

1. Schritt:

Stockwerk (o), $K_{S,o} = 0$

$$c_o = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 25/6}{2 \cdot 12/4}} = 0,265$$

$$c_u = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 25/6}{2 \cdot 12/4 + 2 \cdot 12/4}} = 0,419$$

Diagr.: $\Rightarrow \beta_{(o)} = 1,33$

$$\eta_{K_{i,(o)}} = \left(\frac{\pi}{1,33 \cdot 4} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot 12}{4 \cdot 0,14} = 29,89$$

Stockwerk (u)

$$c_o = c_{u,(o)} = 0,419$$

$$c_u = 0$$

Diagr.: $\Rightarrow \beta_{(u)} = 1,22$

$$\eta_{K_{i,(u)}} = \left(\frac{\pi}{1,22 \cdot 4} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot 12}{4 \cdot 0,14} = 17,76$$

Das obere Stockwerk ist wegen der geringeren Normalkraft wesentlich weniger knickgefährdet als das untere. Die Steifigkeit des mittleren Riegels wird daher geteilt und anteilmäßig den beiden Stockwerken zugewiesen. Die Aufteilung wird geschätzt und solange variiert, bis die beiden Verzweigungslastfaktoren ungefähr gleich sind. Im vorliegenden Beispiel ist die Rechnung ausreichend genau bei der in (6.21b) vorgenommenen Verteilung:

2. Schritt:

Stockwerk (o)

 $c_o =$ wie im 1. Schritt

$$c_u = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 0,175 \cdot 25/6}{2 \cdot 12/4}} = 0,673$$

Diagr.: $\Rightarrow \beta_{(u)} = 1,60$

$$\eta_{K_{i,(o)}} = \left(\frac{\pi}{1,60 \cdot 4} \right)^2 \cdot \frac{12}{0,14} = 20,65$$

Stockwerk (u)

$$c_o = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 0,825 \cdot 25/6}{2 \cdot 12/4}} = 0,304$$

$$c_u = 0$$

Diagr.: $\Rightarrow \beta_{(u)} = 1,135$

$$\eta_{K_{i,(u)}} = \left(\frac{\pi}{1,135 \cdot 4} \right)^2 \cdot \frac{12}{2 \cdot 0,14} = 20,52$$

Der Knicklängenbeiwert des oberen Stockwerkes wird über Gl. (6.24b) nicht mehr korrigiert. Die Knicklängen der Einzelstiele werden aus den $\beta_{(o,u)}$ Werten wie folgt bestimmt:

$$s_{K,(o)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,14 \cdot 12}{0,084 \cdot 2 \cdot 12}} \cdot 1,60 \cdot h = 2,07 \cdot h$$

$$s_{K,(u)} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,14 \cdot 12}{2 \cdot 0,084 \cdot 2 \cdot 12}} \cdot 1,135 \cdot h = 1,46 \cdot h$$

(Fehler gegenüber einer EDV-Berechnung: $s_{K,(o)} = 2,03 \cdot h \triangleq 2\%$.)

Die geometrische Deutung der Knicklängen geht aus Bild 6.21c hervor.

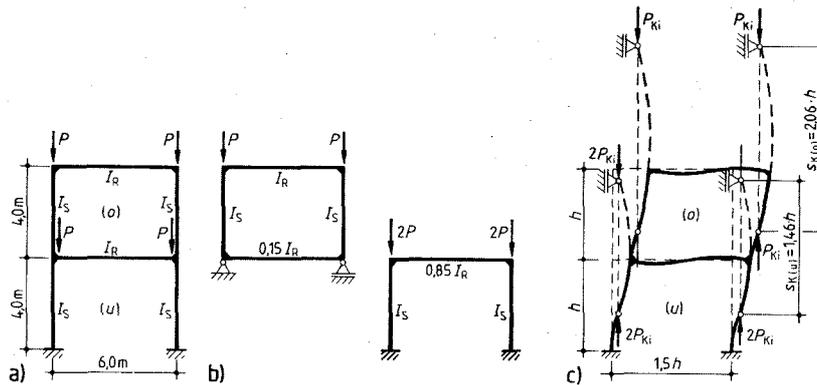


Bild 6.21 Knicklängenberechnung nach [14] durch Verteilung der Riegelsteifigkeiten a) System b) Steifigkeitsverteilung c) geometrische Deutung der Knicklänge

