

Robustheit und Duktilität – Zwei Fremdwörter im Holzbau ?

Partnermeeting mit Freunden der hbf

TU Graz – 18.11.2022

Robustheit und Duktilität

(auf Tragwerke bezogen)

Robustheit

Fähigkeit eines Tragwerkes, Schädigungen oder ein Versagen auf vertretbare Ausmasse zu begrenzen

durch **Vermeiden** von Schwachstellen

sowohl konzeptioneller als auch konstruktiver Art

Robustheit und Duktilität

(auf Tragwerke bezogen)

Robustheit

Fähigkeit eines Tragwerkes, Schädigungen oder ein Versagen auf vertretbare Ausmasse zu begrenzen

durch **Vermeiden** von Schwachstellen
sowohl konzeptioneller als auch konstruktiver Art

Duktilität

Eigenschaft eines Baustoffes, Bauteils oder Tragwerkes bei Überlastungen – vor dem Versagen - stark plastisch zu verformen,

durch **Vermeiden** spröder Bereiche
die zu einem plötzlichen Gesamtversagen führen

Baustoff	Stahl	prinzipiell →	duktil
	Beton und Holz	generell →	spröde

Stahlbeton: Verbundbaustoff
Duktilität mit angepasster Stahlbewehrung

Holzbau: Beschränkung auf Verbindungsbereiche (in Stahl)
duktil konstruktive Ausbildung
Beachte: Verbindung meist Schwachstelle (in Holztragwerken)

Baustoff

Stahl

prinzipiell →

duktil

Beton und Holz

generell →

spröde

Stahlbeton:

Verbundbaustoff

Duktilität mit angepasster Stahlbewehrung

Holzbau:

Beschränkung auf Verbindungsbereiche (in Stahl)

duktil konstruktive Ausbildung

Beachte: Verbindung meist Schwachstelle (in Holztragwerken)

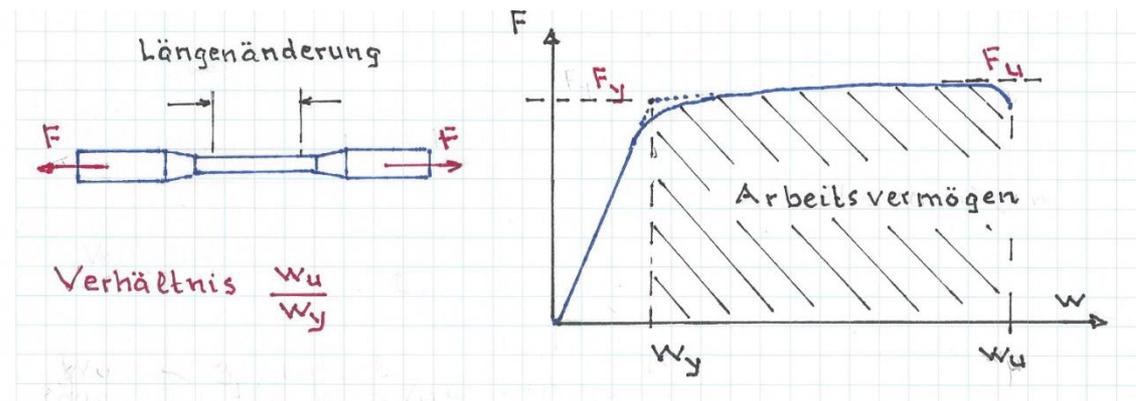
Welche konstruktive Ausbildungen sind duktil ?

Wie duktil soll eine Verbindung sein ?

+/- Konsens:

Definition

eines Duktilitätsmasses



CH-Holz-Regelwerk

- Das **erforderliche** Duktilitätsmass der Verbindung ist eine Funktion des **gewünschten** Tragverhaltens und der **gewünschten** Ausnützung plastischer Kraftumlagerungen im System festzulegen.

- **Wunschkonzert** ? Nein ! Durch Ingenieur festzulegen → Verantwortung
- Für europäische Normenschaffende: **unzulässige** Formulierung

CH-Holz-Regelwerk

- Das **erforderliche** Duktilitätsmass der Verbindung ist eine Funktion des **gewünschten** Tragverhaltens und der **gewünschten** Ausnützung plastischer Kraftumlagerungen im System festzulegen.

Immerhin **CH-Hinweis**:

falls $w_u/w_y > 3$ duktile **Verbindung** (Richtwert)



mit üblichen Toleranzen / Streuungen
in Verbindungsteilen/Bohrungen
bez. Festigkeitseigenschaften Holz / Stahl

Generell nur erreichbar:

- Scherverbindungen mit Stiften (z.B. **Stabdübel**)
- und bei Einhaltung bestimmter – festgelegter - **Spielregeln**

Stabdübel-Verbindungen: Praxis und Reglementierung

Historisches

Stiftförmige Verbindungen (z.B. Nagelung)	seit Jahrtausende bekannt
Bolzenverbindungen (mit Kopf und Mutter)	seit über 200 Jahre
Reine Stiftverbindungen (Holz-Holz), z.B. Meltzer-Stifte	um 1900

Tragvermögen: aufgrund von Prüfungen (um 1920)

Bezugsgrößen:	Druckfestigkeit //z.F. $f_{c,0}$	$f_{c,0} \sim$ Rohdichte ρ
	Stahlfestigkeit des SD	Zugfestigkeit f_u

Tragmodelle:

empirische: $F = f (f_u , \rho , d)$

Tragmodelle:

empirische: $F = f (f_u , \rho , d)$

Johansen (1949): basiert auf **ideal starr-plastischen Gleichgewichtsmodell**
umschreibt **Tragverhalten e i n e s Verbindungsmittel s** (\neq **Verbindung** !)
spröde Versagensformen **nicht erfasst**

European Yield Model → mit Übergang von Holz-Holz zu **Stahl**-Holz-Verb.

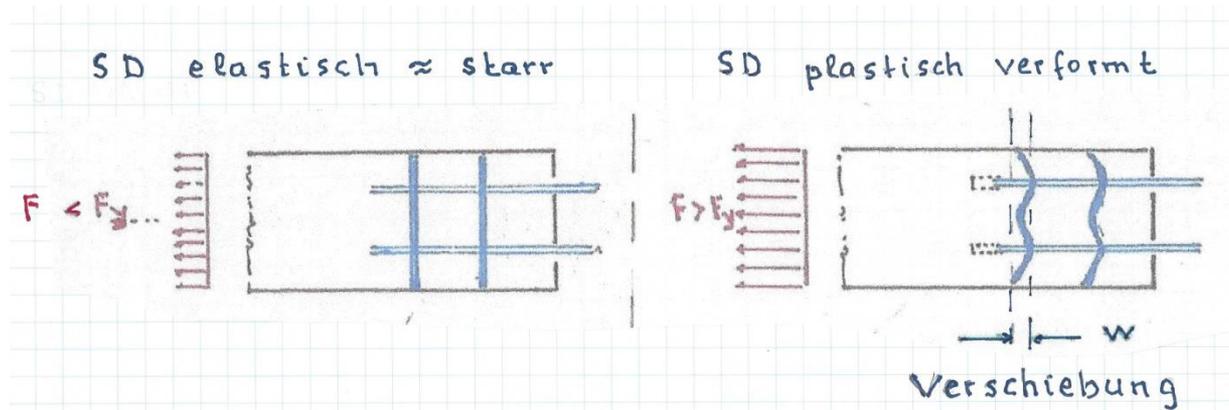
umfassende detaillierte Festlegungen in **Eurocode 5-1**

Voraussetzungen von Johansen (**ungenügend umschrieben bzw. eigentlich nicht erfüllt**)

