

University of Luxembourg

Multilingual. Personalised. Connected.



ArcelorMittal Chair of  
Steel Construction  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Odenbreit

# Erste Ideen für Bemessungsansätze für Verbundträger in Stahl-Holz-Verbundbauweise

**Prof. Dr.-Ing. Christoph ODENBREIT**

**Dr. Alfredo Romero**

**Dr. Teodora Bogdan**

ArcelorMittal Chair of Steel Construction,  
University of Luxembourg, Luxembourg



- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 Erster Vergleich
- 7 Danksagung

- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 Erster Vergleich
- 7 Danksagung



## Signifikante Unterschiede zur Stahl-Beton Verbundbauweise

1. Der Werkstoff hat einen nennenswert **Zugfestigkeit**, die im Gegensatz zu Beton nicht vernachlässigt werden kann



Hassanieh, A.; Valipour, H.R.; Bradford, M.A.: Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 122, 2016, Pages 367-378.

## Signifikante Unterschiede zur Stahl-Beton Verbundbauweise

2. Holzbauwerkstoffe («Engineered Timber»)  
sind meist lageweise aufgebaut

- (i) mit **unterschiedlichem Werkstoff-Verhalten**  
in den Lagen und
- (ii) mit unterschiedlichen Möglichkeiten  
der **Ausrichtung** der Platten selbst



Brettsperrholz



Furnier-  
schichtholz



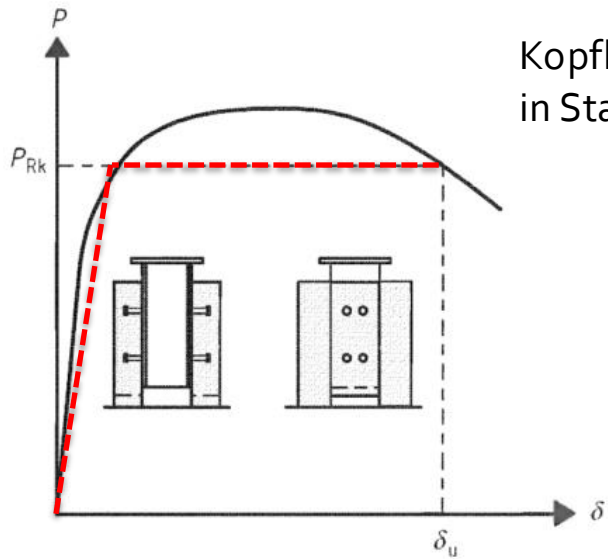
## Signifikante Unterschiede zur Stahl-Beton Verbundbauweise

3. Die **Dübelkennlinien** der unterschiedlichsten Verbundmittel entsprechen nicht unbedingt den Voraussetzungen des Eurocode 4 für :

- eine «einfache» plastische Bemessung
- mit äquidistanter Dübelanordnung.



# Signifikante Unterschiede zur Stahl-Beton Verbundbauweise



Kopfbolzendübel  
in Stahl-Beton

Vorgespannter  
Verbinder in  
Stahl-Holz

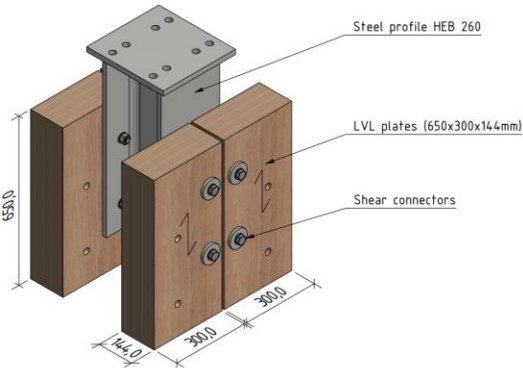


Figure B.2 : Determination of slip capacity  $\delta_u$

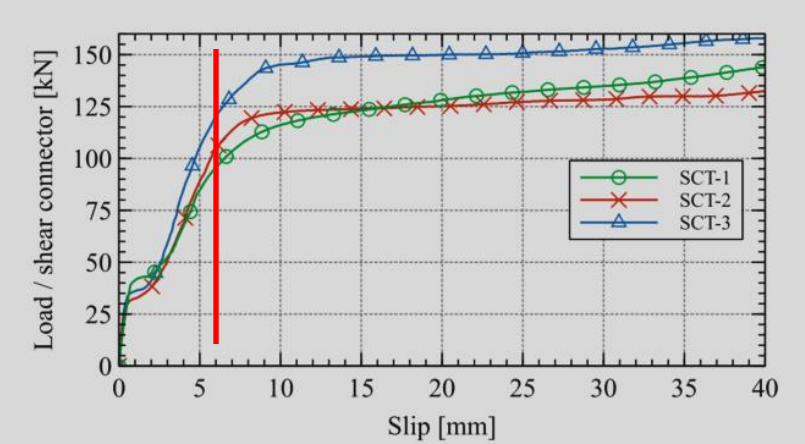


Figure 21: Comparison of the mean load-slip curves of the three shear connections.



- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven  
der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit  
bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 Erster Vergleich
- 7 Danksagung

## 2. Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel

### 2.1 Verbundmittel mit «nicht-duktilem» Verhalten in Stahl-Beton Verbundträgern

### 2.2 Verbundmittel mit «nicht-duktilem» Verhalten in Stahl-Holz Verbundträgern

### 2.3 Der «Kozma-Algorithmus»



# European Research Project RFCS – REDUCE

## Reuse of Steel Structures and the Circular Economy

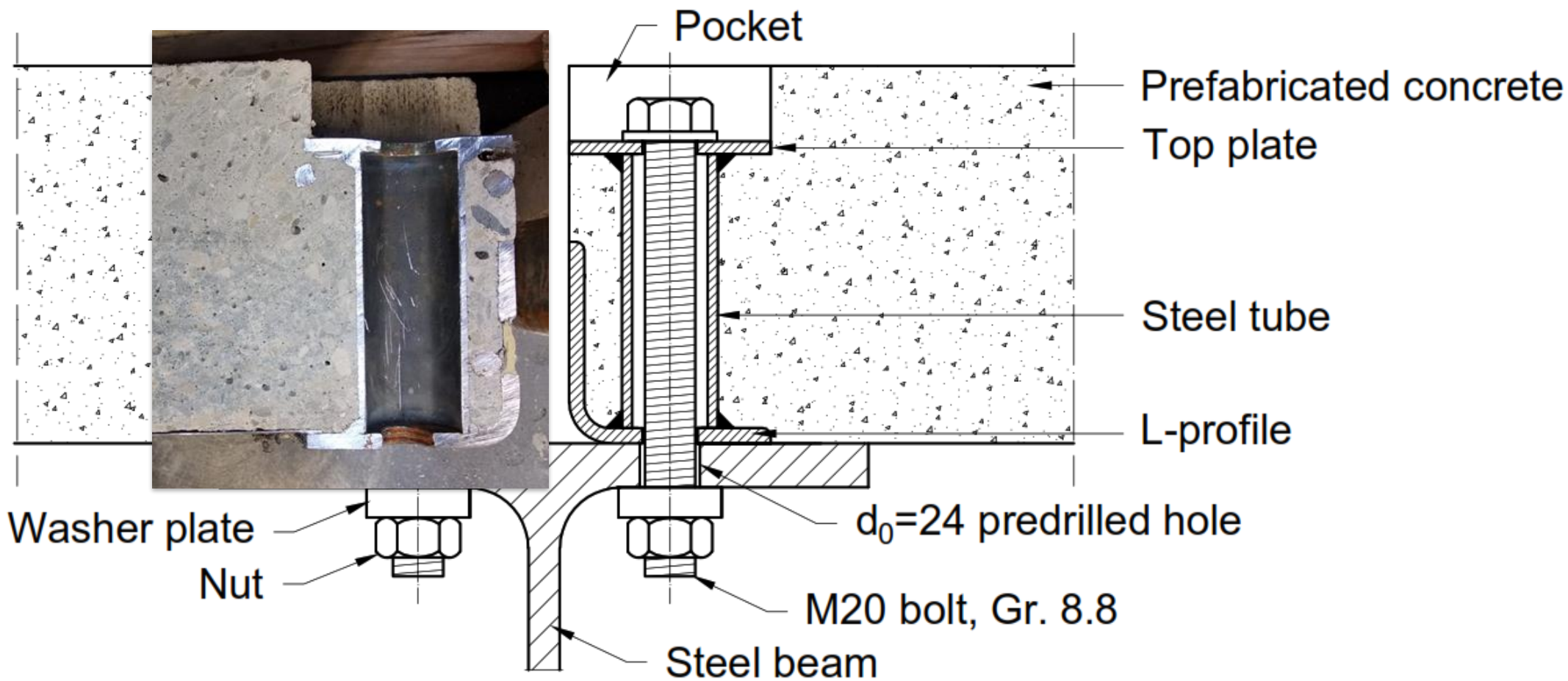


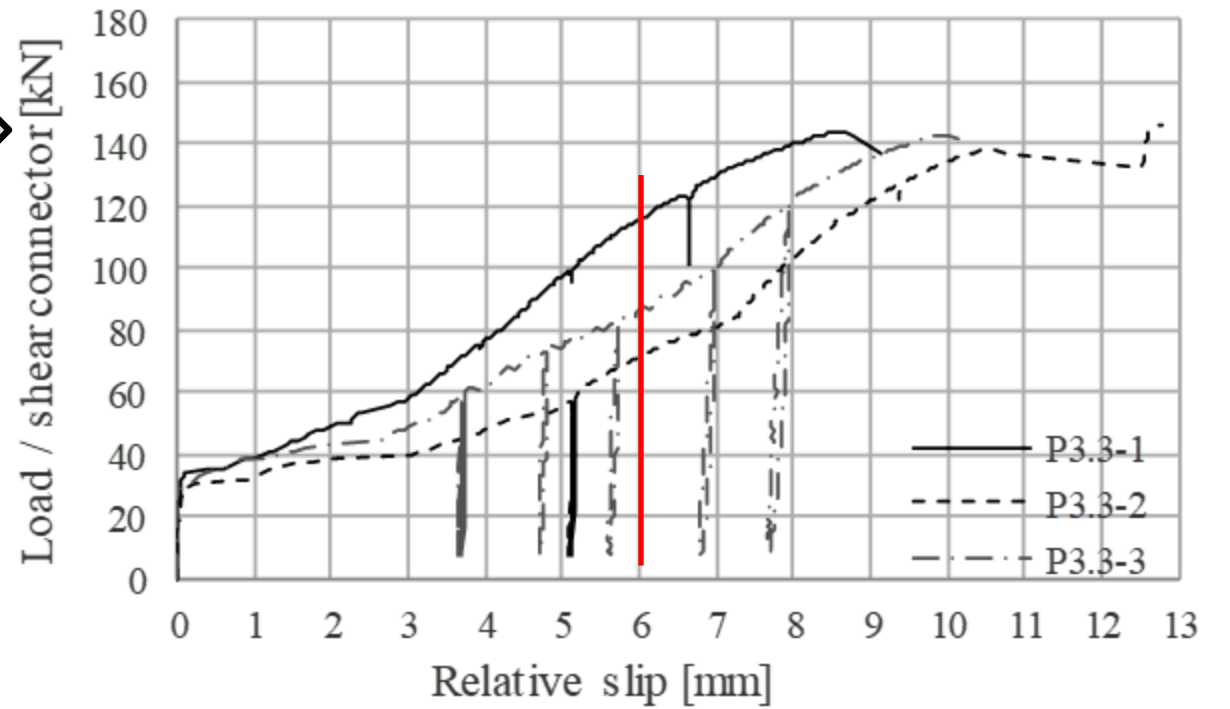
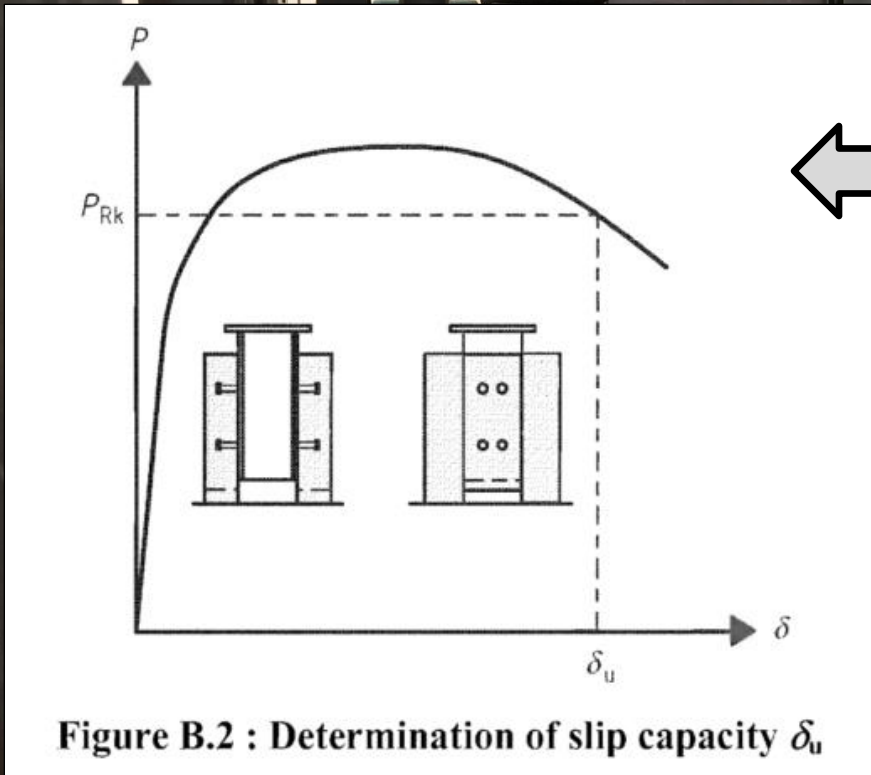
ArcelorMittal Chair of  
Steel Construction  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Odenbreit







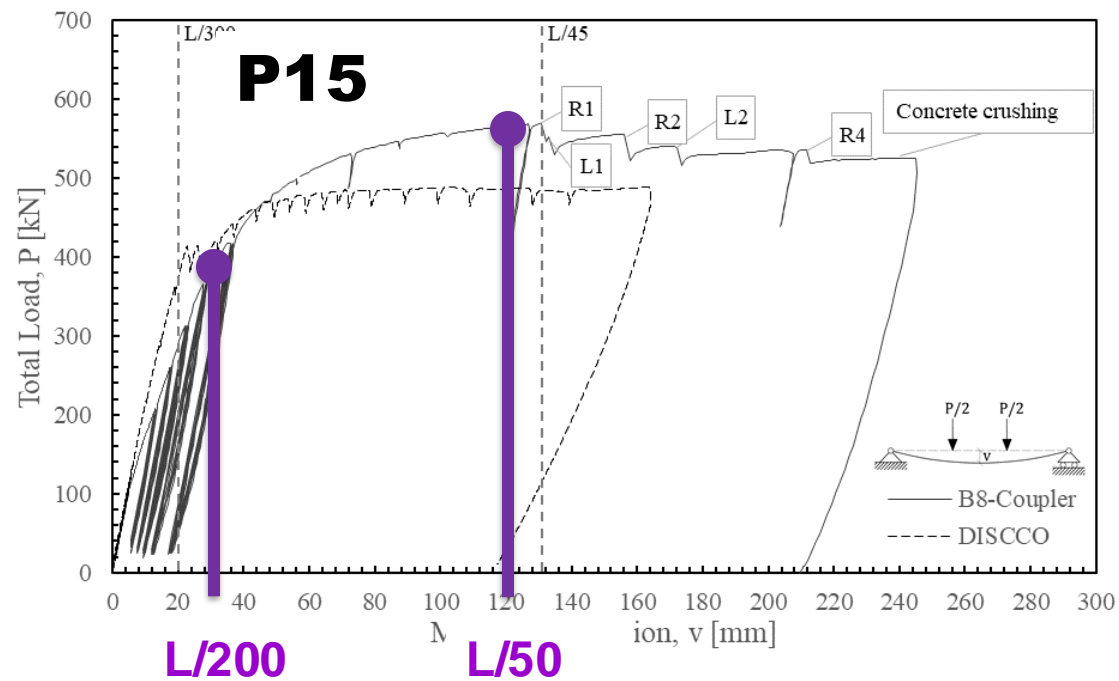
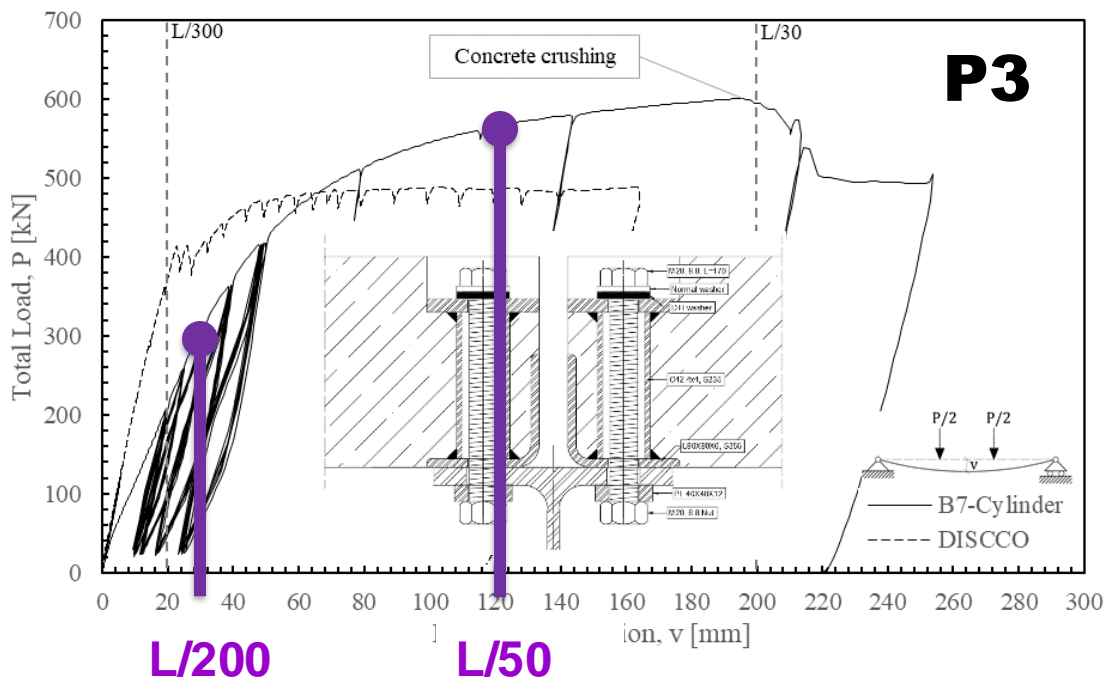














