




Möglichkeiten zur Modellierung von Kohäsivverbindungen in LS-DYNA



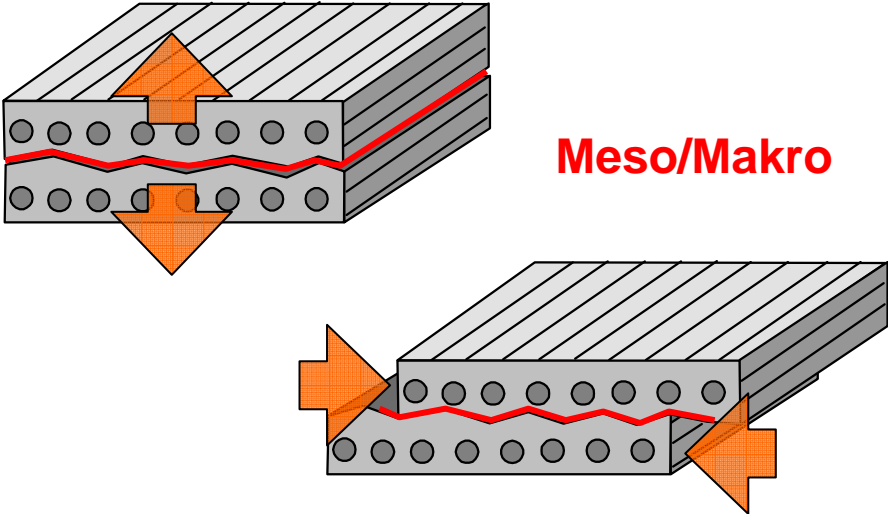
Tobias Erhart, André Haufe
Dynamore GmbH

LS-DYNA Update Forum, 12. November 2009

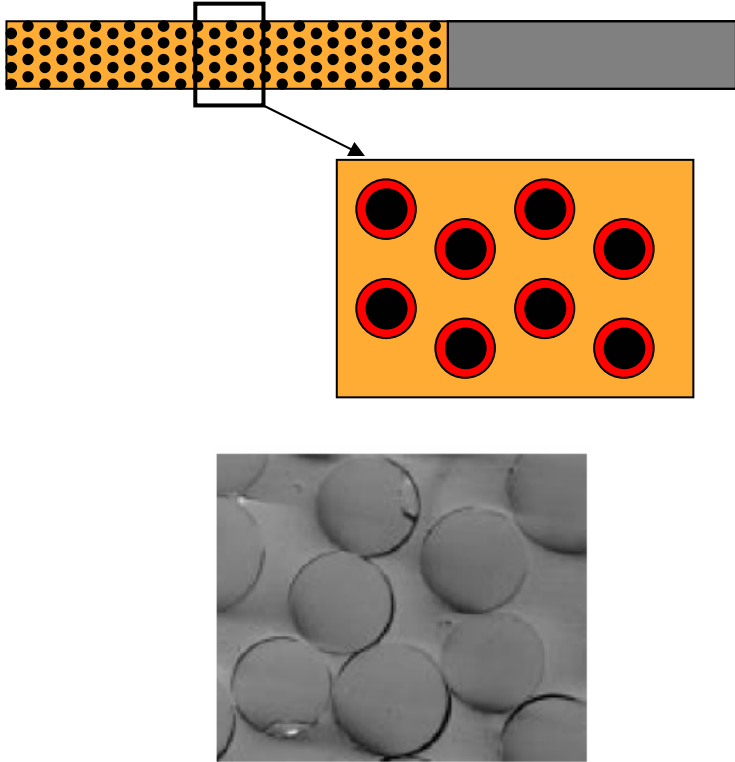
- **Kohäsivverbindungen:** Partner werden durch atomare oder molekulare Kräfte zusammengehalten.
 - Typische **Anwendungen:** z.B. Klebschichten, Schweißverbindungen, Lamine oder Verbundwerkstoffe (CFK, GFK, Stahlbeton, Sperrholz, usw.), mit Stoff- oder Formschiuß zwischen den Werkstoffen.
 - Das **mechanische Verhalten** solcher Verbundschichten innerhalb einer Struktur kann einen großen **Einfluß auf des Gesamttragverhalten** haben, insbesondere wenn es zur Werkstofftrennung und somit zum **Versagen, Delamination** oder **Debonding** dieser Kohäsivverbindungen kommt.
-
- ➔ **Modellierung in LS-DYNA: Kohäsivelemente oder Tiebreakkontakte**
 - ➔ **Theorie, Materialmodelle, Vor- und Nachteile**
 - ➔ **Numerische Tests**
 - ➔ **Strategie für grobe Vernetzungen**

Makro

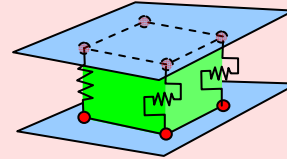
Klebschichten im Automobilbau



Mikro

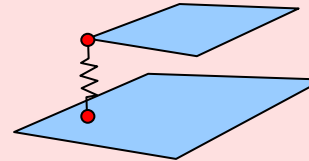


- **Kohäsivelemente** und dazugehörige Materialmodelle (*MAT_COHESIVE_...)



