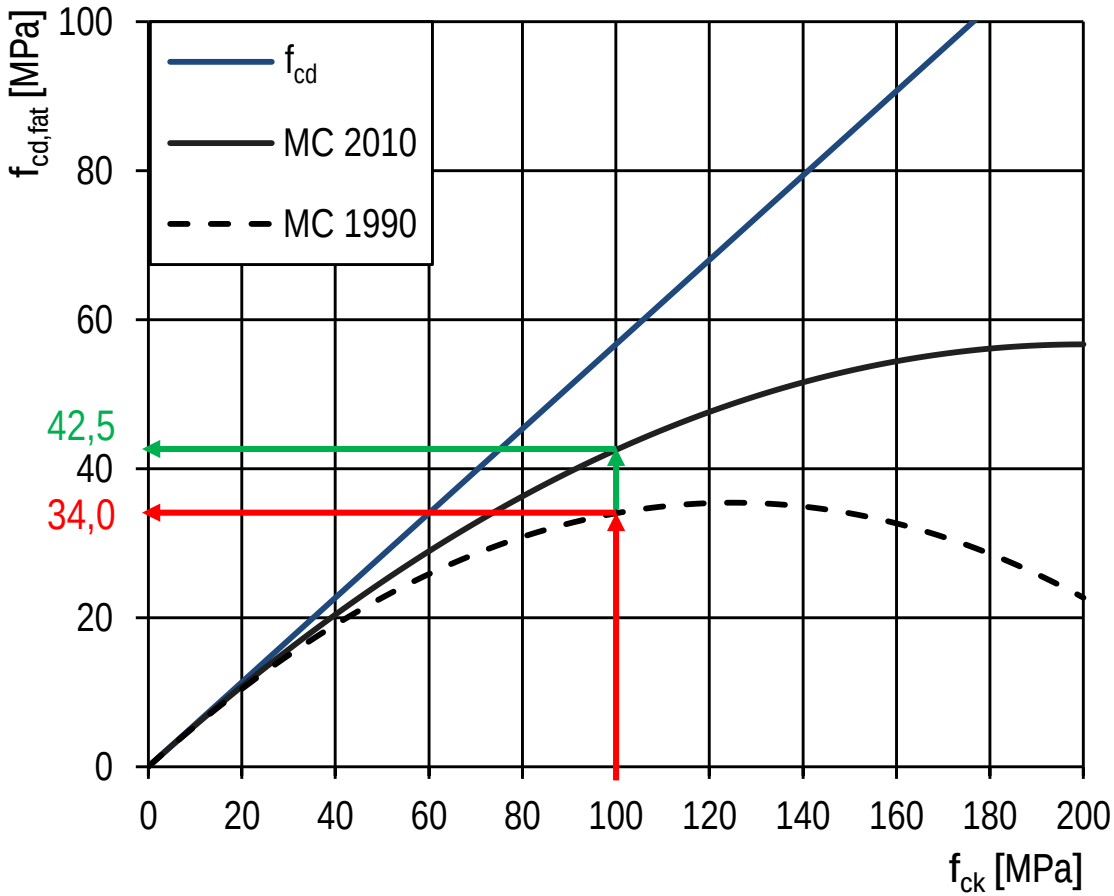
MC 2010:

$$\alpha_{cd,fat} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right)$$

MC 1990:

$$\alpha_{cd,fat} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

Auswirkung von $\alpha_{cd,fat}$ auf $f_{cd,fat}$



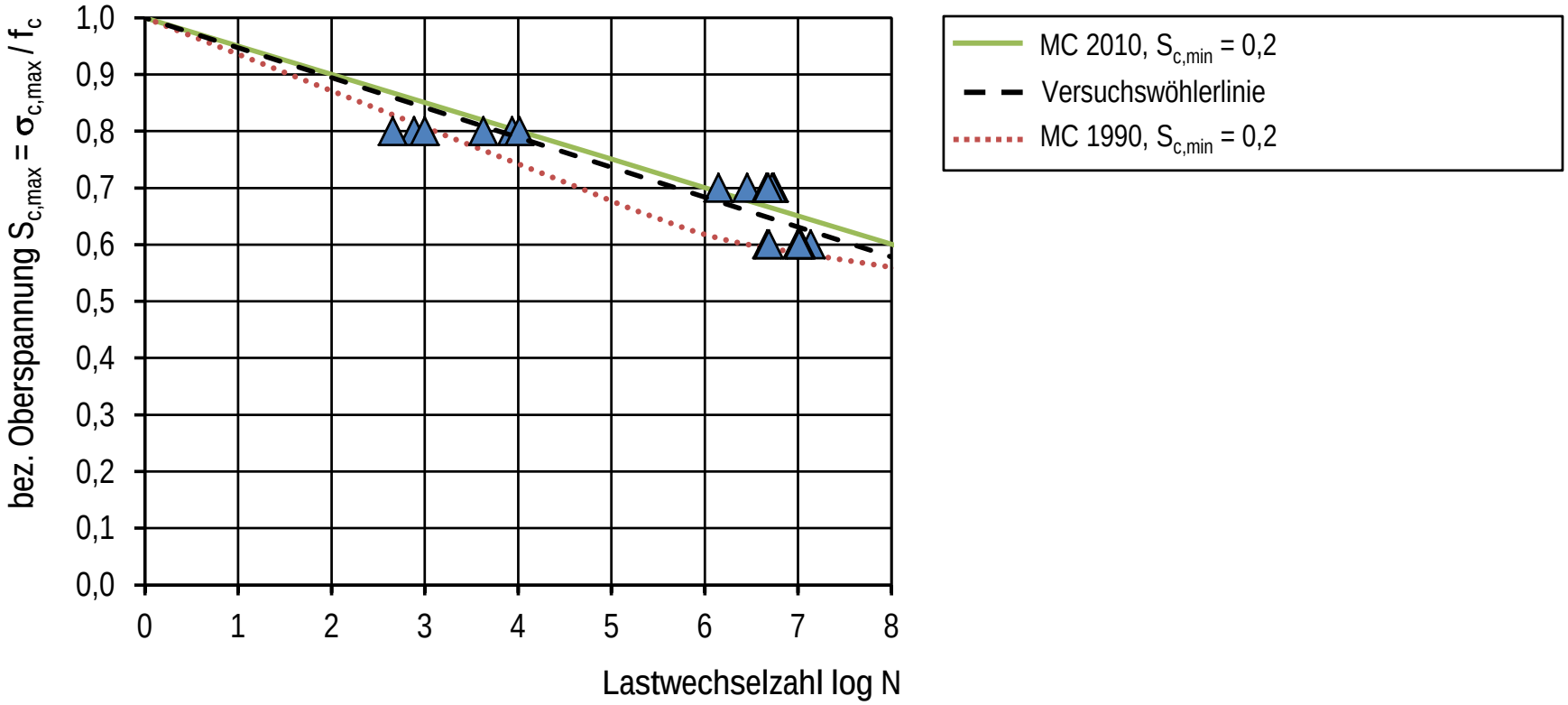
MC 2010:

$$\alpha_{cd,fat} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{400}\right)$$

