ANWENDUNG DER NEUEN EUROP. REGELWERKE AUF RAHMENTRAGWERKE AUS STAHL

Diplomarbeit

von

Johann Franz Ferdinand PLATZER

eingereicht am

Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke
der
Technischen Universität Graz

Vorstand

o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Richard Greiner

Graz, im März 1991

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

EINLEITUNG

Ausgehend von der Zielformulierung, den allgemeinen und spezifischen Voraussetzungen dieser Arbeit, folgen im Kapitel "Durchführung" die Zusammenstellung der theoretischen Grundlagen und der schematische Ablauf der Berechnungen. Die anschließenden Schlußfolgerungen werden durch die Zusammenfassung der Rechenergebnisse in Tabellenform und durch Diagramme untermauert. Literaturhinweise werden, sofern sie im Text angeführt sind, durch [ ] dargestellt und befinden sich vor dem Anhang. Die Berechnung selbst ist in vollständiger Form im Anhang wiedergegeben.

An dieser Stelle möchte ich meinem Betreuer, Herrn o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Richard Greiner, danken, vorallem auch dafür, daß ich meine Diplomarbeit an seinem Institut abfassen durfte.

Graz, im März 1991

1. ZIELSETZUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Berechnungsmöglichkeiten von Tragwerken nach den europäischen Regelwerken aufzuzeigen, wobei die Berechnung in der leicht nachvollziehbaren Form einer Handrechnung an einem representativen Beispiel erfolgt. Im besonderen wird dabei versucht, die plastische Schnittkraftermittlung von Tragwerken - nach der Fließgelenktheorie - in anschaulicher Form und mit baustatisch üblichen Methoden darzustellen und anzuwenden. Ebenso soll das Erfassen von Fließgelenken im Feldbereich von Stäben, das Wandern von Fließgelenken, dargelegt werden.
Ein weiterer Aspekt ist die Berücksichtigung der Knotennachgiebigkeit.

2. VORAUSSETZUNGEN

2.1 Allgemeine Voraussetzungen

Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte

EINWIRKUNGEN **F**	WIDERSTANDSGRÖSSEN **M**
ständige Einwirkungen................G	Festigkeiten
veränderliche Einwirkungen..........Q	plast. Momente
außergewöhnliche Einwirkungen....F_A	...

CHARAKTERISTISCHE WERTE

$\mathbf{F_k}$ | $\mathbf{M_k}$

Sie sind den entsprechenden Normen zu entnehmen.

z.B.

einschlägigen Normen über Lastannahmen | charakt. Werte der Festigkeit $f_{y,k}$

TEILSICHERHEITSBEIWERTE γ

γ_F | γ_M

KOMBINATIONSBEIWERT ψ

($\psi \leq 1$) berücksichtigt das Zusammenwirken von mehreren veränderlichen Einwirkungen

BEMESSUNGSWERTE

$\mathbf{F_d}$ | $\mathbf{M_d}$

$\mathbf{F_d = \gamma_F * \psi * F_k}$ | $\mathbf{M_d = M_k / \gamma_M}$

BEANSPRUCHUNGEN

S_d | R_d

Die Beanspruchungen S_d sind mit den Bemessungswerten $\mathbf{F_d}$ zu bestimmen.

Die Beanspruchbarkeiten R_d sind mit den Bemessungswerten der Widerstandsgrößen $\mathbf{M_d}$ zu bestimmen.

ALLGEMEINE ANFORDERUNG

$$S_d \leq R_d$$

Es ist nachzuweisen, daß die Beanspruchungen S_d die Beanspruchbarkeiten R_d nicht überschreiten.

Grenzzustände für den Nachweis der Tragsicherheit

Beginn des Fließens
Durchplastizieren eines Querschnittes
Ausbilden einer Fließgelenkkette
Bruch

Erforderliche Nachweise

Nachweis der Tragsicherheit
Nachweis der Lagesicherheit
Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Nachweisverfahren

Elastisch-Elastisch (EE): Die Beanspruchungen S_d und die Beanspruchbarkeiten R_d werden nach der Elastizitätstheorie ermittelt.

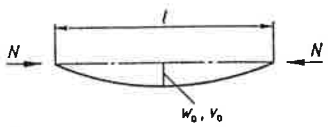
Elastisch-Plastisch (EP): Die Beanspruchungen S_d werden nach der Elastizitätstheorie und die Beanspruchbarkeiten R_d nach der Plastizitätstheorie ermittelt.

Plastisch-Plastisch (PP): Die Beanspruchbarkeiten S_d und die Beanspruchbarkeiten R_d werden nach der Plastizitätstheorie ermittelt.

Grundsätzlich zu berücksichtigende Einflüsse

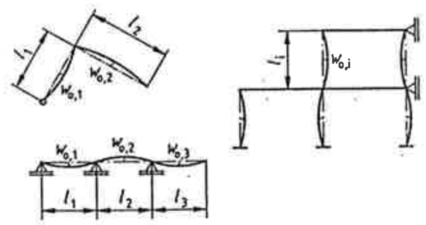
Tragwerksverformungen: Diese sind zu berücksichtigen, wenn sie zu Vergrößerungen der Beanspruchungen führen (Theorie II. Ordnung).

Imperfektionen von Tragwerken: Der Einfluß von geometrischen und strukturellen Imperfektionen wird in der Form von Vorverdrehungen der Stabachsen und Vorkrümmungen berücksichtigt.

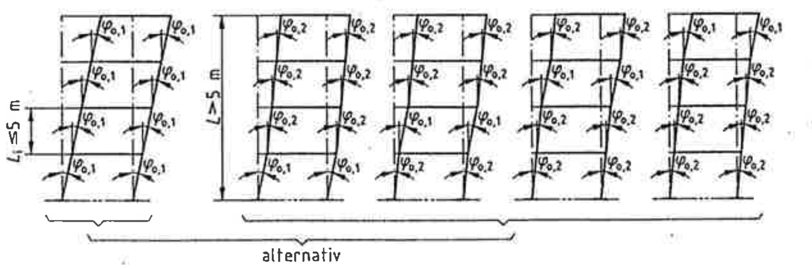


quadratische Parabel
oder sin-Halbwelle

Vorkrümmung eines Stabes

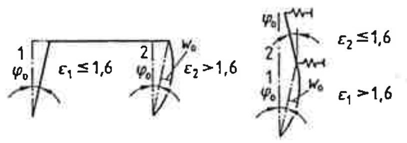


Beispiele für den Ansatz von Vorkrümmungen



$\varphi_{0,1} = r_2 \frac{1}{200}$ $\varphi_{0,2} = r_2 \frac{1}{200} r_1$ $n = 2$

Beispiele für Vorverdrehungen in Stabwerken und Rahmen



Beispiele für die gleichzeitige Berücksichtigung
von Vorkrümmung und Vorverdrehung

Größe der Imperfektionen: Je nachdem welche Globalanalyse (Theorie I. Ordnung oder Theorie II. Ordnung) der Berechnung zugrunde gelegt wird, dürfen bzw. müssen unterschiedliche Größenwerte der Imperfektionen angesetzt werden.

Theorie II. Ordnung:

Vorkrümmung: Für Einzelstäbe, für Stäbe von Stabwerken mit unverschieblichen Knotenpunkten und für Stäbe mit $\varepsilon > 1{,}6$.

Tabelle 3. **Stich der Vorkrümmung**

	Stabart	Stich w_0, v_0 der Vorkrümmung
	Einteilige Stäbe mit Querschnitten, denen nach Tabelle 5 folgende Knickspannungslinie zugeordnet ist.	
1	a	$l/300$
2	b	$l/250$
3	c	$l/200$
4	d	$l/150$
5	**Mehrteilige Stäbe,** wenn der Nachweis nach Abschnitt 4.3 erfolgt	$l/500$

Vorverdrehung:

für einteilige Stäbe:

$$\varphi_0 = \frac{1}{200}\, r_1 \cdot r_2$$

Es bedeuten:

$r_1 = \sqrt{\frac{5}{l}}$ Reduktionsfaktor für Stäbe oder Stabzüge mit $l > 5$ m, wobei l die Systemlänge des vorverdrehten Stabes L bzw. Stabzuges L_r in m ist. Maßgebend ist jeweils derjenige Stab oder Stabzug, dessen Vorverdrehung sich auf die betrachtete Beanspruchung am ungünstigsten auswirkt.

$r_2 = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{\frac{1}{n}}\right)$ Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von n voneinander unabhängigen Ursachen für Vorverdrehungen von Stäben und Stabzügen.

Bei Anwendung des Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch (EE) brauchen nur 2/3 der Werte der Ersatzimperfektionen in Rechnung gestellt werden.

Theorie I. Ordnung:

Vorkrümmung: Wenn das Abgrenzungskriterium für die Anwendung der Theorie I. Ordnung ($N/N_{Ki} \leq 0{,}10$) erfüllt ist, darf ohne Ansatz von Vorkrümmungen gerechnet werden.

Vorverdrehung: Wenn das Abgrenzungskriterium für die Anwendung der Theorie I. Ordnung ($N/N_{Ki} \leq 0{,}10$) erfüllt ist, darf mit verminderten Vorverdrehungen gerechnet werden.

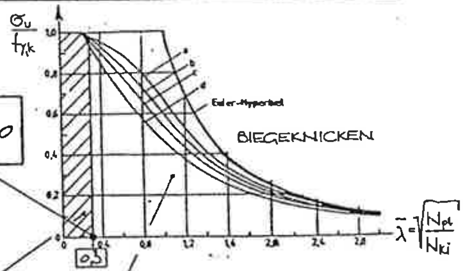
$$\varphi_0 = \frac{1}{400}\, r_1 \cdot r_2$$

Verfahren für den Tragsicherheitsnachweis

GLOBALE SYSTEMBETRACHTUNG

1 SYSTEMSTABILITÄT

$\frac{N}{N_{ki}} \leq 0{,}10$



a.) SYSTEME OHNE EFFEKT 2.ORDNUNG: $\alpha = \frac{1}{1-(N/N_{ki})}$

=> THEORIE 1. ORD. (-> KEIN BIEGEKNICKNACHWEIS)

BERECHNUNGSVERFAHREN

	EE	EP	PP
SYSTEMBERECHNUNG :	ELAST. TH. 1. ORD.	ELAST. TH. 1. ORD.	PLAST.-FLIESSGELENKTH. 1. ORD.
QUERSCHNITTSBERE. :	ELAST.	ELAST.	PLAST.

b.) SYSTEME MIT EFFEKT 2.ORDNUNG :

=> THEORIE 2.ORD. (-> KEIN BIEGEKNICKNACHWEIS)

BERECHNUNGSVERFAHREN

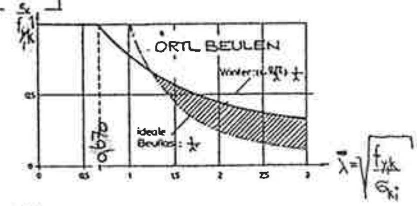
	EE	EP	PP
SYSTEMBERECHNUNG :	ELAST. TH. 2. ORD.	ELAST. TH. 2. ORD.	PLAST.-FLIESSGELENKTH. 2. ORD.
QUERSCHNITTSBERE. :	ELAST.	PLAST.	PLAST.

NÄHERUNG :

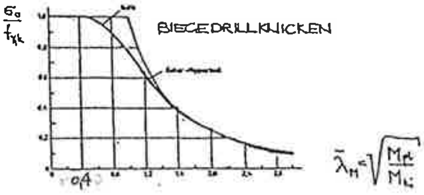
-> ERSATZSTABVERFAHREN (TH. 1.ORD. MIT BIEGEKNICKNACHWEIS)
-> TH. 1. ORD. MIT α -VERGRÖSSERUNGSFAKTOR

2 ÖRTLICHE STABILITÄT

- AM QUERSCHNITT - LOKALES BEULEN
  -> NACHWEIS MIT GRENZ (b/t)



- AM STAB - BIEGEDRILLKNICKEN
  -> BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS



STABILITÄTSEFFEKTE
(siehe Seite 6)

(1) auf der Ebene des Systems (Systemknicken) und
(2) im lokalen Bereich (Querschnittsbeulen, Kippen)

werden unterschiedlich behandelt.

Bei (1) durch die Systemberechnung (Theorie II. Ordnung) und
bei (2) durch die (b/t)-Nachweise bzw. durch die Biegedrillknicknachweise.

In beiden Fällen werden Bereiche durch Plateau-Werte abgegrenzt, in denen der Stabilitätseffekt gegeben ist.

Bei (1) ist der Stabilitätseffekt abhängig von N/N_{Ki} oder $\bar{\lambda}_K$. Für $N/N_{Ki} \leq 0{,}10$ bzw. $\bar{\lambda}_K \leq 0{,}30$ - Systeme ohne Effekt II. Ordnung - darf nach Theorie I. Ordnung gerechnet werden bzw. heißt das, daß kein Stabilitätseffekt auftritt; andernfalls muß nach Theorie II. Ordnung - Systeme mit Effekt II. Ordnung - gerechnet werden. Neuerdings werden sämtliche Systemberechnungen mit Berücksichtigung von Systemimperfektionen (Vorkrümmungen, Vorverdrehungen) durchzuführen sein.

Bei (2) gibt es Grenzwerte für die (b/t)-Verhältnisse und die Kipplängen bzw. für $\bar{\lambda}_M$.

2.2 Spezielle Voraussetzungen

Regelwerke

Die Berechnung der Beispiele erfolgt aus Gründen der Einheitlichkeit anhand der neuen DIN 18 800 [1] und [2], die für die zugrundegelegte Zielsetzung im wesentlichen mit dem EUROCODE 3 [4] übereinstimmt.
Nur die Traglastermittlung nach dem Ersatzstabverfahren (β-Verfahren) erfolgt für das Berechnungsverfahren Elastisch-Plastisch in Anlehnung an den EUROCODE. Zum Vergleich wird für das sogenannte Ersatzstabverfahren auch noch die Berechnung nach Ö-NORM B 4600 vorgenommen, basierend auf der Ermittlung der Gebrauchslast.

Tragsicherheitsnachweise

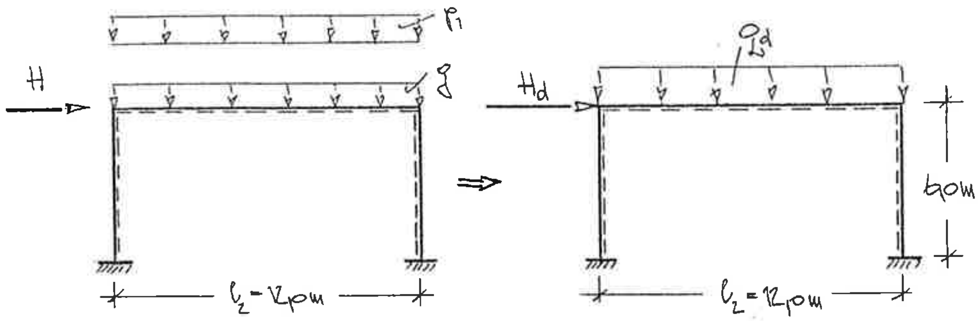
Diese erfolgen sowohl für Theorie I. Ordnung als auch für Theorie II. Ordnung jeweils für die Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch (EE), Elastisch-Plastisch (EP) und Plastisch-Plastisch (PP). Bei der Theorie II. Ordnung werden auch noch die Näherungsmethoden, α-Verfahren und β-Verfahren, herangezogen, mit der Aufspaltung in das Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch. Unter dem α-Verfahren versteht man bei verschieblichen Systemen die Vergrößerung der Schnittkräfte aus dem Verschiebungszustand. Das β-Verfahren ist als Ersatzstabverfahren bekannt.

Annahmen für den Tragsicherheitsnachweis

TEILSICHERHEITSBEIWERTE

Einwirkungen		Widerstandsgrößen	
ständige Einwirkungen	$\gamma_F = 1.35$	für Bemessungswert der Festigkeit	$\gamma_M = 1.1$
veränderliche Einwirkungen	$\gamma_F = 1.5$	für Bemessungswert der Steifigkeit	$\gamma_M = 1.1$
Kombinationsbeiwert	$\psi = 0.9$	$(EJ)_d = (EJ)/\gamma_M$	

Dieser Effekt, der durch die Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_M=1.1 bei der Ermittlung des Bemessungswertes der Steifigkeit auftritt, findet sich nur in der DIN 18 800. Es wird dabei vorausgesetzt, daß die abgeminderte Steifigkeit erhöhend wirkt, ansonsten darf mit γ_M=1.0 gerechnet werden.
Eine mögliche Beinflussung durch Lastkombinationen wird - im Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit - im vorhinein eliminiert, indem man den Kombinationslastfall aus der veränderlichen Einwirkung Riegelgleichlast und der veränderlichen Einwirkung Riegelhorizontalkraft als maßgebend voraussetzt.



Biegedrillknicknachweis

Der Nachweis erfolgt unter der Voraussetzung von Gabellagerungen, sodaß diese Annahmen auch konstruktiv vorzunehmen wären.

Annahmen für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis

TEILSICHERHEITSBEIWERTE

Einwirkungen		Widerstandsgrößen	
ständige Einwirkungen	$\gamma_F=1.0$	für Bemessungswert der Einwirkungen	$\gamma_M=1.0$
veränderliche Einwirkungen	$\gamma_F=1.0$	für Bemessungswert der Steifigkeit	$\gamma_M=1.0$
Kombinationsbeiwert	$\psi=1.0$		

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgt ohne Ansatz von Vorverformungen (Vorverdrehungen, Vorkrümmungen).

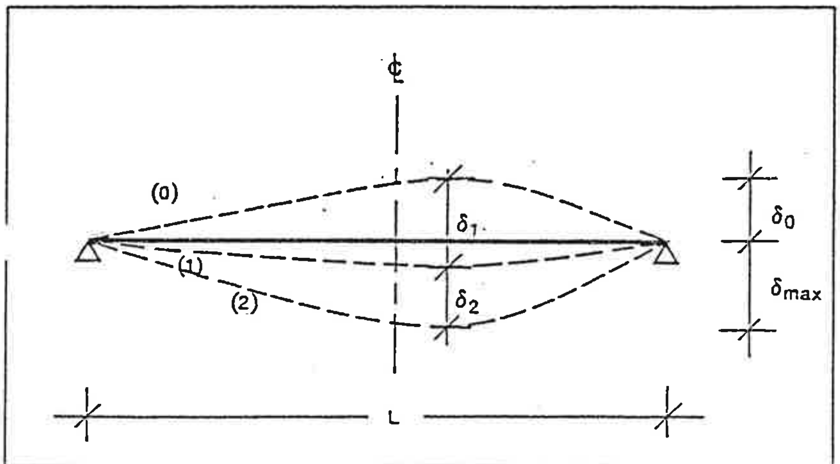


Figure 4.1 Vertical deflections to be considered

Table 4.1 Recommended limiting values for vertical deflections		
Conditions	Limits (see figure 4.1)	
	δ_{max}	δ_2
roofs generally	L/200	L/250
roofs frequently carrying personnel other than for maintenance	L/250	L/300
floors generally	L/250	L/300
floors and roofs supporting plaster or other brittle finish or non-flexible partitions	L/250	L/350
floors supporting columns (unless the deflection has been included in the global analysis for the ultimate limit state)	L/400	L/500
where δ_{max} can impair the appearance of the building	L/250	-

aus [4]

For crane gantry girders and runway beams, the horizontal and vertical deflections should be limited according to the use and class of the equipment.

For buildings the recommended limits for horizontal deflections at the tops of the columns are:

- Portal frames without gantry cranes: h/150
- Other single storey buildings: h/300
- In a multistorey building:
  - In each storey h/300
  - On the structure as a whole $h_o/500$

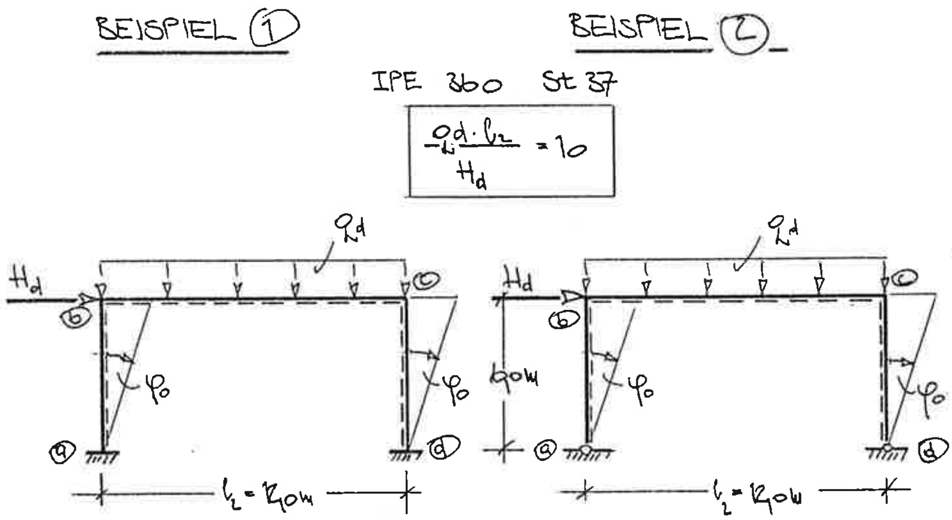
where h = height of the column or of the storey
and h_o = overall height of the structure.

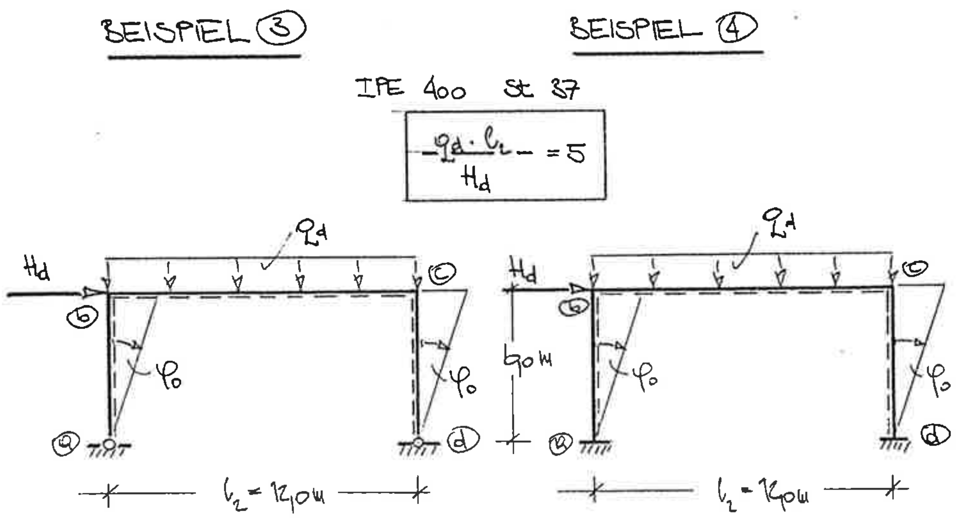
3. DURCHFÜHRUNG DER BERECHNUNG

3.1 Allgemeines

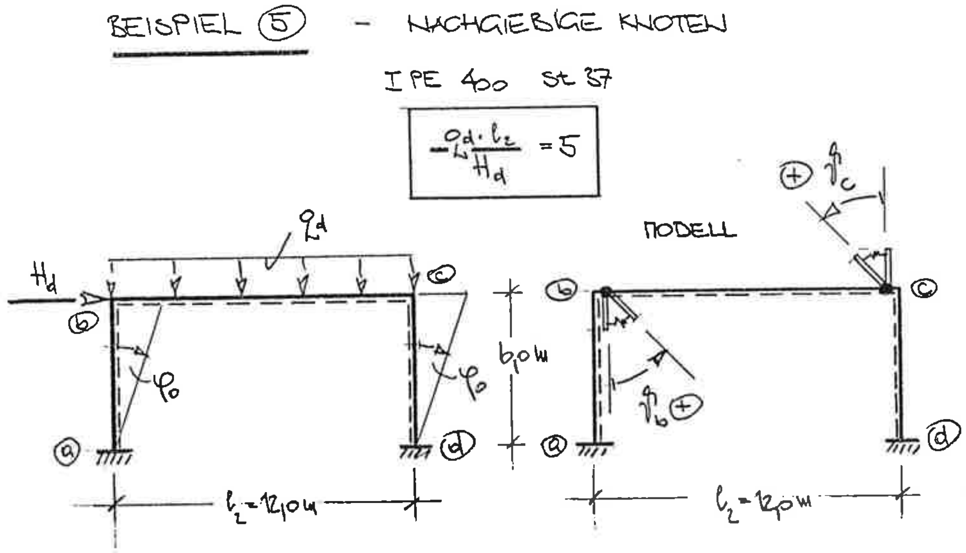
An einem representativen Beispiel, nach [3], werden die möglichen Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch, Elastisch-Plastisch und Plastisch-Plastisch nach den europ. Regelwerken dargelegt, getrennt nach Theorie I. Ordnung und Theorie II. Ordnung. Bei der Theorie II. Ordnung werden auch die Näherungsverfahren, α-Verfahren und β-Verfahren, berücksichtigt.

Die Berechnung erfolgt zuerst nur für Systeme mit ideal starren Knoten, sowohl für eingespannte als auch gelenkig gelagerte Stiele. Der Einfluß der Horizontalkraft im Riegel wird durch Änderung des Belastungsverhältnisses miterfaßt (Beispiele 1 bis 4).





Anhand des Rahmens mit den eingespannten Stielen und einem Belastungsverhältnis von $(q_d*l_2)/H = 5$ wird die Knotennachgiebigkeit - je nach Knotenausbildung - untersucht und mit den Ergebnissen des ideal starren Knotens verglichen (Beispiel 5).



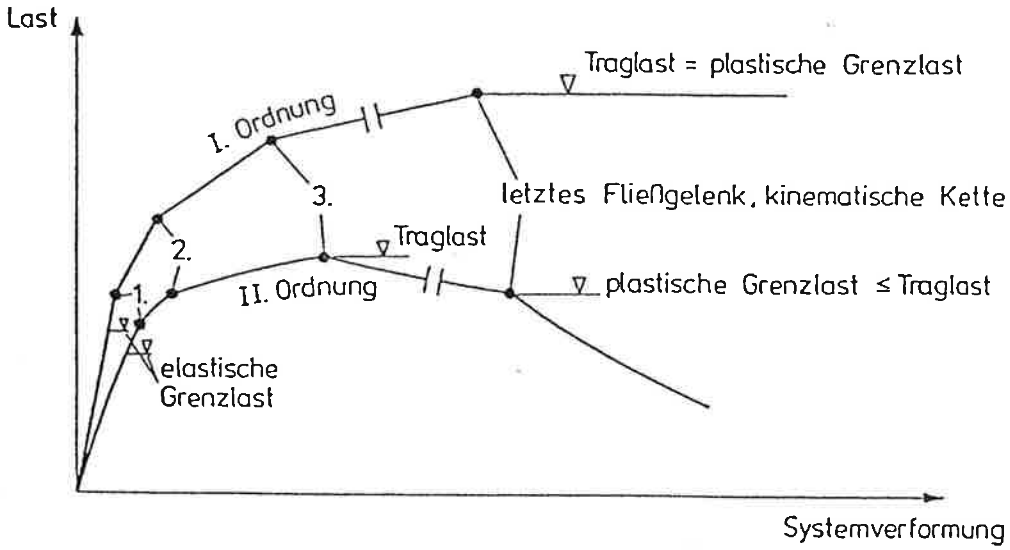
Gesucht sind sowohl die maximale Bemessungslast q_d, die dazugehörenden Verformungen w (ermittelt an der Stelle des maximalen Riegelfeldmomentes) und die Horizontalverformung v_c, als auch die maximale Gebrauchslaste q_{zul} mit den Verformungen w und v_c.

3.2 Elastizitäts- und Fließgelenktheorie I. und II. Ordnung unter Zugrundelegung der Deformationsmethode

aus [9]

Ausgehend von der Elastizitätstheorie werden Fließgelenke sukzessive dort eingeführt, wo Tragfähigkeitsüberschreitungen gemäß den Interaktionsbeziehungen auftreten. Die baustatische Erfassung der Fließgelenke erfolg nicht durch Einführung eines neuen Systems, sondern durch Überlagerung von Knickwinkeln an den Fließgelenkstellen. Matrix und Lastspalte des elastischen Systems bleiben damit erhalten, jedes Fließgelenk ergibt eine neue Unbekannte (Knickwinkel) und dementsprechend eine Vergrößerung des Gleichungssystems.

Last-Verformungs-Verhalten



Theorie II. Ordnung bedeutet: Gleichgewicht am verformten System.

Nachweis bei:

Elastizitätstheorie: Bemessungslast ≤ elastische Grenzlast,

Fließgelenktheorie: Bemessungslast ≤ Traglast.

Schwierigkeiten bei Fließgelenktheorie: Traglast tritt in irgend einem Fließgelenkzustand auf, der nicht bekannt ist. Theorie II. Ordnung-Effekt kann erheblich größer sein als bei Elastizitätstheorie, Kurven weichen zunehmendvoneinander ab. Für zunehmende Plastizierung gilt: Steigende Systemfestigkeit - fallende Systemsteifigkeit.

Interaktionsbeziehungen

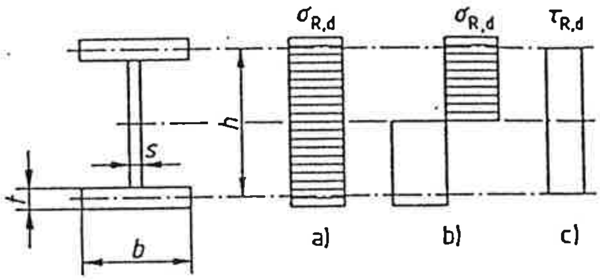
Beziehungen zwischen denjenigen Schnittgrößen, die volle Plastizierung des Querschnitts hervorrufen, diese Schnittgrößen sind stets größer als die zul. Schnittgrößen nach Elastizitätstheorie ("plastische Querschnitts-reserve").

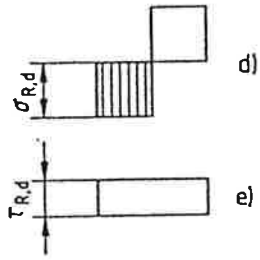
Tabelle 16. **Vereinfachte Tragsicherheitsnachweise für doppeltsymmetrische I-Profile mit N, M_y, V_z**

Momente um y-Achse	Gültigkeits-bereich	$\frac{V}{V_{pl,d}} \le 0{,}33$	$0{,}33 < \frac{V}{V_{pl,d}} \le 0{,}9$
z, y—y, z	$\frac{N}{N_{pl,d}} \le 0{,}1$	$\frac{M}{M_{pl,d}} \le 1$	$0{,}88 \frac{M}{M_{pl,d}} + 0{,}37 \frac{V}{V_{pl,d}} \le 1$
	$0{,}1 < \frac{N}{N_{pl,d}} \le 1$	$0{,}9 \frac{M}{M_{pl,d}} + \frac{N}{N_{pl,d}} \le 1$	$0{,}8 \frac{M}{M_{pl,d}} + 0{,}89 \frac{N}{N_{pl,d}} + 0{,}33 \frac{V}{V_{pl,d}} \le 1$

Schnittgrößen im vollplastischen Zustand für doppeltsymmetrische I-Querschnitte

Die Schnittgrößen im vollplastischen Zustand sind Bild 18 zu entnehmen.





a) $N_{pl,d} = \sigma_{R,d} \cdot A$
b) $M_{pl,y,d} = \sigma_{R,d} \cdot \alpha_{pl,y} \cdot W_y$
c) $V_{pl,z,d} = \tau_{R,d} \cdot h \cdot s$
d) $M_{pl,z,d} = \sigma_{R,d} \cdot \alpha_{pl,z} \cdot W_z$
e) $V_{pl,y,d} = 2 \cdot t \cdot b \cdot \tau_{R,d}$

Bild 18. Spannungsverteilung für doppelsymmetrische I-Querschnitte für Schnittgrößen im vollplastischen Zustand

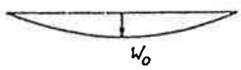
aus [1]

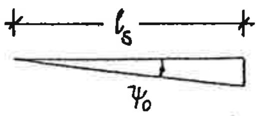
Moment eines Fließgelenks wird aus Interaktionsbeziehung ermittelt.

Interaktionsbeziehungen sind nur auf Querschnitt bezogen, somit unabhängig von Theorie I. oder II. Ordnung.

Vorverformungen

2 Arten: Vorkrümmung (hier parabolisch) Vorverdrehung





$v_s = l_s \cdot \psi_o$

Anordnung qualitativ wie Knickbiegelinie und in ungünstiger Richtung.

Die Vorverformungen sind direkt in die Formeln des Verfahrens eingearbeitet.

Vorverformungen müssen nicht verträglich sein.

Grundgedanken des hier vorgeschlagenen Verfahrens

Ziel: Berechnung grundsätzlich wie üblich bei statisch unbestimmten Systemen:

Planmäßige Rechnung, kein Probieren,

Lineares Gleichungssystem für alle Unbekannten,

Integriertes Verfahren für Elastizitäts- und Fließgelenktheorie sowie I. und II. Ordnung.

Vorgehensweise:

1. Nicht Berechnung der Traglast, sondern des Zustandes unter Bemessungslast, Nachweis, daß Gleichgewicht stabil und Schnittgrößen sicher (d.h. Interaktionsbeziehungen eingehalten),
2. N und erforderlichenfalls Q werden nach sicheren Seite hin abgeschätzt und für gesamte Rechnung festgehalten,
3. Sukzessive Berechnung: Elastizitätstheorie, Einführung nur so vieler FG(Fließgelenke) wie erforderlich.

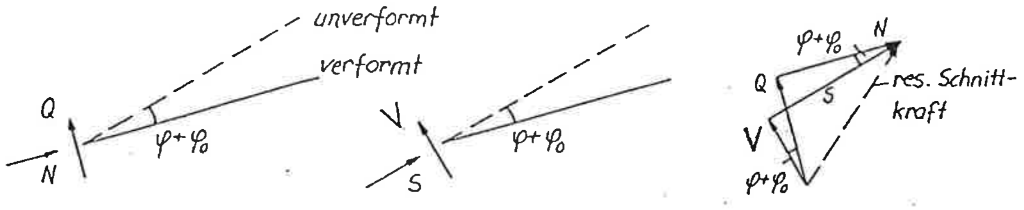
Baustatische Behandlung von Fließgelenken:

Grundlage ist stets elastisches System, Fließgelenke werden durch Oberlagerung von "Knickwinkeln" berücksichtigt, nicht durch Systemänderung!

Vorteil: Matrix und Lastglieder des elast. Systems bleiben erhalten,
Pro Fließgelenk neue Spalte (=Zeile), neues Lastglied, neue Unbekannte = Knickwinkel

Anwendungsbereich: beliebig verschiebliche oder unverschiebliche Systeme, Gelenke und Federgelenke ("elastische Gelenke") an beliebiger Stelle, Querschnitt für den Einzelstab konstant.

Schnittkräfte N,Q und S,R



Theorie II. Ordnung: $N = S$, $Q = V + N(\varphi + \varphi_0)$

Theorie I. Ordnung: $N = S$, $Q = V$

R,S für Gleichgewichtsbedingungen

Q,N für Beanspruchung des Stabquerschnittes (Interaktionsbeziehungen oder Spannungsnachweis).

Nachweis der Tragsicherheit

Nachweis erfüllt, wenn:

1.) Schnittgrößen sicher, d.h. Interaktionsbez. in jedem Querschnitt eingehalten,

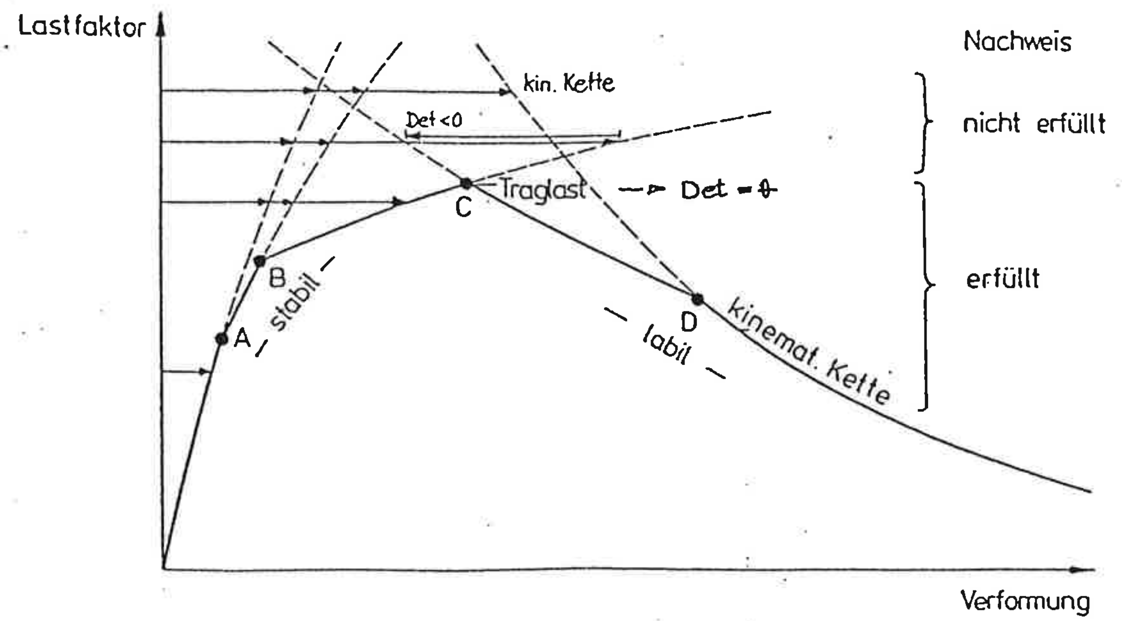
2.) Stabiles Gleichgewicht, d.h. Det > 0 ,

3.) In allen Fließgelenken M_f und $\bar{\rho}_f$ gleiches Vorzeichen.

Nachweis nicht erfüllt, wenn:

1.) Det < 0, oder M_f, $\bar{\rho}_f$ verschiedene Vorzeichen,

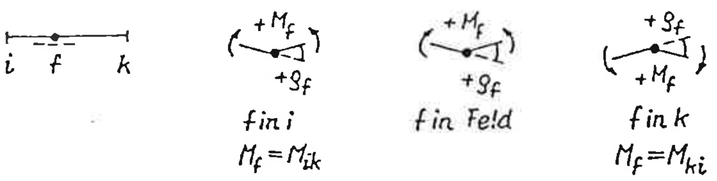
2.) soviele Fließgelenke notwendig werden, daß eine kinematische Kette vorliegt.



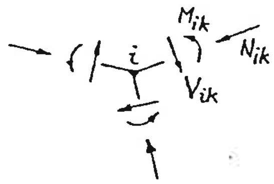
Elastizitäts- und Fließgelenktheorie I. und II. Ordnung nach der Deformationsmethode

Formelzusammenstellung

φ_i Knotendrehwinkel ⊕
ψ_s Stabdrehwinkel ⊕
ϑ_f Knickwinkel eines Fließgelenks
M_f Moment eines Fließgelenks

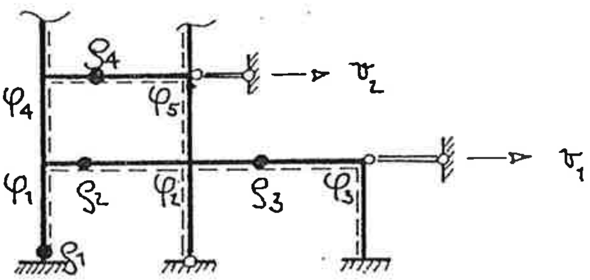


Stabendschnittgrößen



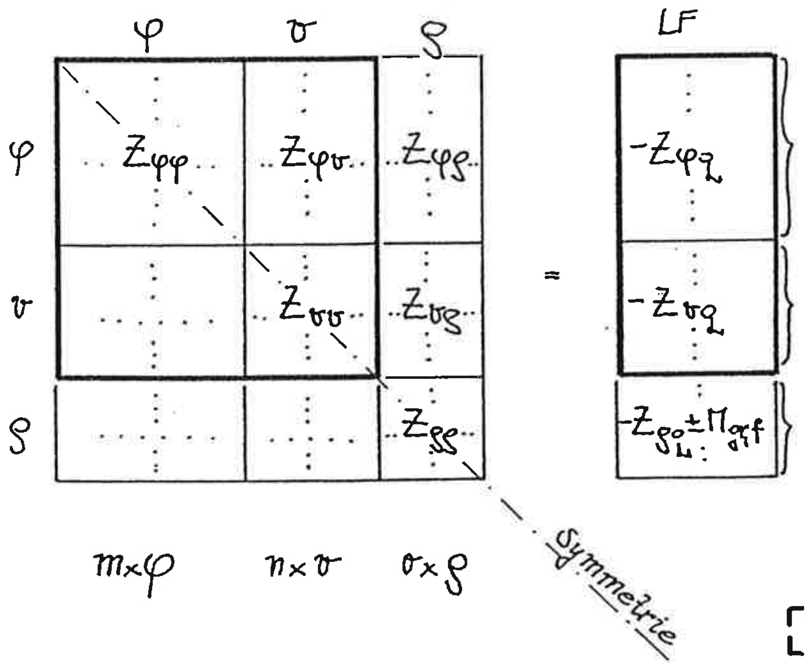
Vorverformungen

Stabkennzahl (bei Th. II. O.): $\varepsilon_s = \ell_s \sqrt{\dfrac{N_s}{EI_s}}$



v_i Horizontalverformung
φ_i Knotendrehwinkel
ϑ_i Knickwinkel im Fließgelenk

Koeffizientenmatrix, Lastglieder



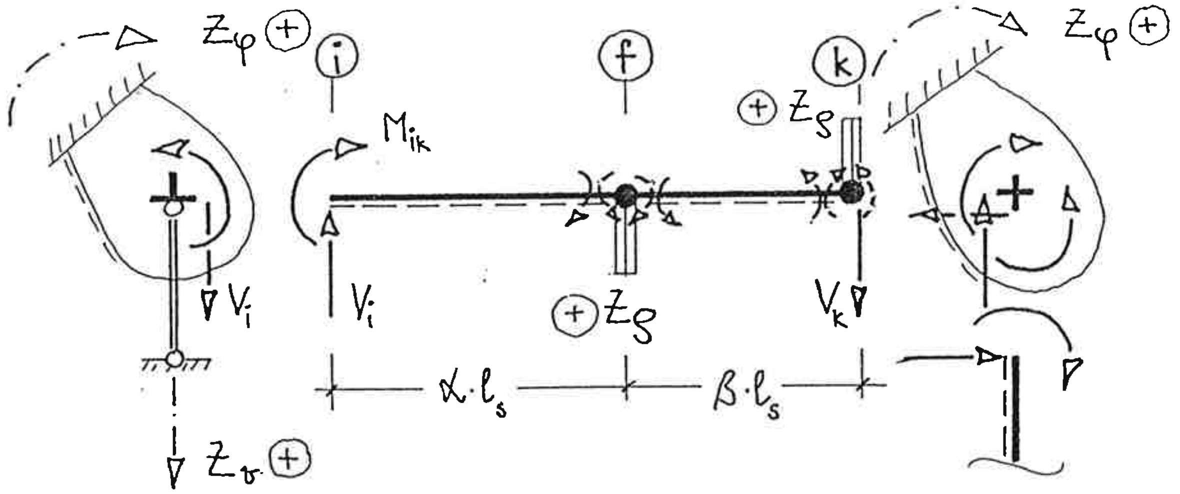
Z_{ik}
i Ursache
k Ort

m × Momentengleichgewicht am Knoten

n × Systemgleichgewicht

r × Momentengleichgew. am Fließgelenk

[ ] Gleichungssystem des elast. Systems



Z_φ : aus ΣM am Knoten

Z_v : aus ΣV am Knoten

Z_ρ : aus $\Sigma M = M_{gr,f}$ am Fließgelenk

Bestimmung der Einheitsverformungszustände

$$\left.\begin{array}{l} \varphi = 1 \\ v = 1 \\ \rho = 1 \end{array}\right. \left\{ \begin{array}{c} M_{ik},\ V_{ik} \\ \text{aus Tab. } 1{,}2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \rightarrow Z_{\varphi\varphi},\ Z_{v\varphi},\ Z_{\rho\varphi} \\ \rightarrow Z_{vv},\ Z_{\varphi v},\ Z_{\rho v} \\ \rightarrow Z_{\rho\rho},\ Z_{\varphi\rho},\ Z_{v\rho} \end{array}$$

Bestimmung der Belastungszustände (q + Vorverformung)

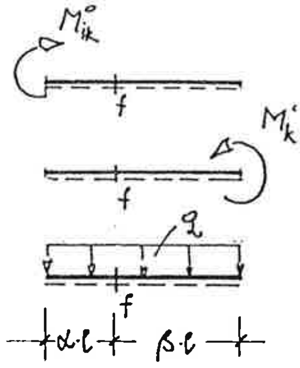
$$q,\ w_0,\ v_0 \quad \left\{ \begin{array}{c} M^0_{ik},\ V^0_{ik} \\ \text{aus Tab. } 3{,}4 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \rightarrow Z_{\varphi q} \\ \rightarrow Z_{vq} \\ \rightarrow Z_{\rho q} \end{array}$$

Bestimmung von $Z_{\rho q}$:

Wobei für das Volleinspannmoment im Fließgelenk gilt:

$$\left.\begin{array}{l} \cdot\ f \text{ in } i:\quad M^0_f = M^0_{ik} \\ \cdot\ f \text{ in } k:\quad M^0_f = M^0_{ki} \end{array}\right\}$$

Liegt das FG am Stabende, entspricht M^0_f dem Volleinspannmoment am Stabende



• f im Feld:

$$\text{Th.II.O.:} \quad M_f^o = \frac{\sin \varepsilon_s \beta_s}{\sin \varepsilon_s} M_{ik}^o + \frac{\sin \varepsilon_s \alpha_s}{\sin \varepsilon_s} M_{ki}^o + M_f^L$$

$$\text{Th.I.O:} \quad M_f^o = \beta_{s_i} M_{ik}^o + \alpha_s M_{ki}^o + M_f^L$$

M_f^L nach Tab. 4, Zeile 3 bis 9, je nach Lastfall

$M_{grf}(N,Q)$ aus Interaktionsbeziehung für Querschnitt f

$\boxed{\text{Auflösung des Gleichungssystems}}$ $\rightarrow \quad \varphi, \vartheta, \varrho$

$\boxed{\text{Endgültigen Schnittkräfte:}}$

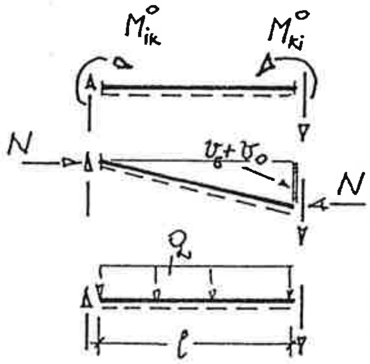
- Stabendmomente M_{ik}, M_{ki} $\qquad M_{ik} = M_{ik}^o + {}^{\varphi_i}M_{ik} \cdot \varphi_i - {}^{\varphi_k}M_{ik} \cdot \varphi_k - {}^{\vartheta_s}M_{ik} \vartheta_s - {}^{\varrho}M_{ik} \cdot \varrho$

- Stabendkräfte $\quad V_{ik}$:

$$V_{ik} = V_S + V_{ik}^L$$

$$V_S = -\frac{1}{\ell_s} \cdot (M_{ik} - M_{ki}) - N \cdot \left(\frac{\vartheta_s + \vartheta_o}{\ell_s} \right)$$

V_{ik}^L aus Querbelastung



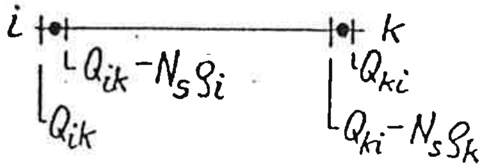
- Normalkräfte N_{ik} (ebenso Auflagerkräfte) aus $\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$

- Stabendquerkräfte:

$$Q_{ik} = V_{ik} + N_s \left(\varphi_i + 4 \frac{w_{os}}{\ell_s} + \frac{v_{os}}{\ell_s} \right)$$

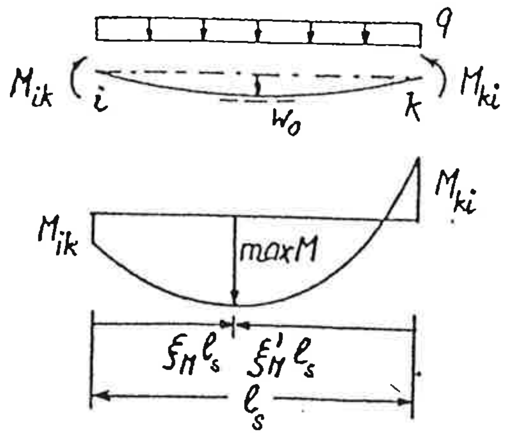
$$Q_{ki} = V_{ki} + N_s \left(\varphi_k - 4 \frac{w_{os}}{\ell_s} + \frac{v_{os}}{\ell_s} \right)$$

<u>bei Fließgelenken an Stabenden:</u>



alternativ Q_{ik} nach Tab. 4
oder nach Formeln unten

$\boxed{\text{Ort und Größe von } \max M}$ für Stab unter Gleichlast ohne ϱ_f im Feld



<u>Th.II.O.:</u>

$$M_0 = \frac{1}{\varepsilon^2}(q\ell_s^2 + 8Nw_0)$$

$$M_1 = \frac{M_{ik}+M_{ki}+2M_0}{\cos\varepsilon/2}$$

$$v = \frac{M_{ik}-M_{ki}}{M_1 \sin\varepsilon/2}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \xi_M &= \frac{1}{2} - \frac{1}{\varepsilon}\arctan v \\ \max M &= \frac{1}{2}\sqrt{1+v^2}\,M_1 - M_0 \end{aligned}}$$

$$Q_{ik} = \frac{1}{\ell_s}(\max M + M_0)\,\varepsilon \sin\varepsilon\xi_M$$

$$Q_{ki} = -\frac{1}{\ell_s}(\max M + M_0)\,\varepsilon \sin\varepsilon\xi'_M$$

<u>Th.I.O. (ohne w_0):</u>

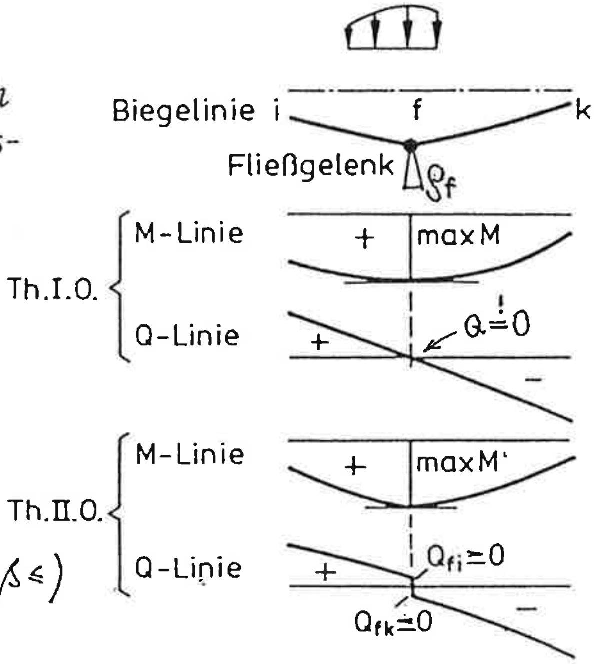
$$\boxed{\begin{aligned} \xi_M &= \frac{1}{2} - \frac{M_{ik}-M_{ki}}{q\ell_s^2} \\ \max M &= M_{ik} + \frac{1}{2}\xi_M^2 q\ell_s^2 \end{aligned}}$$

$$Q_{ik} = \xi_M q\ell_s$$

$$Q_{ki} = -\xi'_M q\ell_s$$

$\boxed{\text{Lage des Fließgelenkes im Feld}}$

Aus der Bedingung daß M_f gleich dem maximalen Moment im Feld ist, ergeben sich aus der Querkraft am FG die Bedingungsgleichungen für die Lage des FGs.



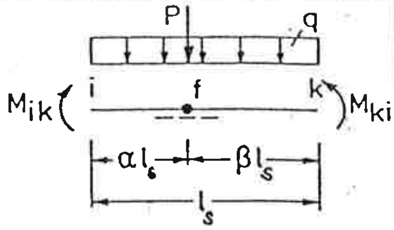
$Q_{fi} \geq 0 \quad \rightarrow \quad \alpha$ - Bedingung

<u>und</u>

$Q_{fk} \leq 0 \quad \rightarrow \quad \beta$ - Bedingung

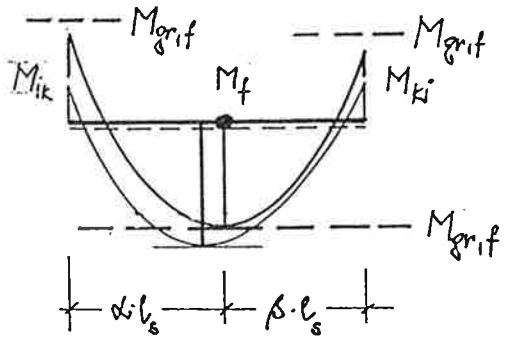
=> Th. I Ord. bestimmte FG-Stelle ($\alpha =$ <u>oder</u> $\beta =$)

Th II. Ord. Lösungsbereich ($\alpha \leq$ <u>und</u> $\beta \leq$)

		Th. II. O.	Th. I. O.
Bedingungen für Fließgelenkstelle im Feld		$\alpha \le \frac{1}{\varepsilon} \arccos \frac{M_o + M_{ik}}{M_o + M_f}$ $\boxed{\text{und}}$ $\beta \le \frac{1}{\varepsilon} \arccos \frac{M_o + M_{ki}}{M_o + M_f}$ mit $M_o = \frac{1}{\varepsilon^2} (q l_s^2 + 8 N w_o)$	$\alpha = \sqrt{2 \frac{M_f - M_{ik}}{q l_s^2}}$ $\boxed{\text{oder}}$ $\beta = \sqrt{2 \frac{M_f - M_{ki}}{q l_s^2}}$

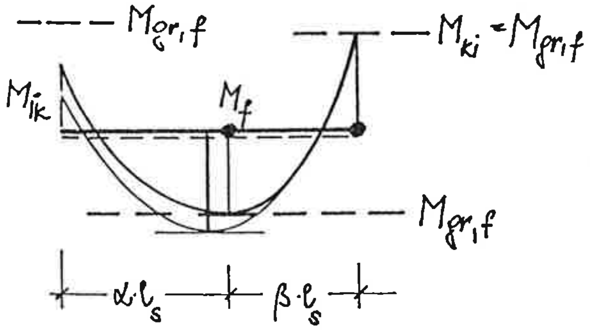
aus Q_{fk} nach Tabelle 4

<u>allgem. Fall</u> : $M_{ik} \neq M_{gr,f}$ $\quad M_{ki} \neq M_{gr,f}$ $\quad \max M_{FELD} > M_{gr,f}$



Annahme von α oder β → Gleichungssystem → M_{ik}, M_{ki} → Überprüfung der α-<u>und</u> β-Bedingung → eventuell neue Annahme

<u>Fließgelenk am Stabende</u> : $M_{ik} = M_{gr,f}$ oder $M_{ki} = M_{gr,f}$ $\quad \max M_{FELD} > M_{gr,f}$



$M_{ik} = M_{gr,f}$ → β-Bedingung

$M_{ki} = M_{gr,f}$ → α-Bedingung

EINHEITSVERFORMUNGEN

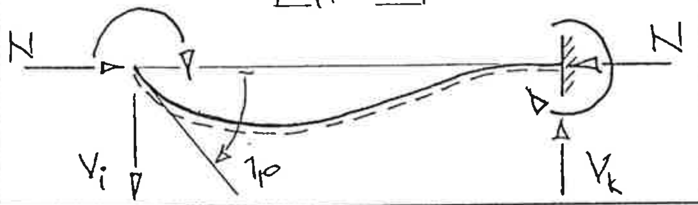
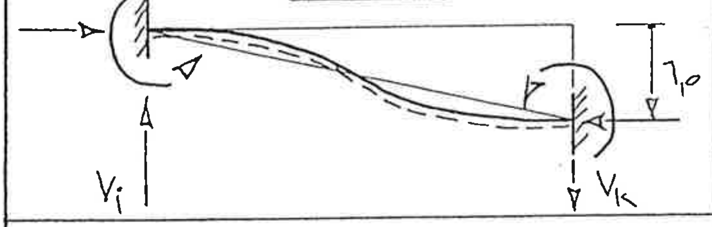
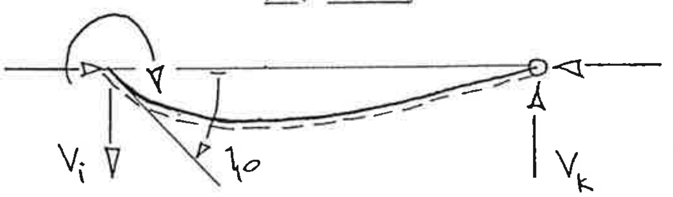
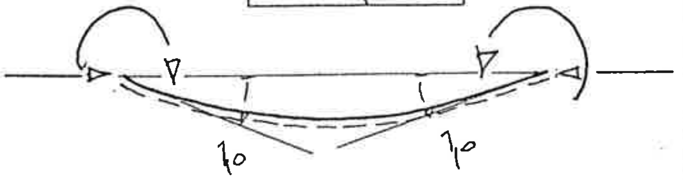
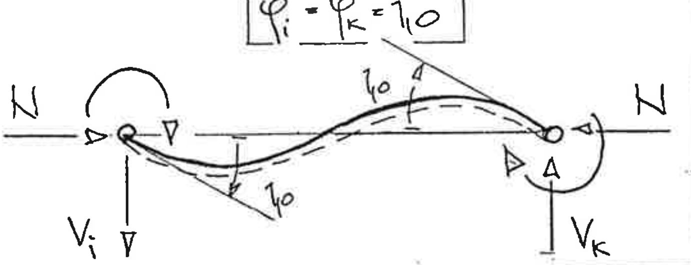
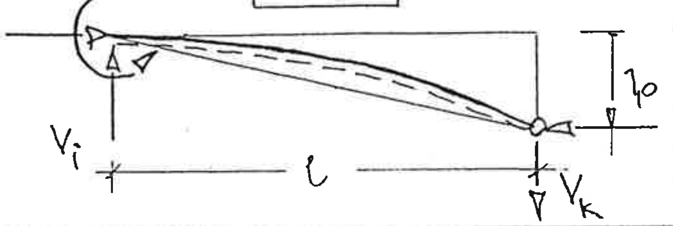
(i) (k)			TH. II	TH. I
$\boxed{\varphi_i = 1{,}0}$ 	M_i	$\frac{EJ}{l} \cdot$	F_1	4
	M_k		F_2	2
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2} \cdot$	F_3	6
$\boxed{\psi = 1{,}0}$ 	M_i	$\frac{EJ}{l^2} \cdot$	F_3	6
	M_k		F_3	6
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^3} \cdot 2 \cdot F_3 - \frac{N}{l}$		$\frac{EJ}{l^3} \cdot 12$
$\boxed{\varphi_i = 1{,}0}$ 	M_i	$\frac{EJ}{l} \cdot$	F_8	3
	M_k		0	0
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2} \cdot$	F_8	3
$\boxed{\varphi_i = -\varphi_k = 1{,}0}$ 	M_i	$\frac{EJ}{l} \cdot$	F_5	2
	M_k		F_5	2
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2} \cdot$	0	0
$\boxed{\varphi_i = \varphi_k = 1{,}0}$ 	M_i	$\frac{EJ}{l} \cdot$	F_3	6
	M_k		F_3	6
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2} \cdot$	$2 \cdot F_3$	12
$\boxed{\psi = 1{,}0}$ 	M_i	$\frac{EJ}{l^2} \cdot$	F_8	3
	M_k		0	0
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^3} \cdot F_8 - \frac{N}{l}$		$3 \cdot \frac{EJ}{l^3}$

TABELLE 1 — ELEMENTARSTAB – LF: EINHEITSVERFORM.