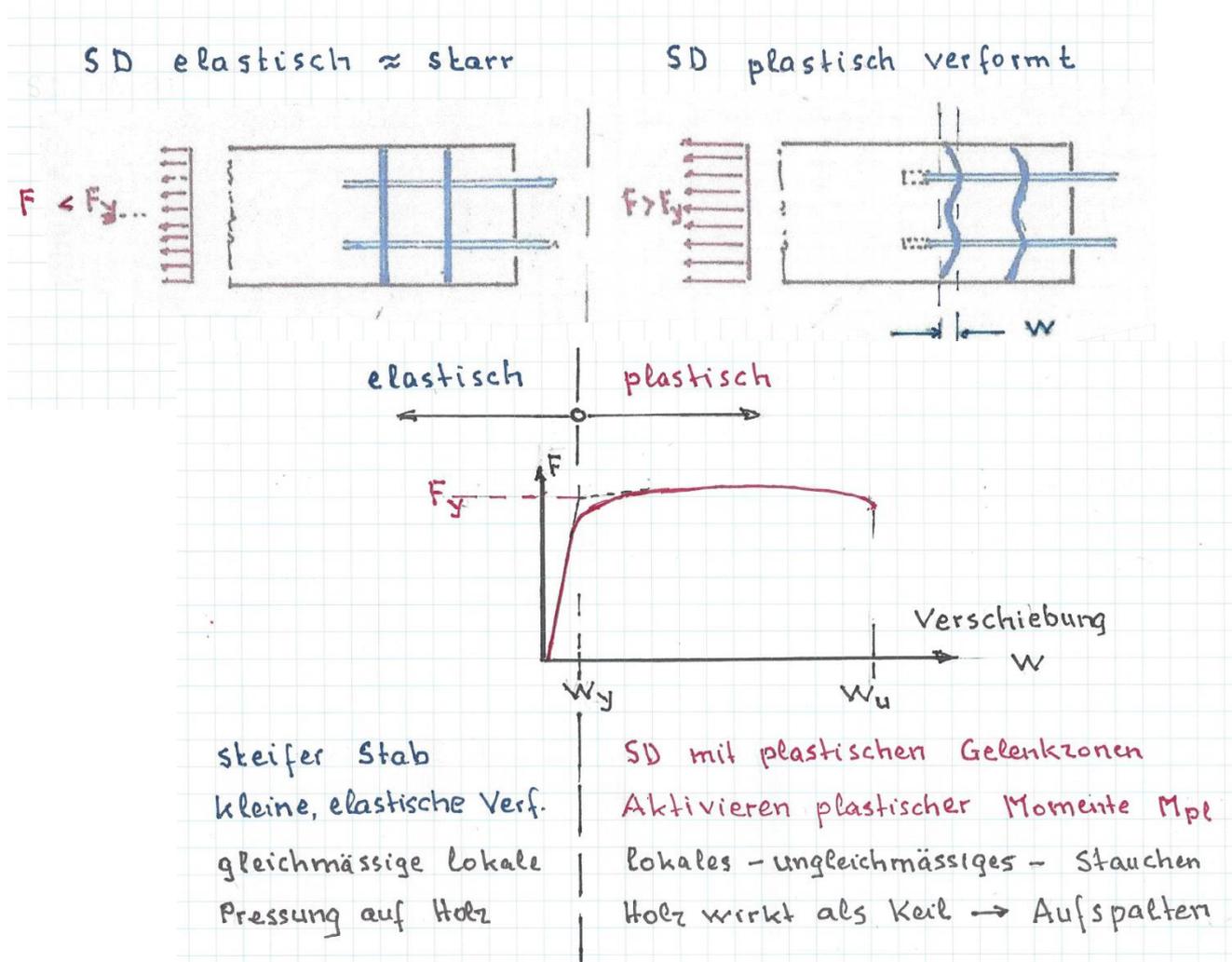
- **Stahlstab** muss sich **plastisch verbiegen können** = **Bildung von Fließgelenken**
- ein **frühzeitiges Versagen des Holzes ausschliessen** (Aufspalten/Nettobruch)

somit **plastisches Modell** nur anwendbar, falls **spröde Bruchformen** ausgeschlossen

Vorbedingung: Bildung **plastischer Gelenke** (= Johansen)
ausreichende Verschiebung w der Stossteile



Vorbedingung: Bildung **plastischer Gelenke** (= Johansen) **ausreichende Verschiebung w** der Stossteile

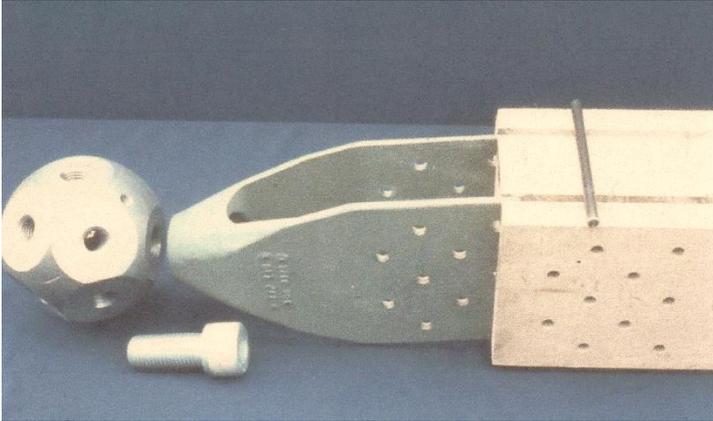


$w = ??$

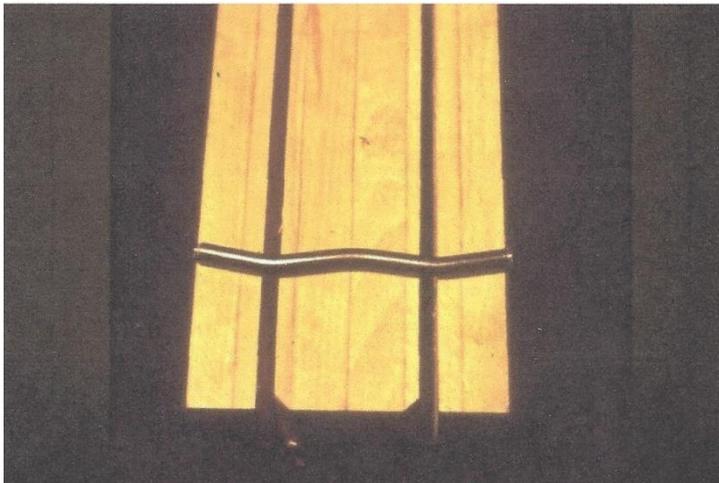
Wie gross, ist ausreichend ?

Angemessene Duktilität - Beispiele

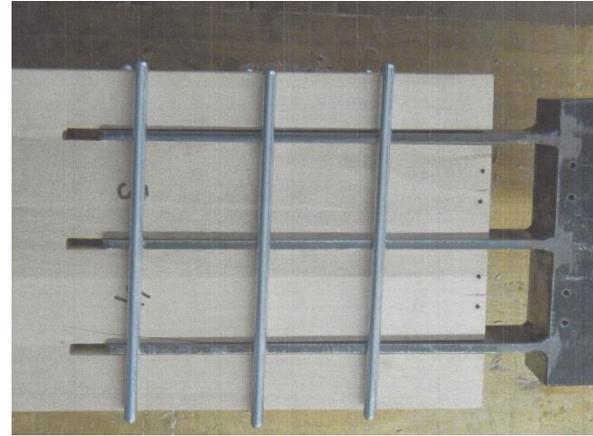
Raumfachwerk Arbon < 1990
2 Bleche SD-Anschluss - Buche



Verformter Stabdübel



Prüfkörper: 3 Bleche SD-Esche
Typische Ausbildung



Typischer Zustand verformter SD



Duktile mehrschnittige Verbindung

über ≥ 2 Bleche

- Bildung **plastischer Gelenke** im Stahlstab

direkte Erfassung über **Flie遝gelenktheorie** \rightarrow aus Gleichgewichtsbetrachtung

The diagram illustrates the formation of plastic hinges in a steel rod. On the left, a straight rod of length t_2 and diameter d is shown, labeled "SD durchlaufend $\hat{=}$ beidseitig eingespannt". An arrow points to the right, where the rod is shown under a uniformly distributed load $d \cdot f_{h,0} \rightarrow f(p, d)$. The rod exhibits a plastic hinge with length l_{pl} and is supported at a distance $e \approx d/2$ from each end. The text "Flie遝gelenk" is written in red next to the hinge.

