



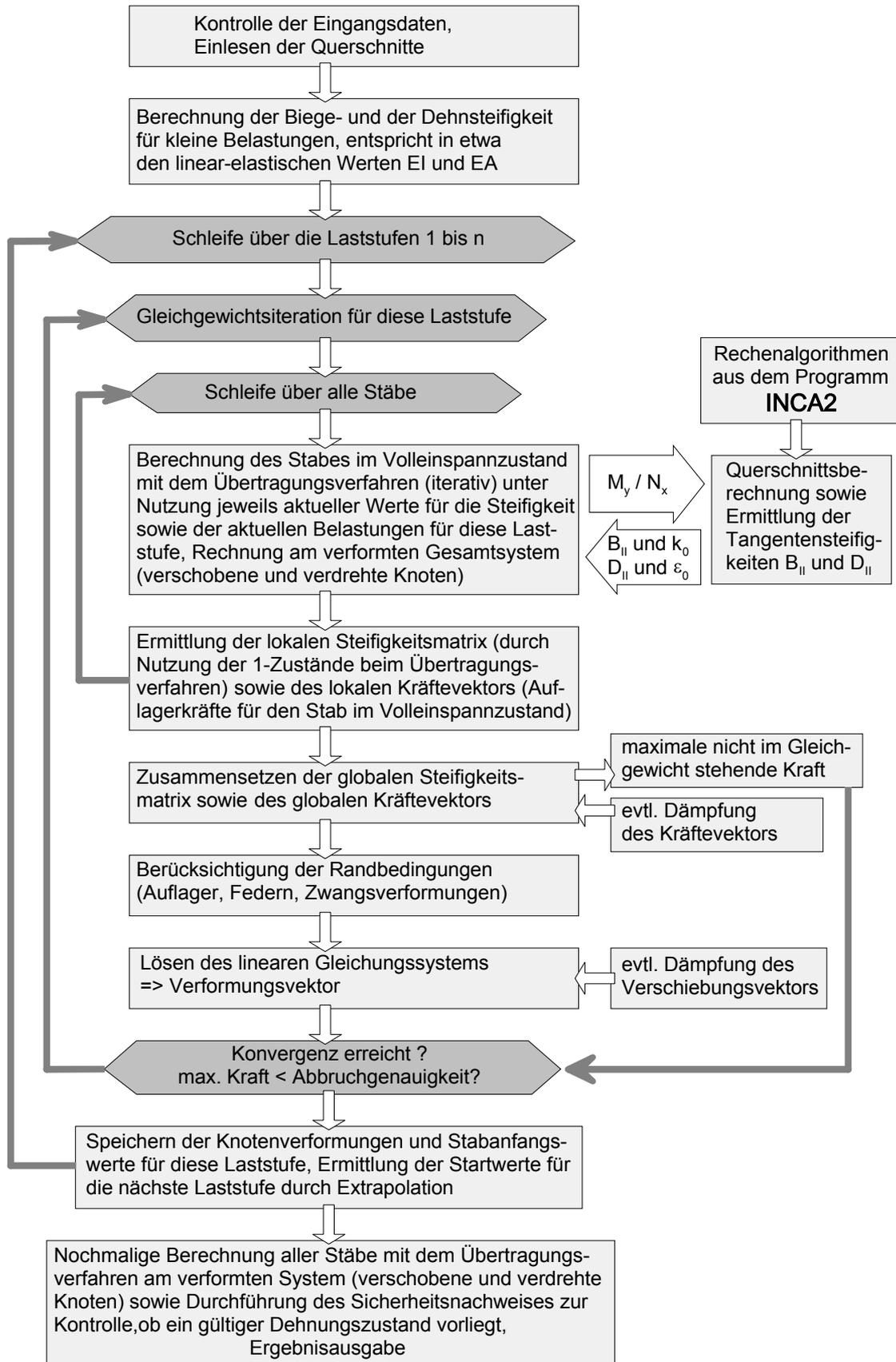
## Was kann das Programm Stab2D-NL ?