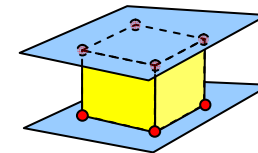
- **Tiebreakkontakt**

*CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURF._TO_SURF._TIEBREAK
mit integrierten Materialmodellen



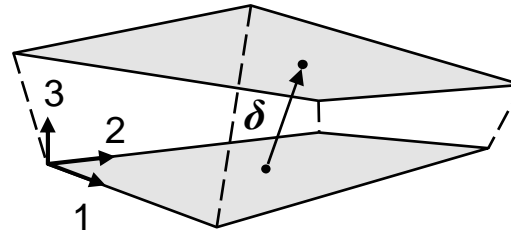
- **Volumenelemente** und 3D-Materialmodelle für Gummi, Schaum, Kunststoff, ... (z.B. *MAT_SIMPLIFIED_RUBBER, *MAT_FU_CHANG_FOAM, *MAT_SAMP)

Spezialfall: *MAT_ARUP_ADHESIVE



- **Balkenelemente** und *MAT_SPOTWELD

- "Spezielles" Volumenelement:
Orientierung, Dicke



- Relative Knotenverschiebungen \rightarrow lokale Relativverschiebungen an IPs

$$\Delta \mathbf{x} = \sum_{i=1}^4 N_i(s, t) \Delta \mathbf{x}_{i+4, i}$$

$$\Delta \mathbf{X} = \sum_{i=1}^4 N_i(s, t) \Delta \mathbf{X}_{i+4, i}$$

\rightarrow

$$\boldsymbol{\delta} = \mathbf{R}^T(t) \Delta \mathbf{x} - \mathbf{R}^T(0) \Delta \mathbf{X}$$

- Lokale Relativverschiebungen an Integrationspunkten \rightarrow lokale Spannungen

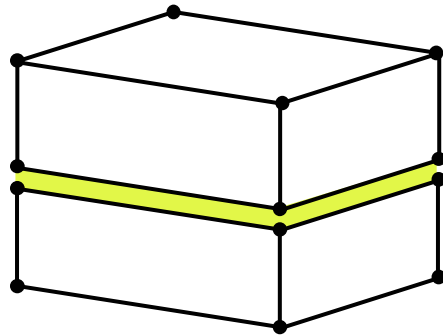
z.B. elastisch:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_T & 0 & 0 \\ 0 & E_T & 0 \\ 0 & 0 & E_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix}$$

$$[N/mm^2] = [N/mm^3] \cdot [mm]$$

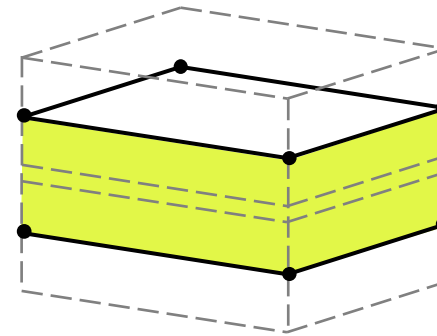
- Lokale Spannungen \rightarrow Interne Knotenkräfte $\mathbf{F}_i = \mathbf{R}(t) \sum_{g=1}^4 \mathbf{t}_g N_i(s_g, t_g) \det(J_g)$

- Verbindung zwischen Volumen- oder Schalenelementen



ELFORM=19

- Dicke "Null": Dichteoption ROFLG
- Zeitschrittberechnung ohne Dicke

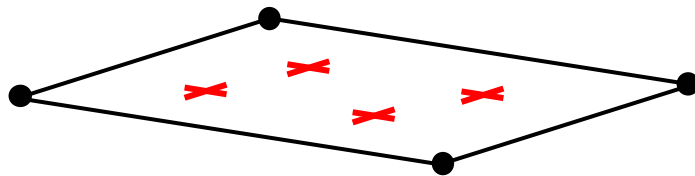


ELFORM=20

- Kohäsivelement mit "Offset"
- Momente = Kräfte · Offset

- Nummerierung!

- Integration in Mittelebene: 2x2 Gauss

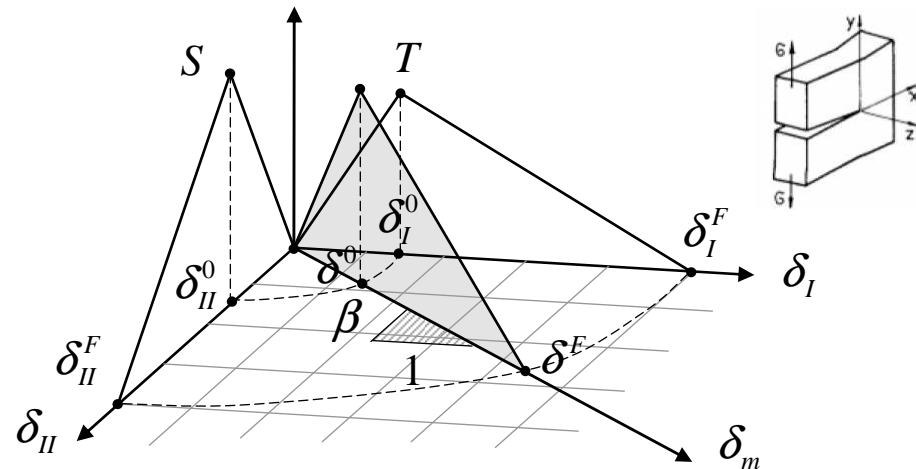
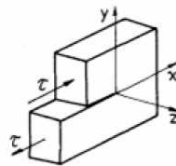