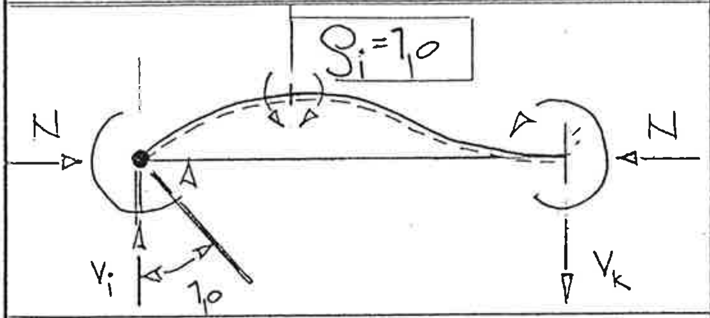
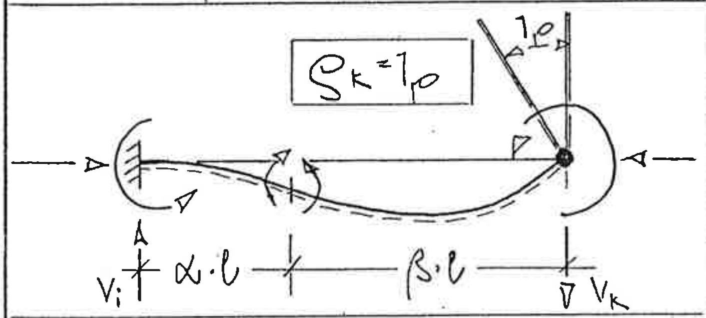
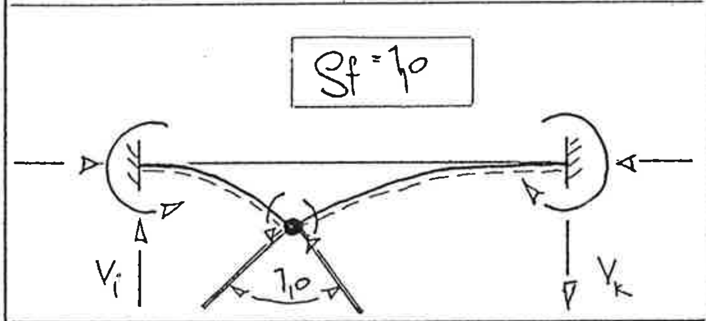
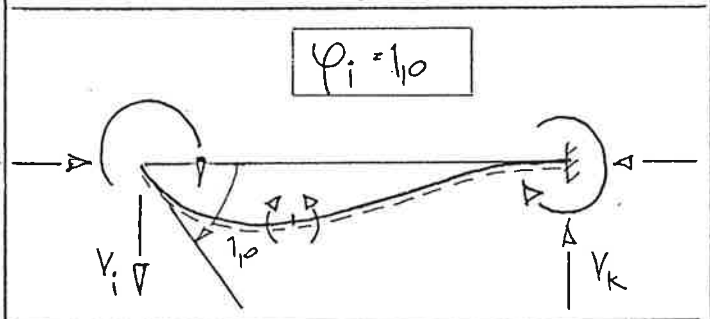
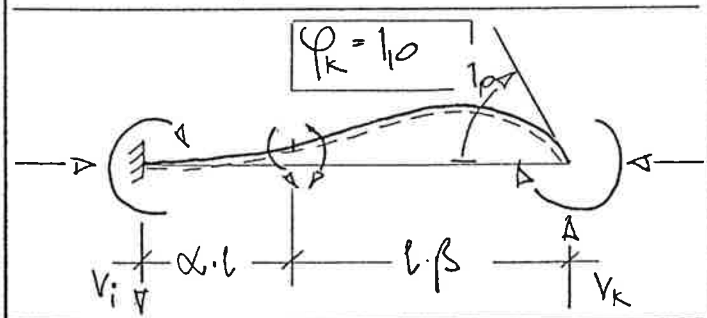
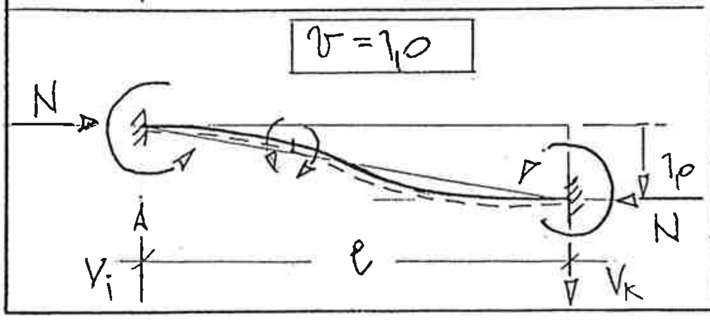
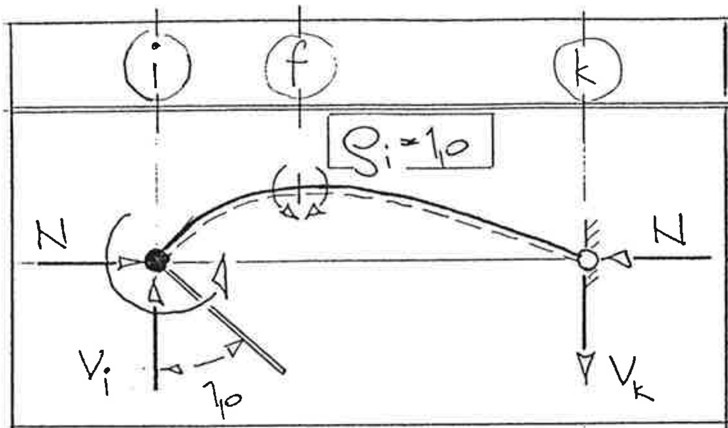
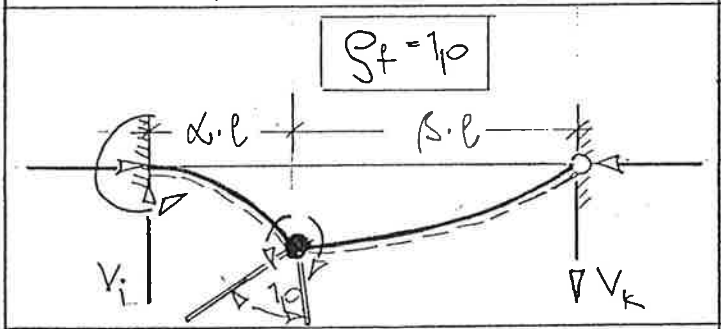
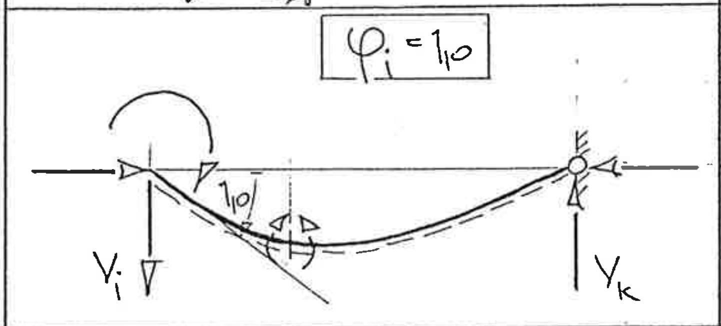
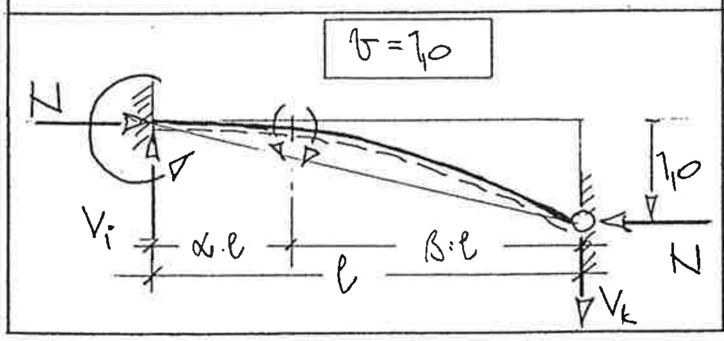
(i) (f) (k)			TH. II.	TH. I.
$\varrho_i = 1{,}0$ 	M_i	$\frac{EJ}{l}\cdot$	F_1	4
	M_k		F_2	2
	M_f		F_{12}	$2\cdot(3\beta-1)$
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2}\cdot$	F_3	6
$\varrho_k = 1{,}0$ 	M_i	$\frac{EJ}{l}\cdot$	F_2	2
	M_k		F_1	4
	M_f		F_{13}	$2\cdot(3\alpha-1)$
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2}\cdot$	F_3	6
$\varrho_f = 1{,}0$ 	M_i	$\frac{EJ}{l}\cdot$	F_{12}	$2\cdot(3\beta-1)$
	M_k		F_{13}	$2\cdot(3\alpha-1)$
	M_f		F_{14}	$4\cdot(1-3\alpha\beta)$
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2}\cdot$	F_{15}	6
$\varphi_i = 1{,}0$ 	M_i	$\frac{EJ}{l}\cdot$	F_1	4
	M_k		F_2	2
	M_f		F_{12}	$2(3\beta-1)$
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2}\cdot$	F_3	6
$\varphi_k = 1{,}0$ 	M_i	$\frac{EJ}{l}\cdot$	F_1	2
	M_k		F_2	4
	M_f		F_{13}	$2\cdot(3\alpha-1)$
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^2}\cdot$	F_3	6
$v = 1{,}0$ 	M_i	$\frac{EJ}{l^2}\cdot$	F_3	6
	M_k		F_3	6
	M_f		F_{15}	$6\cdot(\beta-\alpha)$
	$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{l^3}\cdot 2\cdot F_3 - \frac{N}{l}$		$\frac{EJ}{l^3}\cdot 12$

TABELLE 2 LF - EINHEITSVERF.









		TH. II	TH. I
M_i	$\frac{EJ}{\ell} \cdot$	F_8	3
M_k		0	0
M_f		F_{16}	$3 \cdot \beta$
$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{\ell^2} \cdot$	F_8	3
M_i	$\frac{EJ}{\ell} \cdot$	F_{16}	$3 \cdot \beta$
M_k		0	0
M_f		F_{17}	$3 \cdot \beta^2$
$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{\ell^2} \cdot$	F_{16}	$3 \cdot \beta$
M_i	$\frac{EJ}{\ell} \cdot$	F_8	3
M_k		0	0
M_f		F_{16}	$3 \cdot \beta$
$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{\ell^2} \cdot$	F_8	3
M_i	$\frac{EJ}{\ell^2} \cdot$	F_8	3
M_k		0	0
M_f		F_{16}	$3 \cdot \beta$
$V_i = V_k$	$\frac{EJ}{\ell^3} \cdot F_8 - \frac{N}{\ell}$		$3 \cdot \frac{EJ}{\ell^3}$

$F_i(\varepsilon)$ - WERTE

$F_1 =$	$\dfrac{\varepsilon \cdot (\sin\varepsilon - \varepsilon \cdot \cos\varepsilon)}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
$F_2 =$	$\dfrac{\varepsilon \cdot (\varepsilon - \sin\varepsilon)}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
$F_3 =$	$\dfrac{\varepsilon^2 \cdot (1-\cos\varepsilon)}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
$F_5 =$	$\dfrac{\varepsilon \cdot (1+\cos\varepsilon)}{\sin\varepsilon}$
$F_6 =$	$\dfrac{\varepsilon^2 \cdot \sin\varepsilon}{\sin\varepsilon - \varepsilon \cdot \cos\varepsilon}$

F_{12}	$= \varepsilon \cdot \dfrac{\sin\varepsilon \cdot \alpha + \sin\varepsilon \cdot \beta - \varepsilon \cdot \cos\varepsilon \cdot \beta}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
F_{13}	$= \varepsilon \cdot \dfrac{\sin\varepsilon \cdot \alpha + \sin\varepsilon \cdot \beta - \varepsilon \cdot \cos\varepsilon \cdot \alpha}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
F_{14}	$= \varepsilon \cdot \dfrac{\sin\varepsilon - \varepsilon \cdot \cos\varepsilon \cdot \alpha \cdot \cos\varepsilon \cdot \beta}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
F_{15}	$= \dfrac{\varepsilon^2 \cdot (\cos\varepsilon \cdot \alpha - \cos\varepsilon \cdot \beta)}{2 \cdot (1-\cos\varepsilon) - \varepsilon \cdot \sin\varepsilon}$
F_{16}	$= \dfrac{\varepsilon^2 \cdot \sin\varepsilon \cdot \beta}{\sin\varepsilon - \varepsilon \cdot \cos\varepsilon}$
F_{17}	$= \left(\cos\varepsilon \cdot \alpha - \dfrac{\sin\varepsilon \alpha}{\varepsilon}\right) \cdot F_{16}$

Tabelle 3 Volleinspannmomente nach Theorie I. und II. Ordnung

	Lastfall (l)	Faktor	M_{ik}^{o} (beidseitig eingespannt i–k): Th. II. O.	M_{ik}^{o}: I. O.	M_{ki}^{o}: Th. II. O.	M_{ki}^{o}: I. O.	M_{ik}^{o} (i eingespannt, k gelenkig): Th. II. O.	I. O.	M_{ik}^{o} (i eingespannt, k frei): Th. II. O.	I. O.
1	q, w_o	(ql^2+8Nw_o)	$-\frac{1}{\varepsilon^2}\left(1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}\right)$	$-\frac{1}{12}$	$-\frac{1}{\varepsilon^2}\left(1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}\right)$	$-\frac{1}{12}$	$-\frac{\frac{\tan\varepsilon/2}{\varepsilon}-\frac{1}{2}}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	$-\frac{1}{8}$	$-\frac{\tan\varepsilon}{\varepsilon}\left(1-\frac{\tan\varepsilon/2}{\varepsilon}\right)$	$-\frac{1}{2}$
2	q_i	$q_i l^2$	$-\frac{1}{2\varepsilon^2}\left(2-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}-\frac{\varepsilon^2/12}{1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}}\right)$	$-\frac{1}{20}$	$-\frac{1}{2\varepsilon^2}\left(-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}+\frac{\varepsilon^2/12}{1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}}\right)$	$-\frac{1}{30}$	$-\frac{\frac{1}{\varepsilon^2}\left(1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}\right)-\frac{1}{3}}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	$-\frac{1}{15}$	$-\frac{\tan\varepsilon}{\varepsilon}\left(\frac{1}{2}-\frac{1-\frac{\tan\varepsilon}{\varepsilon}}{\varepsilon^2}\right)$	$-\frac{1}{6}$
3	q_k	$q_k l^2$	$-\frac{1}{2\varepsilon^2}\left(-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}+\frac{\varepsilon^2/12}{1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}}\right)$	$-\frac{1}{30}$	$-\frac{1}{2\varepsilon^2}\left(2-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}-\frac{\varepsilon^2/12}{1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}}\right)$	$-\frac{1}{20}$	$-\frac{\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\varepsilon}{\sin\varepsilon}-1\right)-\frac{1}{6}}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	$-\frac{7}{120}$	$-\frac{\tan\varepsilon}{\varepsilon}\left(\frac{1}{2}-\frac{\frac{\varepsilon}{\sin\varepsilon}-1}{\varepsilon^2}\right)$	$-\frac{1}{3}$
4	P; αl, βl	Pl	$-\frac{\frac{1}{\varepsilon}(\sin\varepsilon\alpha+\sin\varepsilon\beta-\sin\varepsilon)+\alpha+\beta\cos\varepsilon-\cos\varepsilon\beta}{2(1-\cos\varepsilon)-\varepsilon\sin\varepsilon}$	$-\alpha\beta^2$	$-\frac{\frac{1}{\varepsilon}(\sin\varepsilon\beta+\sin\varepsilon\alpha-\sin\varepsilon)+\beta+\alpha\cos\varepsilon-\cos\varepsilon\alpha}{2(1-\cos\varepsilon)-\varepsilon\sin\varepsilon}$	$-\beta\alpha^2$	$-\frac{\frac{\sin\varepsilon\beta}{\sin\varepsilon}-\beta}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	$-\frac{1+\beta}{2}\alpha\beta$	$-\frac{\sin\varepsilon-\sin\varepsilon\beta}{\varepsilon\cos\varepsilon}$	$-\alpha$
5	M_e; αl, βl	M_e	$\frac{\varepsilon\sin\varepsilon\beta-1+\cos\varepsilon-\cos\varepsilon\alpha+\cos\varepsilon\beta}{2(1-\cos\varepsilon)-\varepsilon\sin\varepsilon}$	$(3\alpha-1)\beta$	$-\frac{\varepsilon\sin\varepsilon\alpha-1+\cos\varepsilon-\cos\varepsilon\beta+\cos\varepsilon\alpha}{2(1-\cos\varepsilon)-\varepsilon\sin\varepsilon}$	$-(3\beta-1)\alpha$	$\frac{\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\beta}{\sin\varepsilon}-1}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	$\frac{1-3\beta^2}{2}$	$-\frac{\cos\varepsilon\beta}{\cos\varepsilon}$	-1
6	d, ΔT	$\frac{\Delta T}{d}\alpha_T EI$	-1	-1	-1	-1	$-\frac{\varepsilon\tan\varepsilon/2}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	$-1{,}5$	$\frac{1}{\cos\varepsilon}-1$	0
7	$\Delta\varphi$; αl, βl	$\Delta\varphi\frac{EI}{l}$	$-\varepsilon\frac{\sin\varepsilon\alpha+\sin\varepsilon\beta-\varepsilon\cos\varepsilon\beta}{2(1-\cos\varepsilon)-\varepsilon\sin\varepsilon}$	$-2(3\beta-1)$	$-\varepsilon\frac{\sin\varepsilon\beta+\sin\varepsilon\alpha-\varepsilon\cos\varepsilon\alpha}{2(1-\cos\varepsilon)-\varepsilon\sin\varepsilon}$	$-2(3\alpha-1)$	$-\frac{\varepsilon^2\frac{\sin\varepsilon\beta}{\sin\varepsilon}}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	-3β	$\frac{\varepsilon\sin\varepsilon\beta}{\cos\varepsilon}$	0
8	Δ	$\Delta\frac{EI}{l^2}$	$-\frac{\varepsilon^2/2}{1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}}$	-6	$\frac{\varepsilon^2/2}{1-\frac{\varepsilon/2}{\tan\varepsilon/2}}$	6	$-\frac{\varepsilon^2}{1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}}$	-3	—	—

Tabelle 4 Biegemomente M, Querkräfte Q nach Theorie I. und II. Ordnung für beliebig gelagerte Stäbe

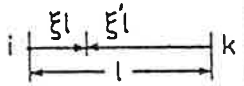
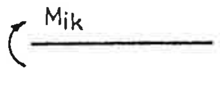
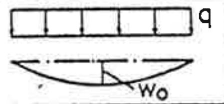
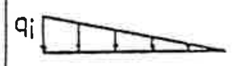
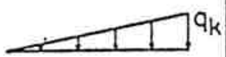
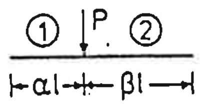
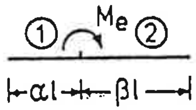
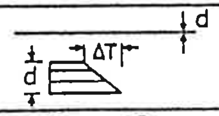
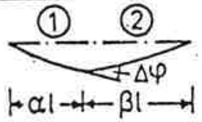
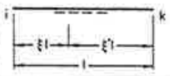
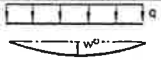
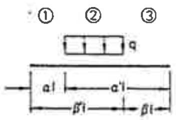
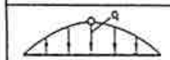
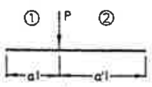
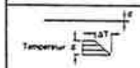
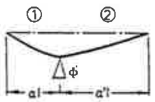
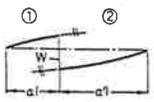
	Lastfall	Faktor	Bereich	M $(\overset{+M}{\curvearrowright})$ Th. II. O.	M I. O.	Ql $(\uparrow \overset{+Q}{—} \downarrow)$ Th. II. O.	Ql I. O.	$Q_{ik}l$ Th. II. O.	$Q_{ik}l$ I. O.	$Q_{ki}l$ Th. II. O.	$Q_{ki}l$ I. O.
											
1		M_{ik}		$\frac{\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	ξ'	$-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	-1	$-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}$	-1	$-\frac{\varepsilon}{\sin\varepsilon}$	-1
2		M_{ki}		$-\frac{\sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}$	$-\xi$	$-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}$	-1	$-\frac{\varepsilon}{\sin\varepsilon}$	-1	$-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}$	-1
3		$(q l^2 + 8 N w_o)$		$\frac{1}{\varepsilon^2}\left[\frac{\cos\varepsilon(0{,}5-\xi)}{\cos\varepsilon/2}-1\right]$	$\frac{1}{2}\xi\xi'$	$\frac{\sin\varepsilon(0{,}5-\xi)}{\varepsilon\cos\varepsilon/2}$	$\frac{1}{2}-\xi$	$\frac{\tan\varepsilon/2}{\varepsilon}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{\tan\varepsilon/2}{\varepsilon}$	$-\frac{1}{2}$
4		$q_i l^2$		$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}-\xi'\right)$	$\frac{1}{6}(\xi'-\xi'^3)$	$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(1-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}\right)$	$\frac{1}{6}(3\xi'^2-1)$	$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}\right)$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\varepsilon}{\sin\varepsilon}-1\right)$	$-\frac{1}{6}$
5		$q_k l^2$		$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}-\xi\right)$	$\frac{1}{6}(\xi-\xi^3)$	$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}-1\right)$	$\frac{1}{6}(1-3\xi^2)$	$\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\varepsilon}{\sin\varepsilon}-1\right)$	$\frac{1}{6}$	$-\frac{1}{\varepsilon^2}\left(1-\frac{\varepsilon}{\tan\varepsilon}\right)$	$-\frac{1}{3}$
6		Pl	①	$\frac{\sin\varepsilon\beta\ \sin\varepsilon\xi}{\varepsilon\sin\varepsilon}$	$\beta\xi$	$\frac{\sin\varepsilon\beta\cos\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}$	β	$\frac{\sin\varepsilon\beta}{\sin\varepsilon}$	β	$-\frac{\sin\varepsilon\alpha}{\sin\varepsilon}$	$-\alpha$
			②	$\frac{\sin\varepsilon\alpha\ \sin\varepsilon\xi'}{\varepsilon\sin\varepsilon}$	$\alpha\xi'$	$-\frac{\sin\varepsilon\alpha\cos\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	$-\alpha$				
7		M_e	①	$-\frac{\cos\varepsilon\beta\ \sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}$	$-\xi$	$-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\beta\cos\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}$	-1	$-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\beta}{\sin\varepsilon}$	-1	$-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\alpha}{\sin\varepsilon}$	-1
			②	$\frac{\cos\varepsilon\alpha\ \sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	ξ'	$-\frac{\varepsilon\cos\varepsilon\alpha\cos\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	-1				
8		$\frac{\Delta T}{d}\alpha_T EI$		$\frac{\sin\varepsilon\xi+\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}-1$	0	$\varepsilon\frac{\cos\varepsilon\xi-\cos\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	0	$\varepsilon\tan\varepsilon/2$	0	$-\varepsilon\tan\varepsilon/2$	0
9		$Nl\,\Delta\varphi$	①	$\frac{\sin\varepsilon\beta\ \sin\varepsilon\xi}{\varepsilon\sin\varepsilon}$	$\beta\xi$	$\frac{\sin\varepsilon\beta\cos\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}$	β	$\frac{\sin\varepsilon\beta}{\sin\varepsilon}$	β	$-\frac{\sin\varepsilon\alpha}{\sin\varepsilon}$	$-\alpha$
			②	$\frac{\sin\varepsilon\alpha\ \sin\varepsilon\xi'}{\varepsilon\sin\varepsilon}$	$\alpha\xi'$	$-\frac{\sin\varepsilon\alpha\cos\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}$	$-\alpha$				

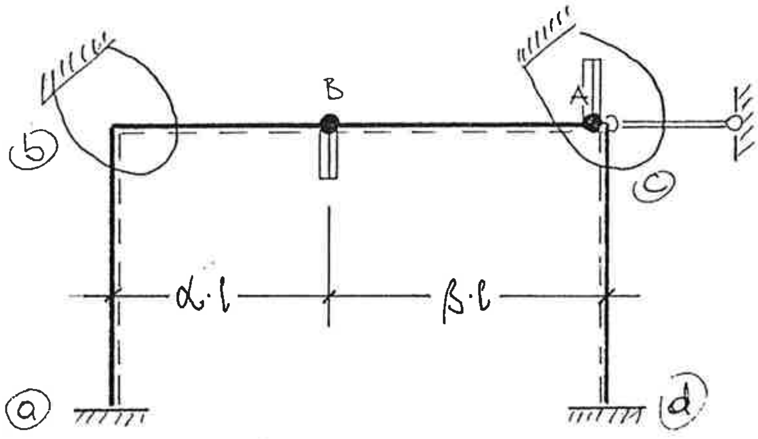
Tabelle 5 : Durchbiegungen $\Delta w(\xi)$ aus [10]

	Bereich	Theorie I. Ordnung $\Delta w(\xi) =$	Theorie II. Ordnung $\Delta w(\xi) =$
		$\frac{1}{6}(\xi' - \xi'^3)\frac{M_i l^2}{EI}$	$\left(\frac{\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon} - \xi'\right)\frac{M_i}{N}$
		$\frac{1}{6}(\xi - \xi^3)\frac{M_k l^2}{EI}$	$\left(\frac{\sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon} - \xi\right)\frac{M_k}{N}$
 Vorverformung quadrat. Parabel		$\frac{\xi\xi'}{24}(1 + \xi\xi' + 12\varrho)\frac{ql^4}{EI}$	$\left[\frac{\gamma}{\varepsilon^2}\left(\frac{\cos\varepsilon(0{,}5-\xi)}{\cos\varepsilon/2} - 1\right) - \frac{\xi\xi'}{2}\right]\frac{ql^2 + 8Nw^0}{N}$
	①	$\frac{1}{24}(\alpha'^2 - \beta^2)\xi(2 - \alpha'^2 - \beta^2 - 2\xi^2 + 12\varrho)\frac{ql^4}{EI}$	$\left[\frac{\gamma\sin\varepsilon\xi}{\varepsilon^2\sin\varepsilon}(\cos\varepsilon\beta - \cos\varepsilon\alpha') - \frac{\xi}{2}(\alpha'^2 - \beta^2)\right]\frac{ql^2}{N}$
	②	$\frac{1}{24}[(\alpha'^2 - \beta^2)\xi(2 - \alpha'^2 - \beta^2 - 2\xi^2 + 12\varrho) + (\xi-\alpha)^4 - 12(\xi-\alpha)^2\varrho]\frac{ql^4}{EI}$	$\left[\frac{\gamma}{\varepsilon^2}\left(\frac{\cos\varepsilon\beta\sin\varepsilon\xi + \cos\varepsilon\alpha\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon} - 1\right) - \frac{1}{2}(\xi\xi' - \xi\beta^2 - \xi'\alpha^2)\right]\frac{ql^2}{N}$
	③	$\frac{1}{24}(\beta'^2 - \alpha^2)\xi'(2 - \beta'^2 - \alpha^2 - 2\xi'^2 + 12\varrho)\frac{ql^4}{EI}$	$\left[\frac{\gamma\sin\varepsilon\xi'}{\varepsilon^2\sin\varepsilon}(\cos\varepsilon\alpha - \cos\varepsilon\beta') - \frac{\xi'}{2}(\beta'^2 - \alpha^2)\right]\frac{ql^2}{N}$
		$\frac{\xi' - \xi'^3}{360}(7 - 3\xi'^2 + 60\varrho)\frac{q_i l^4}{EI}$	$\left[\frac{\gamma}{\varepsilon^2}\left(\frac{\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon} - \xi'\right) - \frac{\xi' - \xi'^3}{6}\right]\frac{q_i l^2}{N}$
		$\frac{\xi - \xi^3}{360}(7 - 3\xi^2 + 60\varrho)\frac{q_k l^4}{EI}$	$\left[\frac{\gamma}{\varepsilon^2}\left(\frac{\sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon} - \xi\right) - \frac{\xi - \xi^3}{6}\right]\frac{q_k l^2}{N}$
 quadrat. Parabel		$\frac{1}{90}[(1 + \xi\xi')^3 - 1 + 30\xi\xi'(1 + \xi\xi')\varrho]\frac{ql^4}{EI}$	$\left\{\frac{4\gamma}{\varepsilon^2}\left[\frac{2}{\varepsilon^2}\left(\frac{\cos\varepsilon(0{,}5-\xi)}{\cos\varepsilon/2} - 1\right) - \xi\xi'\right] - \frac{1}{3}\xi\xi'(1 + \xi\xi')\right\}\frac{ql^2}{N}$
	①	$\frac{\alpha'\xi}{6}(1 - \alpha'^2 - \xi^2 + 6\varrho)\frac{Pl^3}{EI}$	$\left(\frac{\gamma\sin\varepsilon\alpha'\sin\varepsilon\xi}{\varepsilon\sin\varepsilon} - \alpha'\xi\right)\frac{Pl}{N}$
	②	$\frac{\alpha\xi'}{6}(1 - \alpha^2 - \xi'^2 + 6\varrho)\frac{Pl^3}{EI}$	$\left(\frac{\gamma\sin\varepsilon\alpha\sin\varepsilon\xi'}{\varepsilon\sin\varepsilon} - \alpha\xi'\right)\frac{Pl}{N}$
	①	$-\frac{\xi}{6}(1 - 3\alpha'^2 - \xi^2)\frac{M^e l^2}{EI}$	$\left(\xi - \frac{\cos\varepsilon\alpha'\sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}\right)\frac{M^e}{N}$
	②	$\frac{\xi'}{6}(1 - 3\alpha^2 - \xi'^2)\frac{M^e l^2}{EI}$	$\left(\frac{\cos\varepsilon\alpha\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon} - \xi'\right)\frac{M^e}{N}$
		$\frac{1}{2}\xi\xi' l^2\frac{\Delta T}{d}\alpha_T$	$\frac{\gamma}{\varepsilon^2}\left(\frac{\cos\varepsilon(0{,}5-\xi)}{\cos\varepsilon/2} - 1\right)l^2\frac{\Delta T}{d}\alpha_T$
	①	$\alpha'\xi l\phi$	$\frac{\gamma\sin\varepsilon\alpha'\sin\varepsilon\xi}{\varepsilon\sin\varepsilon}l\phi$
	②	$\alpha\xi' l\phi$	$\frac{\gamma\sin\varepsilon\alpha\sin\varepsilon\xi'}{\varepsilon\sin\varepsilon}l\phi$
	①	$-\xi W$	$-\frac{\cos\varepsilon\alpha'\sin\varepsilon\xi}{\sin\varepsilon}W$
	②	$\xi' W$	$\frac{\cos\varepsilon\alpha\sin\varepsilon\xi'}{\sin\varepsilon}W$

GLEICHUNGSSYSTEM BEI FLIESSGELENKTHEORIE

FLIESSGELENKE DURCH "KNICKWINKEL" BERÜCKSICHTIGT

=> KEINE ÄNDERUNG DES ELAST. SYSTEMS



$$Z_1 = Z_{11}\cdot\varphi_b + Z_{12}\cdot\varphi_c + Z_{13}\cdot\vartheta + Z_{14}\cdot\rho_A + Z_{15}\cdot\rho_B + Z_{10} = 0$$

$$Z_2 = Z_{21}\cdot\varphi_b + Z_{22}\cdot\varphi_c + Z_{23}\cdot\vartheta + Z_{24}\cdot\rho_A + Z_{25}\cdot\rho_B + Z_{20} = 0$$

$$Z_3 = Z_{31}\cdot\varphi_b + Z_{32}\cdot\varphi_c + Z_{33}\cdot\vartheta + Z_{34}\cdot\rho_A + Z_{25}\cdot\rho_B + Z_{30} = 0$$

$$Z_4 = Z_{41}\cdot\varphi_b + Z_{42}\cdot\varphi_c + Z_{43}\cdot\vartheta + Z_{44}\cdot\rho_A + Z_{45}\cdot\rho_B + Z_{40} = +\Pi_A$$

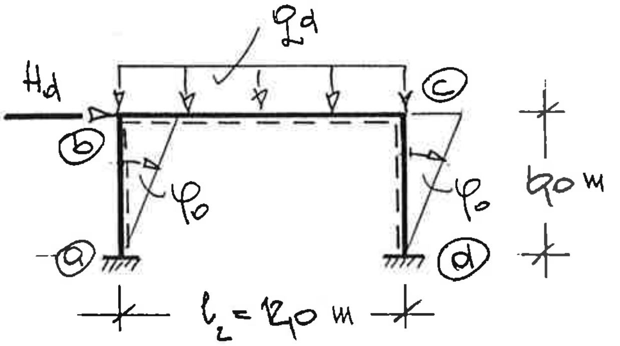
$$Z_5 = Z_{51}\cdot\varphi_b + Z_{52}\cdot\varphi_c + Z_{53}\cdot\vartheta + Z_{54}\cdot\rho_A + Z_{55}\cdot\rho_B + Z_{50} = -\Pi_B$$

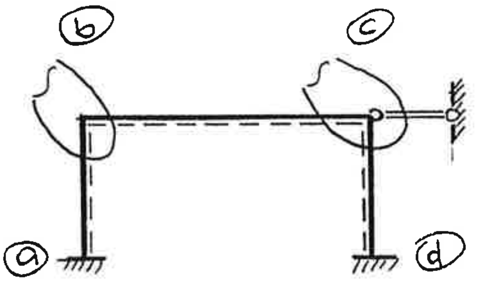
	φ_b	φ_c	ϑ	ρ_A	ρ_B	LF
b	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}	$-Z_{10}$
c	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}	Z_{25}	$-Z_{20}$
ϑ	Z_{31}	Z_{32}	Z_{33}	Z_{34}	Z_{35}	$-Z_{30}$
A	Z_{41}	Z_{42}	Z_{43}	Z_{44}	Z_{45}	$-Z_{40} \pm \Pi_A$
B	Z_{51}	Z_{52}	Z_{53}	Z_{54}	Z_{55}	$-Z_{50} \pm \Pi_B$

3.3 Schematischer Ablauf der Berechnung - ideal starre Knoten

SYSTEM UND BELASTUNG

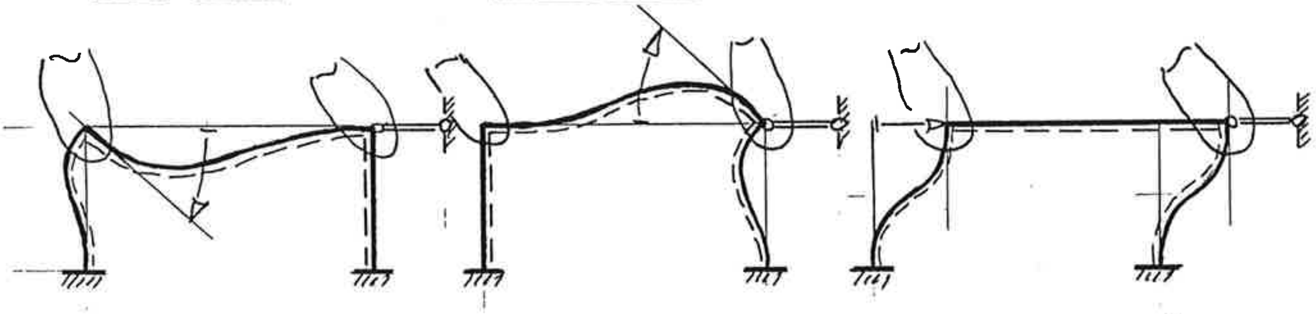
VOLLEINSPANNZUSTAND





EINHEITSVERFORMUNGEN

LF: $\varphi_b = 1,0$ LF: $\varphi_c = 1,0$ LF: $\psi_c = 1,0$

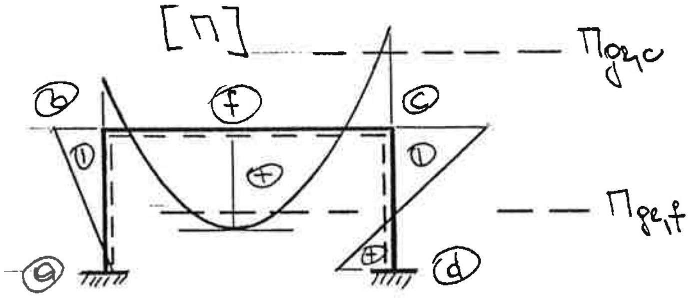


VOLLEINSPANNZUSTAND: LF: q_d, H_d, φ_0

GLEICHUNGSSYSTEM:

$$a_{11} \cdot \varphi_b + a_{12} \cdot \varphi_c + a_{13} \cdot \psi_c + a_{10} = 0$$
$$a_{21} \cdot \varphi_b + a_{22} \cdot \varphi_c + a_{23} \cdot \psi_c + a_{20} = 0$$
$$a_{31} \cdot \varphi_b + a_{32} \cdot \varphi_c + a_{33} \cdot \psi_c + a_{30} = 0$$

SCHNITTGRÖSSEN M, Q, N



MOMENTENVERLAUF

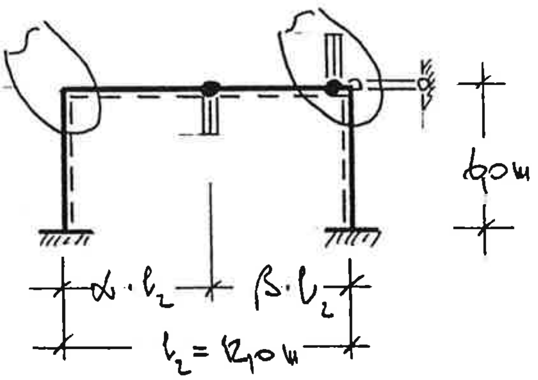
$M_{cb} > M_{gr,c}$ UND $M_f > M_{gr,f}$ =>

FLIESSGELENKE A UND B

M_{gr} AUS INTERAKTION

$M_{gr} = M(N,Q)$

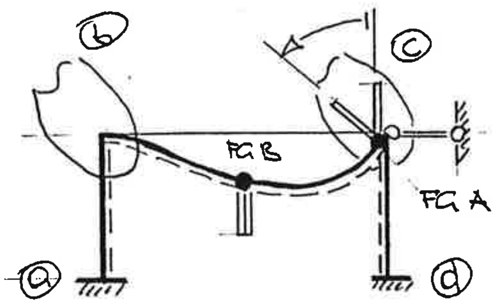
SYSTEM MIT FG A UND B



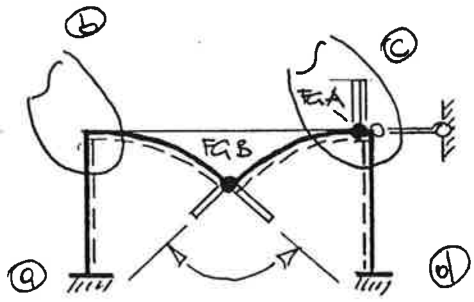
... VOLLEINSPANNZUSTAND

EINHEITSVERFORMUNGEN

LF: $\varphi_b = 1,0$, LF: $\varphi_c = 1,0$, LF: $\delta_c = 1,0$ WIE VORHER



LF: $\rho_A = 1,0$



LF: $\rho_B = 1,0$

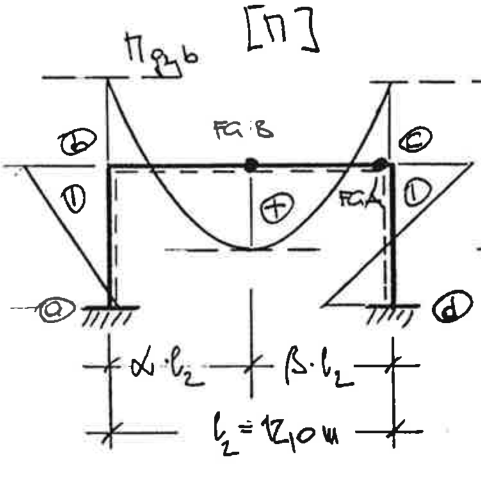
VOLLEINSPANNZUSTAND

LF: q_d, H_d, φ_0

GLEICHUNGSSYSTEM

$$
\begin{aligned}
a_{11}\cdot\varphi_b + a_{12}\cdot\varphi_c + a_{13}\cdot\vartheta_c + a_{14}\cdot\rho_A + a_{15}\cdot\rho_B + a_{10} &= 0\\
a_{21}\,\varphi_b + a_{22}\cdot\varphi_c + a_{23}\cdot\vartheta_c + a_{24}\cdot\rho_A + a_{25}\cdot\rho_B + a_{20} &= 0\\
a_{31}\,\varphi_b + a_{32}\,\varphi_c + a_{33}\cdot\vartheta_c + a_{34}\cdot\rho_A + a_{35}\cdot\rho_B + a_{30} &= 0\\
a_{41}\cdot\varphi_b + a_{42}\cdot\varphi_c + a_{43}\cdot\vartheta_c + a_{44}\cdot\rho_A + a_{45}\cdot\rho_B + a_{40} &= M_{pl,A}\\
a_{51}\cdot\varphi_b + a_{52}\cdot\varphi_c + a_{53}\cdot\vartheta_c + a_{54}\cdot\rho_A + a_{55}\cdot\rho_B + a_{50} &= -M_{pl,B}
\end{aligned}
$$

SCHNITTGRÖSSEN M, Q, N



... MOMENTENVERLAUF

MIT $M_b = M_{pl,b}$ TRAGLAST DES SYSTEMS ERREICHT (DET A → 0)

(=> KINEMAT. BALKENKETTE IM RIEGEL)

3.4 Theorie der nachgiegigen Knoten

DAS VERFORMUNGSVERHALTEN DES KNOTENS aus [8]

Das elastisch-plastische Last-Verformungsverhalten

Definition des Knotens als Element

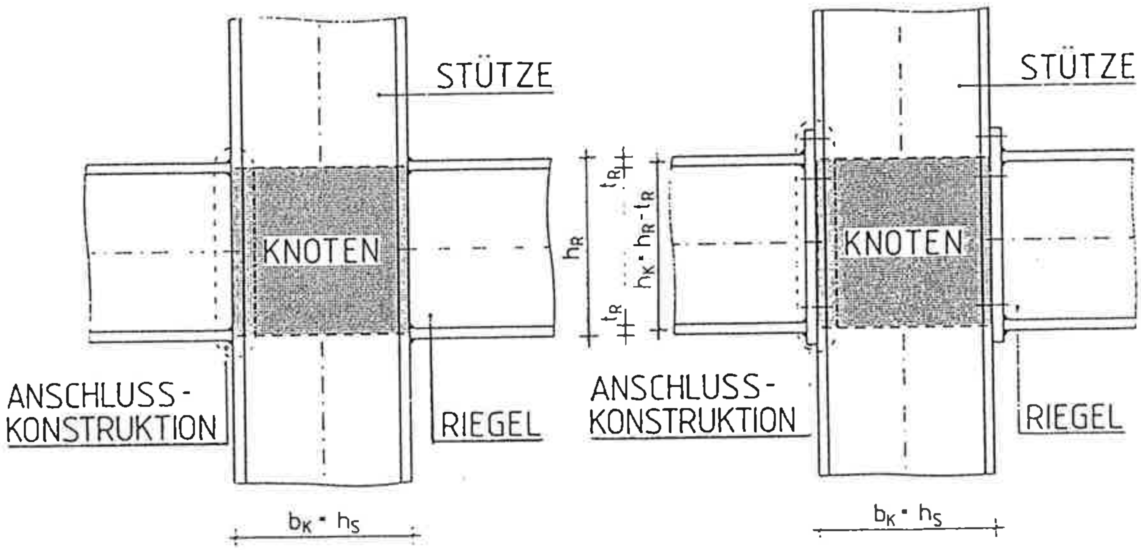
Im Gegensatz zu der bisher üblichen Betrachtungsweise wird der Knoten in der Systemberechnung nicht als starrer Punkt im Schnittpunkt der Systemlinien betrachtet, sondern als Element mit endlichen Abmessungen und elastisch-plastischem Last-Verformungsverhalten definiert.

Damit ergeben sich für die Systemberechnung drei verschiedene Elemente, nämlich:

- Riegel: R
- Stützen: S
- Knoten: K

In Abb. 2 sind zwei Beispiele von steifenlos ausgeführten Knoten dargestellt, wobei im Fall a der Riegel an die Stütze angeschweisst und im Fall b ein Stirnplattenanschluss ausgeführt ist.

In beiden Fällen ist die Nachgiebigkeit des Knotenelementes selbst gleich. Die beiden Varianten unterscheiden sich durch die Nachgiebigkeit des jeweiligen Anschlusses (Schweissanschluss bzw. Schraubanschluss).



a) Schweissanschluss:
Anschlussnachgiebigkeit bestimmt durch:
— Schweissnähte

b) Schraubanschluss:
Anschlussnachgiebigkeit bestimmt durch:
— Schweissnähte
— Stirnplatte
— Schrauben
— Stützenflansch

Abb. 2: Steifenlose Knoten

Modellbildung für den Knoten

EINFÜHRUNG

Aufgrund von systematischen Versuchen [3] an steifenlosen Knoten ist es möglich, ein mechanisches Modell für den Knoten selbst zu entwickeln, das das elastisch-plastische Verformungsverhalten zutreffend beschreibt.

Dabei wurde der geschweisste Anschluss des Riegels an die Stütze gewählt, um zunächst die Anschlussnachgiebigkeit als Parameter auszuschliessen. In weiteren Untersuchungen [5] wurden statt der Schweissanschlüsse Stirnplattenanschlüsse an steifenlose Knoten untersucht.

Abb. 3a zeigt einen symmetrisch belasteten Innenknoten, der steifenlos mit geschweisstem Anschluss ausgeführt ist.

Durch den Wegfall der Aussteifungsrippen verformen die Kräfte aus den Riegelflanschen den Knoten im Einleitungsbereich. Es handelt sich dabei um ein Krafteinleitungsproblem, bei dem das aufnehmbare Moment des steifenlosen Knotens durch das plastische Beulen des Knotensteges infolge Druck aus dem Riegelflansch begrenzt wird.

Dieses Krafteinleitungsproblem kann durch ein Federpaar, im weiteren als „Einleitungsfedern" bezeichnet, dargestellt werden. Die Verformungen des Federpaares bedingen eine Endverdrehung ϑ_E des Riegels. (Der Index E steht für „Einleitung").

Den Zusammenhang zwischen dem Riegelanschlussmoment M und der Verdrehung ϑ_E für einen symmetrisch belasteten Innenknoten zeigt das Diagramm in Abb. 3a.

Bei Erreichen des vollplastischen Grenzmomentes M_{pK} des Knotens tritt die Grenzverdrehung ϑ_p auf. Nach Überschreiten von ϑ_p fällt das aufnehmbare Moment ab, es bildet sich eine plastische Beule im Knotensteg (siehe Foto) infolge Druck aus dem Riegelflansch und eine Fliesszone beim Zugflansch.

Abb. 3b zeigt einen steifenlosen Randknoten mit geschweisstem Riegelanschluss unter Momentenbelastung.

Gegenüber dem symmetrisch beanspruchten Innenknoten bewirken die Kräfte aus den Riegelflanschen nicht nur eine Verformung aus der Krafteinleitung, sondern auch eine Deformation des gesamten Knotenelementes aus der im Knoten wirkenden Querkraft Q. Das Verhalten des Knotens bei einer Querkraftbeanspruchung wird durch eine Diagonalfeder, im weiteren als „Querkraftfeder" bezeichnet, beschrieben.

Die Verformung der Querkraftfeder bewirkt eine zusätzliche Riegelendverdrehung ϑ_Q (der Index Q steht hier für „Deformation infolge Querkraft Q im Knoten"). Somit ergibt sich die Gesamtverdrehung $\vartheta_E + \vartheta_Q$.

Das Diagramm in Abb. 3b zeigt den Zusammenhang von Moment M und Riegelendverdrehung $\vartheta_E + \vartheta_Q$, wobei die Anteile aus Einleitung und Querkraft getrennt gekennzeichnet sind. Auch hier gehört zum vollplastischen Grenzmoment M_{pK} ein Grenzwert ϑ_p für die Verdrehung. Der steifenlose Knoten ist demnach weicher, und die Deformationen werden entsprechend grösser.

EINFLUSS DER STÜTZENNORMALKRAFT AUF DEN KNOTEN

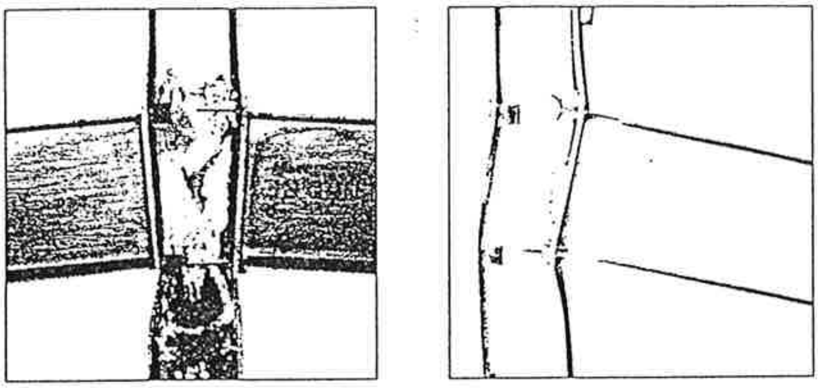
Bei den Versuchen [6] konnte für die Einleitungsfeder keine Interaktion mit der Normalkraft in der Stütze festgestellt werden. Der Anfangsanstieg der Querkraftfeder ist ebenfalls von der Normalkraft im Knoten unabhängig.

Für das plastische Grenzmoment M_{pQ} muss bis zu $N^* = 0{,}5\ N_p$ keine Interaktion berücksichtigt werden. Für $N^* \geq 0{,}5\ N_p$ muss das plastische Grenzmoment der Querkraftfeder wie folgt abgemindert werden:

$$M_{pQ,N} = M_{pQ} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{N^*}{N_p}\right)^2}$$

Abb. 3: Verformungsverhalten steifenloser Rand- und Innenknoten mit zugehörigen Federmodellen.

Foto bei Versuchsende

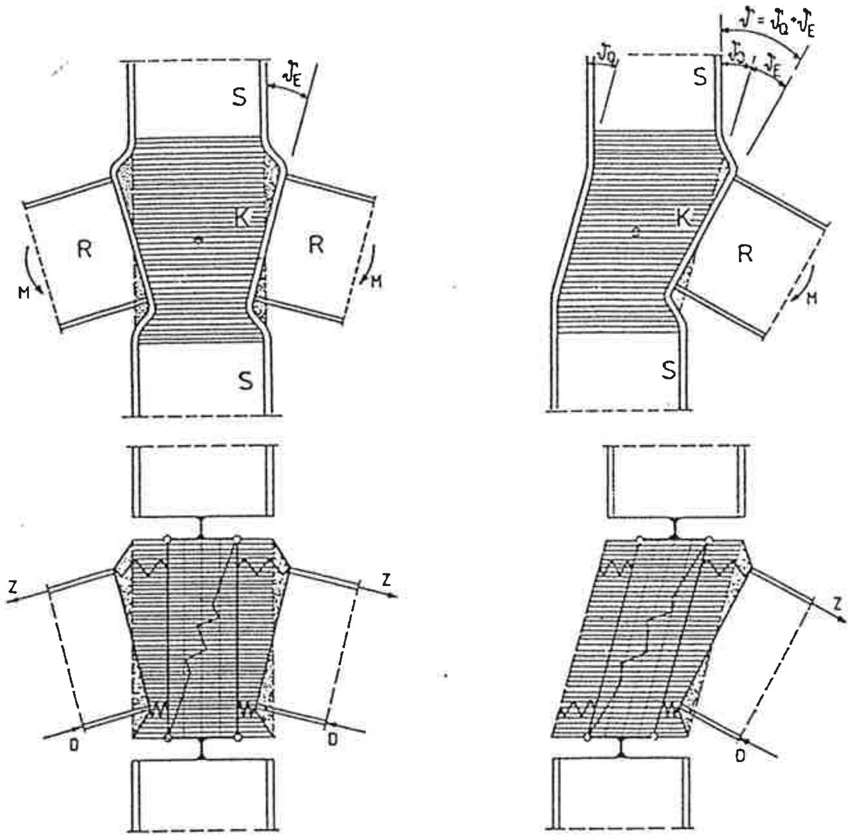


a) Innenknoten
Verformung aus
Einleitung (ϑ_E)

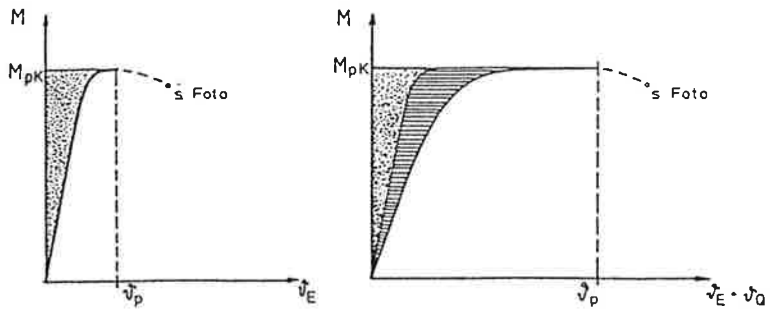
b) Randknoten
Verformung aus
Einleitung (ϑ_E)
und Querkraft (ϑ_Q)

Verformungseinflüsse

Tragmodell



M-ϑ-Verhalten (Diagramm)



ALLGEMEINES FEDERMODELL

Aufgrund dieser Überlegungen konnte dann ein allgemein gültiges Federmodell gefunden werden [3], das in Abb. 4 dargestellt ist.

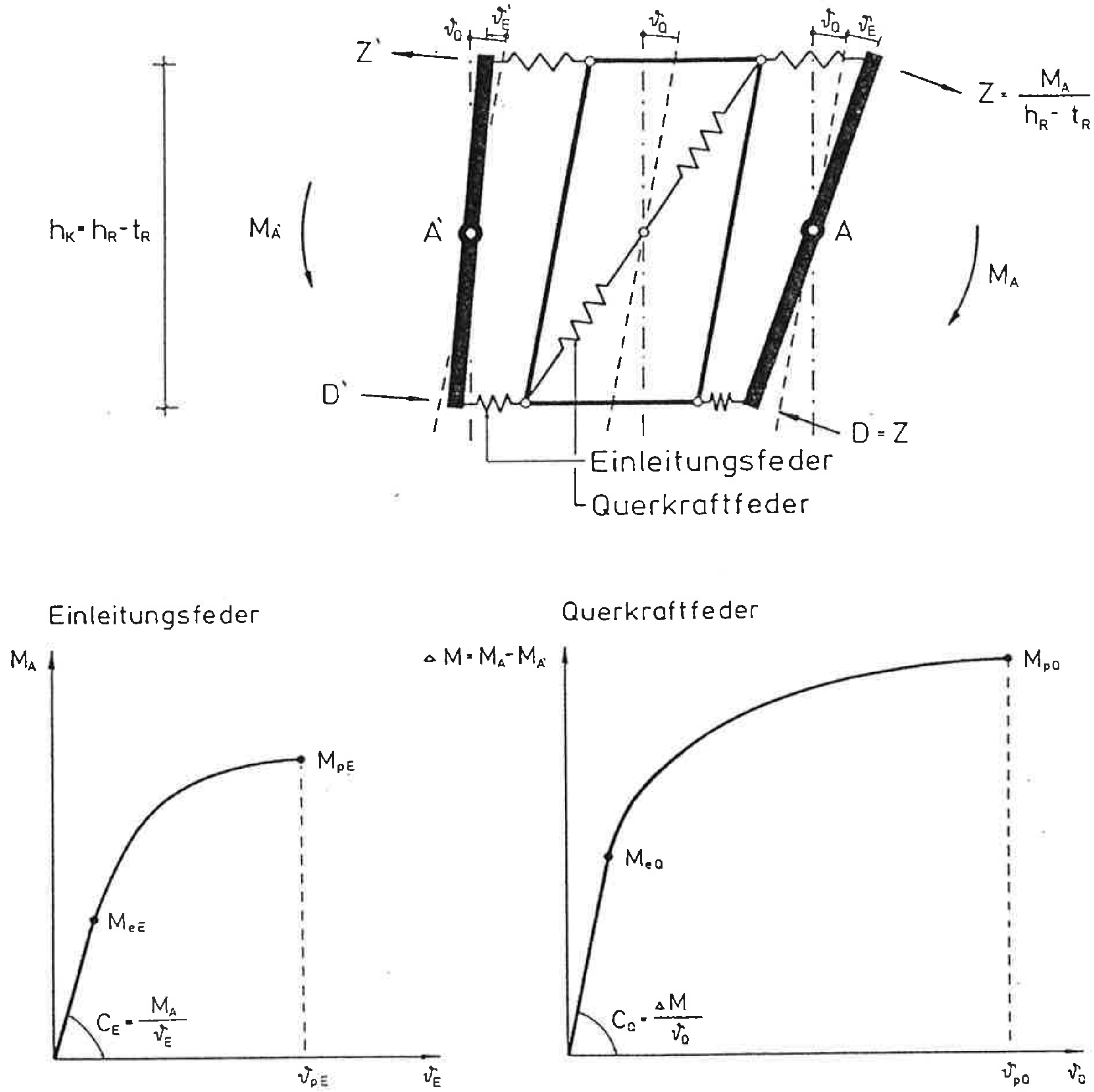


Abb. 4: Federmodell für den Knoten

Das gesamte Verformungsverhalten eines beliebigen Knotens lässt sich mit diesem Modell mechanisch sauber beschreiben. Wird an einem Schnitt im Punkt A das Moment M_A eingeleitet und dieses Moment durch das Kräftepaar $M_A/(h_R - t_R)$ ersetzt, so wirken diese Kräfte vorerst auf die Einleitungsfedern, die sich entsprechend verformen. Daraus resultiert die Verdrehung ϑ_E im Punkt A. In analoger Weise wirkt am Schnitt im Punkt A' das Moment $M_{A'}$ und erzeugt die Verdrehung ϑ'_E.

Der Zusammenhang zwischen Moment M und Verdrehung ϑ_E ist durch eine Drehfeder mit elastisch-plastischem Verhalten darstellbar. Abb. 4 zeigt eine entsprechende Federkurve. Zur vollständigen Beschreibung dieser Federkurve sind folgende Kennwerte notwendig:

M_{eE}	elastisches Grenzmoment	aus Einleitung
M_{pE}	plastisches Grenzmoment	
ϑ_{pE}	Grenzverdrehung	
C_E	Drehfedersteifigkeit (Ursprungsanstieg)	

Diese Kennwerte wurden aus Versuchen ermittelt und werden im Kapitel 3 quantifiziert.

Auf die Querkraftfeder wirkt nur die Momentendifferenz $\Delta M = M_A - M_{A'}$ ein. Diese Momentendifferenz beansprucht den Knoten mit der Querkraft $Q = (M_A - M_{A'})/(h_R - t_R)$. Daraus resultiert eine Verdrehung ϑ_Q des gesamten Knotens.

Der Zusammenhang zwischen Momentendifferenz ΔM und Knotenverdrehung ϑ_Q kann ebenfalls durch eine Drehfeder mit elastisch-plastischem Verhalten dargestellt werden. Die erforderlichen Kennwerte zur Bestimmung der Querkraftfeder sind:

M_{eQ}	elastisches Grenzmoment	aus Querkraft
M_{pQ}	plastisches Grenzmoment	
ϑ_{pQ}	Grenzverdrehung	
C_Q	Drehfedersteifigkeit	

Eine Quantifizierung dieser Kennwerte erfolgt in Kapitel 3. Das Momentenrotationsverhalten an einem Schnitt kann somit durch Hintereinanderschalten der Einleitungsfeder und der Querkraftfeder beschrieben werden. Die Einleitungsfeder reagiert auf das entsprechende Riegelendmoment, die Querkraftfeder auf die Momentendifferenz ΔM.

Anwendung des Modells auf verschiedene Knotentypen

INNENKNOTEN UNTER SYMMETRISCHER MOMENTENBELASTUNG

Da die Momentendifferenz ΔM in diesem Knoten gleich null ist, werden nur die Einleitungsfedern beansprucht. In Abb. 5 sind zwei Knotenausbildungen dargestellt, Fall a mit Einleitungssteifen und Fall b steifenlos.

Im steifenlosen Knoten treten, bedingt durch die Verformungen des Knotensteges, grössere Verdrehungen auf als beim Knoten mit Einleitungssteifen.