Flie遝gelenk-Theorie \rightarrow Bildung 4 Flie遝gelenke (= Zonen)

$$\rightarrow \frac{d \cdot f_{h,0} \cdot l_{pl}^2}{8} = 2 \cdot M_{pl} \rightarrow l_{pl} = \sqrt{\frac{16 \cdot M_{pl}}{f_{h,0} \cdot d}}$$

mit $M_{pl} = 0,26 \cdot f_u \cdot d^{2,7}$ und $f_{h,0} = 0,15 \cdot d^{-0,3} \cdot p$ gemäss SIA 265:2003

$$\rightarrow \text{Grenzschlankheit } \lambda = \frac{t_2}{d} = 1 + 5,2 \cdot \sqrt{\frac{f_u}{p}} \quad \text{unschön/praktisch}$$

Duktile mehrschnittige Verbindung

über ≥ 2 Bleche

- bedingt Bildung **plastischer Gelenke** im Stahlstab
direkte Erfassung über **Fliessgelenktheorie** \rightarrow aus Gleichgewichtsbetrachtung

SD durchlaufend $\hat{=}$ beidseitig eingespannt

Belastung $d \cdot f_{h,0} \rightarrow f(p, d)$

Fließgelenk $e \approx d/2$

Fließgelenk-Theorie \rightarrow Bildung 4 Fließgelenke (= Zonen)

$$\rightarrow \frac{d \cdot f_{h,0} \cdot l_{pl}^2}{8} = 2 \cdot M_{pl} \rightarrow l_{pl} = \sqrt{\frac{16 \cdot M_{pl}}{f_{h,0} \cdot d}}$$

mit $M_{pl} = 0,26 \cdot f_u \cdot d^{2,7}$ und $f_{h,0} = 0,15 \cdot d^{-0,3} \cdot p$ gemäss SIA 265:2003

\rightarrow Grenzschlankheit $\lambda = \frac{t_2}{d} = 1 + 5,2 \cdot \sqrt{\frac{f_u}{p}}$ ~~unschön~~ / praktisch

Häufige Ausführung: handelsübliche Komponenten: Holz (GL24h) und SD-Stahl (S 355)
Schlankheit $\lambda = t/d \approx 9$

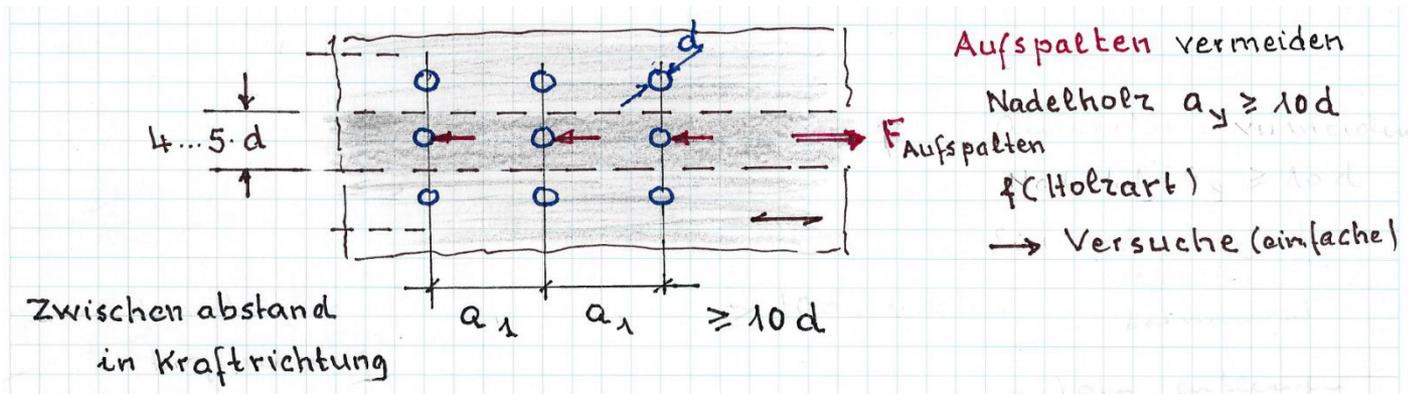
Fassung SIA 265:2003, Anhang A – Vereinfachte Berechnung (praktisch für Entwurf)

direkte Angabe $t/d = 9$ (zu unwissenschaftlich \rightarrow nicht mehr aufgeführt)
sowie $R_{design, Schnitt} = 109 \cdot d^{1,7}$ (in N für d in mm)

Duktile mehrschnittige Verbindung

über ≥ 2 Bleche

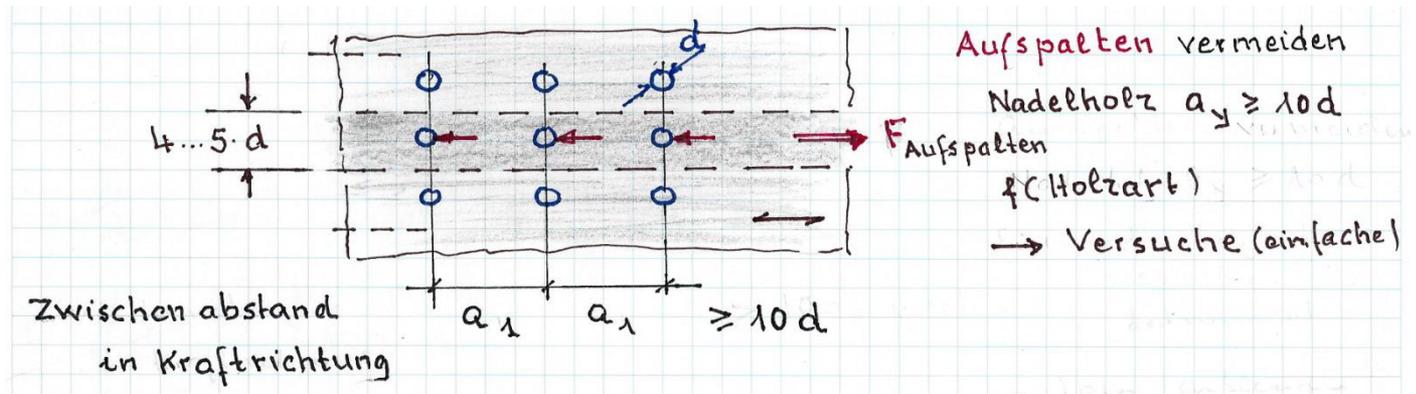
- Ausschluss von **frühzeitigem Holzversagen**
- **Aufspalten**



Duktile mehrschnittige Verbindung

über ≥ 2 Bleche

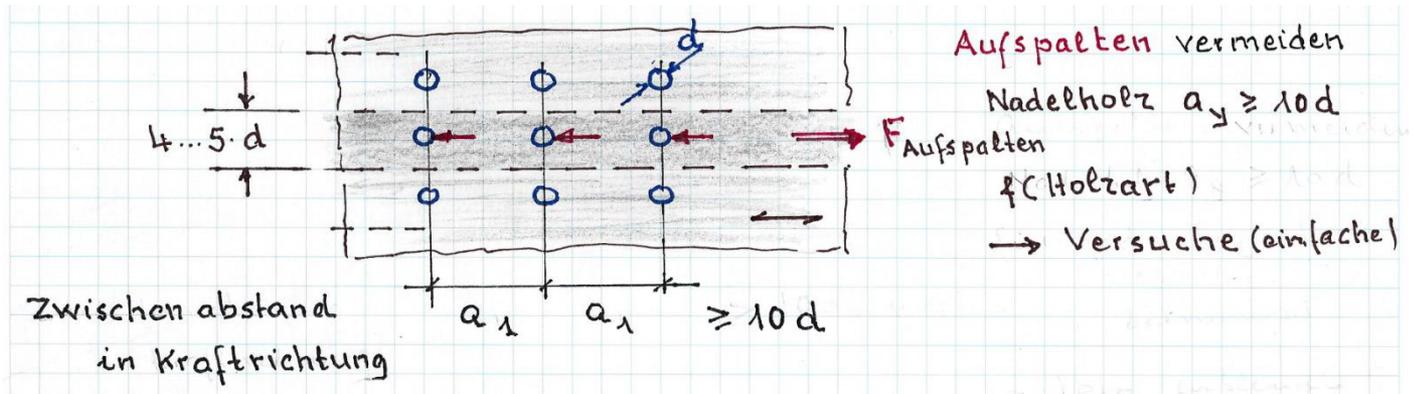
- Ausschluss von **frühzeitigem Holzversagen**
- **Aufspalten**