→ Steuerung des Versagens über Materialparameter INTFAIL

Kohäsivelemente: Materialmodelle

- ***MAT_COHESIVE_....**
- **ELASTIC** (184): rein elastisch, entkoppelt, 2 Parameter, kein Versagen
- **TH** (185): "Tvergaard-Hutchinson", nichtlinear elastisch (pseudo-plastisch-schädigend), 6 Parameter, Entlastung unphysikalisch

- **MIXED_MODE** (138):
Elasto-Schädigung,
Kopplung zw. Mode I (Zug)
und Mode II (Schub)
7 Parameter

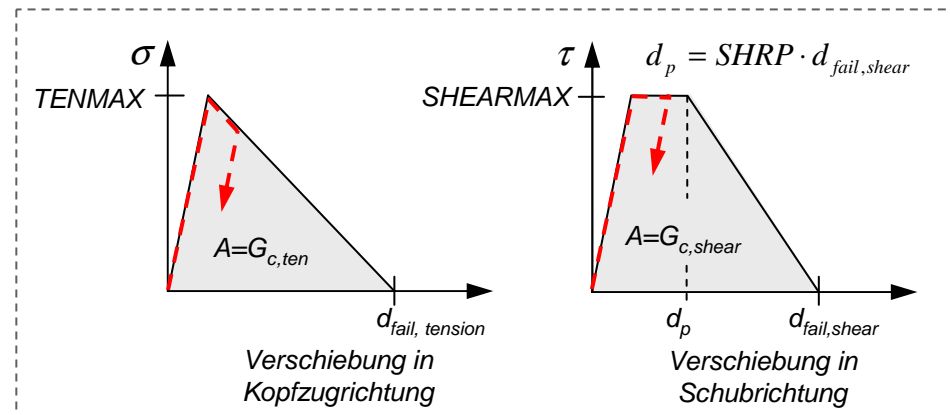


- **GENERAL** (186): wie *MAT_138, aber beliebige Kurve anstelle "Dreiecksverlauf"
- **MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE** (240): neu ab 971 R5
- ***MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS**: Benutzerschnittstelle

- *MAT_ARUP_ADHESIVE (169)

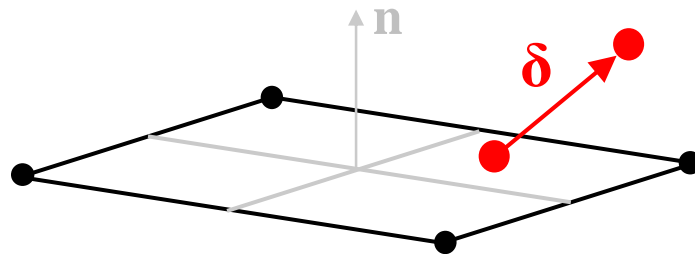
- Normales Volumenelement, das material-intern wie Kohäsivelement formuliert ist.
- Dicke geht in Zeitschrittberechnung ein → nur praktikabel zwischen Schalenelementen
- Versagen ist definiert zu:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}\right)^{PWRT} + \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}}\right)^{PWRS} - 1.0 = 0$$



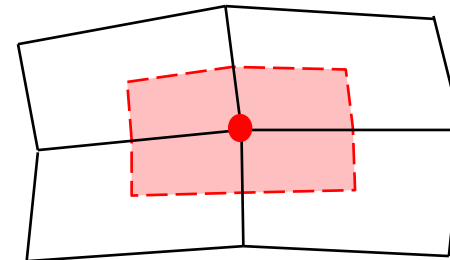
- Der plastische Fluss ist nicht volumenkonstant (nicht isochor, $\nu_{ue} \neq 0.5$)
- Dehnratenabhängigkeit kann ebenso berücksichtigt werden wie spezielles Verhalten von Randschichten.

- **Kinematik:** 3 Relativverschiebungen zwischen Slaveknoten und Mastersegment



$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \} \text{ tangential} \\ \leftarrow \text{ normal} \end{array} \right\}$$

- **Material:** Spannungsberechnung wie bei Kohäsivelementen
- Kontaktknotenkräfte ergeben sich dann aus:
Spannung mal "Slaveknoten-Fläche"



- "Two pass"-Kontaktalgorithmus nicht sinnvoll: Immer **ONE_WAY** verwenden!
- Elastische Steifigkeit \leftrightarrow Penaltysteifigkeit!
- SOFT=1 verwenden

Tiebreakkontakte: Materialmodelle

- *CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURF._TO_SURF._TIEBREAK: Card 4

| | | | | | | | | |
|----------|--------|------|------|-------|--------|--------|-------|----|
| Variable | OPTION | NFLS | SFLS | PARAM | ERATEN | ERATES | CT2CN | CN |
|----------|--------|------|------|-------|--------|--------|-------|----|

Zeitschritt!