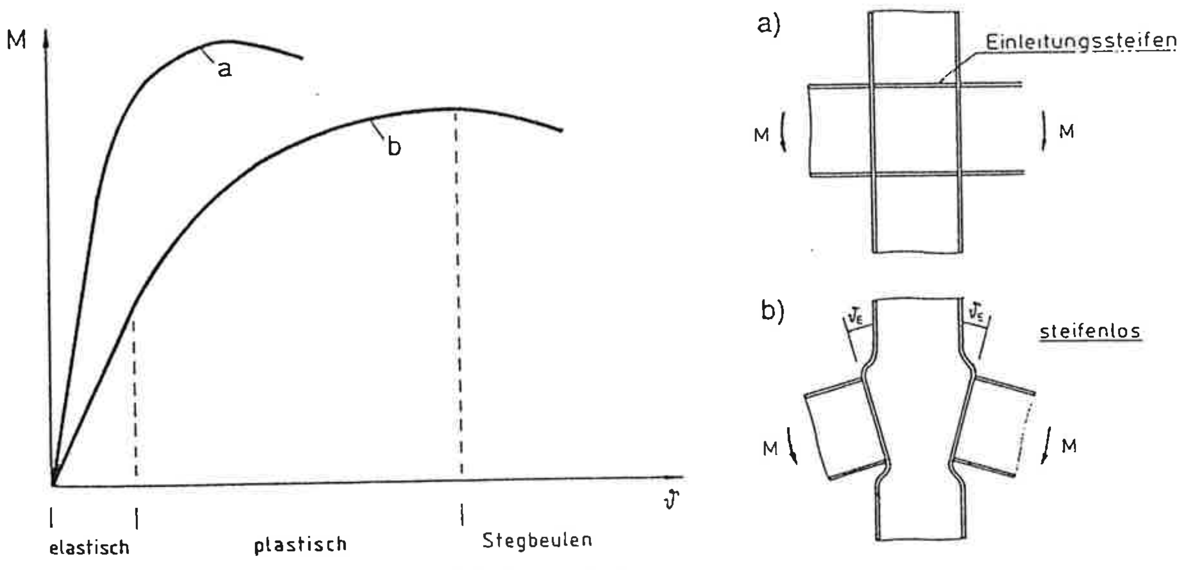


Abb. 5: Innenknoten unter symmetrischer Belastung.

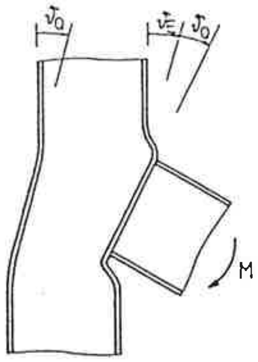
RANDKNOTEN

Für den Sonderfall eines Randknotens gilt $M_{A'} = 0$, womit sich $\Delta M = M_A$ ergibt.

Grundsätzlich können in diesem Fall zwei Versagensarten auftreten, nämlich:

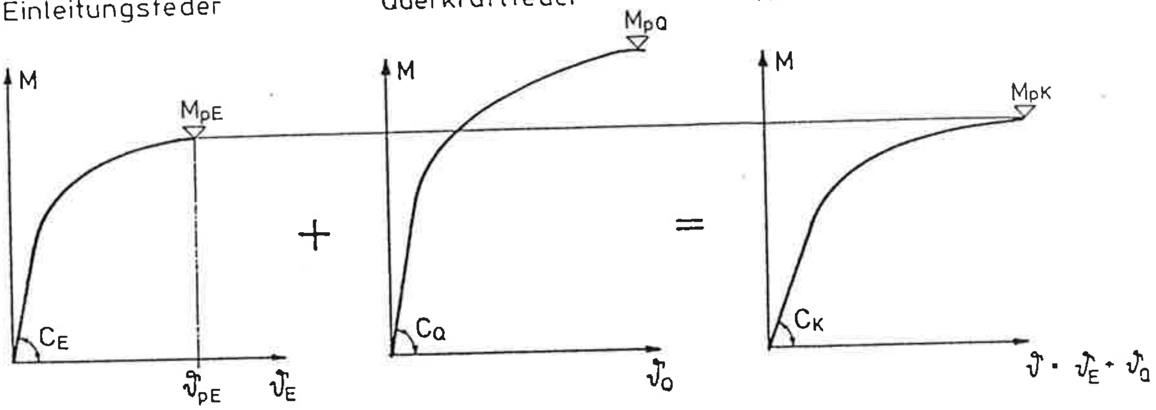
a) Versagen auf Einleitung
b) Versagen auf Querkraft

In Abb. 6 ist ein steifenloser Randknoten mit dem jeweiligen Momenten-Rotationsverhalten der Knotenfeder für Versagen auf Einleitung bzw. auf Querkraft dargestellt.



Randknoten

a) Versagen auf Einleitung



b) Versagen auf Querkraft

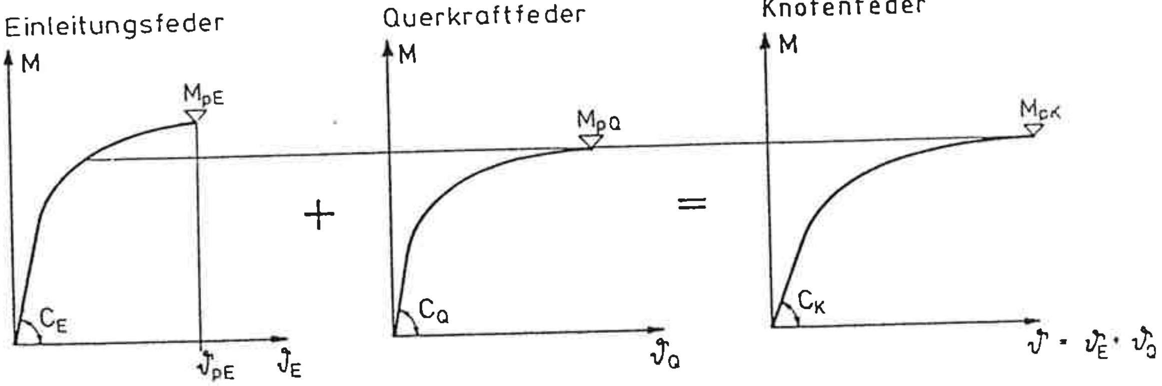


Abb. 6: Steifenlose Randknoten.

Die Gesamtverdrehung im Punkt A ergibt sich aus der Addition der Verdrehungsanteile aus Einleitung und Querkraft, wobei das aufnehmbare Moment M_{pK} im Knoten durch das plastische Grenzmoment der schwächeren Feder begrenzt wird (siehe Abb. 6).

Damit gilt allgemein

$$M_{pK} = \min (M_{pE}, M_{pQ}) \tag{1}$$

Bei steifenloser Ausbildung der Knoten versagt entweder die Einleitungs- oder die Querkraftfeder. Wenn das Versagen auf Querkraft massgebend wird, kann die Tragfähigkeit des Knotens durch das Einschweissen von Einleitungssteifen (Abb. 7) nicht gesteigert werden. Einleitungssteifen beeinflussen das Verhalten eines Knotens auf Querkraftbeanspruchung nicht.

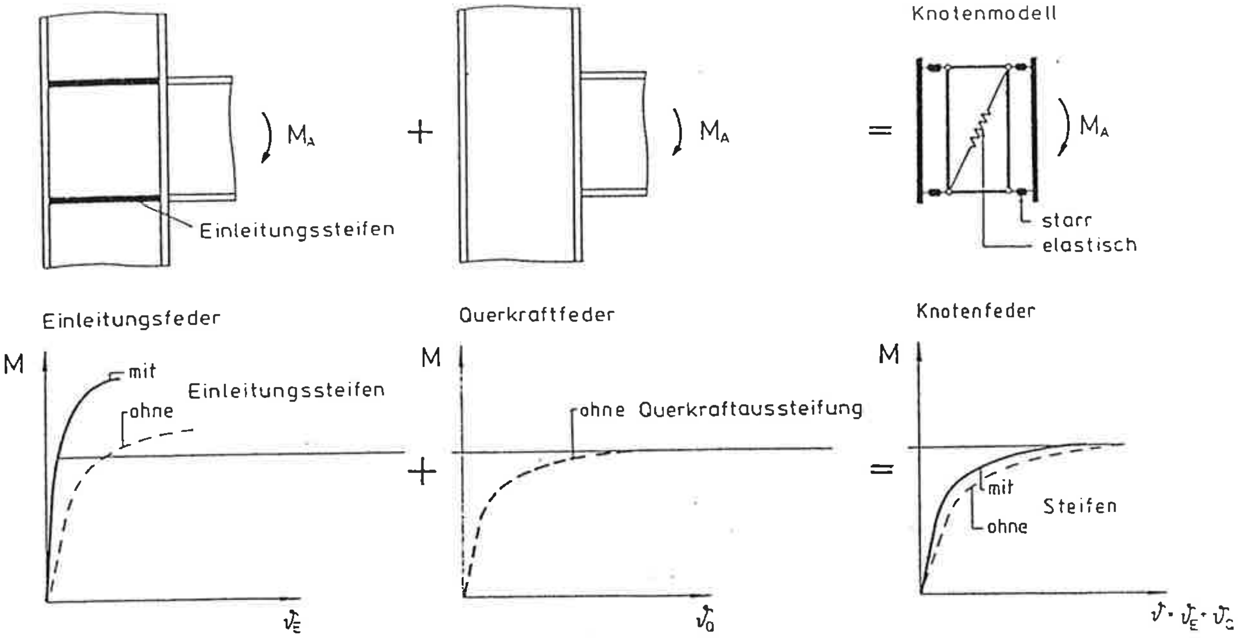


Abb. 7: Randknoten mit Einleitungssteifen.

Will man auch das Verhalten auf Querkraftbeanspruchung verbessern, muss entweder eine zusätzliche Diagonalsteife oder eine Stegverstärkung eingeschweisst werden (siehe Abb. 8).

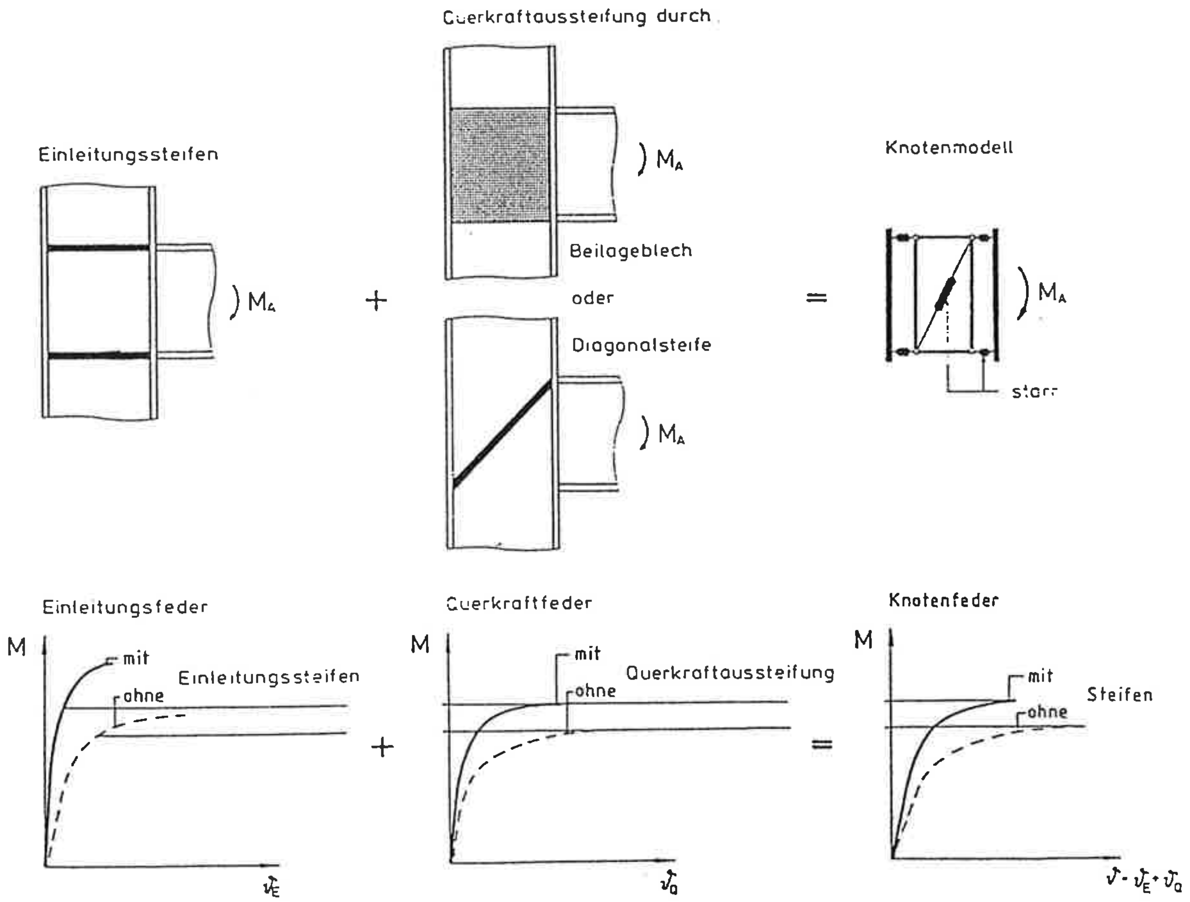


Abb. 8: Randknoten mit Einleitungssteifen und Querkraftaussteifung.

Die Versuche mit europäischen Walzprofilen nach [3] haben gezeigt, dass der Tragwiderstand des Knotens gegen Querkraft im allgemeinen höher liegt als der Tragwiderstand gegen Querkraft Q_{pS} des Stützenquerschnittes. Dies ist auch durch amerikanische Forschungen [8] bestätigt.

Für Randknoten wurde bisher vorgeschlagen [9], den Knotentragwiderstand über die Vergleichsspannungshypothese nach van Mises aus Eindrückung und Querkraft zu ermitteln. Diese Berechnungsmethode führt aber zu sehr konservativen Werten. Der Tragwiderstand des Knotens gegen Querkraft Q_{pK} liegt höher als der Tragwiderstand des Stützensteges Q_{pS} (1. Tragzustand) allein, weil auch die Flansche über Flanschbiegung Querkräfte aufnehmen können und die Ausbildung von plastischen Zonen mit Verfestigung im Stützensteg zu einer weiteren Erhöhung des Tragwiderstandes führt.

In Abb. 9 sind die einzelnen Anteile des Tragwiderstandes des Knotens dargestellt. Im Stützensteg des Knotens liefert das Querkraftfeld den bisher in Rechnung gestellten Anteil Q_{pS} (1. Tragzustand). Bei weiterer Verformungszunahme wird ein 2. Tragzustand aktiviert, in welchem die Fliessgelenke in den Stützenflanschen (Abb. 9b) zusammen mit den plastischen Zonen und Verfestigungen im Stützensteg (Abb. 9c) weitere Tragwiderstands-Anteile liefern. Die Verformungen für die einzelnen Tragzustände können den Fotos der Prüfkörper mit aufgespritzten Rastern entnommen werden.

Einleitungssteifen oder Diagonalsteifen werden bei Kenntnis des tatsächlichen Tragverhaltens des Knotens in vielen Fällen überflüssig.

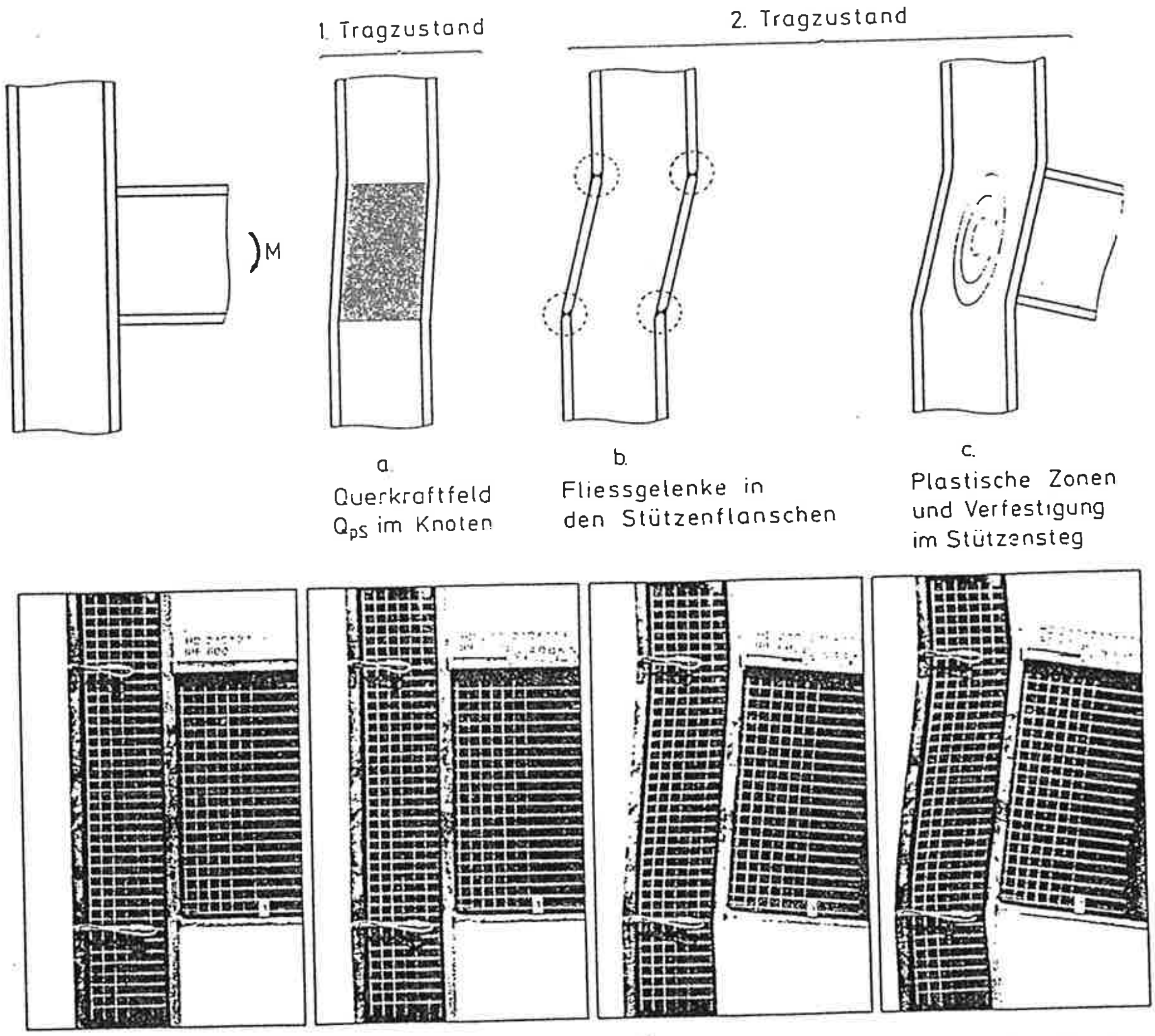


Abb. 9: Beiträge der einzelnen Profilteile zum Tragwiderstand gegen Querkraft von Randknoten.

Nachgiebigkeit verschiedener Anschlusskonstruktionen

Bisher wurde die Nachgiebigkeit des Knotens selbst betrachtet. Je nach Art des Anschlusses der Riegel an den Knoten ist zusätzlich noch die Nachgiebigkeit der Anschlusskonstruktion zu berücksichtigen.

Dies kann im allgemeinen Knotenmodell durch eine weitere elastisch-plastische Feder für die Anschlusskonstruktion berücksichtigt werden (siehe Abb. 10). Diese Feder ist durch den Ursprungsanstieg C_C, den Tragwiderstand M_{pC} und eine allfällige Rotationsbegrenzung ϑ_{pC} gegeben.

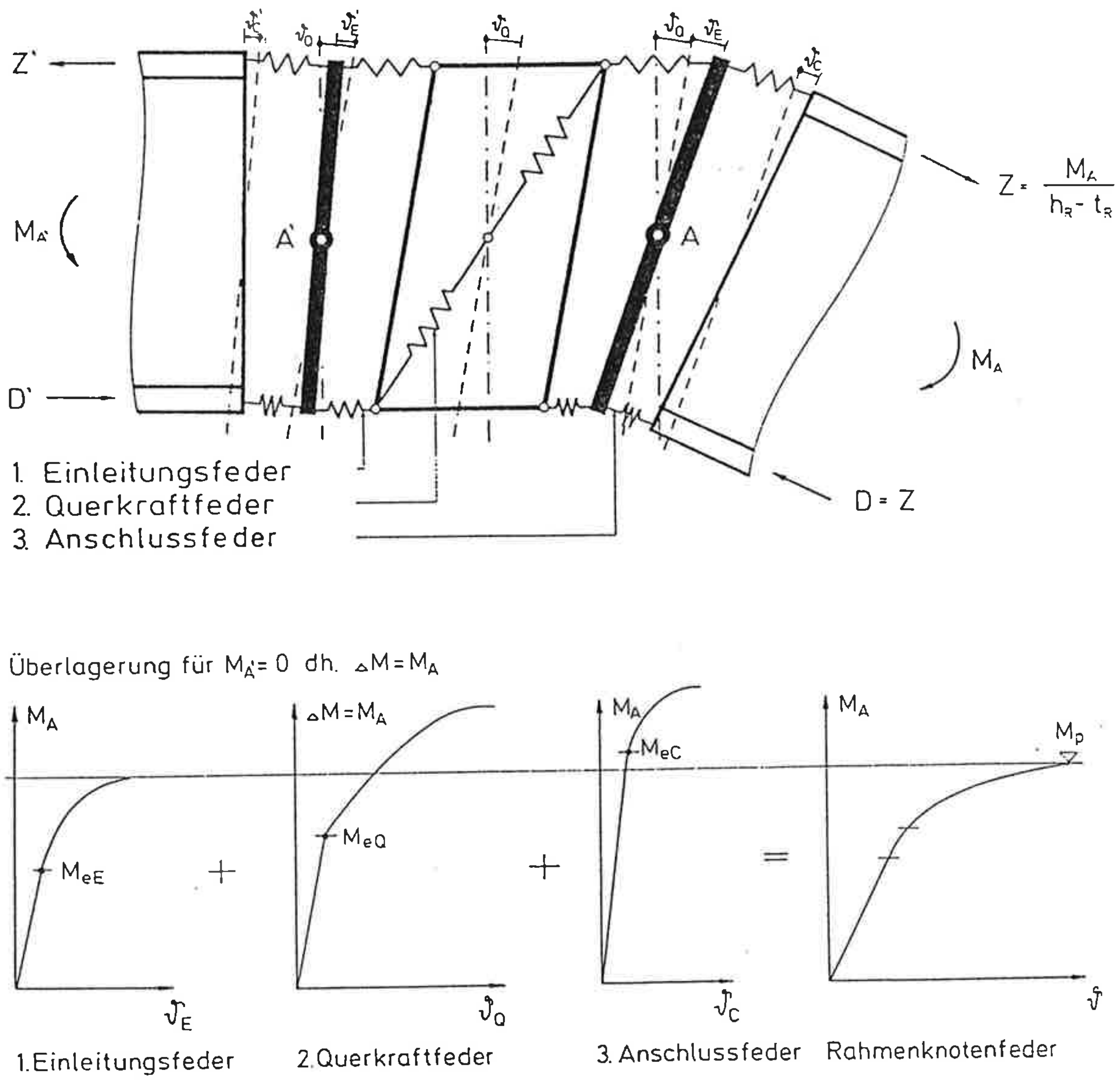


Abb. 10: Allgemeingültiges Federmodell.

Die Anschlusskonstruktionen können unterschiedlich ausgeführt werden und haben sehr stark variierende Nachgiebigkeiten. Einige Beispiele werden in Abb. 11 gezeigt.

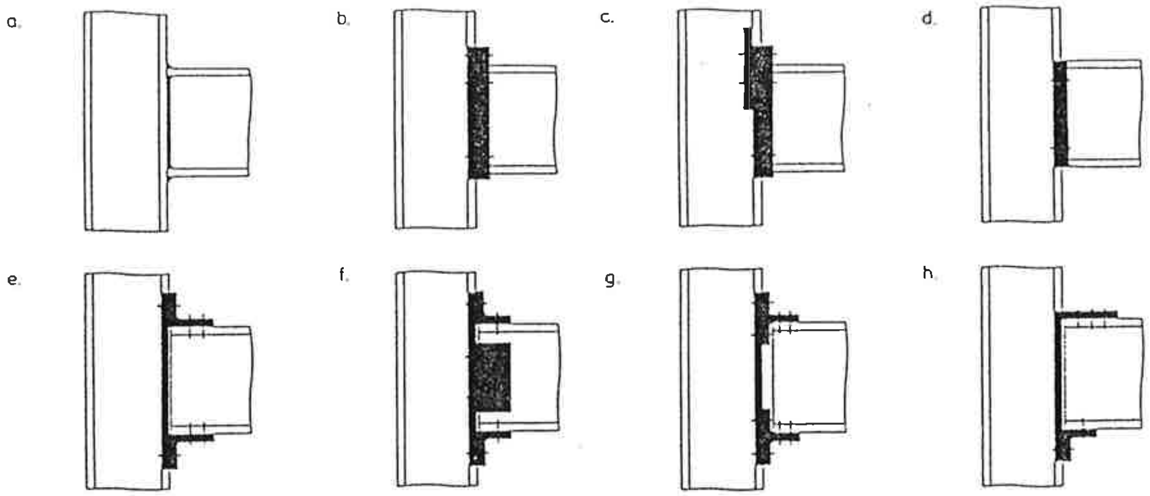


Abb. 11: Beispiele für Anschlusskonstruktionen
(die schwarz gekennzeichneten Bereiche sind Teile der Anschlusskonstruktion).

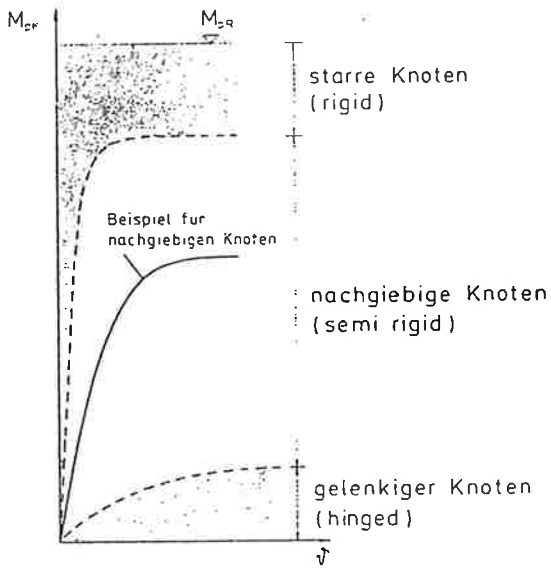


Abb. 12: M-ϑ-Verhalten der Knoten.

Die Nachgiebigkeit der Anschlusskonstruktion vergrössert die Gesamtverdrehung zu $\vartheta_Q + \vartheta_E + \vartheta_C$. Liegt die plastische Grenzlast der Anschlusskonstruktion unter der des Knotens, so wird diese für den Tragwiderstand des gesamten Knotens massgebend. Daher ist es sinnvoll, Tragwiderstand und Steifigkeit der Anschlusskonstruktion dem Tragwiderstand und der Steifigkeit des Knotens anzupassen. Betrachtet man das Gesamtverhalten eines Knotens inklusive Anschlusskonstruktion, so kann das M-ϑ-Verhalten in drei Gruppen zusammengefasst werden:

- starrer Knoten (rigid)
- nachgiebiger Knoten (semi rigid)
- gelenkiger Knoten (hinged)

Die Beispiele a, b, c, g und h von Abb. 11 sind als relativ steife Anschlüsse zu bezeichnen, während die Beispiele d (bei sehr dünnen Stirnplatten) sowie e und f einem gelenkigen Anschluss nahekommen.

Diese Arbeit behandelt nur solche Anschlusskonstruktionen, bei denen die Nachgiebigkeit ϑ_C gegenüber der Nachgiebigkeit des Knotens $\vartheta_Q + \vartheta_E$ vernachlässigt werden kann und bei denen zugleich der Tragwiderstand der Anschlusskonstruktion gleich oder grösser der des Knotens ist. Es sind dies

- geschweisste Anschlusskonstruktionen (Abb. 11a)
- Stirnplattenanschlüsse mit vorgespannten hochfesten Schrauben (Abb. 11b und c), wenn sie nach Abschnitt 5.3 dieser Arbeit nachgewiesen werden.

Für beliebige andere Anschlusskonstruktionen ist diese Arbeit sinngemäss anwendbar, wenn für die Anschlusskonstruktion die Steifigkeit C_C und der Tragwiderstand M_{pC} aus Versuchen bekannt sind.

CHARAKTERISTISCHE KNOTENKENNWERTE

Kennwerte der Einleitungsfeder

Elastischer Bereich

Das elastische Grenzdrehmoment M_{eE} kann in sehr guter Näherung allgemein wie folgt beschrieben werden (für A_e und A_{Steife} siehe Abb. 13):

$$M_{eE} = \underbrace{f_y \cdot A_e \cdot (h_R - t_R)}_{\text{Anteil Steg}} + \underbrace{f_y \cdot A_{Steife} \cdot (h_R - t_R)}_{\text{Anteil Steife}} \tag{2}$$

Der Anfangsanstieg C_E kann nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$C_E = \left(1 + \frac{A_{Steife}}{A_e}\right) \cdot \frac{(h_R - t_R)^2}{2} \cdot c_E \qquad [\text{kNmm/rad}] \tag{3}$$

Bei angenommener Dimension kN und mm in Gleichung (3) ergab sich aus den Versuchsreihen, dass **c_E = 1200 kN/mm** für alle Profile gleich angesetzt werden kann.

Bei steifenlosen Knoten wird $A_{Steife} = 0$.

Plastischer Bereich

Das plastische Grenzmoment M_{pE} ergibt sich aus der folgenden Gleichung (für A_p siehe Abb. 13):

$$M_{pE} = f_y \cdot A_p \cdot (h_R - t_R) + f_y \cdot A_{Steife} \cdot (h_R - t_R) \tag{4}$$

Bei steifenlosen Knoten wird $A_{Steife} = 0$. Die plastischen Momente können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Die Grenzverdrehungen ϑ_{pE} wurden aus den Versuchen [3] ermittelt. Sie sind im Anhang für verschiedene Riegel-Stützenkombinationen zusammengestellt. Bei ausgesteiften Knoten braucht keine Rotationskapazität beachtet zu werden.

Kennwerte der Querkraftfeder

Elastischer Bereich

Das elastische Grenzmoment M_{eQ} ist erreicht, wenn im Stützenprofil im Bereich des Knotens die plastische Querkraft Q_{pS} auftritt. Dieses Moment kann nach folgender Gleichung bestimmt werden.

$$M_{eQ} = Q_{pS} \cdot (h_R - t_R) + \Delta Q_{pS} \cdot (h_R - t_R) \tag{5}$$

ΔQ_{pS} ergibt sich gemäss Abb. 14 bei Beilageblechen oder Diagonalaussteifungen im Knoten. Fehlen diese, wird $\Delta Q_{pS} = 0$.

Den Anfangsanstieg erhält man bei unausgesteiften Knoten aus der Gleichung:

$$C_Q = s_S \cdot (h_R - t_R) \cdot (h_S - t_S) \cdot G \qquad [\text{kNmm/rad}] \tag{6}$$

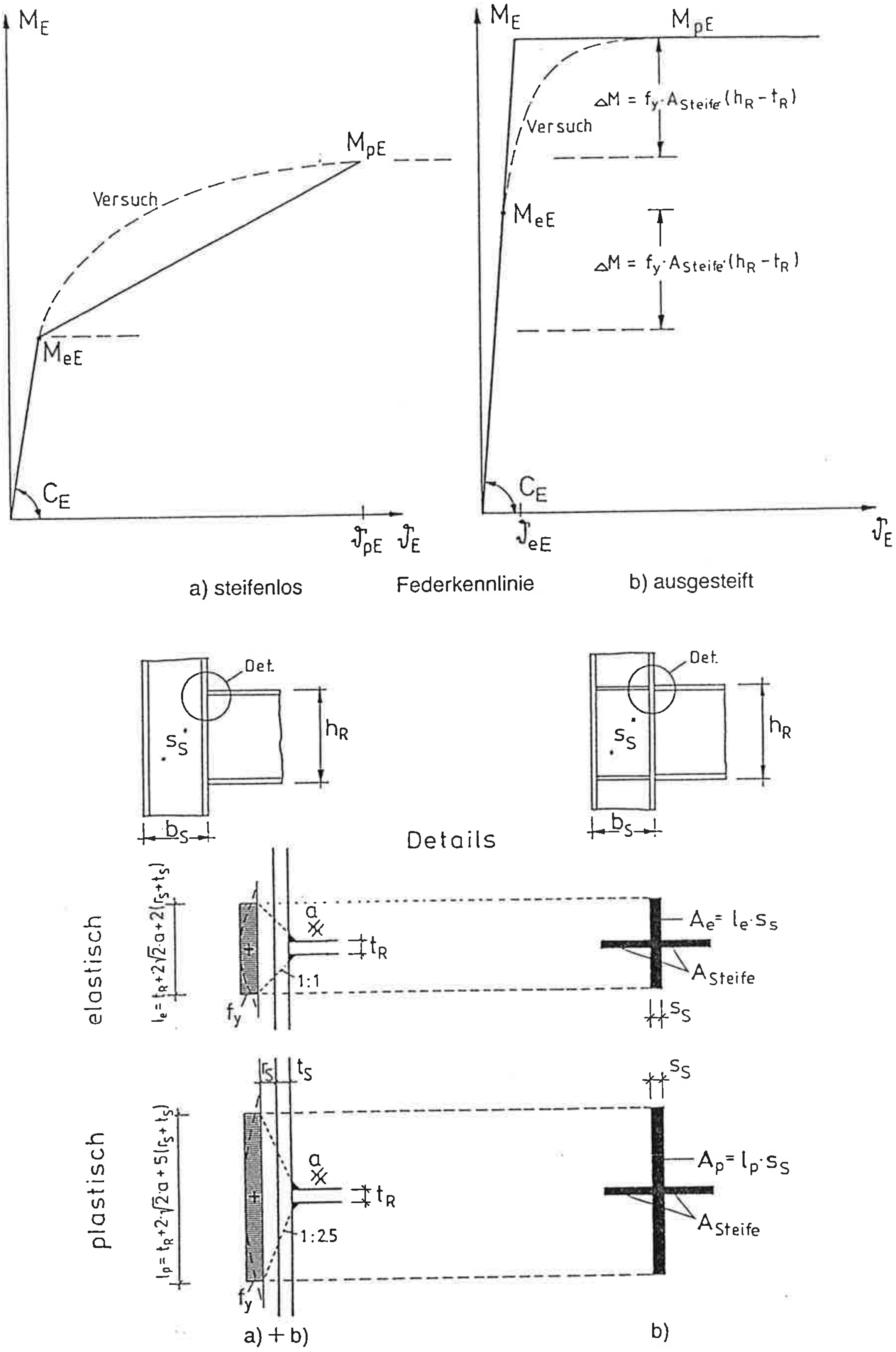
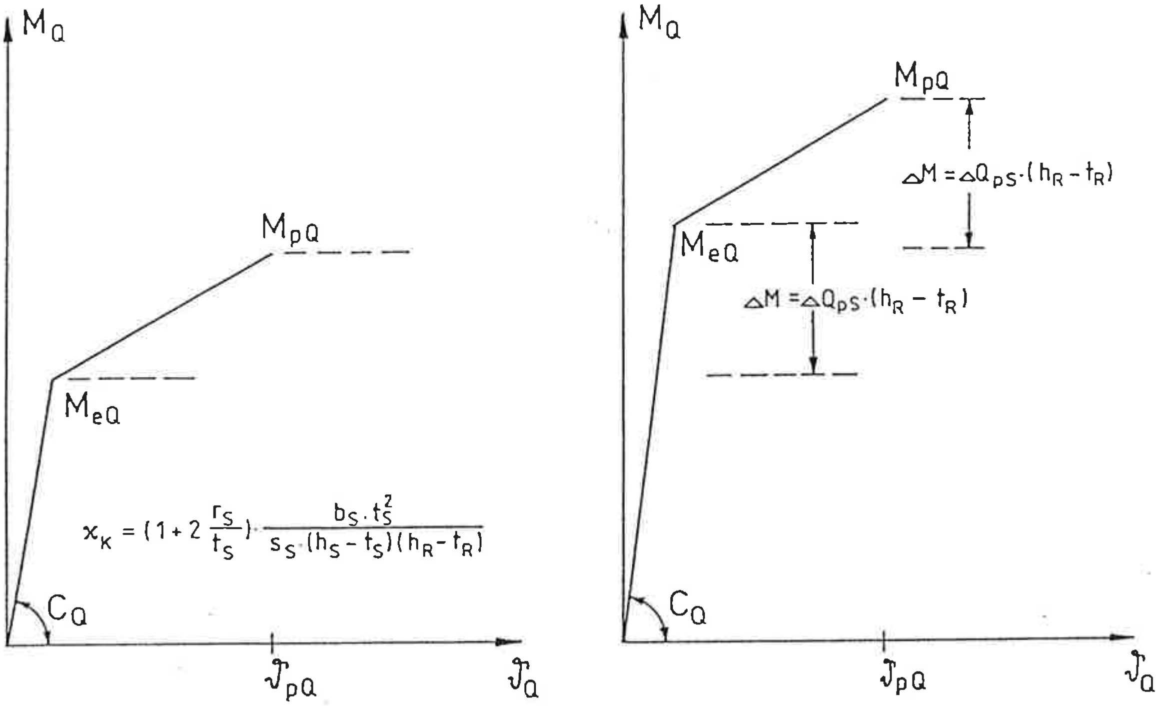
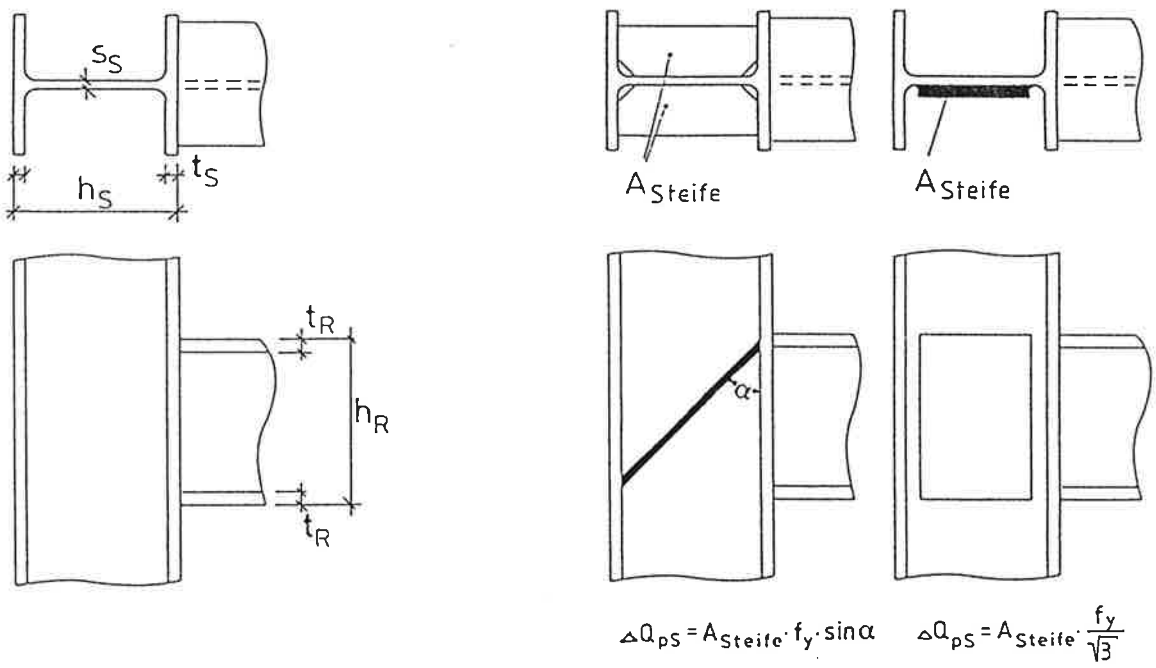


Abb. 13: Federkennlinie für Krafteinleitungsfeder.



a) steifenlos Federkennlinie b) ausgesteift



a) b)

Abb. 14: Federkennlinie für Querkraftfeder.

Bei Knoten mit Beilageblechen oder Diagonalsteifen kann die Drehfedersteifigkeit durch Einsetzen einer fiktiven Stegblechdicke $\bar{s}_S$ anstelle von s_S in Gleichung (6) ermittelt werden:

für Beilagebleche $\quad \bar{s}_S = s_S + \dfrac{A_{Steife}}{h_S - t_S}$

für Diagonalsteifen $\quad \bar{s}_S = s_S + \dfrac{A_{Steife} \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{3}}{h_S - t_S}$

Zweckmässigerweise wird hier nicht die Steifigkeit C_Q, sondern die Verdrehung ϑ_{eQ} bei Erreichen des elastischen Grenzmomentes M_{eQ} berechnet, da diese nach Gl. (6a) für jede Profilkombination konstant ist.

$$\vartheta_{eQ} = \frac{M_{eQ}}{C_Q} = 1{,}73 \cdot 10^{-3}\ \text{rad} \tag{6a}$$

Plastischer Bereich

Das plastische Grenzmoment M_{pQ} kann nach [4] aus der Gleichung (7) bestimmt werden:

$$M_{pQ} = \left(0{,}66 \cdot \left(1 + \frac{h_R - t_R}{240 \cdot t_S}\right) + 2{,}624 \cdot x_K \cdot \left(1 - \frac{0{,}024 \cdot ts}{h_R - t_R}\right)\right) \cdot Q_{pS} \cdot (h_R - t_R) + \Delta Q_{pS} \cdot (h_R - t_R) \tag{7}$$

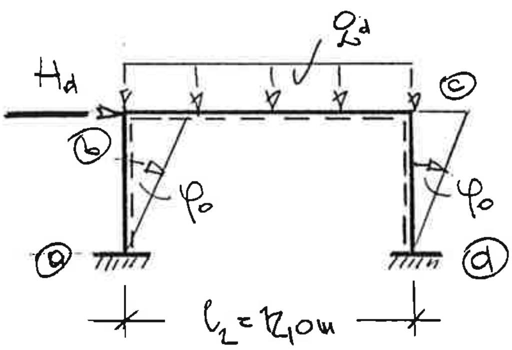
wobei x_K aus Abb. 14 entnommen werden kann.

Bei steifenlosen Knoten wird $\Delta Q_{pS} = 0$. Die plastischen Grenzmomente M_{pQ} können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

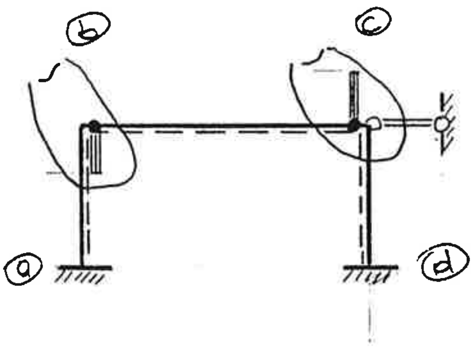
Die Grenzverdrehungen ϑ_{pQ} wurden aus Versuchen [4] ermittelt. Für verschiedene Riegel-Stützenkombinationen sind sie im Anhang tabellarisch zusammengestellt. Diese „Grenzverdrehung" ist keine Grenze an sich, sie dient zur rechnerischen Ermittlung der Federkennwerte. Die Rotationskapazität des Knotens ist aus der Querkraftbeanspruchung praktisch unbegrenzt (Abb. 14).

3.5 Schematischer Ablauf der Berechnung - nachgiebige Knoten

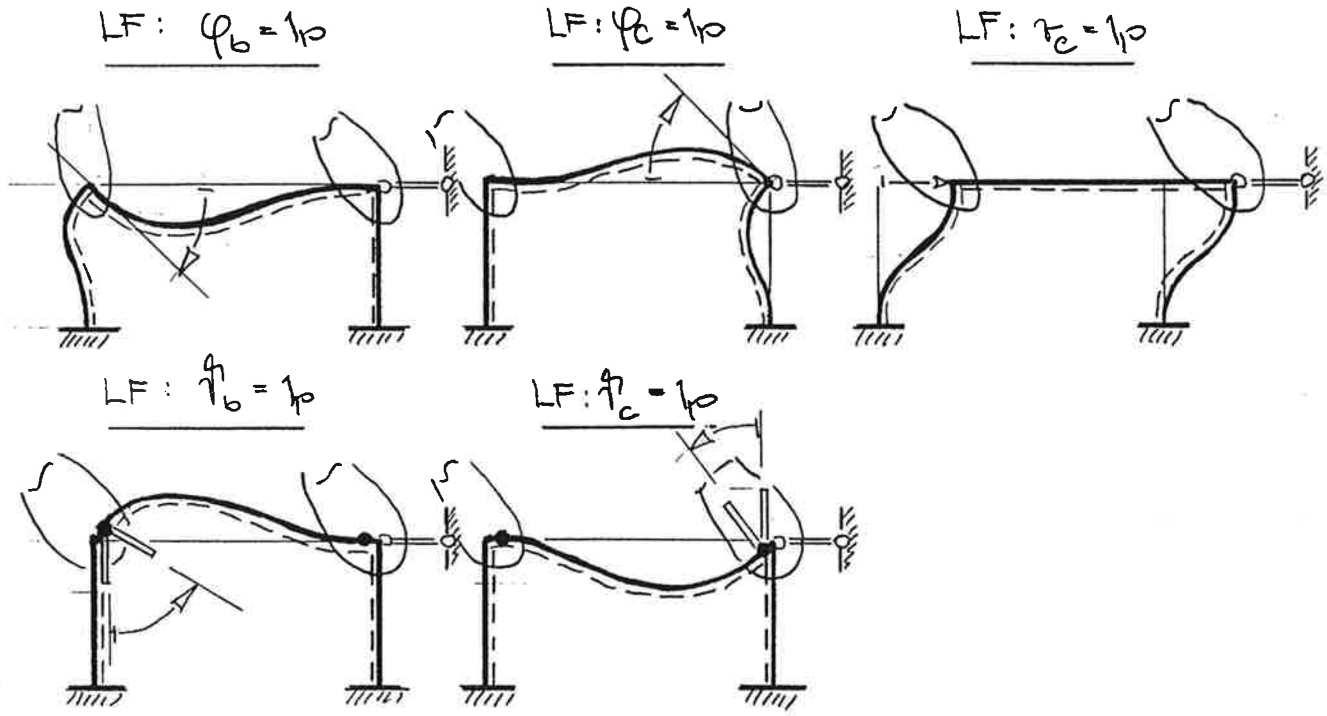
SYSTEM UND BELASTUNG



VOLLEINSPANNZUSTAND

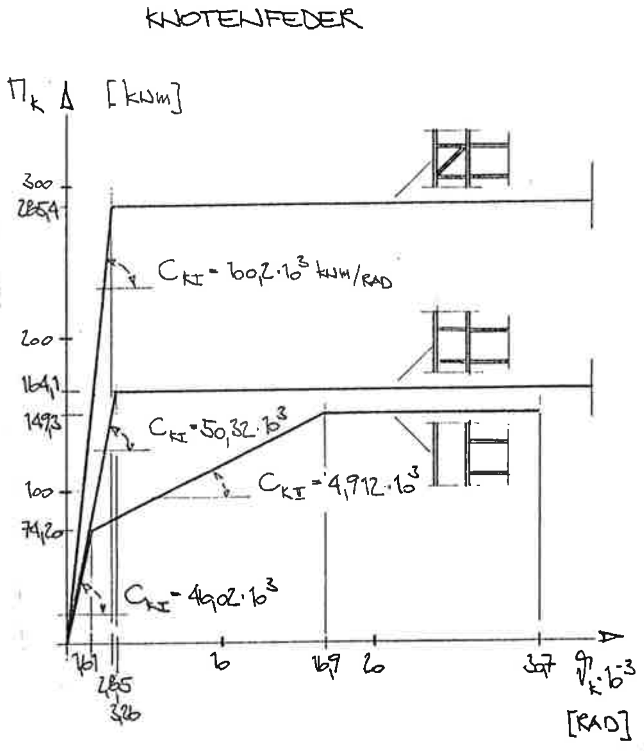


EINHEITSVERFORMUNGEN



VOLLEINSPANNZUSTAND LF : q_d, H_d, φ_0

FEDERCHARAKTERISTIKA - TRAGLASTZUSTAND



GLEICHUNGSSYSTEM

$$a_{11} \cdot \varphi_b + a_{12} \cdot \varphi_c + a_{13} \cdot v_c + a_{14} \cdot \vartheta_b + a_{15} \cdot \vartheta_c + a_{10} = 0$$
$$a_{21} \cdot \varphi_b + a_{22} \cdot \varphi_c + a_{23} \cdot v_c + a_{24} \cdot \vartheta_b + a_{25} \cdot \vartheta_c + a_{20} = 0$$
$$a_{31} \cdot \varphi_b + a_{32} \cdot \varphi_c + a_{33} \cdot v_c + a_{34} \cdot \vartheta_b + a_{35} \cdot \vartheta_c + a_{30} = 0$$
$$a_{41} \cdot \varphi_b + a_{42} \cdot \varphi_c + a_{43} \cdot v_c + a_{44} \cdot \vartheta_b + a_{45} \cdot \vartheta_c + a_{40} = - M_{bc}(\vartheta_b)$$
$$a_{51} \cdot \varphi_b + a_{62} \cdot \varphi_c + a_{53} \cdot v_c + a_{45} \cdot \vartheta_b + a_{55} \cdot \vartheta_c + a_{50} = M_{cb}(\vartheta_c)$$

SCHNITTGRÖSSEN M, Q, N

3.6 Nachweise

Nach dem Berechnungsverfahren

Für das Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch erfolgt der Tragsicherheitsnachweis auf Spannungsebene, für die Verfahren Elastisch-Plastisch und Plastisch-Plastisch auf Schnittkraftebene, wobei hier die M-Q-N-Interaktion einzuhalten ist.

Nachweis von grenz(b/t)

Er dient der Vermeidung des lokalen Beulens und ist abhängig vom verwendeten Berechnungsverfahren. Hier erfolgt dieser Nachweis - für alle Beispiele - nur bei den Berechnungsverfahren Plastisch-Plastisch, da allen Beispielsgruppen jeweils konstante Querschnitte (I PE 360 und I PE 400) zugrundeliegen und sowohl die Beanspruchungen als auch die Bestimmungen für die grenz (b/t) -Werte im Verfahren Plastisch-Plastisch am ungünstigen sind.

Biegedrillknicknachweis

Da bei einem Normalkraftverhältnis von $(N_d / N_{pl,d}) \leq 0.10$ kein Einfluß auf die Schnittkraftinteraktion (Berechnungsverfahren Elastisch-Plastisch und Plastisch-Plastisch) gegeben ist, können sich bei der Erfüllung des Biegedrillknicknachweises besonders deshalb Probleme ergeben - vor allem in Bereichen der vollen Auslastung (Fließgelenken) -, da dieser Effekt (kein Einfluß auf die Schnittkraftinteraktion) nur teilweise in den Biegedrillknicknachweis einfließt. Stäbe mit geringer Normalkraft, das sind jene für die $N_d/(\kappa * N_{pl,d}) < 0{,}10$ ist, dürfen unter Vernachlässigung dieser Normalkraft nachgewiesen werden. Hier wird jedoch die Geringfügigkeit der Normalkraft plötzlich abhängig von κ (κ hängt ab von der bezogenen Schlankheit, dem Querschnitt und von der Ausweichrichtung).

Verformungen

TRAGLASTZUSTAND

Verformungen sind nur im Falle des Berechnungsverfahrens Plastisch-Plastisch nachzuweisen, und auch hier nur die maximale Rotation, die durch die Grenzrotation (grenz ρ=0.07...0.13 rad für Stahlprofile - nach [3]) beschränkt ist. Diese Bedingung ist in der Regel erfüllt und war auch bei den berechneten Beispielen nie maßgebend. Eine weitere Begrenzung der Rotation tritt bei steifenlosen Knotenausbildungen auf - siehe [8] -, die jedoch über die Federcharakteristik direkt in die plastische Traglastermittung einfließt.

GEBRAUCHSLASTZUSTAND

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (unter den Gebrauchslasten) werden die Verformungen w und v_c ermittelt. Die maximale horizontale Riegelverschiebung v_c fällt bei dieser Form der Deformationsmethode direkt an (grenz v_c= h/150= 4.0 cm -[4]). Die vertikale Riegeldurchbiegung w wird an der Stelle des maximalen Riegelfeldmomentes bestimmt, wobei die Tabellen aus [10], für Theorie I. und II. Ordnung, ihre Anwendung finden. Begrenzt ist die Riegeldurchbiegung mit grenz w= l/200 = 6 cm - [4] - für diese Beispiele.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

4.1 Allgemeines

In den Tabellen **4.2.1**, **4.2.2**, **4.2.3** und **4.2.4** sind für die Beispiele 1 bis 4 - ideal starre Knoten - die maximalen Bemessungslasten q_d und die maximalen Gebrauchslasten q_{zul} mit den jeweils dazugehörenden Verformungen w (Riegeldurchbiegung an der Stelle des max. Feldmomentes) und v_c (Horizontalverschiebung des Knotens c bzw. des Riegels) zusammengestellt, getrennt nach den globalen Systembertachtungen Theorie I. Ordnung und Theorie II. Ordnung (exakt und nach den Näherungsverfahren α und β) und gegliedert nach den Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch, Elastisch-Plastisch und Plastisch-Plastisch. Für den Gebrauchslastzustand, das ist der entsprechende Lastzustand mit den Teilsicherheitsbeiwerten γ_F=1,0, γ_M=1,0 und ψ=1,0 - sie sind den entsprechenden Fachnormen zu entnehmen - , befinden sich die graphischen Darstellungen der Größen q_{zul}, w und v_c in den Diagrammen **4.2.5** und **4.2.6**.
Die Tabelle **4.3.1** enthält für Theorie II. Ordnung (exakte Berechnung) den Vergleich zwischen dem ideal starren Knoten, anhand des Beispiels 4, und dem nachgiebigen Knoten (steifenloser Knoten, Knoten mit Einleitungssteifen und Knoten mit Einleitungs- und Querkraftsteifen) -je nach Knotenausbildung (Beispiel 5)-, gegliedert nach den Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch, Elastisch-Plastisch und Plastisch-Plastisch. Dargestellt sind wieder die maximalen Bemessungslasten q_d, die maximalen Gebrauchslasten q_{zul} und die jeweils dazugehörenden Verformungen w und v_c. Diagramm **4.3.2** gibt diese Werte für den Gebrauchslastzustand graphisch wieder.

4.2 Ideal starre Knoten

Einfluß der Vorverformung φ_o

Je nach Globalanalyse des Systems (Theorie I. oder II. Ordnung), bei Theorie II. Ordnung zusätzlich auch je nach dem gewählten Berechnungsverfahren (entweder Elastisch-Elastisch oder Elastisch-Plastisch bzw. Plastisch-Plastisch), sind unterschiedliche Vorverformungen φ_o anzusetzen. Da die Vorverformungen im Falle der Theorie I. Ordnung am geringsten sind, ergeben sich in Fällen in denen die Theorie I. Ordnung anwendbar ist geringfügig größere maximale Bemessungslasten q_d als nach Theorie II. Ordnung. Die Verformungen w und v_c bei Theorie II. Ordnung sind - wie zu erwarten - etwas größer als bei Theorie I. Ordnung bzw. auch gleich.

a) Elastische Systemberechnung

nach Theorie I. Ordnung und Theorie II. Ordnung, getrennt nach den Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch.

Für $N_d/N_{d,Ki} \leq 0{,}10$ darf nach Theorie I. Ordnung, für $N_d/N_{d,Ki} > 0{,}10$ muß nach Theorie II. Ordnung gerechnet werden. Bei allen Beispielen war die Berechnung nach Theorie I. Ordnung möglich. Im nachfolgendem werden die Ergebnisse der Theorie II. Ordnung (exakte Berechnung) mit jenen der beiden Näherungsverfahren der Theorie II. Ordnung, α-Verfahren und β-Verfahren, verglichen.

α-Verfahren

Bei diesem Näherungsverfahren für die Theorie II. Ordnung werden die nach Theorie I. Ordnung ermittelten Schnittkräfte aus dem Verschiebungszustand mit dem Faktor α vergrößert ($\alpha=1/(1-N/N_{Ki})$) und die Nachweise auf Spannungs- bzw. Schnittkraftebene (Interaktion) durchgeführt.

Das α-Verfahren beschreibt die Theorie II. Ordnung für die betrachteten Beispiele sehr gut, wobei folgendes ersichtlich ist:

Bei den eingespannten Rahmen (Beispiel 1 und 4) gleichen die Verformungen jenen nach Theorie II. Ordnung, die Bemessungslasten q_d sind jedoch etwas höher. Bei den gelenkigen Rahmen (Beispiel 2 und 3) stimmen die Bemessungslasten überein bzw. sind sie geringfügig niedriger als nach Theorie II. Ordnung. Die Verformungen sind gleich bzw. etwas größer als nach der exakten Methode.

β-Verfahren

Auch das β-Verfahren oder sogenannte Ersatzstabverfahren stellt eine Näherung der Theorie II. Ordnung dar. Wiederum von den Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung ausgehend, wird für die einzelnen Stäbe ein Biegeknicknachweis geführt, wobei die zu den entsprechenden Stabwerken gehörenden Knicklängen anzusetzen sind.

Die nach diesem Verfahren ermittelten Bemessungslasten q_d liegen generell und unabhängig von System und Belastung unter jenen nach Theorie II. Ordnung (exakte Methode) oder jenen nach dem α-Verfahren berechneten Werten, bei Zugrundelegung des Berechnungsverfahrens Elastisch-Plastisch und des Eurocode. Durch die geringere max. Bemessungslast q_d sind natürlich auch die Verformungen geringer als jene, die sich nach den anderen Verfahren (Theorie II. Ordnung, α-Verfahren) ergeben.

Zum Vergleich wurde auch die Berechnung nach der Ö-NORM vorgenommen, wobei die Einordnung unter dem Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch erfolgte. Die Erhöhung der Widerstandsmomente um den Faktor 1,07 wurde, sofern dies zulässig war, in Rechnung gestellt. Ein Vergleich mit den nach den anderen Methoden ermittelten Lasten und Verformungen ist jedoch nur auf der Gebrauchslastebene möglich, da die Ö-NORM zur Zeit noch grundsätzlich auf Gebrauchslasten basiert. Die nach der Ö-NORM berechneten Gebrauchslasten q_{zul} und entsprechenden Verformungen liegen nun zwischen den Werten nach dem Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch.

b) plastische Systemberechnung

nach Theorie I. und II. Ordnung, wobei für $N_d/N_{d,Ki} \leq 0{,}10$ nach Theorie I. Ordnung gerechnet werden darf und für $N_d/N_{d,Ki.} > 0{,}10$ nach Theorie II. Ordnung vorzugehen ist.

Fließgelenktheorie I. Ordnung

Für alle Systeme und Belastungsverhältnisse war sie unzulässig, da infolge der höheren Traglasten im plastischen Zustand das Kriterium $N_d/N_{d,Ki} \leq 0{,}10$ nicht mehr einhaltbar war.
In diesem Zusammenhang sei auf die Neuerscheinung [11] verwiesen, in der dargelegt wird, daß das Kriterium für die Anwendung der Fließgelenktheorie I. Ordnung im Einzellfall zu ungünstig ist, da das Kriterium alle möglichen Fälle abzudecken hat. Für den eingeschoßigen und einfeldigen Rahmen, der durch eine horizontale Einzellast und durch eine gleichmäßig verteilte Riegellast beansprucht wird, findet sich in [11] ein günstigeres Kriterium in Abhängigkeit vom Lastverhältnis H/(q*l) und vom Verhältnis des plastischen Stielmomentes zum plastischen Riegelmoment.

Fließgelenktheorie II. Ordnung

Je größer die Anzahl der sich ausbildenden Fließgelenke ist, umso höher ist die Traglast (größere plastische Systemreserve), wobei die Anzahl der möglichen Fließgelenke auch vom Lastverhältnis abhängt (vergleiche Beispiel 1 und 4).
Begrenzt war die plastische Traglast der Systeme (unabhängig vom Lastverhältnis) durch die Ausbildung einer kinematischen Balkenkette im Riegel, Stabilitätsversagen trat nicht ein, sodaß hier gilt:

plast. TRAGLAST = plast. GRENZLAST.

Unter der plastischen Traglast wird jene Last verstanden, bei der die Systemdeterminante zu Null wird. Hingegen ist jene Last, bei der das kinematisches System auftritt, die plastische Grenzlast. Üblicherweise gilt: plast. Traglast ≥ plast. Grenzlast.
Bezüglich der maximalen Rotation - sie tritt im Beispiel 5 auf - gilt:

$$\max\rho = 0.040 \leq 0.07....0.13 \text{ rad - nach [3].}$$

Die wesentlichen Voraussetzungen für die Ausnutzung der plastischen Traglast sind - die notwendigen Rotationsfähigkeiten der Querschnitte vorausgesetzt - die erforderlichen Biegedrillknickhalterungen. Mit steigender Traglast werden immer engere Kipphalterungen erforderlich, die im Grenzfall - bei den Fließgelenken - sehr eng liegen (1,0 m).

c) Belastungs-Verformungs - Verhalten

Zugrundegelegt sind Beispiel 1 (eingespannte Stiele) und Beispiel 2 (gelenkiggelagerte Stiele) ein Lastverhältnis von $(q_d*l)/H_d=10$ und Beispiel 3 (gelenkiggelagerete Stiele) und Beispiel 4 (eingespannte Stiele) ein Lastverhältnis von $(q_d*l)/H_d=5$.