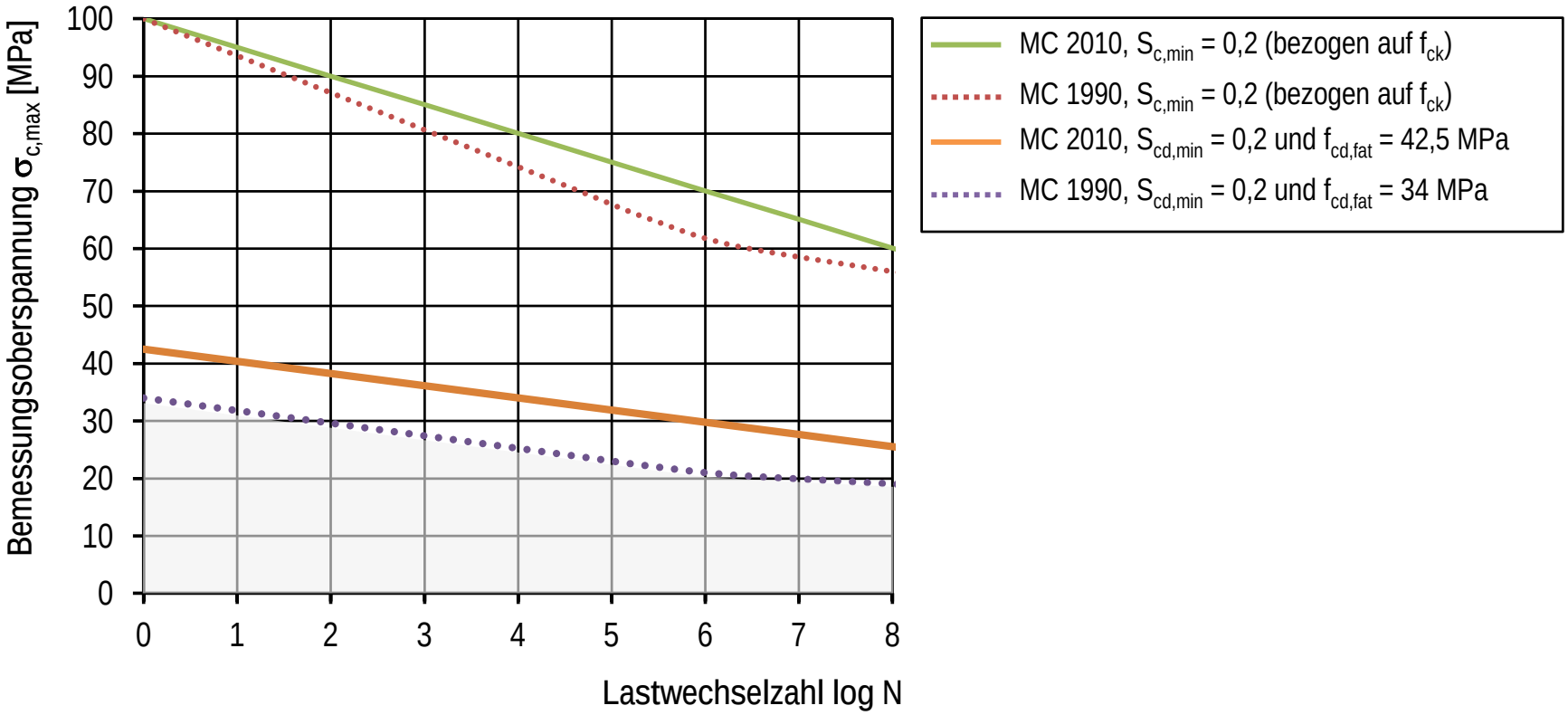
MC 1990:

$$\alpha_{cd,fat} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

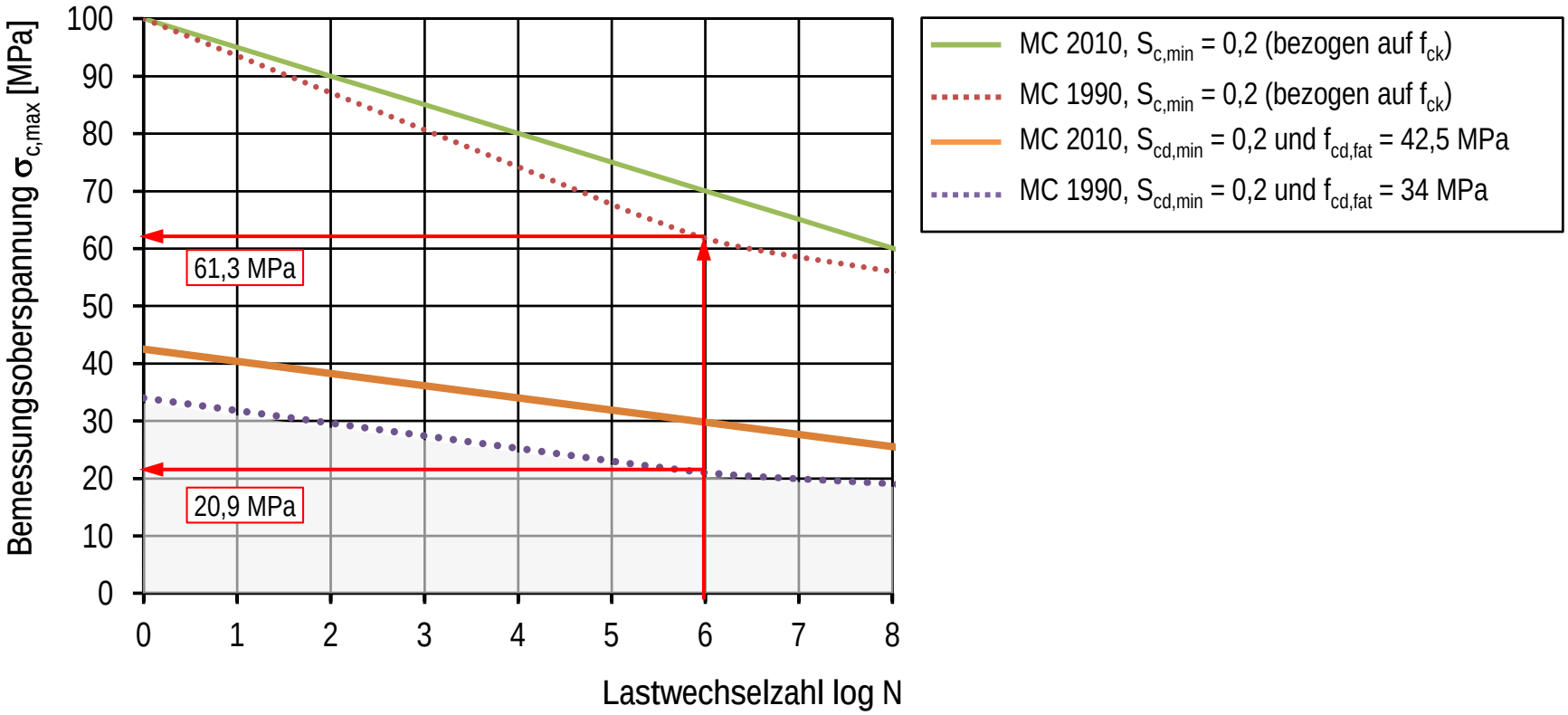
Ermüdungsversuche an Beton C 100/115



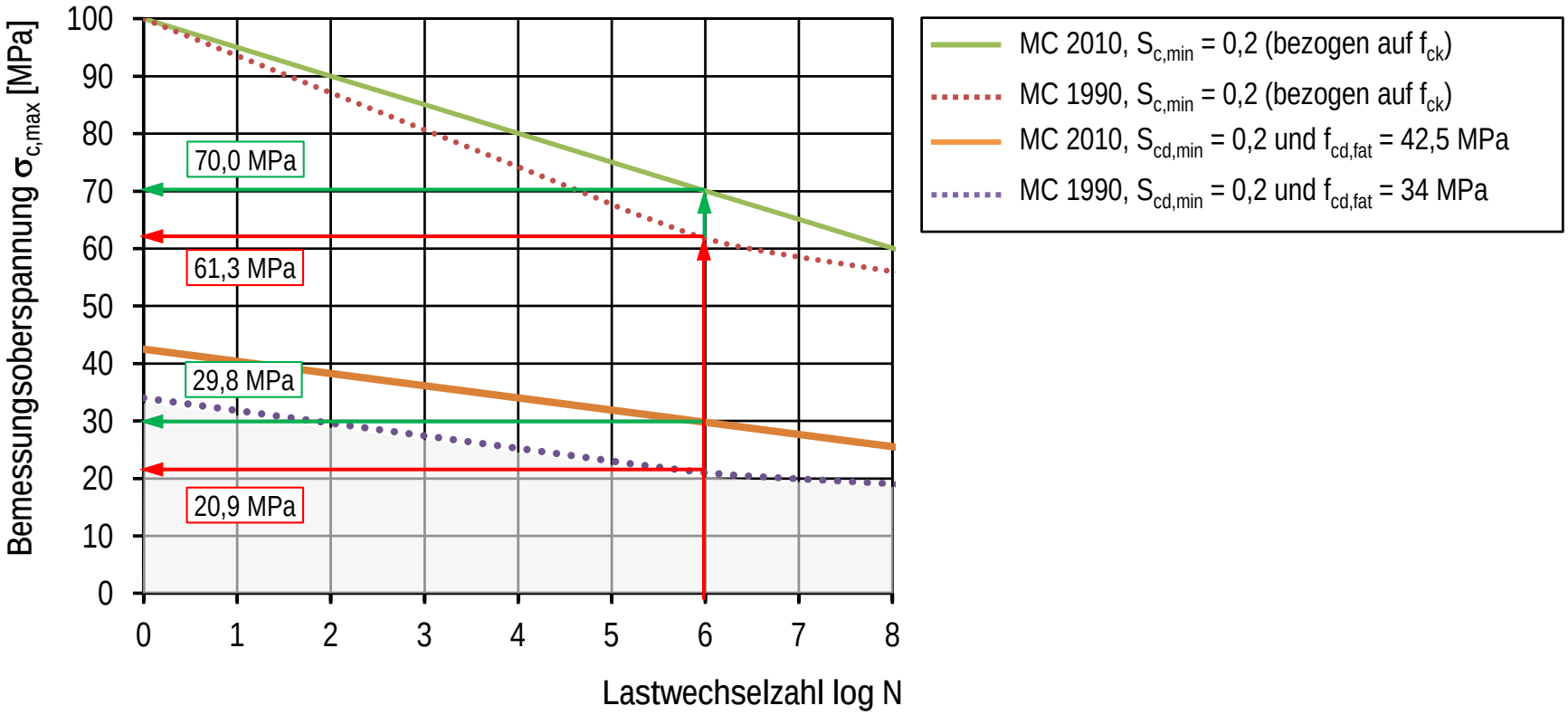
Ermüdungsversuche an Beton C 100/115



Ermüdungsversuche an Beton C 100/115

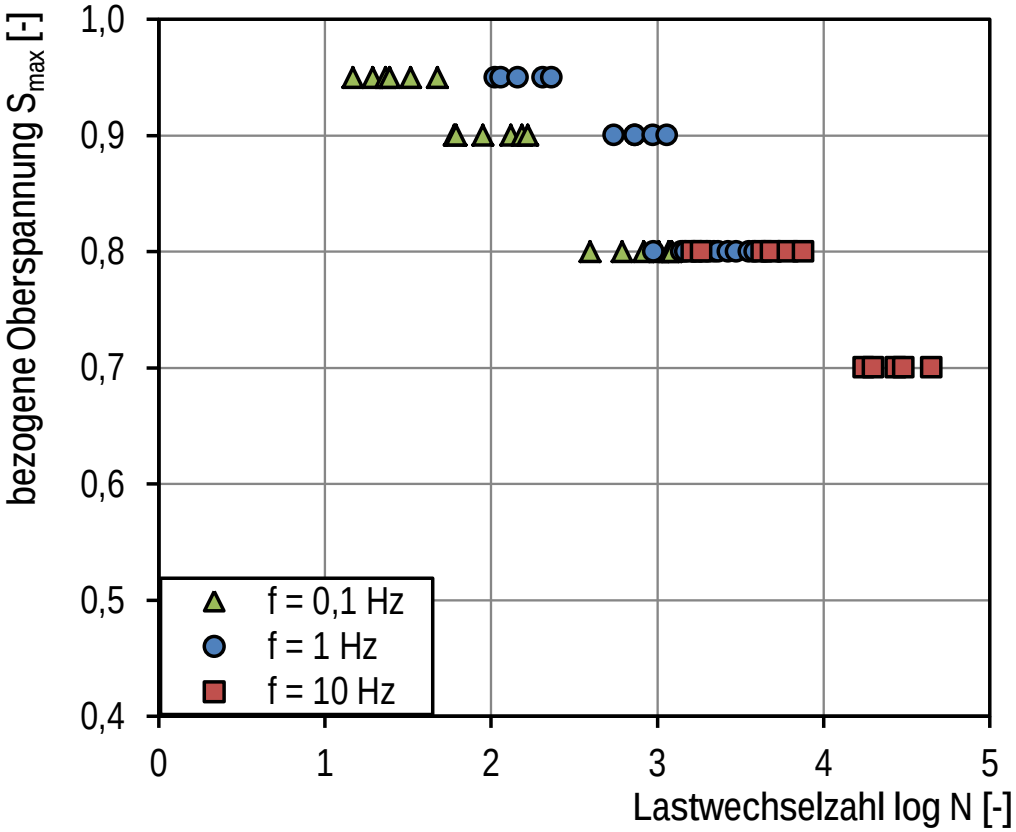


Ermüdungsversuche an Beton C 100/115



Weitere Fragestellungen zur Betonermüdung

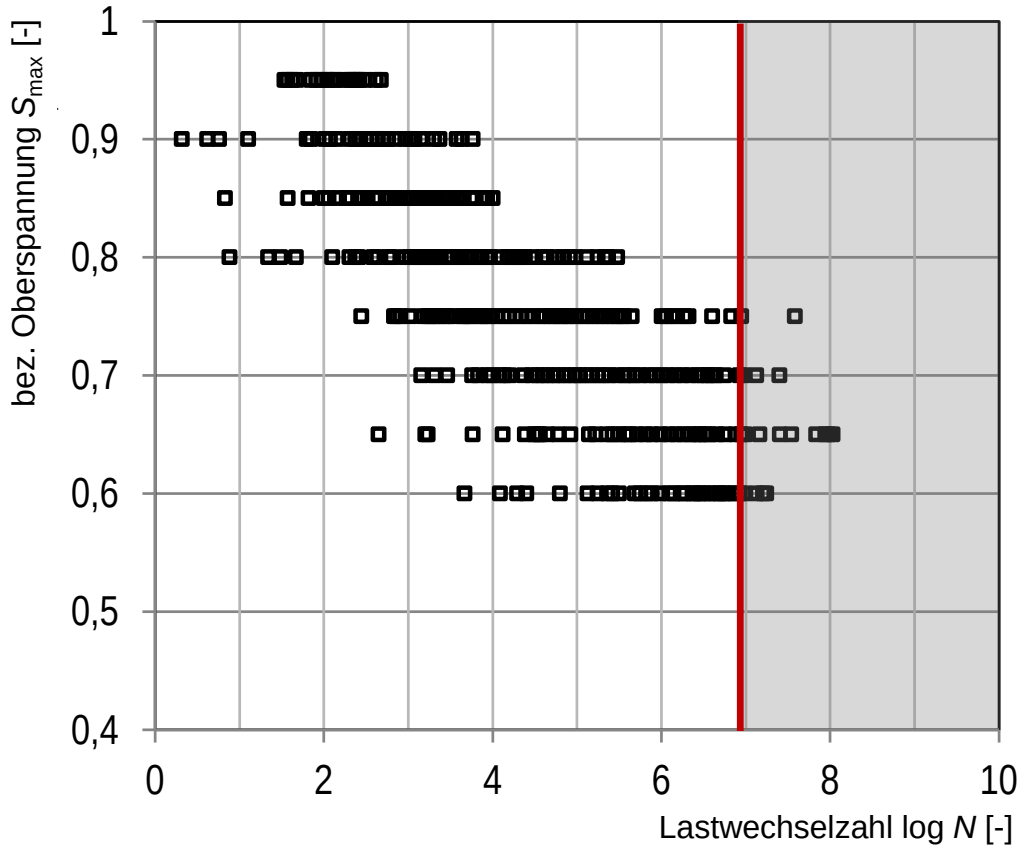
- Einfluss der Belastungsfrequenz



(Oneschkow 2014)