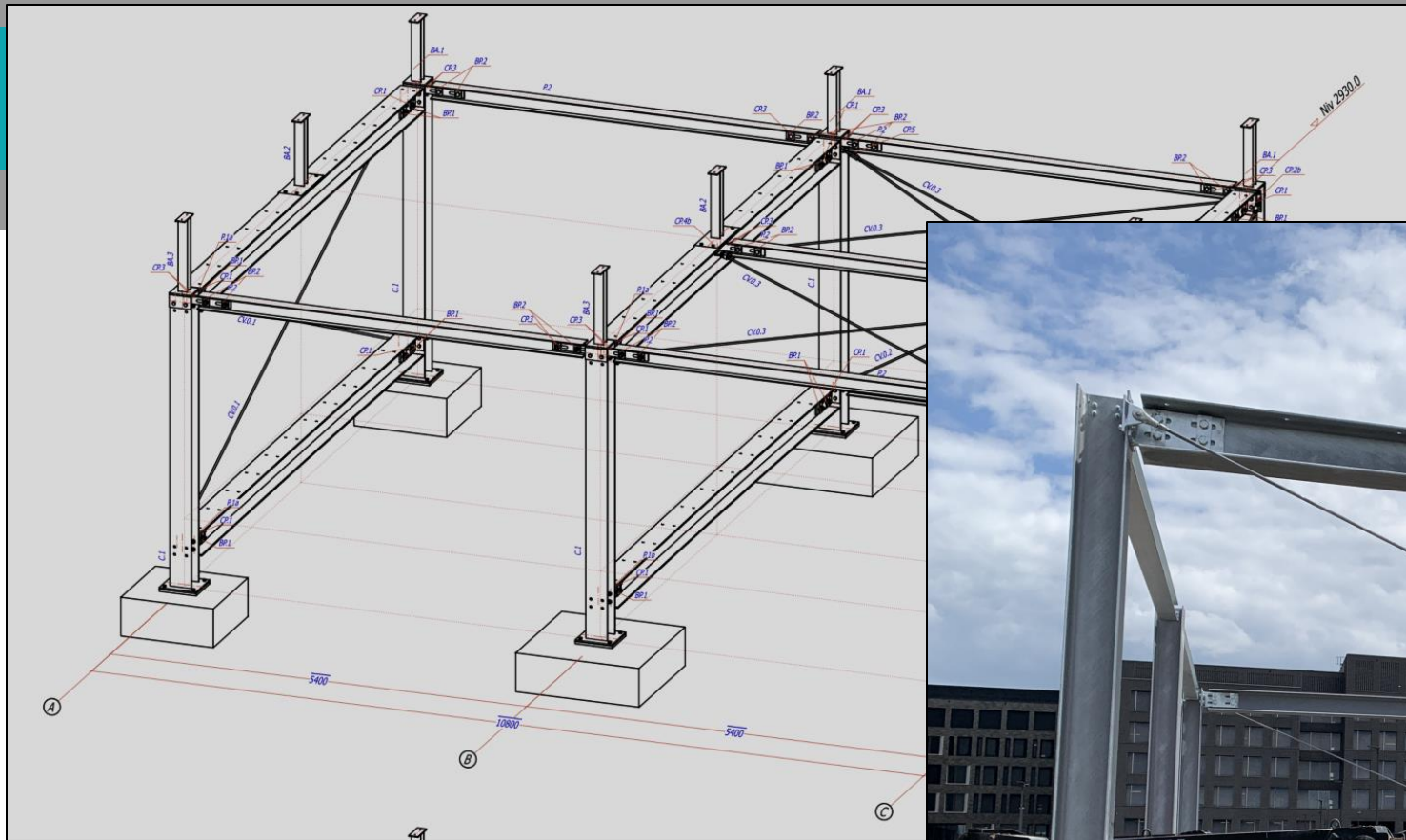
European Capital of Culture '22

**Demonstration: Pavillon «Petite Maison» in Esch/Belval**















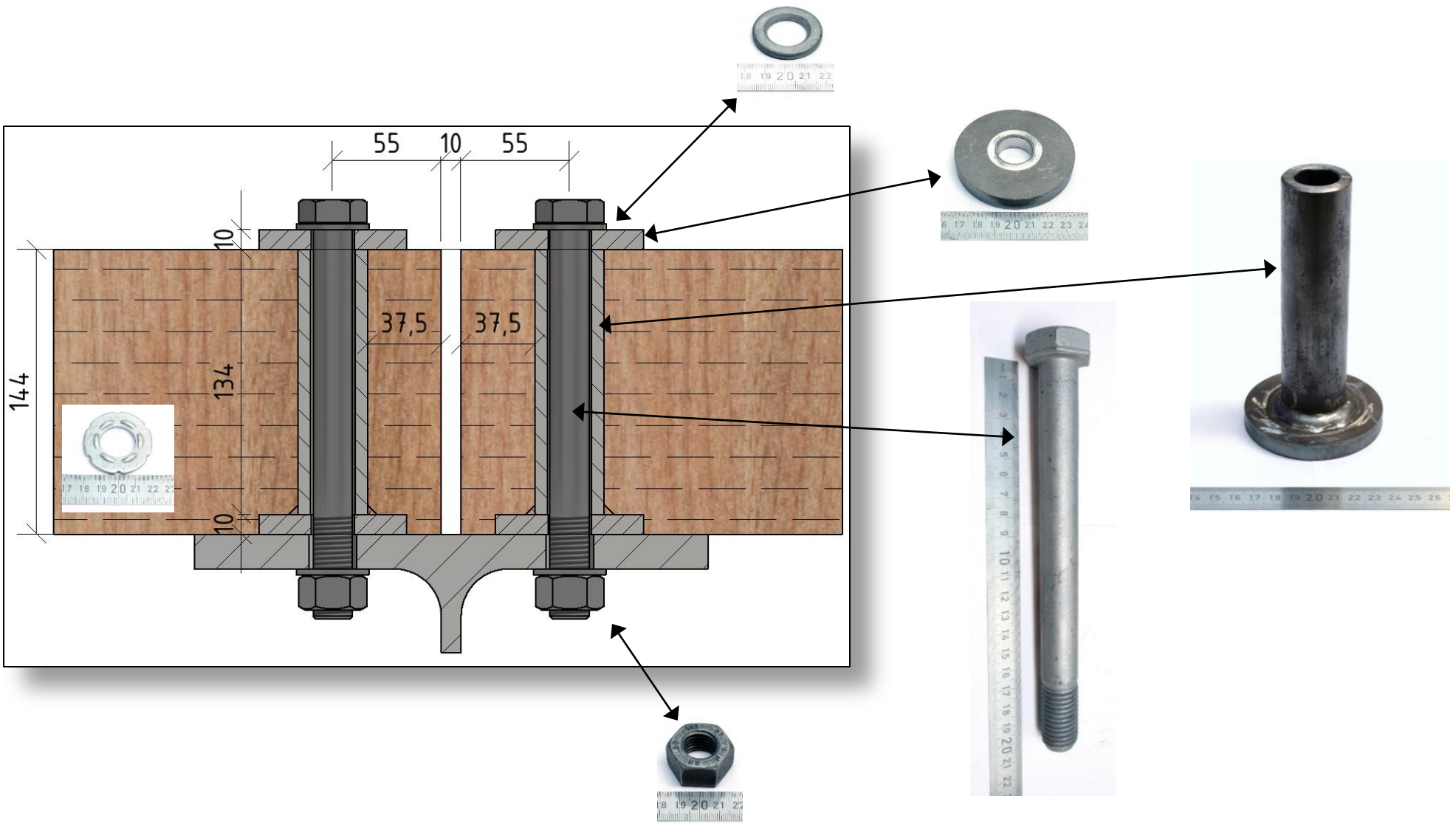








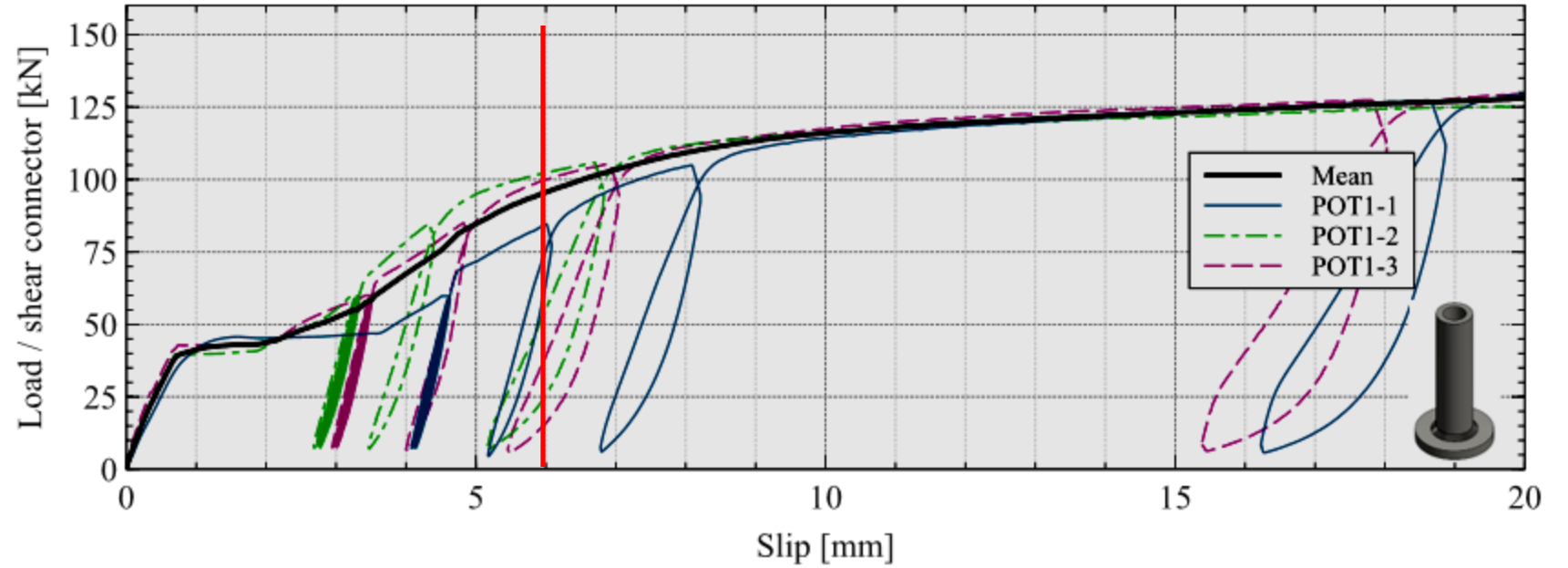
2. Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
  - 2.1 Verbundmittel mit «nicht-duktilem» Verhalten in Stahl-Beton Verbundträgern
  - 2.2 **Verbundmittel mit «nicht-duktilem» Verhalten in Stahl-Holz Verbundträgern**
  - 2.3 Der «Kozma-Algorithmus»







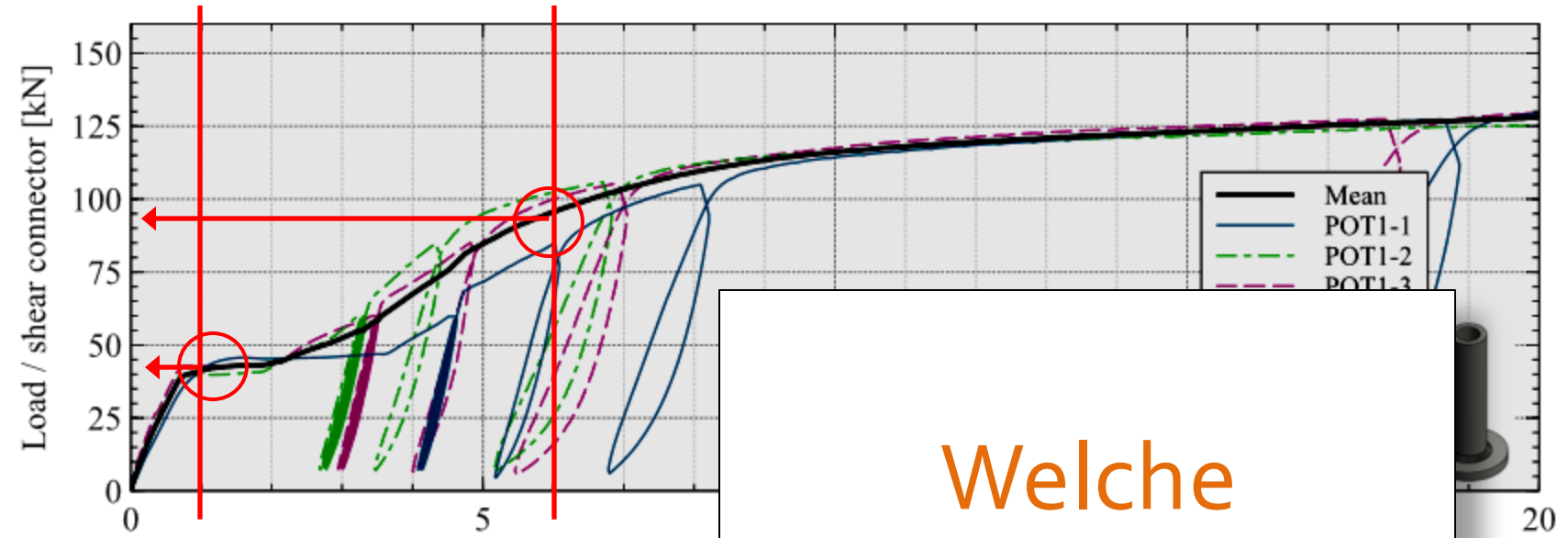
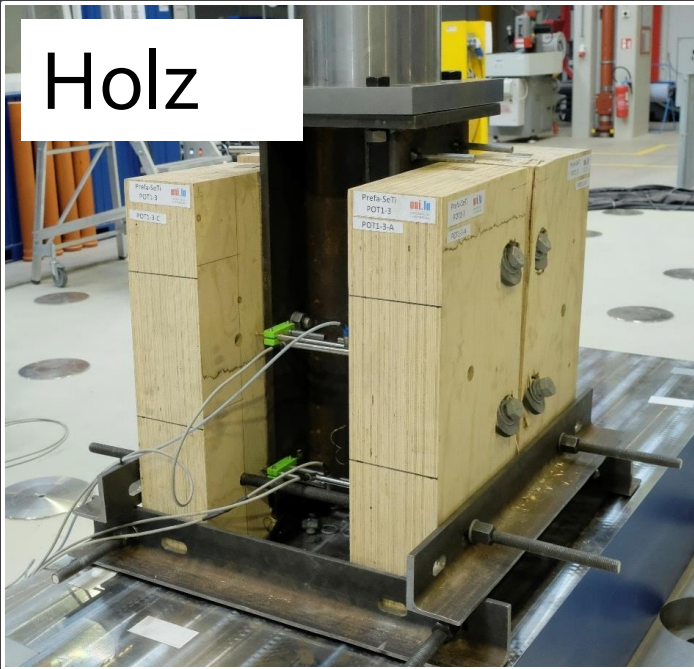




Last-Schlupfkurve, Push-Out tests POT<sub>1</sub> (Verbinder Typ 1)

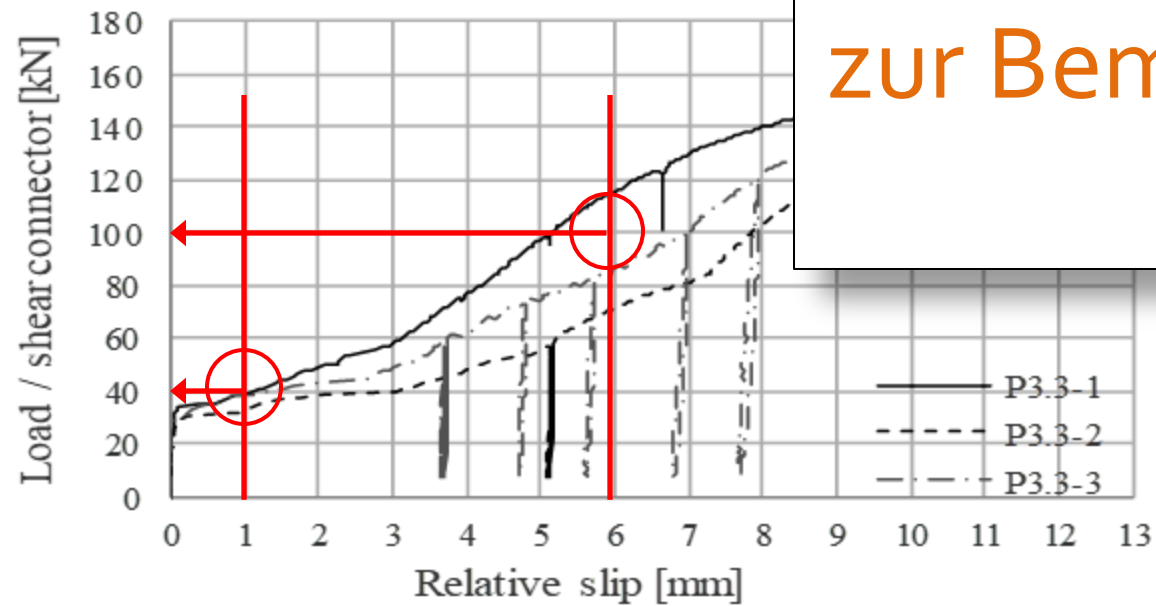
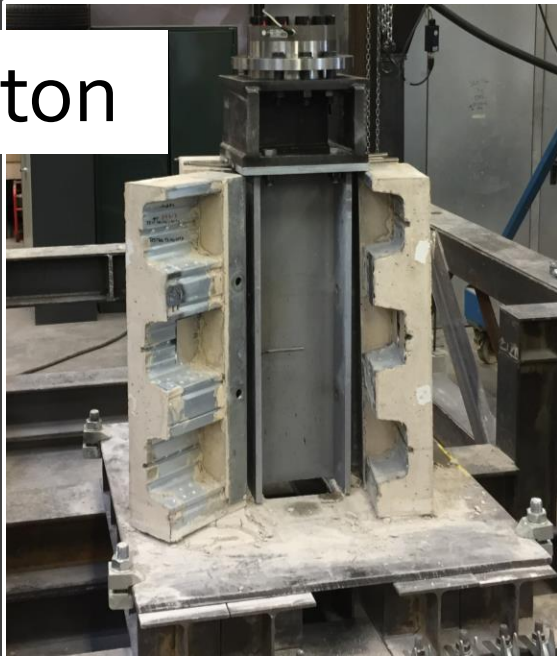


Holz



Welche  
Dübelkraft  $P_R$   
zur Bemessung ?