Durch den geringen Einfluß der Theorie II. Ordnung und das rein elastische Systemverhalten (es tritt kein Plastizieren auf) unter den Gebrauchslasten ergeben sich lineare Zusammenhänge zwischen den Gebrauchslasten q_{zul} und den Verformungen w bzw. v_c, was aus den Diagrammen **4.2.5** und **4.2.6** sehr gut ersichtlich ist. Der Einfluß der Stiellagerungen wirkt sich sehr deutlich aus, ersichtlich in den q_{zul}-v_c - Diagrammen, sodaß für Beispiel 2 die größte Horizontalverformung (max v_c= 3.9 cm) gerade noch kleiner als die zulässige Grenzverschiebung (grenz v_c= 4.0 cm) ist.

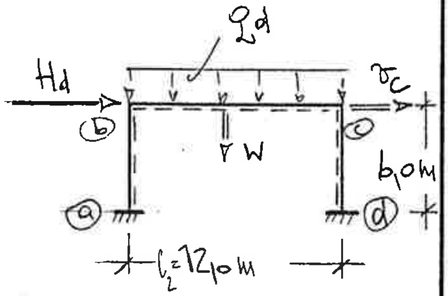
Für die vergrößerte Horizontalkraft (Beispiel 3) treten bereits so große Horizontalverschiebungen auf (max v_c= 5.7), daß die Bedingung $v_c \leq$ grenz v_c nur mehr für das Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch erfüllbar ist (v_c= 3.9 cm). In diesem Fall ist eine plastische Ausnutzung des Systems, und sogar die des Querschnittes, durch den Gebrauchstauglichkeitsnachweis beschränkt.

4.2.1 Bemessungs- und Gebrauchslasten - Beispiel 1

BEMESSUNGSLAST				EE	EP	PP
TH. II. ORD.	EXAKT	q_d	kN/m	16,7	20,0	$\frac{N}{N_{Ki}} > 0{,}1$
		W	cm	4,7	5,6	
		v_c	cm	1,0	1,2	
THEORIE I. ORDNUNG	EXAKT	q_d	kN/m	16,5	19,7	23,8
		W	cm	5,2	6,3	11,5
		v_c	cm	1,1	1,3	3,7
	γ-VERF.	q_d	kN/m	16,7	19,9	
		W	cm	5,2	6,2	
		v_c	cm	1,1	1,3	
	β-VERF.	q_d	kN/m	–	18,5	
		W	cm	–	5,8	
		v_c	cm	–	1,2	

SYSTEM

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$



IPE 360 St 37

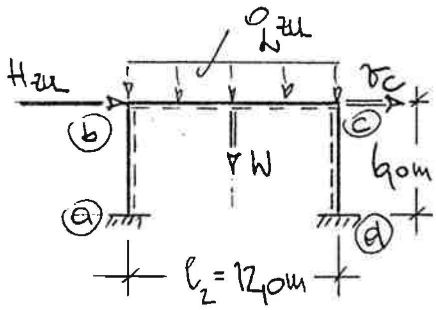
$H_d = \frac{q_d \cdot l_2}{10}$

W ... STELLE max M_{FELD}

q_d, H_d .. γ_F-FACHE BEMESSUNGSLAST

GEBRAUCHSLAST				EE	EP	PP
TH. II. ORD.	EXAKT	q_{zul}	kN/m	12,37	14,81	$\frac{N}{N_{Ki}} > 0{,}1$
		W	cm	3,5	4,2	
		v_c	cm	0,68	0,82	
THEORIE I. ORDNUNG	EXAKT	q_{zul}	kN/m	12,22	14,59	17,63
		W	cm	3,5	4,2	5,1
		v_c	cm	0,68	0,82	1,0
	γ-VERF.	q_{zul}	kN/m	12,37	14,74	
		W	cm	3,5	4,2	
		v_c	cm	0,70	0,84	
	β-VERF.	q_{zul}	kN/m	13,55 (*)	13,70	
		W	cm	3,9	3,9	
		v_c	cm	0,75	0,76	

SYSTEM



IPE 360 St 37

$H_{zul} = \frac{q_{zul} \cdot l_2}{10}$

W ... STELLE max M_{FELD}

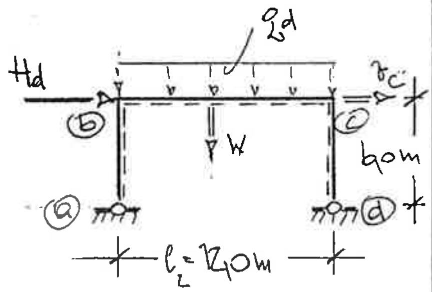
(*) NACH Ö-NORM B 4600 MIT $(1{,}07 \cdot W_{el})$

4.2.2 Bemessungs- und Gebrauchslasten - Beispiel 2

BEMESSUNGSLAST				EE	EP	PP
TH. I. ORD.	EXAKT	q_d	kN/m	14,6	17,5	$\frac{N}{N_{Ki}} > 0,1$
		W	cm	4,3	6,1	
		v_c	cm	4,1	5,0	
THEORIE II. ORDNUNG	EXAKT	q_d	kN/m	14,2	16,9	19,2
		W	cm	5,0	6,0	9,4
		v_c	cm	4,4	5,4	14,0
	γ - VERF.	q_d	kN/m	14,2	16,9	
		W	cm	5,0	5,9	
		v_c	cm	4,4	5,4	
	β - VERF.	q_d	kN/m	—	15,1	
		W	cm	—	5,3	
		v_c	cm	—	4,4	

SYSTEM

$$\boxed{-\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$



IPE 360 St 37

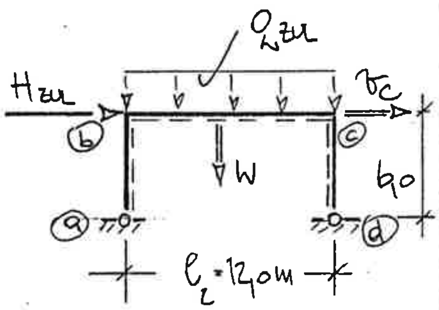
$H_d = -\frac{q_d \cdot l_2}{10}$

W ... STELLE max M_{FELD}

q_d, H_d ... γ_F - FACHE BEMESSUNGSLAST

GEBRAUCHSLAST				EE	EP	PP
TH. I. ORD.	EXAKT	q_{zul}	kN/m	10,81	12,96	$\frac{N}{N_{Ki}} > 0,1$
		W	cm	3,4	4,1	
		v_c	cm	2,7	3,3	
THEORIE II. ORDNUNG	EXAKT	q_{zul}	kN/m	10,52	12,52	14,22
		W	cm	3,4	4,0	4,6
		v_c	cm	2,8	3,4	3,9
	γ - VERF.	q_{zul}	kN/m	10,52	12,52	
		W	cm	3,3	4,0	
		v_c	cm	2,9	3,5	
	β - VERF.	q_{zul}	kN/m	11,54 (*)	11,19	
		W	cm	3,7	3,6	
		v_c	cm	2,9	2,8	

SYSTEM



IPE 360 St 37

$H_{zul} = -\frac{q_{zul} \cdot l_2}{10}$

W ... STELLE max M_{FELD}

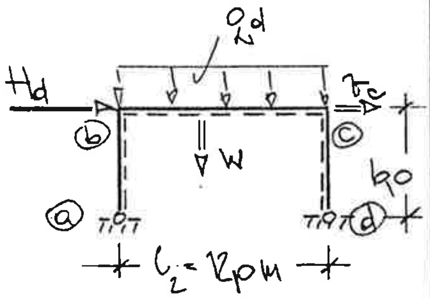
(*) NACH Ö-NORM B 4600 mit ($1,07 \cdot W_{el}$)

4.2.3 Bemessungs- und Gebrauchslasten - Beispiel 3

BEMESSUNGSLAST			EE	EP	PP
TH. I. ORD.	EXAKT	q_d kN/m	14,6	17,5	$\frac{N}{N_{ki}} > 0{,}1$
		W cm	3,6	4,4	
		v_c cm	5,8	6,9	
THEORIE II. ORDNUNG	EXAKT	q_d kN/m	14,3	16,9	20,5
		W cm	3,6	4,3	8,2
		v_c cm	6,0	7,2	18,0
	γ-VERF.	q_d kN/m	14,2	16,8	
		W cm	3,5	4,4	
		v_c cm	6,0	7,2	
	β-VERF.	q_d kN/m	—	15,0	
		W cm	—	3,8	
		v_c cm	—	6,0	

SYSTEM

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$



IPE 400 St 37

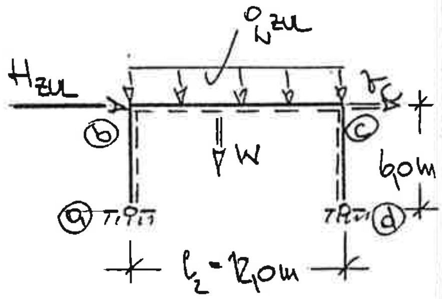
$H_d = \frac{q_d \cdot l_2}{5}$

W ... STELLE max M_{FELD}

q_d, H_d ... γ_F-FACHE BEMESSUNGSLAST

GEBRAUCHSLAST			EE	EP	PP
TH. I. ORD.	EXAKT	q_{zul} kN/m	10,81	12,96	$\frac{N}{N_{ki}} > 0{,}1$
		W cm	2,4	2,9	
		v_c cm	3,8	4,6	
THEORIE II. ORDNUNG	EXAKT	q_{zul} kN/m	10,59	12,52	15,19
		W cm	2,4	2,9	3,5
		v_c cm	3,9	4,7	5,7
	γ-VERF.	q_{zul} kN/m	10,52	12,44	
		W cm	2,4	2,8	
		v_c cm	4,0	4,8	
	β-VERF.	q_{zul} kN/m	11,79 (*)	11,11	
		W cm	2,7	2,5	
		v_c cm	4,2	3,9	

SYSTEM



IPE 400 St 37

$H_{zul} = \frac{q_{zul} \cdot l_2}{5}$

W ... STELLE max M_{FELD}

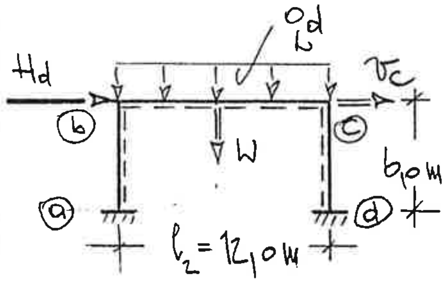
(*) NACH Ö-NORM B 4600 MIT ($1{,}07 \cdot W_{el}$)

4.2.4 Bemessungs- und Gebrauchslasten - Beispiel 4

BEMESSUNGSLAST				EE	EP	PP
TH. I. ORD.	EXAKT	q_d	kN/m	19,1	22,8	$\frac{N}{N_{Ki}} > 0,1$
		w	cm	4,2	5,0	
		v_c	cm	1,7	2,0	
THEORIE II. ORDNUNG	EXAKT	q_d	kN/m	19,0	22,6	29,9
		w	cm	4,2	5,1	18,1
		v_c	cm	1,7	2,0	8,7
	γ-VERF.	q_d	kN/m	19,0	22,7	
		w	cm	4,2	5,0	
		v_c	cm	1,7	2,0	
	δ-VERF.	q_d	kN/m	—	20,6	
		w	cm	—	4,6	
		v_c	cm	—	1,8	

SYSTEM

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$



IPE 400 St 37

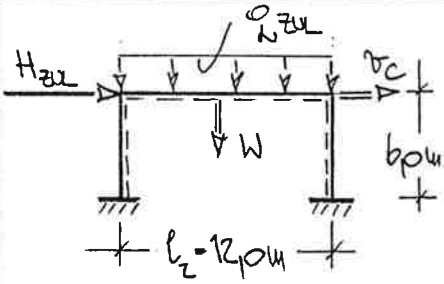
$H_d = \frac{q_d \cdot l_2}{5}$

w.. STELLE max M_{FELD}

q_d, H_d .. γ_F - FACHE BEMESSUNGSL.

GEBRAUCHSLAST				EE	EP	PP
TH. I. ORD.	EXAKT	q_{zul}	kN/m	14,15	16,89	$\frac{N}{N_{Ki}} > 0,1$
		w	cm	2,8	3,4	
		v_c	cm	1,1	1,3	
THEORIE II. ORDNUNG	EXAKT	q_{zul}	kN/m	14,07	16,74	22,15
		w	cm	2,8	3,4	4,5
		v_c	cm	1,1	1,3	1,8
	γ-VERF.	q_{zul}	kN/m	14,07	16,81	
		w	cm	2,8	3,4	
		v_c	cm	1,1	1,3	
	δ-VERF.	q_{zul}	kN/m	15,46 (*)	15,26	
		w	cm	3,1	3,0	
		v_c	cm	1,2	1,2	

SYSTEM

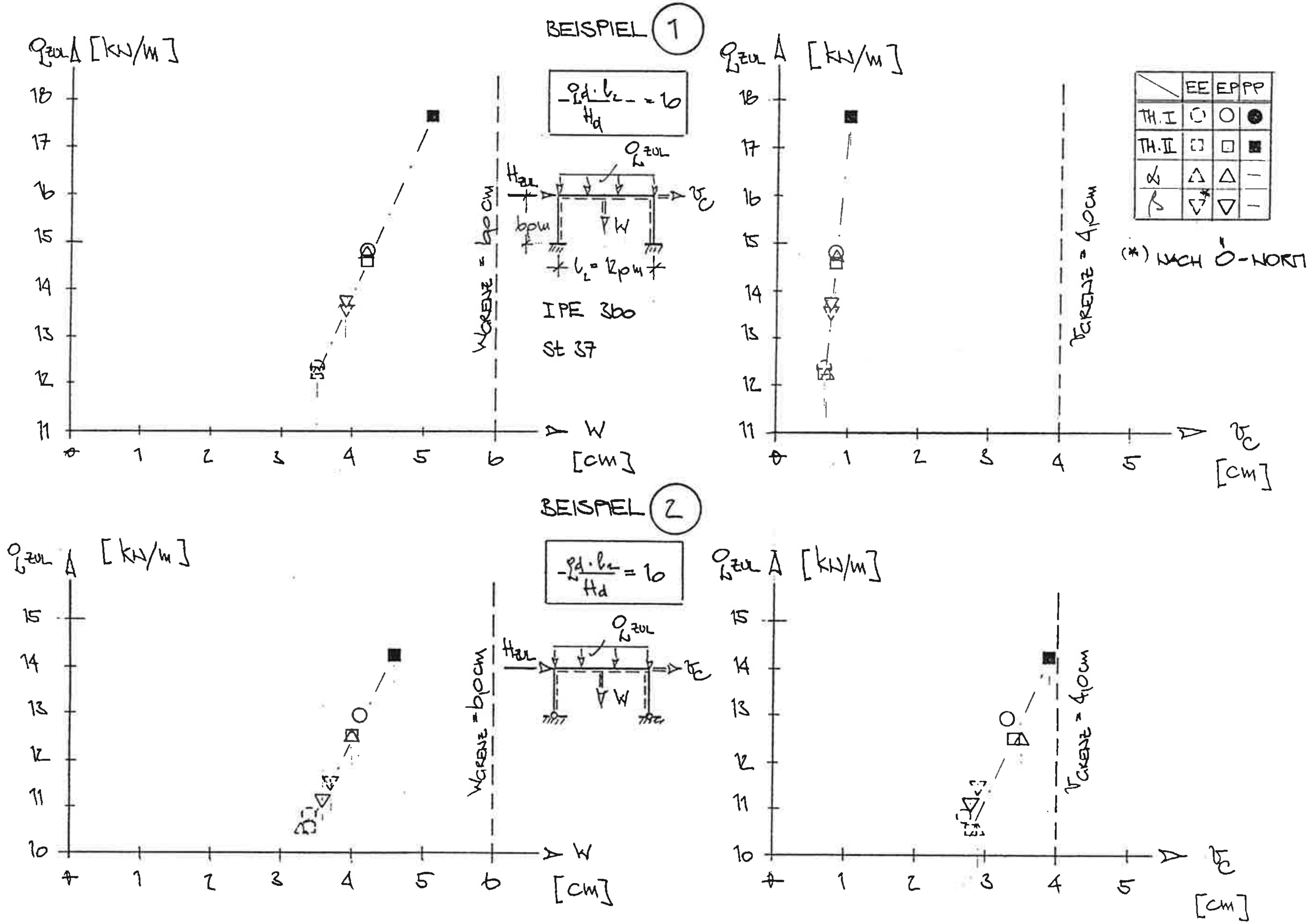


IPE 400 St 37

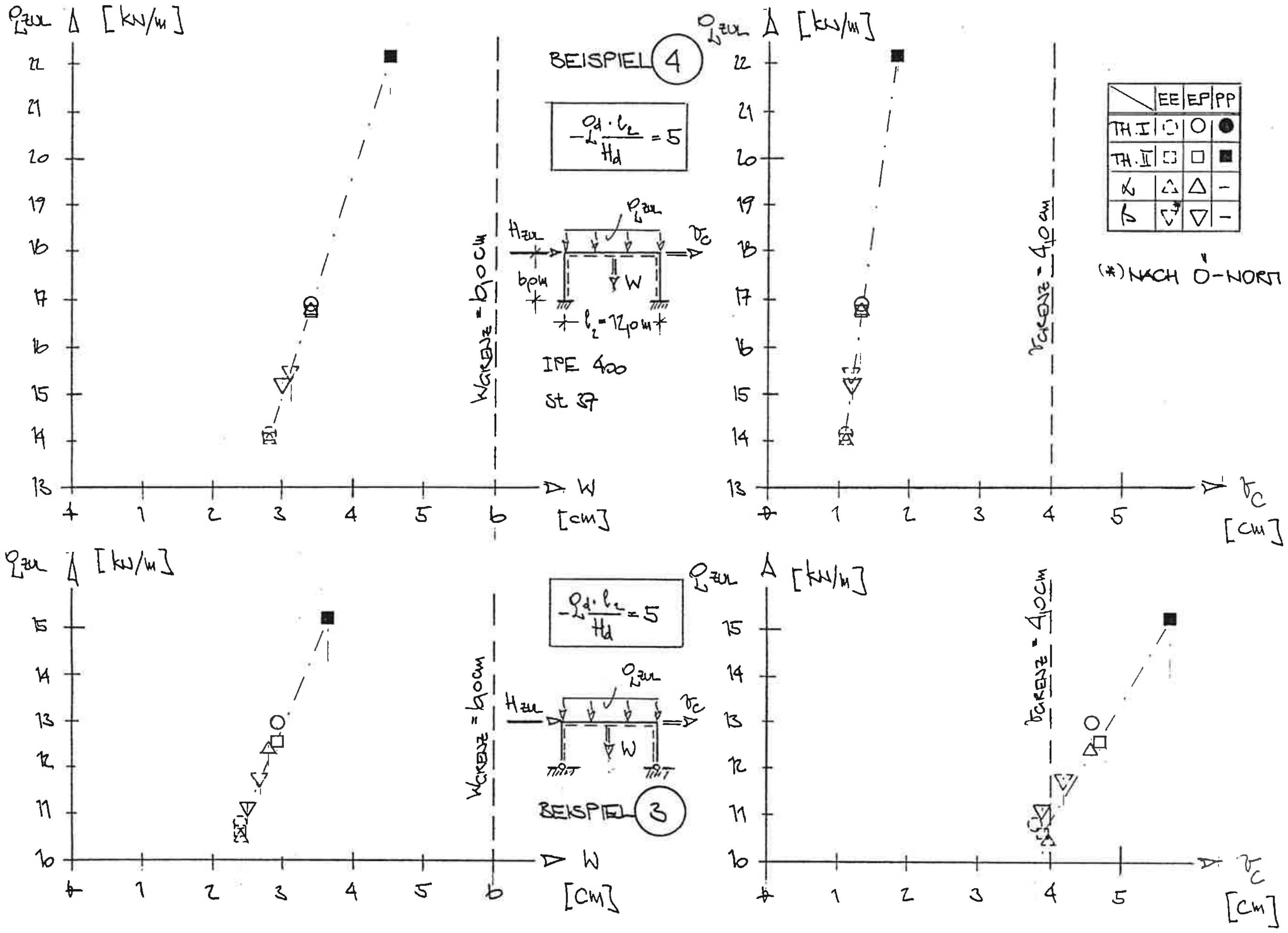
$H_{zul} = \frac{q_{zul} \cdot l_2}{5}$

w... STELLE max M_{FELD}

(*) NACH Ö-NORM B 4600 MIT $(1,07 \cdot W_{el})$



4.2.5 Belastungs-Verformungs - Diagramme - Beispiel 1 und 2



4.2.6 Belastungs-Verformungs - Diagramme - Beispiel 3 und 4

4.3 Nachgiebige Knoten

Die Bezeichnungen der Berechnungsverfahren (Elastisch-Elastisch, Elastisch-Plastisch und Plastisch-Plastisch) gelten sowohl für die Knoten als auch für die Stabquerschnitte.

Steifenlose Knoten

Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch (**EE**):

Bei Anwendung des Verfahrens ergeben sich relativ niedrige Bemessungslasten q_d bzw. Gebrauchslasten q_{zul}, da das geringe elastische Verhalten der Knoten (siehe Federcharakteristika **A 5.5**) maßgebend ist. Die Stabquerschnitte können nicht ausgenützt werden. Eine Bemessung nach diesem Berechnungsverfahren muß daher als unwirtschaftlich angesehen werden.

Berechnungverfahren Elastisch-Plastisch (**EP**):

Es darf wegen der großen Nichtlinearität der Knotenfeder von steifenlosen Knoten nicht angewandt werden.

Berechnungsverfahren Plastisch-Plastisch (**PP**):

Es ist sofort ersichtlich, daß die Vorteile der steifenlosen Knoten nur durch bzw. erst durch das Berechnungsverfahren Plastisch-Plastisch genützt werden können, da erst dadurch eine wirtschaftliche Systemausnutzung möglich wird. Die Grenze für die maximale Bemessungslast ist durch die Beschränkung der Knotenrotation gegeben (in diesem Fall: $\max\rho = 0{,}0307$ rad), bedingt durch das Stegbeulen im Knotenbereich. Die plastische Reserve beträgt gegenüber (EE) 3,4. Abhängig ist die maximale Rotation von den jeweiligen Riegel- und Stützenquerschnitten, deren Tabellierung [8] entnommen werden kann.

Knoten mit Einleitungssteifen

Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch (**EE**):

Auch hier ergeben sich relativ niedrige Bemessungslasten q_d bzw. Gebrauchslasten q_{zul}, da die Einleitungssteifen das elastische Verhalten der Knoten nur gering anheben. Die Bemessung nach diesem Verfahren muß daher ebenfalls als unwirtschaftlich angesehen werden.

Berechnungsverfahren Elastisch-Plastisch (**EP**):

Eine Beschränkung der Knotenrotation, wie bei den steifenlosen Knoten, ist hier nicht mehr gegeben.

Berechnungsverfahren Plastisch-Plastisch (**PP**):

Einleitungssteifen heben die maximale Bemessungslast q_d bzw. Gebrauchslast q_{zul} nur geringfügig an, da die Schubnachgiebigkeit überwiegt, d.h., daß die Einleitungsfeder gegenüber der Querkraftfeder für die Knotencharakteristik maßgebend ist. Die plastische Reserve beträgt gegenüber (EE) 3,1.

Knoten mit Einleitungs- und Querkraftsteifen

Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch (**EE**):

Gut ersichtlich sind hierbei die Abweichungen zwischen dem Modell mit den ideal starren Knoten und jenem mit den nachgiebigen Knoten (Einleitung- und Querkraftsteifen). Diese Abweichungen sind relativ gering, wobei die maximalen Bemessungslasten q_d bzw. Gebrauchslasten q_{zul} für den ideal starren Knoten etwas höher liegen. Die zugehörigen Verformungen w und v_c sind für das Modell mit den ideal starren Knoten geringer als jene für das Modell mit nachgiebigen Knoten.

Berechnungsverfahren Elastisch-Plastisch (**EP**):

Bei der Berechnung nach dem Verfahren Elastisch-Plastisch tritt nun plötzlich der Effekt auf, daß die maximale Bemessungslast q_d für das System mit den nachgiebigen Knoten größer ist. Wegen der Knotennachgiebigkeit sind die Eckmomente beim nachgiebigen Modell niedriger als beim ideal starren. Bei diesen Systemen und Beanspruchungen tritt nun ein Plastizieren im Rahmeneck auf, sodaß im Falle des nachgiebigen Knotens eine größere Belastung auftreten kann, bis ein Durchplastizieren des Querschnittes eintritt. Die Verfor-mungen sind naturgemäß größer.

Berechnungsverfahren Plastisch-Plastisch (**PP**):

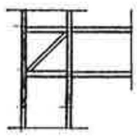
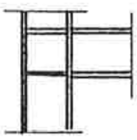
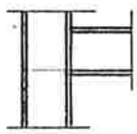
Auch hier sind die nahezu geringfügigen Abweichungen zwischen dem Modell mit den ideal starren Knoten und jenem mit den nachgiebigen Knoten (Einleitungs- und Querkraftsteifen) gut ersichtlich.Die maximalen Bemessungslasten q_d bzw. Gebrauchs-lasten q_{zul} liegen für den ideal starren Knoten minimal höher, wobei die Verformungen geringer sind. Die plastische Reserve beträgt gegenüber (EE) 1,8 (für den ideal starren Knoten 1,6).

Belastungs-Verformungs -Verhalten

Wie schon bei den Systemen mit den ideal starren Knoten kommt es auch hier, durch den geringen Einfluß der Theorie II. Ordnung und die geringe Auswirkung des plastischen Knotenverhaltens, zu einem linearen Zusammenhang zwischen den Gebrauchslasten q_{zul} und den Verformungen w und v_c, allerdings nur für den Knoten mit den Einleitungs- und Querkraftssteifen, wie dem Diagramm **4.3.2** entnommen werden kann. Die Abweichungen der Vertikalverformungen w sind größer als jene der Horizontalverschiebungen v_c, verglichen

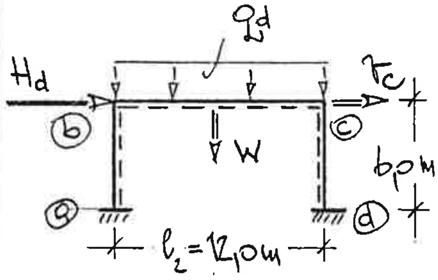
mit dem ideal starren Knotenmodell.
Für den Knoten mit den Einleitungssteifen tritt das unterlineare (größere Verformungszunahme bei gleicher Laststeigerung) Verhalten zwischen der maximalen Gebrauchslast q_{zul} und den Verformungen w und v_c schon besonders deutlich hervor.
Die Abbildungen im Diagramm **4.3.2** veranschaulichen gut die Abweichungen zwischen den Gebrauchslasten q_{zul} und den Verformungen w bzw. v_c - je nach Knotenausbildung - im Vergleich zum Grenzfall des ideal starren Knotens. Unabhängig von der Knotenausbildung gilt, daß die Abweichungen der Vertikalverformungen w größer sind als jene der Horizontalverschiebungen v_c (Einfluß der Knotennachgiebigkeit).

4.3.1 Bemessungs- und Gebrauchslasten - Beispiel 5

BEMESSUNGSLAST			EE	EP	PP
STARRE KNOTEN		q_d kN/m	19,0	22,6	29,9
		w cm	4,2	5,1	18,1
		v_c cm	1,7	2,0	8,7
NACHGIEBIGE KNOTEN		q_d kN/m	17,8	23,7	29,8
		w cm	4,4	5,8	19,4
		v_c cm	1,7	2,3	8,6
		q_d kN/m	8,00	14,6	24,5
		w cm	2,1	3,9	16,5
		v_c cm	0,79	1,5	5,1
		q_d kN/m	6,74		22,9
		w cm	2,8		12,0
		v_c cm	0,67		4,2

NACH TH. II. ORD.

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

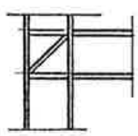
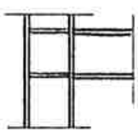


IPE 400 St 37

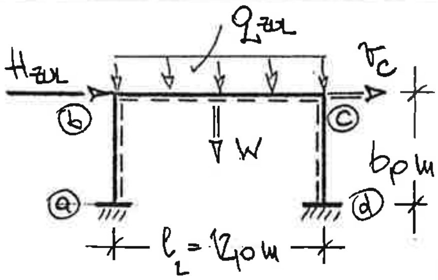
$H_d = \frac{q_d \cdot l_2}{5}$

W . . . STELLE max M_{FELD}

q_d, H_d . . . γ_F - FACHE BEMESSUNGSL.

GEBRAUCHSLAST			EE	EP	PP
STARRE KNOTEN		q_{zul} kN/m	14,07	16,74	22,15
		w cm	2,8	3,4	4,5
		v_c cm	1,1	1,3	1,8
NACHGIEBIGE KNOTEN		q_{zul} kN/m	13,19	17,56	22,07
		w cm	2,9	3,9	4,9
		v_c cm	1,1	1,5	1,9
		q_{zul} kN/m	5,93	10,81	18,15
		w cm	1,4	2,6	4,8
		v_c cm	0,53	0,96	2,0
		q_{zul} kN/m	4,99		16,96
		w cm	1,2		4,7
		v_c cm	0,45		1,7

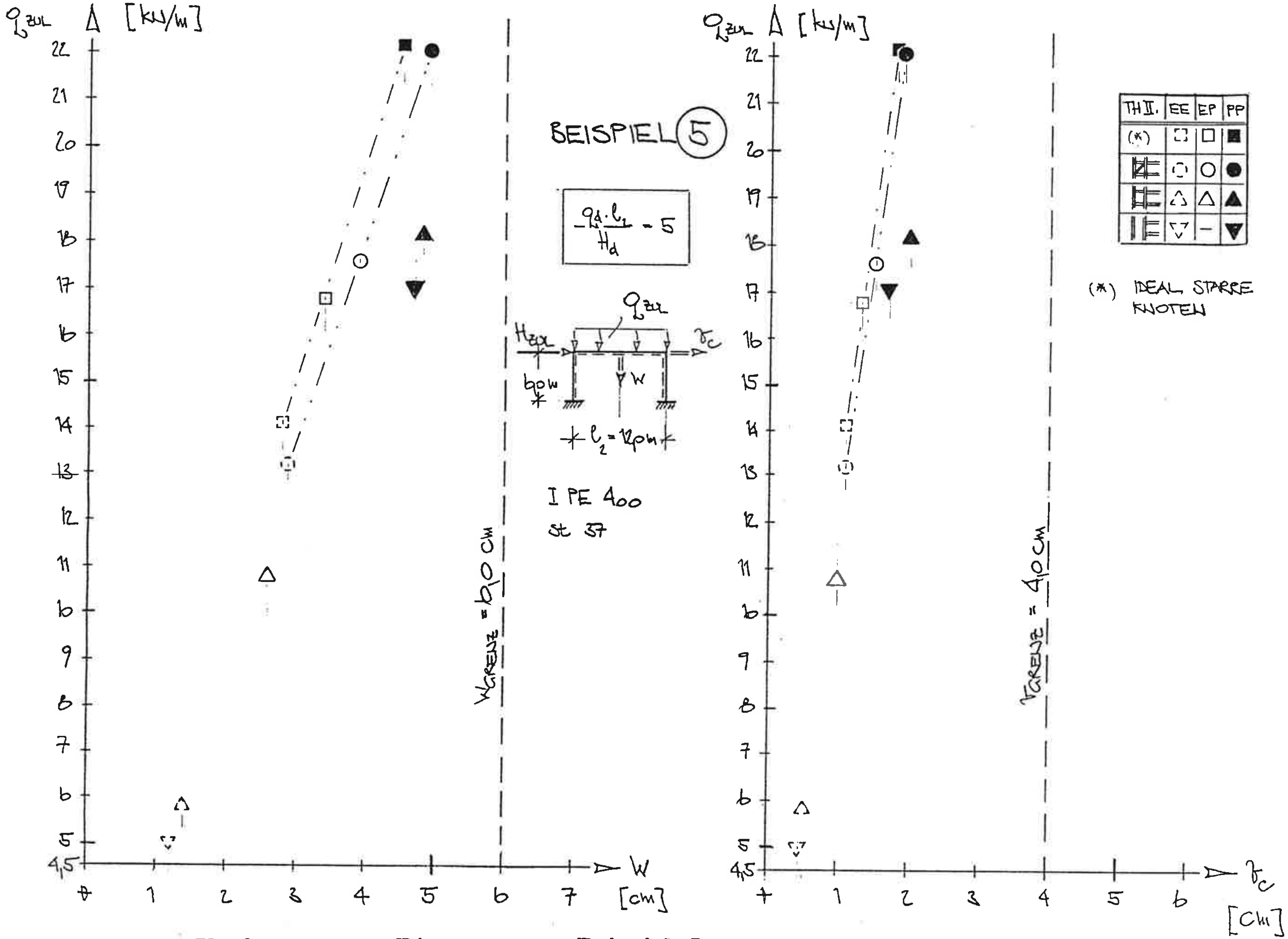
NACH TH. II. ORD.



IPE 400 St 37

$H_{zul} = \frac{q_{zul} \cdot l_2}{5}$

W . . . STELLE max M_{FELD}



4.3.2 Belastungs-Verformungs - Diagramme - Beispiel 5

4.4 Zusammenfassung

Mit der Fließgelenktheorie, in Form der Überlagerung von Knickwinkeln an den Fließgelenkstellen, steht eine Methode zur Verfügung, die sehr anschaulich ist und nach gewohnten Schemata ablaufen kann, sodaß Berechnungen nach dem Verfahren Plastisch-Plastisch leicht praktikabel sind. Es besteht somit die konkrete Möglichkeit plastische Globalanalysen von Systemen vorzunehmen, wie dies nach den neuen europ. Normenwerken, neben der geläufigeren elastischen Globalanalyse mit den Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch, durchwegs die Regel ist.
Gleichzeitig zeigt sich auch, daß mit diesem Modell der Fließgelenktheorie die Knotennachgiebigkeit direkt und o h n e Iteration berücksichtigbar ist. Analog dazu kann auch die Nachgiebigkeit von Anschlüssen in die Berechnung einfließen, unabhängig vom Berechnungsverfahren Elastisch-Elastisch, Elastisch-Plastisch oder Plastisch-Plastisch. Voraussetzung ist nur, daß die Knotenfedercharakteristik - eventuell unter Beachtung der Anschlußfeder - vorher zusammengestellt wurde. Deren einfache Ermittlung ist in [8] ausführlich dargelegt. Somit kann dem tatsächlichen Knotenverhalten - je nach Knotenausbildung - und der Anschlußnachgiebigkeit Rechnung getragen werden.
Wesentliche Bedingungen für das Ausnutzen der Systemreserven bis hin zur plastischen Traglast sind - die notwendigen Querschnittsrotationsfähigkeiten vorausgesetzt - die erforderlichen Biegedrillknickhalterungen, deren Anzahl mit dem Systemausnutzungsgrad steigt. Vom Standpunkt der Gebrauchstauglichkeit ist die Bemessung bis hin zur plastischen Traglast durchaus vertretbar.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] DIN 18 800. Teil 1: Stahlbauten. Bemessung und Konstruktion. Berlin: Beuth (November) 1990.

[2] DIN 18 800. Teil 2: Sahlbauten. Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken. Berlin (November) 1990.

[3] Duddeck, Heinz: Seminar Traglastverfahren. Bericht Nr. 73-6 aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig: 1973.

[4] EUROCODE 3: Design of steelstructures. Part 1: General rules and rules for buildings. (April) 1990.

[5] Kreutz, Johannes-Stefan/Nather, Friedrich: Vergleichende Untersuchung des Entwurfs der DIN 18 800 ,Teil 2 mit der zur Zeit gültigen Vorschrift DIN 4114, Juli 1952. In: Mitteilungen aus dem Lehrstuhl für Stahlbau. Technische Universität München. Hrsg. v. Friedrich Nather. H.18. München: 1981.

[6] Ö-NORM B 4600. Teil 2: Stahlbauten. Berechnung der Tragwerke. Wien: 1978.

[7] Ö-NORM B 4600 Teil 4: Stahlbauten. Stabilitätsnachweis, Grundfälle. Wien: 1978.

[8] Rahmentragwerke in Stahl unter besonderer Berücksichtigung der steifenlosen Bauweise. Theoretische Grundlagen, Beispiele, Bemessungstabellen. Hrsg. v. Östereichischen Stahlbauverband/Schweizerischen Zentralstelle für Stahlbau. Wien/Zürich: 1987.

[9] Rubin,Helmut: Drehwinkelverfahren zur Berechnung biegesteifer Stabwerke nach Elastizitäts- und Fließgelenktheorie I. und II. Ordnung, insbesondere auch im Hinblick auf die Anwendung der künftigen DIN 4114 (1. Teil). Stahlbau Seminar am 2. und 3. Febr. 1979 in Lindau.

[10] Stahlbau Handbuch. Für Studium und Praxis. Bd.1. Hrsg. v. Deutschen Stahlbau-Verband. Köln: Stahlbau-Verlag 1982.

NEUERSCHEINUNGEN

[11] Practical Analysis of Single-Storey Frames. Technical Committee 8 - Structural Stability. Technical Working Group 8.1/8.2 Skeletal Structures. Nr.61. Brussels: European Convention for Constructional Steelwork [ECCS] 1991.

ANHANG

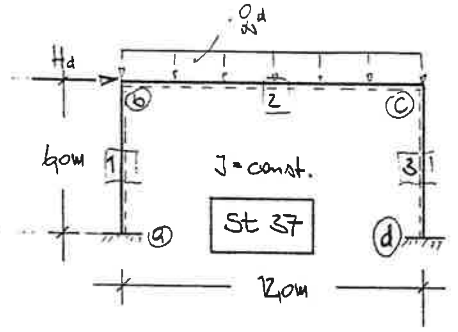
ANHANG

Seite

A 1. BEISPIEL (1)

A 1.1 LASTFALL EINHEITSBELASTUNG $q_d = 1{,}0$ kN/m $\rightarrow H_d = 1{,}2$ kN

SYSTEM UND BELASTUNGEN



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$

IPE 360:

$A = 72{,}7$ cm², $g = 0{,}571$ kN/m

$S_x = 510{,}0$ cm³, $W_x = 904{,}0$ cm³

$J_x = 16270$ cm⁴, $i_x = 15{,}0$ cm

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

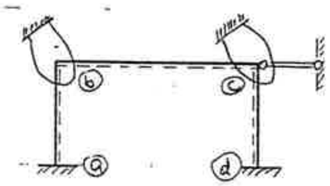
$(EJ)_d = \frac{EJ}{\gamma_M}$, $\gamma_M = 1{,}1$

SCHNITTKRAFTERMITTLUNG NACH TH. I ORD

FÜR $q_d = 1{,}0$ kN/m, $H_d = 1{,}2$ kN

$$\frac{M}{\left(\frac{(EJ)_d}{l_1}\right)} = \kappa_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right)\cdot 4{,}0 \quad \lambda_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right)\cdot 2{,}0 \quad \eta_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right)\cdot 6{,}0 \qquad \left(C = \frac{(EJ)_d}{l_1} = 5177 \text{ kNm}\right)$$

(S)	l_1/l_s	κ_s	λ_s	η_s
(1)	1,0	4,0	2,0	6,0
(2)	0,5	2,0	1,0	3,0
(3)	1,0	4,0	2,0	6,0



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$: $a_{11} = \kappa_1 + \kappa_2 = 6{,}0$ $a_{21} = \lambda_2 = 1{,}0$ $a_{31} = -\frac{1}{l_1}\cdot\eta_1 = -1{,}0$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$: $a_{12} = \lambda_2 = 1{,}0$ $a_{22} = \kappa_2 + \kappa_3 = 6{,}0$ $a_{32} = -\frac{1}{l_3}\cdot\eta_3 = -1{,}0$

LF $\bar{\delta}_c = 1{,}0$: $a_{13} = a_{31}$ $a_{23} = a_{32}$

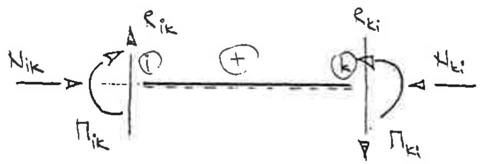
$$a_{33} = \frac{1}{l_1^2}\cdot 2\cdot\eta_1 + \frac{1}{l_3^2}\cdot 2\cdot\eta_1 = 0{,}6667$$

LF $q = 1{,}0$ kN/m:

$M^0_{bc} = -M^0_{cb} = -\frac{1}{12}\cdot q \cdot l^2 = -12{,}0$ kNm

M^0 .. VOLLEINSPANNMOMENT

$a_{10} = -a_{20} = -12{,}0$ kNm $a_{30} = +$



LF $H = 1{,}2$ kN:

$a_{30} = -1{,}2$ kN $a_{10} = a_{20} = +$

GLEICHUNGSSYSTEM $[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$:

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\delta}_c$	LF
a_{11}	a_{12}	a_{13}	$-a_{10}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}	$-a_{20}$
a_{31}	a_{32}	a_{33}	$-a_{30}$

			LF q	LF H
6,0	1,0	−1,0	12,0	+
	6,0	−1,0	−12,0	+
		0,6667	+	1,20

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\delta}_c$	LF
2,400	−2,400	+	q
0,4500	0,4500	3,150	H

$$\varphi_i = \frac{\bar{\varphi}_i}{C}$$

STABENDMOMENTE:

$$M_{ik} = M^0_{ik} + \kappa_s\cdot\left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{\delta}}{l_s}\right) + \lambda_s\cdot\left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{\delta}}{l_s}\right)$$

$$M_{ki} = M^0_{ki} - \lambda_s\cdot\left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{\delta}}{l_s}\right) - \kappa_s\cdot\left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{\delta}}{l_s}\right)$$

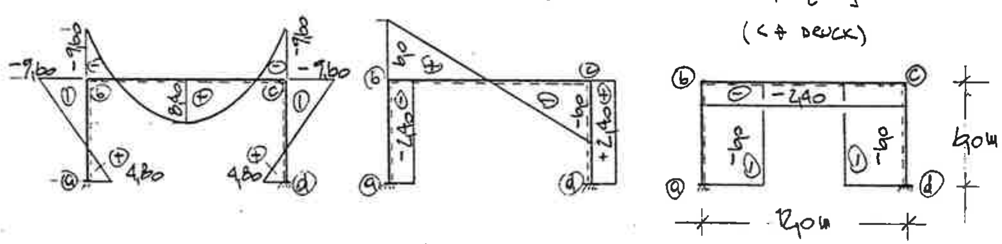
STABENDKRÄFTE:

$R_{ik} = R_s + R^L_{ik}$ $R_{ki} = R_s + R^L_{ki}$ $R_s = -\frac{1}{l_s}(M_{ik} - M_{ki})$ R^L ... QUERKRAFT INF. QUERLAST AM TRÄGER AUF 2 STÜTZ.

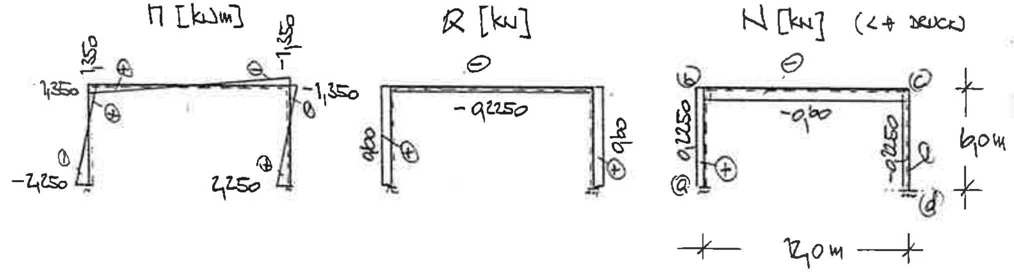
		LF $q = 1{,}0$ kN/m				LF $H = 1{,}20$ kN :			
S	i-k	M^0_{ik} [kNm]	M_{ik} [kNm]	R^L_{ik} [kN]	R_{ik} [kN]	M^0_{ik} [kNm]	M_{ik} [kNm]	R^L_{ik} [kN]	R_{ik} [kN]
①	a	∅	4,80	∅	-2,40	∅	-2,250	∅	0,60
	b	∅	-9,60	∅			-1,350		
②	b	-12,0	-9,60	6,0	6,0		1,350		-0,2250
	c	-12,0	-9,60	-6,0	-6,0		1,350		
③	c	∅	-9,60	∅	2,40		-1,350		0,60
	d	∅	4,80	∅			-2,250		

$f = \frac{q l^2}{8} = 18{,}0$ kNm

SCHNITTKR. INF. $q = 1{,}0$ kN/m (TH. I. ORD) :

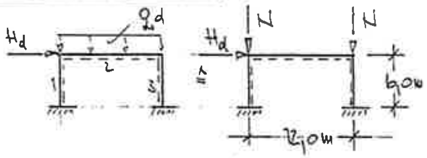


SCHNITTKR. INF. $H = 1{,}20$ kN (TH. I. ORD)



A1.2 ELASTIZITÄTSTHEORIE I. ORD.

FÜR $\boxed{\frac{N_{Ki,d}}{N_d} \geq 10}$ ZULÄSSIG



$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$

$N_{Ki,d} = \left(\frac{\pi}{\beta}\right)^2 \cdot \frac{(EI)_d}{l_1^2}$ $\beta_1 = \frac{1+0{,}4 \cdot r}{1+0{,}2 \cdot r}$ $r = \frac{l_2}{l_1} = 2{,}0 \Rightarrow \beta_1 = 1{,}29$

$N_{Ki,d} = 5117$ kN , $N_d = \frac{q}{2} \cdot [6{,}0 + 0{,}225] = \frac{q}{2} \cdot 6{,}225$ $\frac{5117}{6{,}225 \cdot \frac{q}{2}} \geq 10$

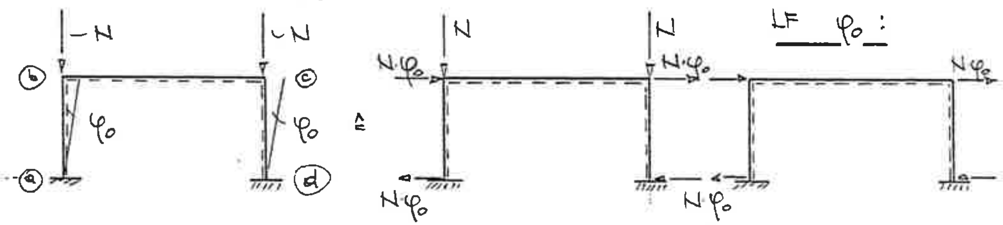
$\Rightarrow \boxed{q_d \leq 82{,}20 \text{ kN/m}}$ ZULÄSSIG

VORVERDREHUNG φ_0 :

$\varphi_0 = \frac{1}{400} \cdot r_1 \cdot r_2$ $r_1 = \sqrt{\frac{5}{l_1}} = 0{,}9129$ $r_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1}{n}}\right) = 0{,}8536$ $n = 2$

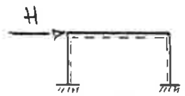
$\underline{\varphi_0 = 0{,}001948}$

SCHNITTKR. INF. LF φ_0 :



ENTSPRICHT LF H : MIT $H = (q \cdot l_2) \cdot \varphi_0$

MIT : $N_{bc} = ∅$, $A_{aH} = A_{dH} = ∅$



41.3 E-THEORIE I. ORD. - (ELAST.-ELAST)

$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$ $\underset{\sim}{q}_d = 16{,}7$ kN/m $\rightarrow H_d = 20{,}04$ kN

LF $\underset{\sim}{q}$ LF H LF P_o

$\max M = M_c = \underset{\sim}{q} \cdot [-9{,}60 - 1{,}350 \cdot (1+0{,}01946)] = -183{,}3$ kNm

$\max N = N_{cd} = \underset{\sim}{q} \cdot [-6{,}0 - 0{,}2250\,(1+0{,}01948)] = -104{,}0$ kNm

$\max Q = Q_{cb} = \underset{\sim}{q} \cdot [-6{,}0 - 0{,}2250\,(1+0{,}01948)] = -104{,}0$ kNm

$M_b = \underset{\sim}{q} \cdot [-9{,}60 + 1{,}350 \cdot (1+0{,}01948)] = -137{,}3$ kNm

GRENZSPANNUNGEN

$\sigma_{Rd} = f_{yk}/\gamma_M = 24{,}0/1{,}1 = 21{,}82$ kN/cm²

$\tau_{Rd} = f_{yk}/(\sqrt{3} \cdot \gamma_M) = 12{,}60$ kN/cm²

NACHWEISE :

$^M\sigma = \dfrac{M}{W} = \dfrac{18330}{904} = 20{,}28$ kN/cm² $\quad \sigma^N = \dfrac{N}{A} = \dfrac{104}{72{,}7} = 1{,}431$ kN/cm²

$\underline{\sigma = 21{,}71 \text{ kN/cm}^2} < \underline{\sigma_{Rd} = 21{,}82 \text{ kN/cm}^2}$ ✓

$\max \tau = \dfrac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \dfrac{104 \cdot 510}{16270 \cdot 0{,}8} = \underline{4{,}075 \text{ kN/cm}^2} < \underline{\tau_{Rd} = 12{,}60 \text{ kN/cm}^2}$ ✓

$\underline{\sigma_V \leq \sigma_{Rd}}$ GILT ALS ERFÜLLT, WENN $\dfrac{\sigma}{\sigma_{Rd}} < 0{,}5$ ODER $\dfrac{\tau}{\tau_{Rd}} < 0{,}5$ ✓

GRENZ (b/t) lt. TAB 12 ERFÜLLT - SIEHE BEISPIEL FG. TH. II. ORD

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$: $\quad M_{ik} = M_b = -137{,}3$ kNm $\quad M_{ik} = M_c = -183{,}3$ kNm

$\xi_M = \dfrac{1}{2} - \dfrac{M_{ik} - M_{ki}}{\underset{\sim}{q} \cdot l^2} = 0{,}4809 \quad (x_M = 5{,}770\,\text{m})$

$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \dfrac{1}{2} \cdot \xi_M^2 \cdot \underset{\sim}{q}\, l^2 = \underline{140{,}8 \text{ kNm}}$

VERFORMUNGEN $\qquad \xi = 0{,}4809, \quad \xi' = 1 - \xi$

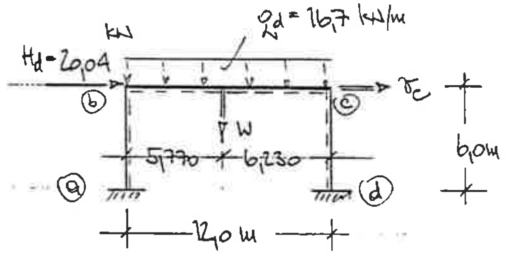
M_i : $\Delta w = \dfrac{1}{6}(\xi' - \xi'^3) \cdot \dfrac{M_i \cdot l^2}{(EJ)_d} = -0{,}03982$ m

M_k : $\Delta w = \dfrac{1}{6}(\xi - \xi^3) \cdot \dfrac{M_k \cdot l^2}{(EJ)_d} = -0{,}05236$ m

$\underset{\sim}{q}$: $\Delta w = \dfrac{\xi \cdot \xi'}{24} \cdot (1 + \xi \cdot \xi') \cdot \dfrac{\underset{\sim}{q} \cdot l^4}{(EJ)_d} = 0{,}1390$ m

STELLE $x_M = 5{,}770$ m : $\quad \underline{w} = 0{,}04682$ m $\hat{=}$ $\underline{4{,}7 \text{ cm}}$

$\underline{\delta_c} = \dfrac{\delta_0}{c} = \dfrac{1}{c} \cdot [3{,}150 \cdot (1+0{,}01948)] \cdot \underset{\sim}{q} = 0{,}01036$ m $\hat{=}$ $\underline{1{,}0 \text{ cm}}$



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL TH. II. ORD. - ELAST. ELAST.

A 1.4 E-THEORIE I. ORD – (ELAST. - PLAST.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME:}}$ $\underline{q_d = 20{,}0\ \text{kN/m} \rightarrow H_d = 24{,}0\ \text{kN}}$

$\max M = M_c = -219{,}5$ kNm (FORMEL SIEHE VOR $M_c^p = q_\nu^p / q_\nu^E \cdot M_c^E$

$M_b = -164{,}4$ kNm

$\max N = N_{cd} = -124{,}6$ kNm

$\max Q = Q_{cb} = -124{,}6$ kNm

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$: STAB 1 b-c

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}4809$ $\quad \underline{x_M = 5{,}770\ \text{m}}$

$\underline{\max M_F = 168{,}6\ \text{kNm}}$

PLAST. GRENZSCHNITTGRÖSSEN:

$M_{pl} = f_{yk} \cdot W_{pl} = f_{yk} \cdot 2 \cdot S_x = 244{,}8$ kNm $\quad M_{pl,d} = 222{,}6$ kNm

$N_{pl} = f_{yk} \cdot A = 1745$ kN $\quad N_{pl,d} = 1586$ kN

$Q_{pl} = f_{yk}/\sqrt{3} \cdot A_s = 385$ kN $\quad Q_{pl,d} = 350$ kN

$A_s = 27{,}78\ \text{cm}^2$

INTERAKTION:

$\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}1$, UND $0{,}33 < \frac{Q}{Q_{pl,d}} < 0{,}9$: $0{,}88 \cdot \frac{M}{M_{pl,d}} + 0{,}37 \cdot \frac{Q}{Q_{pl,d}} \leq 1$

$\frac{Q_{cb}}{Q_{pl,d}} = 0{,}3560 \rightarrow M_{gr,c} = \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{Q}{Q_{pl}}\right) \cdot \frac{1}{0{,}88} \cdot M_{pl,d} = 219{,}6$ kNm

$\underline{M_c = -219{,}5\ \text{kNm} < M_{gr,c} = -219{,}6\ \text{kNm}}$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

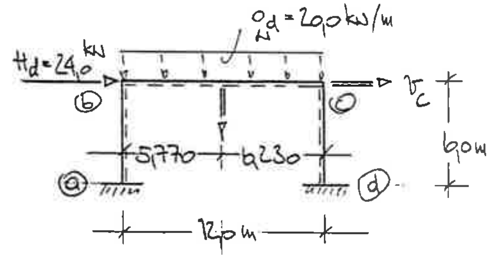
NACH TAB. 15 (DIN, T.1) ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL FG. TH. II ORD.

VERFORMUNGEN:

$W^p = q_\nu^p / q_\nu^E \cdot W^E$

$\underline{W} = 0{,}05607$ m $\hat{=}$ $\underline{5{,}6\ \text{cm}}$

$\underline{v_c} = 0{,}01241$ m $\hat{=}$ $\underline{1{,}2\ \text{cm}}$



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL TH. II ORD. – ELAST. PLAST.

A 15 α – VERFAHREN (NÄHERUNG F. E. TH. II. ORD.) – (ELAST.-ELAST.)

ZULÄSSIG FÜR $\boxed{\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N} \geq 4}$

$\alpha = \frac{1}{1-\frac{N}{N_{Ki,d}}}$ ... VERGRÖSSERUNGSFAKTOR

VORVERDREHUNG φ_0:

$\bar{\varphi}_0 = \frac{1}{200} \cdot r_1 \cdot r_2$ $\quad r_1 = \sqrt{\frac{5}{6}} = 0{,}9129$ $\quad r_2 = \frac{1}{2}\left(1+\sqrt{\frac{1}{n}}\right) = 0{,}8536$ $\quad n = 2$

$\bar{\varphi}_0 = 0{,}003896$

$\varphi_0 = \frac{2}{3} \cdot \bar{\varphi}_0 = 0{,}002598$ $\quad$ (VERMIND. UM 2/3 FÜR VERFAHREN E.E.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME:}}$ $\quad \underline{q_d = 16{,}7\ \text{kN/m} \rightarrow H_d = 20{,}04\ \text{kN}}$

$\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N} = \frac{5117}{6{,}225 \cdot q_d} = 49{,}22 > 4$ $\quad \underline{\alpha} = \frac{1}{1-\frac{1}{\eta_{Ki,d}}} = \underline{1{,}020}$

(SIEHE E. TH. 1. ORD. VORHER)

$$\max M = M_c = q_d \cdot [-9{,}6 - \alpha \cdot \overset{LF\,H}{1{,}350} \cdot (1 + \overset{LF\,\varphi_0}{0{,}02598})] = -183{,}9\ \text{kNm}$$

$$M_b = q_d \cdot [-9{,}6 + \alpha \cdot 1{,}350 \cdot (1 + 0{,}02598)] = -136{,}7\ \text{kNm}$$

$$\max N = N_{cd} = q_d \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}2250\,(1 + 0{,}02598)] = -104{,}1\ \text{kN}$$

$$\max Q = Q_{cb} = -104{,}1\ \text{kN}$$

(SCHNITTGRÖSSENÜBERLAGERUNG)

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$: STAB (2) b–c

$\xi_n = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot \ell^2} = 0{,}4804$ $\quad x_n = 5{,}764\ \text{m}$

$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi_n \cdot \xi_n' \cdot q_d \cdot \ell^2 = \underline{140{,}8\ \text{kNm}}$

NACHWEISE:

$^{M}\sigma = \frac{1639{,}0}{90{,}4} = 20{,}34\ \text{kN/cm}^2$ $\qquad ^{N}\sigma = \frac{104{,}1}{72{,}7} = 1{,}432\ \text{kN/cm}^2$

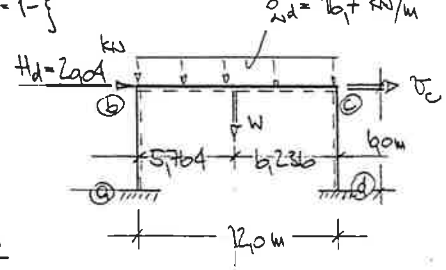
$\underline{\sigma = 21{,}77\ \text{kN/cm}^2 < \sigma_{Rd} = 21{,}82\ \text{kN/cm}^2}$ ✓

$\max \tau = \frac{104{,}1 \cdot 510}{16270 \cdot 0{,}8} = \underline{4{,}079\ \text{kN/cm}^2 < \tau_{Rd} = 12{,}60\ \text{kN/cm}^2}$ ✓

$\sigma_V \leq \sigma_{Rd}$ GILT ALS ERFÜLLT, WENN $\sigma/\sigma_{Rd} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{Rd} < 0{,}5$ ✓

GRENZ (b/t) LT. TAB. 12. **ERFÜLLT** – SIEHE FG. TH. I. ORD

VERFORMUNGEN: $\quad \xi = 0{,}4804,\ \xi' = 1-\xi$



M_i : $\quad \Delta W = -0{,}04001\ \text{m}$

M_k : $\quad \Delta W = -0{,}05251\ \text{m}$

q_d : $\quad \Delta W = 0{,}1449\ \text{m}$

$W = 0{,}05288\ \text{m} \hat{=} \underline{5{,}2\ \text{cm}}$

$\underline{v_c} = \frac{\bar{v}_c}{C} = \frac{1}{C} \cdot \left[\alpha \cdot 3{,}150 \cdot (1 + 0{,}02598)\right] \cdot q_d = 0{,}01063\ \text{m} \hat{=} \underline{1{,}1\ \text{cm}}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL TH. II. ORD. – ELAST.-ELAST.