Duktile mehrschnittige Verbindung

über ≥ 2 Bleche

- Ausschluss von **frühzeitigem Holzversagen**
- **Aufspalten**



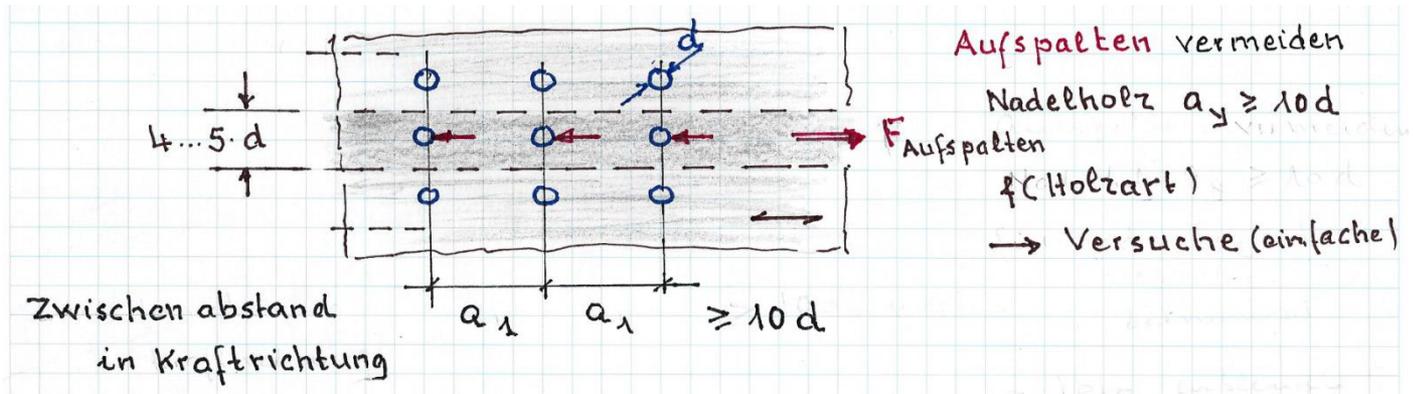
- **Nettobruch**

$$\text{Nettoquerschnitt} \leq 0,65 \cdot A_{\text{Brutto}} \Rightarrow F_{\text{Nettobruch}} = f_{t,0} \cdot A_{\text{Netto}}$$

Duktile mehrschnittige Verbindung

über ≥ 2 Bleche

- **Ausschluss von frühzeitigem Holzversagen**
- **Aufspalten**



- **Nettobruch**

$$\text{Nettoquerschnitt} \leq 0,65 \cdot A_{\text{Brutto}} \Rightarrow F_{\text{Nettobruch}} = f_{t,0} \cdot A_{\text{Netto}}$$

- **Gesamtverhalten Verbindung (Kontrolle)**

$$F_{SD} < \underbrace{F_{\text{Aufspalten}} \text{ bzw. } F_{\text{Nettobruch}}}_{\text{sprödes Versagen}}$$

duktiles

! überverdübelt = spröde ?

Erkenntnisse



Baupraxis

Hermann Blumer : Praktiker - 80er Jahre

Entwickelt **standardisierte Verbindung**: mit SD \emptyset 6,3 mm (**dünne Stifte**)
mehrschnittige Verbindung. Blechabstände 40 mm (Brettdicke)
gute Prüfergebnisse (2 Bleche): Prüfkörper 120/200 mm

Erkenntnisse



Baupraxis

Hermann Blumer : Praktiker - 80er Jahre

Entwickelt **standardisierte Verbindung**: mit $SD\varnothing 6,3$ mm (**dünne Stifte**)

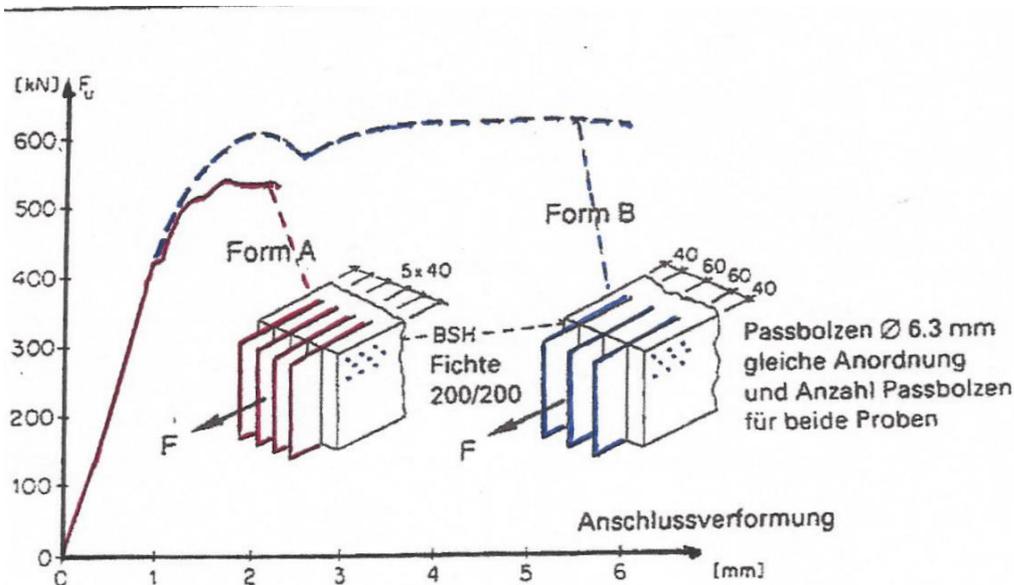
mehrschnittige Verbindung. Blechabstände 40 mm

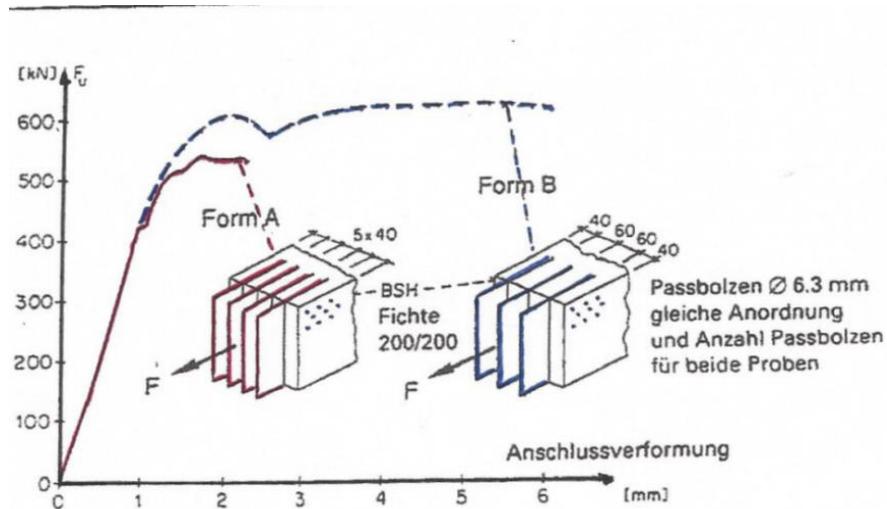
gute Prüfergebnisse (2 Bleche): Prüfkörper 120/200 mm

Lizenz für Österreich: Gutachter: Prof. Richard Pischl

Prüfung mit 4 Blechen → Ernüchterung: keine Verdoppelung und sprödes Versagen

Problem erkannt: **zu geringer Holzwiderstand**; zu schwach um plastische Gelenke zu formen





Folgerung

Vergrößerung Abstand der Bleche von 40 mm auf 60 mm

Zwischenabstand Bleche $t \geq 9d$ (Fichte/Tanne + übliche SD-Qualität)

Statt **4 Bleche** nur noch **3 Bleche** → höhere Tragkraft und duktiles Verhalten

Eurocode 5-1

keine Duktilitätsanforderung (bez. Blechabstand)

Festlegung von Mindestwerten (Mindestabstände) → nicht «optimal»

verleitet zur spröder Ausbildung (da genau berechenbar!)