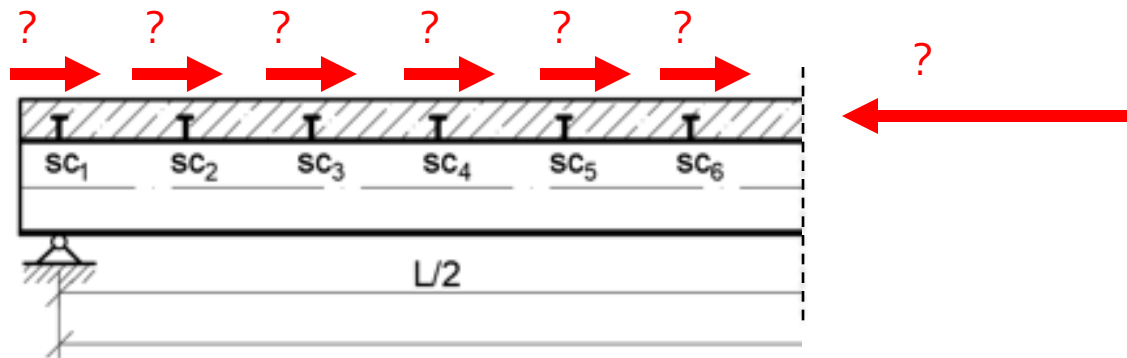
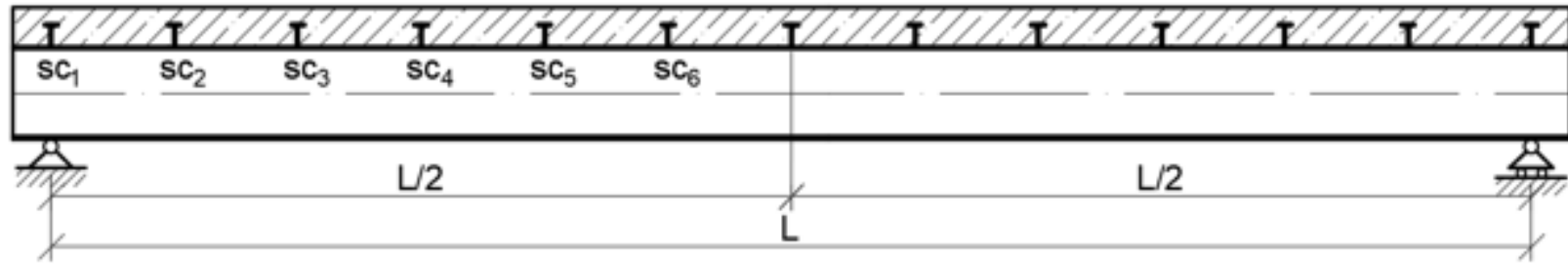
Beton

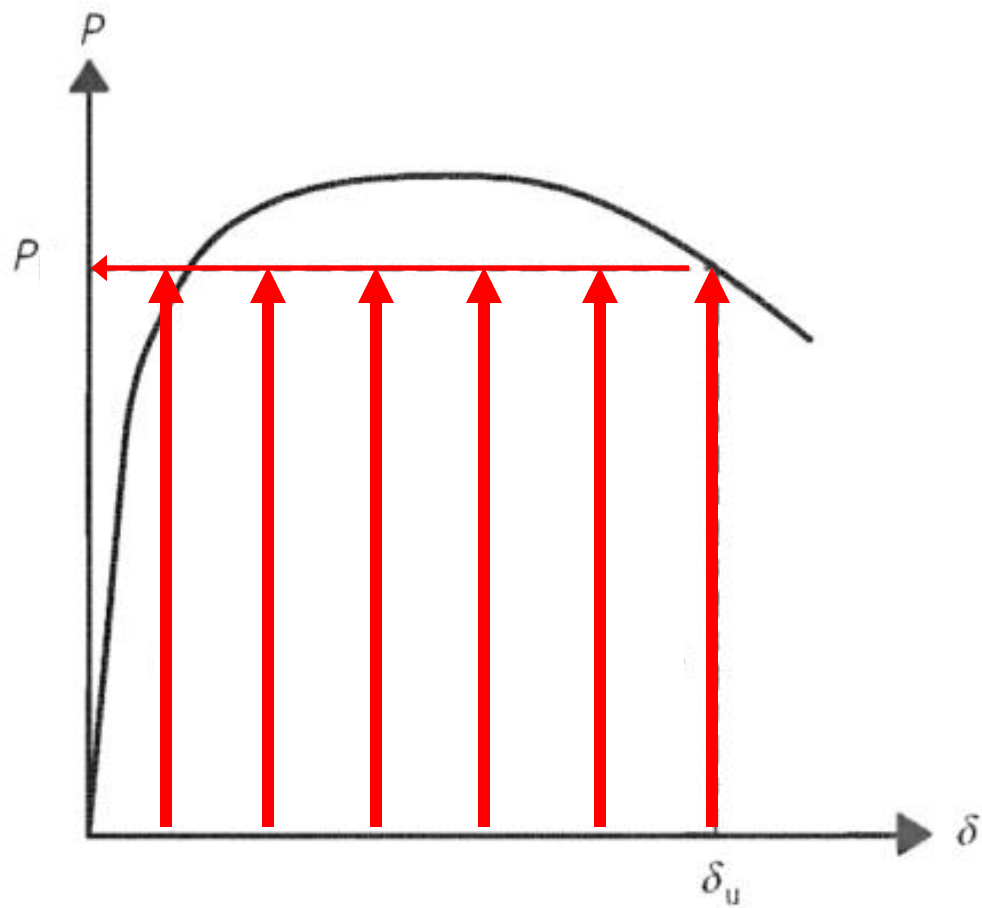


2. Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
  - 2.1 Verbundmittel mit «nicht-duktilem» Verhalten in Stahl-Beton Verbundträgern
  - 2.2 Verbundmittel mit «nicht-duktilem» Verhalten in Stahl-Holz Verbundträgern
  - 2.3 Der «Kozma-Algorithmus»

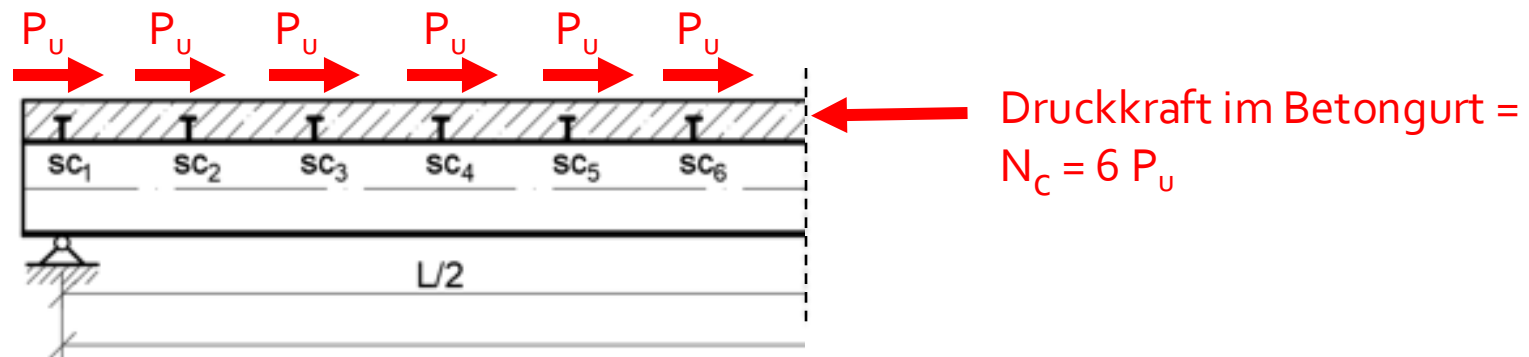
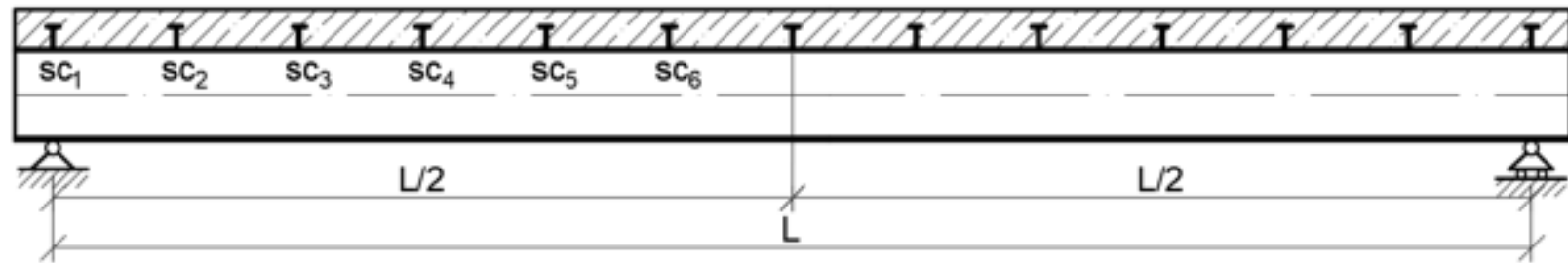


# Grundlagen und Annahme des Eurocode 4 für die «einfache» plastische Bemessung mit Voll- oder Teilverbund mit äquidistanter Dübelanordnung





# Grundlagen und Annahme des Eurocode 4 für die «einfache» plastische Bemessung mit Voll- oder Teilverbund mit äquidistanter Dübelanordnung





ICSAS 2024

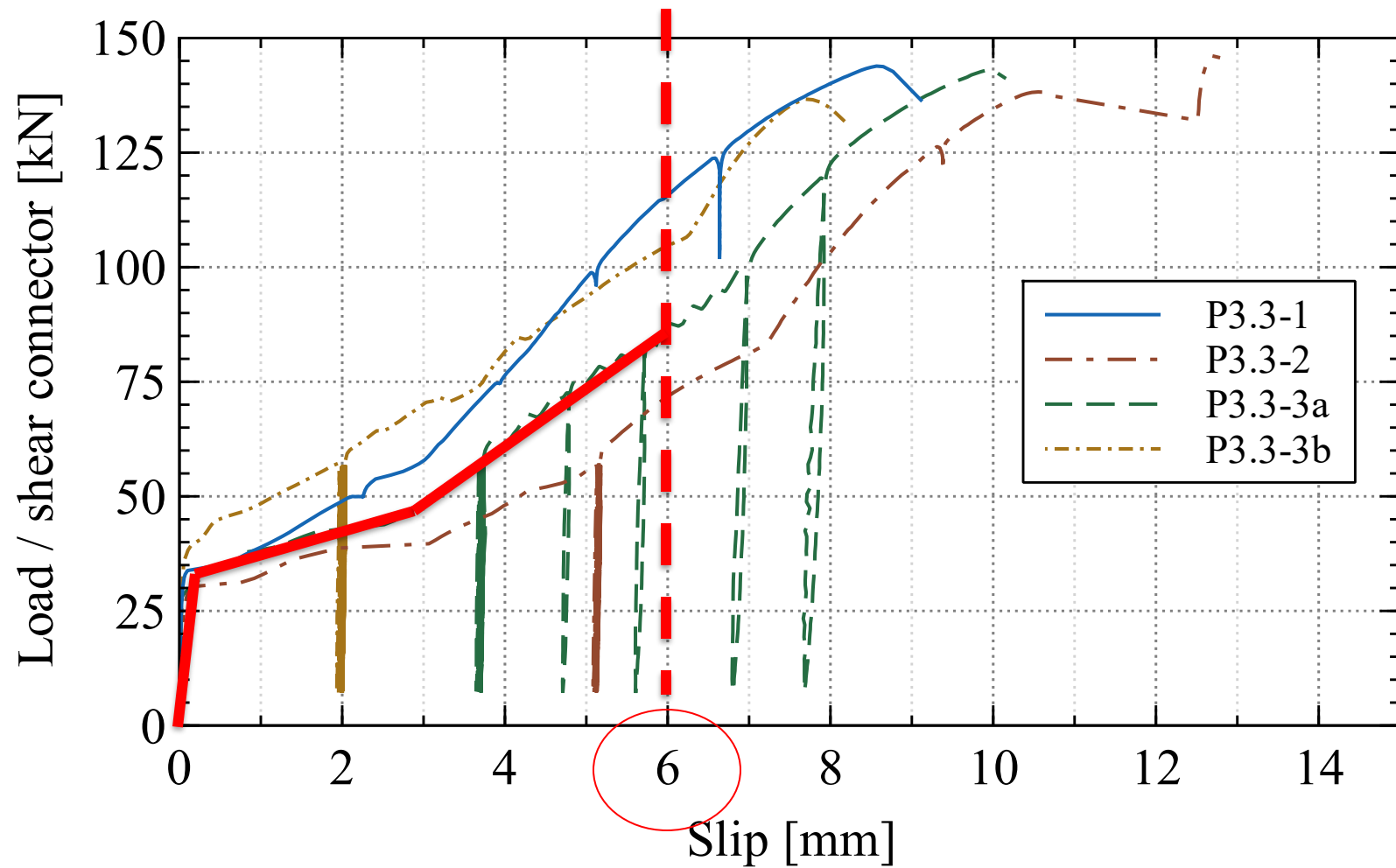
10<sup>th</sup> International Conference on Steel and  
Aluminium Structures