- 2D-Rahmensystem aus Stahlbeton oder aus jedem anderen beliebigen Baustoff
- Realitätsnahe Berücksichtigung der Verformungen mit nichtlinearer Beziehung zwischen Moment / Normalkraft und Verkrümmung / Dehnung:
  - Zustand I - ungerissener Querschnitt
  - Zustand II – gerissen, Berücksichtigung der versteifenden Mitwirkung der Betonzugzone
  - Zustand III – Fließen der Bewehrung
- Zeitabhängige Verformungen (Schwinden, Kriechen)
- gevoutete Querschnitte
- Vorspannung mit Verbund (auch parabelförmiger Verlauf, Modellierung mittels gevouteter Stababschnitte), nachträglich ergänzte Querschnitte
- Berücksichtigung großer Verformungen (Theorie 3. Ordnung, Seiltragwerke)
- elastisch gebettete Balken mit einer nichtlinearen Kraft-Verformungs-Beziehung
- näherungsweise Berücksichtigung der Schubverformungen

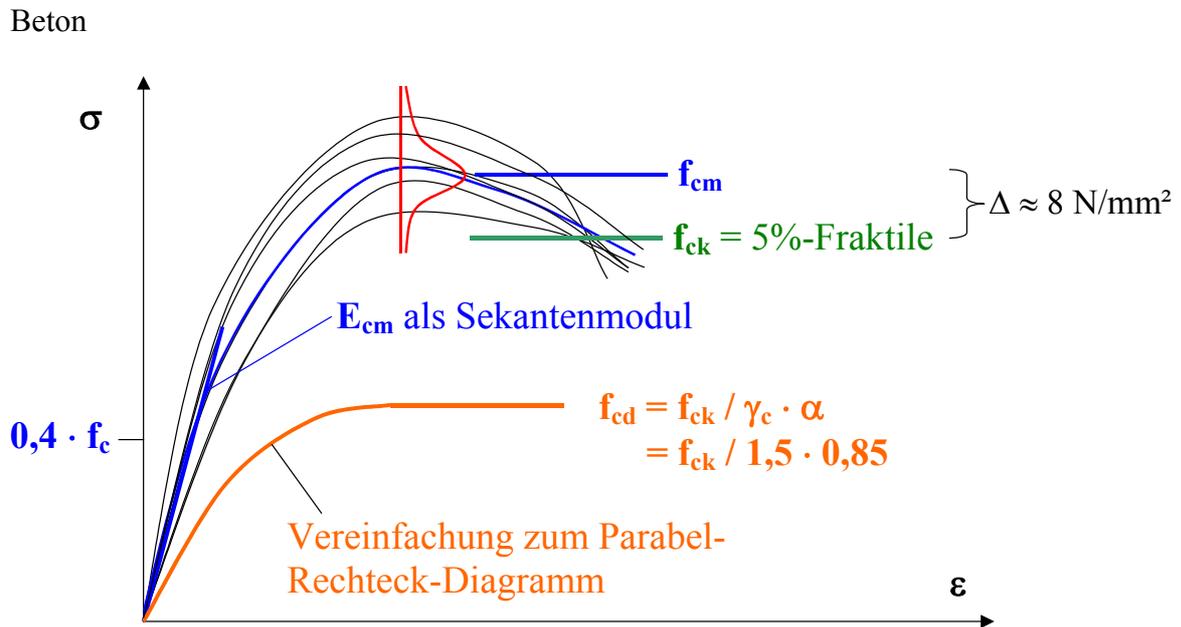
## Was kann das Programm nicht oder nur relativ ungenau?

- Diskontinuitätsbereiche (mehrxiale Spannungszustände) in Rahmenecken, bei Lasteinleitungen, Querschnittssprüngen
- gedrungene Balken mit einem erheblichen Anteil der Schubverformung sowie Versagen auf Schub
- Berücksichtigung bleibender Verformungen bzw. anschließender Rückverformung
  - Hysterese-Kurve bei Hin- und Rückverformung
  - plastischer Anteil beim Kriechen bzw. bei der Relaxation
  - Überschreiten der Querschnittstragfähigkeit in einem Balkenbereich mit anschließender Rückverformung benachbarter Abschnitte