6.3 Rahmenecken

In Rahmenecken (-knoten) werden die horizontal (geneigt) angeordneten *Rahmenriegel* mit den vertikal (geneigt) stehenden *Rahmenstielen biegefest* zusammengesetzt. Damit die in der statischen Berechnung als *starr* unterstellte Knotenverbindung tatsächlich auch gewährleistet ist, sind i.d.R. besondere konstruktive Maßnahmen erforderlich. Diese ergeben sich aber auch aus der zwangsläufigen Schnittkraftumlenkung vom Riegel (N, M, V)_R auf den Stiel (N, M, V)_S. Sie findet auf einem begrenzten Stabwerksbereich (Knoten) statt und erzeugt daher einen nicht nur sehr hohen, sondern gleichzeitig auch komplizierten Beanspruchungszustand im Rahmeneck. Dies macht i. Allg. *Versteifungen* erforderlich in Form von *Rippen* zur Ein- und Fortleitung der Flanschkräfte oder *Vouten* zur Vergrößerung des Kraftumlenkungsbereiches. Sie sind *lohnintensiv*, sodass es nicht an Versuchen fehlt, sogenannte *steifenlose Rahmenecken* auszuführen.

Eine zu starke Ausdünnung dieser hochbeanspruchten Tragwerkspunkte hält der Verfasser nicht unbedingt für sinnvoll aus folgenden Gründen:

- Die Stabilität des Gesamttragwerkes hängt im hohen Maße von der Steifigkeit der Knotenpunkte ab.
- Alle Nachweise für Rahmenecken basieren auf mechanischen Rechenmodellen, die mit den praktischen Ausführungen nur bedingt übereinstimmen. Konstruktive Reserven sind bei zu schwacher Ausbildung nicht vorhanden.
- Unversteifte Rahmenecken müssen in der statischen Berechnung als nachgiebige Knotenverbindungen (drehelastisch-drehplastische Federn) berücksichtigt werden. Die Rahmensteifigkeit nimmt u.U. deutlich ab, der Berechnungsaufwand jedoch beträchtlich zu.
- Infolge der abgeminderten Biegesteifigkeit im Rahmeneck nehmen die Feldschnittgrößen (des Riegels) entsprechend zu.
- Aus vorhergenannten Gründen sind die Riegel und fallweise auch die Stiele kräftiger auszubilden und kompensieren durch höheren Materialeinsatz Einsparungen an Lohnkosten in den Knotenpunkten.

Aus den genannten Gründen werden daher die *ausgesteiften* Rahmenecken vorab und ausführlicher behandelt.

6.3.1 Grundformen ausgesteifter Rahmenecken

6.3.1.1 Geschweißte Rahmenecken

In Bild 6.22 sind einige typische Konstruktionsprinzipien von geschweißten Rahmenecken dargestellt. Sie werden in der Werkstatt (in Ausnahmefällen auf der Baustelle/Einbauort) hergestellt. Die dann fallweise erforderlichen Schraubstöße (z.B. aus Transport- oder Montagegründen) liegen im Rahmenriegel oder -stiel. Die unterschiedlichen Ausführungsformen sollen nur in ihren wichtigsten Merkmalen beschrieben werden.