Weitere Fragestellungen zur Betonermüdung

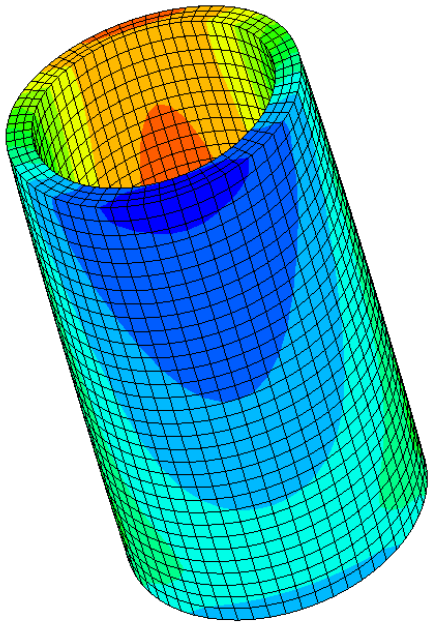
- Ermüdungsfestigkeit im Very-High-Cycle Fatigue Bereich ($N > 10^7$)



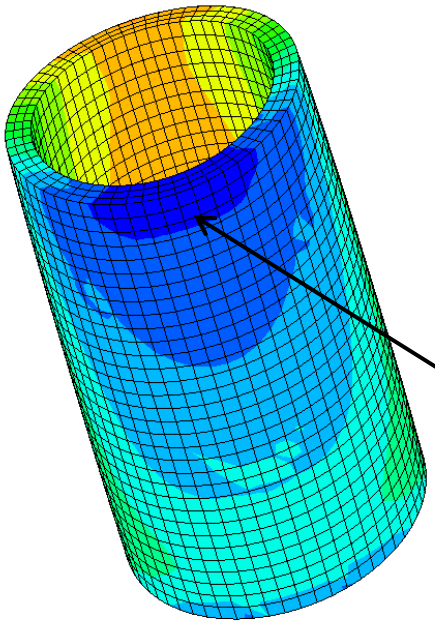
Weitere Fragestellungen zur Betonermüdung

- Einfluss von Spannungsumlagerungen

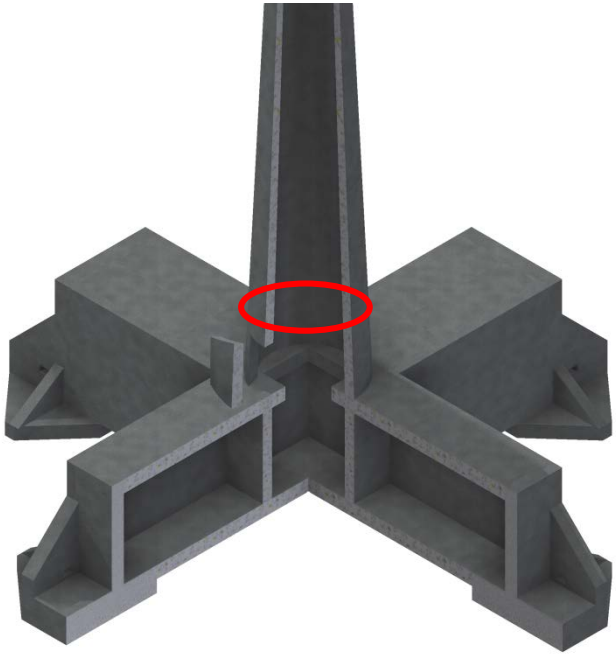
Spannungsverteilung zu Beginn der Lastgeschichte



Spannungsverteilung am Ende der Lastgeschichte



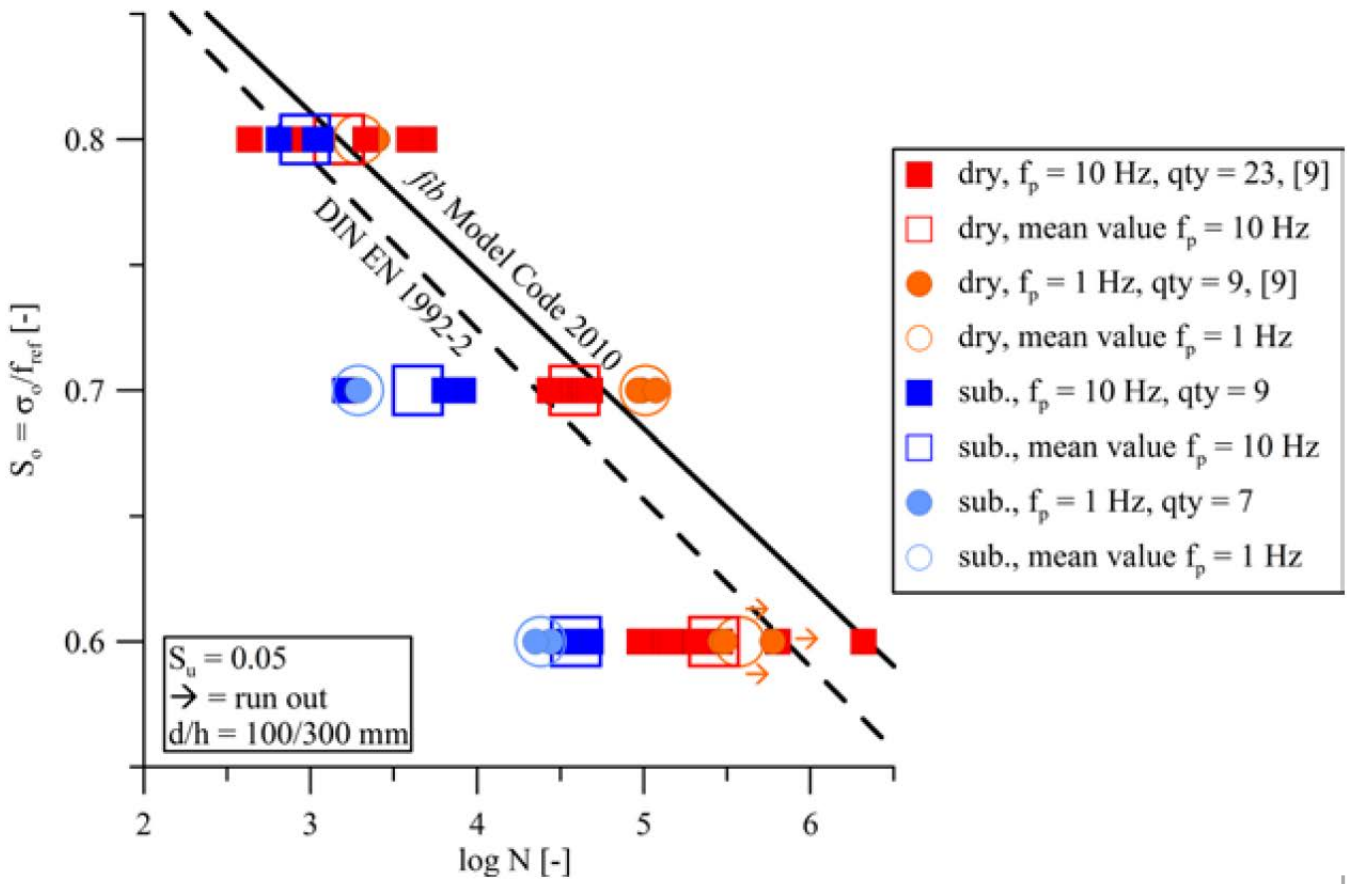
Verbreiterung der Druckzone



(Göhlmann 2009)