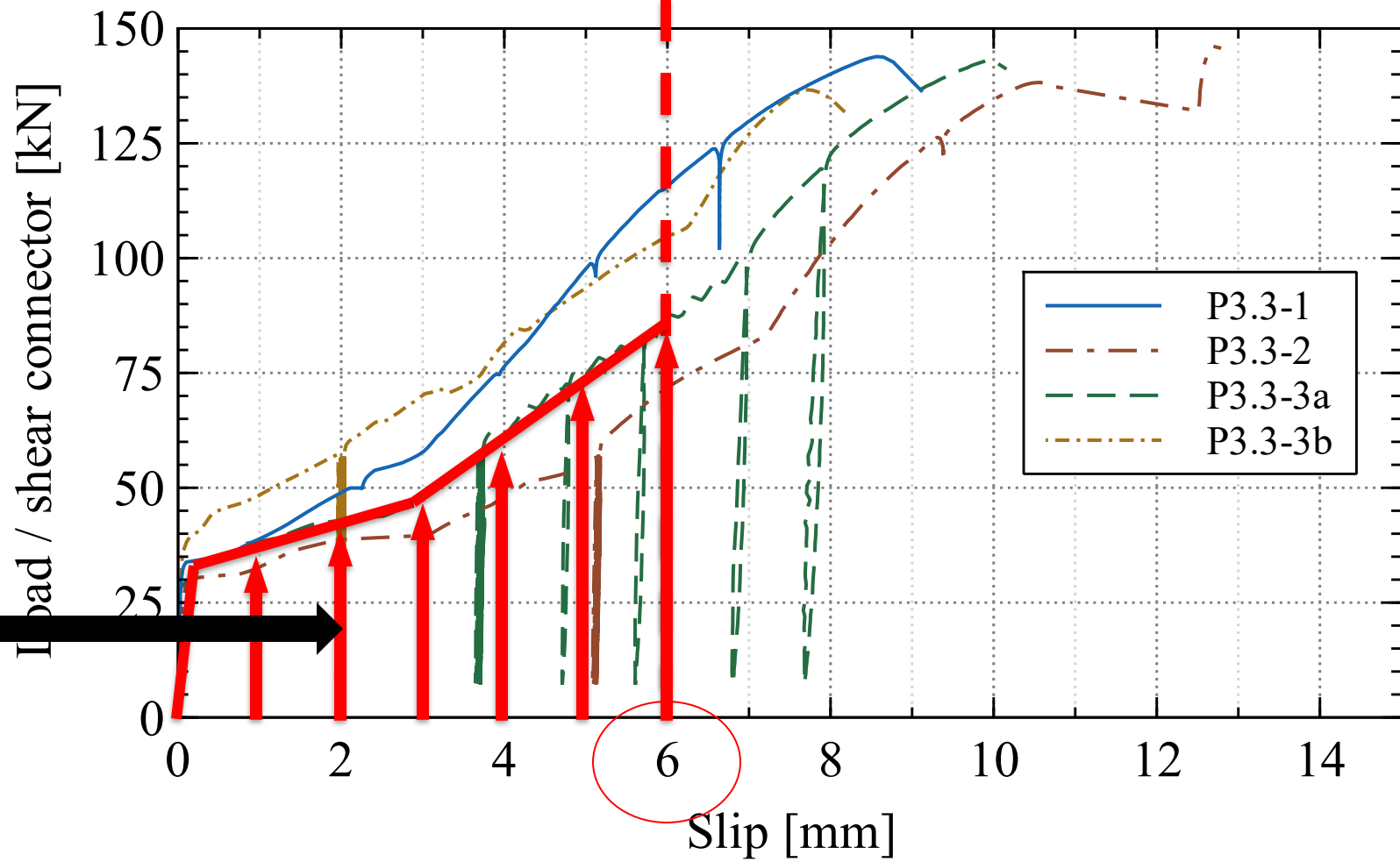
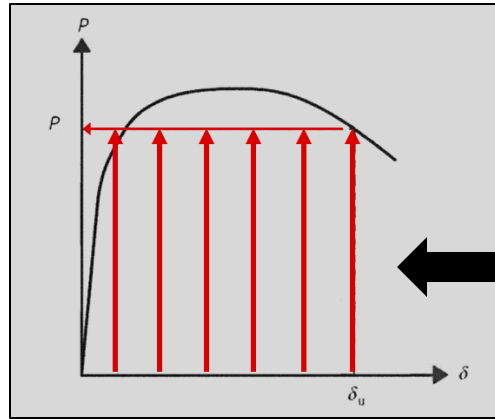
5-7 June 2024

Rio de Janeiro, Brazil



# Last- Schlupfkurve POT P<sub>3</sub>







**ICSAS 2024**

10<sup>th</sup> International Conference on Steel and  
Aluminium Structures

5-7 June 2024

Rio de Janeiro, Brazil



# Der «Kozma-Algorithmus»



ICSAS 2024

10<sup>th</sup> International Conference on Steel and  
Aluminium Structures

5-7 June 2024

Rio de Janeiro, Brazil



## Schritt 1 – Schlupffunktion entlang der Trägerlängsachse

- (i) Der Algorithmus ist offen für die Annahme einer jeglichen **Funktion**
- (ii) Die Annahme einer **Kosinus-Funktion** hat sich für die Verbundbauweise in Stahl-Beton
  - im Grenzzustand der Tragfähigkeit
  - bei erlaubter Plastizierungals leicht auf der sicheren Seite herausgestellt.
- (iii) Der maximale **Schlupfwert von 6mm** hat sich in der Stahl-Beton Verbundbauweise bewährt. →

Im Stahl-Holz Verbundbau werden beide Annahmen auch als **erste Arbeits-Hypothese** übernommen.





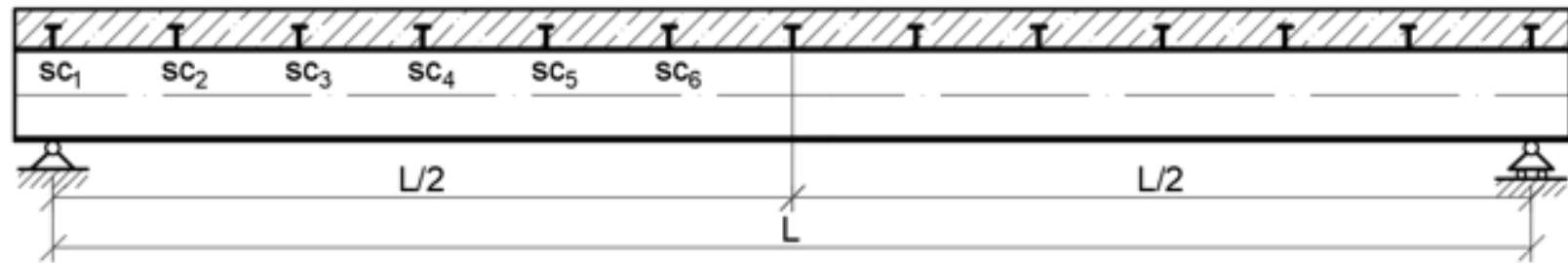
ICSAS 2024

10<sup>th</sup> International Conference on Steel and  
Aluminium Structures  
5-7 June 2024  
Rio de Janeiro, Brazil

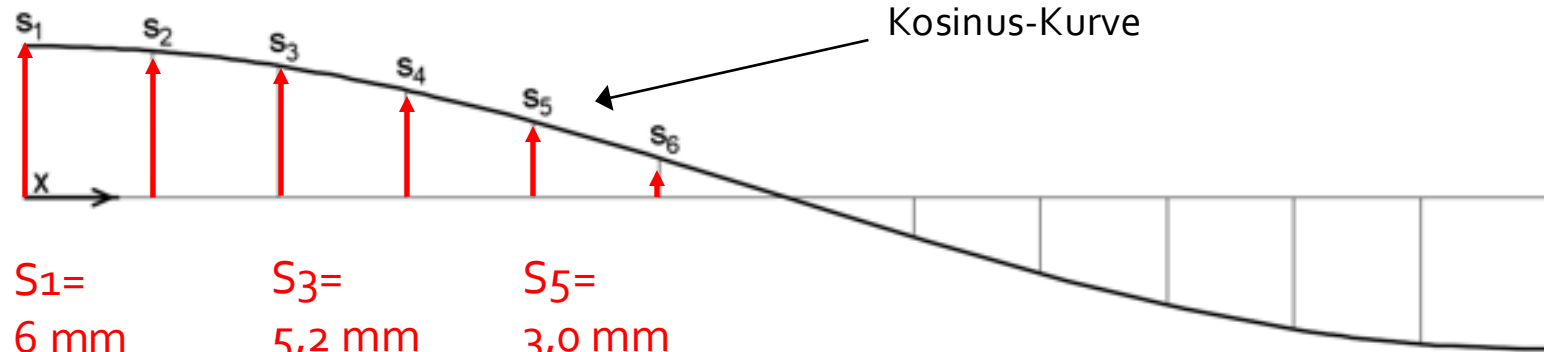


## Schritt 1 – Schlupffunktion entlang der Trägerlängsachse

Beispiel mit 6  
Verbundmitteln



Schlupf-Verteilung



$S_1 =$   
6 mm

$S_3 =$   
5,2 mm

$S_5 =$   
3,0 mm

$S_2 =$   
5,8 mm

$S_4 =$   
4.24 mm

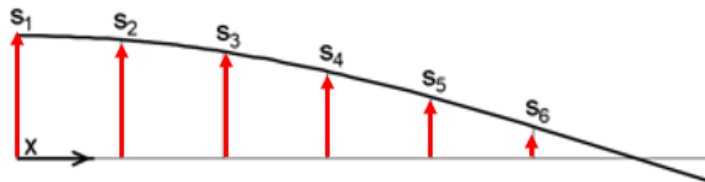
$S_6 =$   
1.55 mm



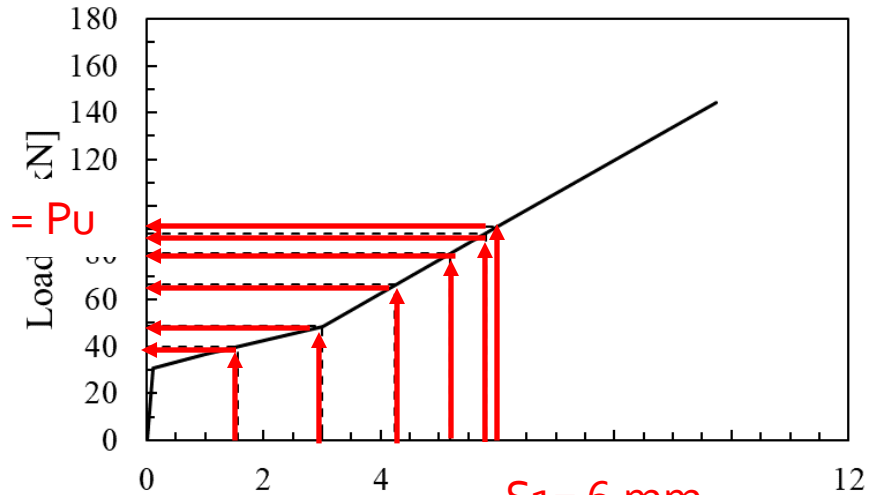
# Schritt 3 – Bestimmung der aktivierten Dübelkräfte

$P_4 = 0,707 P_U$      $P_3 = 0,866 P_U$      $P_2 = 0,966 P_U$      $P_1 = P_U$   
 $P_5 = 0,5 P_U$   
 $P_6 = 0,259 P_U$

Slip distribution:



$S_1 = 6 \text{ mm}$      $S_3 = 5,2 \text{ mm}$      $S_5 = 3,0 \text{ mm}$   
 $S_2 = 5,8 \text{ mm}$      $S_4 = 4,24 \text{ mm}$      $S_6 = 1,55 \text{ mm}$



$S_1 = 6 \text{ mm}$   
 $S_2 = 5,8 \text{ mm}$   
 $S_3 = 5,2 \text{ mm}$   
 $S_4 = 4,24 \text{ mm}$   
 $S_5 = 3,0 \text{ mm}$   
 $S_6 = 1,55 \text{ mm}$

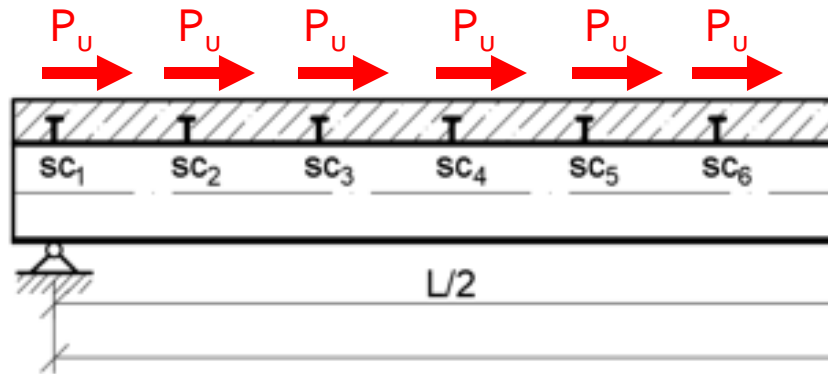
## Schritt 4 – Aufsummierung der aktivierten Dübelkräfte

Shear connector	$S$ , slip [mm]	$P$ , force (elastic-plastic) [kN]	$P$ , force (elastic) [kN]
SC1	6.00	$P_U$	$P_U$
SC2	5.80	$P_U$	$0.966 P_U$
SC3	5.20	$P_U$	$0.866 P_U$
SC4	4.24	$P_U$	$0.707 P_U$
SC5	3.00	$P_U$	$0.500 P_U$
SC6	1.55	$P_U$	$0.259 P_U$
<b>Sum (<math>N_c</math>):</b>		<b><math>6 P_U</math></b>	<b><math>4.298 P_U</math></b>
<b>Mean:</b>		<b><math>6 P_U / 6 = 1.0 P_U</math></b>	<b><math>4.298 P_U / 6 = 0.716 P_U</math></b>

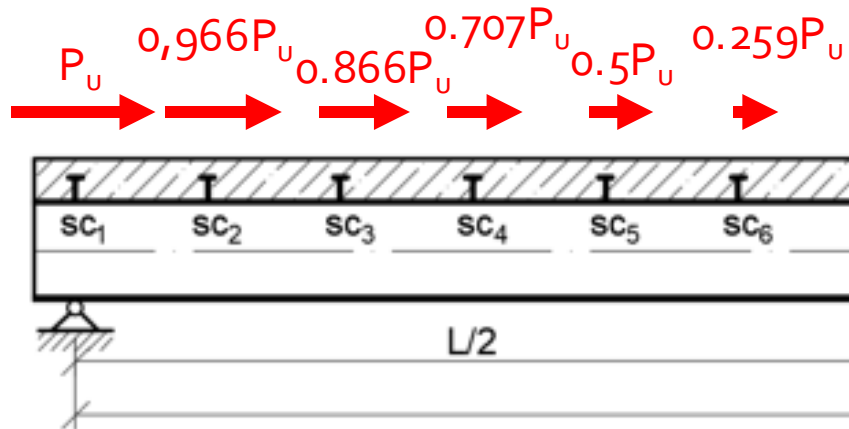




## Schritt 5 – Bestimmung von $k_{flex}$ und $P_{R,eff}$



Druckkraft im Betongurt =  $N_c = 6 P_u$



$N_c = 4,298 P_u$  (und nicht  $6 P_u$ )

$k_{flex} = 4,298 / 6 = 0,716$

Für die weiter Statische Berechnung :

$$P_{R,eff} = 0,716 P_u$$

- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 Erster Vergleich
- 7 Danksagung

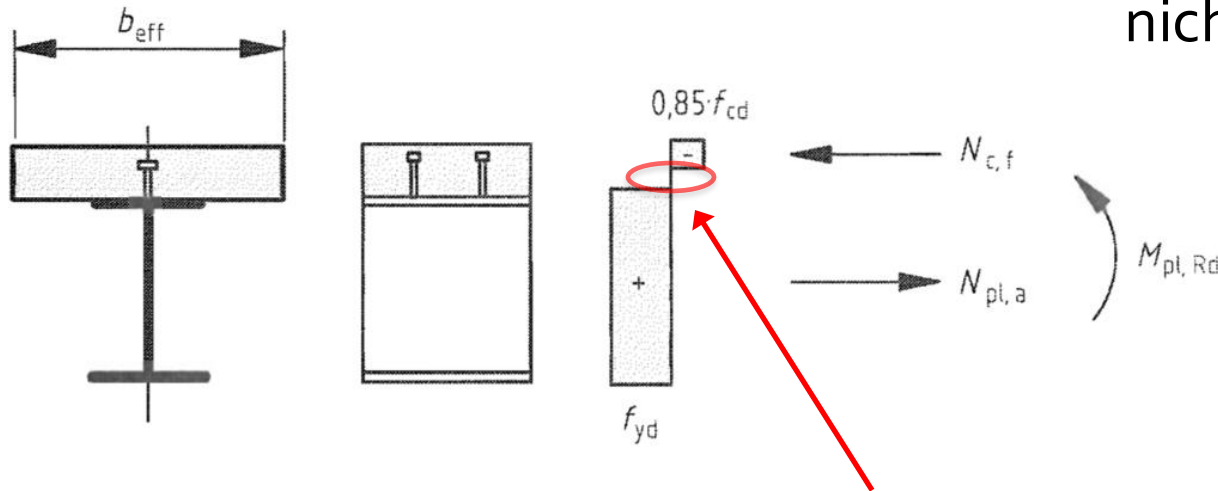


## Risse auf der Unterseite des Holzgurtes eines Stahl-Holz Verbundträgers aufgrund Biegezugversagens

Hassanieh, A.; Valipour, H.R.; Bradford, M.A.: Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams, Journal of Constructional Steel Research, Volume 122, 2016, Pages 367-378.