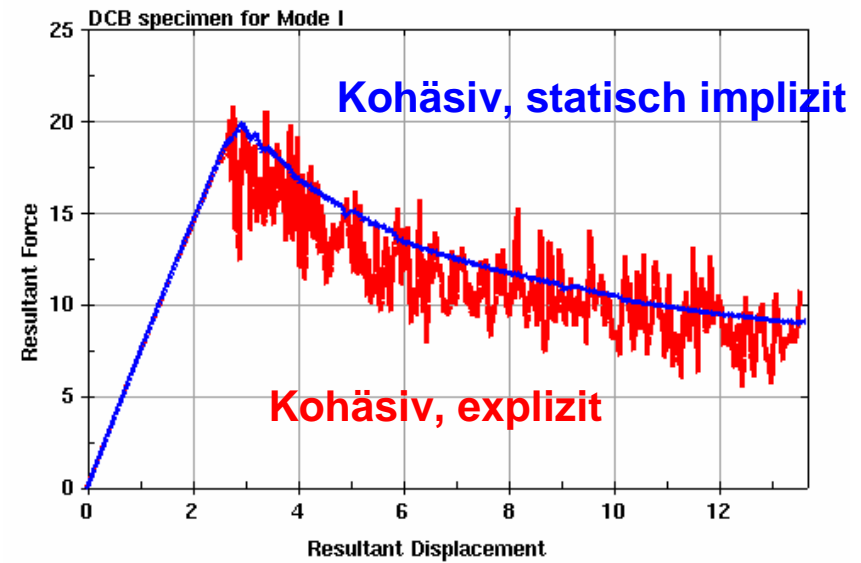
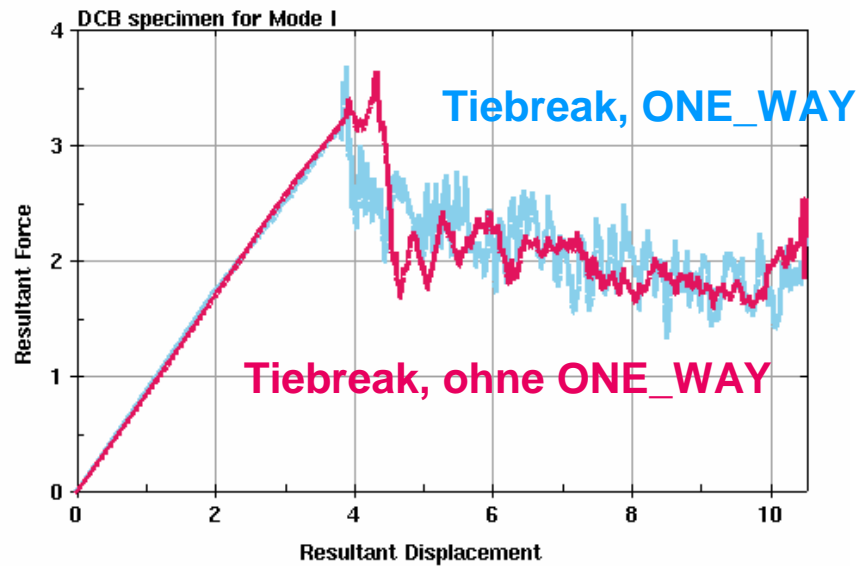
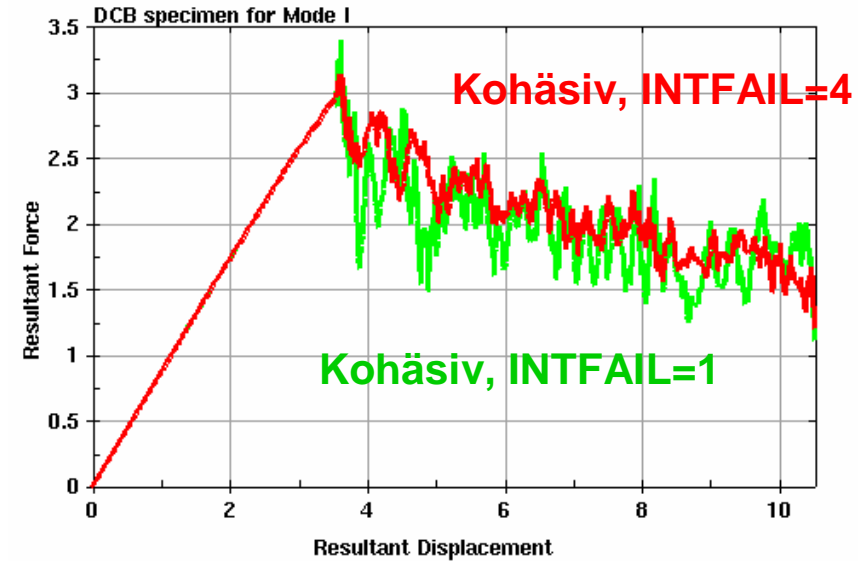
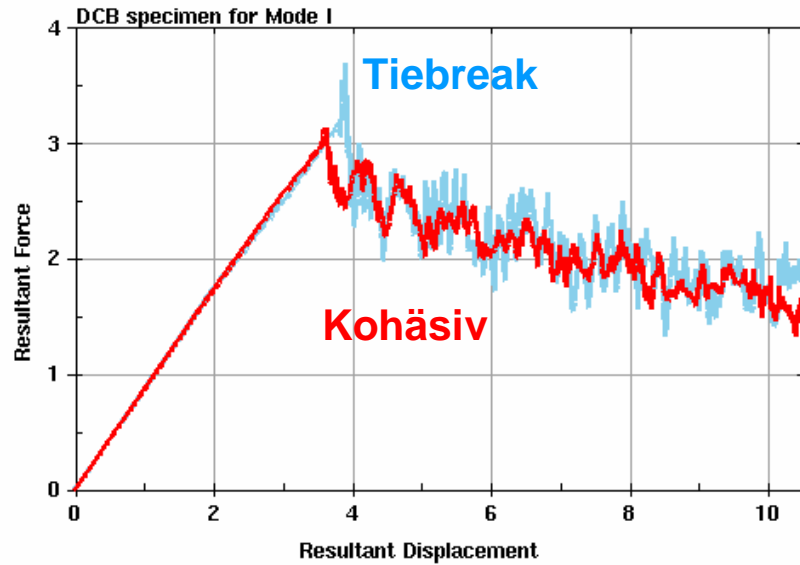
- 14 Optionen mit bis zu 7 Parametern (+3 für Dämpfung bei Option 9)
- Option ± 1 : ohne Versagen
- Optionen ± 2 , ± 3 , 4: Abruptes Versagen ohne Entfestigung (spröde)
- Optionen **5, 6/8, 7/10, 9/11**: Versagen mit Entfestigung/Schädigung
entsprechen Kohäsivmaterial *MAT_138
(9: zwischen Volumenelementen, 11: zwischen Schalenelementen),
hier einziges Modell mit vollem Mixed-Mode-Verhalten
- Parametervergleich ***MAT_138** und **Tiebreakkontakt OPTION=9/11**:

EN=CN, ET=CT2CN·CN, GIC=ERATEN, GIIC=ERATES, XMU=PARAM, T=NFLS, S=SFLS

Vergleich der Methoden

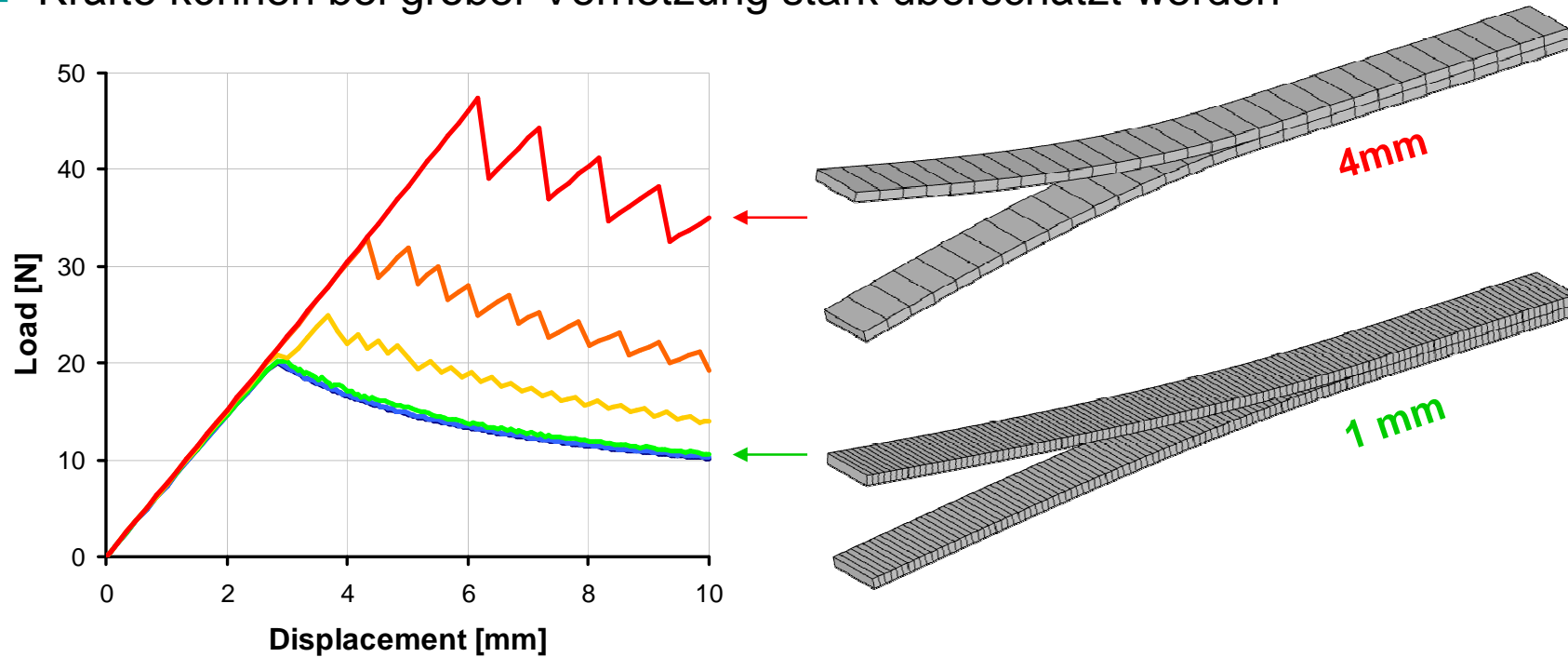
| Kohäsivelemente | | Tiebreakkontakte |
|---|------------------------|---|
| Kongruente Netze oder Tied-Kontakt, Nummerierung | Vernetzung | Beliebige "Partner", keine Elemente |
| Elasto-Schädigung, Mixed Mode, UserIF, Viskoplastizität | Materialauswahl | Elasto-Schädigung, Mixed Mode |
| Höhere "Auflösung": glattere Ergebnisse | Ergebnisse | Geringere "Auflösung": rauhere Ergebnisse |
| Zusatzkontakt oder "Elemente behalten" | Rißschliessen | Automatisch |
| Elementspannungen, Versagen | Postprocessing | Nur Knotenwerte, Intfor: Contact gap |