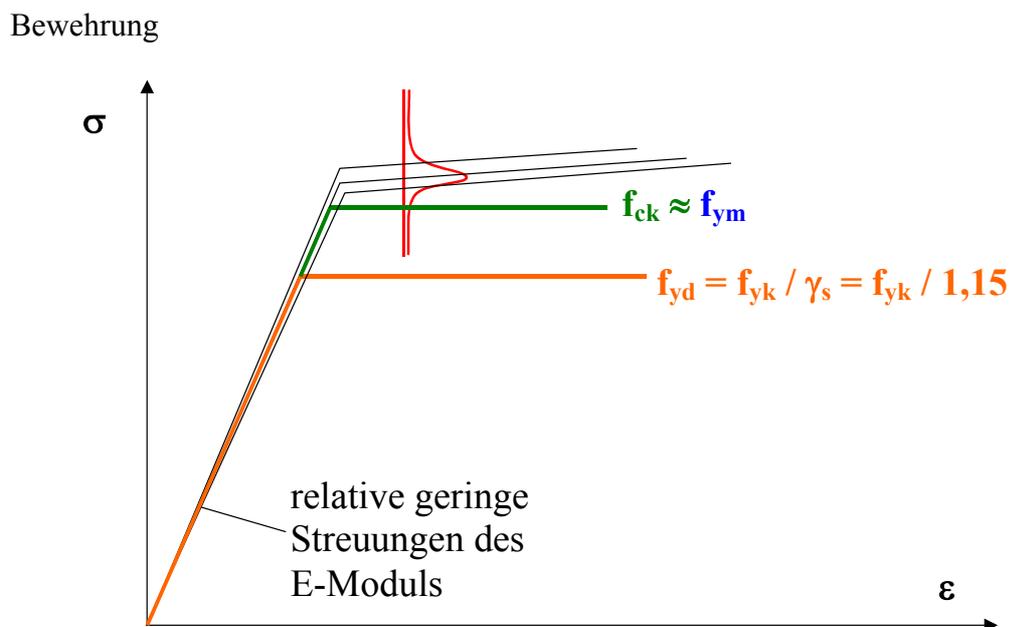
**Programmablaufplan Stab2D-NL**



## Baustoffeigenschaften

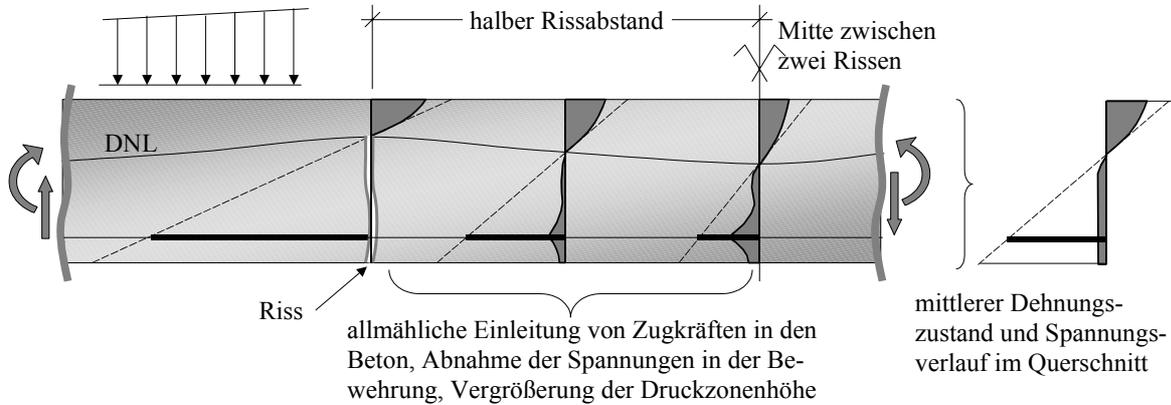


E-Modul - stark schwankend, insbesondere starke Abhängigkeit vom Zuschlag  
 Druckfestigkeit - streuend  
 Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit sowie Grenzdehnung relativ konstant