In Ausführung a) und b) sind die Verbindungen der Riegel mit den Stielen *ohne Voute* dargestellt. Das Eckblech wird u.U. dicker ausgeführt (a) oder das Rahmeneck durch eine *Schrägsteife* verstärkt. Beide Ausführungen sind nur bei mäßigen Schnittgrößen möglich. Eine Stegblechverstärkung sollte stets bis an die Flansche des zu verstärkenden Stabes geführt werden (Detail „A“), da die hohen Schubkräfte im Eckblech über die Flansche (und Aussteifungsrippen) eingeleitet werden. Die hier zugelegten Stegblechen werden der Ausrundung angepasst und müssen am Flansch angeschweißt werden. Die Beilagen müssen dick genug sein, um die Schweißnaht aus dem Bereich evtl. Seigerungszone in der Ausrundung herauszuhalten; als statisch wirksame Dicke der Beilagen darf jedoch nur die Dicke der Anschlusschweißnähte angesetzt werden.

Bei Schrägsteifen werden Anhäufungen von Schweißnähten vermieden, wenn im Kreuzungspunkt der Flansche und Rippen ein Rund- oder Vierkantstahl eingeschweißt wird. Eine solche schweißgerechte Ausführung ist indes teuer. Im Teilbild c), d) sind Verbindungen oberer Rahmenriegel mit den Stützen schematisch dargestellt. Im Fall c) läuft der Rahmenriegel über die Stütze, im häufigeren Fall d) dagegen die Stütze durch. In den *Knickpunkten* der Flansche sind Rippen angeordnet, die eine (übermäßige) Verbiegung der Flansche infolge der Kraftresultierenden aus den Flanschkräften (s. e) verhindern. Wie auch in den Bildern e), f) und g) (sowie i) und j)) ist der Rahmenriegel (Stiel) *voutenförmig* von der Höhe h'_R (= Flanschabstand des ursprünglichen Riegelquerschnittes) auf die künstliche Höhe h'_V aufgezogen, um den Hebelarm der inneren (Flansch-) Kräfte aus dem Riegelmoment zu vergrößern. Dadurch reduzieren sich die Schubspannungen im Eckblech und die Flanschanschlussgrößen zur Dimensionierung der erforderlichen Schweißnähte (bzw. Schrauben bei geschraubtem Riegelanschluss). Bei g) und h) sind beidseitige Vouten (im Riegel bzw. Stiel) angeordnet. Teilbild i) und j) stellt Rahmenecken mit „langen Vouten“ dar, die im Hallenbau üblich sind. Soll die lange Voute nicht nur örtlich (im Rahmeneck) wirksam werden, sondern auch in die Steifigkeitsverhältnisse der Rahmenberechnung eingehen, so wählt man ihre Länge $h'_V \approx (1/12 \text{ bis } 1/8) \cdot l$ und ihre Höhe $h'_V \approx (1,5 \text{ bis } 2,0) \cdot h'_R$, l = Hallenstützweite, h'_R = Riegelhöhe, s. Bild 6.22i. Der Voutenbereich wird dann als gesonderter Stab mittlerer Voutensteifigkeit rechnerisch erfasst; dadurch verringern sich die Verformungen und die Riegelfeldmomente.

Zur Vermeidung von Eckverstärkungen werden auch Stöße über *Gehrungsschnitte* (k, l) mit oder ohne Zwischenblech bei geringer Beanspruchung ausgeführt. Diese Verbindungsart ist auch geeignet bei Hohlprofilen m), n), Ausführungsregeln hierzu s. [39], [44]. Auf weitere Einzelheiten der unterschiedlichen Ausführungsformen soll nicht detaillierter eingegangen, sondern die Problematik aller konstruktiven Lösungen durch wenige Grundregeln festgehalten werden:

- 1) Geschweißte Rahmenecken weisen örtlich und fallweise eine Anhäufung von Schweißnähten auf, die zu räumlichen Spannungszuständen mit der Gefahr einer *Versprödung* neigen. Eine sorgfältige Auswahl der Werkstoffgüten [36] und Schweißfolgepläne (eine Aufgabe des Schweißfachingenieurs (SFI)) ist unbedingt erforderlich.