Ein Versagen auf Zug an der Unterseite des Holzgurtes kann nicht vernachlässigt werden



Stahl-Beton Verbund: Die Zugdehnung wird einfach ignoriert



## Ansatz

Eine **dehnungskontrollierte**  
Biege-Bemessung des Verbundquerschnittes

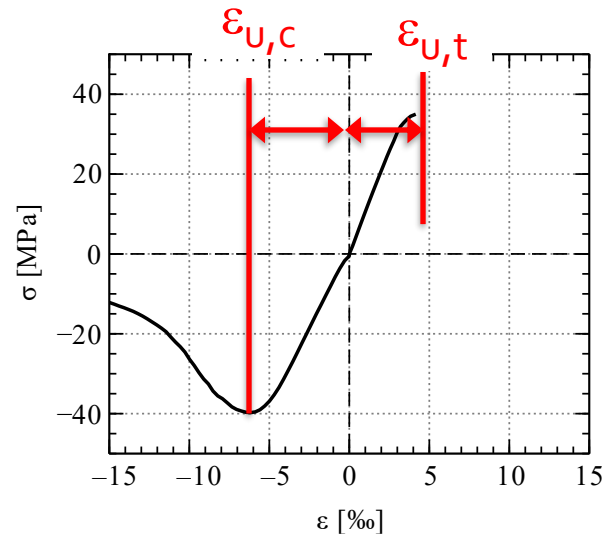




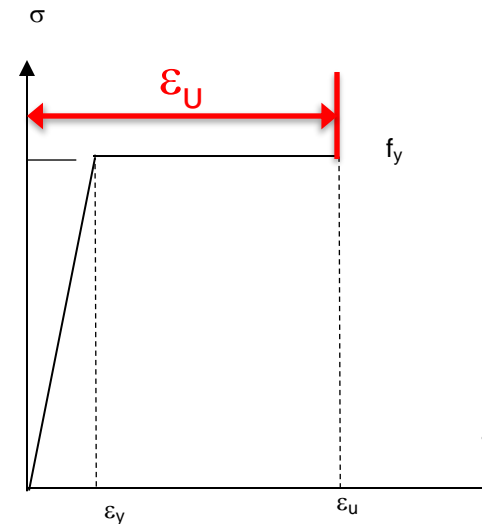
# Die Dehnungskontrolliert Biege-Bemessung des Verbundquerschnittes (bei vollem Verbund)

(1) Die Werkstoffkennlinien der verwendeten Materialien

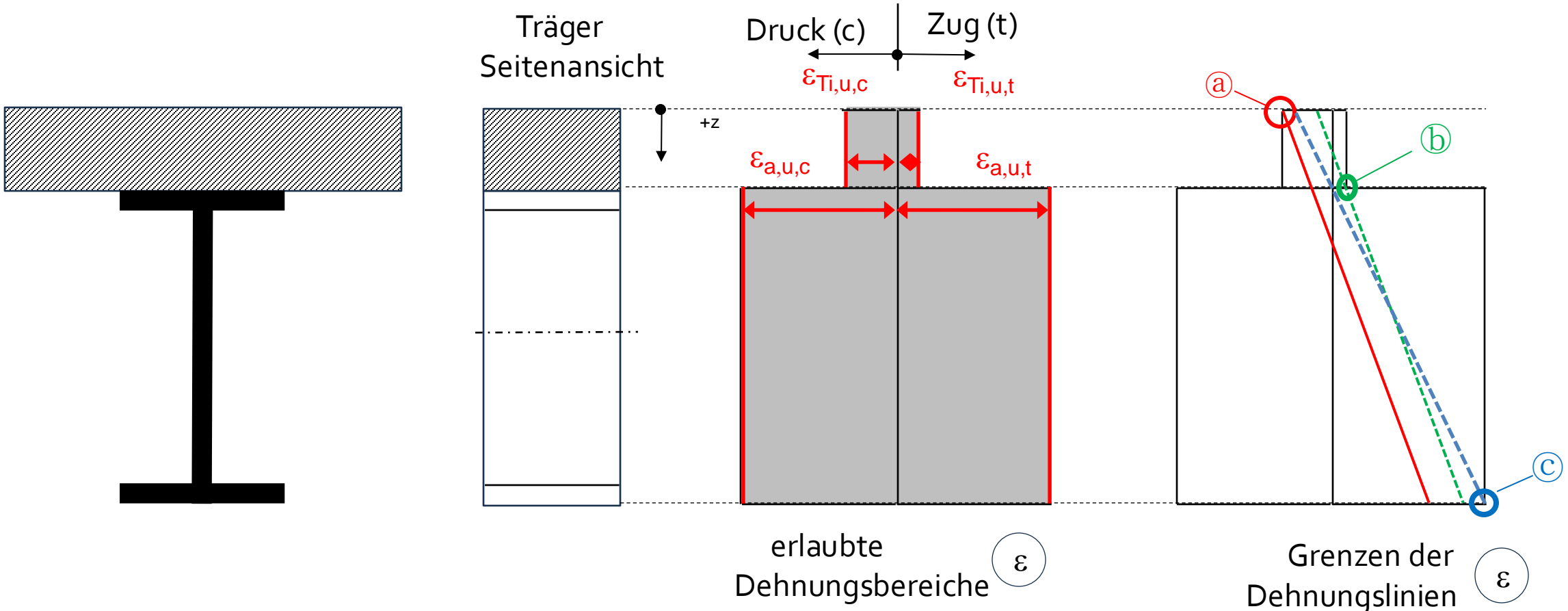
Holz



Stahl

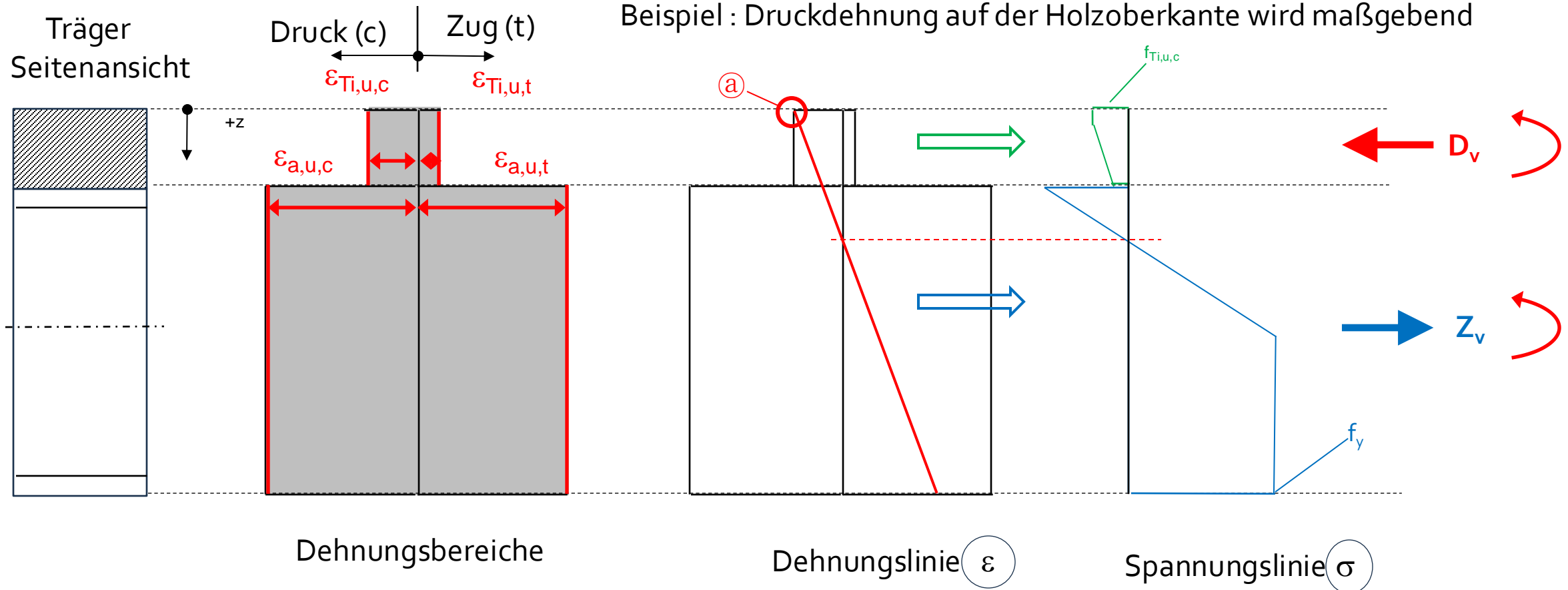


## (2) Der Querschnitt mit den Grenzwerten der Dehnungen

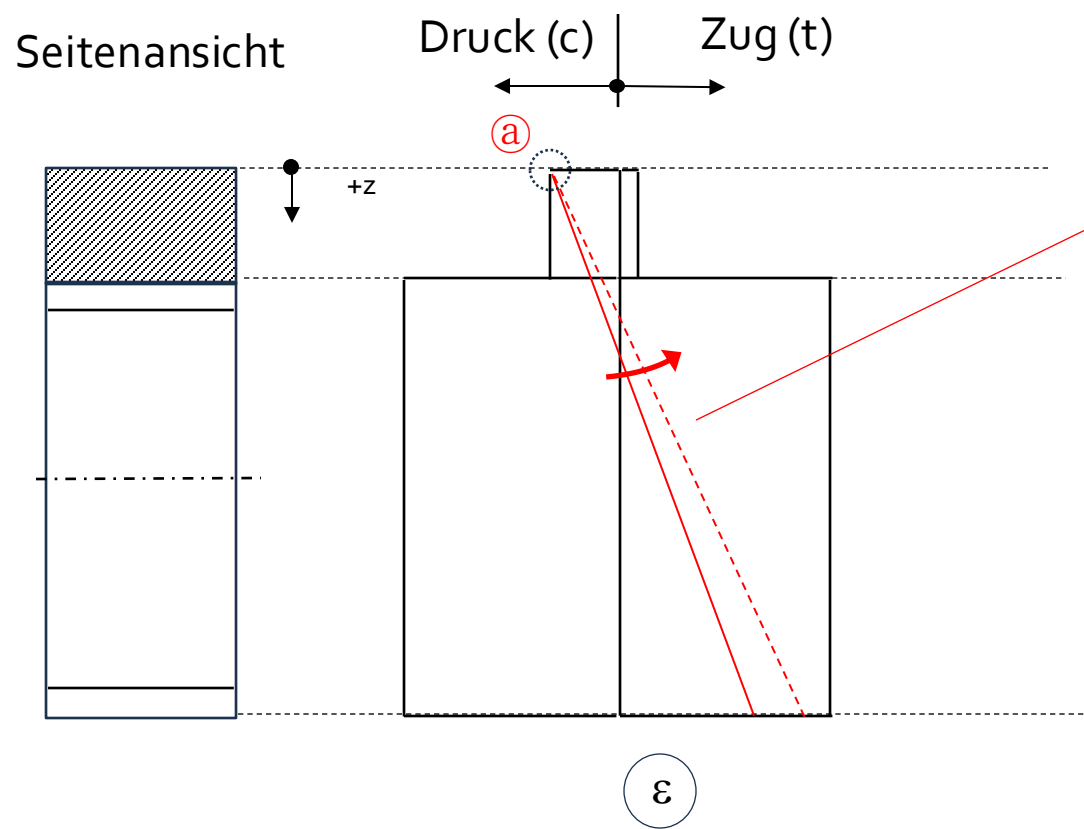


### (3) Der Querschnitt mit der zugehörigen Spannungsverteilung

Beispiel : Druckdehnung auf der Holzoberkante wird maßgebend



## (4) Ermittlung des Grenzbiegemomentes

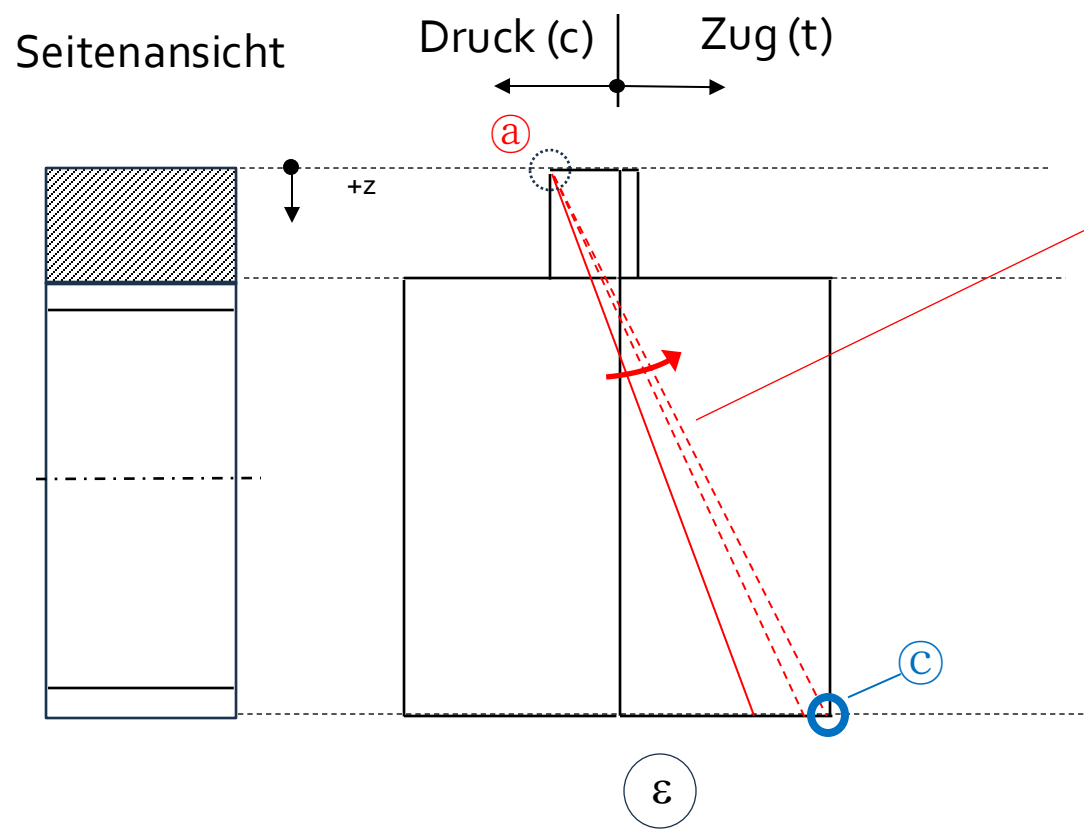


Ist in der horizontalen Summe die Druckkraft zu groß, wird der Zugbereich vergrößert

... so lange, bis horizontales Gleichgewicht erreicht ist ...



## (4) Ermittlung des Grenzbiegemomentes

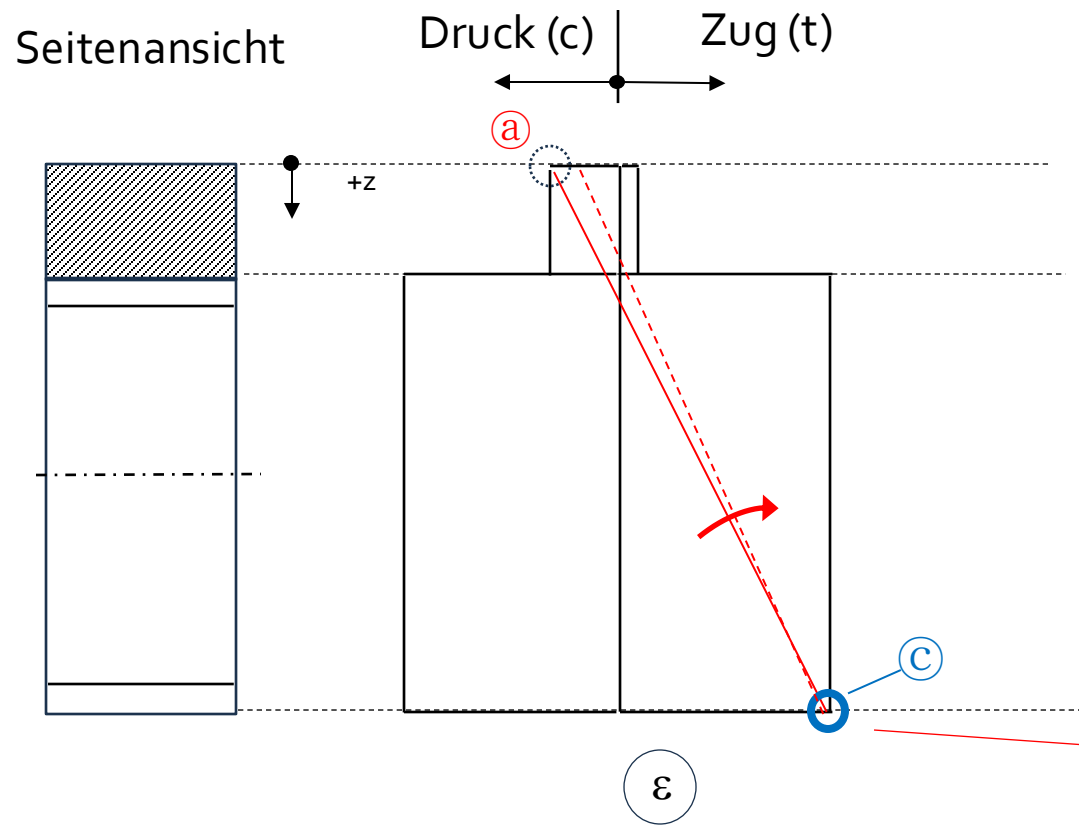


Ist in der horizontalen Summe die Druckkraft zu groß, wird der Zugbereich vergrößert ...

... so lange, bis horizontales Gleichgewicht erreicht ist ...

... oder bis die Grenzdehnung an der Unterkante erreicht ist ...

## (4) Ermittlung des Grenzbiegemomentes



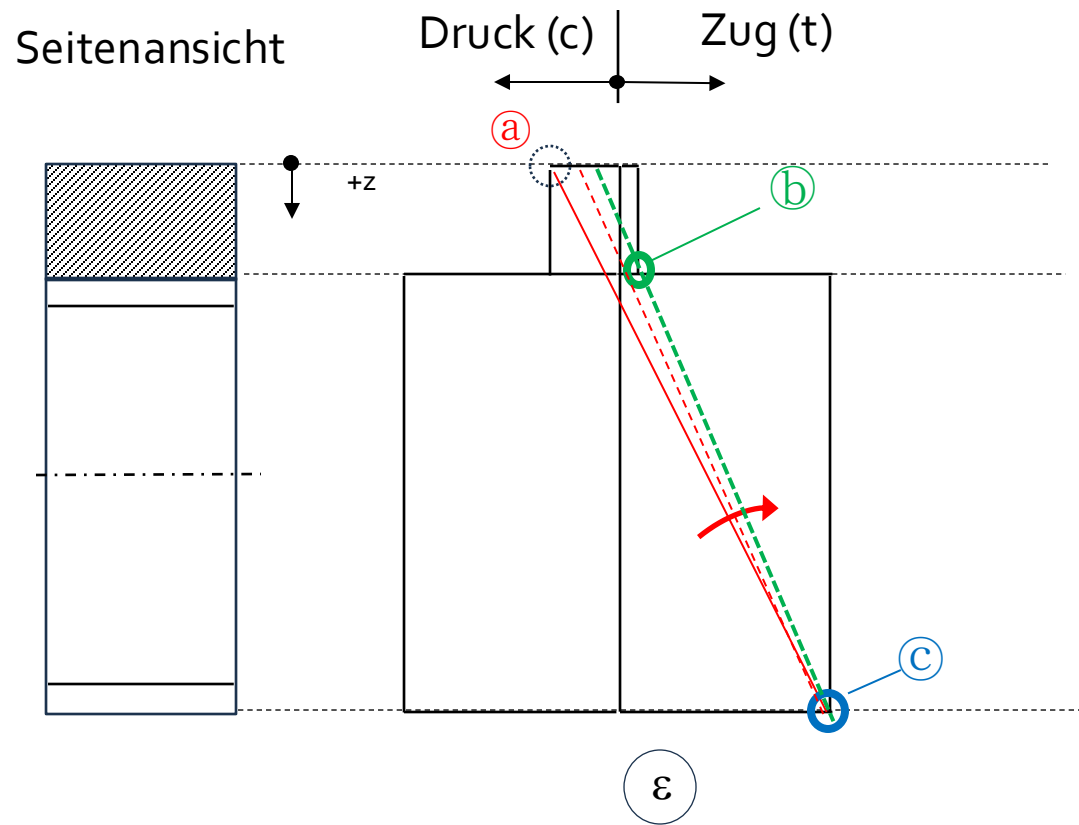
Ist in der horizontalen Summe die Druckkraft zu groß, wird der Zugbereich vergrößert ...