Numerische Tests: DCB

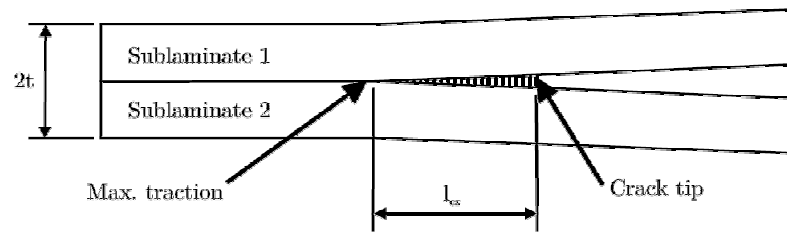


Grobe Vernetzung: Problem

- Kräfte können bei grober Vernetzung stark überschätzt werden



- 0.25 mm
- 0.50 mm
- 1.00 mm
- 2.00 mm
- 3.10 mm
- 4.00 mm

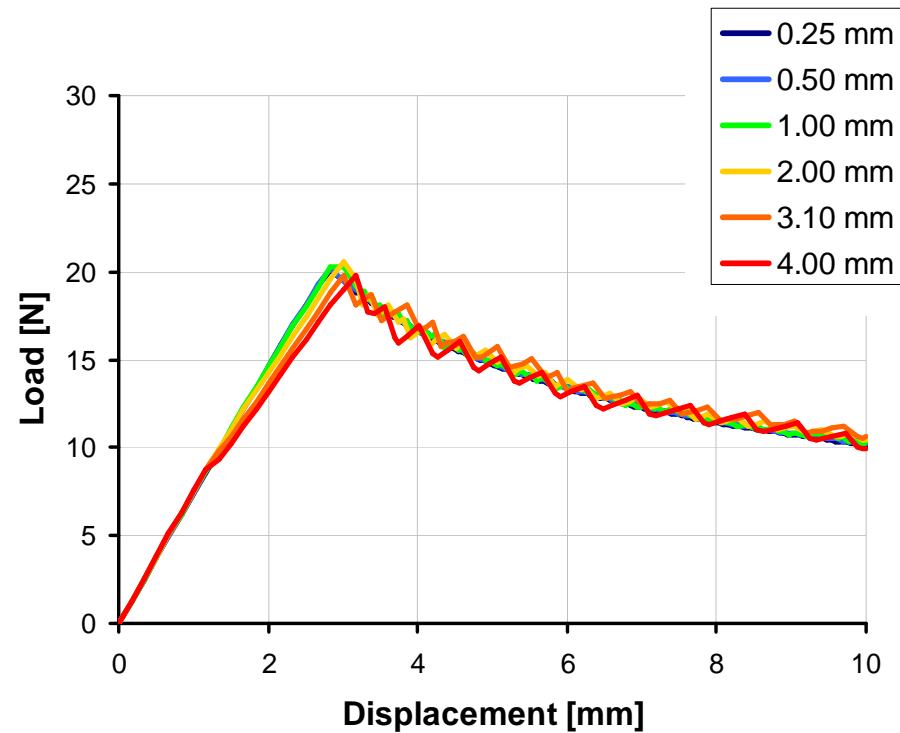
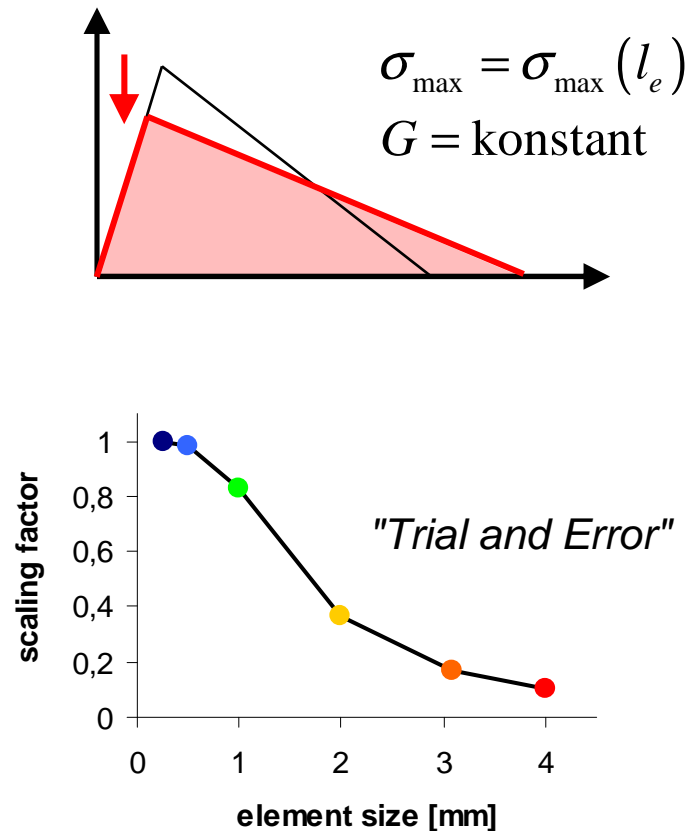