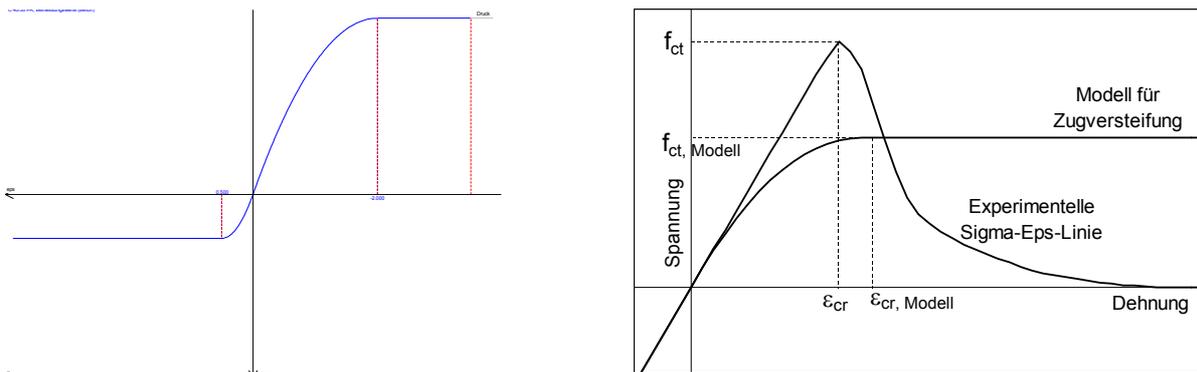


## Versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug

- Realität und Vereinfachung

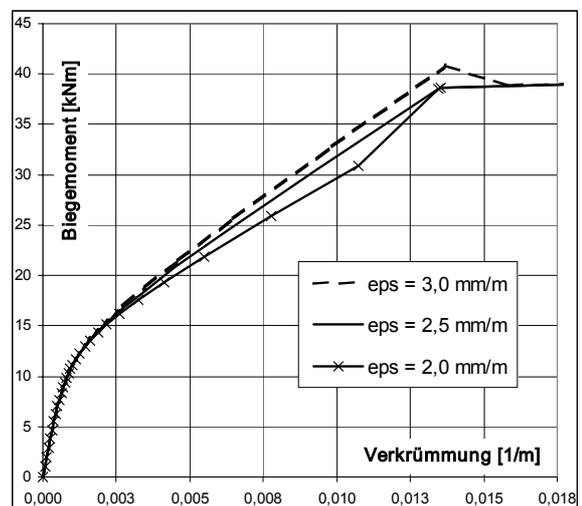
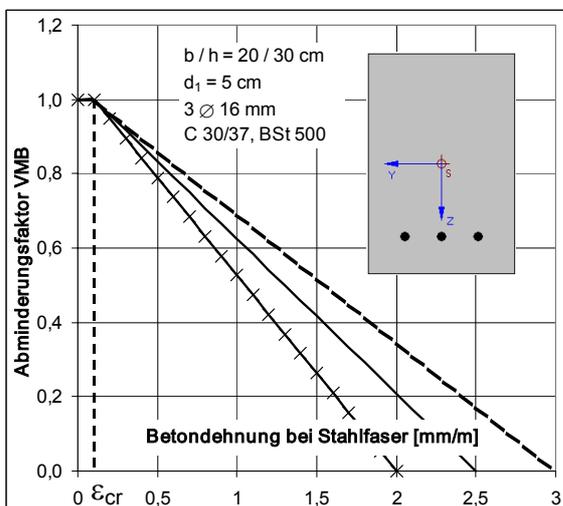


- Definition des Materialgesetzes

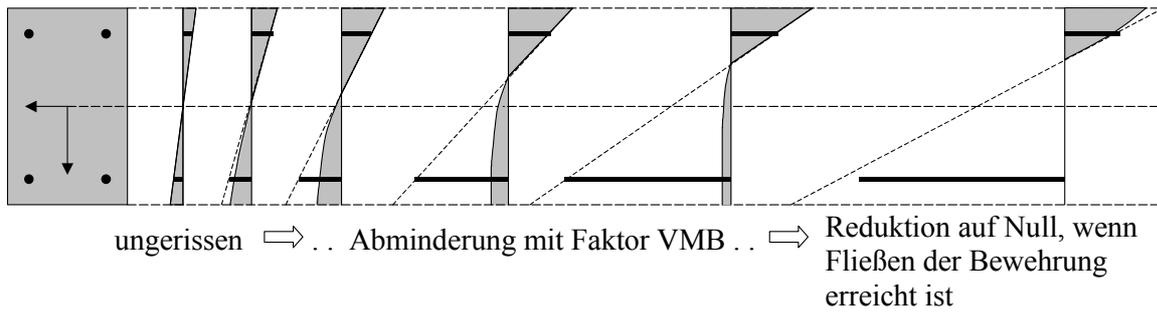


**Rechenwert der Zugfestigkeit  $f_{ct,Modell}$  beträgt nur ca. 60% des Wertes  $f_{ct}$  entsprechend DIN 1045-1 !**

- Definition eines Abminderungsfaktors (in Abhängigkeit der Dehnung in der Bewehrung)