... so lange, bis horizontales Gleichgewicht erreicht ist ...

... oder bis die Grenzdehnung an der Unterkante erreicht ist ...

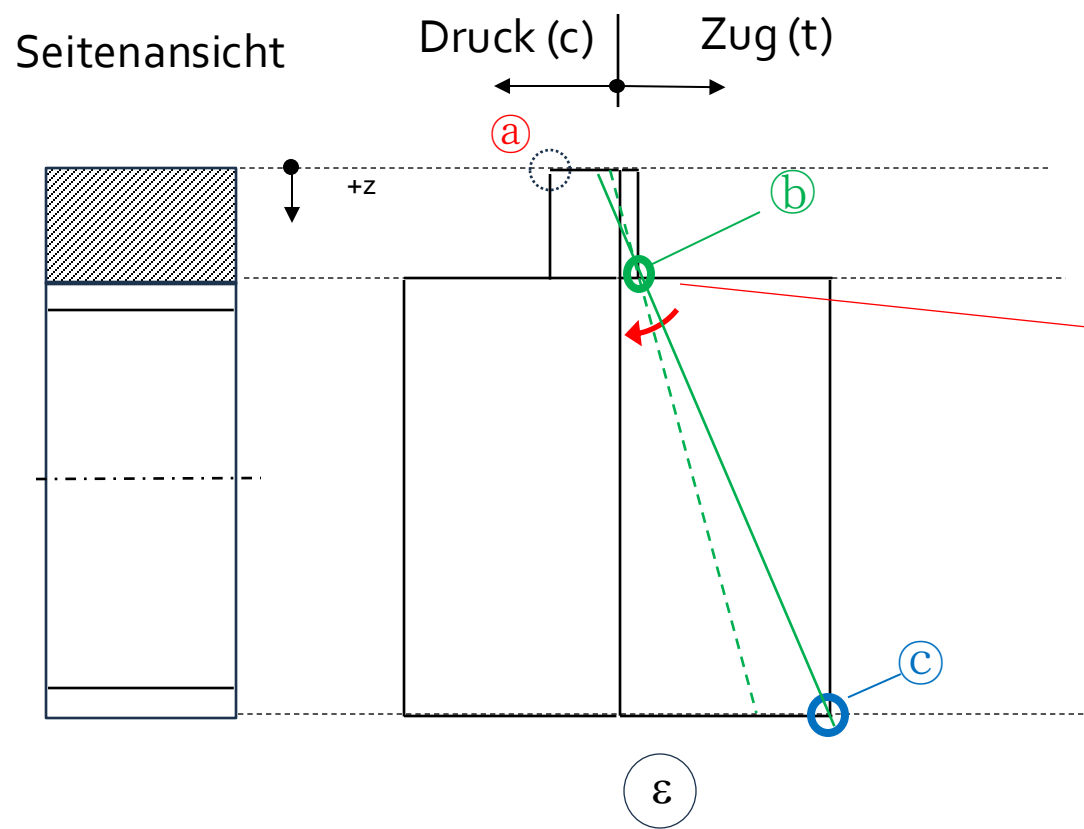
... dann wird um den Punkt „c“ gedreht, und die Druckzone verkleinert, bis horizontales Gleichgewicht erreicht ist ...

## (4) Ermittlung des Grenzbiegemomentes



... oder die Grenzdehnung an der Unterseite des Holzes erreicht ist ...

## (4) Ermittlung des Grenzbiegemomentes



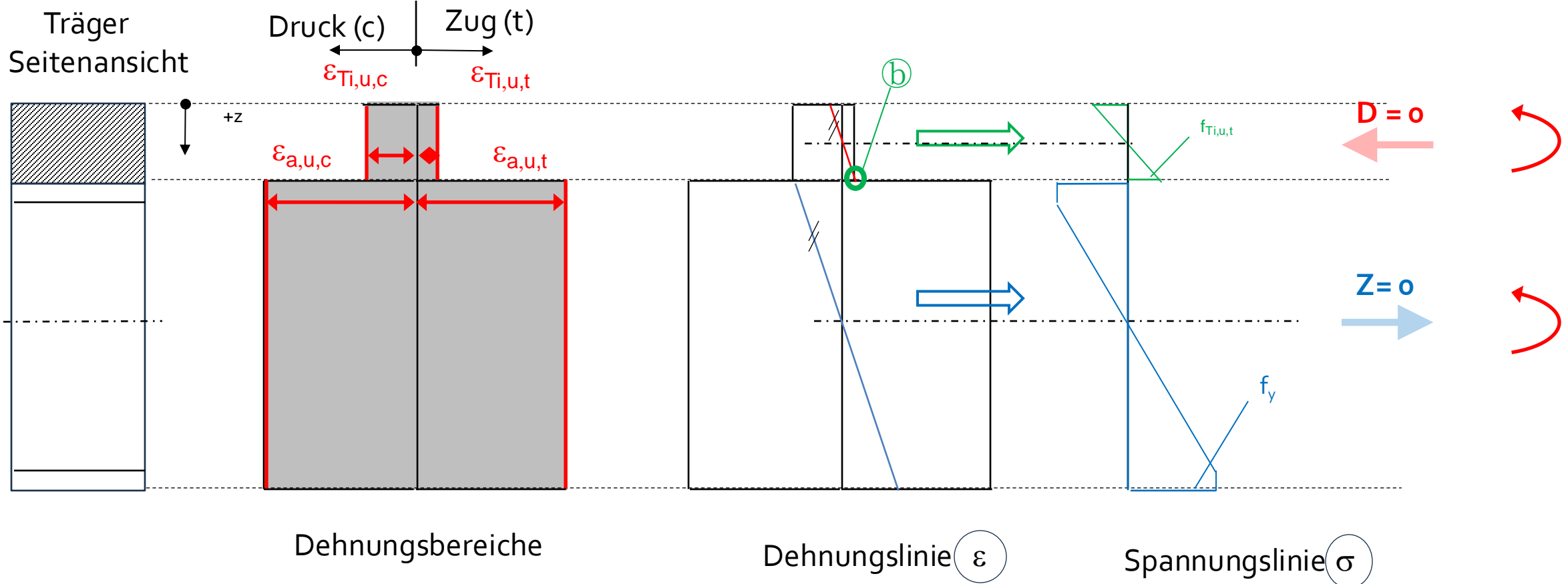
... oder die Grenzdehnung an der Unterseite des Holzes erreicht ist ...

... ist die horizontale Druckkraft immer noch zu groß, wird um den Punkt „b“ gedreht, bis das horizontale Gleichgewicht letztendlich erreicht ist.

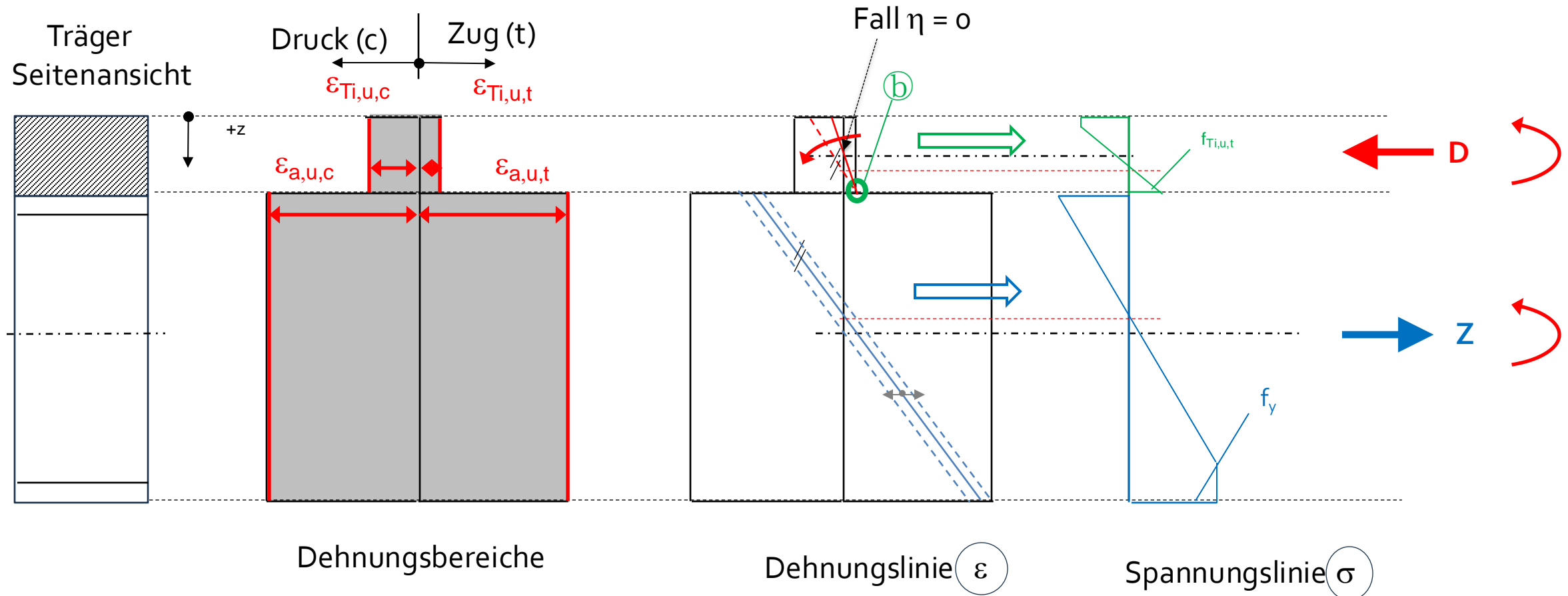


- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 Erster Vergleich
- 7 Danksagung

# (1) Der Querschnitt ohne Verbund ( $\eta = 0$ )



## (2) Der Querschnitt mit Teilverbund (1) ( $0 < \eta < 1$ ) (b)

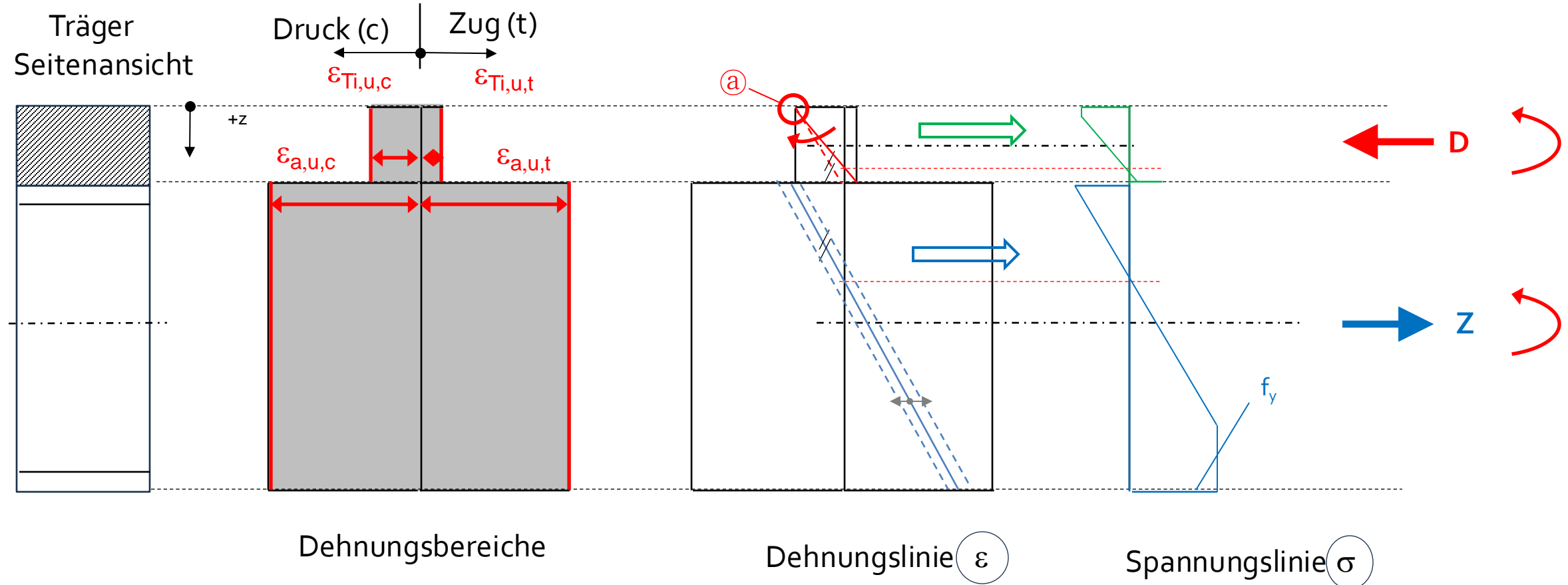




(2) Der Querschnitt mit Teilverbund (2) ( $0 < \eta < 1$ ) @



## (2) Der Querschnitt mit Teilverbund (2) ( $0 < \eta < 1$ ) <sup>a</sup>

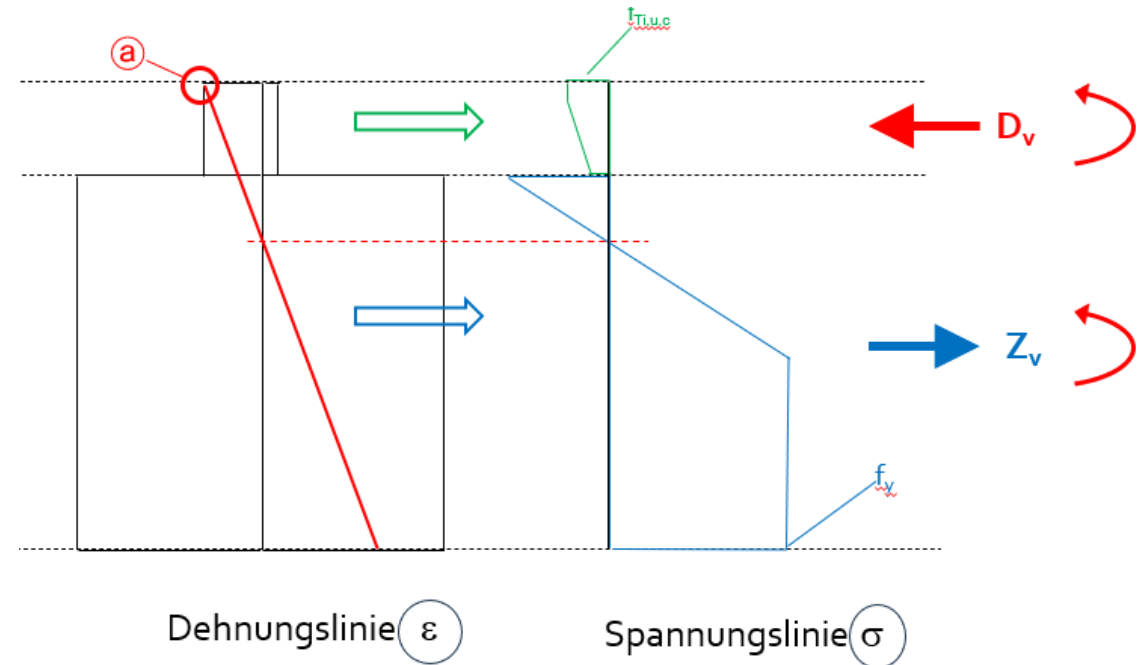




### (3) Ermittlung des Verdübelungsgrades $\eta$

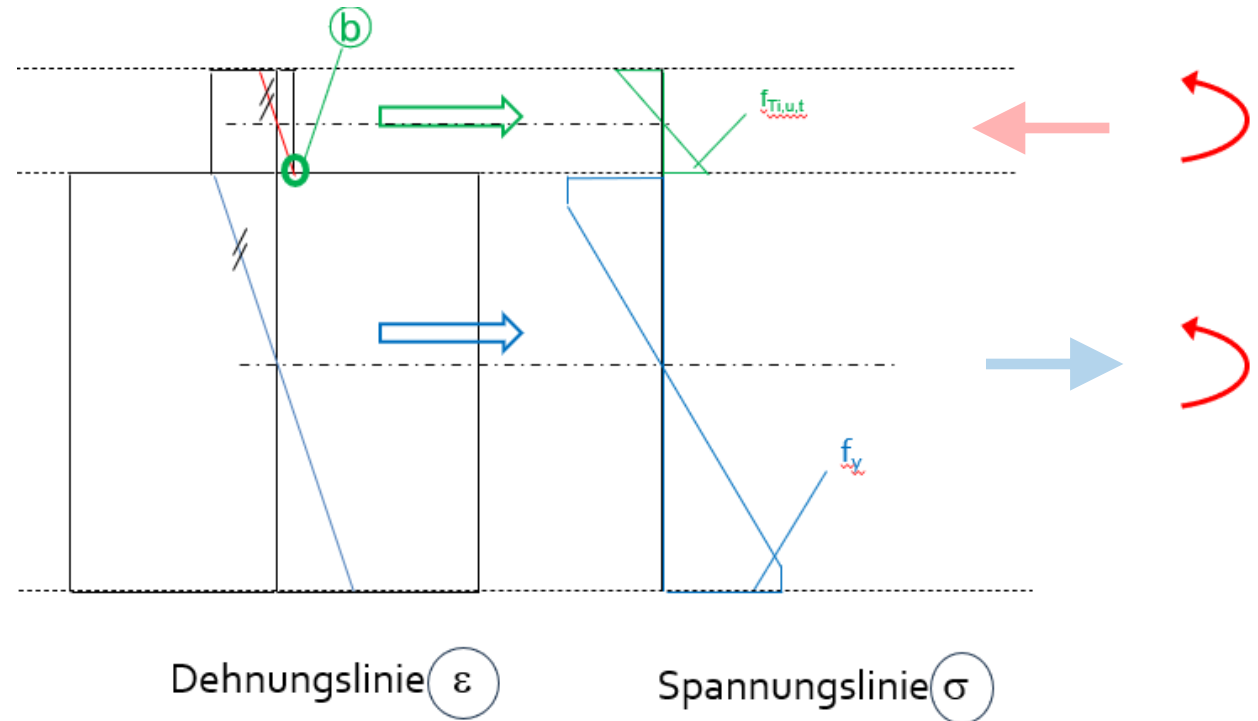
### (3) Ermittlung des Verdübelungsgrades $\eta$