Kohäsivzone kann mit grober Diskretisierung nicht abgebildet werden.

Fig. 5. Length of the cohesive zone.

Grobe Vernetzung

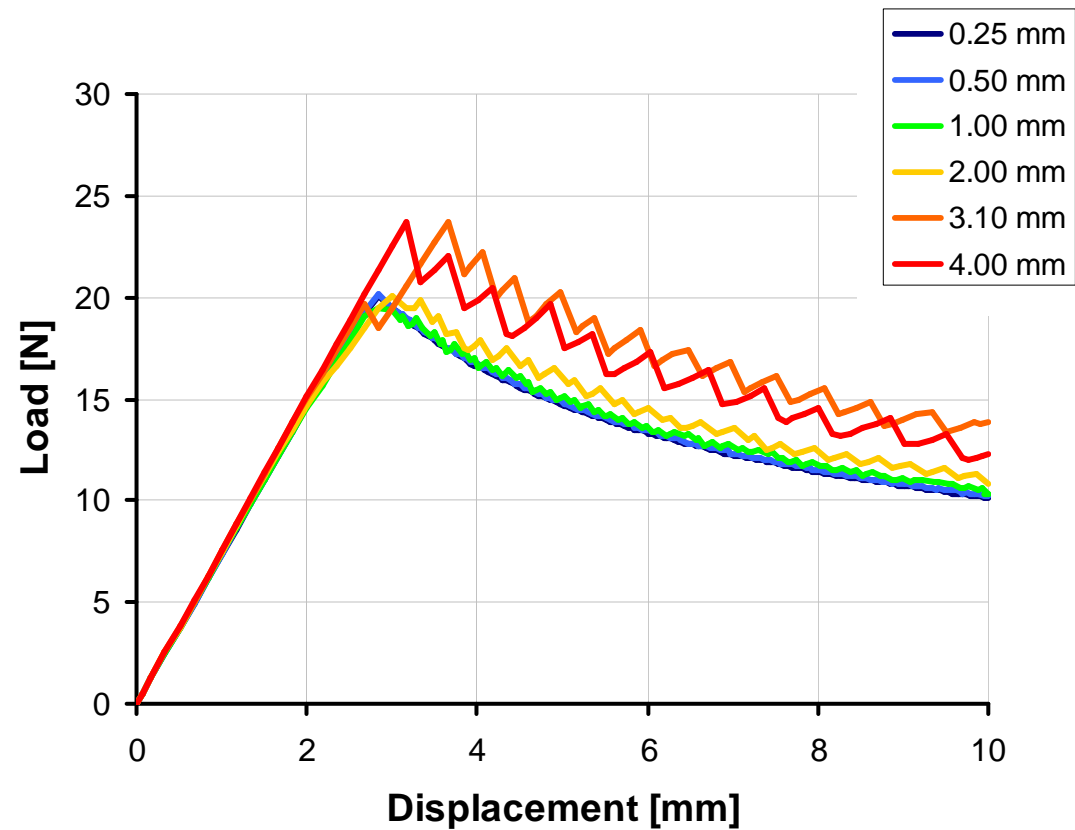
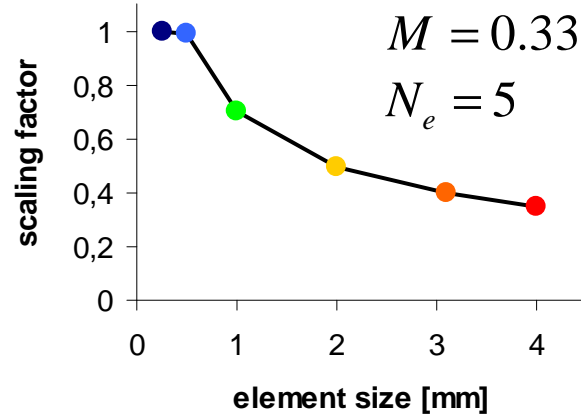
- "Ingenieurslösung": Maximalspannung als Funktion der Elementgröße
- *MAT_138: Negative T- und S-Werte verweisen auf entsprechende Kurven
- *CONTACT_AUTOMATIC_..._TIEBREAK: Negative Werte für NFLS und SFLS