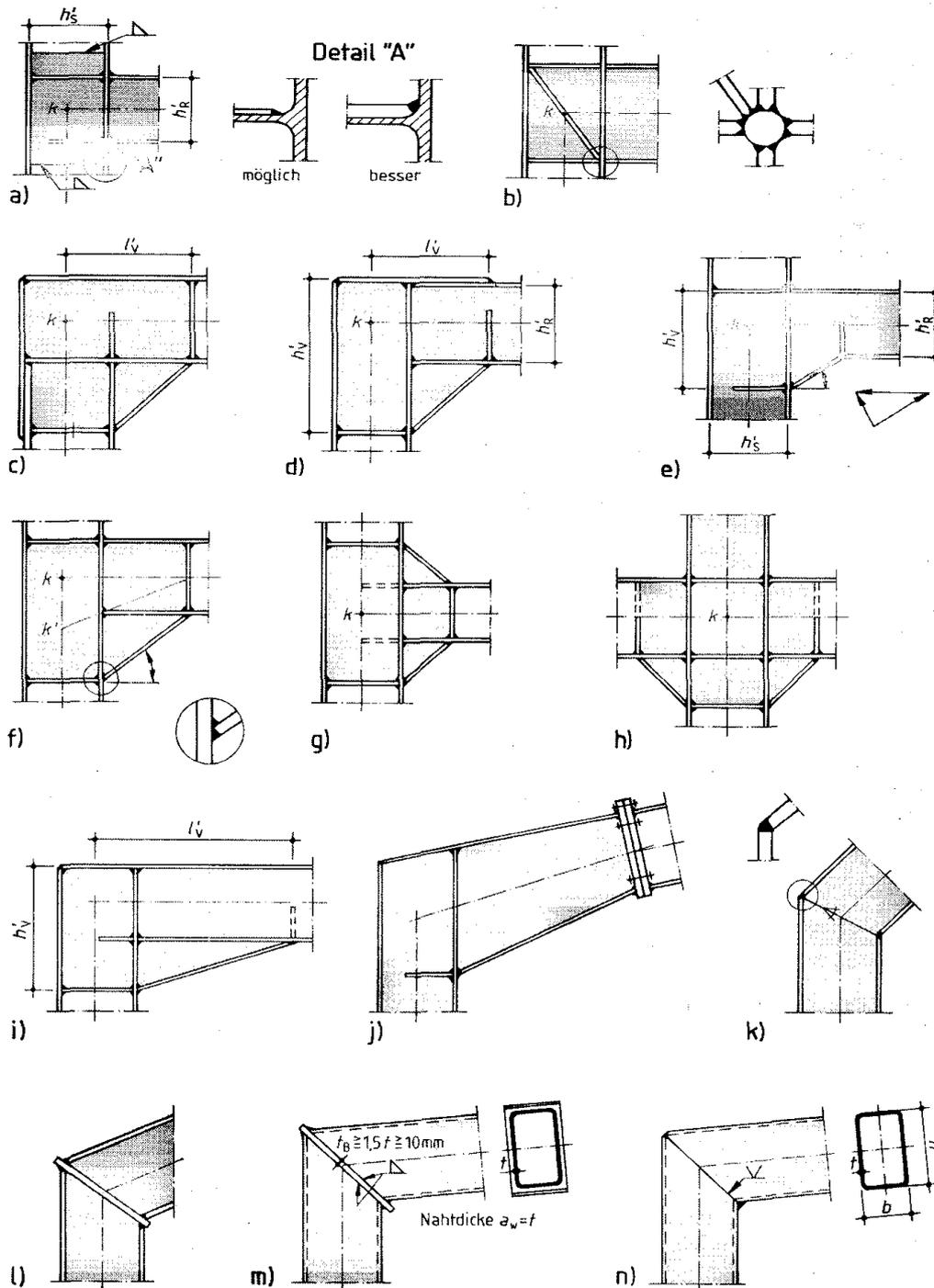


Bild 6.22 Geschweißte Rahmenecken
 a) ohne Eckverstärkung
 b) mit Schrägsteife
 c) bis f) mit einseitiger Voute
 g) bis h) mit beidseitiger Voute
 i) bis j) mit langer Voute im Hallenbau
 k) bis l) mit Gehrungsschnitt
 m) bis n) mit Gehrungsschnitt bei Hohlprofilen