Weitere Fragestellungen zur Betonermüdung

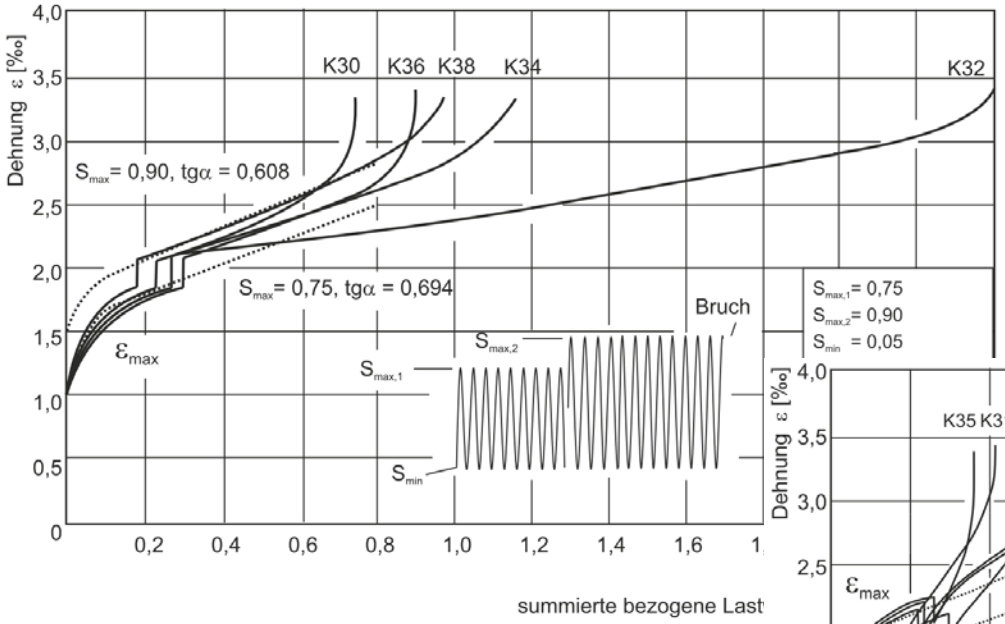
- Einfluss der Wassersättigung

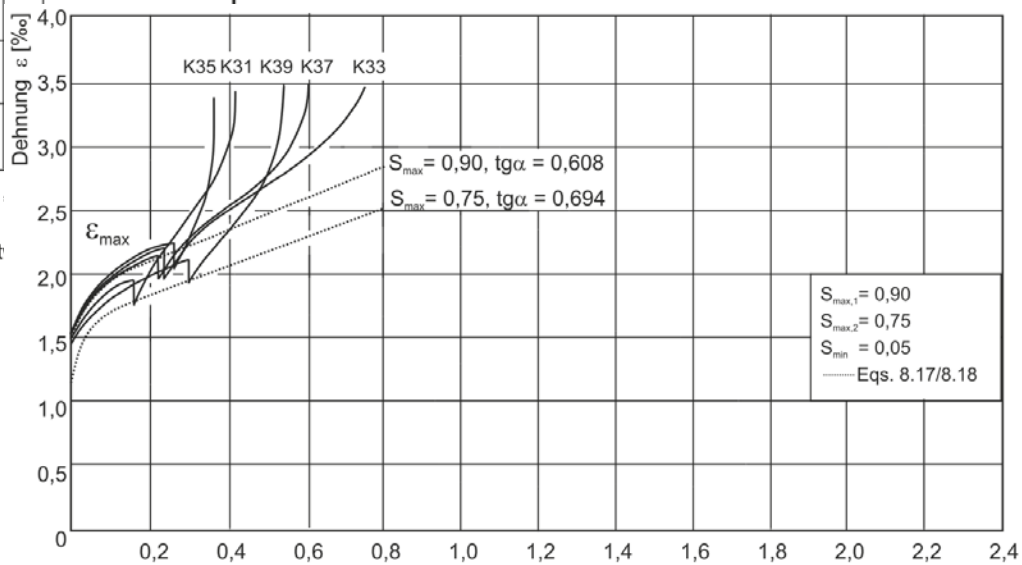


Hümme (2015)

Weitere Fragestellungen zur Betonermüdung

- Einfluss von Amplitudenwechsel

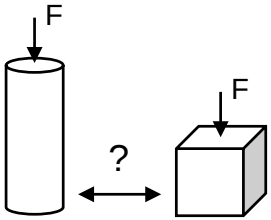
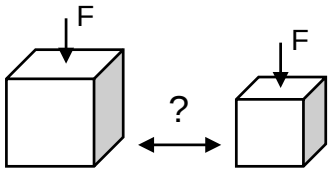




Holmen (1979)

Weitere Fragestellungen zur Betonermüdung

- Einfluss der Probekörpergeometrie und des Maßstabeffekts

Statisch		Dynamisch
$f_{ck} = 0{,}82 \cdot f_{ck,cube,150}$		?
$f_{ck,cube,200} = 0{,}95 \cdot f_{ck,cube,150}$		?

Verbundforschungsvorhaben WinConFat

Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Fördersumme: ~ 3.000.000 €

Industriemittel: ~ 900.000 €

Geplante Laufzeit: 2016 - 2019

Verbundpartner: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.
Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.
Leibniz Universität Hannover
RWTH Aachen
Technische Universität Dresden
Technische Universität München
Ruhr-Universität Bochum
Karlsruher Institut für Technologie
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Verbundforschungsvorhaben WinConFat

Ermüdung von druckschwellbeanspruchtem Beton

BAM
AP 1.1 Maßstabseffekt und Probekörpergeometrie

IfMa, IfB Hannover
AP 1.2 - Spannungsumlagerungen
AP 1.3 - Belastungsfrequenz u. -geschwindigkeit des Betons
AP 1.6 - Grundwert der Ermüdungsfestigkeit $f_{cd,fat}$
AP 1.8 - Wassersättigung und Chloridtransport
AP 4 - Monitoring und Restnutzungsdauer

KIT, Karlsruhe
AP 1.4 - Beton unter sehr hohen Lastwechselzahlen

RWTH Aachen
AP 1.5 - Amplitudenwechsel und Reihenfolgeeffekte

RU Bochum
AP 1.7 - Stahlfaserbeton

Ermüdung des Verbundes

RWTH Aachen
AP 2.1 - Verbund unter sehr hohen Lastwechselzahlen
- Druckschwellbeanspruchung

TU Dresden
AP 2.2 - Verbund unter sehr hohen Lastwechselzahlen
- Zugschwellbeanspruchung
AP 2.3 - Belastungsfrequenz u. -geschwindigkeit des Verbundes

Ermüdung Betonstahl

TU München
AP 3 - Betonstahl unter sehr hohen Lastwechselzahlen

IfMa / DAfStb / DBV
AP 0 - Koordination
AP 5 - ökobilanzielle Betrachtung von WEA

Kurzfristige Verwertung in Deutschland

- DAfStb-Richtlinie zur Bemessung von WEA aus Stahl- und Spannbeton gegen Ermüdung
- DBV-Merkblätter z.B. „Ermüdungsmonitoring hochdynamisch beanspruchter Bauwerke“, „Ermittlung der Restnutzungsdauer von WEA auf Grundlage von Ermüdungsmonitoring“
- Ökobilanz von WEA
- Praxis-Tagungen