1. Die Resultierende Druckkraft „ $D_v$ “ aus dem Fall „voller Verbund“ gibt das Maß für  $\eta = 1$ .



### (3) Ermittlung des Verdübelungsgrades $\eta$

1. Die Resultierende Druckkraft „ $D_v$ “ aus dem Fall „voller Verbund“ gibt das Maß für  $\eta = 1$ .
2. Die Druckkraft „ $D$ “ im Falle „kein Verbund“ ist 0



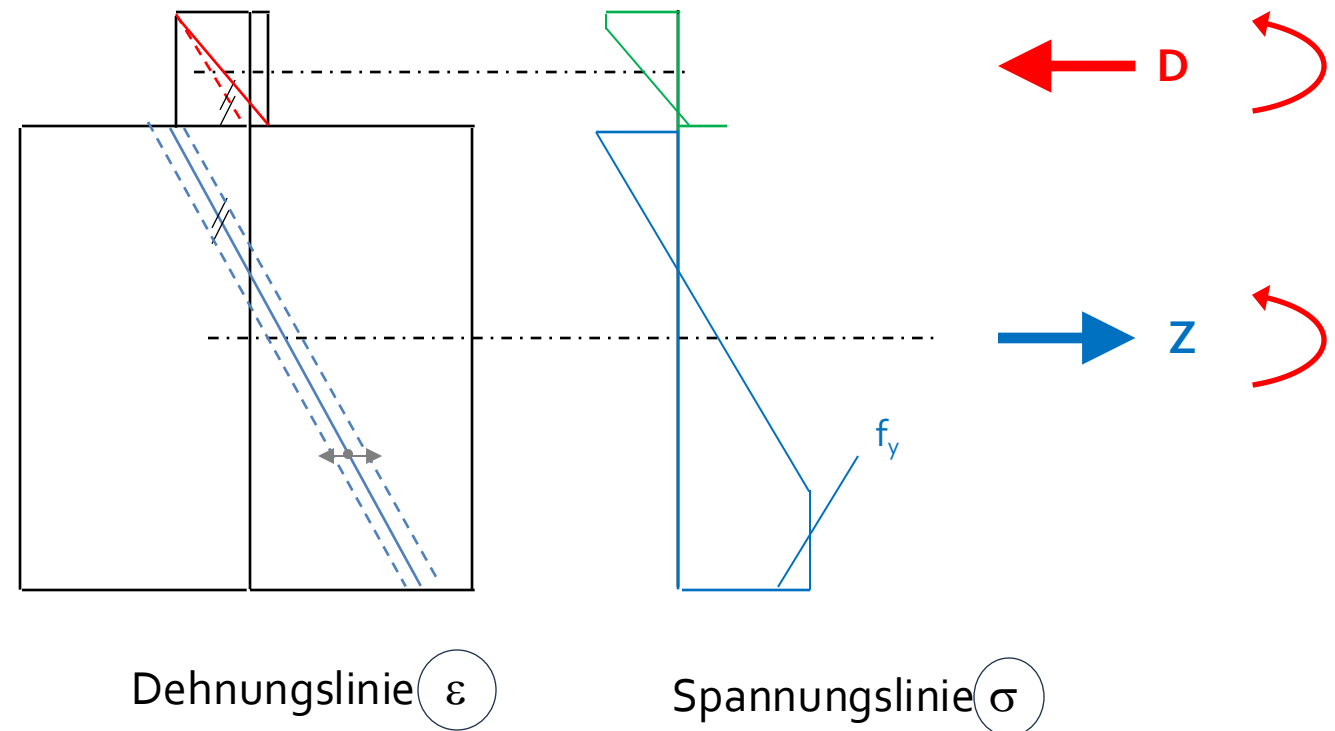


### (3) Ermittlung des Verdübelungsgrades $\eta$

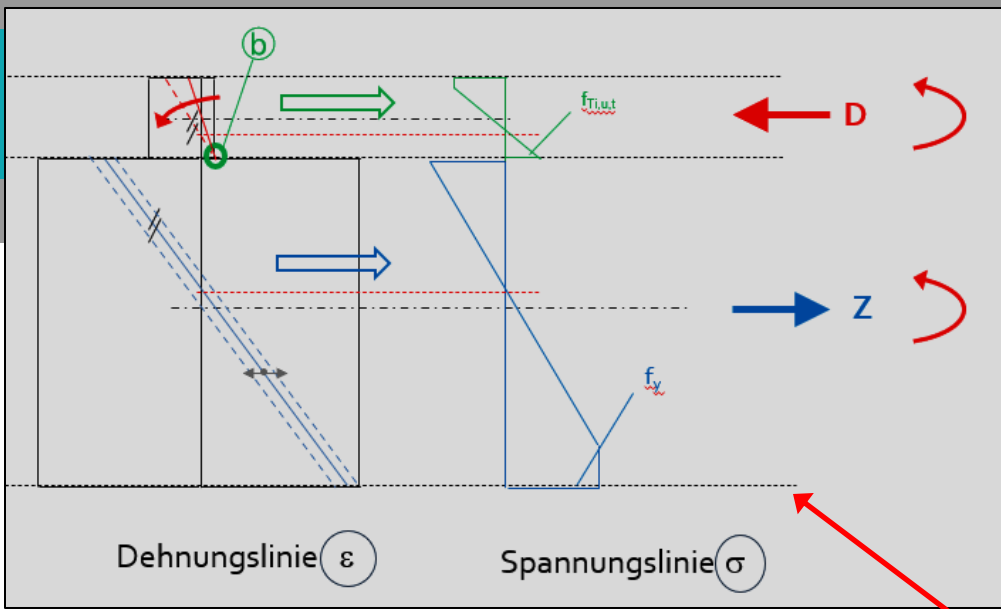
1. Die Resultierende Druckkraft „ $D_v$ “ aus dem Fall „voller Verbund“ gibt das Maß für  $\eta = 1$ .
2. Die Druckkraft „ $D$ “ im Falle „kein Verbund“ ist 0

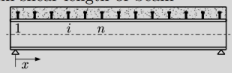
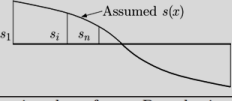
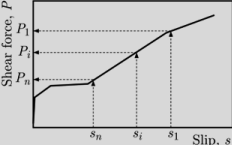
3. Für die dazwischen liegenden Fälle ist

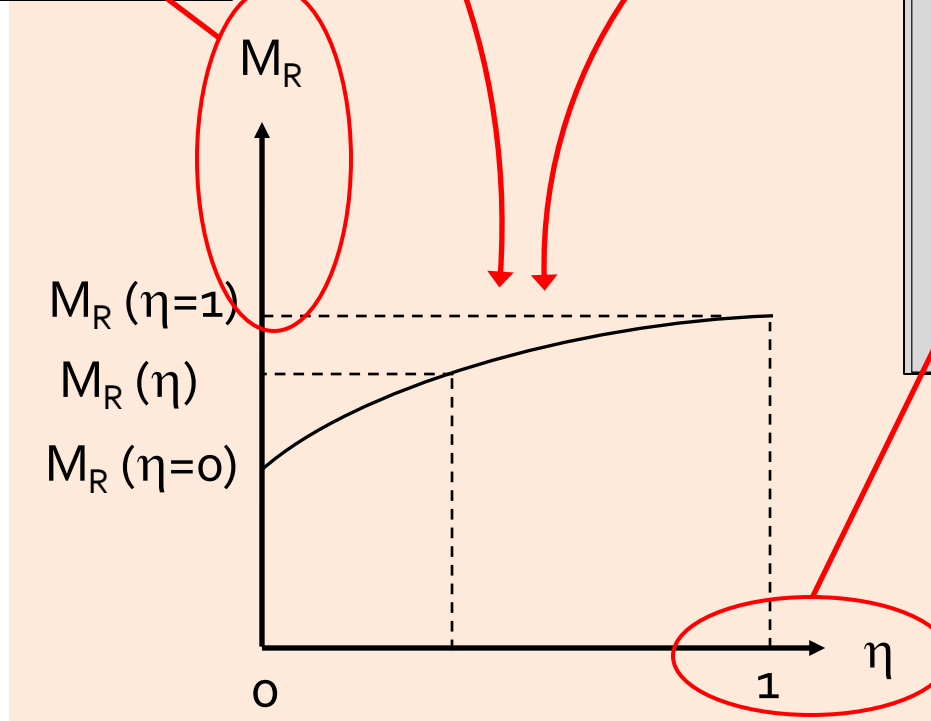
$$\eta = D / D_v$$



- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 **Der Vorschlag : Eine Kombination**
- 6 Erster Vergleich
- 7 Danksagung



Step	General algorithm	Simplified algorithm
1	Select (i) shear connectors distribution, (ii) number of shear connections $n$ placed within shear length of beam 	Assume (i) shear connectors distribution as uniformly distributed, (ii) number of reference points $n = 6$
2	Assume (iii) slip distribution function $s(x)$ , (iv) end slip $s_1$ , and determine slip values $s_i$ ( $i > 1$ ) according to slip distribution 	Assume (iii) cosinus slip distribution function, (iv) end slip of $s_1 = 6$ mm, and determine slip values $s_2$ to $s_6$ according to cosine function
3	Determine shear forces $P_i$ on basis of slip values $s_i$ and chosen load-slip curve: $s_i \rightarrow P_i$ 	Define design load-slip curve (in accordance with EN 1994-1-1, Annex B2, from at least 3 normally identical tests) (i) check that coefficient of variation $CV$ (deviation from mean value) of ultimate shear force $P_{ult}$ out of tests is not greater than 10%, (ii) determine shear forces $P_i$ for each test curve on basis of slip values $s_i$ , where $s_1 = 6$ mm and $P_1$ is force at 6 mm slip: $s_i \rightarrow P_i$ , (iii) find for each slip $s_i$ the minimum occurring shear force $\min P_i$ , (iv) analyse for each step $i$ , from 1 to 6 $P_{i,k} = 0.9 \cdot \min P_i$  $P_{i,d} = P_{i,k} / (\text{partial factor of } 1.25)$ (v) create design load-slip curve $P_{i,d}$ vs. $s_i$



- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 **Erster Vergleich**
- 7 Danksagung





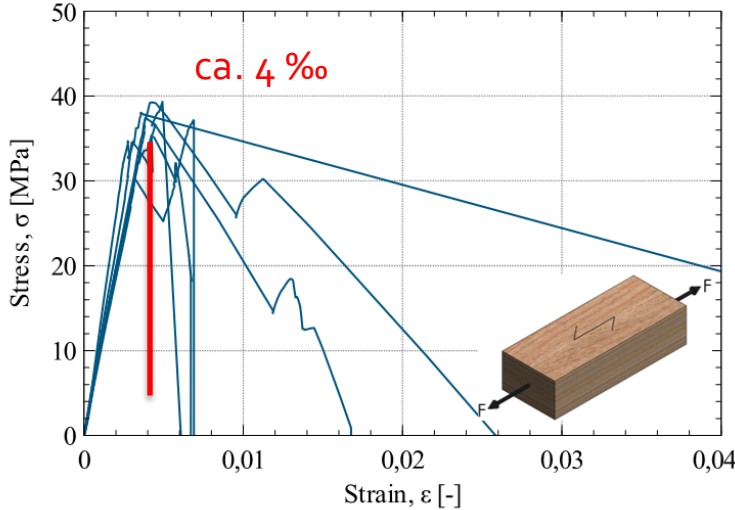
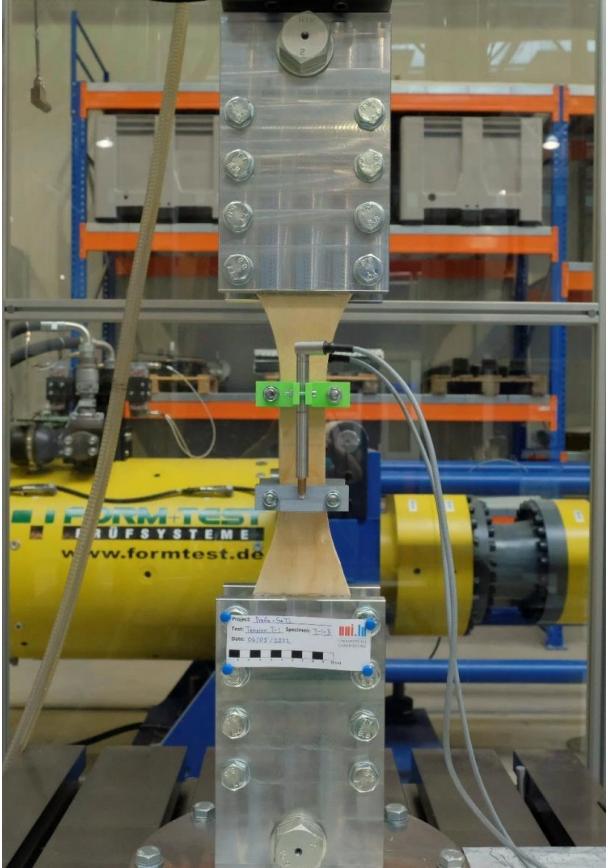
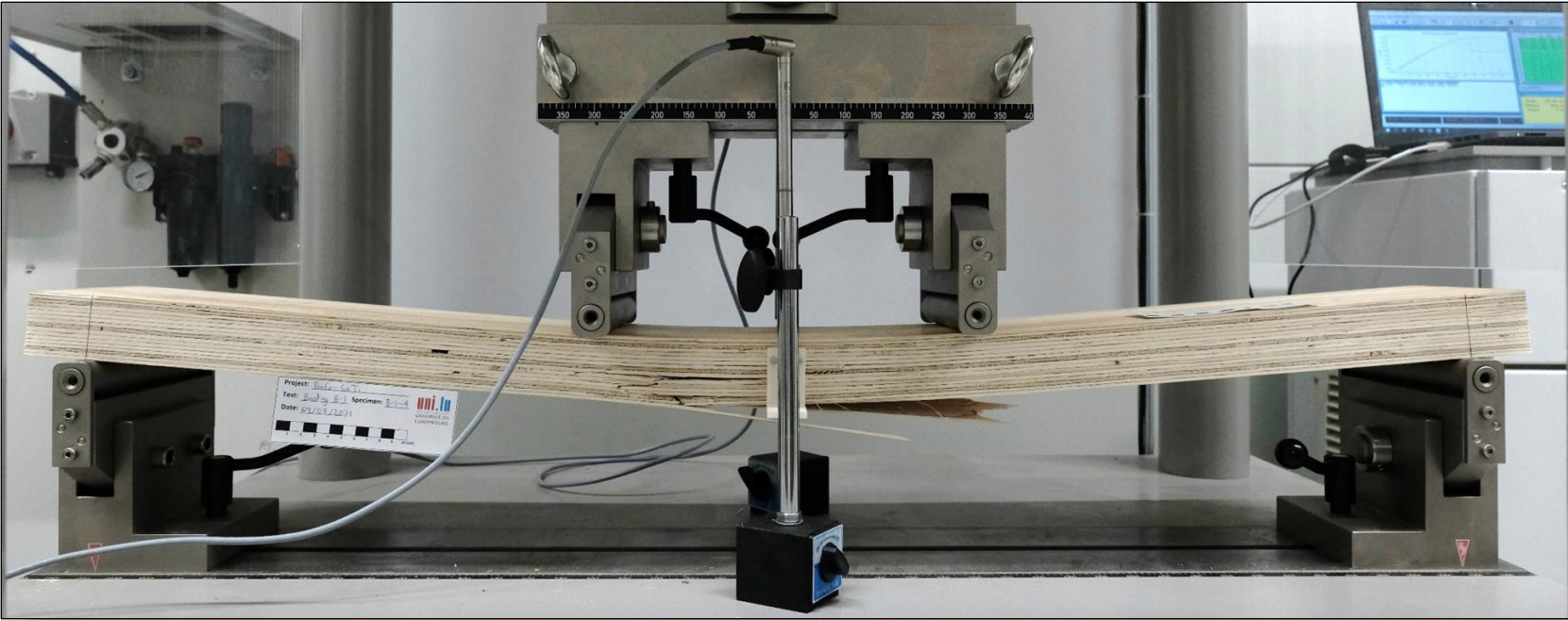
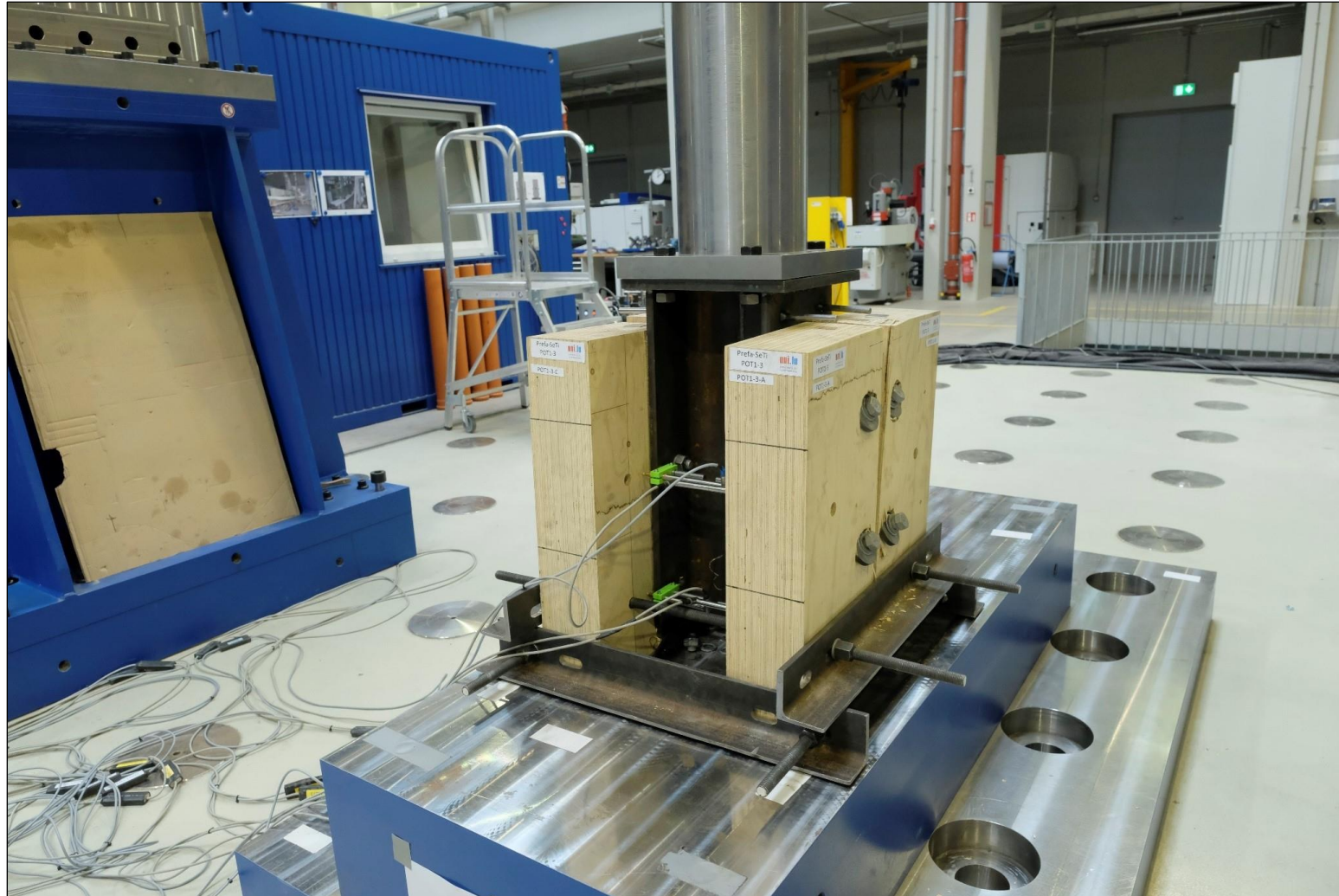