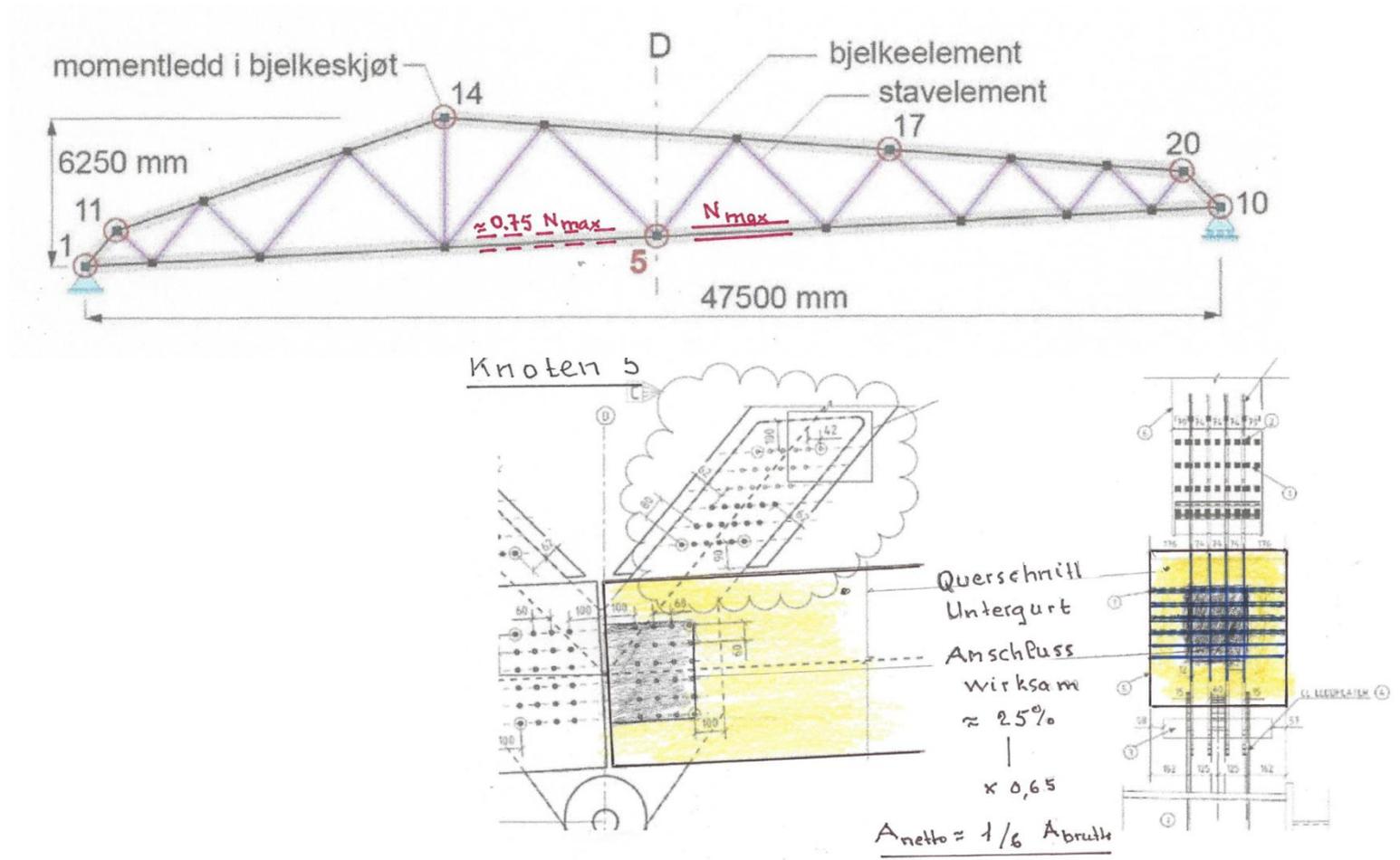
Fallbeispiele: mangelnde Robustheit (Duktilität)

- Fehlerhafte konstruktive Auslegung

sprödes Versagen: Beispiel: Perkolo-Brücke (2016) Norwegen

erfasster Querschnitt im Stossbereich $\approx 25\%$

keine Möglichkeit Bildung «Flie遝gelenke»



Fallbeispiele: mangelnde Robustheit (Duktilität)

- Fehlerhafte konstruktive Auslegung
sprödes Versagen: Beispiel: Perkolo-Brücke (2016) Norwegen
keine Möglichkeit Bildung «Fließgelenke»

Anschluss Diagonale



Stabdübel $d = 12 \text{ mm}$

hochfester Stahl $900 \text{ Mpa} !$

Holzdicke (zwischen Bleche) = 60 mm

$$t / d = 60 / 12 = 5 !$$

sollte mindestens **10** betragen

→ Stabdübel unverformt !

Fallbeispiele: mangelnde Robustheit (Duktilität)

- Fehlerhafte konstruktive Auslegung (Perkolo-Brücke)



Einsturz-Begründung:

Fehler in der Erfassung der Kräfte im Stoss Zuggurt (Differenzkraft $\approx 0,25 \cdot N_{max}$)

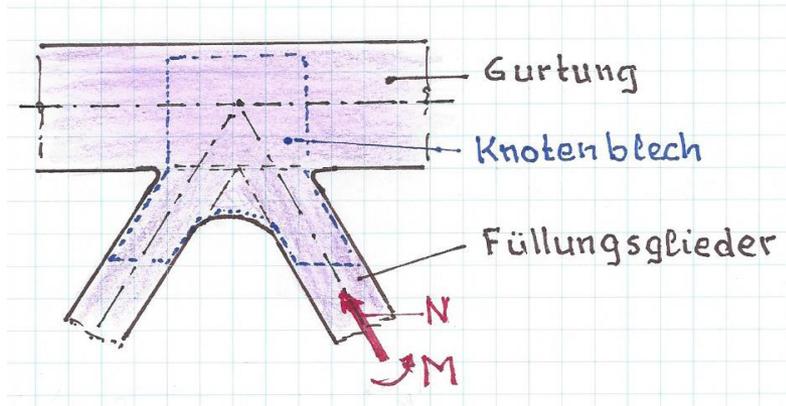
Persönliche Meinung:

- Gurtquerschnitt ist «voll» zu stossen – **Stoss bei N_{max} vermeiden**
- **Verbindung ist duktil auszubilden**

Fachwerkträger

Rahmentragwerk

Knoten: Füllungsglieder + / - biegesteif



SD-Verbindung : eingeschlitzte Bleche
bedeutende Steifigkeit im Stabanschluss

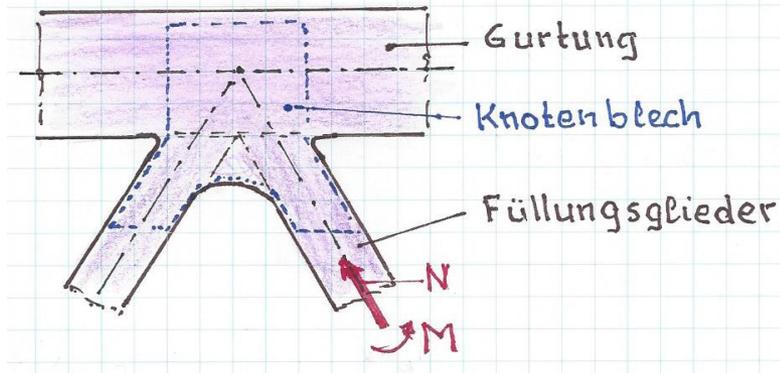


Anschlussmomente M

Fachwerkträger

Rahmentragwerk

Knoten: Füllungsglieder + / - biegesteif



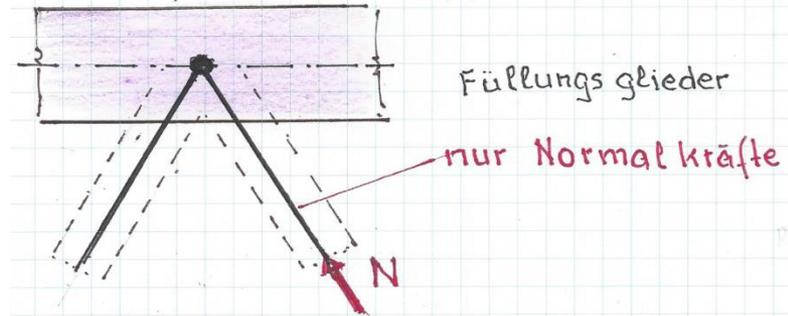
SD-Verbindung : eingeschlitzte Bleche
bedeutende Steifigkeit im Stabanschluss