A 1.6 α - VERFAHREN (NÄHERUNG FÜR E. TH. II. ORD.) - (ELAST.-PLAST.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$

$\underline{q_d = 19{,}9\ kN/m \rightarrow H_d = 23{,}88\ kN}$

$\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N} = \frac{5117}{6{,}225 \cdot q_d} = 41{,}31 > 4 \rightarrow$ ZULÄSSIG $\quad \underline{\alpha} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\eta_{Ki,d}}} = \underline{1{,}025}$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDREHUNG)

SCHNITTGRÖSSENÜBERLAGERUNG:

$$\max M = M_c = q_d \cdot [\overset{LF\ q}{-9{,}6} - \alpha \cdot \overset{LF H}{1{,}350} \cdot (1 + \overset{LF\ \varphi_0}{0{,}03896})] = -219{,}6\ kNm$$

$$M_b = q_d \cdot [-9{,}6 + \alpha \cdot 1{,}350 \cdot (1 + 0{,}03896)] = -162{,}5\ kNm$$

$$\max N = N_{cd} = q_d \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}2250 \cdot (1 + 0{,}03896)] = -124{,}2\ kN$$

$$\max Q = Q_{cb} = -124{,}2\ kN$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$: STAB ② b-c

$\xi_n = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot l^2} = 0{,}4801 \qquad x_n = 5{,}761\ m$

$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi_n^2 \cdot q_d \cdot l^2 = \underline{167{,}8\ kNm}$

NACHWEIS DER INTERAKTION

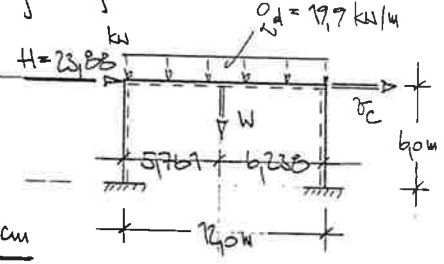
$\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}1 : \quad \frac{Q_{cb}}{Q_{pl,d}} = 0{,}3549 \rightarrow M_{pl,c} = 219{,}7\ kNm$

$\underline{M_c = -219{,}6\ kNm < M_{pl,c} = -219{,}7\ kNm}$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

NACH TAB. 15 (DIN 18800 T1.) ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN: $\quad \xi = 0{,}4801 \quad \xi' = 1 - \xi$



M_i: $\quad \Delta W = -0{,}04763\ m$

M_k: $\quad \Delta W = -0{,}06269\ m$

q_d: $\quad \Delta W = 0{,}1727\ m$

STELLE x_n: $\quad \underline{W} = 0{,}06238\ m \mathrel{\hat{=}} \underline{6{,}2\ cm}$

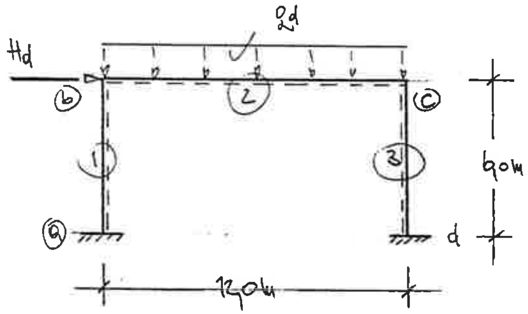
$\underline{\delta_c} = \delta_c/c = \frac{1}{c} \cdot [\alpha \cdot 3{,}150 \cdot (1 + 0{,}03896)] \cdot q_d = 0{,}01289\ m \mathrel{\hat{=}} \underline{1{,}3\ cm}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN:

SIEHE BEISPIEL TH. II. ORD. - ELAST.-PLAST.

A 1.7 ERSATZSTABVERFAHREN (NÄHERUNG F. TH. II. ORD.) – (ELAST. PLAST)

(NACH EUROCODE 3 – APRIL 1990)

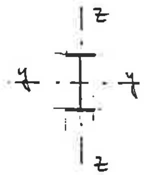


IPE 360 St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$

QUERSCHNITTSWERTE :



$W_y = 904$ cm³ , $W_{pl} = 1020$ cm³ , $A = 72{,}7$ cm²

$J_y = 16270$ cm⁴ , $J_z = 1040$ cm⁴

PLAST. SCHNITTGR.

$f_{yk} = 24{,}0$ kN/cm² (lt. DIN) $\quad \gamma_M = 1{,}1$ (lt. DIN)

$N_{pl} = A \cdot f_{yk} = 1745$ kN $\qquad N_{pl,d} = A \cdot f_{yd} = 1586$ kN

$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_{yk} = 244{,}8$ kNm $\qquad M_{pl,d} = W_{pl} \cdot f_{yd} = 222{,}6$ kNm

$N_{ki_y} = \dfrac{\pi^2 \cdot EJ_y}{\beta_1^2 \cdot l_1^2} = 5629$ kN $\quad$ MIT $\beta_1 = 1{,}29$ SIEHE VORHER

$N_{ki_z} = \dfrac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l_k^2} = 5389$ kN $\quad l_{k_z} = 2{,}0$ m (FÜR STIEL UND RIEGEL)

$\bar{\lambda} = \sqrt{\dfrac{N_{pl}}{N_{ki}}}$ $\qquad \bar{\lambda}_y = 0{,}5567 \rightarrow$

$\qquad \bar{\lambda}_z = 0{,}5690 \rightarrow$

y–y : KNICKSP. LINIE a : $\alpha = 0{,}21 \rightarrow \kappa_y = 0{,}9057$

z–z : b : $\alpha = 0{,}34 \rightarrow \kappa_z = 0{,}8523 = \kappa_{min}$

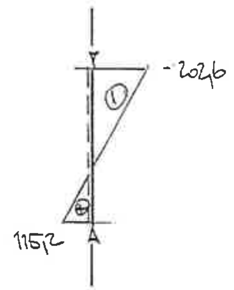
$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$ $\qquad q_d = 16{,}5$ kN/m $\rightarrow H_d = 22{,}2$ kN

STAB 3 :

$M_{cd} = \underset{\sim}{0} \cdot (-9{,}6 - 1{,}35) = -20{,}26$ kNm

$M_{dc} = \underset{\sim}{0} \cdot (4{,}6 + 2{,}25) = 13{,}04$ kNm

$N_3 = \underset{\sim}{0} \cdot (6{,}0 + 0{,}225) = 115{,}2$ kN (DRUCK)



NACHWEIS :

FORMEL ABGEÄNDERT VON N_{Rd} AUF $N_{pl,d}$, $M_{pl,y,Rd}$ AUF $M_{pl,y,d}$ (d.h. VON $\gamma_{M0} = 1{,}0$ lt. EUROCODE AUF $\gamma_M = 1{,}1$ lt. DIN BZW. γ_{M1})

$$\boxed{\frac{N_d}{\kappa_{min} \cdot N_{pl,d}} + \frac{k_y \cdot M_{y,d}}{M_{pl,y,d}} \le 1}$$

$\kappa \triangleq \chi$

MIT :

$$\boxed{\begin{array}{ll} k_y = 1 - \dfrac{\mu_y \cdot N_d}{\kappa_y \cdot \gamma_M \cdot N_{pl,d}} & k_y \le 1{,}5 \\ \mu_y = \bar{\lambda}_y \cdot (2 \cdot \beta_{M_y} - 4) + \left(\dfrac{W_{pl,y} - W_y}{W_y}\right) & \mu_y < 0{,}90 \end{array}}$$

β_{M_y} lt. FIGURE 5.5.3 $\rightarrow$

$\psi = -0{,}5686 \rightarrow \beta_{M_y} = \beta_{M,\psi} = 2{,}198$

$\mu_y = 0{,}5567 \cdot (2 \cdot 2{,}198 - 4) + \dfrac{1020 - 904}{904} = 0{,}3488$

$k_y = 1 - \dfrac{0{,}3488 \cdot 115{,}2}{0{,}9057 \cdot 1{,}1 \cdot 1586} = 0{,}9746$

NACHWEIS FÜR STAB 3 :

$$\frac{115{,}2}{0{,}8523 \cdot 1586} + \frac{0{,}9746 \cdot 20{,}26}{222{,}6} = 0{,}9723 < 1 \;✓$$

STAB ②:

lt. EUROCODE PKT. 5.2.6.2 (8)

VERGRÖSSERUNG DER 'SWAY MOMENTS' IM RIEGEL UM $\boxed{1{,}2}$

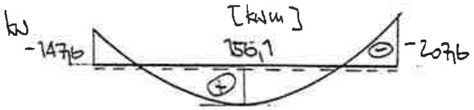
$M_{bc} = q_d \cdot [-9{,}60 + 1{,}2 \cdot 1{,}350] = -147{,}6$ kNm

$M_{cb} = q_d \cdot [-9{,}60 + 1{,}2 \cdot (-1{,}350)] = -207{,}6$ kNm

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot \ell^2} = 0{,}4775 \rightarrow x_M = 5{,}730$ m

$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot \xi_M^2 \cdot \ell^2 = 156{,}1$ kNm

$N_2 = q_d \cdot [2{,}40 + 0{,}60] = 55{,}5$ kN
(DRUCK)



$\rightarrow \psi = 0{,}7110 \rightarrow \beta_{M,\psi} = 1{,}302 \qquad \beta_{M,Q} = 1{,}30 \qquad \beta_{MQ} - \beta_{M\psi} \doteq 0 \Rightarrow$

$\beta_M = \beta_{M,\psi} = 1{,}302$

$\underline{\mu_y} = 0{,}5567 \cdot (2 \cdot 1{,}302 - 4) + \frac{1620 - 904}{904} = \underline{-0{,}6488}$

$\underline{k_y} = 1 - \frac{55{,}5 \cdot (-0{,}6488)}{0{,}9057 \cdot 1{,}1 \cdot 1586} = \underline{1{,}023}$

NACHWEIS:

$$\frac{55{,}5}{0{,}8523 \cdot 1586} + \frac{1{,}023 \cdot 207{,}6}{222{,}0} = \underline{0{,}9951 < 1{,}0} \checkmark$$

NACHWEIS GRENZ (b/t) ERFÜLLT – SIEHE B. FG. TH. II ORD.

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

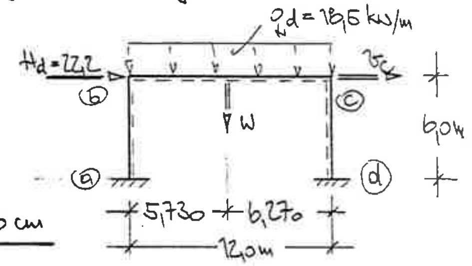
SIEHE E.TH. II. ORD. – ELAST. PLAST.

ANMERKUNG:

lt. DIN 18800 T2. FÜR BDKN-NW → STABENDMOMENTE N. TH II ORD.(!)
WENN ERFORDERLICH

VERFORMUNGEN:

$\xi = 0{,}4775 \qquad \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\Delta W = -0{,}04332$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}05913$ m

q_d : $\Delta W = 0{,}1604$ m

STELLE x_M: $\underline{W} = 0{,}05795$ m $\hat{=}$ $\underline{5{,}8 \text{ cm}}$

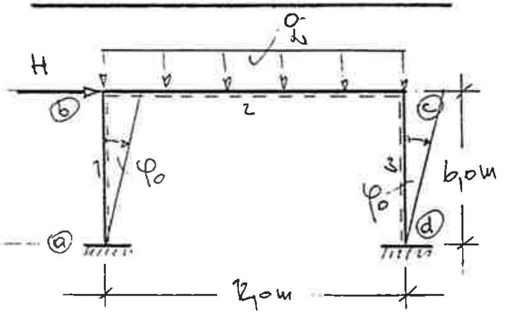
$\underline{\delta_c} = \bar{\delta}_c / C = \frac{1}{C} \cdot q_d \cdot [3{,}150 \cdot (1 + 0{,}03896)] = 0{,}01170 \hat{=} \underline{1{,}2 \text{ cm}}$

ANSATZ VON $\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDREHUNG)

11.8 ELASTIZITÄTSTH. II ORDNUNG – (ELAST. – ELAST.)

(NACH DIN 18800 T.1,T.2 – NOVEMBER 1990)

SYSTEM UND BELASTUNG :



$$\boxed{\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 10 = \text{const}}$$

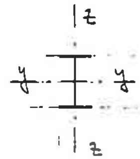
I PE 360 St 37

J = const.

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

GESUCHT : TRAGLAST DES SYSTEMS FÜR $\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 10$

QUERSCHNITTSWERTE – IPE 360



$A = 72{,}7$ cm² $\quad g = 0{,}571$ kN/m

$S_y = 510$ cm³ $\quad t_s = 0{,}8$ cm $\ t_F = 1{,}27$ cm $\ h = 36{,}0$ cm $\ b = 17{,}0$ cm

$W_y = 904$ cm³ $\quad J_y = 16\,270$ cm⁴ $\quad i_y = 15{,}0$ cm

$W_{pl} = 1020$ cm³ $\quad J_z = 1040$ cm⁴ $\quad i_z = 3{,}79$ cm

$J_{\omega} = 313\,600$ cm⁶ $\quad J_T = 28{,}9$ cm⁴

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad \underline{q_d = 16{,}5 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 19{,}8 \text{ kN}}$

(BEMESSUNGSLASTEN .... γ_F - FACHEN LASTEN)

ABSCHÄTZUNG DER NORMALKRÄFTE ÜBER TH I. ORDNUNG (N > 0 DRUCK)

S	N_s	ε_s	F_1	F_2	F_3
1	110	0,3571	3,983	2,004	5,987
2	55	0,5050	3,966	2,009	5,975
3	110	0,3571	3,983	2,004	5,987

$$\varepsilon = \ell \cdot \sqrt{\frac{N}{(EJ)_d}}$$

$$(EJ)_d = \frac{EJ}{\gamma_M} \qquad \gamma_M = 1{,}1$$

S	ℓ_1/ℓ_s	α_s	λ_s	γ_s
1	1,0	3,983	2,004	5,987
2	0,5	1,983	1,005	2,988
3	1,0	3,983	2,004	5,987

$$\frac{\Pi}{\left(\frac{(EJ)_d}{\ell_1}\right)} = \alpha_s = \frac{\ell_1}{\ell_s} \cdot F_1 \ , \quad \lambda_s = \frac{\ell_1}{\ell_s} \cdot F_2 \ , \quad \gamma_s = \frac{\ell_1}{\ell_s} \cdot F_3 \qquad \left(C = \frac{(EJ)_d}{\ell_1} = 5177 \text{ kNm}\right)$$

VORVERDREHUNG φ_0 :

$$\varphi_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{200} \cdot r_1 \cdot r_2 \qquad r_1 = \sqrt{\frac{5}{\ell}} = 0{,}9129 \qquad r_2 = \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{\frac{1}{n}}\right) = 0{,}8536 \qquad n = 2$$

$\underline{\varphi_0 = 0{,}002598}$ (ABMINDERUNG UM 2/3, DA VERFAHREN EE T.2, S6, PKT 2.1)

$\varepsilon < 1{,}6 \rightarrow$ KEINE VORKRÜMMUNG

BERECHNUNG NACH DER DEF.METHODE : $[A] \cdot \{X\} + \{B\} = 0$

UNBEKANNTEN : $\varphi_b, \varphi_c, v_c$ $\qquad (\hat{=} [Z] \cdot \{X\} + \{Z_0\} = 0)$

KOEFFIZIENTEN :

LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$$a_{11} = \alpha_1 + \alpha_2 = \underline{5{,}966} \qquad a_{21} = \lambda_2 = \underline{1{,}005} \qquad a_{31} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \gamma_1 = \underline{-0{,}9978}$$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$$a_{22} = \alpha_2 + \alpha_3 = \underline{5{,}966} \qquad a_{12} = \lambda_2 = \underline{1{,}005} \qquad a_{32} = -\frac{1}{\ell_3} \cdot \gamma_3 = \underline{-0{,}9978}$$

LF $\bar{v} = 1{,}0$:

$$a_{13} = a_{31} \qquad a_{23} = a_{32} \qquad a_{33} = \frac{1}{\ell_1^2} \cdot 2 \cdot \gamma_1 - \frac{N_1}{C \cdot \ell_1} + \frac{1}{\ell_3^2} \cdot 2 \cdot \gamma_3 - \frac{N_3}{C \cdot \ell_3}$$

$$a_{33} = \underline{0{,}6582}$$

LF 0,H:

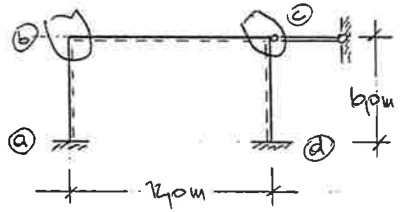
$$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08369 \cdot q \cdot l^2 = -198{,}8 \text{ kNm}$$

$$\underline{a_{10}} = \underline{-a_{20}} = \underline{-198{,}8 \text{ kNm}}$$

$$\underline{a_{30}} = -H - (N_1 + N_3) \cdot \varphi_0 = \underline{-20{,}37 \text{ kN}}$$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG:

$$a_{11} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{12} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{13} \cdot \bar{\psi} + a_{10} = 0$$
$$a_{21} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{22} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{23} \cdot \bar{\psi} + a_{20} = 0$$
$$a_{31} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{32} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{33} \cdot \bar{\psi} + a_{30} = 0$$



$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}$	LF
5,966	1,005	-0,9978	198,8
1,005	5,966	-0,9978	-198,8
-0,9978	-0,9978	0,6582	20,37
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}$	DET (A)
47,90	-32,25	54,68	> 0

$$[A] \cdot \{x\} = -\{b\}$$

$$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$$

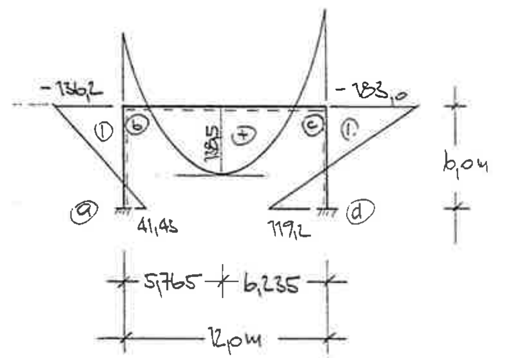
STABENDMOMENTE:

$$M_{ik} = M^0_{ik} + \gamma_s \cdot \left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{\psi}}{l}\right) + \lambda_s \cdot \left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{\psi}}{l}\right)$$

$$M_{ki} = M^0_{ki} - \lambda_s \cdot \left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{\psi}}{l}\right) - \gamma_s \cdot \left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{\psi}}{l}\right)$$

S	i-k	$q_d = 16{,}5$ kN/m: M^0_{i-k} kNm	M_{i-k} kNm
1	a	0	41,43
1	b	0	-136,2
2	b	-198,8	-136,2
2	c	-198,8	-183,0
3	c	0	-183,0
3	d	0	119,2

MOMENTE [kNm]

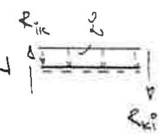


(VERLAUF ZWISCHEN DEN ENDMOMENTEN NACH TH. I. ORD.)

STABENDKRÄFTE $R_{ik} = R_s + R^L_{ik}$:

$$R_s = -\frac{1}{l} \cdot (M_{ik} - M_{ki}) - N_s \cdot \left(\frac{\bar{\psi}}{l\,C} + \varphi_0\right)$$

R^L_{ik} .. KRÄFTE INFOLGE QUERLAST AM BALKEN AUF 2 STÜTZEN



$$R^L_{bc} = -R^L_{cb} = \frac{1}{2} \cdot q \cdot l = 108{,}0 \text{ kN}$$

S	i-k	$q_d = 16{,}5$ kN/m: R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a / b	0	-30,08
2	b	99,00	95,10
2	c	-99,00	-102,9
3	c / d	0	49,89

$$\Sigma H = 0 \;, \quad \Sigma V = 0$$

STABENDQUERKRÄFTE Q :

$Q_{ik} = R_{ik} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_i / c + \varphi_0)$ $\qquad Q_{ki} = R_{ki} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_k / c + \varphi_0)$

		$q = 16{,}5$ kN/m
(S)	i-k	Q_{ik} kN
①	a	-29,79
	b	-28,78
②	b	95,61
	c	-103,2
③	c	49,49
	d	50,18

NORMALKRÄFTE AUS GLEICHGEW. ($N_s < 0 \triangleq$ DRUCK)

		$q = 16{,}5$ kN/m
(S)	i-k	N_s kN
①	a-b	-95,10
②	b-c	-49,89
③	c-d	-62,9

GESCHÄTZTEN NORMALKRÄFTE SIND GRÖSSER ALS DIE BERECHNETEN
→ SICHEREN SEITE

max FELDMOMENT STAB b-c

$M_0 = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot q \cdot \ell^2$ $\qquad M_1 = \frac{M_{ik} + M_{ki} + 2 \cdot M_0}{\cos \varepsilon/2}$ $\qquad v = \frac{M_{ik} - M_{ki}}{M_1 \cdot \sin \varepsilon/2}$

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{1}{\varepsilon} \cdot \operatorname{arctg} v$ $\qquad \max M = \frac{1}{2} \sqrt{1+v^2} \cdot M_1 - M_0$ $\qquad x_M = \ell \cdot \xi_M$

	$q = 16{,}5$ kN/m
M_0	9317
M_1	18916
v	0,009906
ξ_M	0,4804
x_M	5,765
max M	138,5

GRENZSPANNUNGEN :

$\sigma_{R,d} = f_{y,k} / \gamma_M = 24{,}0/1{,}1 = 21{,}82$ kN/cm²

$\tau_{R,d} = f_{y,k} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_M) = 24{,}0 / (\sqrt{3} \cdot 1{,}1) = 12{,}60$ kN/cm²

NACHWEISE :

max σ : KNOTEN ⓒ : $\sigma_M = \frac{M}{W} = -\frac{18300}{904} = -20{,}24$ kN/cm²

$\sigma_N = \frac{N}{A} = -\frac{104{,}7}{74{,}7} = -1{,}415$ kN/cm²

$\max \sigma = |-20{,}24 - 1{,}415| = \underline{21{,}66 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82 \text{ kN/cm}^2}$

max τ : KNOTEN ⓒ :

$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \frac{629 \cdot 516}{16270 \cdot 0{,}8} = \underline{4{,}032 \text{ kN/cm}^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60 \text{ kN/cm}^2}$

$\sigma_V \leq \sigma_{R,d}$: FÜR $\frac{\sigma}{\sigma_{R,d}} \leq 0{,}5$ ODER $\frac{\tau}{\tau_{R,d}} \leq 0{,}5$ GILT BEDINGUNG $\sigma_V \leq \sigma_{R,d}$ ALS ERFÜLLT (Vss. ALLEINIGE WIRKUNG VON τ UND σ)

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

U. TAB. 12, T.1, S 23

(b/t) ERFÜLLT DIE BEDINGUNGEN, DA SIE FÜR TAB. 18 (VERF. P.P.) UND GRÖSSERE BEANSPR. ERFÜLLT SIND. – SIEHE BEISPIEL FG. II. ORD.

VERFORMUNGEN :

$(\xi = \xi_M \,,\ \xi' = 1 - \xi)$

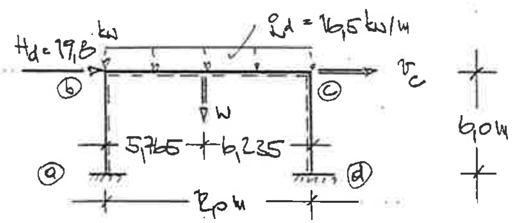
M_i : $\Delta W = \left(\frac{\sin \varepsilon \cdot \xi'}{\sin \varepsilon} - \xi'\right) \cdot \frac{M_i}{N} = -0{,}04100\ m$

M_k : $\Delta W = \left(\frac{\sin \varepsilon \cdot \xi}{\sin \varepsilon} - \xi\right) \cdot \frac{M_k}{N} = -0{,}05370\ m$

$q_{\perp}$: $\Delta W = \left[\frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \left(\frac{\cos \varepsilon \cdot (0{,}5 - \xi)}{\cos \varepsilon/2} - 1\right) - \frac{\xi \cdot \xi'}{2}\right] \cdot \frac{q \cdot \ell^2}{N} = 0{,}1470\ m$

STELLE X_M : $\underline{W} = 0{,}05230\ m \,\hat{=}\, \underline{5{,}2\ cm}$

$\underline{v_c} = F_u / c = 0{,}01056\ m = \underline{1{,}1\ cm}$



PLAST. GRENZSCHNITTGRÖSSEN :

$M_{pe} = f_{y,k} \cdot W_{pe} = 24{,}0 \cdot 1020 = 24480\ kNcm \,\hat{=}\, 244{,}8\ kNm$

$\underline{M_{pe,d}} = f_{y,d} \cdot W_{pe} = 21{,}82 \cdot 1020 = 22260\ kNcm \,\hat{=}\, \underline{222{,}6\ kNm}$

$N_{pe} = f_{y,k} \cdot A = 1745\ kN$

$\underline{N_{pe,d}} = f_{y,d} \cdot A = \underline{1586\ kN}$

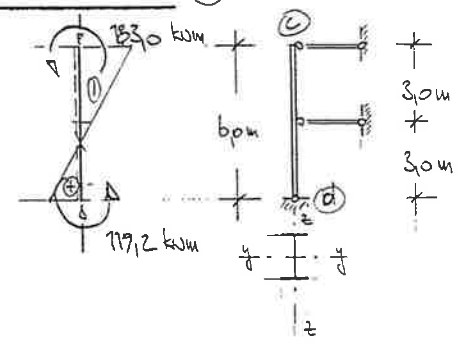
NACHWEIS - BIEGEDRILLKNICKEN

(DIN 18800 T2 S 15 PKT 3.4.3)

NACHWEIS DER RAHMENSTIELE DURCH STIEL (3)

$N = 102{,}9\ kN$ (DRUCK ≥ Ø)

$\boxed{S_K = \ell = 3{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)



$M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot (\sqrt{c^2 + 0{,}25 \cdot z_p^2} + 0{,}5 \cdot z_p)$

$N_{Ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_z}{\ell^2} = 2395\ kN$

$c^2 = \frac{J_{\omega\omega} + 0{,}039 \cdot \ell^2 \cdot J_T}{J_z} = 399{,}1\ cm^2$

$z_p \doteq Ø \quad \psi \doteq 0{,}17 \rightarrow \zeta = 1{,}77 - 0{,}77 \cdot \psi = 1{,}639$

$M_{Ki,y} = 784{,}2\ kNm \quad \bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pe}}{M_{Ki,y}}} = 0{,}5587 \quad n = 2{,}5$ (WALZPROFIL)

$\underline{K_M} = \left(\frac{1}{1 + \bar{\lambda}_M^{2n}}\right)^{1/n} = \underline{0{,}9790}$

$\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{N_{pe}}{N_{Ki,z}}} = 0{,}8536$

$h/b = 2{,}1 > 1{,}2 \quad t = 8\ mm < 40\ mm \quad \perp\ z\text{-}z \Rightarrow$ LINIE $b \Rightarrow \alpha = 0{,}34$

$k = 0{,}5 \cdot [1 + \alpha (\bar{\lambda}_K - 0{,}2) + \bar{\lambda}_K^2] = 0{,}9754 \quad \underline{K_z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_K^2}} = \underline{0{,}6909}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

$\frac{N}{K_z \cdot N_{pe,d}} + \frac{M}{K_M \cdot M_{pe,d}} \cdot k_y = \frac{102{,}9}{0{,}6909 \cdot 1586} + \frac{183{,}0}{0{,}9790 \cdot 222{,}6} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}9336 < 1{,}0}$

BZW. FÜR $\frac{N}{K_z \cdot N_{pe,d}} < 0{,}10$ – STAB MIT GERINGER NORMALKRAFT –

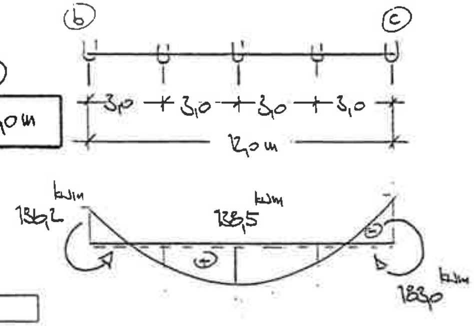
GILT : $\underline{\text{BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS}} : \frac{M}{K_M \cdot M_{pe,d}} \leq 1{,}0$

RIEGEL ②

N = 49,89 kN (GABELLAGERUNG)

$N_{Ki,z}$ = 2375 kN (WIE VOR) $\boxed{s_K = l = 3{,}0\,m}$

κ_z = 0,6909 (WIE VOR)



a.) NACHWEIS FÜR M_y = 138,5 kNm

ANN: $\psi = 1{,}0 \rightarrow \zeta = 1{,}0$

$z_p = -20\,cm$

$M_{Ki,y} = 2956\,kNm \quad \bar{\lambda}_M = 0{,}9100 \quad \bar{n} = 2{,}5 \quad k_n = 0{,}8 \quad n = 2{,}0 \quad \underline{k_M = 0{,}7702}$

$$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M}{\kappa_M \cdot M_{pl,d}} \cdot k_y = \frac{49{,}89}{0{,}6909 \cdot 1586} + \frac{138{,}5}{0{,}7702 \cdot 222{,}6} \cdot 1{,}0 =$$

$$= 0{,}04552 + 0{,}8078 = \underline{0{,}8533 < 1{,}0}$$

b.) NACHWEIS FÜR M_y = 183,0 kNm

ANN. $\psi = \phi$: $\zeta = 1{,}77$

$z_p = \phi$

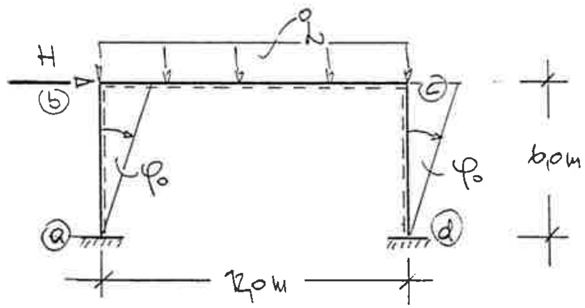
$M_{Ki,y} = 846{,}9\,kNm \quad \bar{\lambda}_M = 0{,}5576 \quad n = 2{,}5 \quad \underline{k_M = 0{,}9826}$

$$\frac{49{,}89}{0{,}6909 \cdot 1586} + \frac{183{,}0}{0{,}9826 \cdot 222{,}6} \cdot 1{,}0 = 0{,}04553 + 0{,}8367 = \underline{0{,}8822 < 1{,}0}$$

A1.9 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORDNUNG – (ELAST. – PLAST.)

(NACH DIN 18800 T.1, T.2 – NOVEMBER 1990)

SYSTEM UND BELASTUNG :



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 16 = const}$$

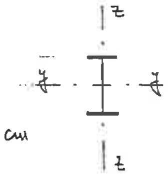
IPE 360 St 37

J = const.

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\,kN/cm^2$

GESUCHT : TRAGLAST DES SYSTEMS FÜR $\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 16$

QUERSCHNITTSWERTE – IPE 360 :



$A = 72{,}7\,cm^2$	$g = 0{,}571\,kN/m$		
$S_y = 510\,cm^3$	$t_s = 0{,}8\,cm$	$t_F = 1{,}27\,cm$	$h = 36{,}0\,cm$ $b = 17{,}0\,cm$
$W_y = 904\,cm^3$	$J_y = 16\,270\,cm^4$	$i_y = 15{,}0\,cm$	
$W_{pl} = 1020\,cm^3$	$J_z = 1040\,cm^4$	$i_z = 3{,}79\,cm$	
	$J_{\omega} = 313\,600\,cm^6$	$J_T = 28{,}9\,cm^4$	

$A_s = t_s \cdot (h - 2 \cdot \frac{t_F}{2}) = 27{,}78\,cm^2$

$\underline{f_{y,k} = 24{,}0\,kN/cm^2}$: $N_{pl} = A \cdot f_{yk} = 1745\,kN$ $N_{pl,d} = 1586\,kN$

$\underline{f_{y,d} = 21{,}82\,kN/cm^2}$: $Q_{pl} = A_s \cdot f_{yk}/\sqrt{3} = 385\,kN$ $Q_{pl,d} = 350\,kN$

$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_{y,k} = 244{,}8\,kNm$ $M_{pl,d} = 222{,}6\,kNm$

$$\text{VORH } \alpha_{pl} = \frac{W_{pl}}{W_y} = \underline{1{,}13 < \text{MAX } \alpha_{pl} = 1{,}25}$$

1. ANNAHME

$q_d = 19{,}7$ kN/m $\rightarrow$ $H_d = 23{,}64$ kN
(γ_F-FACHEN LASTEN)

ABSCHÄTZUNG DER NORMALKRÄFTE ÜBER TH. I ORDNUNG
(N > 0 DRUCK)

S	N_s	ε_s	F_1	F_2	F_3
1	130	0,3882	3,980	2,005	5,985
2	65	0,5489	3,961	2,010	5,971
3	130	0,3882	3,980	2,005	5,985

$\varepsilon = \ell \cdot \sqrt{\frac{N}{(EI)_d}}$

S	l_1/l_s	γ_s	λ_s	η_s
1	1,0	3,980	2,005	5,985
2	0,5	1,981	1,005	2,968
3	1,0	3,980	2,005	5,985

$\frac{\Pi}{\left(\frac{(EI)_d}{\ell_1}\right)} = \gamma_s = \left(\frac{\ell_1}{\ell_s}\right) \cdot F_1 \quad \lambda_s = \left(\frac{\ell_1}{\ell_s}\right) \cdot F_2 \quad \eta_s = \left(\frac{\ell_1}{\ell_s}\right) \cdot F_3$ $\quad \left(C = \frac{(EI)d}{\ell_1} = 5177 \text{ kNm}\right)$

VORVERDREHUNG φ_0:

$\varphi_0 = \frac{1}{200} \cdot r_1 \cdot r_2 \qquad r_1 = \sqrt{\frac{5}{\ell}} = 0{,}9129 \qquad r_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1}{n}}\right) = 0{,}8536 \quad n = 2$

$\varphi_0 = 0{,}003896$

$\varepsilon < 1{,}6$ $\rightarrow$ KEINE VORKRÜMMUNGEN

BERECHNUNG NACH DER DEFORMATIONSMETHODE

UNBEKANNTEN $\varphi_b, \varphi_c, \vartheta_c$ $\qquad [A] \cdot \{x\} + \{\delta\} = 0$

KOEFFIZIENTEN:

LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$a_{11} = \gamma_1 + \gamma_2 = 5{,}961 \qquad a_{12} = \lambda_2 = 1{,}005 \qquad a_{13} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \eta_1 = -0{,}9975$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{22} = \gamma_2 + \gamma_3 = 5{,}961 \qquad a_{21} = a_{12} \qquad a_{23} = -\frac{1}{\ell_3} \cdot \eta_3 = -0{,}9975$

LF $\bar{\vartheta} = 1{,}0$:

$a_{31} = a_{13} \quad a_{32} = a_{23} \quad a_{33} = \frac{1}{\ell_1^2} \cdot 2 \cdot \eta_1 - \frac{N_1}{\ell_1 \cdot C} + \frac{1}{\ell_3^2} \cdot 2 \cdot \eta_3 - \frac{N_3}{\ell_3 \cdot C} = 0{,}6567$

LF q, H:

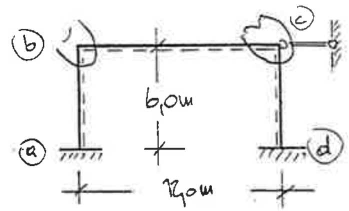
$\Pi^0_{bc} = \Pi^0_{cb} = -0{,}08375 \cdot q \cdot \ell^2 = -237{,}6$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = -237{,}6$ kNm

$a_{30} = -H - (N_1 \cdot \varphi_0 + N_3 \cdot \varphi_0) = -24{,}65$ kN

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG:

$$a_{11} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{12} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{13} \cdot \bar{\vartheta} + a_{10} = 0$$
$$a_{21} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{22} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{23} \cdot \bar{\vartheta} + a_{20} = 0$$
$$a_{31} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{32} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{33} \cdot \bar{\vartheta} + a_{30} = 0$$



$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}$	LF
5,961	1,005	-0,9975	237,6
1,005	5,961	-0,9975	-237,6
-0,9975	-0,9975	0,6567	24,65
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}$	DET (A)
57,46	-38,43	66,44	> 0

$[A] \cdot \{x\} = -\{\delta\}$

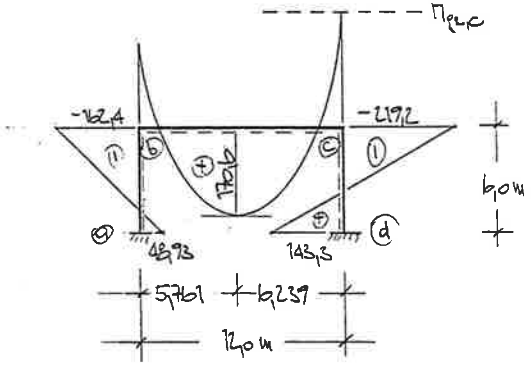
$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

STABENDMOMENTE :

$$M_{ik} = M_{ik}^{o} + \varkappa_s \cdot \left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{v}}{l}\right) + \lambda_s \cdot \left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{v}}{l}\right)$$

$$M_{ki} = M_{ki}^{o} - \lambda_s \cdot \left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{v}}{l}\right) - \varkappa_s \cdot \left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{v}}{l}\right)$$

		$q = 19{,}7$ kN/m	
(S)	i-k	M_{ik}^{o} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	48,93
	b	0	-162,4
2	b	-237,6	-162,4
	c	-237,6	-219,2
3	c	0	-219,2
	d	0	143,3



STABENDKRÄFTE $R_{ik} = R_s + R_{ik}^L$:

$$R_s = -\frac{1}{l}(M_{ik} - M_{ki}) - N_s \cdot \left(\frac{v}{lc} + \varphi_0\right)$$

R_{ik}^L ... KRÄFTE INFOLGE QUERBELASTUNG AM BALKEN AUF 2 STÜTZEN

$$R_{bc}^L = -R_{cb}^L = \frac{1}{2} \cdot q \cdot l = 130{,}2 \text{ kN}$$

		$q = 19{,}7$ kN/m	
(S)	i-k	R_{ik}^L kN	R_{ik} kN
1	a	0	-36,01
	b	0	
2	b	118,2	113,5
	c	-118,2	-122,9
3	c	0	57,63
	d	0	

$\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$

STABENDQUERKRÄFTE Q :

$$Q_{ik} = R_{ik} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_i / c + \varphi_0) \qquad Q_{ki} = R_{ki} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_k / c + \varphi_0)$$

		$q = 19{,}7$ kN/m
(S)	i-k	Q_{ik} kN
1	a	-35,50
	b	-34,06
2	b	114,2
	c	-123,4
3	c	57,17
	d	60,14

NORMALKRÄFTE

AUS GLEICHGEW. ($N_s < 0$ DRUCK)

		$q = 19{,}7$ kN/m
(S)	i-k	N_s
1	a-b	-113,5
2	b-c	-57,63
3	c-d	-122,9

GESCHÄTZTEN NORMALKRÄFTE SIND GRÖSSER ALS DIE BERECHNETEN
→ SICHERE SEITE

max FELDMOMENT STAB b–c:

$$M_0 = \frac{1}{\varepsilon^2}\cdot q \cdot l^2 \qquad M_1 = \frac{M_{ik} + M_{ki} + 2\cdot M_0}{\cos \varepsilon/2} \qquad V = \frac{M_{ik} - M_{ki}}{M_1 \cdot \sin \varepsilon/2}$$

$$\xi_m = \frac{1}{2} - \frac{1}{\varepsilon}\cdot \operatorname{arctg} V \qquad \max M = \frac{1}{2}\sqrt{1+V^2}\cdot M_1 - M_0 \qquad x_m = l \cdot \xi_m$$

	$q_d = 21{,}7$ kN/m
M_0	9415
M_1	19170
V	0,01693
ξ_m	0,4801
x_m	5,761
max M	170,6

INTERAKTIONSBEZIEHUNG M, N, Q

lt. DIN 18800 T1, S26 TAB 16

$$\frac{\max N}{N_{pl,d}} = \frac{130}{1586} = 0{,}08197 < 0{,}1 \qquad \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = \frac{123{,}4}{350} = 0{,}3526 > 0{,}33 \Rightarrow$$

M, Q INTERAKT.

STAB b–c:

KNOTEN c – LINKS: $\quad M_{pl,c} = \left(1 - 0{,}37\cdot\frac{Q_{cb}}{Q_{pl,d}}\right)\cdot\frac{1}{0{,}88}\cdot M_{pl,d} = 220{,}0$ kNm

$M_{cb} = -219{,}2$ kNm $< M_{pl,c} = -220{,}0$ kNm ✓

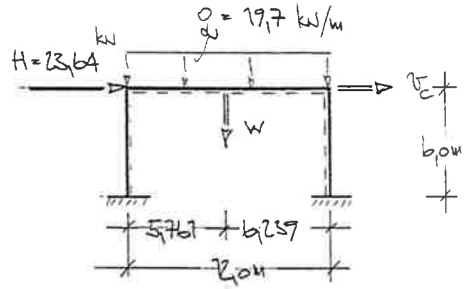
INTERAKTION ÜBERALL EINGEHALTEN

NACHWEIS VON GRENZ (b/t) $\qquad$ lt. TAB 15. T1. S.27

ERFÜLLT, DA (b/t) GRENZ (b/t) VON TAB 15 (PLAST.–PLAST)

EINHALT – SIEHE FLIESSGELENKTH. II ORDNUNG

VERFORMUNGEN



M_i: $\quad \Delta W = -0{,}04912$ m

M_k: $\quad \Delta W = -0{,}06461$ m

q_d: $\quad \Delta W = 0{,}1763$ m

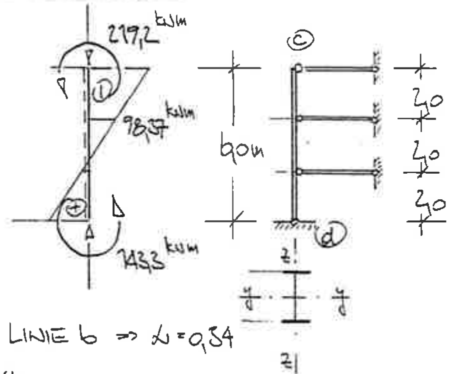
STELLE x_m: $\quad \underline{W} = 0{,}06257$ m $\hat{=}$ $\underline{6{,}3 \text{ cm}}$

$\underline{v_c = \bar{v}/C} = 0{,}01283$ m $\hat{=}$ $\underline{1{,}3 \text{ cm}}$

NACHWEIS – BIEGEDRILLKNICKEN

(DIN 18800 T2. S15 PKT 3.4.3)

NACHWEIS DER RAHMENSTIELE DURCH STIEL ③



$N = 122{,}9$ kN (DRUCK > 0)

$\boxed{S_K = l = 2{,}0\,m}$ (GABELLAGERUNG)

$$N_{ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_z}{l^2} = 5389 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{ki,z}}} = 0{,}5690$$

$h/b = 2{,}1 > 1{,}2 \quad t = 8\,mm < 40 \quad \perp$ z-z $\rightarrow$ LINIE b $\Rightarrow \alpha = 0{,}34$

$$k = 0{,}5\cdot\left(1 + \alpha\cdot(\bar{\lambda}_K - 0{,}20) + \bar{\lambda}_K^2\right) = 0{,}7246$$

$$\underline{k_z} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_K^2}} = \underline{0{,}8523}$$

$$c^2 = \frac{J_\omega + 0{,}039\cdot l^2\cdot J_T}{J_z} = 3449 \qquad z_p \doteq + \qquad \psi \doteq 0{,}45 \qquad \zeta = 1{,}42$$

$$M_{ki,y} = \zeta\cdot N_{ki,z}\left(\sqrt{c^2 + 0{,}25\cdot z_p^2} + 0{,}5\cdot z_p\right) = 1421 \text{ kNm} \qquad \bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{ki,y}}} = 0{,}4151$$

$n = 2{,}5$ $(\psi < 0{,}5)$ WALZPROFIL $k_M = \left(\frac{1}{1+\bar{\lambda}_M^{2n}}\right)^{1/n} = 0{,}9951$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{122{,}9}{0{,}8523 \cdot 1586} = \underline{0{,}09092 < 0{,}1} \Rightarrow$$

$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{219{,}2}{0{,}9951 \cdot 2226} = \underline{0{,}9896 \leq 1{,}0} \checkmark$$

b.) NACHWEIS FÜR $M_y = 219{,}2$ kNm

ANN. $\psi = 1 \rightarrow \zeta = 1{,}77$

$z_p = +$

$M_{Ki,y} = 1771$ kNm $\bar{\lambda}_M = 0{,}3718 < 0{,}4 \rightarrow \underline{k_M = 1{,}0}$

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{59{,}63}{0{,}8523 \cdot 1586} = \underline{0{,}04411 < 0{,}1} \Rightarrow$$

$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{219{,}2}{1{,}0 \cdot 2226} = \underline{0{,}9847 \leq 1{,}0} \checkmark$$

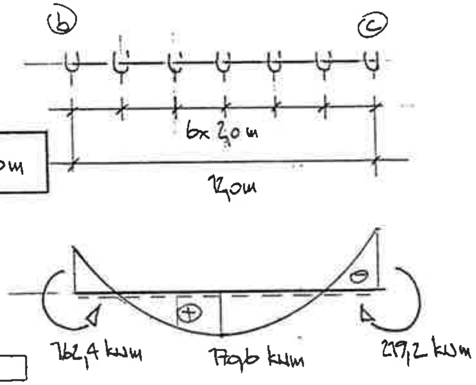
RIEGEL ②

$N = 59{,}63$ kN (GABELLAGERUNG)

$N_{Ki,z} = 5389$ kN (WIE VOR)

$\underline{k_z = 0{,}8523}$ (WIE VOR)

$\boxed{s_K = l = 2{,}0\,m}$



a.) NACHWEIS FÜR $M_y = 170{,}6$ kNm

ANN. $\psi = 1{,}0 \rightarrow \zeta = 1{,}0$

$z_p = -20$

$M_{Ki,y} = 597{,}8$ kNm $\bar{\lambda}_M = 0{,}6399$ $\bar{n} = 2{,}5$ $k_N = 0{,}8$ $n = 2{,}0$

$\underline{k_M = 0{,}9254}$

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{59{,}63}{0{,}8523 \cdot 1586} = \underline{0{,}04411 < 0{,}1} \Rightarrow$$

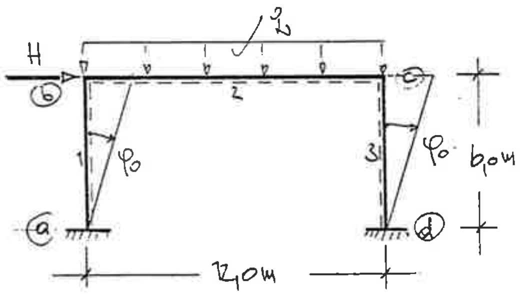
$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{170{,}6}{0{,}9254 \cdot 2226} = \underline{0{,}8282 \leq 1{,}0} \checkmark$$

1.10 FLIESSGELENKTHEORIE I. ORDNUNG (EXAKTE BERE.)

BERECHNET NACH DIN 18800 T.1, T.2 – NOVEMBER 1990

SYSTEM UND BELASTUNG :

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10 = \text{const.}}$$



I PE 360 St 37

J = const.

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

GESUCHT : TRAGLAST DES SYSTEMS FÜR : $\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10$

QUERSCHNITTSWERTE – I PE 360 :

$A = 72{,}7$ cm², $A_S \doteq t_s \cdot (h - t_f) = 27{,}78$ cm², $g = 0{,}571$ kN/m

$S_y = 510$ cm³, $W_{yel} = 904$ cm³, $W_{ypl} = 2 \cdot S_x = 1020$ cm³, $\alpha_{pl} = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = 1{,}13$

$J_y = 16\,270$ cm⁴, $i_y = 15{,}0$ cm, $J_z = 1040$ cm⁴, $i_z = 3{,}79$ cm

$J_\omega = 313\,600$ cm⁶ $J_T = 28{,}9$ cm⁴

RECHNUNG NACH FG TH. I ORD. ZULÄSSIG ?

DIN 18800 T.2, S.26 PKT 5.3.2.4 (527)

$$\frac{\alpha}{1 + \frac{J_S \cdot l}{J_R \cdot h}} \cdot \frac{(E \cdot J_S)_d}{N \cdot h^2} \geq 10$$

$\alpha = 10$ .. EINGESP. STÜTZENFUSS

N .. Σ DER VERTIKALLASTEN

$$\frac{10}{1 + 10 \cdot \frac{12{,}0}{6{,}0}} \cdot \frac{2{,}1 \cdot 10^8 \cdot 16\,270 \cdot 10^{-8}}{N \cdot 6{,}0^2 \cdot 1{,}1} \geq 10$$

$\Rightarrow \underline{N \leq 172{,}6 \text{ kN}}$ BZW $\underline{q \leq 14{,}38 \text{ kN/m}} < q = 19{,}7$ kN/m (VERF. EP.)

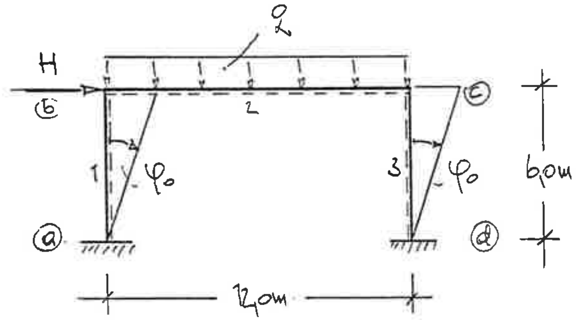
→ ZU NIEDER → ABBRUCH

A1.11 FLIESSGELENKTHEORIE II ORD. (EXAKTE BERECHNUNG)

BERECHNET NACH DIN 18800 T1, T2 – NOVEMBER 1990

SYSTEM UND BELASTUNG :

$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10 = \text{const}}$$



I PE 360 St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

$J = 16\,270$ cm⁴ = const

GESUCHT :

TRAGLAST DES GEG. SYSTEMS FÜR : $\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10$ = const.

1. ANNAHME : $\underline{q_d = 20{,}0 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 24{,}0 \text{ kN}}$

ABSCHÄTZUNG DER NORMALKRÄFTE N_S ÜBER TH. I. ORDNUNG

N > 0 DRUCK

$$\varepsilon_S = l_S \cdot \sqrt{\frac{N_S}{(EJ_S)_d}}$$

S	N_S [kN]	l_i/l_S	ε_S	F_1	F_2	F_3	F_4
1	120,0	1,0	0,3729	3,982	2,005	5,986	11,97
2	65,0	0,5	0,5489	3,961	2,010	5,970	–
3	130,0	1,0	0,3882	3,980	2,005	5,985	11,97

(S)	l_1/l_s	$\varkappa_s$	λ_s	η_s
①	1,0	3,982	2,005	5,986
②	0,5	1,981	1,005	2,986
③	1,0	3,980	2,005	5,985

$$\frac{\Pi}{\left(\frac{(EJ)d}{l_1}\right)} = \varkappa_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right)\cdot F_1 \,,\quad \lambda_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right)\cdot F_2 \,,\quad \eta_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right)\cdot F_3 \qquad \left(C = \frac{(EJ)d}{l_1} = 5777\ kNm\right)$$

VORVERDREHUNG φ_0 :

$$\varphi_0 = \frac{1}{200}\cdot r_1\cdot r_2 \qquad r_1 = \sqrt{\frac{5}{l}} = 0{,}9129 \qquad r_2 = \frac{1}{2}\cdot\left(1+\sqrt{\frac{1}{n}}\right) = 0{,}8536 \qquad n=2$$

$$\underline{\varphi_0 = 0{,}003896} \qquad\qquad \varepsilon < 1{,}6 \Rightarrow \underline{w_0 = 0}$$

BERECHNUNG NACH DER DEF. METHODE : $[A]\cdot\{X\} + \{B\} = 0$

UNBEKANNTEN : $\varphi_b, \varphi_c, \vartheta_c$

KOEFFIZIENTEN :

LF : $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$$\underline{a_{11}} = \varkappa_1 + \varkappa_2 = \underline{5{,}963} \qquad \underline{a_{21}} = \lambda_2 = \underline{1{,}005} \qquad \underline{a_{31}} = -\frac{1}{l_1}\cdot\eta_1 = \underline{-0{,}9977}$$

LF : $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$$\underline{a_{22}} = \varkappa_2 + \varkappa_3 = \underline{5{,}961} \qquad \underline{a_{12}} = \lambda_2 = \underline{1{,}005} \qquad \underline{a_{32}} = -\frac{1}{l_3}\cdot\eta_3 = \underline{-0{,}9977}$$

LF : $\bar{\vartheta} = 1{,}0$:

$$a_{13} = a_{23} = -\frac{1}{l_1}\cdot\eta_1 = \underline{-0{,}9977}$$

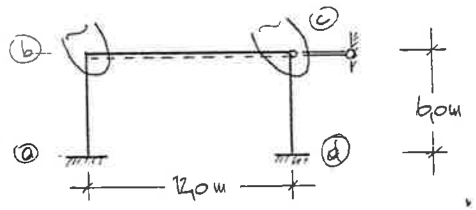
$$\underline{a_{33}} = \frac{1}{l_1^2}\cdot 2\cdot\eta_1 - \frac{N_1}{l_1\cdot C} + \frac{1}{l_3^2}\cdot 2\cdot\eta_3 - \frac{N_3}{l_3\cdot C} = \underline{0{,}6572}$$

LF $q_d = 20{,}0\ kN/m$; $H_d = 24{,}0\ kN$:

$$\Pi^0_{bc} = \Pi^0_{cb} = -0{,}08375\cdot q\cdot l_2^2 = \underline{-241{,}2\ kNm}$$

$$a_{10} = -241{,}2 \qquad a_{20} = 241{,}2$$

$$\underline{a_{30}} = -H - \varphi_0\cdot(N_1+N_3) = \underline{-24{,}97\ kN}$$



GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG :

$$a_{11}\cdot\bar{\varphi}_b + a_{12}\cdot\bar{\varphi}_c + a_{13}\cdot\bar{\vartheta} + a_{10} = 0$$
$$a_{21}\cdot\bar{\varphi}_b + a_{22}\cdot\bar{\varphi}_c + a_{23}\cdot\bar{\vartheta} + a_{20} = 0 \qquad \varphi_i = \frac{\bar{\varphi}_i}{C}$$
$$a_{31}\cdot\bar{\varphi}_b + a_{32}\cdot\bar{\varphi}_c + a_{33}\cdot\bar{\vartheta} + a_{30} = 0$$

$[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}$	ρ_A		LF
5,963	1,005	-0,9977	-1,005		241,2
1,005	5,961	-0,9977	-1,981		-241,2
-0,9977	-0,9977	0,6572	0		24,97
-1,005	-1,981	0	1,981		21,80

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}$	$\bar{\rho}_A$		DET|A|	DISSIPAT.
58,27	-39,04	67,19	—		> 0	—
59,40	-37,13	71,80	4,012		> 0	> 0

89

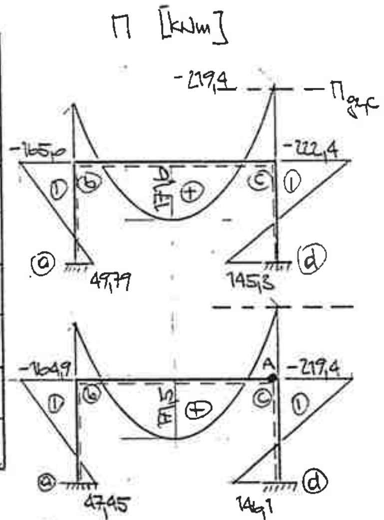
STABENDMOMENTE :

$$M_{ik} = M^0_{ik} + \varkappa_s \cdot (\bar{\varphi}_i - \tfrac{\bar{v}}{\ell} - \bar{\varrho}_i) + \lambda_s \cdot (\bar{\varphi}_k - \tfrac{\bar{v}}{\ell} - \bar{\varrho}_k) - \mu_{if} \cdot \bar{\varrho}_f$$

$$M_{ki} = M^0_{ki} - \lambda_s \cdot (\bar{\varphi}_i - \tfrac{\bar{v}}{\ell} - \bar{\varrho}_i) - \varkappa_s \cdot (\bar{\varphi}_k - \tfrac{\bar{v}}{\ell} - \bar{\varrho}_k) - \mu_{kf} \cdot \bar{\varrho}_f$$

			ELAST.	FG A
(S)	i-k	M^0_{i-k} [kNm]	M_{i-k} [kNm]	M_{i-k} [kNm]
1	a	0	47,79	47,45
	b	0	-165,0	-164,9
2	b	-241,2	-165,0	-164,9
	c	-241,2	-222,4	-219,4 ✓
3	c	0	-222,4	-219,4
	d	0	145,3	146,1

M [kNm]



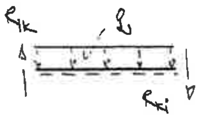
(ERLÄUTE NACH TH. I. ORD.)