- Kombination der Materialdefinition und des Abminderungsfaktors

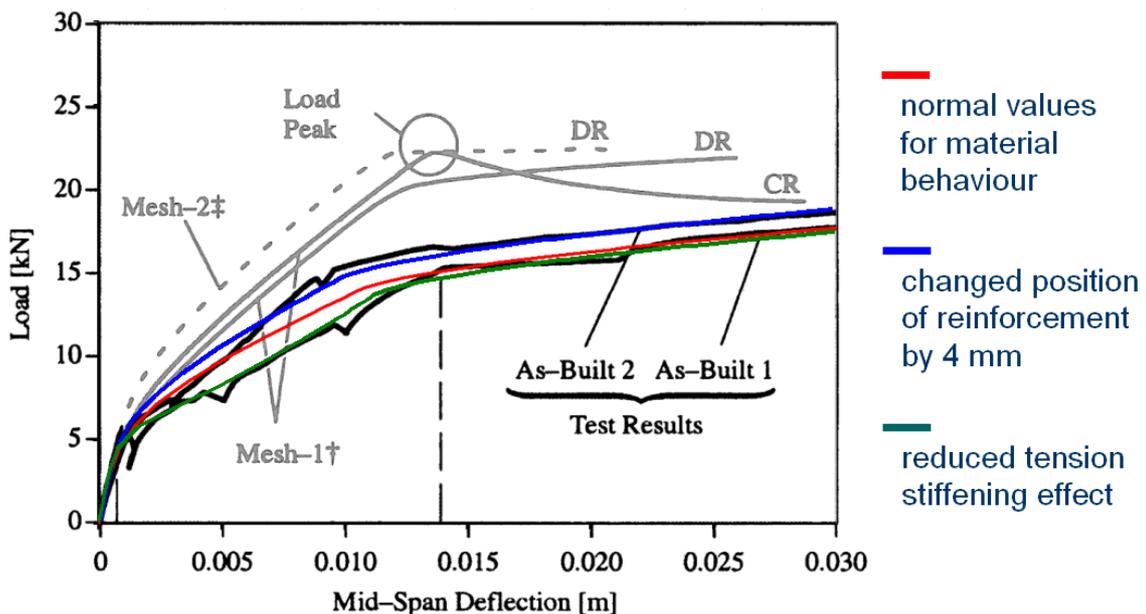
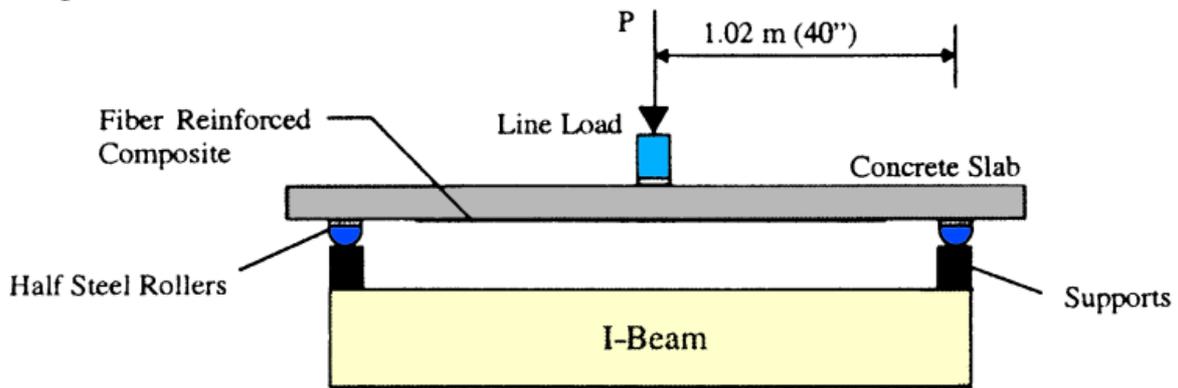


=> Vereinfachung der realen Zusammenhänge mit ausreichender Genauigkeit für baupraktische Belange

- Beispiel: Stahlbetonplatte

aus Journal of Engineering Mechanics, May 2002: Numerical Investigations of Fiber Reinforced Polymers Poststrengthened Concrete Slabs, by M. Hörmann, H. Menrath and E. Ramm (Stuttgart, Germany), P. 552 - 561