Anschlussmomente M

Vereinfachte Berechnung

Gelenkige, unverschiebliche Knoten



Bedingungen (z.B. SIA 265):

Gurtungen durchlaufend

Allfällige Stöße biegesteif

Nachweis Gurtungen

auf 2/3 reduzierte Bemessungswerte

Nachweis Stabanschlüsse

auf 3/4 reduzierte Tragwiderstände

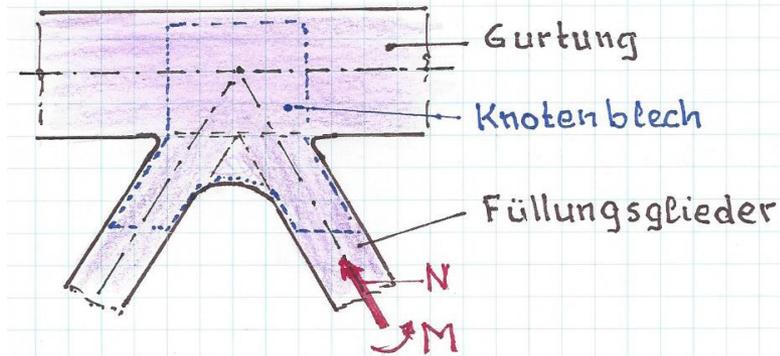
Verformungen

$\leq 2/3$ zulässige Werte

Fachwerkträger

Rahmentragwerk

Knoten: Füllungsglieder + / - biegesteif



SD-Verbindung : eingeschlitzte Bleche
bedeutende Steifigkeit im Stabanschluss

↓
Anschlussmomente M

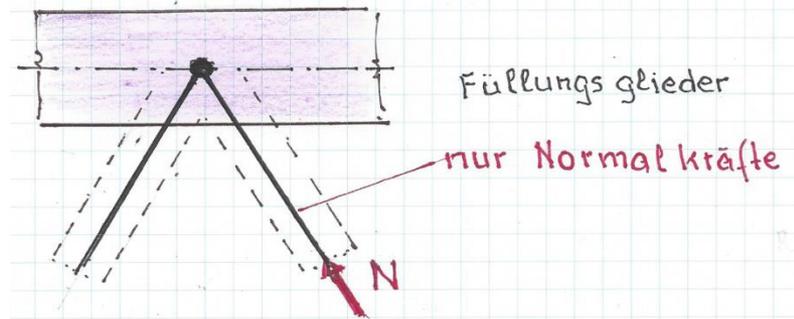
↓
Zwangsmomente

Duktilität bedeutsam

Abbau Momente vor dem Versagen

Vereinfachte Berechnung

Gelenkige, unverschiebliche Knoten



Bedingungen (z.B. SIA 265):

Gurtungen durchlaufend

Allfällige Stöße biegesteif

Nachweis Gurtungen

auf 2/3 reduzierte Bemessungswerte

Nachweis Stabanschlüsse

auf 3/4 reduzierte Tragwiderstände

Verformungen

≤ 2/3 zulässige Werte

Fallbeispiele: mangelnde Robustheit (Duktilität)

- Mängel **konzeptioneller** und **konstruktiver Art**

keine Möglichkeit Bildung alternativer Lastpfade («fragile» Lagerung)

Gurtstöße und Strebenanschlüsse «spröde» ausgebildet - Tretten-Brücke (2022)

SD-Verbindungen analog Perkolo (gleiches Ing.büro)