- 2) Je nach Ausbildungsform werden Bleche (Flansche) durch direkte Verbindungen über Kehln-, K- oder Stumpfnahte kraftschlüssig angeschlossen und verursachen hohe Beanspruchungen in Dickenrichtung der Teile, an die angeschlossen werden soll. Für diese besteht dann eine *Rissegefahr* infolge *Doppelungen* oder eines *Terrassenbruches*. Über eine Güteprüfung der Werkstoffe (Druschallen, Strahlen) und entsprechende Auswahl der Schweißnähte kann dieser Gefahr vorgebeugt werden.
- 3) Die Schweißtechnik verursacht zwangsläufig infolge der Wärmeeinbringung und des unterschiedlichen Abkühlungsverhaltens innerhalb der Schweißkonstruktion geometrische Verformungen, die z.B. bei durchlaufenden Stielen im Anschlusspunkt der Riegel zu deutlichen Knicken führen können.

Bei Beachtung dieser Gesichtspunkte lassen sich ausreichend tragfähige Detaillösungen finden. Die hier aufgeführten Grundsätze gelten natürlich auch für Rahmenecken, die im Kreuzungspunkt der Stäbe verschraubt werden, aber vergleichbare Anschlussdetails aufweisen.

In den Berechnungs- und Ausführungsbeispielen wird auf weitere Besonderheiten fallweise hingewiesen.

6.3.1.2 Geschraubte Rahmenecken

Die üblichen Konstruktionsformen sind natürlich den geschweißten Rahmenecken sehr ähnlich; aus diesem Grund sind in Bild 6.23 nur einige Fälle aufgeführt:

In Teilbild a), b) ist die *übergreifende Zuglasche* am Stiel (Riegel) angeschweißt und mit dem Riegel (Stiel) verschraubt. Die Querkraftübertragung erfolgt im Fall a) über eine am Riegel angeschweißte und mit dem Stiel verschraubte Stirnplatte. Die vertikalen Schrauben sollten wegen der unterschiedlichen Steifigkeit der Zuglasche und des auf Biegung beanspruchten Stirnbleches zur Biegemomentenübertragung nicht herangezogen werden. Im Bild c) erfolgt der Riegelanschluss über eine *typisierte, überstehende Stirnplatte* [45], die jetzt wesentlich steifer als im Fall a) auszubilden ist. Als Schrauben kommen hier nur *vorgespannte, hochfeste Schrauben* in Frage. Bei Verwendung *roher Schrauben* benötigt man wesentlich mehr Verbindungsmittel und muss den Riegel dadurch mit einer *Voute* versehen, e). Bei wechselnden Momenten sind fallweise *Doppelvouten*, Teilbild d) erforderlich. Verschraubte *Gehrungsstöße* werden wiederum mit *biegesteifen Stirnplatten* ausgeführt. Für Zweigelenkrahmen aus IPE-Profilen kann man sich sowohl statisch als auch konstruktiv an [35 d] halten.