Mittelfristige Verwertung in Europa

Eurocode 2 - CEN (Europäisches Komitee für Normung)
Model Code - fib (fédération internationale du béton)

Messgrößen bei Ermüdungsversuchen

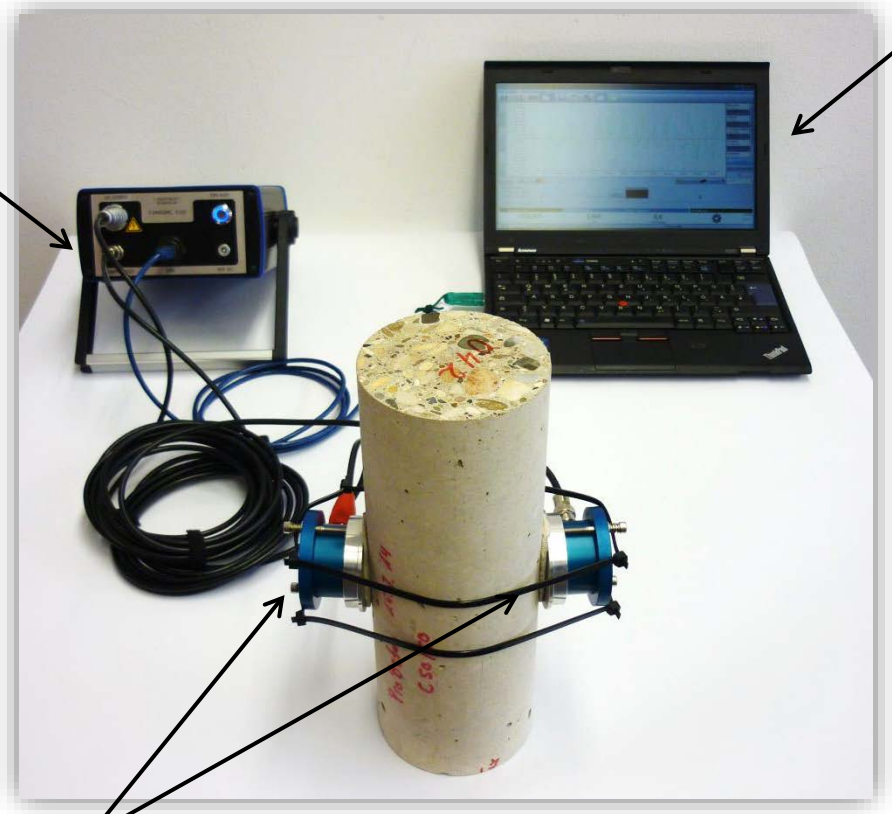
- Bisher:
  - Lastwechselzahl
  - Ober- und Unterlast
  - Belastungsfrequenz
  - Dehnungen
- Zukünftig:
  - Lastwechselzahl
  - Ober- und Unterlast
  - Belastungsfrequenz
  - Dehnungen
  - Oberflächentemperaturen
  - Kriech- und Schädigungsdehnung
  - Feuchtegehalt
  - Ultraschalllaufzeiten