STABENDKRÄFTE $R_{ik} = R_s + R^L_{ik}$:

$$R_s = -\tfrac{1}{\ell} \cdot (M_{ik} - M_{ki}) - N_s \cdot \left(\tfrac{\bar{v}}{\ell c} + \varphi_{os}\right)$$

R^L_{ik} .. KRÄFTE INF. QUERLAST AM BALKEN AUF 2 STÜTZEN

$R^L_{bc} = -R^L_{cb} = \tfrac{1}{2} \cdot q_2 \cdot \ell_2 = 132,0\ kN$



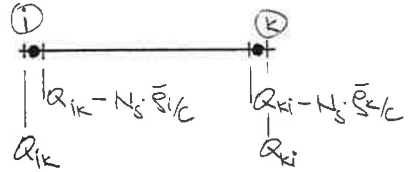
			ELAST.	FG A
(S)	i-k	R^L_{ik} [kN]	R_{ik} [kN]	R_{ik} [kN]
1	a	0	-36,53	-36,14
	b	0		
2	b	120,0	115,2	115,5
	c	-120,0	-124,8	-124,5
3	c	0	60,50	60,11
	d	0		

KONTROLLE : $\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$

STABENDQUERKRÄFTE Q :

$$Q_{ik} = R_{ik} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_i / c + \varphi_{os}) \qquad Q_{ki} = R_{ki} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_k / c + \varphi_o)$$

BEI FLIESSGELENK AN STABENDEN :



		ELAST.	FG A
(S)	i-k	Q_{i-k} [kN]	Q_{i-k} [kN]
1	a	-36,06	-35,67
	b	-34,71	-34,30
2	b	115,9	116,2
	c	-125,3	-125,0
3	c	60,03	59,68
	d	61,01	60,62

NORMALKRÄFTE : AUS GLEICHGEW. (N_s < 0 DRUCK)

		ELAST.	FG A
(S)	i-k	N_s [kN]	N_s [kN]
1	a-b	-115,2	-115,5
2	b-c	-60,50	-60,11
3	c-d	-124,8	-124,5

MAX. FELDMOMENT STAB b–c :

$M_0 = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot q\, l_2^2$ $M_1 = \frac{M_{ik} + M_{ki} + 2M_0}{\cos \varepsilon_2}$ $v = \frac{M_{ik} - M_{ki}}{M_1 \cdot \sin \varepsilon_2}$

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{1}{\varepsilon} \cdot \text{arctg}\, v$ $\max M = \frac{1}{2}\sqrt{1+v^2} \cdot M_1 - M_0$

$x_M = l_2 \cdot \xi_M$

$\varepsilon = 0{,}5432$ $l_2 = 12{,}0\,m$ $q = 20{,}0\,kN/m$

	ELAST.	FG A
M_0	9559	9559
M_1	19460	19460
v	0,01088	0,01033
ξ_M	0,4802	0,4812
x_M	5,762	5,774
max M	171,6	171,5

ERMITTLUNG DER PLAST. SCHNITTGRÖSSEN

$f_{y,k} = 24{,}0\,kN/cm^2$ $f_{y,d} = f_{y,k} / \gamma_M$ $\gamma_M = 1{,}1$

$N_{pl} = f_{y,k} \cdot A = 24{,}0 \cdot 72{,}7 = 1745\,kN$ $N_{pl,d} = 1586\,kN$

$M_{pl} = f_{y,k} \cdot 2 \cdot S = 24{,}0 \cdot 2 \cdot 510{,}0 = 24\,480\,kNcm \hat{=} 244{,}8\,kNm$ $M_{pl,d} = 222{,}6\,kNm$

$Q_{pl} = V_{pl} = f_{y,k}/\sqrt{3} \cdot A_S = 13{,}86 \cdot 27{,}78 = 385{,}0\,kN$ $Q_{pl,d} = 350\,kN$

$A_S = l_S \cdot t_S = 34{,}73 \cdot 0{,}8 = 27{,}78\,cm^2$

INTERAKTIONSBEZIEHUNG FÜR Q(V), M, N :

STAB ① :

$\frac{N}{N_{pl,d}} = 0{,}07264 < 0{,}1$ $\frac{Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}1030 < 0{,}33$ $M_{gr\,①} = M_{pl,d} = 222{,}6\,kNm$

STAB ② :

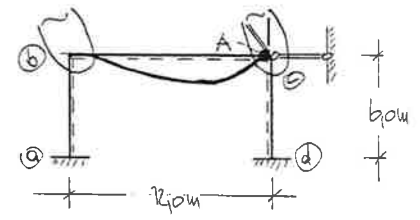
$\frac{N}{N_{pl,d}} = 0{,}03815 < 0{,}1$ $\frac{Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3580 > 0{,}33$ $0{,}88 \cdot \frac{M}{M_{pl,d}} + 0{,}37 \cdot \frac{Q}{Q_{pl,d}} = 1$

$M_{gr,d} = \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{Q}{Q_{pl,d}}\right) \frac{1}{0{,}88} \cdot M_{pl,d} = 219{,}4\,kNm$

$M_{cb} = -222{,}4\,kNm$ $|M_c| > M_{gr\,c} = 219{,}4\,kNm$

=> FLIESSGELENK A IN ©

SYSTEM MIT FG A IN ©



$M_A = -219{,}4\,kNm$

LF $\bar{\varphi}_A = 1{,}0$:

$a_{14} = -\lambda_2 = -1{,}005$ $a_{24} = -\varkappa_2 = -1{,}981$ $a_{34} = \emptyset$ $a_{44} = \varkappa_2 = 1{,}981$

$a_{40} = M^0_{cb} = -241{,}2\,kNm$

$a_{41} \cdot \varphi_b + a_{42} \cdot \varphi_c + a_{43} \cdot \tau + a_{44} \cdot \varphi_A + a_{40} = M_A$ MOMENTENBED. AM FG. A

=> LÖSUNG DES GLEICHUNGSSYSTEMS

INTERAKTIONSBEZIEHUNG FÜR Q(V), N, M

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} = 0{,}08197 < 0{,}1$ => Q, M INTERAKTION

$M_{gr,c} = \left(1 - 0{,}37 \cdot \frac{Q_{cb}}{Q_{pl,d}}\right) \cdot \frac{1}{0{,}88} \cdot M_{pl,d} = 219{,}5\,kNm$

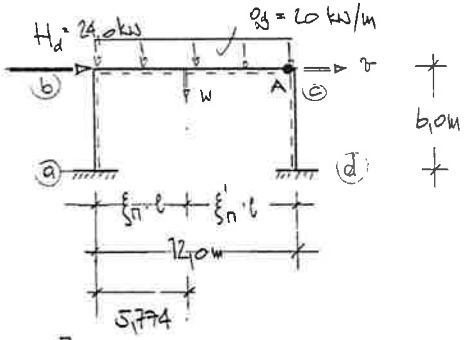
$M_A = -219{,}4\,kNm \doteq M_{gr\,c} = -219{,}5\,kNm$

$\max M_{FELD} = 171{,}5\,kNm < M_{pl,d} = 222{,}6\,kNm$ => SYSTEM HAT NOCH EINE PLAST. RESERVE BZW $q_{VORH} < q_{TRAGLAST}$

GESCHÄTZTEN NORMALKRÄFTE SIND GRÖSSER ALS DIE BERECHNETEN -> SICHERE SEITE

VERFORMUNGEN AM FLIESSGELENKSYSTEM

INFOLGE $q_d = 20{,}0\ kN/m \rightarrow H_d = 24{,}0\ kN$



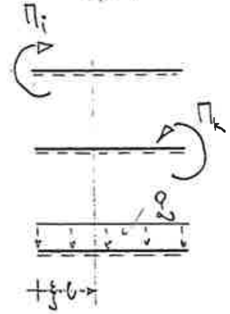
w .. DURCHBIEGUNG AN DER STELLE max M_{FELD}

$\xi_M = 0{,}4812 \quad \xi'_M = 0{,}5188$

$M_i = -164{,}9\ kNm \quad M_k = -219{,}4\ kNm$

$N = 65{,}0\ kN$

$\varepsilon = 0{,}5489$



$$\Delta w = \left(\frac{\sin \varepsilon \cdot \xi'}{\sin \varepsilon} - \xi'\right) \cdot \frac{M_i}{N} = -0{,}04985\ m$$

$$\Delta w = \left(\frac{\sin \varepsilon \xi}{\sin \varepsilon} - \xi\right) \cdot \frac{M_k}{N} = -0{,}06472\ m$$

$$\Delta w = \left[\frac{1}{\varepsilon^2}\left(\frac{\cos \varepsilon (0{,}5 - \xi)}{\cos \varepsilon/2} - 1\right) - \frac{\xi \cdot \xi'}{2}\right] \cdot \frac{q\ell^2}{N} = 0{,}1790\ m$$

$$\underline{w} = 0{,}06443\ m$$

$$\underline{v} = \frac{\bar{v}}{C} = \frac{71{,}80}{5177} = \underline{0{,}01387\ m}$$

$\underline{v_c = 1{,}4\ cm \quad , \quad w(x_M) = 6{,}4\ cm}$

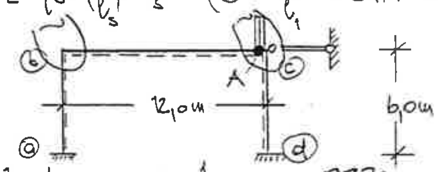
2. ANNAHME $\quad \underline{q_d = 23{,}0\ kN/m \rightarrow H_d = 27{,}6\ kN}$

S	N_s	ε	F_1	F_2	F_3
1	140,0	0,4028	3,978	2,006	5,984
2	75,0	0,5897	3,955	2,011	5,966
3	150,0	0,4170	3,977	2,006	5,983

$$\varepsilon = \ell \cdot \sqrt{\frac{N}{(EJ)_d}}$$

S	ℓ_1/ℓ_s	κ_s	λ_s	η_s
1	1,0	3,978	2,006	5,984
2	0,5	1,978	1,006	2,983
3	1,0	3,977	2,006	5,983

$\frac{M}{\frac{(EJ)_d}{\ell_1}}$: $\kappa_s = \left(\frac{\ell_1}{\ell_s}\right) \cdot F_1 \quad , \quad \lambda_s = \left(\frac{\ell_1}{\ell_s}\right) \cdot F_2 \quad \eta_s = \left(\frac{\ell_1}{\ell_s}\right) \cdot F_3 \quad \left(C = \frac{(EJ)_d}{\ell_1} = 5177\ kNm\right)$



SYSTEM MIT FG A IN c :

LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$\underline{a_{11}} = \kappa_1 + \kappa_2 = \underline{5{,}956} \quad \underline{a_{21}} = \lambda_2 = \underline{1{,}006} \quad \underline{a_{31}} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \eta_1 = \underline{-0{,}9973}$

$\underline{a_{41}} = -\lambda_2 = \underline{-1{,}006}$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$\underline{a_{22}} = \kappa_2 + \kappa_3 = \underline{5{,}955} \quad \underline{a_{12}} = \underline{a_{21}} \quad \underline{a_{32}} = -\frac{1}{\ell_3} \eta_3 = \underline{-0{,}9972} \quad \underline{a_{42}} = -\kappa_2 = \underline{-1{,}976}$

LF $\bar{v} = 1{,}0$:

$\underline{a_{13}} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \eta_1 = \underline{a_{31}} \quad \underline{a_{23}} = -\frac{1}{\ell_2} \cdot \eta_3 = \underline{a_{32}} \quad \underline{a_{43}} = \underline{\phi}$

$\underline{a_{33}} = \frac{1}{\ell_1^2} \cdot 2 \cdot \eta_1 - \frac{N_1}{C \cdot \ell_1} + \frac{1}{\ell_3^2} \cdot 2 \cdot \eta_3 - \frac{N_3}{C \cdot \ell_3} = \underline{0{,}6555}$

LF $\bar{\varphi}_A = 1{,}0$:

$\underline{a_{14}} = -\lambda_2 = \underline{a_{41}} \quad \underline{a_{24}} = -\kappa_2 = \underline{a_{42}} \quad \underline{a_{34}} = \phi = \underline{a_{43}} \quad \underline{a_{44}} = \kappa_2 = \underline{1{,}978}$

LF g, H:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08382 \cdot g \cdot l^2 = -\underline{277{,}6\,\text{kNm}}$

$\underline{a_{10}} = -a_{20} = \underline{-277{,}6\,\text{kNm}}$

$\underline{a_{30}} = -(H + N_1 \varphi_0 + N_3 \varphi_0) = \underline{-28{,}73\,\text{kN}}$ $\qquad \varphi_0 = 0{,}003896$

$\underline{a_{40}} = M^0_{cb} = \underline{-277{,}6\,\text{kNm}}$ $\qquad M_{pl,c} = \underline{-216{,}0\,\text{kNm} = M_A}$ (ANNAHME)

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG:

$$a_{11} \cdot \varphi_b + a_{12} \cdot \varphi_c + a_{13} \cdot \vartheta + a_{14} \cdot \varrho_A + a_{10} = 0$$
$$a_{21} \cdot \varphi_b + a_{22} \cdot \varphi_c + a_{23} \cdot \vartheta + a_{24} \cdot \varrho_A + a_{20} = 0$$
$$a_{31} \cdot \varphi_b + a_{32} \cdot \varphi_c + a_{33} \cdot \vartheta + a_{34} \cdot \varrho_A + a_{30} = 0$$
$$a_{41} \cdot \varphi_b + a_{42} \cdot \varphi_c + a_{43} \cdot \vartheta + a_{44} \cdot \varrho_A + a_{40} = M_A$$

$[A] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}$	$\bar{\varrho}_A$
5,956	1,006	-0,9973	-1,006
1,006	5,955	-0,9972	-1,978
-0,9973	-0,9972	0,6555	0
-1,006	-1,978	0	1,978

LF
277,6
-277,6
28,73
61,60

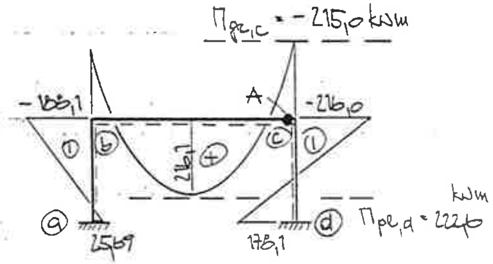
(277,6 − 216,0)

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}$	$\bar{\varrho}_A$			DET|A|
82,36	-19,24	139,9	53,79			> 0

STABENDMOMENTE:

Ⓢ	i-k	$g_d = 23{,}0$ kN/m M^0_{i-k} [kNm]	FG A M_{i-k} [kNm]
①	a	0	25,69
	b		-188,1
②	b	-277,6	-188,2
	c	-277,6	-216,0 ✓
③	c	0	-216,0
	d		178,1

M [kNm]



(VERLÄUFE NACH TH. I ORD.)

STABENDKRÄFTE R_{ik}:

Ⓢ	i-k	$g_d = 23{,}0$ kN/m R^L_{ik} [kN]	FG A R_{ik} [kN]
①	a	0	-36,81
	b		
②	b	138,0	135,7
	c	-138,0	-140,3
③	c	0	64,42
	d		

$\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$

STABENDQUERKRÄFTE Q :

$q_d = 23{,}0$ kN/m		FG A
S	i-k	Q_{ik} kN
①	a	-36,26
	b	-34,04
②	b	136,9
	c	-140,6
③	c	64,45
	d	65,00

NORMALKRÄFTE N : (DRUCK <0)

$q_d = 23{,}0$ kN/m		FG A
S	i-k	N_s
①	a-b	-135,7
②	b-c	-64,42
③	c-d	-140,3

max FELDMOMENT STAB b-c [kNm]

$q_d = 23{,}0$ kN/m	FG A
M_0	9524
M_1	19480
ν	0,004911
ξ_M	0,4917
x_M	5,900
max M	216,1

INTERAKTION FÜR Q(V), N, M :

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} = 0{,}09458 < 0{,}1 \rightarrow QM$

$Q_{A_{li}} = Q_c - N_2 \cdot \bar{S}_A / C = -141{,}4\ kN \rightarrow M_{pl,c} = -215{,}1\ kNm \Rightarrow$

$M_A = M_{pl,c} = -215{,}1\ kNm$ ($\doteq$ ANNAHME : $M_A = -216{,}0\ kNm$)

$\max M = 216{,}1\ kNm < M_{pl,d} = 222{,}6\ kNm$ → SYSTEM HAT NOCH

PLAST. RESERVE BZW $q < q_{TRAGLAST}$

VERFORMUNGEN

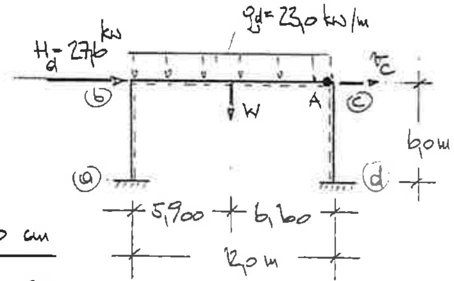
M_i : $\Delta w = -0{,}05688$ m

M_k : $\Delta w = -0{,}06458$ m

q_d : $\Delta w = 0{,}2072$ m

STELLE x_M : $\underline{w} = 0{,}08574$ m $\hat{=}$ $\underline{8{,}6\ cm}$

$\underline{v_c} = \frac{\bar{v}}{C} = 0{,}02702$ m $\hat{=}$ $\underline{2{,}7\ cm}$



3. ANNAHME

$q_d = 23{,}8\,kN/m \rightarrow H_d = 28{,}56\,kN$

(S)	N_S	ε	F_1	F_2	F_3
1	145	0,4099	3,978	2,006	5,983
2	73	0,5817	3,955	2,011	5,966
3	145	0,4099	3,978	2,006	5,983

$\varepsilon = \ell \cdot \sqrt{\frac{N}{(EJ)_d}}$

(S)	ℓ_1/ℓ_S	$\varkappa_S$	λ_S	η_S
1	1,0	3,978	2,006	5,983
2	0,5	1,978	1,006	2,983
3	1,0	3,978	2,006	5,983

$\frac{M}{\left(\frac{(EJ)d}{\ell_1}\right)} \cdot \varkappa_S = \left(\frac{\ell_1}{\ell_S}\right) \cdot F_1$

$\lambda_S = \left(\frac{\ell_1}{\ell_S}\right) \cdot F_2$

$\eta_S = \left(\frac{\ell_1}{\ell_S}\right) \cdot F_3$

$\left(C = \frac{(EJ)d}{\ell_1} = 5177\,kNm\right)$

SYSTEM MIT FG A IN (c):

LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$a_{11} = \varkappa_1 + \varkappa_2 = 5{,}956$ $\quad a_{21} = \lambda_2 = 1{,}006$ $\quad a_{31} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \eta_1 = -0{,}9972$

$a_{41} = -\lambda_1 = -a_{21}$.

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{22} = a_{11}$ $\quad a_{12} = a_{21}$ $\quad a_{32} = -\frac{1}{\ell_3} \eta_3 = -0{,}9972$ $\quad a_{42} = -\varkappa_2 = -1{,}978$

LF $\bar{v} = 1{,}0$:

$a_{13} = a_{31}$ $\quad a_{23} = a_{32}$ $\quad a_{33} = \frac{1}{\ell_1^2} \cdot 2 \cdot \eta_1 - \frac{N_1}{C \cdot \ell_1} + \frac{1}{\ell_3^2} \cdot 2 \cdot \eta_3 - \frac{N_3}{C \cdot \ell_3} = 0{,}6554$

$a_{43} = 0$

LF $\bar{\varsigma}_A = 1{,}0$:

$a_{14} = a_{41}$ $\quad a_{24} = a_{42}$ $\quad a_{34} = a_{43} = 0$ $\quad a_{44} = \varkappa_2 = 1{,}978$

LF q, H:

$M^{\circ}_{bc} = M^{\circ}_{cb} = -0{,}08381 \cdot q \cdot \ell_2^2 = -287{,}2\,kNm$

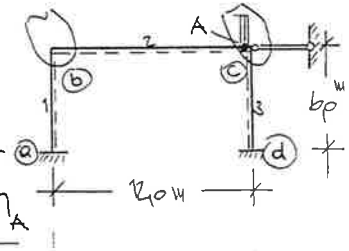
$a_{10} = -a_{20} = M^{\circ}_{bc} = -287{,}2\,kNm$

$a_{30} = -(H + N_1 \cdot \varphi_0 + N_2 \cdot \varphi_0) = -29{,}69\,kN$ $\qquad \varphi_0 = 0{,}003896$

$a_{40} = M^{\circ}_{cb} = -287{,}2\,kNm$ $\qquad M_A = M_{g_{2,c}} = -214{,}5\,kNm$ (ANNAHME)

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$$a_{11} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{12} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{13} \cdot \bar{v} + a_{14} \cdot \bar{\varsigma}_A + a_{10} = 0$$
$$a_{21} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{22} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{23} \cdot \bar{v} + a_{24} \cdot \bar{\varsigma}_A + a_{20} = 0$$
$$a_{31} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{32} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{33} \cdot \bar{v} + a_{34} \cdot \bar{\varsigma}_A + a_{30} = 0$$
$$a_{41} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{42} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{43} \cdot \bar{v} + a_{44} \cdot \bar{\varsigma}_A + a_{40} = M_A$$



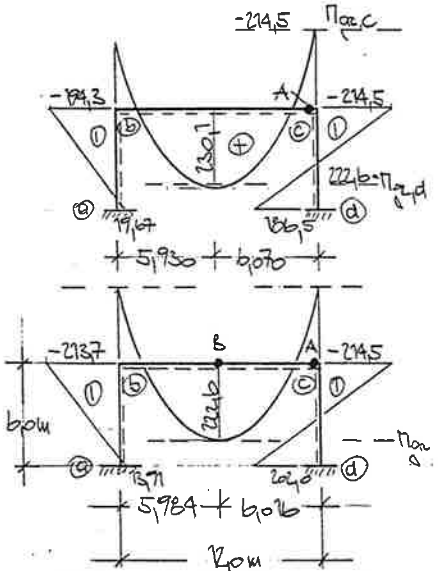
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}$	$\bar{\varsigma}_A$	$\bar{\varsigma}_B$	$\bar{\varsigma}_C$	LF
5,956	1,006	-0,9972	-1,006	-0,5111	-1,978	287,2
1,006	5,956	-0,9972	-1,978	0,5032	-1,006	-287,2
-0,9972	-0,9972	0,6554	0	0	0	29,69
-1,006	-1,978	0	1,978	-0,5032	1,006	72,70
-0,5111	0,5032	0	-0,5032	0,4858	0,5111	-78,40
-1,978	-1,006	0	1,006	0,5111	1,978	
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}$	$\bar{\varsigma}_A$	$\bar{\varsigma}_B$	$\bar{\varsigma}_C$	DET |A|
88,56	-14,20	158,4	67,59	–	–	> 0
101,3	-6,331	189,8	94,63	49,81	–	> 0
						< 0 !

STABENDMOMENTE:

		$q_d = 23{,}8$ kN/m FG A	FG A, B
Ⓢ i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm	M_{ik} kNm
① a	0	19,67	13,91
① b	0	−194,3	−213,7
② b	−287,2	−194,3	−213,9
② c	−287,2	−214,5 ✓	−214,5 ✓
③ c	0	−214,5	−214,5
③ d	0	186,5	202,0
② B	—	—	222,6 ✓

$$M_B = M^0_B + \left(\frac{l_1}{l}\right)_s F_{12}\cdot\left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{\delta}_s}{l} - \bar{\varsigma}_i\right) - \left(\frac{l_1}{l}\right)_s F_{13}\cdot\left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{\delta}_s}{l} - \bar{\varsigma}_k\right) - \left(\frac{l_1}{l}\right)_s F_{14}\cdot \bar{\varsigma}_s$$

M [kNm]



(VERLAUF NACH TH. I. ORD)

STABENDKRÄFTE R_{ik}:

		$q_d = 23{,}8$ kN/m FG A	FG A, B
Ⓢ i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN	R_{ik} kN
① a–b	0	−36,97	−39,39
② b	142,8	141,1	142,8
② c	−142,8	−144,5	−142,9
③ c–d	0	65,53	67,97

$\Sigma H = 0$ ✓ $\Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q:

		$q_d = 23{,}8$ kN/m FG A	FG A, B
Ⓢ	i-k	Q_{ik} kN	Q_{ik} kN
①	a	−36,41	−38,83
①	b	−33,92	−35,99
②	b	142,3	144,2
②	c	−144,7	−143,0
③	c	65,70	68,36
③	d	66,09	68,53

NORMALKRÄFTE: (N < 0 DRUCK)

		$q_d = 23{,}8$ kN/m FG A	FG A, B
Ⓢ	i-k	N_s kN	N_s kN
①	a-b	−141,1	−142,8
②	b-c	−65,63	67,97
③	c-d	−144,5	−142,9

INTERAKTION Q(V), N, M

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} = 0{,}09142 < 0{,}10 \rightarrow Q, M$

STAB ②

$\frac{Q_{Aei}}{Q_{pl,d}} = 0{,}4163 \Rightarrow M_{pl,c} = -214{,}0$ kNm $= M_A \doteq -214{,}5$ kNm (ANNAHME)

$M_{pl,d} = 222{,}6$ kNm ($N < 0{,}10 \wedge Q < 0{,}33$)

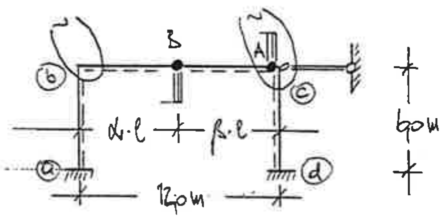
max FELDMOMENT STAB b–c

	FG A
M_b	1013o
M_1	2072o
V	0,003400
ξ_M	0,4942
x_M	5,930
max M	230,1

$\max M = 230{,}1\ kNm > M_{pl,d} = 222{,}6\ kNm \Rightarrow$ FG B IM FELD

$M_B = M_{pl,d} = 222{,}6\ kNm$ (AUS INTERAKTION MIT $Q_B \doteq 0$ – max M_{FELD})

SYSTEM MIT FG A, B



LAGE DES FG B:

β – BEDINGUNG:

$$\beta \le \frac{1}{\varepsilon} \arccos \frac{M_b + M_{ki}}{M_b + M_B} = 0{,}5013 \qquad \alpha = 0{,}4987$$

LF $\bar{\varrho}_B = 1{,}0$:

$a_{15} = -\frac{l_1}{l_2} \cdot F_{12} = -0{,}5111$ $\quad a_{25} = \frac{l_1}{l_2} \cdot F_{13} = 0{,}5032$ $\quad a_{35} = 0$

$a_{45} = -\frac{l_1}{l_2} \cdot F_{13} = -0{,}5032$ $\quad a_{55} = \frac{l_1}{l_2} \cdot F_{14} = 0{,}4658$

LF p_d, H:

$$M_B^0 = \frac{\sin\varepsilon \cdot \xi'}{\sin\varepsilon} \cdot M_{ik}^0 + \frac{\sin\varepsilon \cdot \xi}{\sin\varepsilon} \cdot M_{ki}^0 + \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \left[\frac{\cos\varepsilon \cdot (0{,}5-\xi)}{\cos\varepsilon/2} - 1\right] \cdot p_d \cdot l^2 = 144{,}2\ kNm$$

$a_{50} = -M_B^0 = -144{,}2\ kNm$ $\qquad M_B = M_{pl,d} = 222{,}6\ kNm$

MOMENTENBED. IM FG B:

$$a_{15} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{25} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{35} \cdot \bar{\psi} + a_{45} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{55} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{50} = -M_B$$

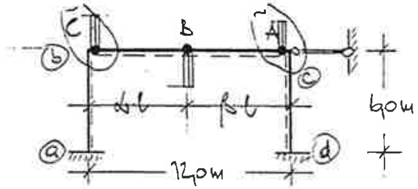
INTERAKTION: MIT $\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$ – KONTROLLE

KNOTEN (b): $Q_{bc} = 144{,}2\ kN \rightarrow M_{pl,c} = -214{,}4\ kNm \doteq M_{bc} = -213{,}9\ kNm$ ✓

KNOTEN (c): $Q_{cb} = -144{,}3\ kN \rightarrow M_{pl,c} = -214{,}4\ kNm \doteq M_{cb} = -214{,}5\ kNm$ ✓

LASTSTEIGERUNG MÖGLICH!

⇒ WEITERES FG C IN (b):



LF $\bar{\varrho}_C = 1{,}0$: (KIN. BALKENKETTE)

$a_{16} = -\varkappa_2 = -1{,}970$ $\quad a_{26} = -\lambda_2 = -1{,}006$ $\quad a_{36} = 0$ $\quad a_{46} = \lambda_2 = 1{,}006$

$a_{56} = \frac{l_1}{l_2} \cdot F_{12} = 0{,}5111$ $\quad a_{66} = \varkappa_2 = 1{,}970$

⇒ DET (A) < 0 ! LABILES GLEICHGEW. ⇒ $q_d = 23{,}8\ kN/m$ ... TRAGLAST

• UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON:

- STABILES GLEICHGEW. (DET(A) > 0)
- POSITIVE DISSIPATIONSARBEIT ($M \cdot \varrho > 0$)
- EINHALTUNG DER INTERAKTION

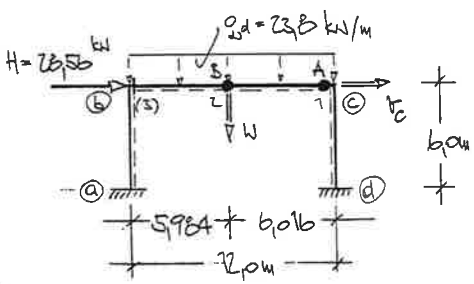
ERGIBT SICH $\boxed{q_{TR,d} = 23{,}8\ kN/m \quad H_{TR,d} = 28{,}56\ kN}$

VERFORMUNGEN w, ϑ:

M_i:	Δw =	$-0{,}06428$	m
M_k:	Δw =	$-0{,}06436$	m
q_{zd}:	Δw =	$0{,}2142$	m
ρ_B:	Δw =	$0{,}02971$	m

STELLE $x_M = B$ $\underline{w}$ = $0{,}1153$ m $\hat{=}$ $\underline{11{,}5\ cm}$

$\underline{\vartheta} = \delta_c / c$ = $0{,}03666$ m = $\underline{3{,}7\ cm}$



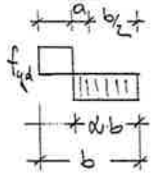
NACHWEIS DER QUERSCHNITTSGRENZWERTE für PP:

(DIN 18800 T1, S29, TAB 18)

FÜR $M = 222{,}6$ kNm UND $N = 145$ kN (UNGÜNSTIGSTE ANNAHME)

IPE 360: (FÜR DAS GESAMTE SYSTEM)

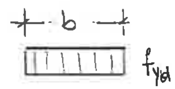
STEG: $t = 0{,}8$ cm, $b = h - 2\cdot(t_F + r) = 36 - 2\cdot(1{,}27 + 1{,}8) = 29{,}86$ cm



$b \cdot \alpha \doteq b/2 + a$ $\quad a = \dfrac{N}{2 \cdot f_{yd} \cdot t} \doteq 4{,}15$ cm $\quad \alpha = 0{,}64$

$\underline{\text{VORH}(b/t) = 37{,}33 < \text{GRENZ}(b/t)} = \dfrac{32}{\alpha} \cdot \underbrace{\sqrt{\dfrac{240}{f_{yk}}}}_{1} = \underline{50}$

FLANSCH: $t = 1{,}27$ cm $\quad b = (\bar{b} - t_s - 2\cdot r)\frac{1}{2} = (17 - 1{,}27 - 2\cdot 1{,}8)\frac{1}{2} = 6{,}065$ cm



$\underline{\text{VORH}(b/t) = 4{,}776 < \text{GRENZ}(b/t)} = \dfrac{9}{\alpha} \cdot \sqrt{\dfrac{240}{f_{yk}}} = \underline{9}$ $\quad (\alpha = 1{,}0)$

DA KONSTANTER QUERSCHNITT (IPE 360) UND UNGÜNSTIGSTEN SCHNITTKRÄFTE ZUGRUNDE GELEGT WURDEN (max α), IST DER NACHWEIS FÜR QUERSCHNITTE MIT FLIESSGELENKEN ERBRACHT UND FÜR ALLE ÜBRIGEN QS, DA GRENZ (b/t) FÜR EP UND EE GÜNSTIGER.

NACHWEIS VON α_{pe}:

$\underline{\text{VOR}\ \alpha_{pe}} = \dfrac{W_{pe}}{W_{el}} = \dfrac{2 \cdot S_x}{W_x} = \dfrac{2 \cdot 516}{904} = \underline{1{,}126 < \text{GRENZ}\ \alpha_{pe}} = \underline{1{,}25}$

($\Rightarrow$ KEINE ABMINDERUNG DER SCHNITTGRÖSSEN IM PLAST. ZUSTAND)

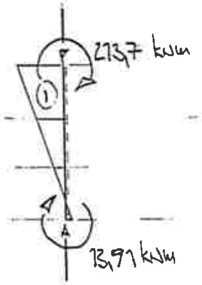
NACHWEIS – BIEGEDRILLKNICKEN:

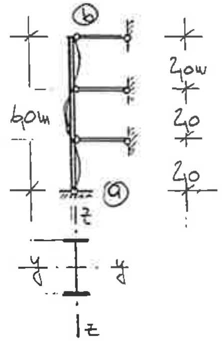
(DIN 18800 T.2, S15 PKT. 3.3.4)

IPE 360: $J_z = 1040\,cm^4$ $J_{\omega} = 313\,600\,cm^6$ $J_T = 28{,}9\,cm^4$

$N_{pl} = 1745\,kN$ $M_{pl} = 244{,}8\,kNm$

RAHMENSTIEL ①:





$N = 142{,}8\,kN$ (DRUCK > 0)

$\boxed{S_k = l = 2{,}0\,m}$ (GABELLAGERUNG)

$M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0{,}25\,z_p^2} + 0{,}5\,z_p\right)$

$\underline{N_{Ki,z}} = \dfrac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l^2} = \underline{5389\,kN}$

$c^2 = \dfrac{J_{\omega} + 0{,}039 \cdot l^2 \cdot J_T}{J_z} = 344{,}9\,cm^2$ ζ: $\psi = 0{,}07$ $\zeta = 1{,}77 - 0{,}77 \cdot \psi = 1{,}26$

$z_p = 0$ (KEINE QUERLAST – MOMENTE GREIFEN IM SCHWERPUNKT AN)

$M_{Ki,y} = 1261\,kNm$ $\bar{\lambda}_M = \sqrt{\dfrac{M_{pl}}{M_{Ki,y}}} = 0{,}4406$ $\bar{n} = 2{,}5$ $\psi > 0{,}5 \rightarrow k_n'$

$k_n = 0{,}864$ $n = k_n \cdot \bar{n} = 2{,}160$ $\underline{k_M} = \left(\dfrac{1}{1 + \bar{\lambda}_M^{2n}}\right)^{1/n} = \underline{0{,}9869}$

$\bar{\lambda}_k = \sqrt{\dfrac{N_{pl}}{N_{Ki,z}}} = 0{,}5690$ $h/b = 2{,}118 > 1{,}2$ $t = 8\,mm < 40\,mm$ $\perp$ z-z $\Rightarrow$ b

$\Rightarrow \alpha = 0{,}34$ (KNICKSPANNUNGSLINIE b)

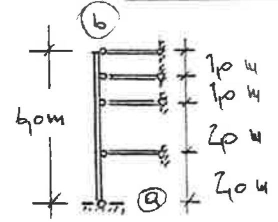
$k = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_k - 0{,}2) + \bar{\lambda}_k^2\right] = 0{,}7246$ $\underline{k_z} = \dfrac{1}{k + \sqrt{k^2 - \bar{\lambda}_k^2}} = \underline{0{,}8523}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M_y}{k_M \cdot M_{pl,d}} \cdot k_y \leq 1$$

FÜR $\dfrac{N}{k \cdot N_{pl,d}} < 0{,}10$: $\dfrac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} \leq 1{,}0$

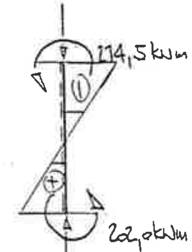
$$\frac{142{,}8}{0{,}8523 \cdot 1586} + \frac{213{,}7}{0{,}9869 \cdot 222{,}6} \cdot 1{,}0 = 0{,}1056 + 0{,}9728 = \underline{1{,}078 > 1{,}0}\ !$$

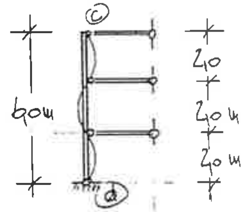


$\Rightarrow$ ZUSÄTZLICHE HALTERUNG ERF.

$l = 1{,}0\,m$

RAHMENSTIEL ③:



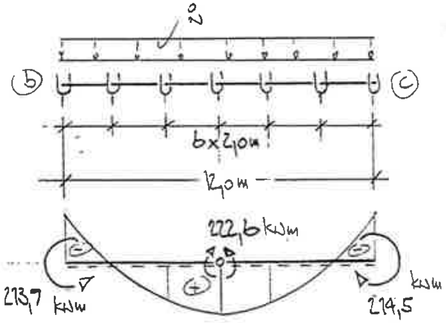


$N = 142{,}9\,kN$ (DRUCK > 0)

$\underline{S_k = l = 2{,}0\,m}$ (GABELLAGERUNG)

NACHWEIS DURCH RAHMENSTIEL ① ERBRACHT, DA GÜNSTIGERE BEANSPRUCHUNG HIER

RIEGEL ②:



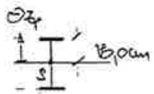
$N = 67{,}97\,kN$ (DRUCK > 0)

$\underline{S_k = l = 2{,}0\,m}$ (GABELLAGERUNG)

UNGÜNSTIGSTE ANN. $\psi = 1{,}0$

$\rightarrow \zeta = 1{,}0$

$z_p \doteq -20\,cm$



$N_{Ki,z} = 5389\,kN$ (WIE VOR) $\Rightarrow \underline{k_z = 0{,}8523}$ (WIE VOR)

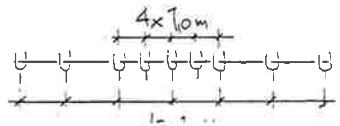
$c^2 = 344{,}9\,cm^2$ (WIE VOR) $M_{Ki,y} = 597{,}8\,kNm$ $\bar{\lambda}_M = 0{,}6399$ $\bar{n} = 2{,}5$ $k_n = 0{,}8$

$k_M = 0{,}9254$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M_y}{k_M \cdot M_{pl,d}} \cdot k_y = 0{,}05028 + 1{,}081 = \underline{1{,}131 > 1{,}0}\ !$$

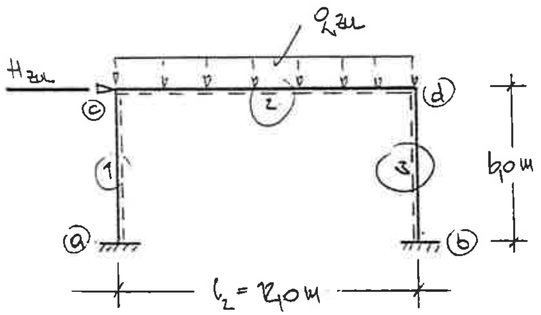
$\Rightarrow$ z.B. ZUSÄTZLICH 2 KIPPHALTERUNGEN ERFORDERLICH



A1.12 GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT – (EINGESPANNTE STIELE)

SYSTEM UND BELASTUNG

$$\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 16$$



I PE 360 St 37

$J = 16270\ cm^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

ANNAHME: KEIN ANSATZ VON VORVERFORMUNGEN

TEILSICHERHEITSBEIWERTE: $\gamma_F = 1{,}0$, $\psi = 1{,}0$ (ANNAHME)

$\gamma_M = 1{,}0$

q_{zul}, H_{zul}:

STÄNDIGE EINWIRKUNG ... $\gamma_F = 1{,}35$

VERÄNDERL. –"– ... $\gamma_F = 1{,}5$ $\quad \psi = 0{,}9 \rightarrow \gamma_F \cdot \psi = 1{,}35$

$\underline{q_d} = g \cdot \gamma_F + p \cdot \gamma_F \cdot \psi = \underline{1{,}35 \cdot q_{zul}}$

n. TH. I. ORD

q_d [kN/m]	–	16,7	20,0
q_{zul}	1,0	12,37	14,81
M_b [kNm]	-8,25	-102,1	-122,2
M_c [kNm]	-16,95	-135,5	-162,2
ξ_M	–	0,4812	0,4812
max M	–	104,1	124,7
$\bar{\tau}_c$	3,150	38,97	46,65

q_{zul}	ΔW [m] 12,37	14,81
M_b:	-0,02719	-0,03255
M_c:	-0,03520	-0,04213
q:	0,09757	0,1168
W =	0,03520	0,04212
τ_c =	0,006843	0,008191

C = 5695 kNm

n. TH. II - ORDNUNG – α - VERFAHREN

	α = 1,020		α = 1,025	
q_d [kN/m]	–	16,7	–	19,9
q_{zul}	1,0	12,37	1,0	14,74
M_b	-8,223	-101,7	-8,216	-121,1
M_c	-16,98	-135,8	-16,98	-161,8
ξ_M	–	0,4809	–	0,4808
max M	–	104,3	–	124,2
$\bar{\tau}_c$	3,213	39,74	3,229	47,60

q_{zul}	ΔW [m] 12,37	14,74
M_b:	-0,02709	-0,03226
M_c:	-0,03526	-0,04201
q:	0,09758	0,1162
W =	0,03523	0,04193
τ_c =	0,006978	0,008358

n. TH. II. ORDNUNG (EXAKT)

$$\varepsilon = l \cdot \sqrt{\frac{N}{EJ}}$$

$q_d = 16,5 \rightarrow q_{zul} = 12,22$ kN/m									
ⓢ	N_s [kN]	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
①	75	1,0	0,2611	3,990	2,003	5,992	3,990	2,003	5,992
②	40	0,5	0,4106	3,978	2,006	–	1989	1,003	–
③	80	1,0	0,2703	3,988	2,003	5,992	3988	2,003	5,992

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
5,979	1,003	-0,9987	147,1
1,003	5,977	-0,9987	-147,1
-0,9987	-0,9987	0,6612	14,66

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	τ_c
35,15	-23,79	39,02

$[A] \cdot \{X\} = -\{B\}$

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

$C = \frac{EJ}{l_1} = 5695$ kNm

$q_d = 19{,}7\ kN/m \rightarrow q_{zul} = 14{,}59\ kN/m$

(S)	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
(1)	90	1,0	0,3079	3,987	2,003	5,991	3,987	2,003	5,991
(2)	45	0,5	0,4355	3,975	2,006	–	1,988	1,003	–
(3)	95	1,0	0,3164	3,987	2,003	5,990	3,987	2,003	5,990

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	LF
5,975	1,003	-0,9985	175,6
1,003	5,975	-0,9983	-175,6
-0,9985	-0,9983	0,6602	17,51

$[A] \cdot \{X\} = -\{B\}$

φ_b	φ_c	ϑ_c
42,01	-28,63	46,77

$q_d = 23{,}8\ kN/m \rightarrow q_{zul} = 17{,}63\ kN/m$

(S)	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
(1)	105	1,0	0,3326	3,985	2,004	5,989	3,985	2,004	5,989
(2)	55	0,5	0,4815	3,969	2,008	–	1,985	1,004	–
(3)	115	1,0	0,3481	3,984	2,004	5,988	3,984	2,004	5,988

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	LF
5,970	1,004	-0,9982	212,4
1,004	5,969	-0,9980	-212,4
-0,9982	-0,9980	0,6590	21,16

$[A] \cdot \{X\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$
50,89	-34,66	50,69

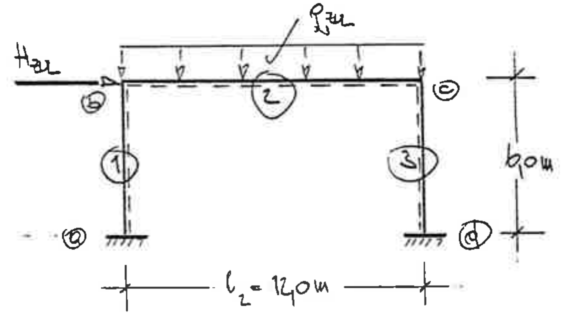
q_{zul} [kN/m]	12,22	14,59	17,63
M_b	-101,3	-120,8	-146,2
M_c	-134,6	-160,8	-194,7
M_0	104,40	110,80	109,50
M_1	206,40	224,10	222,00
v	0,007914	0,008262	0,009163
δ_M	0,4807	0,4816	0,4816
max M =	119,7	125,4	150,5

q_{zul} [kN/m]	ΔW [m] 12,22	14,59	17,63
M_b :	-0,02747	-0,03282	-0,03990
M_c :	-0,03558	-0,04261	-0,05183
ϱ :	0,09808	0,1174	0,1425
W =	0,03503	0,04197	0,05077
ϑ_c =	0,006852	0,008212	0,009954

$\underline{M_{el}} = f_{y,d} \cdot W_{el} = 24{,}0/1{,}0 \cdot 904 = \underline{2170\ kNm} \rightarrow$

→ REIN ELAST. VERHALTEN DER SYSTEME

1.13 BERECHNUNG NACH Ö-NORM B 4600 – (EINGESPANNTE STIELE)



$$\boxed{\frac{p_{zul} \cdot l_2}{H_{zul}} = 10}$$

IPE 360
St 360 EF
$J = 16\,270\ cm^4$
$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad p_{zul} = 13{,}55\ kN/m \rightarrow H_{zul} = 16{,}26\ kN$

$$\max M = M_{cd} = p \cdot [-9{,}60 - 1{,}35] = -146{,}4\ kNm$$
$$M_{bc} = p \cdot [-9{,}60 + 1{,}35] = -111{,}8\ kNm$$
$$M_{dc} = p \cdot [\ 4{,}80 + 2{,}250] = \ 95{,}53\ kNm$$
$$\max Q = Q_{cb} = p \cdot [-6{,}0 - 0{,}225] = -84{,}35\ kN$$
$$N_{cd} = \qquad = -84{,}35\ kN$$
$$N_{bc} = p \cdot [-2{,}40 - 0{,}60] = -40{,}65\ kN$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ STAB 2

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{p \cdot l^2} = 0{,}4812 \qquad x_M = 5{,}775\ m$$
$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi^2 \cdot p \cdot l^2 = 114{,}1\ kNm$$

NACHWEISE:

ALLGEM. SPANNUNGSNACHWEIS:

$$\max \sigma: \quad \frac{N}{A} + \frac{M}{1{,}07 \cdot W} = \frac{84{,}35}{72{,}7} + \frac{14640}{1{,}07 \cdot 904} = 16{,}50 = \sigma_{zul} = 16{,}50\ kN/cm^2\ ✓$$

$$\max \tau: \quad \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \frac{84{,}35 \cdot 51{,}0}{16270 \cdot 0{,}8} = 3{,}305 \le \tau_{zul} = 1{,}0\ kN/cm^2$$

VERGLEICHSSPANNUNG:

$$\sigma = 17{,}58\ kN/cm^2 \qquad \tau = \frac{40{,}65 \cdot 374{,}9}{16270 \cdot 0{,}8} = 1{,}170\ kN/cm^2$$
$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 17{,}70\ kN/cm^2 < \beta_P = 19{,}0\ kN/cm^2\ ✓$$

KNICKNACHWEIS:

(VERSCHIEBL. SYSTEM; QUERSCHNITT: $e_z = ed$)

STIEL 3:

KN – IN DER MOMENTENEBENE.

$\beta_3 = 1{,}29$ (SIEHE VOR) $\quad s_k = 1{,}29 \cdot 600 = 774{,}0\ cm \quad i_y = 15{,}0\ cm$

$\lambda_y = 51{,}60 \rightarrow \sigma_{K\,zul} = 14{,}1\ kN/cm^2$

$$\frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{Kzul}} \cdot \frac{N}{A} + 0{,}9 \cdot \frac{M}{W} = \frac{16{,}5}{14{,}1} \cdot \frac{84{,}35}{72{,}7} + 0{,}9 \cdot \frac{14840}{904} = 16{,}13\ kN/cm^2$$

$\sigma_{vorh} = 16{,}13\ kN/cm^2 < \sigma_{zul} = 16{,}50$ ✓

KN – ⊥ ZUR MOMENTENEBENE:

$s_k = 300{,}0\ cm$ (SIEHE BDKN) $\quad i_z = 3{,}79\ cm$

$\lambda_z = 79{,}16 \rightarrow \sigma_{Kzul} \doteq 11{,}88\ kN/cm^2$

$$\sigma_{Kvorh} = \frac{84{,}35}{72{,}7} = 1{,}160\ kN/cm^2 < \sigma_{Kzul} = 11{,}88\ kN/cm^2\ ✓$$

RIEGEL 2

KN – IN DER MOMENTENEBENE

$$\beta_2 = ?\ \text{AUS}\ N_{Ki} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_3}{\beta_3^2\, l_3^2} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_2}{\beta_2^2\, l_2^2} \Rightarrow \beta_2 = \beta_3 \cdot \frac{l_3}{l_2} = 0{,}645$$

$\lambda_y = 51{,}60 \rightarrow \sigma_{Kzul} = 14{,}1\ kN/cm^2$

(NICHT MASSGEBEND)

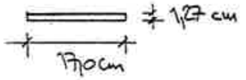
KN – ⊥ ZUR MOMENTENEBENE

ANNAHME $\underline{S_K = 3{,}0\,m}$ $\quad i_z = 3{,}79\,cm \quad \lambda_z = 79{,}16 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = 11{,}88\,kN/cm^2$

$$\sigma_{K_{vorh}} = \frac{40{,}65}{72{,}7} = \underline{0{,}5591\,kN/cm^2 < \sigma_{K_{zul}} = 11{,}88\,kN/cm^2} \checkmark$$

BIEGEDRILLKNICKEN :

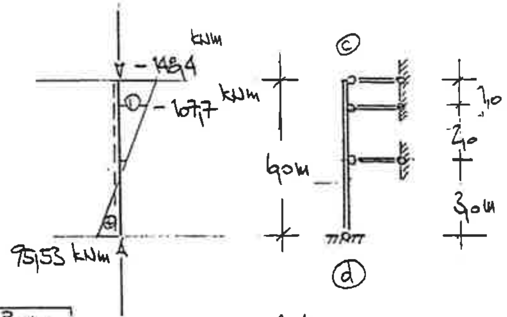
$b < h \rightarrow$ VEREINFACHTER NACHWEIS DURCH KNICKNACHWEIS DES GURTES



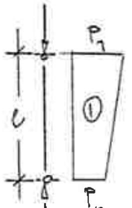
$\underline{i_z = 4{,}907\,cm}$

STIEL ③

$N = 84{,}35\,kN$ (DRUCK)



a.) $\boxed{l_z = 1{,}0\,m}$ FÜR $M_y = -148{,}4\,kNm$:



$P_o/P_1 = 0{,}49 \quad \beta = \sqrt{\frac{1 + 0{,}881 \cdot P_o/P_1}{1{,}881}} = 0{,}872 \quad \lambda_z = \frac{l \cdot \beta}{i_z} = 17{,}8 \rightarrow$

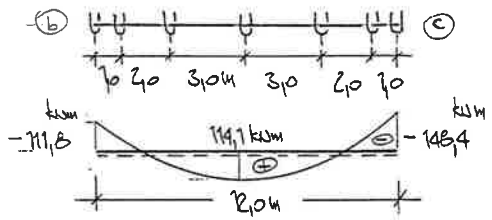
$$\rightarrow \sigma_{K_{zul}} = 16{,}5\,kN/cm^2 = \frac{84{,}35}{72{,}7} + \frac{14840}{1{,}07 \cdot 904} = \underline{\sigma_{K_{vorh}}} \checkmark$$

b.) $\boxed{l_z = 2{,}0\,m}$ FÜR $M_y = -107{,}7\,kNm$:

$$S_K = 2{,}0\,m \quad \lambda_z = 40{,}76 \rightarrow \underline{\sigma_{K_{zul}}} = \underline{14{,}72\,kN/cm^2} > \frac{84{,}35}{72{,}7} + \frac{10770}{1{,}07 \cdot 904} = 12{,}29\,kN/cm^2 \checkmark$$

RIEGEL ②

$N = 40{,}65\,kN$ (DRUCK)



a.) FÜR $M_y = 114{,}1\,kNm$:

$\boxed{l_z = 3{,}0\,m}$

$$\lambda_z = \frac{300}{4{,}907} = 61{,}14 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = 13{,}38\,kN/cm^2$$

$$\sigma_{K_{vorh}} = \frac{40{,}65}{72{,}7} + \frac{11410}{1{,}07 \cdot 904} = \underline{12{,}36\,kN/cm^2 < \sigma_{K_{zul}} = 13{,}38\,kN/cm^2} \checkmark$$

b.) FÜR $M_y = -148{,}4\,kNm$

$\boxed{l_z = 1{,}0\,m}$ MIT $P_o/P_1 = 0{,}52 \rightarrow \beta = 0{,}880$ (SIEHE VOR)

$$\lambda_z = \frac{88{,}0}{4{,}907} = 17{,}94 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = 16{,}5\,kN/cm^2$$

$$\sigma_{K_{vorh}} = \frac{40{,}65}{72{,}7} + \frac{14840}{1{,}07 \cdot 904} = \underline{15{,}70\,kN/cm^2 < \sigma_{K_{zul}} = 16{,}5\,kN/cm^2}$$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

a.) STEG :

$h_1 = \bar{h} - 2 \cdot t_F - r = 31{,}66\,cm, \; t = t_s = 0{,}8\,cm, \quad \lambda = 51{,}6 \le 70$

$$\text{VORH}\,(h/t) = \frac{31{,}66}{0{,}8} = \underline{39{,}6} < \text{GRENZ}\,(h/t) = \underline{42} \checkmark$$

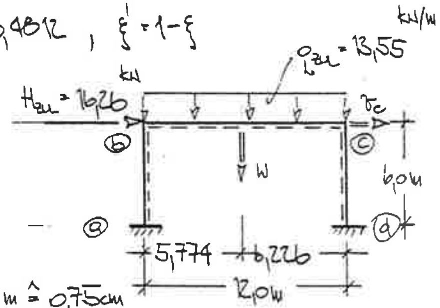
b.) FLANSCH :

$h = b/2 = 8{,}5\,cm, \quad t = t_F = 1{,}27\,cm, \quad \lambda = 51{,}6 \le 80$

$$\text{VORH}\,(h/t) = \frac{8{,}5}{1{,}27} = \underline{6{,}69} < \text{GRENZ}\,(h/t) = 8 + 0{,}1 \cdot \lambda = \underline{13{,}2} \checkmark$$

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4812, \quad \xi' = 1 - \xi$



M_1 : $\quad \Delta W = -0{,}02978\,m$

M_K : $\quad \Delta W = -0{,}03855\,m$

q : $\quad \Delta W = 0{,}1669\,m$

$\underline{W} = 0{,}03857\,m \mathrel{\hat=} \underline{3{,}9\,cm}$

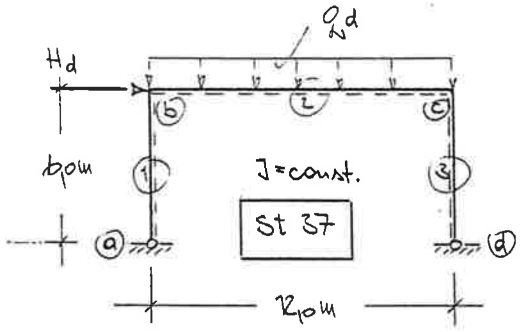
$$\underline{\tau_c} = \bar{\tau}_c / C = \frac{1}{C} \cdot (3{,}150) \cdot q = 0{,}007495\,m \mathrel{\hat=} \underline{0{,}75\,cm}$$

$$C = \frac{EJ}{l_1} = 5695\,kNm$$

A 2. BEISPIEL 2

A 2.1 LASTFALL EINHEITSBELASTUNG $q_d = 1{,}0\ kN/m \rightarrow H_d = 1{,}2\ kN$

SYSTEM UND BELASTUNGEN



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$

IPE 360:

$A = 72{,}7\ cm^2$ $\quad g = 0{,}571\ kN/m$

$S_x = 510{,}0\ cm^3$ $\quad W_x = 904{,}0\ cm^3$

$J_x = 16270\ cm^4$ $\quad i_x = 15{,}0\ cm$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

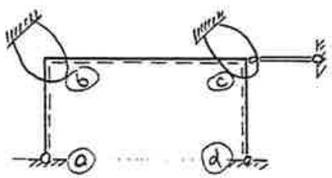
$(EJ)_d = \frac{EJ}{\gamma_M}$, $\gamma_M = 1{,}1$

SCHNITTKRAFTERMITTLUNG NACH TH. I. ORDNUNG

FÜR: $q_d = 1{,}0\ kN/m$, $H_d = 1{,}2\ kN$

$$\frac{M}{\left(\frac{(EJ)_d}{l_1}\right)} = \varkappa_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right) 4{,}0 \ , \ \lambda_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right) \cdot 2{,}0 \ , \ \eta_s = \left(\frac{l_1}{l_s}\right) \cdot 6{,}0 \qquad C = \frac{(EJ)_d}{l_1} = 5177\ kNm$$

s	l_1/l_s	$\varkappa_s$	λ_s	η_s
1	1,0	3,0	∅	3,0
2	0,5	2,0	1,0	3,0
3	1,0	3,0	∅	3,0



LF: $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$: $\quad a_{11} = \varkappa_1 + \varkappa_2 = 5{,}0 \quad a_{21} = \lambda_2 = 1{,}0 \quad a_{31} = -\frac{1}{l_1} \cdot \eta_1 = -0{,}5$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$: $\quad a_{12} = \lambda_2 = 0{,}5 \quad a_{22} = \varkappa_2 + \varkappa_3 = 5{,}0 \quad a_{32} = -\frac{1}{l_3} \cdot \eta_3 = -0{,}5$

LF $\bar{v}_c = 1{,}0$: $\quad a_{13} = a_{31} \quad a_{23} = a_{32}$

$$a_{33} = \frac{1}{l_1^2} \cdot \eta_1 + \frac{1}{l_3^2} \cdot \eta_3 = 0{,}1667$$

LF $q = 1{,}0\ kN/m$:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -q \cdot l^2 \cdot \frac{1}{12} = -12{,}0\ kNm$

$a_{10} = -a_{20} = -12{,}0\ kNm \qquad a_{30} = ∅$

LF $H = 1{,}2\ kN$:

$a_{10} = a_{20} = ∅ \qquad a_{30} = -1{,}2\ kN$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG: $[A] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	LF q	LF H
5,0	1,0	-0,5	12,0	∅
1,0	5,0	-0,5	-12,0	∅
-0,5	-0,5	0,1667	∅	1,2

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	LF
3,000	-3,000	∅	q
1,200	1,200	14,39	H

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

STABENDMOMENTE:

$$M_{ik} = M^0_{ik} + \varkappa_s \cdot \left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{v}}{l}\right) + \lambda_s \left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{v}}{l}\right)$$

$$M_{ki} = M^0_{ki} - \lambda_s \cdot \left(\bar{\varphi}_i - \frac{\bar{v}}{l}\right) - \varkappa_s \left(\bar{\varphi}_k - \frac{\bar{v}}{l}\right)$$

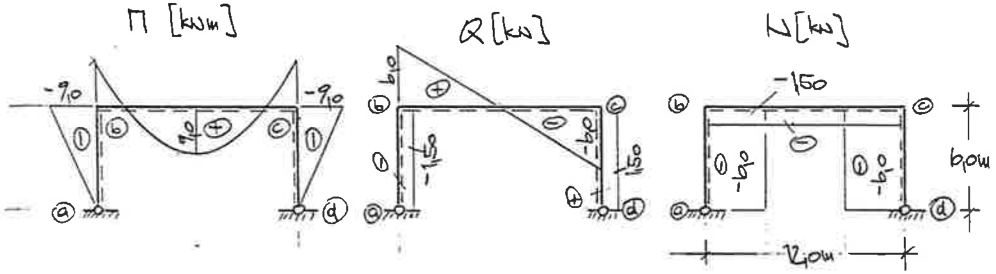
STABENDKRÄFTE:

$R_{ik} = R_s + R^L_{ik} \qquad R_s = -\frac{1}{l}(M_{ik} - M_{ki}) \qquad R^L$ ... AUFLAGERKRAFT INF. QUERLAST AM TRÄGER AUF 2 STÜTZEN

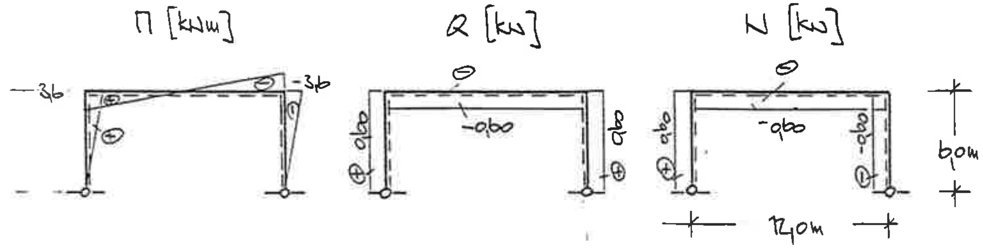
(S)	i-k	M^0_{ik} [kNm]	M_{ik} [kNm]	R^L_{ik} [kN]	R_{ik} [kN]	M^0_{ik} [kNm]	M_{ik} [kNm]	R^L_{ik} [kN]	R_{ik} [kN]
		LF q_d = 1,0 kN/m				LF H = 1,2 kN			
1	a	0	0	0	−1,50	0	0	0	0,5992
	b		−9,0				3,595		
2	b	−12,0	−9,0	6,0	6,0		3,600		−0,6000
	c	−12,0	−9,0	−6,0	−6,0		−3,600		
3	c	0	−9,0	0	1,50		−3,595		0,5992
	d		0				0		

$f = \frac{q_d \cdot l^2}{8} = 18,0$ kNm

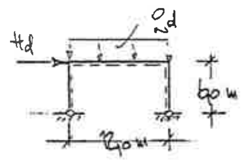
SCHNITTKR. INF. q_d = 1,0 kN/m (TH. I. ORD.)



SCHNITTKR. INF. H_d = 1,2 kN (TH. I. ORD.):



A2.2 ELASTIZITÄTSTHEORIE I. ORD



ZULÄSSIG FÜR $\boxed{\frac{N_{ki,d}}{N_d} \geq 10}$

$N_{ki,d} = \left(\frac{\pi}{\beta_1}\right)^2 \cdot \frac{EJ}{l_1^2}$ $\quad \beta_1 = 2\sqrt{1+0,4\cdot\gamma}$ $\quad \gamma = l_2/l_1 = 2,0$ $\quad \beta_1 = 2,683$

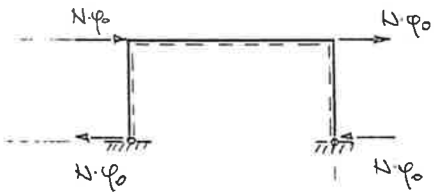
$N_{ki,d} = 1183$ kN, $\quad N_d = q_d \cdot [6,0+0,60] = q_d \cdot 6,6 \quad \frac{1183}{6,6 \cdot q_d} \geq 10$

⇒ ZULÄSSIG FÜR $\boxed{q_d \leq 17,93 \text{ kN/m}}$ $\quad \boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$

VORVERDREHUNG

$\varphi_0 = 0,001948$

LF φ_0:



ENTSPRICHT LF H:

MIT $H = (q_d \cdot l_2) \cdot \varphi_0 = q_d \cdot (l_2 \cdot \varphi_0)$

MIT: $N_{bc} = 0$, $A_{aH} = A_{dH} = 0$

2.3 E – THEORIE I. ORD. – (ELAST.-ELAST.)

1. ANNAHME $q_d = 14{,}6\ kN/m \rightarrow H_d = 17{,}52\ kN$

$$\max M = M_c = q \cdot [-9{,}0 - 3{,}6 \cdot (1 + 0{,}01948)] = -135{,}0\ kNm$$
$$M_b = q \cdot [-9{,}0 + 3{,}6 \cdot (1 + 0{,}01948)] = -77{,}82\ kNm$$
$$\max Q = Q_{cb} = q \cdot [-6{,}0 - 0{,}6 \cdot (1 + 0{,}01948)] = -96{,}53\ kN$$
$$\max N = N_{cd} = \qquad = -96{,}53\ kN$$

NACHWEISE:

$\max \sigma$: $\sigma = \dfrac{13500}{904} + \dfrac{96{,}53}{72{,}7} = 21{,}79\ kN/cm^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\ kN/cm^2$ ✓

$\max \tau$: $\tau = \dfrac{96{,}53 \cdot 516}{26270 \cdot 0{,}8} = 2{,}343\ kN/cm^2 < \tau_{R,d} = 12{,}6\ kN/cm^2$ ✓

$\sigma_v \leq \sigma_{R,d}$ GILT ALS ERFÜLLT FÜR $\sigma/\sigma_{R,d} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{R,d} < 0{,}5$

GRENZ (b/t) ERFÜLLT – SIEHE FG. TH. II. ORD

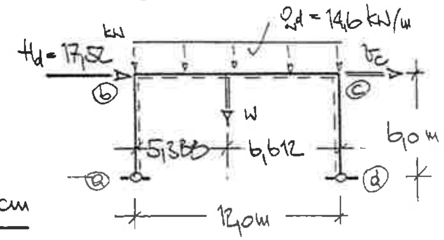
ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$:

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{lk} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}4490 \quad (x_M = 5{,}388\ m)$$

$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi_M^2 \cdot q \cdot l^2 = 134{,}1\ kNm$$

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4490$, $\xi' = 0{,}5510$



M_i :	$\Delta w = -0{,}01694$ m	
M_k :	$\Delta w = -0{,}06582$ m	
q :	$\Delta w = 0{,}1253$ m	
	$w = 0{,}04254$ m	$\hat{=}$ 4,3 cm

$$v_c = \bar{v}/c = \frac{1}{c} \cdot [14{,}37 \cdot (1 + 0{,}01948)] \cdot 0 = 0{,}04137\ m \hat{=} 4{,}1\ cm$$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL TH. II. ORD. (ELAST.-ELAST.)