Longitudinal Section



## Zeitabhängiges Verhalten

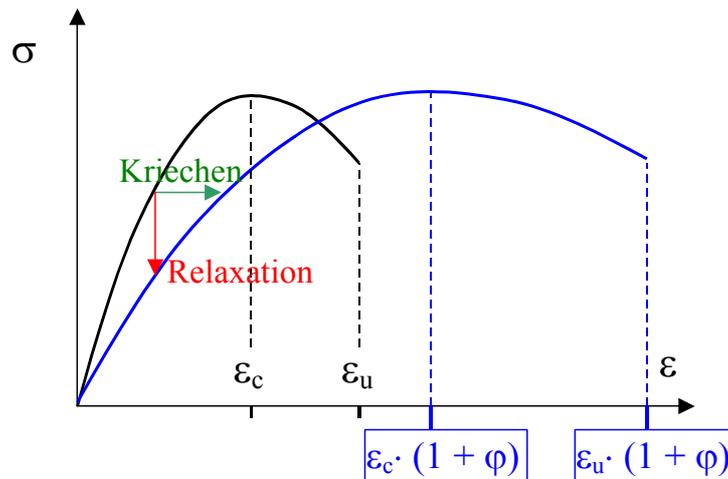
**Schwinden** – Verkürzung des Betons

⇒ Modellierung durch Vordehnung der Bewehrung (negativ) oder des Betons (positiv)

**Kriechen** – bleibende (plastische) Verformung unter quasi-ständiger Belastung

⇒ Modellierung durch das Strecken der Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t=0} \cdot (1 + \varphi) \quad \text{gültig für } f_c < 40\% \text{ bis } 45\% \text{ von } f_{ck}$$



⇒ Abweichungen bei ca. 10%, Dehnungen werden meist unterschätzt. Der Kriechbeiwert  $\varphi$  kann jedoch nur mit einer Genauigkeit von 30% bis 50% bestimmt werden !

**Relaxation** – Abnahme der Spannungen bei gleichbleibender Verformung

⇒ gleiche grundlegende Zusammenhänge wie beim Kriechen, gleiche Modellierung

$$\sigma_{t=\infty} = \sigma_{t=0} \cdot e^{-\varphi} \quad (\text{theoretischer Zusammenhang})$$

Abweichungen bis ca. 30% bis 50% möglich (z.B. Reduktion des Zwangs bei Baugrundsetzungen)

**Baupraktische Berücksichtigung des Kriechens** für verschiedene Belastungen

$$\varphi_{\text{eff}} = \frac{\text{quasiständige Last}}{\text{aktuelle Last}} \cdot \varphi$$

**Abminderung der Zugfestigkeit**  $f_{ct,R}$  des Betons für  $t = \infty$  auf ca. 50% bis 70%

## Nichtlineare Berechnung im Gebrauchszustand

### Zeitpunkt $t = 0$

Rechnung mit Mittelwerten der Baustoffeigenschaften

### Zeitpunkt $t = \infty$

Mittelwerte der Baustoffeigenschaften für  $t = \infty$  wie folgt ändern:

Schwinden und Kriechen aufbringen sowie Zugfestigkeit des Betons auf ca. 70% reduzieren

### Ermittlung der maximalen Spannungen

Verkrümmungen, Dehnungen sowie die Spannungen sind Mittelwerte als Integral über gerissene und ungerissene Bereiche. Um die maximale Spannung in der Bewehrung oder im Beton zu ermitteln, muss wie folgt vorgegangen werden (Spannung im Riss):

- nichtlineare Rechnung mit Stab2D-NL
- Schnittgrößenkombination  $N_x / M_y$  notieren
- Querschnitt in INCA2 mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften modellieren, jedoch die versteifende Mitwirkung des Betons auf Zug ausschalten ( $f_{ct} = 0 \text{ N/mm}^2$ )
- Schnittgrößenkombination  $N_x / M_y$  aufbringen und Dehnungszustand ermitteln

Mit den so ermittelten Werten können jetzt weitere Nachweise durchgeführt werden, z.B. Begrenzung der Betondruckspannungen, Ermüdungsnachweise oder Ermittlung bzw. Beschränkung der Rissweite.

### Näherungsweise Ermittlung sowie Beeinflussung der Rissweite

Praktisch in allen Balken wird eine Mindestbügelbewehrung angeordnet. Da die Bügel eine Störung der Zugzone darstellen, wird sich vorzugsweise in diesen Bereichen ein Riss einstellen. Unter der Annahme, dass sich der Betonkörper zwischen den Rissen nahezu nicht verformt, lässt sich die Rissweite wie folgt abschätzen:

$$w_{cr} \approx s \cdot \varepsilon_{Rand} \quad \text{mit } s = \text{Bügelabstand}$$

Zu beachten ist hierbei, dass der Wert  $\varepsilon_{Rand}$  die Dehnung der Betonfaser ohne weitere Vordehnung beschreibt. Bei Rechnung mit Schwinden in Stab2D-NL muss auf den dort angezeigten Wert noch die Schwinddehnung  $\varepsilon_s$  aufaddiert werden.