Grobe Vernetzung

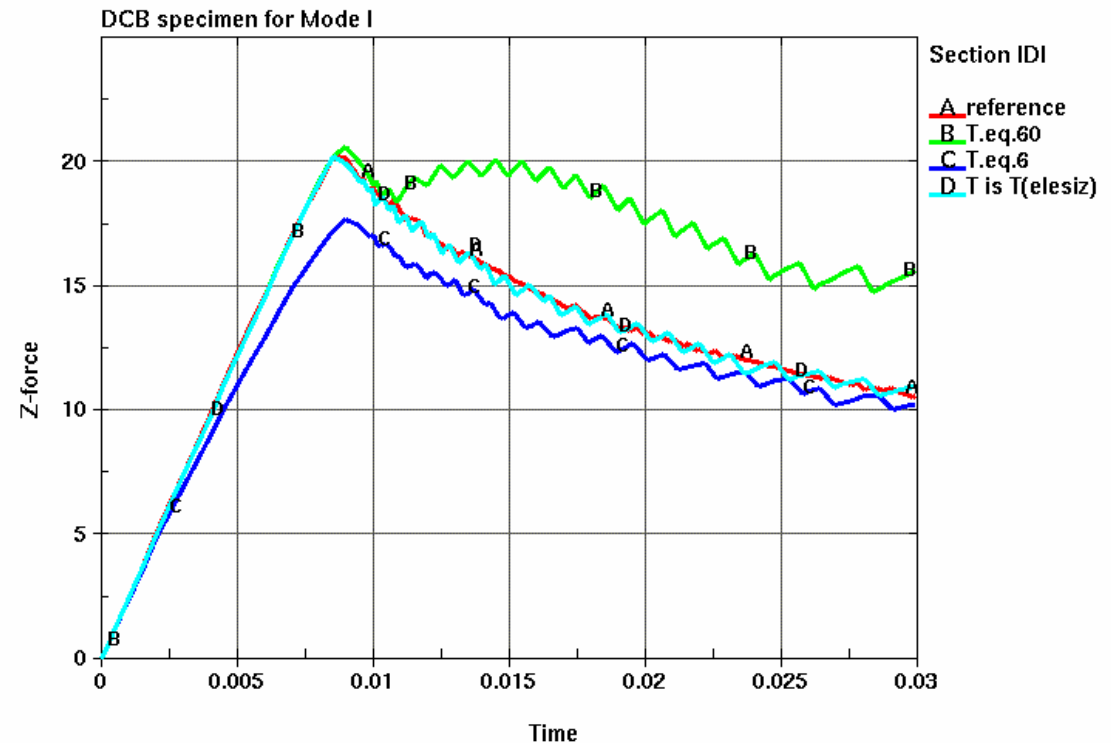
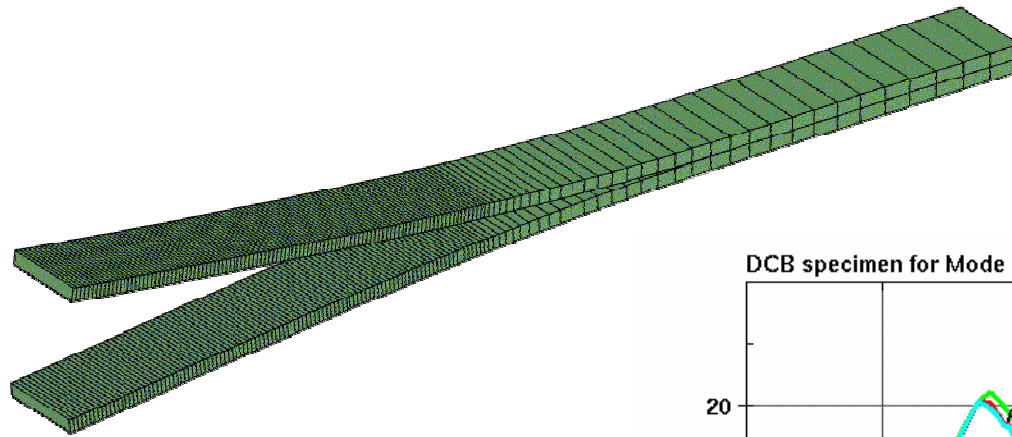
- Alternativ: Formel von Camanho et al. (2005):

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max}(l_e) = \sqrt{M \frac{E_I G_I^c}{N_e l_e}}$$



Grobe Vernetzung

- Neue Option "elementgrößenabhängige Maximalspannungen" erlaubt korrekte Berechnung mit abgestufter Diskretisierung (versch. Elementgrößen)



- Wenn "geometrisch" möglich, **Kohäsivelemente** benutzen
- **Tiebreakkontakte** für komplexe Geometrien
- Sinnvolle Alternative: ***MAT_ARUP_ADHESIVE**
- **Elementgrößenabhängige Maximalspannungen** für grobe Vernetzungen

- Weiterentwicklungen
 - Postprocessing Tiebreakkontakte
 - Materialmodelle
 - Stabilisierung der Rißausbreitung
 - ...