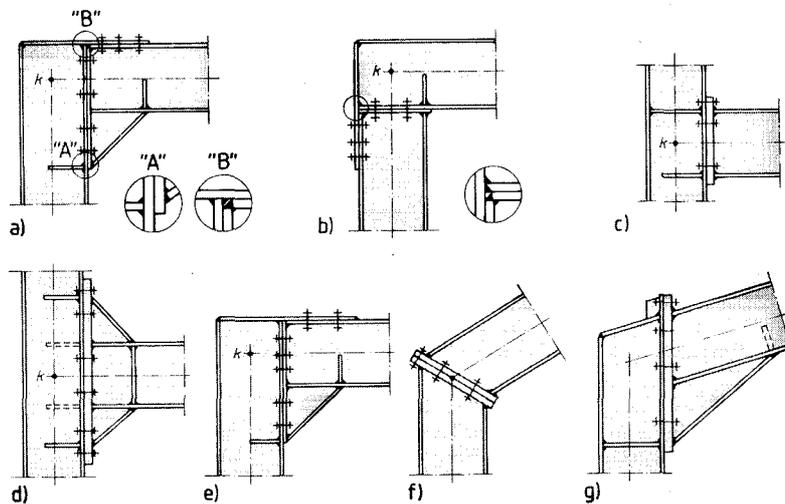


Bild 6.23
Geschraubte Rahmenecken

6.3.1.3 Rahmenecken mit Gurtausrundungen

Voll geschweißte Rahmenecken mit Gurtausrundungen (Bild 6.24) wurden früher (bei geringeren Lohnkosten) häufig aus optischen Gründen ausgeführt. Durch die kontinuierliche Kraftumlenkung der Flanschkräfte entstehen in ihnen radial gerichtete Umlenkkräfte, die die Flansche auf Querbiegung beanspruchen. Am Innengurt sind diesen Gründen – insbesondere bei kleineren Krümmungsradien – relativ dicht angeordnete Kraftumlenkungsrippen erforderlich (b, d, ... f), es sei denn, man hält den Druckflansch bei großer Dicke recht schmal und verstärkt das Stegblech (c). Bei großen Ausrundungsradien genügt u.U. eine Rippe in Richtung der Winkelhalbierenden (a). Die Ausführung des Baustellenschweißstoßes in Bild 6.24f wird durch die vorgesehenen Montagewinkel erleichtert.

Solche Lösungen führt man heute nur noch selten, z.B. bei sehr hohen oder dynamischen Beanspruchungen aus.

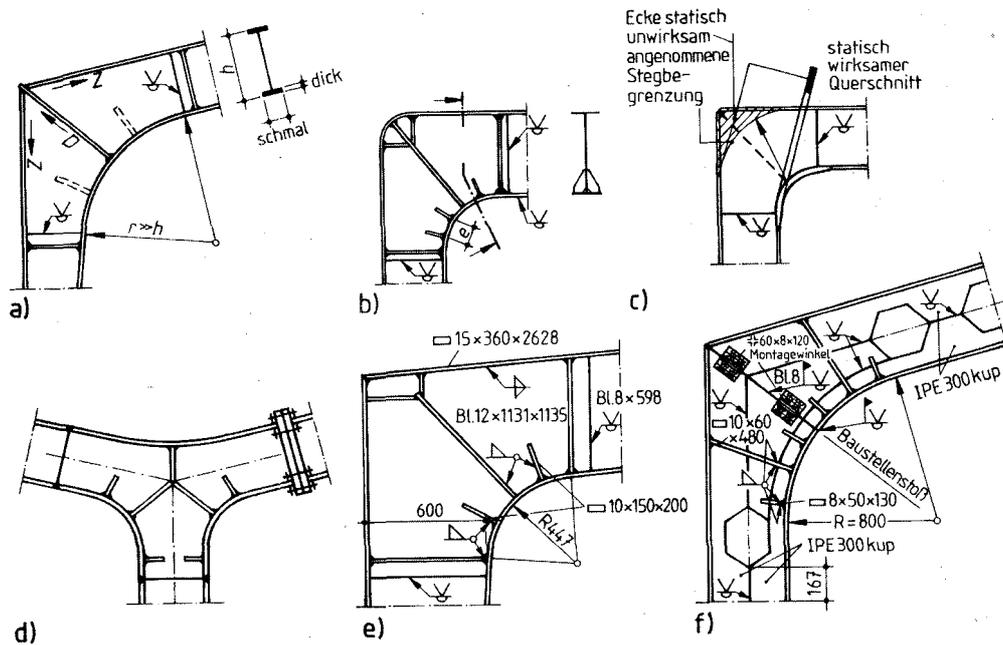
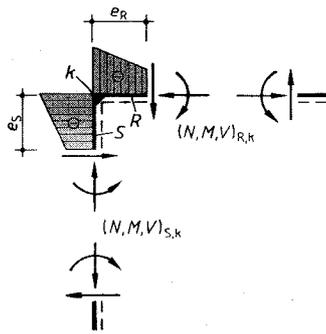