A2.4 E-THEORIE I. ORD – (ELAST.-PLAST.)

1. ANNAHME $\qquad q_d = 17{,}5\ \text{kN/m} \rightarrow H_d = 21{,}0\ \text{kN}$

$\max M = M_c = -221{,}7\ \text{kNm}$

$M_b = -93{,}28\ \text{kNm}$

$\max N = N_{cd} = -115{,}7\ \text{kN}$

$\max Q = Q_{cb} = -115{,}7\ \text{kN}$

(FORMEL SIEHE VOR $M_c^{\varrho} = q^{\varrho}/q^{E} \cdot M_c^{E}$)

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$:

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_k - M_i}{q \cdot l^2} = 0{,}4490 \qquad (x_M = 5{,}388\ \text{m})$$

$\max M_F = 160{,}7\ \text{kNm}$

NACHWEIS DER INTERAKTION:

$$\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}1 \qquad \frac{Q_{cb}}{Q_{pl,d}} = 0{,}3306 > 0{,}3 \rightarrow M_{pl,Q,c} = -222{,}0\ \text{kNm}$$

$$M_{cb} = -221{,}7\ \text{kNm} < M_{pl,Q,c} = -222{,}0\ \text{kNm}\ ✓$$

INTERAKTION ÜBERALL EINGEHALTEN

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT – SIEHE BEISPIEL FG. TH. II. ORD

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4490 \qquad \xi' = 1 - \xi$

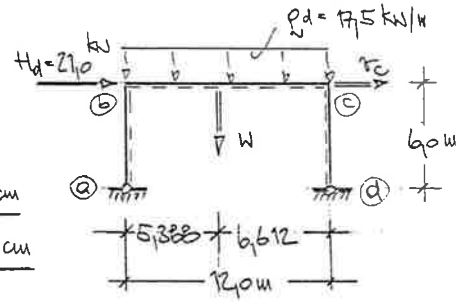
M_i : $\Delta w = -0{,}02766$ m

M_k : $\Delta w = -0{,}06141$ m

q : $\Delta w = 0{,}1502$ m

$w = 0{,}06113$ m $\hat{=}$ 6,1 cm

$v_c = 0{,}04959$ m $\hat{=}$ 5,0 cm



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL TH. II. ORD. – (ELAST.-PLAST.)

12.5 α – VERFAHREN (NÄHERUNG FÜR E.TH. II. ORD) – (ELAST. - ELAST)

ZULÄSSIG FÜR $\boxed{\eta_{Ki,d} = \dfrac{N_{Ki,d}}{N_d} \geq 4}$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{Ki,d}}}$$ ... VERGRÖSSERUNGSFAKTOR

VORVERDREHUNG φ_0:

$\varphi_0 = 0{,}002598$ (VERF. EE)

$\boxed{\text{1. ANNAHME:}}$ $\underline{q_d} = 14{,}2\ kN/m \rightarrow H = 17{,}04\ kN$

$$\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N_d} = \frac{1183}{6{,}6 \cdot \underline{q}} = 12{,}62 \qquad \alpha = \frac{1}{1 - \frac{1}{\eta_{Ki,d}}} = 1{,}086$$

(SIEHE E-TH. I. ORD.)

$$\max M = M_c = \underline{q} \cdot [-9{,}0 - \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (1 + 0{,}02598)] = -184{,}8\ kNm$$

$$M_b = \underline{q} \cdot [-9{,}0 + \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (1 + 0{,}02598)] = -70{,}84\ kNm$$

$$\max N = N_{cd} = \underline{q} \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}6 \cdot (1 + 0{,}02598)] = -94{,}69\ kN$$

$$\max Q = Q_{a} = \qquad = -94{,}69\ kN$$

(SCHNITTGRÖSSENÜBERLAGERUNG)

ORT UND GRÖSSE VON max M_F: STAB ② b–c

$$\xi_m = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{\underline{q} \cdot \ell^2} = 0{,}4443 \qquad (x_m = 5{,}331\ m)$$

$$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2}\xi_m \cdot \xi_m' \cdot \underline{q} \cdot \ell^2 = \underline{131{,}0\ kNm}$$

NACHWEISE:

$\max \sigma$: $\sigma = \dfrac{18480}{90{,}4} + \dfrac{94{,}69}{72{,}7} = \underline{21{,}74\ kN/cm^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\ kN/cm^2}$ ✓

$\max \tau$: $\tau = \dfrac{94{,}69 \cdot 516}{16270 \cdot 0{,}86} = \underline{3{,}710\ kN/cm^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60\ kN/cm^2}$ ✓

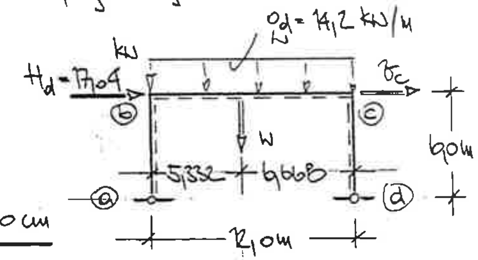
$\underline{\sigma_V \leq \sigma_{Rd}}$: ERFÜLLT, FÜR $\sigma/\sigma_{R,d} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{R,d} < 0{,}5$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t)

ERFÜLLT – SIEHE [profile symbol] FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4443$, $\xi' = 1 - \xi$



M_i: $\Delta w = -0{,}02102\ m$

M_k: $\Delta w = -0{,}05092\ m$

$\underline{q}$: $\Delta w = 0{,}1216\ m$

$\underline{w} = 0{,}04966\ m \mathrel{\hat{=}} \underline{5{,}0\ cm}$

$$\underline{\overline{\delta}_c} = \delta_c / c = \frac{1}{c} \cdot [\alpha \cdot 14{,}39 \cdot (1 + 0{,}02598)] \cdot \underline{q} = 0{,}04398\ m \mathrel{\hat{=}} \underline{4{,}4\ cm}$$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL E. TH. II. ORD. (ELAST. - ELAST)

.2.6 α-VERFAHREN (NÄHERUNG FÜR E.TH. II. ORD) – (ELAST. PLAST)

1. ANNAHME $\quad q_d = 16{,}9\ kN/m \rightarrow H_d = 20{,}28\ kN$

$\eta_{Ki,d} = \dfrac{N_{Ki,d}}{N} = \dfrac{1183}{66 \cdot q} = 10{,}61 > 4 \rightarrow$ ZULÄSSIG $\qquad \alpha = \dfrac{1}{1-\frac{1}{\eta_{Ki,d}}} = 1{,}104$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDREHUNG)

SCHNITTGRÖSSENÜBERLAGERUNG:

$\max M = M_c = q \cdot [-9{,}0 - \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (1+0{,}03896)] = -221{,}9\ kNm$

$M_b = q \cdot [-9{,}0 + \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (1+0{,}03896)] = -82{,}32\ kNm$

$\max N = N_{cd} = q \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}6 \cdot (1+0{,}03896)] = -113{,}0\ kN$

$\max Q = Q_{cb} = -113{,}0\ kN$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ $\quad$ STAB 2 $\quad$ b-c

$\xi_M = \dfrac{1}{2} - \dfrac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}4426 \qquad (x_M = 5{,}312\ m)$

$\max M_F = M_{ik} + \dfrac{1}{2} \cdot \xi_M^2 \cdot q \cdot l^2 = 156{,}0\ kNm$

NACHWEIS DER INTERAKTION:

$\dfrac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10 \qquad \dfrac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3229 < 0{,}33 \rightarrow M_{pl} = M_{pl,d} = 222{,}6\ kNm$

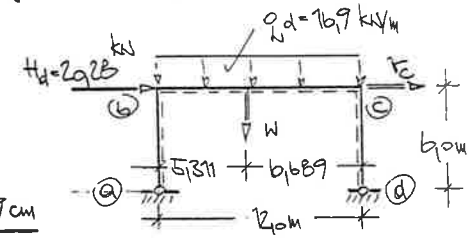
$M_c = -221{,}9\ kNm < M_{pl,c} = -222{,}6\ kNm$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN:

$\xi = 0{,}4426, \quad \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\quad \Delta w = -0{,}02444\ m$

M_k : $\quad \Delta w = -0{,}06102\ m$

q : $\quad \Delta w = 0{,}1446\ m$

$w = 0{,}05914\ m \mathrel{\hat=} 5{,}9\ cm$

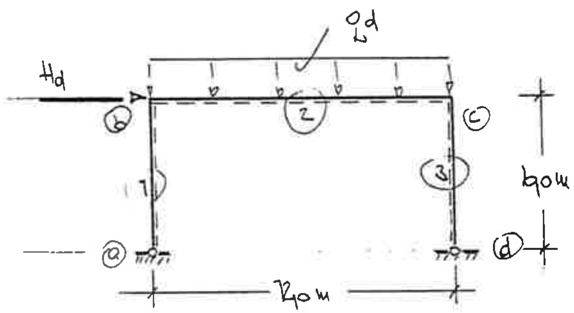
$E = \bar{E}/C = \dfrac{1}{C} \cdot [\alpha \cdot 14{,}39 \cdot (1+0{,}03896)] \cdot q = 0{,}05388\ m \mathrel{\hat=} 5{,}4\ cm$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL E-TH. II. ORD. (ELAST.-PLAST)

12.7 ERSATZSTABVERFAHREN (NÄHERUNG F. TH. II. ORD.) – (ELAST.-PLAST.)

(NACH EUROCODE 3 – APRIL 1990)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$

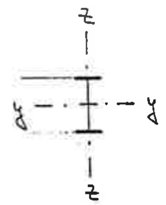
IPE 360 St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4 \ kN/cm^2$

QUERSCHNITTSWERTE :

$W_y = 904 \ cm^3$, $W_{y,pl} = 1020 \ cm^3$, $A = 72{,}7 \ cm^2$

$J_y = 16\,270 \ cm^4$, $J_z = 1040 \ cm^4$



PLAST. SCHNITTGRÖSSEN :

$f_{y,k} = 24{,}0 \ kN/cm^2$ (lt. DIN) $\qquad \gamma_M = 1{,}1$ (lt. DIN)

$N_{pl} = A \cdot f_{y,k} = 1745 \ kN$ $\qquad N_{pl,d} = A \cdot f_{yd} = 1586 \ kN$

$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_{y,k} = 244{,}8 \ kNm$ $\qquad M_{pl,d} = W_{pl} \cdot f_{yd} = 222{,}6 \ kNm$

$N_{ki,y} = \dfrac{\pi^2 \cdot E \cdot J_y}{\beta_1^2 \cdot l_1^2} = 1301 \ kN$ $\qquad$ MIT $\underline{\beta_1 = 2{,}683}$ SIEHE VORHER

$N_{ki,z} = \dfrac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l_k^2} = 2395 \ kN$ $\qquad \underline{l_{k_z} = 3{,}0 \ m}$ (FÜR STIEL UND RIEGEL)

$\bar\lambda = \sqrt{\dfrac{N_{pl}}{N_{ki}}}$: $\quad \bar\lambda_y = 1{,}158 \rightarrow$

$\bar\lambda_z = 0{,}8536 \rightarrow$

y-y : KNICKSP. LINIE (a) : $\alpha = 0{,}21 \rightarrow \underline{\kappa_y = 0{,}5571 = \kappa_{min}}$

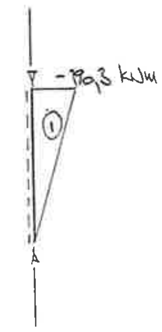
z-z : (b) : $\alpha = 0{,}34 \rightarrow \underline{\kappa_z = 0{,}6969}$

$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$ $\qquad \underline{q_d = 15{,}1 \ kN/m \rightarrow H_d = 18{,}12 \ kN}$

STAB (3) :

$M_{cd} = q_d \cdot [-9{,}0 - 3{,}6] = -190{,}3 \ kNm$

$N_3 = q_d \cdot [6{,}0 + 0{,}60] = 99{,}6 \ kN$ (DRUCK)



NACHWEIS :

$\psi = + \rightarrow \beta_{M\psi} = 1{,}8 = \beta_{M,y}$

$\mu_y = \bar\lambda_y \cdot (2 \cdot \beta_{M,y} - 4) + \dfrac{W_{pl,y} - W_y}{W_y} = -0{,}3349$

$k_y = 1 - \dfrac{\mu_y \cdot N_d}{\kappa_y \cdot \gamma_M \cdot N_{pl,d}} = 1{,}034$

$\dfrac{N_d}{\kappa_{min} \cdot N_{pl,d}} + \dfrac{k_y \cdot M_{y,d}}{M_{pl,d}} = 0{,}1127 + 0{,}8840 = \underline{0{,}9967 < 1}$ ✓

STAB (2) :

lt. EUROCODE PKT. 5.2.6.2 (6)

VERGRÖSSERUNG DER "SWAY MOMENTS" IM RIEGEL UM $\boxed{1{,}2}$

$M_{bc} = q_d \cdot [-9{,}0 + 1{,}2 \cdot 3{,}6] = -70{,}67 \ kNm$

$M_{cb} = q_d \cdot [-9{,}0 - 1{,}2 \cdot 3{,}6] = -201{,}1 \ kNm$

$\xi_M = \dfrac{1}{2} - \dfrac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}4400$ $\qquad (x_M = 5{,}280 \ m)$

$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi_M^2 \cdot q \cdot l^2 = 139{,}8 \ kNm$

$N_2 = q_d \cdot [1{,}5 + 0{,}60] = 31{,}71 \ kN$ (DRUCK)

$\psi = 0{,}3514 \rightarrow \beta_{M,\psi} = 1{,}554$, $\beta_{MQ} = 1{,}3$, $M_Q = 271{,}8$, $\Delta M = 340{,}9$

$\rightarrow \underline{\beta_{M_y} = 1{,}352} \rightarrow \underline{\mu_y = -1{,}372} \rightarrow \underline{k_y = 1{,}045}$

NACHWEIS:

$$\frac{N_d}{\kappa_{min} \cdot N_{pl,d}} + \frac{k_y \cdot M_{y,d}}{M_{pl,d}} = \frac{31{,}71}{0{,}5571 \cdot 1586} + \frac{1{,}045 \cdot 201{,}1}{222{,}6} = \underline{0{,}9820 < 1} \checkmark$$

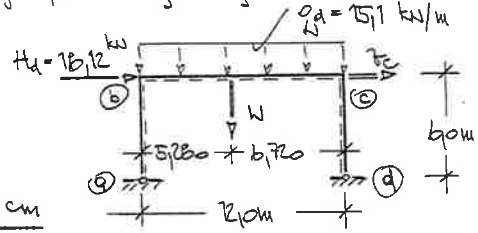
NACHWEIS GRENZ (b/t) ERFÜLLT – SIEHE ⊓ FG. TH. II. ORD

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE E. TH. II. ORD. – ELAST.-ELAST.

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4400 \qquad \xi' = 1 - \xi$



M_i: $\Delta w = -0{,}02099$ m

M_k: $\Delta w = -0{,}05513$ m

q: $\Delta w = 0{,}1290$ m

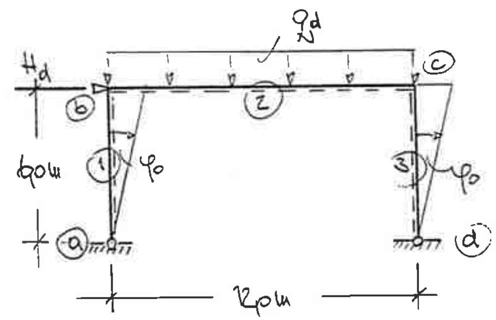
STELLE x_n: $w = 0{,}05288$ m $\hat{=}$ $\underline{5{,}3 \text{ cm}}$

$\underline{t_c} = F_c/C = \frac{1}{C} \cdot \varphi_i \cdot [14{,}37 \cdot (1 + 0{,}003896)] = 0{,}04361$ m $\hat{=}$ $\underline{4{,}4 \text{ cm}}$

ANSATZ VON $\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDREHUNG)

A2.6 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD – (ELAST.-ELAST.)

SYSTEM UND BELASTUNG



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$

IPE 360 St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

$J = 16\,270$ cm⁴ $\quad \gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}002598$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME:

$\underline{q_d = 14{,}2 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 17{,}04 \text{ kN}}$

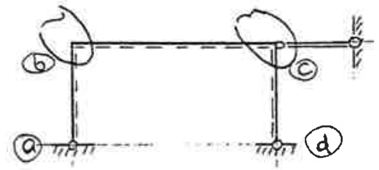
S	N_s [kN]	ε_s	F_1	F_2	F_3
1	80	0,3045	–	–	2,981
2	35	0,4028	3,978	2,005	–
3	95	0,3318	–	–	2,978

$\varepsilon = l \cdot \sqrt{\frac{N}{(EJ)_d}}$

S	l_1/l_s	α_s	λ_s	γ_s
1	1,0	2,981	+	2,981
2	0,5	1,989	1,003	–
3	1,0	2,978		2,978

C = 5177 kNm

SYSTEM



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$\underline{a_{11}} = \gamma_1 + \gamma_2 = \underline{4{,}970}$

$\underline{a_{21} = a_{12}} = \lambda_2 = \underline{1{,}003}$ $\qquad \underline{a_{31} = a_{13}} = -\frac{1}{l_1}\cdot\gamma_1 = \underline{-0{,}4968}$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$\underline{a_{22}} = \gamma_2 + \gamma_3 = \underline{4{,}967}$ $\qquad \underline{a_{32} = a_{23}} = -\frac{1}{l_3}\cdot\gamma_3 = \underline{-0{,}4963}$

LF $\bar{\vartheta}_c = 1{,}0$:

$\underline{a_{33}} = \frac{1}{l_1^2}\cdot\gamma_1 - \frac{N_1}{l_1 \cdot C} + \frac{1}{l_3^2}\cdot\gamma_3 - \frac{N_3}{l_3 \cdot C} = \underline{0{,}1599}$

LF q_w, H:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08356\cdot q_w \cdot l^2 = -170{,}9$ kNm

$\underline{a_{10} = -a_{20} = -170{,}9 \text{ kNm}}$

$\underline{a_{30}} = -H - \varphi_0\cdot(N_1 + N_3) = \underline{-17{,}49 \text{ kN}}$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG $\qquad [A]\cdot\{x\} = -\{B\}$

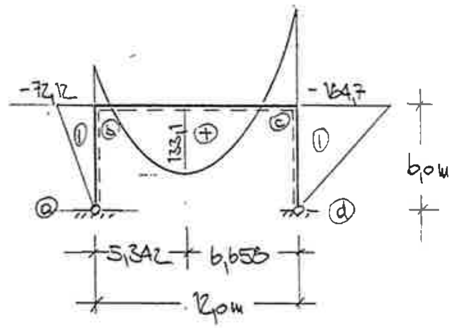
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	LF
4,970	1,003	-0,4968	170,9
1,003	4,967	-0,4963	-170,9
-0,4968	-0,4963	0,1599	17,49
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	DET
61,91	-24,29	226,3	> 0

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

STABENDMOMENTE:

S	i-k	q_w = 14,2 kN/m: M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	0
	b		-72,12
2	b	-170,9	-72,12
	c	-170,9	-184,7
3	c	0	-184,7
	d		0

M [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN END-MOMENTEN N. TH. I. ORD.)

STABENDKRÄFTE R_{ik}:

S	i-k	q_w = 14,2 kN/m: R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a	0	-12,81
	b		
2	b	85,20	75,82
	c	-85,20	-94,58
3	c	0	29,84
	d		

$\Sigma H = 0, \ \Sigma V = 0$

STABENDQUERKRÄFTE

$q_d = 14{,}2$ kN/m		
(S)	i-k	Q_{ik} kN
①	a	*
	b	−11,65
②	b	76,24
	c	−94,74
③	c	29,64
	d	*

(* NICHT BERECHNET)

NORMALKRÄFTE

$q_d = 14{,}2$ kN/m		
(S)	i-k	N_{ik} kN
①	a-b	−75,82
②	b-c	−29,84
③	c-d	−94,58

MAX. FELDMOMENT STAB ⓑ-ⓒ

$q_d = 14{,}2$ kN/m	
M_0	12600
M_1	25460
v	0,02216
ξ_n	0,4451
x_n	5,342
max M	133,1

NACHWEISE:

max σ : − KNOTEN ⓒ

$$\sigma = \frac{16470}{904} + \frac{94{,}58}{72{,}7} = 21{,}73\ \text{kN/cm}^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\ \text{kN/cm}^2\ ✓$$

max τ : − KNOTEN ⓒ

$$\tau = \frac{94{,}74 \cdot 510}{16270 \cdot 0{,}8} = 3{,}712\ \text{kN/cm}^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60\ \text{kN/cm}^2\ ✓$$

$\sigma_V \leq \sigma_{Rd}$:

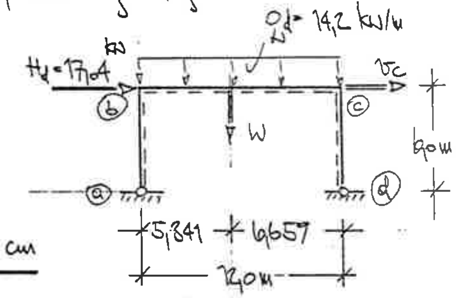
ERFÜLLT FÜR $\sigma/\sigma_{R,d} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{R,d} < 0{,}5$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t) − ERFÜLLT

(SIEHE ⊓ FG TH. I. ORD)

VERFORMUNGEN:

$\xi = 0{,}4451$ $\xi' = 1 - \xi$



M_i : $\Delta W = -0{,}02176$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}05783$ m

q_d : $\Delta W = 0{,}12337$ m

STELLE x_M: $\underline{W} = 0{,}05011$ m ≙ $\underline{5{,}0\ \text{cm}}$

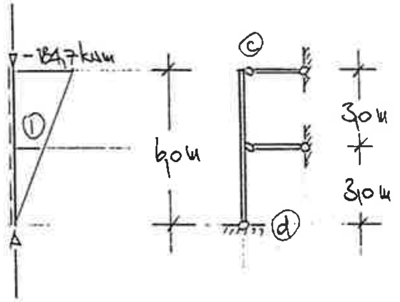
$\underline{v_c} - \overline{v_c}/c = 0{,}04371$ m ≙ $\underline{4{,}4\ \text{cm}}$

NACHWEIS – BIEGEDRILLKNICKEN :

RAHMENSTIEL ③ :

$N = 94{,}58$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_K = l = 3{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)



(SIEHE TH. II. ORD. (EE))

$\underline{\kappa_z = 0{,}6909}$

$\psi \doteq 0{,}5 \quad \zeta = 1{,}385 \quad M_{ki,y} = 662{,}7\ kNm \quad \bar{\lambda}_M = 0{,}6078 \quad \underline{\kappa_M = 0{,}9686}$

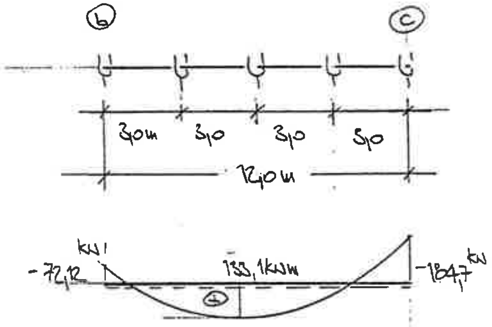
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N_d}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M}{\kappa_M \cdot M_{pl,d}} \cdot k_y = \frac{94{,}58}{0{,}6909 \cdot 1586} + \frac{184{,}7}{0{,}9686 \cdot 222{,}6} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}9430 < 1}\ ✓$$

RIEGEL ② :

$N = 29{,}84$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_K = l = 3{,}0\ m}$

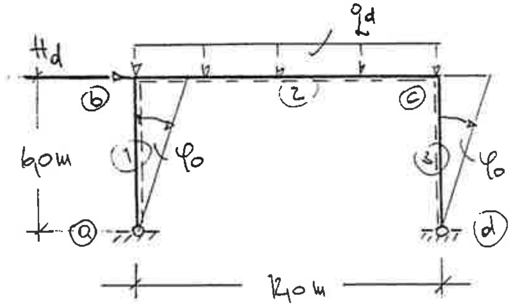


NACHWEIS SIEHE

TH. II. ORD. – E.E

A2.9 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST. – PLAST)

SYSTEM UND BELASTUNG



$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H} = 10}$

IPE 360 St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$J = 16\,270\ cm^4 \quad \gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_o = 0{,}003896$ (VORVERFORM.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$

$\underline{q_d = 16{,}9\ kN/m \rightarrow H_d = 20{,}28\ kN}$

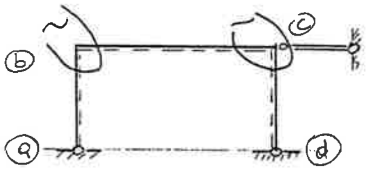
ⓢ	N_s [kN]	ε_s	F_1	F_2	F_3
①	95	0,3318	–	–	2,978
②	40	0,4306	3,775	2,006	–
③	115	0,3651	–	–	2,973

$\varepsilon = l \cdot \sqrt{\frac{N}{(EJ)_d}}$

ⓢ	l_1/l_s	γ_s	λ_s	η_s
①	1,0	2,978	∔	2,978
②	0,5	1,986	1,003	–
③	1,0	2,973	∔	2,973

$C = 5177\ kNm$

SYSTEM



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$a_{11} = \gamma_1 + \gamma_2 = 4{,}966$

$a_{21} = a_{12} = \lambda_2 = 1{,}003$ $\qquad a_{31} = a_{13} = -\frac{1}{\ell_1}\cdot\eta_2 = -0{,}4963$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{22} = \gamma_2 + \gamma_3 = 4{,}963$ $\qquad a_{32} = a_{23} = -\frac{1}{\ell_3}\cdot\eta_3 = -0{,}4955$

LF $\bar{\tau}_c = 1{,}0$:

$a_{33} = \frac{1}{\ell_1^2}\cdot\gamma_1 - \frac{N_1}{\ell_1 c} + \frac{1}{\ell_3^2}\cdot\gamma_3 - \frac{N_3}{\ell_3 c} = 0{,}1585$

LF q_2, H:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08359 \cdot q_2 \cdot \ell^2 = -203{,}4$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = M^0_{bc} = -203{,}4$ kNm

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = -21{,}10$ kN

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG: $\quad [A]\cdot\{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
4,966	1,003	-0,4963	203,4
1,003	4,963	-0,4955	-203,4
-0,4963	-0,4955	0,1585	21,10

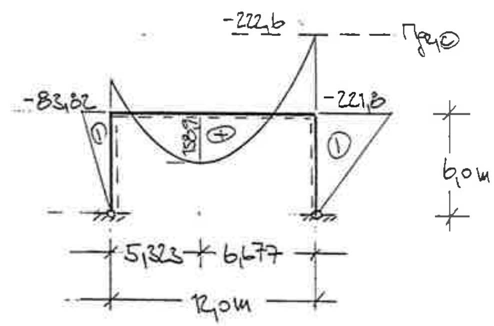
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	DET
74,43	-28,30	277,7	> ø

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / c$

STABENDMOMENTE:

(S)	i-k	$q_d = 16{,}9$ kN/m: M^0_{ik} [kNm]	ELAST: M_{ik} [kNm]
1	a	ø	ø
	b		-83,82
2	b	-203,4	-83,82
	c	-203,4	-221,8
3	c	ø	-221,7
	d		ø

M [kNm]



(VERLÄUFE NACH TH. I. ORD.)

STABENDKRÄFTE:

(S)	i-k	$q_d = 16{,}9$ kN/m: R^L_{ik} [kN]	ELAST.: R_{ik} [kN]
1	a	ø	-15,19
	b		
2	b	101,4	89,90
	c	-101,4	-112,9
3	c	ø	35,47
	d		

$\Sigma H = ø, \quad \Sigma V = ø$

STABENDQUERKRÄFTE

$q_d = 16{,}9$ kN/m		ELAST
(S)	i-k	Q_{ik} kN
(1)	a	*
	b	-13,82
(2)	b	90,46
	c	-113,1
(3)	c	34,84
	d	*

(* NICHT GERECHNET)

NORMALKRÄFTE

$q_d = 16{,}9$ kN/m		ELAST
(S)	i-k	N_{ik} kN
(1)	a-b	-89,90
(2)	b-c	-35,47
(3)	c-d	-112,9

MAX FELDMOMENT STAB (b)-(c)

	ELAST.
M_0	13130
M_1	26570
v	0,02431
ξ_M	0,4436
x_M	5,323
max M	158,9

NACHWEISE

INTERAKTION: $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$ $\quad \frac{Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3231 < 0{,}33 \rightarrow M_{pl} = M_{pl,d}$

$M_{cb} = 221{,}8\ kNm < M_{pl,d} = 222{,}6\ kNm$ ✓

INTERAKTION ÜBERALL EINGEHALTEN

NACHWEIS GRENZ (b/t) ERFÜLLT – SIEHE FG. TH. II ORD.

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4436$, $\xi' = 0{,}5564$

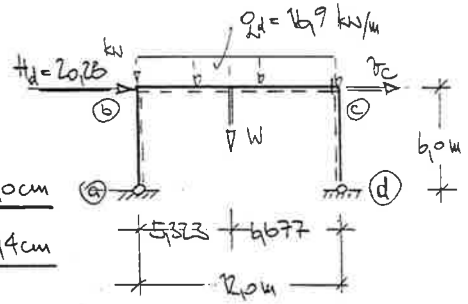
M_i: $\Delta w = -0{,}02535\ m$

M_k: $\Delta w = -0{,}06229\ m$

0: $\Delta w = 0{,}1474\ m$

$w = 0{,}05976\ m \hat{=} 6{,}0\,cm$

$\bar{\varepsilon}_C = \bar{\varepsilon}/C \quad = 0{,}05364\ m \hat{=} 5{,}4\,cm$

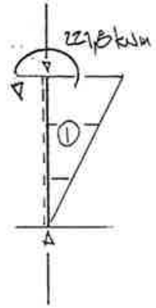


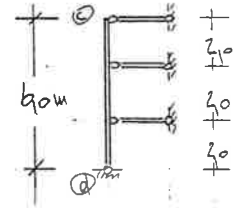
NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

RAHMENSTIEL (3):

$N = 112{,}9$ kN (DRUCK)

$\boxed{S_K = l = 2{,}0\,m}$ (GABELLAGERUNG)





NACHWEIS SIEHE FG. TH. II. ORD.

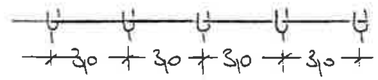
RIEGEL (2):

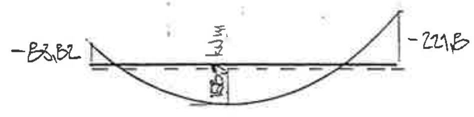
$N = 35{,}47$ kN

NACHWEIS FÜR $M_y = 158{,}9$ kNm

$\kappa_z = 0{,}6909$ $\kappa_M = 0{,}7702$

(SIEHE TH. II. ORD. (EE))

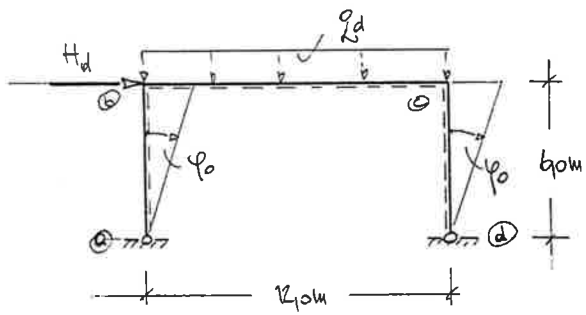




$\frac{35{,}47}{0{,}6909 \cdot 1536} + \frac{158{,}9}{0{,}7702 \cdot 222{,}6} \cdot 1{,}0 = 0{,}9592 < 1{,}0$ ✓

2.16 FLIESSGELENKTHEORIE II ORD. (EXAKTE BERECHNUNG)

SYSTEM UND BELASTUNG.



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 10}$$

IPE 360   St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

$J = 16\,270$ cm⁴

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

GESUCHT :

TRAGLAST DES GEG. SYSTEMS

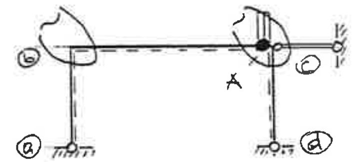
$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $q_d = 19{,}2$ kN/m $\rightarrow$ $H_d = 23{,}04$ kN

(S)	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3
1	105	1,0	0,3489	–	–	2,976
2	45	0,5	0,4568	3,972	2,007	–
3	135	1,0	0,3956	–	–	2,969

$$\varepsilon_s = l \cdot \sqrt{\frac{N}{(EJ)_d}}$$

(S)	l_1/l_s	$\varkappa_s$	λ_s	γ_s
1	1,0	2,976	+	2,976
2	0,5	1,986	1,004	2,990
3	1,0	2,969	+	2,969

SYSTEM MIT FG A IN (c) :



KOEFFIZIENTEN :

LF $\varphi_b = 1{,}0$

$a_{11} = \varkappa_1 + \varkappa_2 = 4{,}962$ $a_{21} = a_{12} = \lambda_2 = 1{,}004$ $a_{31} = a_{13} = -\frac{1}{l_1} \cdot \gamma_1 = -0{,}4960$

$a_{41} = a_{14} = -\lambda_2 = -1{,}004$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{22} = \varkappa_2 + \varkappa_3 = 4{,}955$ $a_{32} = a_{23} = -\frac{1}{l_3} \cdot \gamma_3 = -0{,}4948$ $a_{42} = a_{24} = -\varkappa_2$

LF $\bar{r}_c = 1{,}0$:

$a_{33} = \frac{1}{l_1^2} \cdot \gamma_1 - \frac{N_1}{l_1 \cdot c} + \frac{1}{l_3^2} \cdot \gamma_3 - \frac{N_3}{l_3 \cdot c} = 0{,}1574$ $a_{34} = a_{43} = +$

LF $\bar{\varrho}_A = 1{,}0$:

$a_{44} = \varkappa_2 = 1{,}986$

LF $q = 19{,}2$ kN/m, $H = 23{,}04$ kN :

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08362 \cdot q \cdot l^2 = -231{,}2$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = -231{,}2$ kNm

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = -23{,}98$ kN

$a_{40} = -M^0_{cb} = -231{,}2$ kNm $M_A = -218{,}0$ kNm (ANNAHME) $= M_{pl,c}$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG: $[A]\cdot\{x\} = -\{b\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\varrho}_A$	LF
4,962	1,004	-0,4960	-1,004	231,2
1,004	4,955	-0,4948	-1,986	-231,2
-0,4960	-0,4948	0,1574	0	23,98
-1,004	-1,986	0	1,986	13,20

$= 231{,}2 - 218{,}0$

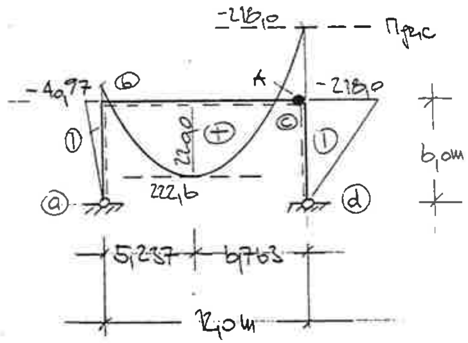
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\varrho}_A$	DET(A)	DISSIP.
133,3	46,10	717,2	120,1	> 0	> 0

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / c$

STABENDMOMENTE:

		$q_2 = 19{,}2$ kN/m	FG A
(S)	i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
①	a	0	0
	b		- 40,97
②	b	- 231,2	- 40,76
	c	- 231,2	- 218,1 ✓
③	c	0	- 218,0
	d		0

M [kNm]



STABENDKRÄFTE:

		$q_2 = 19{,}2$ kN/m	FG A
(S)	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
①	a	0	- 9,662
	b		
②	b	115,2	100,4
	c	- 115,2	- 130,0
③	c	0	32,69
	d		

KONTROLLE: $\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$

STABENDQUERKRÄFTE

$q_d = 17{,}2$ kN/m		FG A
S	i-k	Q_{ik} kN
1	a	(*)
	b	-6,958
2	b	101,6
	c	-129,6
3	c	33,89
	d	(*)

(*) NICHT GERECHNET

NORMALKRÄFTE :

$q_d = 17{,}2$ kN/m		FG A
S	i-k	N_s kN
1	a-b	-100,4
2	b-c	-32,69
3	c-d	-130,0

ERRECHNETEN NORMALKRÄFTE < ALSANGENOMMEN ✓

MAX. FELDMOMENT STAB b-c

	FG A
M_0	13250
M_1	26940
v	0,02907
ξ_M	0,4364
x_M	5,237
max M	220,0

NACHWEIS DER PLAST. GRENZSCHNITTGR.

(INTERAKTION)

$\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}16$: $Q_{A_{li}} = Q_{bc} - N_2 \cdot g_A = -130{,}6$ kN $\quad \frac{Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3781$

$M_{a_{li},c} = -218{,}0$ kNm $= M_A = -218{,}0$ kNm ✓

FELD: $Q(x_M) = + \cdot$ max $M = 220{,}0$ kNm $= M_{pl,d} = 222{,}6$ kNm ✓

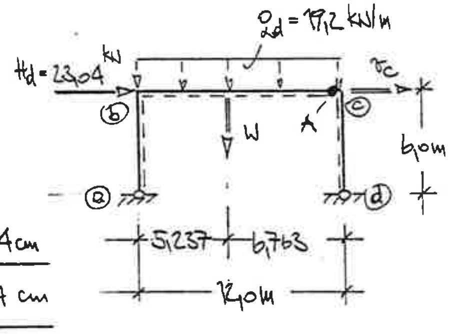
- INTERAKTION ÜBERALL EINGEHALTEN
- GRENZ (b/t) IST ERFÜLLT → SIEHE BEISPIEL  FG. TH. II. ORD
- STABILES GLEICHGEW.
- POSITIVE DISSIPATIONSARBEIT

→ KEIN WEITERES FG (IM FELD) MÖGLICH (KIN. KETTE)

$q_d = 17{,}2$ kN/m $= q_{TRAGLAST}$

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4364 \qquad \xi' = 0{,}5636$



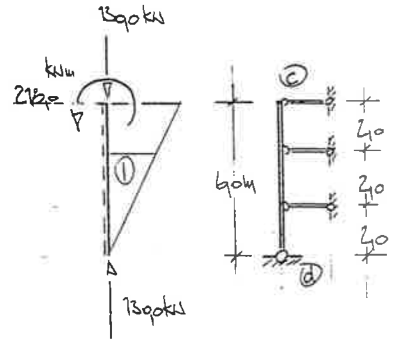
M_i :	ΔW =	$-0{,}01237$ m	
M_k :	ΔW =	$-0{,}06088$ m	
q_d :	ΔW =	$0{,}1672$ m	
STELLE x_n	$\underline{W}$ =	$0{,}09375$ m	$\hat{=}$ $\underline{9{,}4\text{ cm}}$
$\underline{v_c} = \bar{v}_c/c$	=	$0{,}1385$ m	$\hat{=}$ $\underline{14\text{ cm}}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

RAHMENSTIEL ③ :

$N = 130{,}0$ kN (DRUCK > +)

$\boxed{S_K = l = 2{,}0\text{m}}$ (GABELLAGERUNG)



$\varphi \doteq 0{,}67$:

WERTE WIE BEISPIEL FG. TH. II. ORD.
RAHMENSTIEL ①

$k_z = 0{,}8523 \qquad k_m = 0{,}9869 \quad , k_y = 1{,}0$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

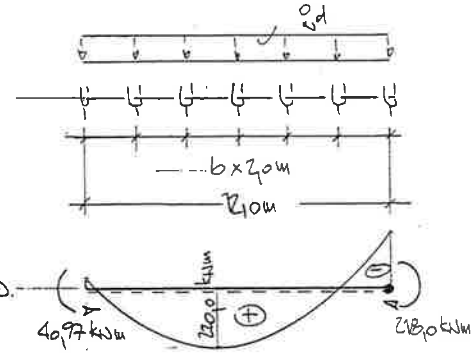
$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{130{,}0}{0{,}8523 \cdot 1586} = \underline{0{,}0617 < 0{,}16} \; :$$

$$\frac{M}{k_m \cdot M_{pl,d}} = \frac{218{,}0}{0{,}9869 \cdot 222{,}6} = \underline{0{,}9923 \leq 1{,}0} \checkmark$$

RIEGEL ② :

$N = 32{,}69$ kN (DRUCK > +)

$\underline{S_K = l = 2{,}0\text{ m}}$ (GABELLAGERUNG)

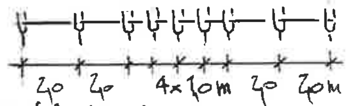


WERTE WIE BEISPIEL FG. TH. II. ORD.
RIEGEL ②

$k_z = 0{,}8523 \quad k_m = 0{,}9254 \quad k_y = 1{,}0$

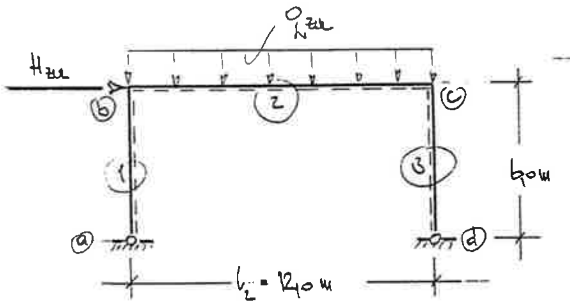
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS : (GEW. $M_{max} = M_{pl,d} = 222{,}6$ kNm)

$$\frac{M}{k_m \cdot M_{pl,d}} = \frac{222{,}6}{0{,}9254 \cdot 222{,}6} = 1{,}081 > 1{,}0 \,!$$



⇒ ZUSÄTZL. KIPPHALTERUNGEN ERF. ($l = 1{,}0$m)

12.11 GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT: – (GELENKIGE STIELLAGERUNG)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 16}$$

I PE 360 St 37

$J = 16270\ cm^4$

$E = 21 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

ANNAHME: KEIN ANSATZ VON VORVERFORMUNGEN

TEILSICHERHEITSBEIWERTE: $\gamma_F = 1,0$, $\psi = 1,0$ (ANNAHME)

$\gamma_\Pi = 1,0$

q_{zul}, H_{zul}:

STÄNDIGE EINWIRKUNG ... $\gamma_F = 1,35$

VERÄNDERL. –"– ... $\gamma_F = 1,5$ $\psi = 0,9 \rightarrow \gamma_F \psi = 1,35$

$$q_d = \gamma_F \cdot g + \gamma_F \cdot \psi \cdot p = 1,35 \cdot q_{zul}$$

n. TH. I. ORD.

q_d [kN/m]	–	14,6	17,5
q_{zul}	1,0	10,81	12,96
Π_b	−5,40	−58,37	−69,98
Π_c	−12,60	−136,2	−163,3
ξ_Π	–	0,4500	0,4500
max Π	–	99,24	117,0
$\bar{\sigma}_c$	14,39	155,6	186,5

$C = 5695$ kNm

	Δw [m]	
q_{zul}	10,81	12,96
Π_b:	−0,01573	−0,01886
Π_c:	−0,03433	−0,04117
φ_2:	0,08440	0,1012
w =	0,03438	0,04117
γ_c =	0,02732	0,03275

n. TH. I. ORDNUNG – α - VERFAHREN

	$\alpha = 1,086$		$\alpha = 1,104$	
q_d [kN/m]	–	14,2	–	16,9
q_{zul}	1,0	10,52	1,0	12,52
Π_b	−5,090	−53,55	−5,026	−62,93
Π_c	−12,91	−135,8	−12,97	−162,4
ξ_Π	–	0,4457	–	0,4448
max Π	–	96,91	–	115,4
$\bar{\sigma}_c$	15,63	164,4	15,89	198,7

	Δw [m]	
q_{zul}	10,52	12,52
Π_b:	−0,01444	−0,01698
Π_c:	−0,03407	−0,04070
φ_2:	0,08196	0,09749
w =	0,03345	0,03981
γ_c =	0,02887	0,03492

n. TH. II. ORDNUNG (EXAKT)

$$\varepsilon = l \cdot \sqrt{\frac{N}{EJ}}$$

$q_d = 14,2$ kN/m $\rightarrow q_{zul} = 10,52$ kN/m									
(S)	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
1	60	1,0	0,2514	–	–	2,987	2,987	+	2,987
2	25	0,5	0,3246	3,986	2,004	–	1,993	1,002	–
3	75	1,0	0,2811	–	–	2,984	2,984	+	2,984

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\sigma}_c$	LF
4,980	1,002	−0,4978	126,5
1,002	4,977	−0,4773	−126,5
−0,4978	−0,4773	0,1619	12,62

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\sigma}_c$
45,09	−18,55	159,6

$$[A] \cdot \{X\} = -\{B\}$$

$$C = \frac{EJ}{l_1} = 5695\ kNm$$

$$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$$

$q_d = 16{,}9$ kN/m → $q_{zul} = 12{,}52$ kN/m

Ⓢ	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	γ_s	λ_s	η_s
①	70	1,0	0,2716	–	–	2,985	2,985	∞	2,985
②	30	0,5	0,3556	3,983	2,004	–	1,992	1,002	–
③	85	1,0	0,2993	–	–	2,982	2,982	∞	2,982

$\bar\varphi_b$	$\bar\varphi_c$	$\bar\sigma_c$	LF
4,977	1,002	-0,4975	15,06
1,002	4,974	-0,4970	-150,6
-0,4975	-0,4970	0,1612	15,02

φ_b	φ_c	σ_c
53,83	-21,98	191,5

$[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$

$q_d = 19{,}2$ kN/m → $q_{zul} = 14{,}22$ kN/m

Ⓢ	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	γ_s	λ_s	η_s
①	80	1,0	0,2903	–	–	2,983	2,983	∞	2,983
②	35	0,5	0,3841	3,980	2,005	–	1,990	1,003	–
③	95	1,0	0,3164	–	–	2,980	2,980	∞	2,980

$\bar\varphi_b$	$\bar\varphi_c$	$\bar\sigma_c$	LF
4,973	1,003	-0,4972	171,1
1,003	4,970	-0,4967	-171,1
-0,4972	-0,4967	0,1605	17,06

φ_b	φ_c	σ_c
61,35	-24,89	219,3

$[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$

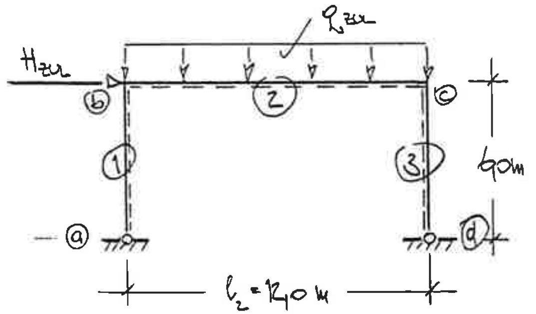
q_{zul} [kN/m]	10,52	12,52	14,22
M_b	-55,23	-65,41	-73,98
M_c	-134,7	-160,7	-183,1
M_0	14380	14260	13880
M_1	28950	28750	28020
v	0,01699	0,01874	0,02040
ξ_M	0,4477	0,4473	0,4469
max M	97,09	117,5	132,9

ΔW [m]			
q_{zul} [kN/m]	10,52	12,52	14,22
M_b:	-0,01505	-0,01787	-0,02026
M_c:	-0,03425	-0,04095	-0,04674
q_{zul}:	0,08293	0,09890	0,1126
w =	0,03363	0,04008	0,04560
σ_c =	0,02802	0,03363	0,03851

$\underline{M_{el}} = f_{yd}\cdot W_{el} = 24{,}0/1{,}0 \cdot 904 = \underline{21700\ \text{kNm}}$ →

→ REIN ELAST. VERHALTEN DER SYSTEME

A2.12 BERECHNUNG NACH Ö-NORM B 4600 – (GELENKIGE STIELL.)



$$\boxed{\frac{q_{zul} \cdot l_2}{H_{zul}} = 16}$$

IPE 360

St 360 EF

$J = 16\,270$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad \underline{q_{zul} = 11{,}54 \text{ kN/m} \rightarrow H_{zul} = 13{,}85 \text{ kN}}$

$$\max M = M_{cd} = q \cdot [-9{,}0 - 3{,}60] = -145{,}4 \text{ kNm}$$

$$M_{bc} = q \cdot [-9{,}0 + 3{,}60] = -62{,}32 \text{ kNm}$$

$$\max Q = Q_{cb} = q \cdot [-6{,}0 - 0{,}60] = -76{,}16 \text{ kN}$$

$$N_{cd} = -76{,}16 \text{ kN}$$

$$N_{bc} = q \cdot [-1{,}50 - 0{,}60] = -24{,}23 \text{ kN}$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB 2

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}4500 \qquad x_M = 5{,}400 \text{ m}$$

$$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2} \xi^2 \cdot q \cdot l^2 = \underline{105{,}7 \text{ kNm}}$$

NACHWEISE:

ALLGEM. SPANNUNGSNACHWEIS:

$$\underline{\max \sigma}: \quad \frac{N}{A} + \frac{M}{1{,}07 \cdot W} = \frac{76{,}16}{72{,}7} + \frac{14540}{1{,}07 \cdot 904} = \underline{16{,}08 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{zul} = 16{,}5} \checkmark$$

$$\underline{\max \tau}: \quad \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \frac{76{,}16 \cdot 510}{16270 \cdot 0{,}8} = \underline{2{,}984 \text{ kN/cm}^2 < \tau_{zul} = 10{,}0 \text{ kN/cm}^2} \checkmark$$

VERGLEICHSSPANNUNG:

$$\sigma = 17{,}13 \text{ kN/cm}^2 \qquad \tau = \frac{24{,}23 \cdot 374{,}9}{16270 \cdot 0{,}8} = 0{,}6980 \text{ kN/cm}^2$$

$$\underline{\sigma_V = 17{,}17 \text{ kN/cm}^2 < \beta_P = 19{,}0 \text{ kN/cm}^2} \checkmark$$

KNICKNACHWEIS:

(VERSCHIEBL. SYSTEM; DOPPELTSYM. QS.)

STIEL 3:

KN – IN DER MOMENTENEBENE

$\beta_3 = 2{,}683$ (SIEHE VORHER) $\quad s_K = 2{,}683 \cdot 600 = 1610$ cm, $\quad i_y = 15{,}0$ cm

$\lambda_y = 107{,}3 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = \underline{8{,}57 \text{ kN/cm}^2}$

$$\frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{K_{zul}}} \cdot \frac{N}{A} + 0{,}9 \cdot \frac{M}{W} = \frac{16{,}5}{8{,}57} \cdot \frac{76{,}16}{72{,}7} + 0{,}9 \cdot \frac{14540}{904} = 16{,}49 \text{ kN/cm}^2$$

$$\underline{\sigma_{VORH} = 16{,}49 \leq \sigma_{zul} = 16{,}5 \text{ kN/cm}^2} \checkmark$$

KN – ⊥ ZUR MOMENTENEBENE

$s_K = 300{,}0$ cm (SIEHE BDKN) $\quad i_z = 3{,}79$ cm

$\lambda_z = 79{,}16 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = 11{,}88$ kN/cm^2

$$\sigma_{K_{VORH}} = \frac{76{,}16}{72{,}7} = \underline{1{,}048 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{K_{zul}} = 11{,}88 \text{ kN/cm}^2} \checkmark$$

RIEGEL 2

KN – IN DER MOMENTENEBENE

AUS $N_{Ki\,SYSTEM}$ → GLEICHE SCHLANKHEIT WIE STIEL

$N_{RIEGEL} < N_{STIEL}$ ⇒ NICHT MASSGEBEND

KN ⊥ ZUR MOMENTENEBENE:

$s_k = 3{,}0\ m$ $\quad i_z = 3{,}79\ cm$ $\quad \lambda_z = 79{,}16 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} \doteq 11{,}88\ kN/cm^2$

$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{24{,}23}{72{,}7} = 0{,}3333 < \sigma_{k_{zul}} = 11{,}88\ kN/cm^2$ ✓

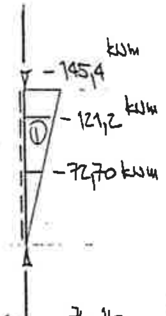
BIEGEDRILLKNICKEN:

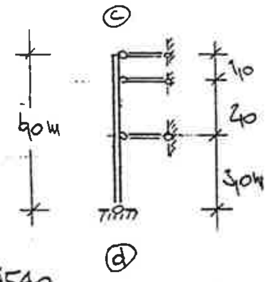
$b < h \rightarrow$ VEREINFACHTER NACHWEIS DURCH KNICKNACHWEIS DES GURTES: $i_z = 4{,}907\ cm$

STIEL ③

$N = 76{,}16\ kN$ (DRUCK)

a) $\boxed{l_z = 1{,}0\ m}$ FÜR $M_y = -145{,}4\ kNm$





$P_0/P_1 = 0{,}84 \rightarrow \beta = 0{,}962$

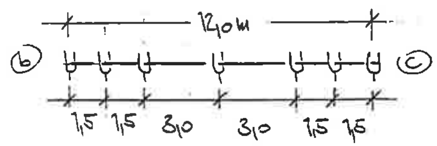
$\lambda_z = \frac{l \cdot \beta}{i_z} = 19{,}60 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 16{,}08\ kN/cm^2 > \frac{76{,}16}{72{,}7} + \frac{14540}{1{,}07 \cdot 904} = \sigma_{k_{vorh}}$ ✓

b) $l_z = 2{,}0\ m$ FÜR $M_y = -121{,}2\ kNm$

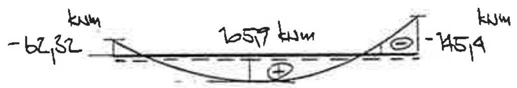
$s_k \doteq 2{,}0\ m$ $\quad \lambda_z = 40{,}76$ $\quad \sigma_{k_{zul}} = 14{,}72\ kN/cm^2 > \frac{76{,}16}{72{,}7} + \frac{12150}{1{,}07 \cdot 904} = 13{,}61\ kN/cm^2$ ✓

RIEGEL ②

$N = 24{,}23\ kN$ (DRUCK)



a) FÜR $M_y = 165{,}9\ kNm$



$\boxed{l_z = 3{,}0\ m}$ $\quad \lambda_z = \frac{300}{4{,}907} = 61{,}14 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 13{,}48\ kN/cm^2$

$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{24{,}23}{72{,}7} + \frac{16590}{1{,}07 \cdot 904} = 11{,}26\ kN/cm^2 < \sigma_{k_{zul}} = 13{,}48\ kN/cm^2$ ✓

b) FÜR $M_y = 145{,}4\ kNm$

$\boxed{l_z = 1{,}50\ m}$ $\quad$ MIT $P_0/P_1 = 0{,}50 \rightarrow \beta = 0{,}88$ (SIEHE VORHER)

$\lambda_z = \frac{132{,}0}{4{,}907} = 26{,}90 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 15{,}5\ kN/cm^2$

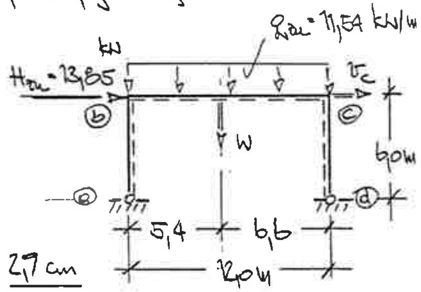
$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{24{,}23}{72{,}7} + \frac{14540}{1{,}07 \cdot 904} = 15{,}37\ kN/cm^2 < \sigma_{k_{zul}} = 15{,}5\ kN/cm^2$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4500$, $\xi' = 1 - \xi$



M_1: $\quad \Delta W = -0{,}01679\ m$

M_k: $\quad \Delta W = -0{,}03665\ m$

q: $\quad \Delta W = 0{,}07010\ m$

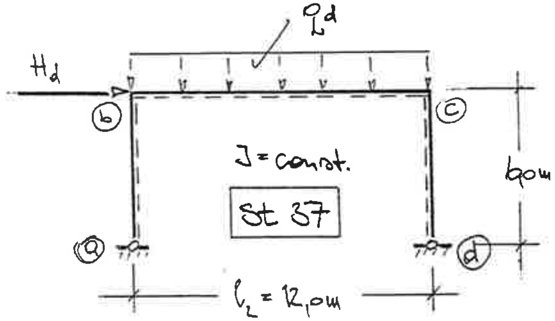
$W = 0{,}03666\ m \mathrel{\hat{=}} 3{,}7\ cm$

$v_c = \bar{v}_c / C = \frac{1}{C} \cdot (14{,}39) \cdot q = 0{,}02716\ m \mathrel{\hat{=}} 2{,}7\ cm$

$C = \frac{EJ}{l_1} = 5695\ kNm$

A 3. BEISPIEL 3

SYSTEM UND BELASTUNGEN



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

I PE 400

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$\gamma_M = 1{,}1$

QUERSCHNITTSWERTE - IPE 400

$A = 84{,}5\ cm^2$, $A_s = s\cdot(h-t) = 33{,}24\ cm^2$ $h = 40\ cm$ $b = 18\ cm$
$t = 1{,}35$, $s = 0{,}86$, $r = 2{,}1$ [cm]

$S_y = 654\ cm^3$, $W_{el,y} = 1160\ cm^3$, $W_{pl,y} = 1308\ cm^3$, $\alpha_{pl} = 1{,}128$

$J_y = 23\,130\ cm^4$, $i_y = 16{,}5\ cm$, $J_z = 1320\ cm^4$

$g = 0{,}663\ kN/m$

$J_\omega = 490\,000\ cm^6$, $J_T = 37{,}4\ cm^4$

y – y, z – z

PLAST. GRENZSCHNITTGRÖSSEN

$f_{y,k} = 24{,}0\ kN/cm^2$ $\qquad f_{y,d} = f_{y,k}/\gamma_M = 21{,}82\ kN/cm^2$

$N_{pl} = f_{y,k} \cdot A = 2028\ kN$ $\qquad N_{pl,d} = 1844\ kN$

$Q_{pl} = f_{y,k}/\sqrt{3} \cdot A_s = 460{,}6\ kN$ $\qquad Q_{pl,d} = 418{,}6\ kN$

$M_{pl} = f_{y,k} \cdot W_{pl} = 313{,}9\ kNm$ $\qquad M_{pl,d} = 285{,}4\ kNm$

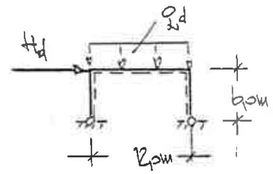
SCHNITTKRÄFTE NACH TH. I. ORDNUNG

SIEHE VOR $\quad q_d = 10\ kN/m$, $H_d = 2{,}4\ kN$

$C_d = \frac{(EJ)_d}{l_1} = 7360\ kNm \qquad C = \frac{EJ}{l_1} = 8096\ kNm$

A3.1 ELASTIZITÄTSTHEORIE I. ORD.

ZULÄSSIG FÜR $\boxed{\frac{N_{Ki,d}}{N_d} \geq 10}$



$N_{Ki,d} = \frac{\pi^2 \cdot (EJ)_d}{\beta_1^2 \cdot l_1^2}$ $\qquad \beta_1 = 2{,}683$ (SIEHE VORHER)

$N_{Ki,d} = 1682\ kN$, $\quad N_d = q_d\,[6{,}0 + 2 \cdot 0{,}60] = 7{,}20 \cdot q_d \quad \frac{1682}{7{,}20 \cdot q_d} \geq 10$

⇒ ZULÄSSIG FÜR: $\boxed{q_d \leq 23{,}36\ kN/m}$

FLIESSGELENKTHEORIE I. ORD. ZULÄSSIG?