Grundprinzip: bei Stossausbildung

Alle Bauweisen

Ausbildung Tretten-Brücke

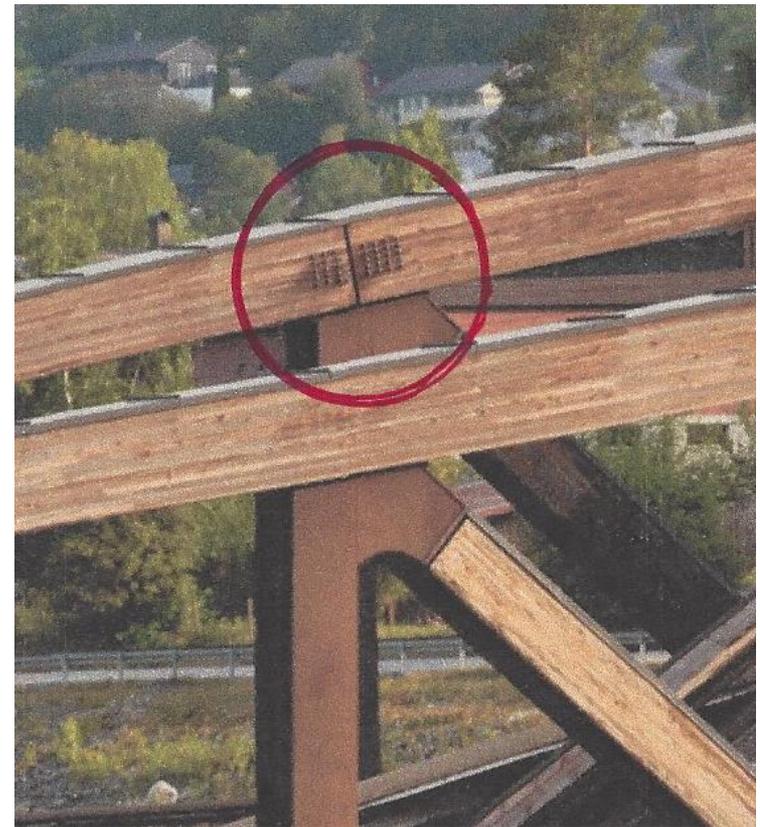
Brückenbau: Flächenstösse

Vorhandener Querschnitt voll gedeckt bzw. angeschlossen

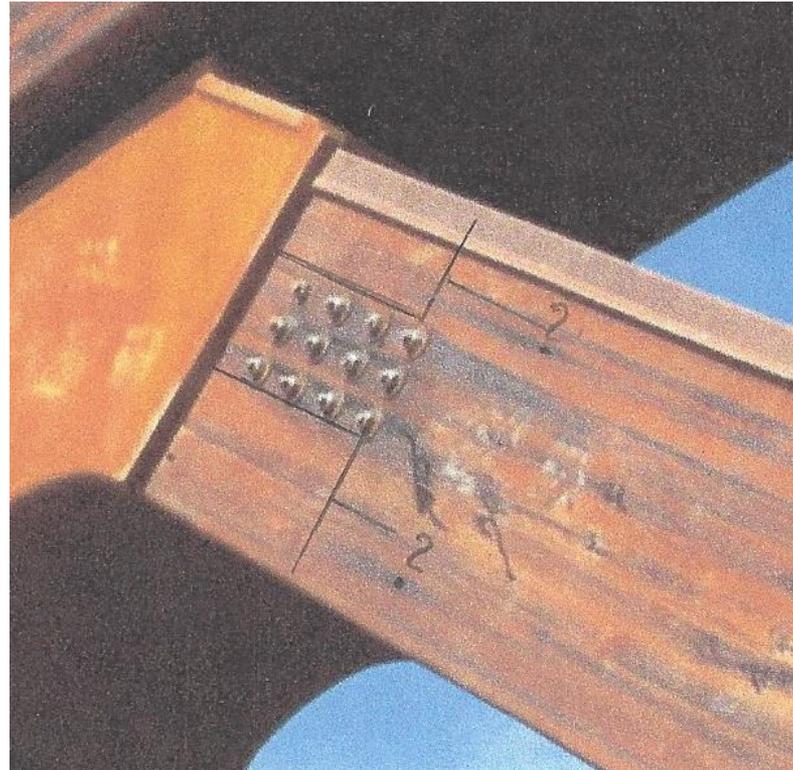
Hochbau: Kraftstösse

Jedoch mindestens Hälfte des Querschnittes gedeckt

F. Stüssi / P. Dubas (1971)



Mängel konzeptioneller und konstruktiver Art

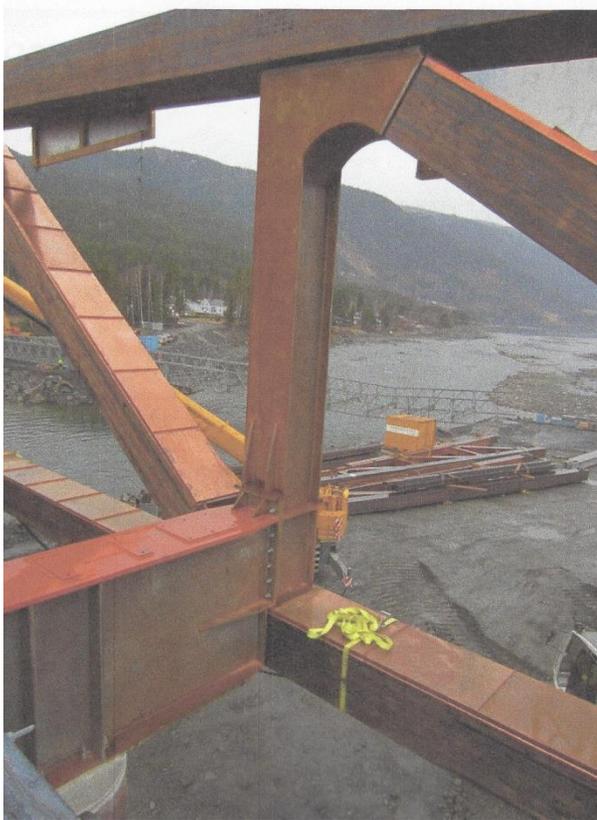


generell Verbindungsbereiche spröde ausgebildet; keine Umlagerungen möglich

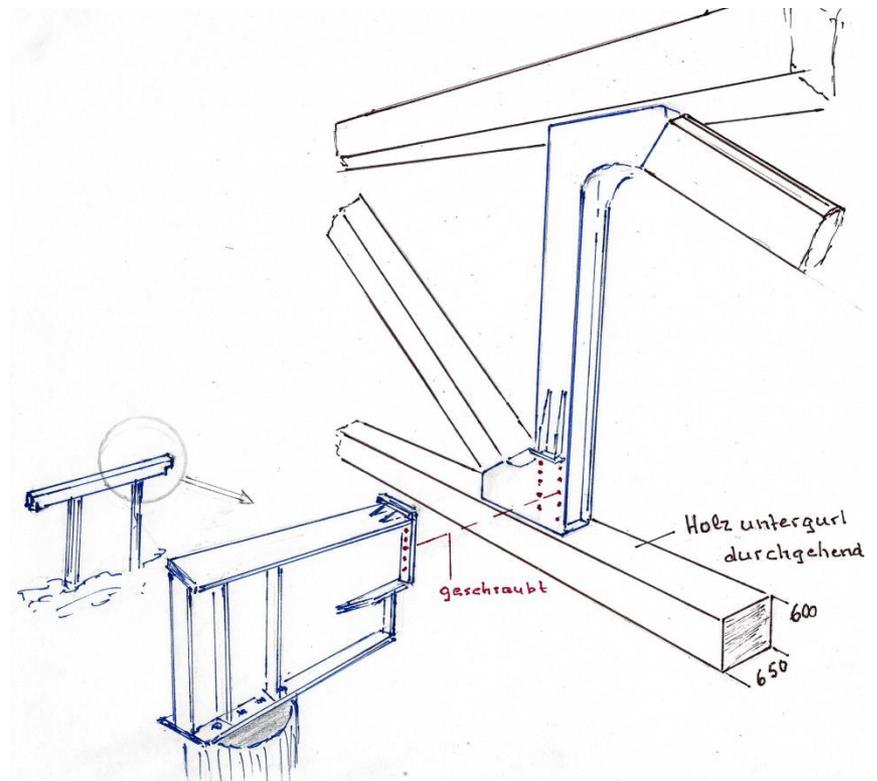
«Delikate» Lagerung mit mangelnder Robustheit

Berechnung «gelenkig» - Ausführung biegesteif

Lagerung beim Stahlpfeiler



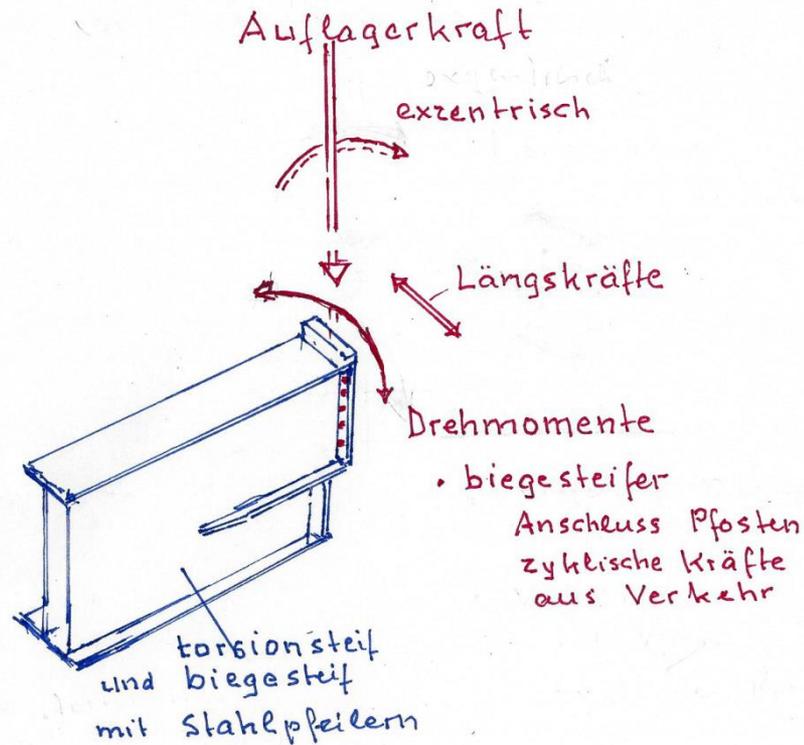
Seitliches Anflanschen



Versagen des Anschlusses

vermutlich inf. Ermüdung Schrauben

Kräftespiel beim Anschluss





Fallbeispiele: mangelnde Robustheit (Duktilität)

- Mängel **konzeptioneller** und **konstruktiver Art**



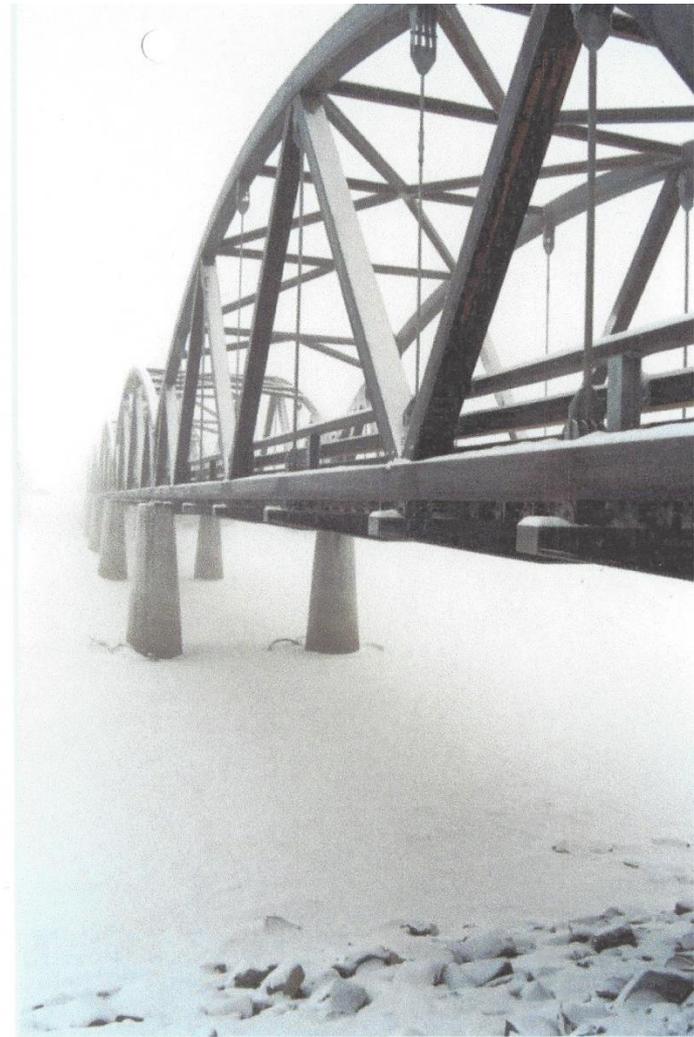
Einsturz-Begründung: Tretten Brücke (2012 – 2022)

Zurzeit Kommission damit beschäftigt Ursache(n) zu finden

Keywords in the Design of Norwegian Timber Bridges: **Vision / Realität**

Keywords in the Design of Norwegian Timber Bridges:

- **Simplicity**
- **Robustness**
- **Durability**
- **Aesthetics**



What is important to remind ?