Bild 6.24 Rahmenecken mit Gurtausrundungen

6.3.2 Beanspruchungen in ausgesteiften Rahmenecken

6.3.2.1 Berechnungsmodelle für Eckbleche und Aussteifungen

Die im Rahmenknoten vom Riegel und Stiel ankommenden Schnittgrößen stehen untereinander und fallweise mit den im Knoten angreifenden äußeren Lasten im Gleichgewicht. Im einfachsten Fall ohne äußere Knotenlasten (Bild 6.25) entsprechen sich daher folgende Schnittgrößen (R = Riegel, S = Stiel):



$$\begin{aligned}
 N_R &\triangleq V_S \\
 V_R &\triangleq N_S \\
 M_R &\triangleq M_S \quad \text{bzw.} \quad N_{\text{Fl,h}}^{M_R} \rightarrow N_{\text{Fl,v}}^{M_S}
 \end{aligned}
 \tag{6.25}$$

Bild 6.25 Schnittgrößen im Rahmeneck

Fasst man die Biegemomente schließlich jeweils als ein Flanschkräftepaar ($N_{\text{Fl,h}}^{M_R}$, $N_{\text{Fl,v}}^{M_S}$, h = horizontal, v = vertikal) auf, so findet im Rahmeneck eine reine Kraftumlenkung statt. Der tatsächliche Beanspruchungszustand ist äußerst kompliziert; unter Beachtung der Gleichgewichtsbedingungen und eines mechanisch plausiblen Verzerrungszustandes lassen sich jedoch *einfache Tragmodelle* ableiten, die auch in einer hinreichend genauen Übereinstimmung mit Versuchen bzw. neueren FEM-Methoden stehen. Bei diesem *Berechnungsmodell* werden die im Rahmeneck vorhandenen Stegbleche gedanklich von den Flanschen gelöst und an den Schnittkanten die freigesetzten Reaktionskräfte (nach *d'Alembert* (1717 – 1787) gegengleich) angetragen. Die Flansche bzw. Steifen seien gelenkig miteinander verbunden.

Von den Biegemomenten und Normalkräften wird vereinfachend angenommen, dass sie allein von den Flanschen aufgenommen (übertragen) werden, während die Querkräfte ohnehin nur in den Stegen vorhanden sind. Nach dieser Aufteilung werden die Kräfte an den entsprechenden Teilflächen als „äußere Lasten“ angesetzt und längs der vertikalen und horizontalen bzw. schrägen Ränder die Gleichgewichtsbedingungen aufgestellt. Man erhält die zuvor erwähnten Reaktionskräfte im Eckblech des Rahmenknotens, aus denen sich die Beanspruchungen (σ), τ errechnen lassen. Dabei werden natürlich nicht die Schnittgrößen im *Systempunkt* (k) zugrunde gelegt, sondern die Größen am jeweiligen *Rahmeneckanschnitt*. Mit den in Rahmenecken üblicherweise vorhandenen Schnittgrößen (Bild 6.25) und $e_{R,S}$ = Abstand des Anschnittes im Riegel bzw. Stiel wird, falls keine (oder vernachlässigbare) Knotenlasten angreifen:

$$\begin{aligned}
 M_R &:= M_{R,k} - V_R \cdot e_R & N_R &:= N_{R,k} & V_R &:= V_{R,k} \\
 M_S &:= M_{S,k} - V_S \cdot e_S & N_S &:= N_{S,k} & V_S &:= V_{S,k}
 \end{aligned}
 \tag{6.26}$$

Für 4 *typische Fälle* werden die Beanspruchungen abgeleitet bzw. angeschrieben.

Wichtig: Für alle Ableitungen werden die mit Richtungssinn eingetragenen Knotenschnittgrößen (abweichend von den üblichen Bezeichnungen) als *positiv* betrachtet.