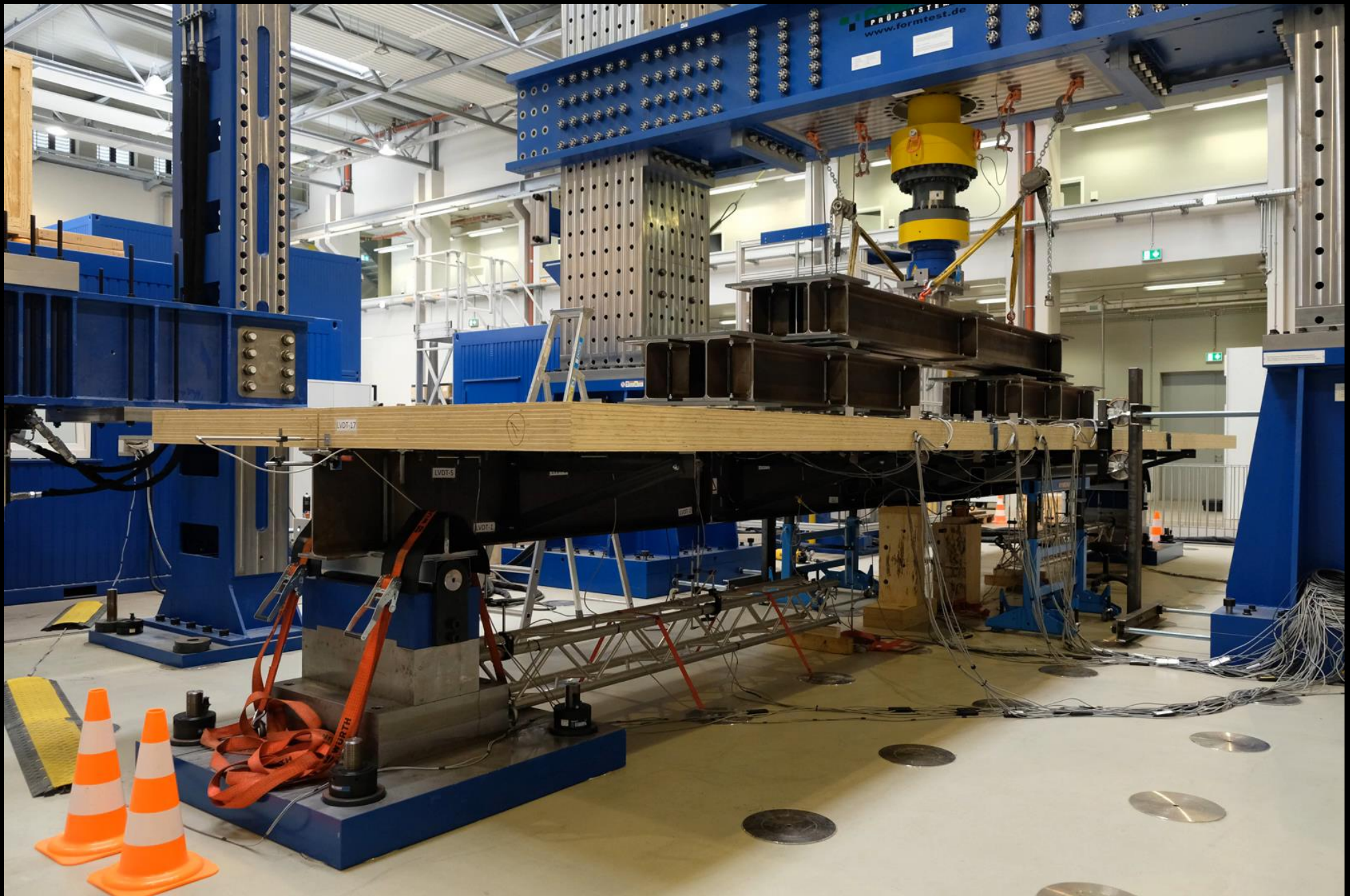
Figure 50. Stress-Strain curves of the tension tests T-1.











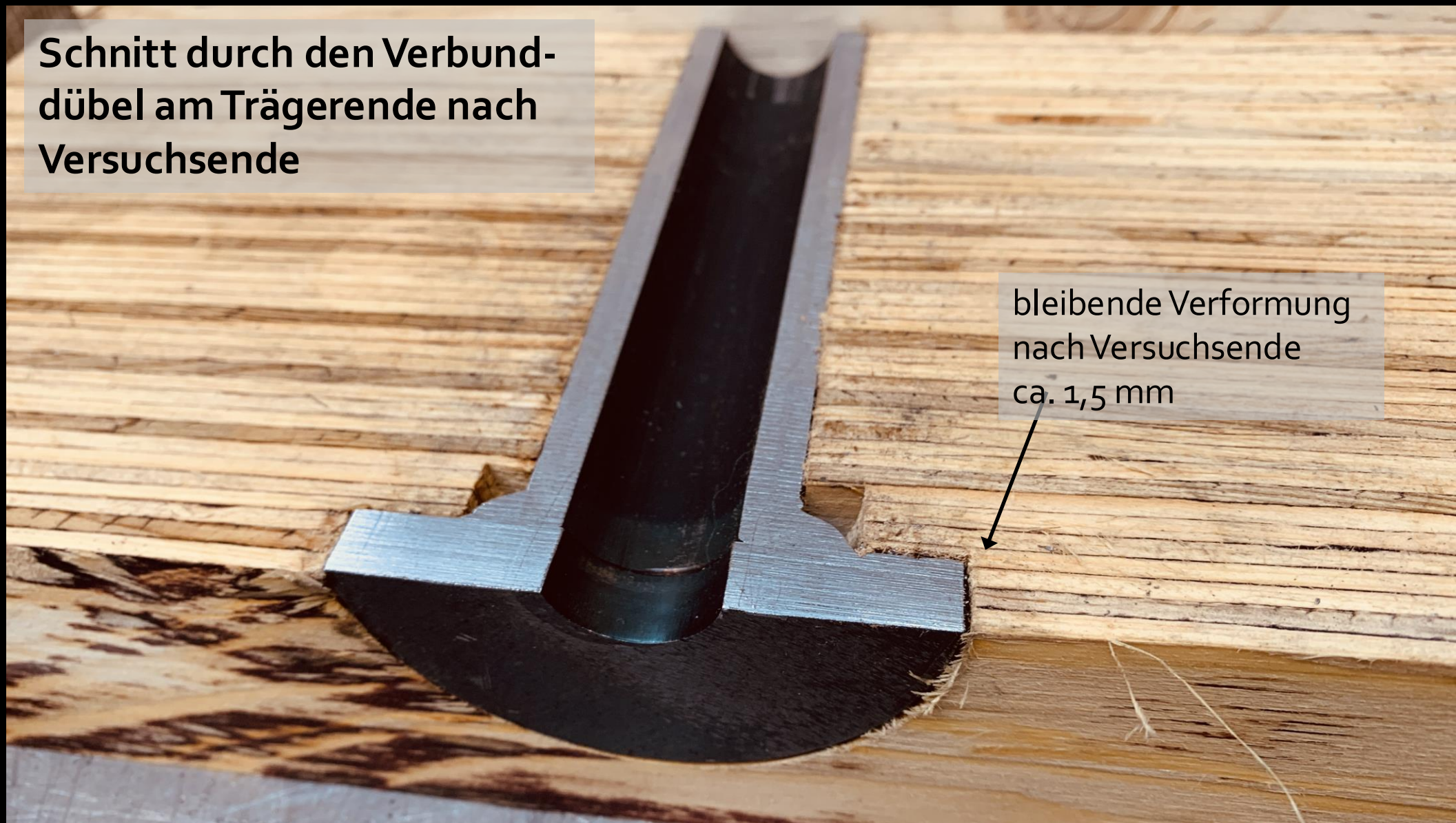




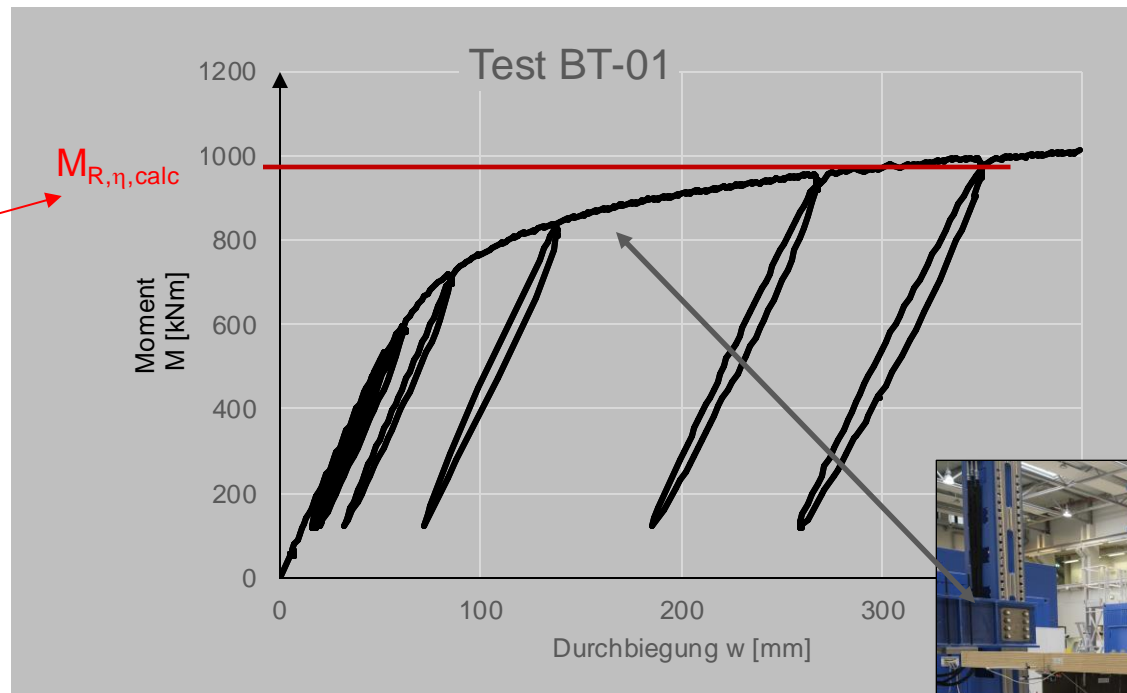
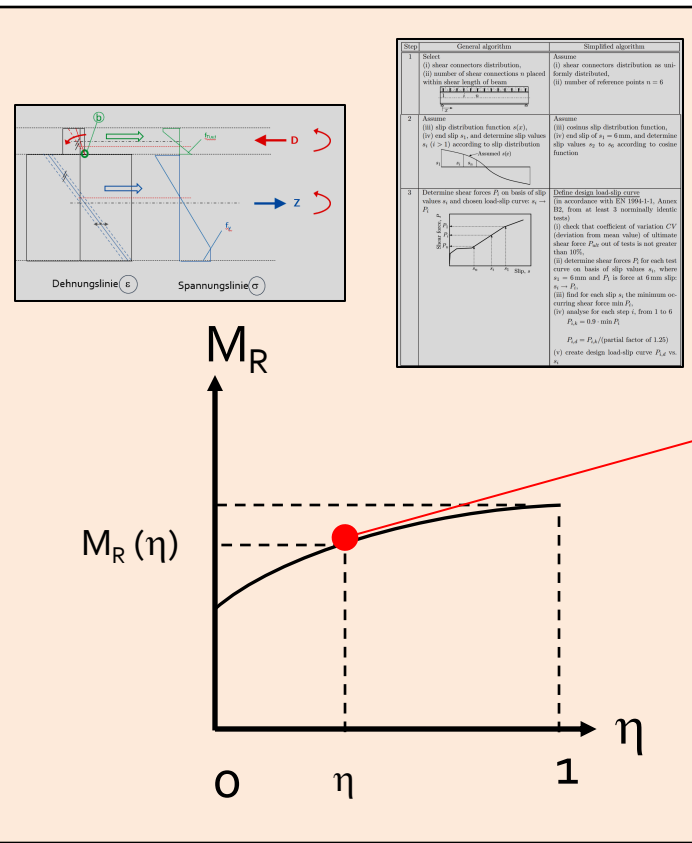


Schnitt durch den Verbunddübel am Trägerende nach Versuchsende

bleibende Verformung  
nach Versuchsende  
ca. 1,5 mm



# Labortest vs. Rechenmodell



- 1 Einführung
- 2 Die Behandlung der unterschiedlichsten Last-Schlupf-Kurven der Verbundmittel
- 3 Die Dehnungskontrollierte Momententragfähigkeit bei vollem Verbund
- 4 Die Berücksichtigung von Teilverbund
- 5 Der Vorschlag : Eine Kombination
- 6 Erster Vergleich
- 7 **Danksagung**





RESEARCH AND INNOVATION



ArcelorMittal



ECCS  
CECM  
EKS



University of Luxembourg

Multilingual. Personalised. Connected.



ArcelorMittal Chair of  
Steel Construction  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Odenbreit

# Erste Ideen für Bemessungsansätze für Verbundträger in Stahl-Holz-Verbundbauweise

**Prof. Dr.-Ing. Christoph ODENBREIT**

**Dr. Teodora Bogdan**

**Dr. Alfredo Romero**

**Dr. Andras Kozma**

ArcelorMittal Chair of Steel Construction,  
University of Luxembourg, Luxembourg