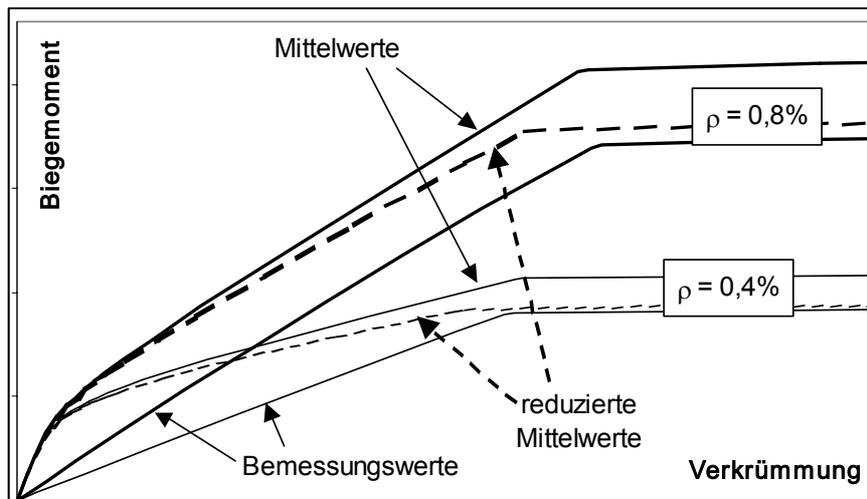
## Nichtlineare Berechnung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Rechnung mit dem Konzept der lokalen Schwachstelle

- Modellierung des Tragwerks im Gebrauchszustand mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften (wichtig für Zwangsbeanspruchungen)
- bei Erreichen der vom Querschnitt aufnehmbaren Beanspruchung setzt des Fließen der Bewehrung ein, es erfolgt eine Umlagerung der Schnittgrößen
- maximale Beanspruchung muss vom Querschnitt mit den Bemessungswerten der Baustoffeigenschaften aufnehmbar sein

Erreicht wird dies vor allem durch eine Reduktion der Fließgrenze der Bewehrung auf den Wert  $f_{yd}$ . Die versteifenden Mitwirkung des Betons muss entsprechend angepasst werden.

Der Vergleich der Moment-Verkrümmungs-Linien zeigt, dass mit dieser Modellierung Belastungen im Gebrauchszustand in etwa mit den Mittelwerten der Baustoffeigenschaften berechnet werden. Höhere Belastungen im Bereich der maximalen Beanspruchbarkeit verursachen jedoch plastische Verformungen des Tragwerks.



## Stützenberechnung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Grundgedanken:

- Die nichtlineare Schnittgrößenermittlung ist mit den mittleren Baustoffkennwerten durchzuführen, um das Tragverhalten der Struktur realitätsnah abzubilden.
- Alle streuenden Größen, die die Sicherheit maßgeblich beeinflussen, werden mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_c$  bzw.  $\gamma_s$  beaufschlagt! Für die Schnittgrößenermittlung bei Stützen sind dies folgende Werte:

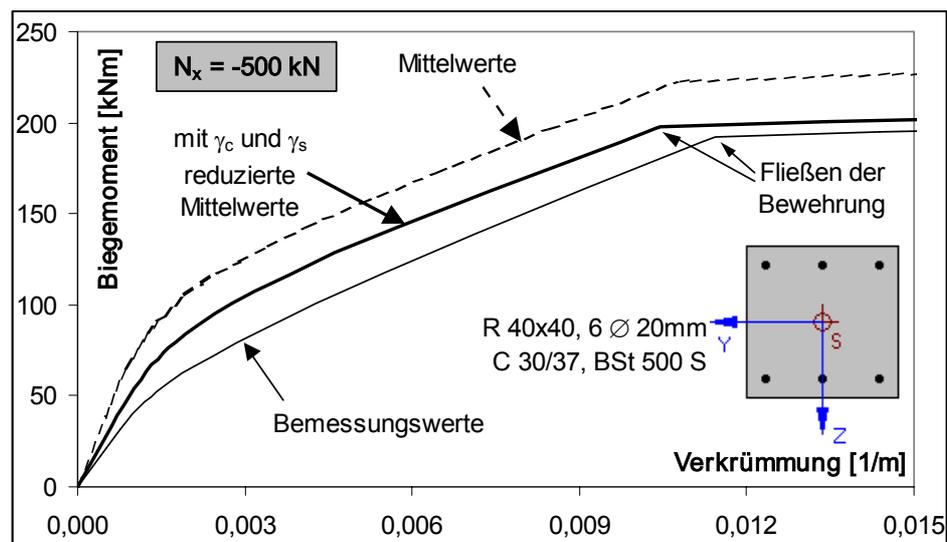
*Baustoff Beton:*

E-Modul	$E_{c,cal} = E_{cm} / 1,5$
Druckfestigkeit	$f_{c,cal} = f_{cm} / 1,5$
Zugfestigkeit	$f_{ct,cal} = f_{ct,Modell} / 1,5$

*Baustoff Bewehrung:*

Fließgrenze	$f_{y,cal} = f_{ym} / 1,15 \approx f_{yk} / 1,15$
-------------	---

- Die maximal auftretenden Beanspruchungen sind, dem Konzept der lokalen Schwachstelle folgend, mit den Bemessungswerten der Baustoffeigenschaften nachzuweisen.



**Schlanke Stützen** – streuende Größen können sein:

- Querschnittsabmessungen: Breite / Höhe, Randabstand der Bewehrung
- Lagerungsart, besonders bei angenommener Volleinspannung
- ungewollte Ausmitte

⇒ Durch die nichtlineare Rechnung einer schlanken Stütze ergeben sich häufig sehr viel kleinere Querschnittsabmessungen als nach den üblichen einfacheren Methoden. Dadurch verringert sich das bisherige Sicherheitsniveau teilweise erheblich. Infolgedessen sollten zusätzliche streuende Größen berücksichtigt werden, die bisher vernachlässigt wurden.

## Tipps für die Modellierung

- Möglichst lange Stäbe verwenden:
  - Übertragungsverfahren für den einzelnen Stab auch im plastischen Bereich sehr stabil
  - Auswirkungen auf globale Steifigkeitsmatrix beim Plastizieren des Stahls nur gering
- Baustoffeigenschaften Bewehrung:  
Modellierung möglichst mit steigendem Ast im plastischen Bereich  
⇒ größere Steifigkeit im plastischen Bereich, Umlagerungsvermögen wird erhöht
- Anordnung der Bewehrung bei einseitig bewehrten Querschnitten:  
auch auf der eigentlichen Druckseite ein klein wenig Bewehrung einlegen (z.B.  $0,01 \text{ cm}^2$ ),  
damit die Modellierung der versteifenden Mitwirkung des Betons korrekt sowohl für  
positive als auch negative Biegemomente funktioniert
- Baustoffeigenschaften Beton:
  - Grenzdehnungen beachten, da sonst negative Tangentensteifigkeiten auftreten können
  - Mitwirkung des Betons auf Zug ⇒ versteifende Mitwirkung endet mit dem Fließen der Bewehrung
- Korrekte Lagerung bei Balkensystemen beachten, da durch Rechnung nach Theorie 3.  
Ordnung oder Berücksichtigung der Achsenlängsdehnung Zwangskräfte auftreten können
- Bei Divergenz der Rechnung:  
Ergebnis des letzten Lastschrittes anschauen ⇒ Ausnutzungsgrad, Last-Verformungs-  
Diagramme, Verlauf der Normalkräfte . . . Erfahrung notwendig
- Querschnittsprünge (Aussparungen, Veränderung des Querschnitts):  
Modellierung als Voute mit Anfangs- und Endquerschnitt
- Rahmenecken, Diskontinuitätsbereiche:
  - Erfassung des Verformungsverhaltens unter Annahme der Bernoulli-Hypothese  
nur sehr eingeschränkt möglich
  - auf konstruktive Durchbildung achten (Bewehrungsführung)
- Bei unterschiedlichen Querschnitten (z.B. Plattenbalken mit veränderlicher Plattenbreite)  
auf Lage des Bezugspunktes achten.
- Abbruchgenauigkeit der Iteration (Konvergenz) den auftretenden Schnittgrößen anpassen,  
bei hohen auftretenden Kräften also auch einen größeren Zahlenwert für die Abbruch-  
genauigkeit benutzen.