- Use multiple steel plates single only for secondary work

- **Ductility requirement** $t = \lambda \cdot d$ softwood $\lambda_{2,design} = 9$
↓
function of $\sqrt{f_u/\rho}$

- **Splitting requirement** $a_1 \geq a_y$ softwood $a_y \approx 10 \cdot d$

- **Strength** function of $\sqrt{f_u \cdot \rho}$ and $d^{1,7}$

simplification $R_{design/shearplane} = X \cdot d^{1,7}$

- **Verification** ductile capacity joint < capacity reduced timber section

Möglichkeiten zur **Vermeidung von Schwachstellen**

- **Grenze bei SD-Verbindungen** (bei üblicher Ausbildung)
maximale Leistung bzw. **Wirkungsgrad durch Nettobruch gegeben**
infolge Schlitze und Bohrungen: **Nettoquerschnitt max. 0,65 · Bruttofläche**

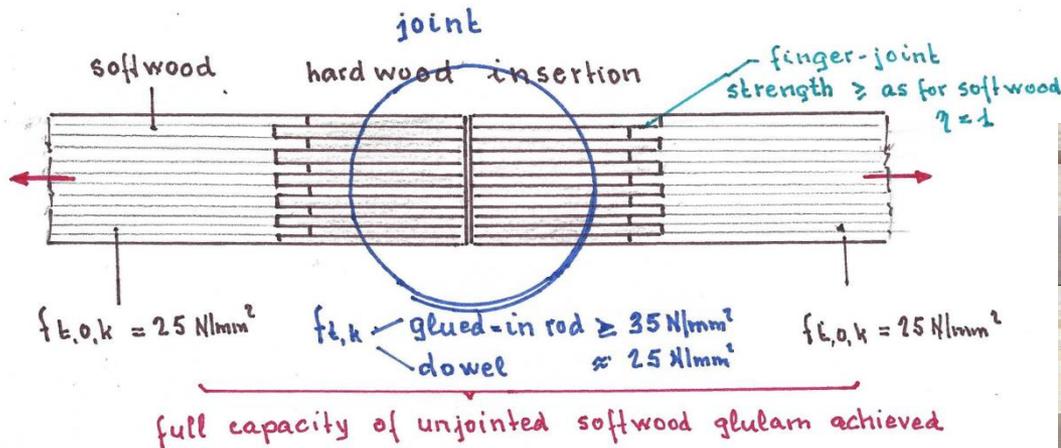
Somit selbst – **bei Vollstoss** – Leistung nur rund 2/3 der angeschlossenen Teile

Möglichkeiten zur **Vermeidung von Schwachstellen**

- **Grenze bei SD-Verbindungen** (bei üblicher Ausbildung)
maximale Leistung bzw. **Wirkungsgrad durch Nettobruch gegeben**
infolge Schlitze und Bohrungen: **Nettoquerschnitt max. 0,65 · Bruttofläche**

Somit selbst – **bei Vollstoss** – Leistung nur rund 2/3 der angeschlossenen Teile

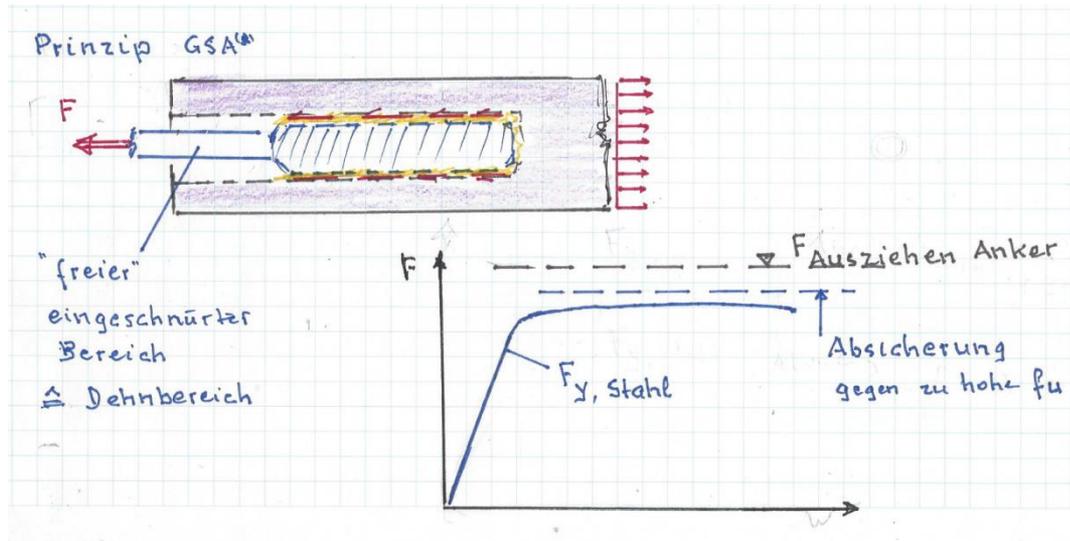
- **Örtliche Verstärkungen**
Holzarten höherer Leistung (Laubhölzer) im Verbindungsbereich



- **Geringere Querschnittsminderungen**

durch Übergang zu eingeklebten Gewindestangen

Duktilität durch Stahleigenschaften **steuerbar**



hoch duktile Anschlüsse, hohe Leistung, keine Schädigung Holzbereiche

-bei Ausnützung plastischer Kraftumlagerung Wirkungsgrad $\eta = 1$ erreichbar!

bei Fachwerken Annahme gelenkiger Strebenanschlüsse zulässig

Robustheit anstreben

bez. Tragwerke

Geeignetes , angepasstes Tragkonzept wählen

→ Ingenieure

- einfache , klare Strukturen
- direkte Lastabtragungen
- alternative Lastpfade ermöglichen
- **duktiler Auslegung** – erlaubt Kraftumlagerungen

unabhängig
Bauweise

Robustheit anstreben bez. Tragwerke

Geeignetes , angepasstes Tragkonzept wählen

→ Ingenieure

- einfache , klare Strukturen
- direkte Lastabtragungen
- alternative Lastpfade ermöglichen
- **duktiler Auslegung** – erlaubt Kraftumlagerungen

unabhängig
Bauweise

Duktilität im Verbindungsbereich im Holzbau

Leistung (SD-Verbindung) auf max. 2/3 der Verbindungsteile begrenzt !

- erfassen des ganzen Querschnittes (über mehrere Bleche)
- **Ausbildung SD mit ausreichender Schlankheit λ**

ein muss: $\lambda > \lambda_y \rightarrow$ **Bildung plastischer Gelenke**

- Aufspalten verhindern: Zwischenabstand $a_1 > a_y$
- Kontrolle: (duktiler) Tragvermögen Verbindung $< F_{netto}$

Ziel: hohe Leistung + duktiles Verhalten

durch einfache Vorgaben möglich
für Ingenieur verständlich
Fehleranfälligkeit vermindern

Statussymbol - [EC-Regeln]

Weshalb kompliziert – wenn einfacher möglich ?
Zu wenig akademisch, zu wenig wissenschaftlich?