Ultraschallmessungen am Beton

Messtechnik

Messrechner

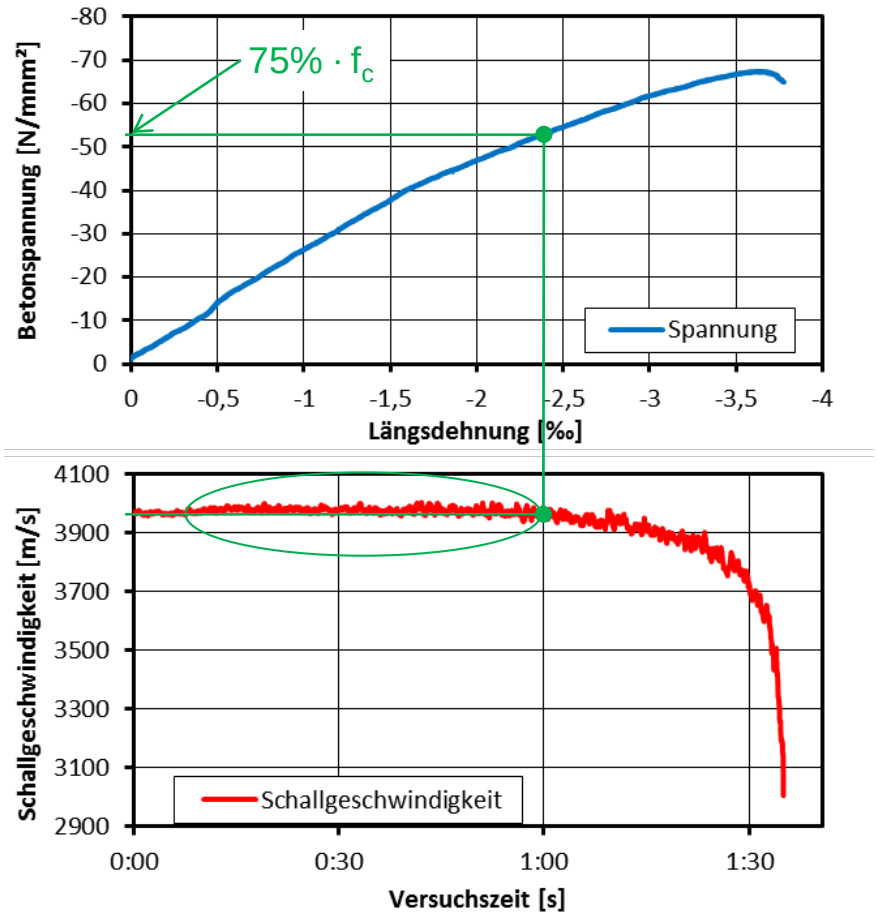
US-Generator & Wandler



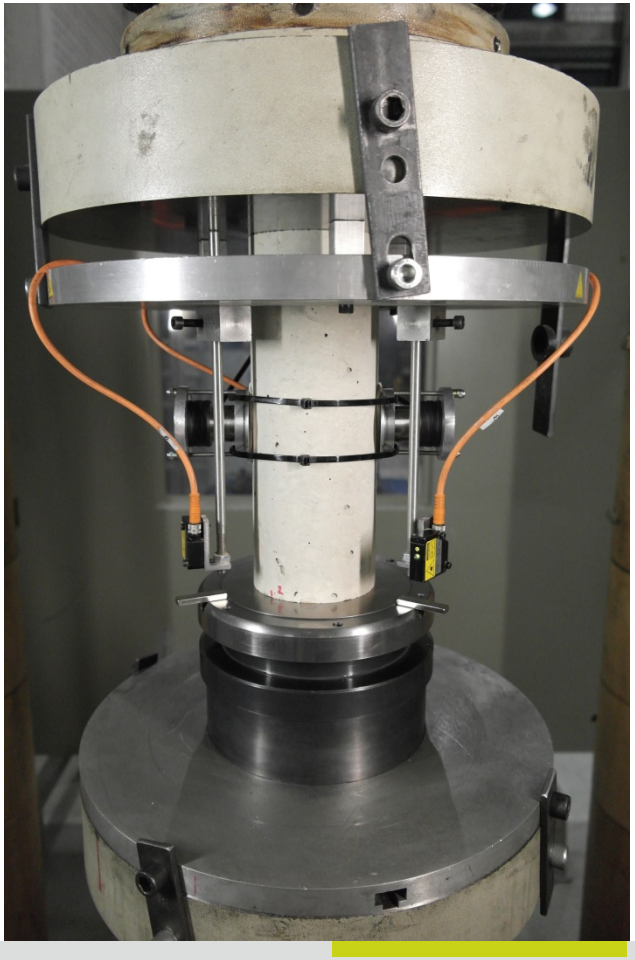
Sender & Empfänger

Ultraschallmessungen am Beton

Statischer Druckversuch

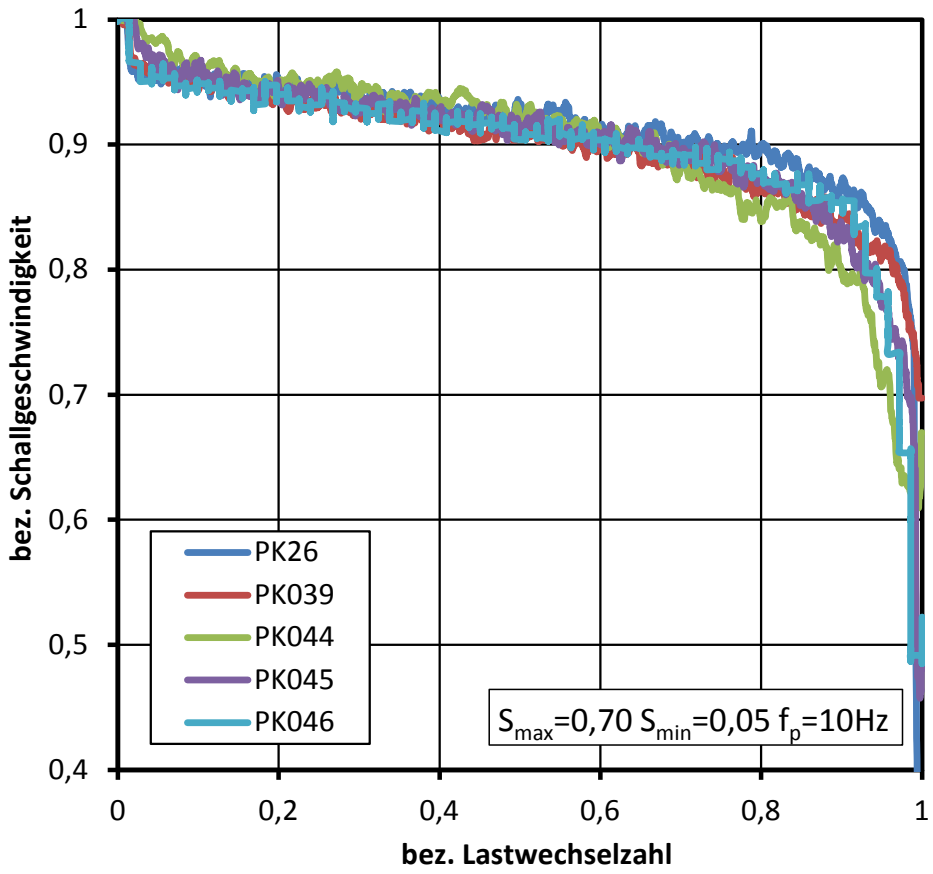


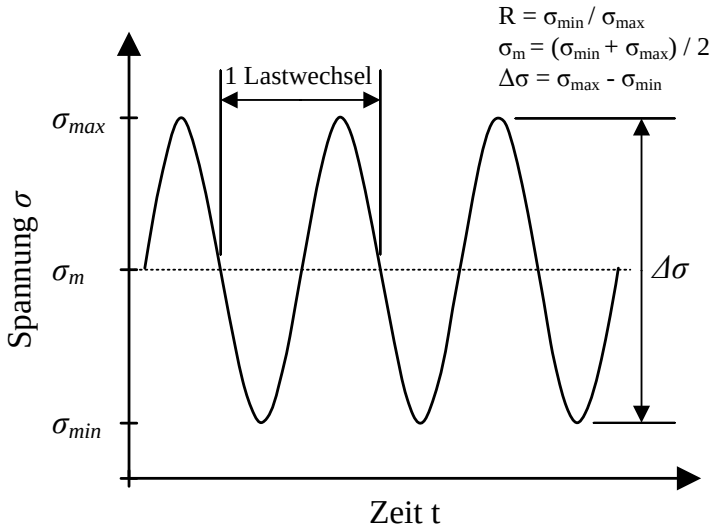
Weggesteuerte Versuchs-durchführung ε` = konst.