Fall 1 - Knieeck ohne Voute (Bild 6.26)

Im Teilbild a) sind die Abmessungen und b) die bereits aufgeteilten Schnitt- und Reaktionskräfte eingetragen. Die Höhen h' beziehen sich auf die Flanschabstände, s_E ist die Blechdicke im Eckblech. Die Anschnittmomente sind

$$M_R = M_{R,k} - V_{R,k} \cdot h'_R / 2 \quad M_S = M_{S,k} - V_{S,k} \cdot h'_R / 2
 \tag{6.27}$$

Das horizontale Kräftegleichgewicht (Bild 6.26b) liefert

$$\text{oben: } T_o = M_R / h'_R - N_R / 2 = \frac{M_{R,k}}{h'_R} - V_R \cdot \frac{h'_S}{2 \cdot h'_R} - \frac{N_R}{2} \quad (6.28)$$

$$\text{unten: } T_u = M_R / h'_R + N_R / 2 - V_S = \frac{M_{R,k}}{h'_R} - V_R \cdot \frac{h'_S}{2 \cdot h'_R} + \frac{N_R}{2} - V_S$$

Mit $V_S = N_R$, Gl. (6.25), wird

$$T_o = T_u \quad (6.29)$$

Aus dem Gleichgewicht der vertikalen Kräfte folgt analog

$$\text{links: } T_r = T_l = M_S / h'_S - N_S / 2 = \frac{M_{S,k}}{h'_S} - V_S \cdot \frac{h'_R}{2 \cdot h'_S} - \frac{N_S}{2} \quad (6.30)$$

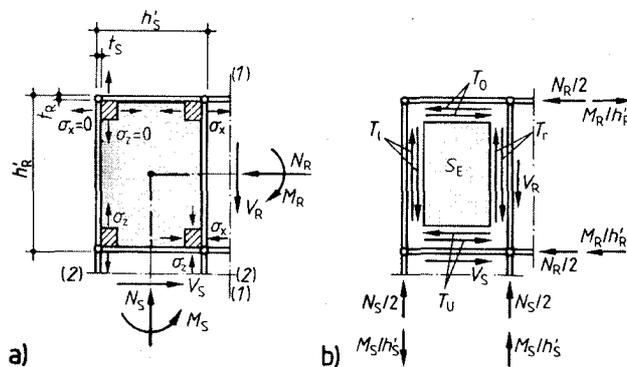


Bild 6.26 Berechnungsmodell für Rahmenecken mit flanschparallelen Stielen und Riegeln

Es wird angenommen, dass die Schubkräfte T sich gleichmäßig über die entsprechenden Breiten/Längen des Eckbleches verteilen – dann sind die Normalspannungen in den Steifen bzw. Flanschen an den kraftfreien Rändern identisch Null, wie es auch sein muss – und man erhält

$$t = t_{o,u} = T_{o,u} / h'_S = \frac{M_k}{h'_R \cdot h'_S} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_R}{h'_R} + \frac{N_R}{h'_S} \right) = t_{l,r} \quad (6.31)$$

Somit gilt auch für die im Eckblech wirksamen Schubspannungen τ_E

$$\tau_E = t / s_E = \text{konst} \quad (6.32)$$

das (notwendige) mechanische Gesetz von der „Gleichheit zugeordneter Schubspannungen“. Damit ist der Beanspruchungszustand im Eckbereich vollständig beschrieben. Für den Tragsicherheitsnachweis gegen Fließen wird in einigen Abhandlungen angenommen, dass im rechten unteren Eckbereich des Eckbleches (Bild 6.26a) aus Kontinuitätsgründen natürlich eine vollständige Schnittkraftaufteilung allein auf die Flansche noch nicht stattgefunden haben kann und im (eng schraffierten) Einheitselement aus Sicherheitsgründen auch noch Normalspannungen aus N und M (theoretisch) vorhanden sind. Teilt man jedoch die Schnittgrößen konsequent auf und berücksichtigt das Fließvermögen des Werkstoffes, so hält es der Verfasser nicht für notwendig,