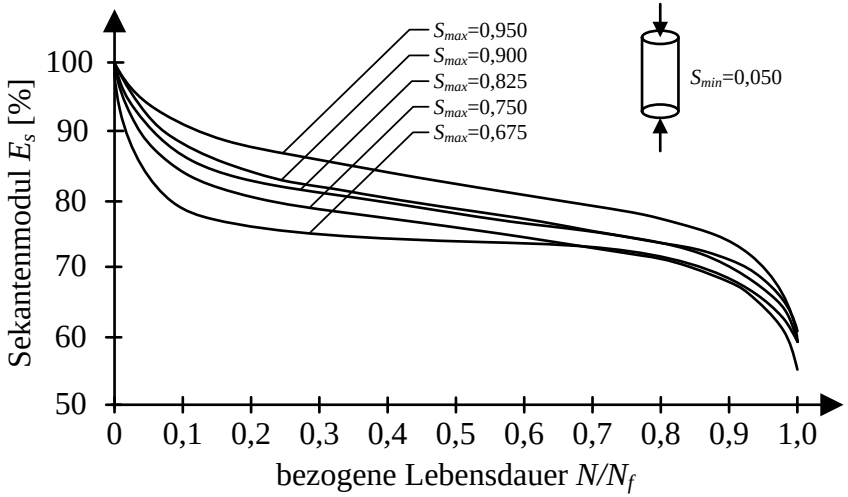


Ultraschallmessungen am Beton

Ermüdungsversuch

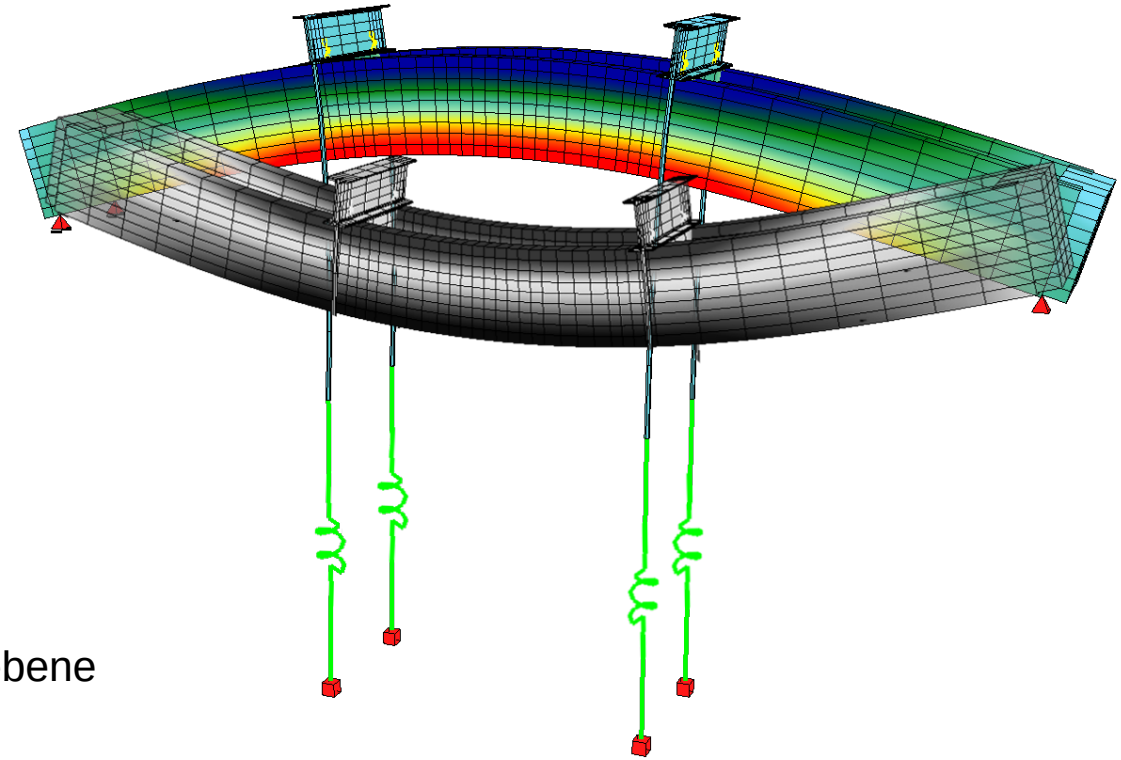






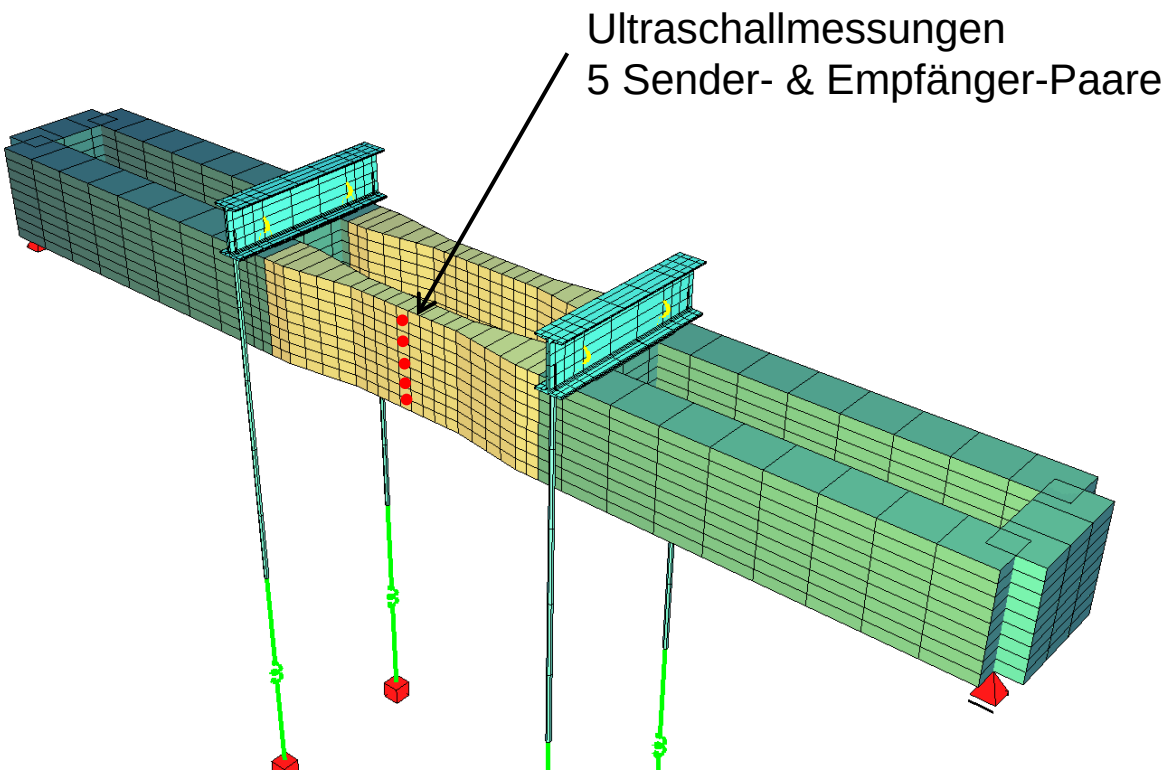
Prüfung von großen Bauteilen

- Versuchsbalken
  - Länge: 9m
  - Höhe: 80 cm
  - Prüffrequenz: 13 - 18 Hz
  - Amplitude: ±2mm
- Ziel
  - Erfassung der Spannungs-umlagerungen auf Bauteilebene
- Fördermittelgeber
  - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)



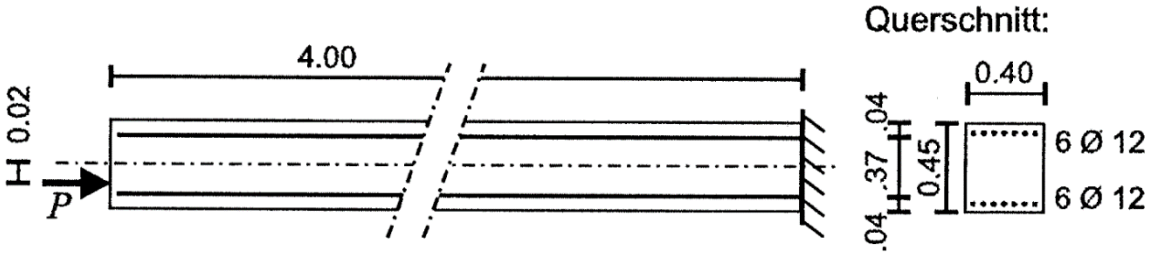
Prüfung von großen Bauteilen

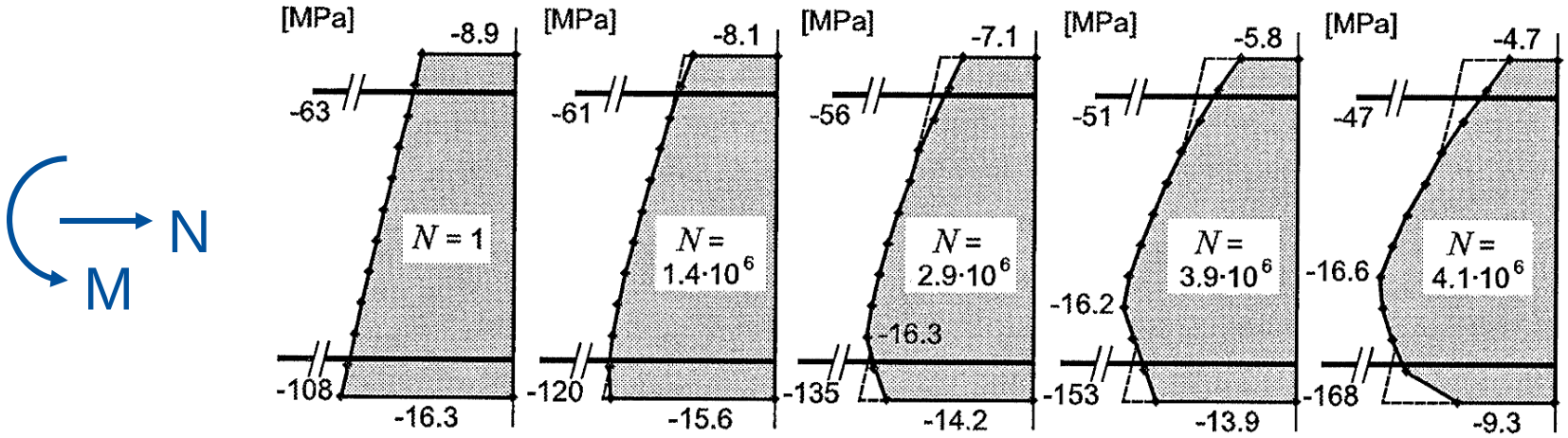
- Spannungsumlagerungen auf Bauteilebene



Prüfung von großen Bauteilen

- Spannungsumlagerungen auf Bauteilebene





(Pfanner 2003)

Institut für Massivbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Leibniz Universität Hannover

Sachstandbericht zur Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Betontragwerken

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!