(GL. DIN 18800 T2. PKT. 5.3.2.4 ELEMENT (527) SEITE 28)

$$\boxed{\frac{\alpha}{1 + \frac{J_s \cdot l_R}{J_R \cdot l_s}} \cdot \frac{(EJ_s)_d}{N \cdot l_s^2} \geq 10}$$

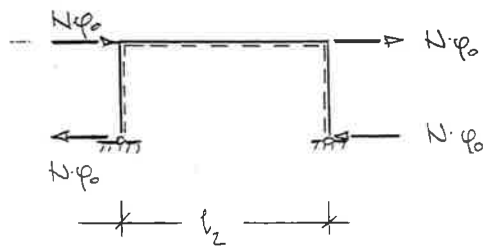
$\alpha = 3$ GELENKIGE FUSSPKTE.
N .. Σ DER VERT. LASTEN

$$\frac{3}{1 + \frac{12}{6}} \cdot \frac{2{,}1 \cdot 23130}{N \cdot 6{,}0^2 \cdot 1{,}1} \geq 10 \Rightarrow N \leq 122{,}7\ kN \quad \text{MIT } N = l_2 \cdot q_d =$$

ZULÄSSIG FÜR $\boxed{q_d \leq 10{,}23\ kN/m}$

VORVERDREHUNG: $\quad \varphi_0 = 0{,}001948$

LF φ_0:



ENTSPRICHT LF H:

MIT $\quad H = (q_d \cdot l_2) \cdot \varphi_0 = q_d \cdot (l_2 \cdot \varphi_0)$

MIT: $\quad H_{bc} = \ast$

$\ast_{aH} = \ast_{dH} = \ast$

13.2 E-THEORIE I. ORD – (ELAST.-ELAST)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad q_d = 14{,}6\,kN/m \rightarrow H_d = 35{,}04\,kN$

$$\max M = M_c = q_d \cdot [\underset{LF\,q}{-9{,}0} \underset{LFH}{- 3{,}6} \cdot (2{,}0 + \underset{LF\,\varphi_0}{0{,}01948})] = -237{,}5\,kNm$$

$$M_b = q_d \cdot [-9{,}0 + 3{,}6 \cdot (2{,}0 + 0{,}01948)] = -252{,}6\,kNm$$

$$\max Q = Q_{do} = q_d \cdot [-6{,}0 - 0{,}6 \cdot (2{,}0 + 0{,}01948)] = -65{,}3\,kN$$

$$\max N = N_{cd} = \qquad -65{,}3\,kN$$

NACHWEISE:

$\max \sigma$: $\quad \sigma = \frac{23750}{1160} + \frac{65{,}3}{84{,}5} = \underline{21{,}72\,kN/cm^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\,kN/cm^2}$ ✓

$\max \tau$: $\quad \tau = \frac{65{,}3 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = \underline{3{,}462\,kN/cm^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60\,kN/cm^2}$ ✓

$\sigma_v \leq \sigma_{R,d}$: GILT ALS ERFÜLLT, WENN $\sigma/\sigma_{R,d}$ ODER $\tau/\tau_{R,d} < 0{,}5$

GRENZ (b/t) ERFÜLLT

SIEHE FG. TH. II. ORD.

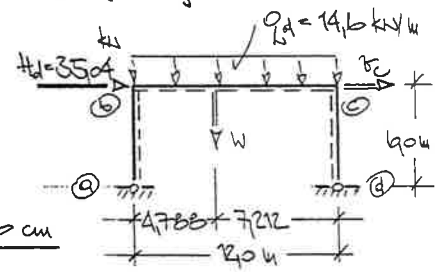
ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ $\quad$ STAB 2

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot l^2} = 0{,}3990 \qquad (x_M = 4{,}789\,m)$$

$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2}\xi^2 \cdot q_d \cdot l^2 = \underline{142{,}1\,kNm}$$

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}3990 \; , \; \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\quad \Delta w = -0{,}005271\,m$

M_k : $\quad \Delta w = -0{,}04330\,m$

q_d : $\quad \Delta w = 0{,}08493\,m$

$\underline{w} = 0{,}03636\,m \;\hat{=}\; \underline{3{,}6\,cm}$

$$\underline{\delta_c} = \bar{\delta}_c / C_d = \frac{1}{C_d} \cdot [14{,}37 \cdot (2 + 0{,}01948)] \cdot q_d = 0{,}05765\,m \;\hat{=}\; \underline{5{,}8\,cm}$$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL TH. II. ORD – ELAST. ELAST

A3.3 E-THEORIE I. ORD – (ELAST.-PLAST.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad \underline{q_d = 17{,}5\ kN/m \rightarrow H_d = 42{,}0\ kN}$

$\max M = M_c = -284{,}7\ kNm$

$M_b = -30{,}28\ kNm$

$\max Q = Q_{cb} = -126{,}2\ kN$

$\max N = N_{cd} = -126{,}2\ kN$

FORMEL SIEHE VOR

$M_c^P = M_c^E \cdot q^P / q^E$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB ②

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}3990 \quad (x_M = 4{,}789\ m) \quad \underline{\max M_F} = \underline{170{,}3\ kNm}$

NACHWEIS DER INTERAKTION:

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}1 \; : \; \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3013 < 0{,}33 \rightarrow M_{pl} = \underline{M_{pl,d} = 285{,}4\ kNm}$

$\underline{M_{cb} = -284{,}7\ kNm} < \underline{M_{pl,c} = -285{,}4\ kNm}$ ✓

NACHWEIS GRENZ(b/t) $\quad$ SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN: $\quad \xi = 0{,}3990 \quad \xi' = 1 - \xi$

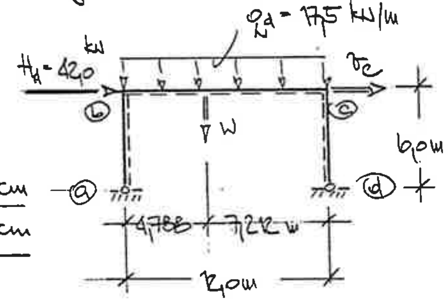
M_i : $\Delta W = -0{,}006318\ m$

M_k : $\Delta W = -0{,}05190\ m$

$\underset{\rightarrow}{0}$: $\Delta W = 0{,}1018\ m$

$\underline{W} = 0{,}04358\ m \hat{=} \underline{4{,}4\ cm}$ – ⓐ

$\underline{\delta_c} = 0{,}06916\ m \hat{=} \underline{6{,}9\ cm}$



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL E-TH. II. ORD – (ELAST. PLAST)

A3.4 α – VERFAHREN (NÄHERUNG FÜR E. TH II. ORD.) – (ELAST. ELAST)

ZULÄSSIG FÜR $\quad \eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N_d} \geq 4 \qquad \alpha = \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{Ki,d}}}$

VORVERDREHUNG φ_0:

$\varphi_0 = 0{,}002598 \quad$ (VERF. E.E.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad \underline{q_d = 14{,}2\ kN/m \rightarrow H_d = 34{,}08\ kN}$

$\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N_d} = \frac{1682}{7{,}20 \cdot q} = 16{,}45 > 4 \Rightarrow \underline{\alpha = 1{,}065}$

$\max M = M_c = q \cdot [\overset{LF\ q}{-9{,}0} - \overset{LF\ H}{\alpha \cdot 3{,}6} \cdot \overset{LF\ \varphi_0}{(2 + 0{,}02598)}] = -238{,}1\ kNm$

$M_b = q \cdot [-9{,}0 + \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (2 + 0{,}02598)] = -17{,}50\ kNm$

$\max Q = Q_{cb} = q \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}6 \cdot (2 + 0{,}02598)] = -103{,}6\ kN$

$\max N = N_{cd} = -103{,}6\ kN$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB ② b–c

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}3921 \qquad (x_M = 4{,}705\ m)$

$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2} \xi_M^2 \cdot q \cdot l^2 = \underline{139{,}7\ kNm}$

NACHWEISE

$\max \sigma$: $\quad \sigma = \frac{23810}{1160} + \frac{103{,}6}{85{,}4} = \underline{21{,}74\ kN/cm^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\ kN/cm^2}$ ✓

$\max \tau$: $\quad \tau = \frac{103{,}6 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = \underline{3{,}406\ kN/cm^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60\ kN/cm^2}$ ✓

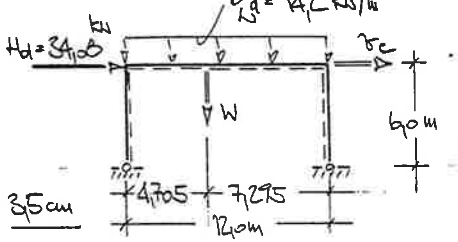
$\sigma_V \leq \sigma_{R,d} \quad$ ERFÜLLT FÜR $\sigma / \sigma_{R,d} < 0{,}5$ ODER $\underline{\tau / \tau_{R,d} < 0{,}5}$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}3921\ ,\quad \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\Delta W = -0{,}003645$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}04294$ m

q : $\Delta W = 0{,}08201$ m

$\underline{W} = 0{,}03543$ m $\hat{=}$ $\underline{3{,}5\text{ cm}}$

$\underline{\delta_c} = \bar{\delta}_c / C_d = \frac{1}{C_d} \cdot [\alpha \cdot 14{,}37 (2 + 0{,}02598)] \cdot q = 0{,}05990 \text{ m} \hat{=} \underline{6{,}0\text{ cm}}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE BEISPIEL E-TH. II. ORD. – ELAST. ELAST

A3.5α – VERFAHREN (NÄHERUNG F. E. TH. II. ORD.) – (ELAST. – PLAST)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad \underline{q_d = 16{,}8\text{ kN/m} \rightarrow H_d = 40{,}32\text{ kN}}$

$\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N_d} = \frac{1682}{720 \cdot q} = 13{,}91 > 4 \qquad \underline{\alpha} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\eta_{Ki,d}}} = \underline{1{,}078}$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDREHUNG)

SCHNITTGRÖSSENÜBERLAGERUNG :

$\max M = M_c = q \cdot [-9{,}0 - \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (2 + 0{,}03896)] = -284{,}1$ kNm

$M_b = q \cdot [-9{,}0 + \alpha \cdot 3{,}6 \cdot (2 + 0{,}03896)] = -18{,}27$ kNm

$\max Q = Q_{cb} = q \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}6 \cdot (2 + 0{,}03896)] = -123{,}0$ kN

$\max N = N = -123{,}0$ kN

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ STAB ② b-c

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}3901 \qquad (x_M = 4{,}681\text{ m})$

$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi_M^2 \cdot q \cdot l^2 = \underline{165{,}8\text{ kNm}}$

NACHWEIS DER INTERAKTION :

$\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10 \qquad \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}2937 < 0{,}33 \rightarrow M_{pl} = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

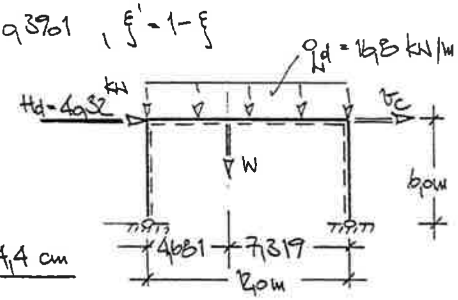
$\underline{M_c = -284{,}1\text{ kNm} < M_{pl,c} = -285{,}4\text{ kNm}}$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}3901 \;,\; \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\Delta w = -0{,}002253$ m

M_k : $\Delta w = -0{,}05107$ m

q : $\Delta w = 0{,}09682$ m

$\underline{w} = 0{,}04350$ m $\hat{=}$ $\underline{4{,}4 \text{ cm}}$

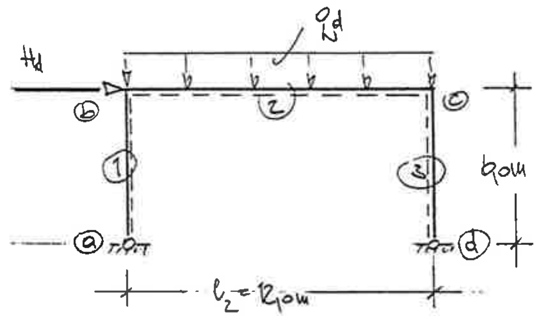
$\underline{v_C = \bar{v}_C / C_d} = \frac{1}{C_d} \cdot \left[\alpha \cdot 14{,}39 \cdot (2 + 0{,}03896)\right] \cdot q = 0{,}07220$ m $\hat{=}$ $\underline{7{,}2 \text{ cm}}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE E. TH. II. ORD. – (ELAST.-PLAST.)

A3.b ERSATZSTABVERFAHREN (NÄHERUNG F. TH. II. ORD.) – (ELAST. PLAST.)

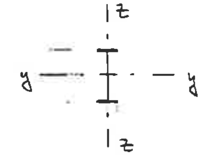
(NACH EUROCODE 3 – APRIL 1990)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400 St 37

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²



$N_{ki,y} = \frac{\pi^2 \cdot E J_y}{\beta_1^2 \cdot \ell_1^2} = 1850$ kN mit $\underline{\beta_1 = 2{,}683}$ (SIEHE VOR)

$N_{ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_z}{\ell_k^2} = 3040$ kN $\underline{\ell_{k_z} = 3{,}0 \text{ m}}$ (RIEGEL)

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{ki}}}$: $\bar{\lambda}_y = 1{,}047$

$\bar{\lambda}_z = 0{,}8168$

$\underline{y-y:}$ KNICKSP. LINIE ⓐ : $\alpha = 0{,}21$ → $\underline{k_y = 0{,}6327 = k_{min}}$

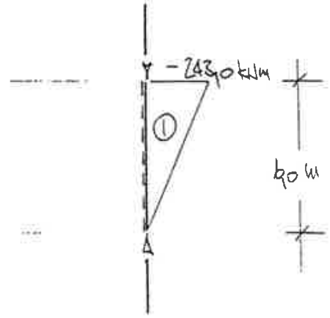
$\underline{z-z:}$ ⓑ : $\alpha = 0{,}34$ → $\underline{k_z = 0{,}7140}$

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\underline{q_d = 15{,}0 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 36{,}0 \text{ kN}}$

STAB ③ :

$M_{cd} = q \cdot \left[\overset{LF\,q}{-9{,}0} - \overset{LF\,H}{3{,}6 \cdot 2}\right] = -243{,}0$ kNm

$N_3 = q \cdot \left[-6{,}0 - 0{,}6 \cdot 2\right] = -108{,}0$ kN



NACHWEIS:

$\varphi = + \rightarrow \beta_{M,\psi} = 1{,}8 = \beta_{M,y}$

$\mu_y = \bar{\lambda}_y \cdot (2 \cdot \beta_{My} - 4) + \frac{W_{pl} - W_{el}}{W_{el}} = -0{,}2912$

$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_d}{\kappa_y \cdot \gamma_M \cdot N_{pld}} = 1{,}025$

$\frac{N_d}{\kappa_{min} \cdot N_{pld}} + \frac{k_y \cdot M_d}{M_{pld}} = \frac{168}{0{,}6327 \cdot 1844} + \frac{1{,}025 \cdot 243{,}2}{2854} = \underline{0{,}9653 < 1{,}0}$ ✓

STAB ②:

11. EUROCODE PKT 5.2.6.2(B)

VERGRÖSSERUNG DER "SWAY MOMENTS" IM RIEGEL UM $\boxed{1{,}2}$

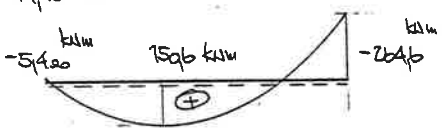
$M_{be} = \gamma_Q \cdot [\overset{LF\,Q}{-9{,}0} + \overset{LF\,H}{1{,}2 \cdot 36 \cdot (2)}] = -51{,}00$ kNm

$M_{cb} = \gamma_Q \cdot [-9{,}0 - 1{,}2 \cdot 36 \cdot (2)] = -264{,}6$ kNm

$N_2 = \gamma_Q \cdot [-1{,}5 - 1{,}2 \cdot 0{,}6 \cdot (2)] = -44{,}10$ kN

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot l^2} = 0{,}3800$

$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \xi^2 \cdot q_d \cdot l^2 = 150{,}6$ kNm



NACHWEIS:

$\psi = 0{,}02 \quad \beta_{M,\psi} = 1{,}786 \quad \beta_{MQ} = 1{,}3 \quad M_Q = 270{,}0$ kNm $\quad \Delta M = 415{,}2$ kNm

$\beta_{M,y} = 1{,}470 \quad \mu_y = -0{,}9822 \quad k_y = 1{,}034$

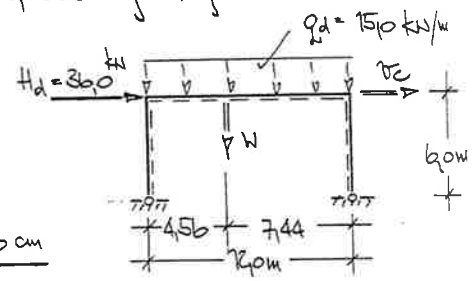
$\frac{44{,}10}{0{,}6327 \cdot 1844} + \frac{1{,}034 \cdot 264{,}6}{2854} = \underline{0{,}9964 < 1{,}0}$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t)

ERFÜLLT – SIEHE FG. TH. I. ORD.

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}3800 \quad \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\Delta W = -0{,}00720$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}04676$ m

q : $\Delta W = 0{,}08544$ m

$\underline{W} = 0{,}03756$ m $\hat{=}$ $\underline{3{,}8 \text{ cm}}$

$\underline{v_c} = \bar{v}_c / C_d = \frac{1}{C_d} \cdot \gamma_Q \cdot [14{,}89 \cdot (2 + 0{,}003896)] = 0{,}05967$ m $\hat{=}$ $\underline{6{,}0 \text{ cm}}$

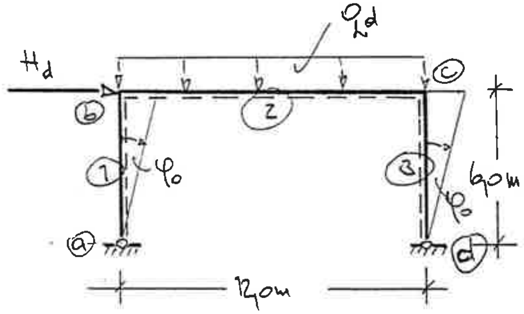
ANSATZ VON $\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN:

SIEHE E-TH. II. ORD. – (ELAST.-PLAST)

A3.7 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST. ELAST.)

SYSTEM UND BELASTUNG



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400

$J = 23130\ cm^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$\gamma_n = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}002598$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$q_d = 14{,}3\ kN/m \rightarrow H_d = 34{,}32\ kN$

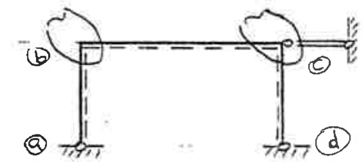
(S)	N_s kN	ε_s	F_1	F_2	F_3
1	70	0,2389	–	–	2,987
2	40	0,3612	3,983	2,004	–
3	105	0,2926	–	–	2,983

$$\varepsilon = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$$

(S)	l_1/l_s	α_s	λ_s	γ_s
1	1,0	2,987	+	2,987
2	0,5	1,992	1,002	–
3	1,0	2,983	+	2,983

$C_d = 7360\ kNm$

SYSTEM:



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$\underline{a_{11}} = \alpha_1 + \alpha_2 = \underline{4{,}979}$

$\underline{a_{21} = a_{12}} = \lambda_2 = \underline{1{,}002}$

$\underline{a_{31} = a_{13}} = -\frac{1}{l_1} \cdot \gamma_1 = \underline{-0{,}4978}$

LF $\varphi_c = 1{,}0$:

$\underline{a_{22}} = \alpha_2 + \alpha_3 = \underline{4{,}975}$

$\underline{a_{32} = a_{23}} = -\frac{1}{l_3} \cdot \gamma_3 = \underline{-0{,}4972}$

LF $\bar{v}_c = 1{,}0$:

$$\underline{a_{33}} = \frac{1}{l_1^2} \cdot \gamma_1 - \frac{N_1}{l_1 \cdot C_d} + \frac{1}{l_3^2} \cdot \gamma_3 - \frac{N_3}{l_3 \cdot C_d} = \underline{0{,}1619}$$

LF q, H:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08352 \cdot q \cdot l^2 = -172{,}0\ kNm$

$\underline{a_{10} = -a_{20}} = \underline{-172{,}0\ kNm}$

$\underline{a_{30}} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = \underline{-34{,}77\ kN}$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$[A] \cdot \{X\} = -\{B\}$

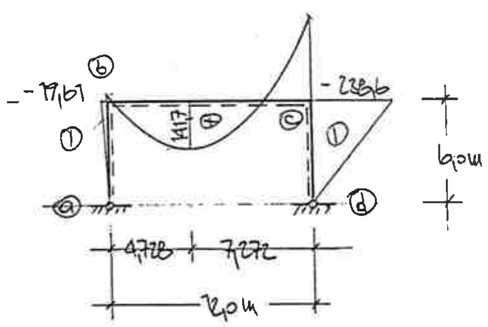
φ_b	φ_c	v_c	LF
4,979	1,002	-0,4978	172,0
1,002	4,975	-0,4972	-172,0
-0,4978	-0,4972	0,1619	34,77
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	DET (A)
79,85	-6,716	439,7	> 0

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

STABENDMOMENTE

	$q_L = 14,3$ kN/m	
(S) i-k	M^o_{ik} kNm	M_{ik} kNm
① a	0	0
① b	0	-19,61
② b	-172,0	-19,67
② c	-172,0	-238,6
③ c	0	-238,6
③ d	0	0

MOMENTE [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN ENDMOMENTEN N. TH. I. ORD)

STABENDQUERKRÄFTE

	$q_L = 14,3$ kN/m
(S) i-k	Q_{ik} kN
① a	*
① b	-3,206
② b	67,99
② c	-164,0
③ c	38,63
③ d	*

(* NICHT GERECHNET)

NORMALKRÄFTE:

	$q_L = 14,3$ kN/m
(S) i-k	N_{ik}
① a-b	-67,56
② b-c	-38,45
③ c-d	-164,0

STABENDKRÄFTE:

	$q_L = 14,3$ kN/m	
(S) i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
① a	0	-4,147
① b		
② b	85,80	67,56
② c	-85,80	-164,0
③ c	0	38,45
③ d		

$\Sigma H = 0, \ \Sigma V = 0$

max FELDMOMENT STAB ⓑ-ⓒ

	$q_L = 14,3$ kN/m
M_0	15780
M_1	31820
v	0,03830
ξ_M	0,3940
x_M	4,728
max M	141,7

NACHWEISE

max σ – KNOTEN ⓒ

$$\sigma = \frac{23860}{1160} + \frac{164{,}0}{84{,}5} = \underline{21{,}80\ kN/cm^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\ kN/cm^2} \checkmark$$

max τ – KNOTEN ⓒ

$$\tau = \frac{164{,}0 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = \underline{3{,}419\ kN/cm^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60\ kN/cm^2} \checkmark$$

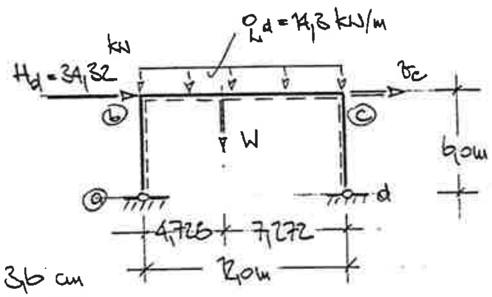
$\underline{\sigma_v \le \sigma_{R,d}}$

ERFÜLLT FÜR $\sigma/\sigma_{R,d} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{R,d} < 0{,}5$

NACHWEIS GRENZ (b/t)

SIEHE FG. TH. II. ORD

VERFORMUNGEN:



Π_i : $\Delta W = -0{,}004141$ m

Π_k : $\Delta W = -0{,}04379$ m

q_2 : $\Delta W = 0{,}08368$ m

$\underline{W} = 0{,}03595\ m \mathrel{\hat=} \underline{3{,}6\ cm}$

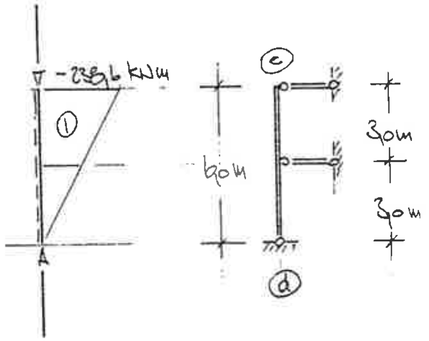
$\underline{\delta_c} = \bar{\delta}_c / C_d = 0{,}05974\ m \mathrel{\hat=} \underline{6{,}0\ cm}$ $\qquad \xi = 0{,}3940 \ ,\ \xi' = 1 - \xi$

NACHWEIS – BIEGEDRILLKNICKEN

RAHMENSTIEL ③

$N = 164{,}0$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_K = \ell = 3{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)



$$\underline{N_{Ki,z}} = \frac{\pi^2 \cdot J_z \cdot E}{\ell^2} = \underline{3040\ kN}$$

$$c^2 = \frac{J_\omega + 0{,}039 \cdot \ell^2 \cdot J_T}{J_z} = 470{,}6\ cm^2 \qquad z_p = +$$

$$M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0{,}25 \cdot z_p^2} + 0{,}5 \cdot z_p\right) \qquad \psi \doteq 0{,}5 \rightarrow \zeta = 1{,}365$$

$$M_{Ki,y} = 913{,}4\ kNm \qquad \bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{Ki,y}}} = 0{,}5862 \qquad n = 2{,}5 \rightarrow \underline{\kappa_M = 0{,}9736}$$

$$\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{Ki,z}}} = 0{,}8168 \qquad z\text{-}z \rightarrow ⓑ \rightarrow \alpha = 0{,}34 \qquad \underline{\kappa_z = 0{,}7140}$$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M_y}{\kappa_M \cdot M_{pl,d}} \cdot k_y = \frac{164}{0{,}7140 \cdot 1644} + \frac{238{,}6}{0{,}9736 \cdot 265{,}4} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}9377 < 1{,}0} \checkmark$$

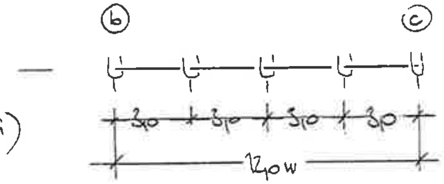
$(k_y \doteq 1{,}0)$

RIEGEL ②:

$N = 38{,}45$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_K = 3{,}0\ m = \ell}$ (GABELLAGERUNG)

$\underline{\kappa_z = 0{,}7140.}$ WIE VOR



a) NACHWEIS FÜR $M_y = 141{,}7$ kNm

ANN.: $\psi = 1{,}0 \rightarrow \zeta = 1{,}0$

$z_p = -20$ cm

$M_{ki,y} = 422{,}2$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}8623 \quad \psi = 1{,}0 \rightarrow k_N = 0{,}8 \rightarrow n = 2{,}0$

$k_M = 0{,}8025$

$$\frac{38{,}45}{0{,}7140 \cdot 1644} + \frac{141{,}7}{0{,}8025 \cdot 265{,}4} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}6479 < 1{,}0} \checkmark$$

b) NACHWEIS FÜR $M_y = 238{,}6$ kNm

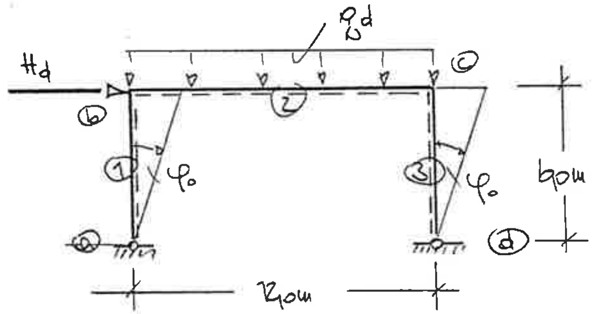
ANN.: $\psi = + \; - \; \zeta = 1{,}77$

$z_p = +$

$M_{ki,y} = 1167$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}5186 \quad n = 2{,}5 \; - \; \underline{k_M = 0{,}9854}$

$$\frac{38{,}45}{0{,}7140 \cdot 1644} + \frac{238{,}6}{0{,}9854 \cdot 285{,}4} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}8776 < 1{,}0} \checkmark$$

A3.8 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST. - PLAST)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400

$J = 23\,130$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$\underline{q_d = 16{,}9 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 40{,}56 \text{ kN}}$

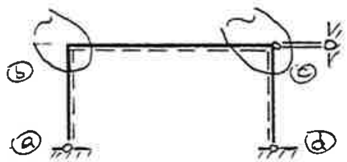
(S)	N_s kN	ε_s	F_1	F_2	F_8
1	85	0,2632	–	–	2,986
2	50	0,4038	3,978	2,006	–
3	125	0,3192	–	–	2,980

$$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$$

(S)	l_1/l_s	$\varkappa_s$	λ_s	γ_s
1	1,0	2,986	+	2,986
2	0,5	1,969	1,003	–
3	1,0	2,980	+	2,980

$C_d = 7360$ kNm

SYSTEM :



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$$a_{11} = \gamma_1 + \gamma_2 = 4{,}975$$
$$a_{21} = a_{12} = \lambda_2 = 1{,}003$$
$$a_{31} = a_{13} = -\frac{1}{l_1}\cdot\eta_1 = -0{,}4977$$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$$a_{22} = \gamma_2 + \gamma_3 = 4{,}969$$
$$a_{32} = a_{23} = -\frac{1}{l_3}\cdot\eta_3 = -0{,}4967$$

LF $\bar{\psi}_c = 1{,}0$:

$$a_{33} = \frac{1}{l_1^2}\cdot\eta_1 - \frac{N_1}{l_1\cdot C_d} + \frac{1}{l_3^2}\cdot\eta_3 - \frac{N_3}{l_3\cdot C_d} = 0{,}1616$$

LF q, H :

$$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08356\, q\cdot l^2 = -203{,}4\ \mathrm{kNm}$$
$$a_{10} = -a_{20} = -203{,}4\ \mathrm{kNm}$$
$$a_{30} = -H - \varphi_0(N_1 + N_3) = -41{,}38\ \mathrm{kN}$$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$$[A]\cdot\{x\} = -\{B\}$$

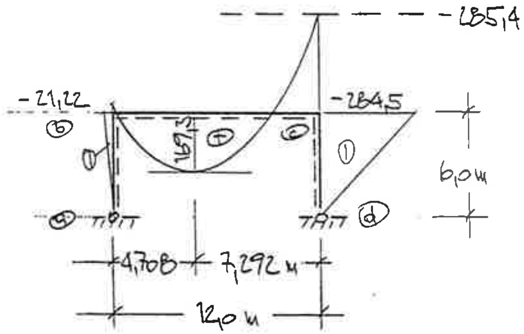
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	LF
4,975	1,003	-0,4977	203,4
1,003	4,969	-0,4967	-203,4
-0,4977	-0,4967	0,1616	41,38
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	DET (A)
95,29	-7,276	529,1	> 0

$$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$$

STABENDMOMENTE

(S)	i-k	$q = 16{,}9$ kN/m: M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
①	a	0	0
	b		-21,22
②	b	-203,4	-21,17
	c	-203,4	-284,5
③	c	0	-284,5
	d		0

M [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN STABENDMOMENTEN NACH TH. I. ORD.)

STABENDKRÄFTE :

(S)	i-k	$q = 16{,}9$ kN/m: R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
①	a	0	-4,886
	b		
②	b	161,4	79,46
	c	-161,4	-123,3
③	c	0	45,43
	d		

$\Sigma H = 0$ ✓ , $\Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE

S	i-k	$q_2 = 16{,}9$ kN/m Q_{ik} kN
1	a	*
	b	−3,454
2	b	80,11
	c	−123,3
3	c	45,79
	d	*

(* NICHT GERECHNET)

NORMALKRÄFTE

S	i-k	$q_2 = 16{,}9$ kN/m N_{ik} kN
1	a-b	−79,46
2	b-c	−45,43
3	c-d	−123,3

(N <+ DRUCK)

max FELDMOMENTE

STAB 2 b-c

	$q_2 = 16{,}9$ kN/m
M_b	14930
M_1	30170
v	0,04353
ξ_M	0,3923
x_M	4,707
max M	169,3

NACHWEISE :

INTERAKTIONSBEZIEHUNG :

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}6 \qquad \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}2944 < 0{,}33 \Rightarrow M_{pl} = M_{pl,d} = 265{,}4\ \text{kNm}$

$M_{cb} = -264{,}5\ \text{kNm} < M_{pl,d} = -265{,}4\ \text{kNm}$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t)

SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN :

$\xi = 0{,}3923\ , \quad \xi' = 1 - \xi$

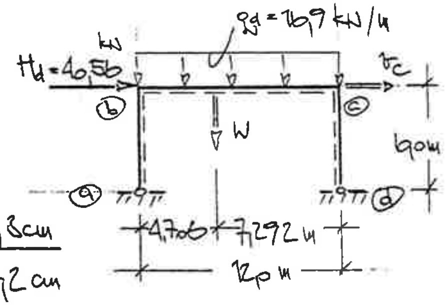
M_i : $\Delta W = -0{,}004482$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}05225$ m

q : $\Delta W = 0{,}09927$ m

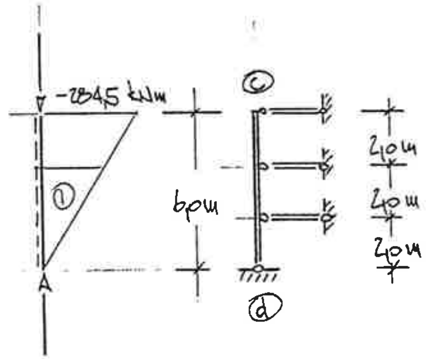
$\underline{W} = 0{,}04254$ m $\hat{=}$ $\underline{4{,}3\ \text{cm}}$

$\underline{v_c} = \bar{v}_c / C_d = 0{,}07169$ m $\hat{=}$ $\underline{7{,}2\ \text{cm}}$



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

RAHMENSTIEL ③ :



$N_3 = 123,3$ kN (DRUCK)

$\boxed{S_K = l = 2,0\ m}$ (GABELLAGERUNG)

$N_{Ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l^2} = 6640$ kN

$c^2 = \frac{J_\omega + 0,039 \cdot l^2 \cdot J_T}{J_z} = 371,2\ cm^2$ $\quad z_p = +$

$M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0,25 \cdot z_p^2} + 0,5 \cdot z_p\right)$ $\quad \psi \doteq 0,67 \rightarrow \zeta = 1,254$

$M_{Ki,y} = 1653$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{Ki,y}}} = 0,4358$ $\quad k_M = 0,664 \rightarrow n = 2,160$

$k_M = 0,9875$

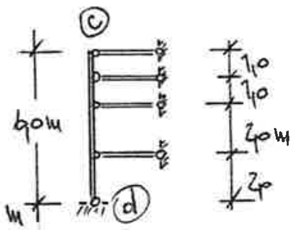
$\bar{\lambda}_K = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{Ki,z}}} = 0,5445$ KN SP. LINIE ⓑ $\rightarrow \alpha = 0,34$ $\quad \kappa_z = 0,8646$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{123,3}{0,8646 \cdot 1844} = 0,07739 < 0,1$ =>

$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{284,5}{0,9875 \cdot 2854} = 1,009 > 1,0\ !$ =>

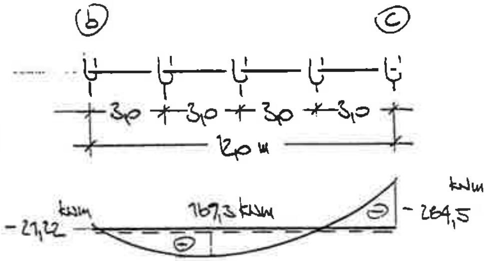
ZUSÄTZLICHE KIPPHALTERUNG ERF. $l = 1,0$ m



RIEGEL ② :

$N_2 = 45,43$ kN (DRUCK)

$\boxed{S_K = l = 3,0\ m}$ (GABELLAGERUNG)



$\kappa_z = 0,7140$ (SIEHE TH. II. ORD. E-E)

a) NACHWEIS FÜR $M_y = 167,3$ kNm

$k_M = 0,8025$ (SIEHE TH. II. ORD E-E)

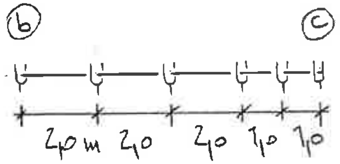
$\frac{45,43}{0,7140 \cdot 1844} + \frac{167,3}{0,8025 \cdot 2854} \cdot 1,0 = 0,7737 < 1,0$ ✓

b) NACHWEIS FÜR $M_y = 284,5$ kNm

$k_M = 0,9854$ (SIEHE TH. II. ORD. E-E)

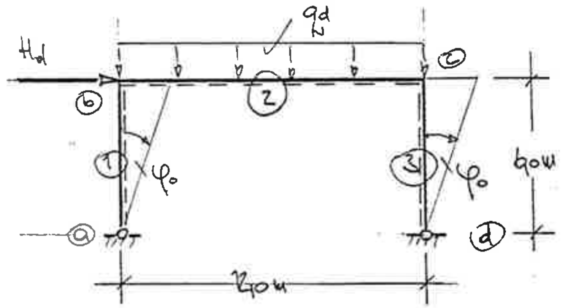
$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{45,43}{0,7140 \cdot 1844} = 0,03451 < 0,10$: ⓑ

$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{284,5}{0,9854 \cdot 2854} = 1,012 > 1,0$ ->



ZUSÄTZLICHE KIPPHALTERUNG ERF. $l = 1,0$ m

13.9 FLIESSGELENKTHEORIE II. ORD – (EXAKTE BERECHNUNG)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400 St 37
$J = 23130\ cm^4$
$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$
$\gamma_M = 1{,}1$
$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$q_d = 20{,}5\ kN/m \rightarrow H_d = 49{,}20\ kN$

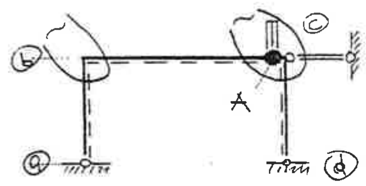
ⓢ	N_s [kN]	ε_s	F_1	F_2	F_3
①	95	0,2783	–	–	2,985
②	45	0,3831	3,980	2,005	–
③	155	0,3555	–	–	2,975

$$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$$

ⓢ	l_1/l_s	κ_s	λ_s	η_s
①	1,0	2,985	0	2,985
②	0,5	1,990	1,003	–
③	1,0	2,975	0	2,975

$C_d = 7360\ kNm$

SYSTEM MIT FG A IN ⓒ:



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$a_{11} = \kappa_1 + \kappa_2 = 4{,}975$ $\quad a_{21} = a_{12} = \lambda_2 = 1{,}003$

$a_{31} = a_{13} = -\frac{1}{l_1} \cdot \eta_1 = -0{,}4975$ $\quad a_{41} = a_{14} = -\lambda_2 = -1{,}003$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{22} = \kappa_2 + \kappa_3 = 4{,}965$ $\quad a_{32} = a_{23} = -\frac{1}{l_3} \cdot \eta_3 = -0{,}4958$

$a_{42} = a_{24} = -\kappa_2 = -1{,}990$

LF $\bar{v}_c = 1{,}0$:

$a_{33} = \frac{1}{l_1^2} \cdot \eta_1 - \frac{N_1}{l_1 \cdot C_d} + \frac{1}{l_3^2} \cdot \eta_3 - \frac{N_3}{l_3 \cdot C_d} = 0{,}1599$ $\quad a_{43} = a_{34} = 0$

LF $\bar{\vartheta}_A = 1{,}0$:

$a_{44} = \kappa_2 = 1{,}990$

LF q, H:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08354 \cdot q \cdot l^2 = -246{,}6\ kNm$ $\quad a_{10} = -a_{20} = M^0_{bc}$

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = -50{,}17\ kN$

$a_{40} = -M^0_{bc} = -246{,}6\ kNm$ $\quad M_A = M_{2,c} = -280{,}4\ kNm$ (ANNAHME)

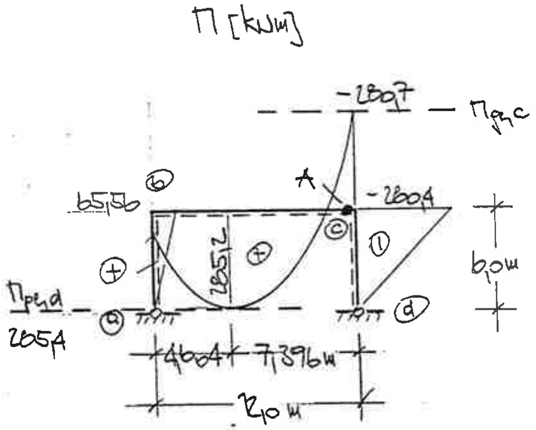
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\vartheta}_A$	LF
4,975	1,003	-0,4975	-1,003	246,6
1,003	4,965	-0,4958	-1,990	-246,6
-0,4975	-0,4958	0,1599	0	50,17
-1,003	-1,990	0	1,990	-33,80
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\vartheta}_A$	DET (A)
198,8	126,4	1324	209,6	> 0

$[A] \cdot \{x\} = -\{\delta\}$

$= -280{,}4 + 246{,}6$

STABENDMOMENTE :

		$q_L = 20{,}5$ kN/m	
(S)	i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
(1)	a	0	0
	b		65,37
(2)	b	-246,6	65,56
	c	-246,6	-280,4 ✓
(3)	c	0	-280,4
	d		0



(VERLAUF ZWISCHEN DEN STAB-ENDMOMENTEN N. TH. I. ORD.)

STABENDQUERKRÄFTE

		$q_L = 20{,}5$ kN/m
(S)	i-k	Q_{ik} kN
(1)	a	*
	b	10,24
(2)	b	95,39
	c	-151,0
(3)	c	44,75
	d	*

(* NICHT GERECHNET)

NORMALKRÄFTE

		$q_L = 20{,}5$ kN/m
(S)	i-k	N_{ik} kN
(1)	a-b	-94,17
(2)	b-c	-41,48
(3)	c-d	-151,8

(N < 0 DRUCK)

STABENDKRÄFTE :

		$q_L = 20{,}5$ kN/m	
(S)	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
(1)	a	0	7,677
	b		
(2)	b	123,0	94,17
	c	-123,0	-151,8
(3)	c	0	41,48
	d		

$\Sigma H = 0$ ✓, $\Sigma V = 0$ ✓

max FELDMOMENT STAB (2) b-c

	$q_L = 20{,}5$ kN/m
M_0	20110
M_1	40750
ν	0,04459
ξ_M	0,3837
x_M	4,604
max M	285,2

NACHWEISE :

- INTERAKTIONSBEZIEHUNG :

$\dfrac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$: $\quad \underline{Q_{Ael}} = Q_{ab} - N_3 \cdot \bar{s}_A / C_d = \underline{-152{,}3\ kN}$

$\dfrac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3637 > 0{,}33 \Rightarrow \underline{M_{RE}} = \underline{M_A = -280{,}7\ kNm}$ ($\hat{=} -280{,}4$ – ANNAHME)

$\underline{\max M_{FELD} = 205{,}2\ kNm} \;\hat{=}\; \underline{M_{pl,d} = 285{,}4\ kNm}$ $(Q = 0!)$ $\Rightarrow$

$\Rightarrow \underline{q_d = q_{TRAGLAST} = 20{,}5\ kN/m \rightarrow H_d = 49{,}20\ kN}$

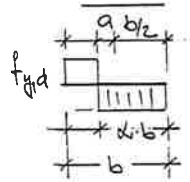
- NACHWEIS GRENZ (b/t)

(Lt DIN 18800 T.1, TAB 18 S. 29)

FÜR $M = 280{,}7\ kNm$ UND $N = 155{,}0\ kNm$

IPE 400 : (FÜR DAS GESAMTE SYSTEM)

STEG :

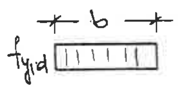


$t = 0{,}86\ cm$, $b = h - 2\cdot(t_F + r) = 33{,}10\ cm$

$b \cdot \alpha = b/2 + a \quad a = \dfrac{N}{2 \cdot f_{yd} \cdot t} \hat{=} 3{,}75\ cm \rightarrow \underline{\alpha = 0{,}61}$

$\text{VORH.}\,(b/t) = \underline{38{,}49 < \text{GRENZ}(b/t)} = \dfrac{32}{\alpha} \cdot \sqrt{\dfrac{240}{f_{y,k}}} = \underline{52{,}46}$ ✓

FLANSCH :



$t = 1{,}35$, $b = (\bar{b} - t_s - 2\cdot r)\cdot\frac{1}{2} = 6{,}47\ cm$

$\text{VORH}\,(b/t) = \underline{4{,}793} < \text{GRENZ}(b/t) = \dfrac{9}{\alpha} \cdot \sqrt{\dfrac{240}{f_{y,k}}} = \underline{9}$ ✓

NACHWEIS FÜR QS. MIT FG ERBRACHT, BZW. AUCH FÜR ALLE ÜBRIGEN QS. (IPE 400), DA GRENZ (b/t) FÜR QS. OHNE FG GÜNSTIGER.

- NACHWEIS VON α_{pe}

VORH. $\alpha_{pe} = 1{,}126 <$ GRENZ $\alpha_{pe} = 1{,}25$ ✓

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}3837$, $\xi' = 1 - \xi$

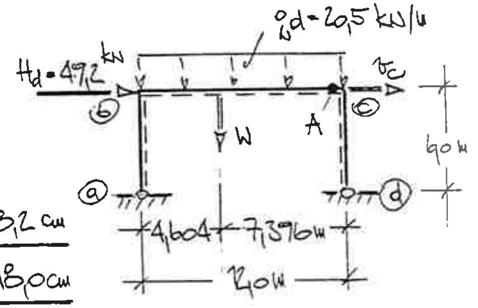
M_i : $\Delta W = 0{,}01382\ m$

M_k : $\Delta W = -0{,}05069\ m$

q : $\Delta W = 0{,}1191\ m$

$\underline{W} = 0{,}08223\ m \hat{=} \underline{8{,}2\ cm}$

$\underline{\delta_C} = \delta_C / C_d = 0{,}1799\ m \hat{=} \underline{18{,}0\ cm}$



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN :

RAHMENSTIEL ③ :

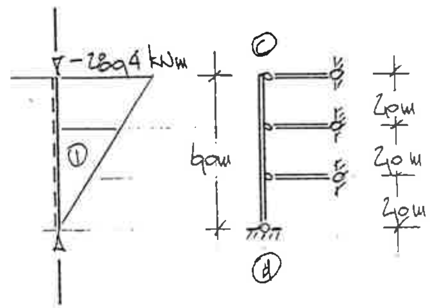
$N = 151{,}6\ kN$ (DRUCK)

$\boxed{s_K = l = 2{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)

$\underline{k_z = 0{,}8640}$, $\underline{k_M = 0{,}9875}$

(SIEHE TH. II. ORD. ELAST.-PLAST)

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

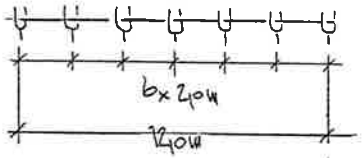


$\dfrac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \underline{0{,}0530 < 0{,}6}$: $\dfrac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \dfrac{280{,}4}{0{,}9875 \cdot 285{,}4} = \underline{0{,}9949 < 1{,}0}$ ✓

RIEGEL ②

$N = 41{,}48$ kN (DRUCK)

$\boxed{S_K = l = 2{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)



$k_z = 0{,}8640$

a) NACHWEIS FÜR $M_y = 285{,}2$ kNm

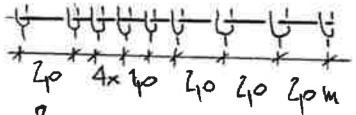
ANN.: $\psi = 1{,}0 \rightarrow \zeta = 1{,}0$

$z_p = -20{,}0$ cm , $c^2 = 415{,}4$ cm^2 $\quad N_{ki,z} = 6646$ kN

$M_{ki,y} = 868{,}8$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}6011 \quad k_N = 0{,}8 \rightarrow n = 2{,}0 \quad \underline{k_M = 0{,}9405}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = 0{,}02604 < 0{,}16:$$



$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{285{,}4}{0{,}9405 \cdot 265{,}4} = \underline{1{,}063 > 1{,}0!} \Rightarrow \text{ZUSÄTZL. KIPPH.}$$

$l = 1{,}0$ m (S. OBEN)

b) NACHWEIS FÜR $M_y = -280{,}4$ kNm

ANN.: $\psi = + \ - \quad \zeta = 1{,}77$

$z_p = \pm$, $c^2 = 415{,}4$

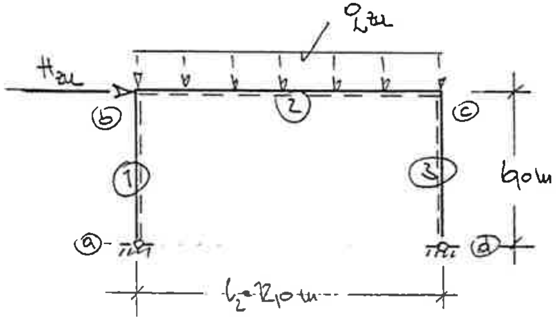
$M_{ki,y} = 2468$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}3566 \rightarrow \underline{k_M = 1{,}0}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = 0{,}02604 < 0{,}16:$$

$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{280{,}4}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = \underline{0{,}9825 < 1{,}0} \checkmark$$

A 3.6 GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT - GELENKIGE STIELLAGERUNG



IPE 400 St 37

$J = 23130$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$

ANNAHME: KEIN ANSATZ VON VORVERFORMUNGEN

TEILSICHERHEITSBEIWERTE: $\gamma_F = 1{,}0 \quad \psi = 1{,}0$ (ANNAHME)

$\gamma_M = 1{,}0$

q_{zul}, H_{zul}:

STÄNDIGE EINW. $\gamma_F = 1{,}35$

VERÄNDERL. –"– $\gamma_F = 1{,}50 \quad \psi = 0{,}9 \ - \ \gamma_F \cdot \psi = 1{,}35$

$$\underline{q_d} = \gamma_F \cdot g + \gamma_F \cdot \psi \cdot p = \underline{1{,}35 \cdot q_{zul}}$$

n. TH. I. ORD.

q_d kN/m	–	14,6	17,5
q_{zul}	1,0	10,81	12,96
M_b	-1,80	-19,46	-23,33
M_c	-1,620	-17,51	-21,00
ξ_M	–	0,4000	0,4000
max M	–	165,1	126,0
$\bar{\tau}_c$	28,78	311,1	373,0

$C = 8096$ kNm

	Δw [m]	
q_{zul}	10,81	12,96
M_b:	-0,003692	-0,004427
M_c:	-0,02907	-0,03486
q:	0,05722	0,06861
w =	0,02446	0,02932
τ_c =	0,03843	0,04607

n. TH. II ORD. – α-VERFAHREN

	α = 1,065		α = 1,078	
q_d [kN/m]	–	14,2	–	16,8
q_{zul}	1,0	10,52	1,0	12,44
Π_b	-1,332	-14,01	-1,238	-15,40
Π_c	-16,67	-175,4	-16,76	-208,5
ξ_Π	–	0,3935	–	0,3922
max Π	–	103,3	–	122,4
$\bar{\tau}_c$	30,65	322,4	31,02	385,9

	ΔW [m]	
q_{zul}	10,52	12,44
Π_b:	-0,002654	-0,002916
Π_c:	-0,02882	-0,03419
q_L:	0,05532	0,06532
W =	0,02385	0,02821
τ_c =	0,03982	0,04767

C = 8096 kNm

n. TH. II. ORDNUNG (EXAKT)

$\varepsilon = \ell \cdot \sqrt{\frac{N}{EJ}}$

q_d = 14,3 kN/m → q_{zul} = 10,59 kN/m									
(S)	N_s	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_8	γ_s	λ_s	η_s
①	55	1,0	0,2019	–	–	2,992	2,992	∞	2,992
②	30	0,5	0,2982	3,988	2,003	–	1,994	1,002	–
③	80	1,0	0,2435	–	–	2,988	2,988	∞	2,988

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
4,986	1,002	-0,4987	127,3
1,002	4,982	-0,4980	-127,3
-0,4987	-0,4980	0,1633	25,42

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$
58,33	-5,635	316,6

$[A] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

$C = \frac{EJ}{\ell_1} = 8096$ kNm

q_d = 16,9 kN/m → q_{zul} = 12,52 kN/m									
(S)	N_s	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_8	γ_s	λ_s	η_s
①	65	1,0	0,2195	–	–	2,990	2,990	∞	2,990
②	35	0,5	0,3221	3,986	2,004	–	1,993	1,002	–
③	95	1,0	0,2653	–	–	2,986	2,986	∞	2,986

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
4,983	1,002	-0,4983	150,5
1,002	4,979	-0,4977	-150,5
-0,4983	-0,4977	0,1627	30,05

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$
69,18	-6,493	376,7

$[A] \cdot \{x\} = -\{B\}$

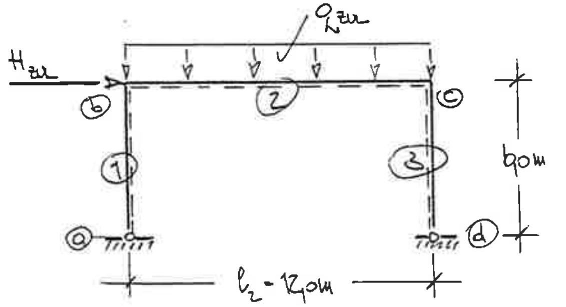
q_d = 20,5 kN/m → q_{zul} = 15,19 kN/m									
(S)	N_s	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_8	γ_s	λ_s	η_s
①	75	1,0	0,2358	–	–	2,989	2,989	∞	2,989
②	45	0,5	0,3652	3,982	2,005	–	1,991	1,003	–
③	110	1,0	0,2855	–	–	2,984	2,984	∞	2,984

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
4,980	1,003	-0,4982	182,7
1,003	4,975	-0,4973	-182,7
-0,4982	-0,4973	0,1621	36,46

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$
84,29	-7,699	460,4

$[A] \cdot \{x\} = -\{B\}$

A3.11 BERECHNUNG NACH Ö-NORM B 4600 – (GELENKIGE STELL.)



$$\boxed{\frac{q_{zul} \cdot l_2}{H_{zul}} = 5}$$

IPE 400
St 360 EF
$J = 23130 \text{ cm}^4$
$E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$

$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$

$\underline{q_{zul} = 11,79 \text{ kN/m}} \rightarrow H_{zul} = \underline{28,30 \text{ kN}}$

$$\max M = M_{cd} = q \cdot [-9,0 - 3,6 \cdot (2,0)] = -191,0 \text{ kNm}$$
$$M_{bc} = q \cdot [-9,0 + 3,6 \cdot (2,0)] = -21,22 \text{ kNm}$$
$$\max Q = Q_{db} = q \cdot [-6,0 - 0,6 (2,0)] = -84,89 \text{ kN}$$
$$N_{cd} = \qquad = -84,89 \text{ kN}$$
$$N_{bc} = q \cdot [-1,50 - 0,60 \cdot (2,0)] = -31,83 \text{ kN}$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB ②

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0,4000 \qquad x_M = 4,800 \text{ m}$$
$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \xi^2 \cdot q \cdot l^2 = \underline{114,6 \text{ kNm}}$$

NACHWEISE :

ALLGEM. SPANNUNGSNACHWEIS :

$$\max \sigma: \quad \frac{N}{A} + \frac{M}{1,07 \cdot W} = \frac{84,89}{84,5} + \frac{19100}{1,07 \cdot 1160} = \underline{16,39 \text{ kN/cm}^2 < \sigma_{zul} = 16,5 \text{ kN/cm}^2} ✓$$

$$\max \tau: \quad \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \frac{84,89 \cdot 654}{23130 \cdot 0,86} = \underline{2,791 \text{ kN/cm}^2 < \tau_{zul} = 10,0 \text{ kN/cm}^2} ✓$$

q_{zul} [kN/m]	16,59	12,52	15,19
M_b	-16,65	-19,13	-22,59
M_c	-174,5	-206,9	-251,9
M_0	17150	17380	16400
M_1	34490	34990	33060
v	0,03081	0,03347	0,03617
ξ_M	0,3967	0,3961	0,3955
$\max M_F$	163,2	124,8	152,0

	ΔW [m]		
q_{zul} [kN/m]	16,59	12,52	15,19
M_b :	-0,003184	-0,003663	-0,004337
M_c :	-0,02910	-0,03453	-0,04213
q :	0,05637	0,06671	0,08112
W =	0,02409	0,02852	0,03465
τ_c =	0,03911	0,04653	0,05687

$\underline{M_{el}} = f_{y,d} \cdot W_{el} = 24,0 / 1,0 \cdot 1160 = \underline{278,4 \text{ kNm}} \rightarrow$

$\rightarrow$ REIN ELAST. VERHALTEN DER SYSTEME

VERGLEICHSSPANNUNG:

$\sigma = 17{,}47\ kN/cm^2 \quad \tau = \frac{31{,}83 \cdot 409{,}6}{23130 \cdot 0{,}86} = 0{,}7514\ kN/cm^2$

$\sigma_v = 17{,}52\ kN/cm^2 < \beta_p = 19{,}0\ kN/cm^2$ ✓

KNICKNACHWEIS:

(VERSCHIEBL. SYSTEM; DOPPELTSYM. QS)

STIEL ③:

KN – IN DER MOMENTENEBENE

$\beta_3 = 2{,}683$ (SIEHE VORHER) $s_k = 2{,}683 \cdot 600 = 1610\ cm$, $i_y = 16{,}5\ cm$

$\lambda_y = 97{,}6 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 9{,}84\ kN/cm^2$

$\frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{k_{zul}}} \cdot \frac{N}{A} + 0{,}9 \cdot \frac{M}{W} = \frac{16{,}5}{9{,}84} \cdot \frac{84{,}89}{84{,}5} + 0{,}9 \cdot \frac{19100}{1160} = 16{,}50\ kN/cm^2$

$\sigma_{vorh} = 16{,}5\ kN/cm^2 = \sigma_{zul}$ ✓

KN – ⊥ ZUR MOMENTENEBENE:

$s_k = 3{,}0\ m$ (SIEHE BDKN) $i_z = 3{,}95\ cm$

$\lambda_z = 75{,}95 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 12{,}1\ kN/cm^2$

$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{84{,}89}{84{,}5} = 1{,}005\ kN/cm^2 < \sigma_{k_{zul}} = 12{,}1\ kN/cm^2$ ✓

RIEGEL ②:

KN – IN DER MOMENTENEBENE:

β_2 AUS $N_{Ki_{SYSTEM}} \rightarrow \lambda_{yR} = \lambda_{yS}$ UND MIT $N_{RIEGEL} < N_{STIEL}$

NACHWEIS ERBRACHT (SIEHE STIEL)

KN – ⊥ ZUR MOMENTENEBENE

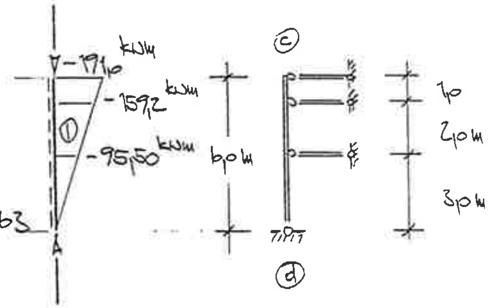
$s_k = 3{,}0\ m \quad i_z = 3{,}95\ cm \quad \lambda_z = 75{,}95 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 12{,}1\ kN/cm^2$

$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{31{,}83}{84{,}5} = 0{,}3767\ kN/cm^2 < \sigma_{k_{zul}}$ ✓

BIEGEDRILLKNICKEN

$b < h \rightarrow$ VEREINFACHTER NACHWEIS DURCH KNICKNACHWEIS DES GURTES $\quad i_z = 5{,}196\ cm$

STIEL ③:



$N = 84{,}89\ kN$ (DRUCK)

a) FÜR $M_y = -191{,}0\ kNm$

$l = 1{,}0\ m \quad M/M_1 = 0{,}844 \rightarrow \beta = 0{,}963$

$\lambda_z = 18{,}53 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 16{,}5\ kN/cm^2$

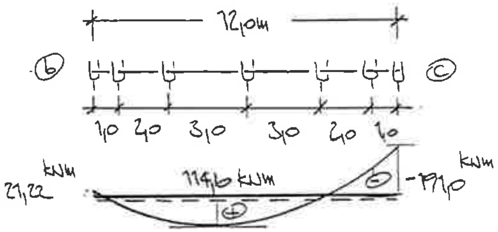
$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{84{,}89}{84{,}5} + \frac{19100}{1{,}07 \cdot 1160} = 16{,}39\ kN/cm^2 < \sigma_{k_{zul}} = 16{,}5\ kN/cm^2$ ✓

b) FÜR $M_y = -157{,}2\ kNm$

$l = 2{,}0\ m \doteq s_k \quad \lambda_z = 38{,}5 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 14{,}85\ kN/cm^2$

$\sigma_{k_{vorh}} = \frac{84{,}89}{84{,}5} + \frac{15920}{1{,}07 \cdot 1160} = 13{,}83\ kN/cm^2 < \sigma_{k_{zul}}$ ✓

RIEGEL ②:



$N = 31{,}83\ kN$ (DRUCK)

a) FÜR $M_y = -191{,}0\ kNm$

$l = 1{,}0\ m \quad M/M_1 \doteq 0{,}8 \quad \beta = 0{,}952$

$\lambda_z = 18{,}32 \rightarrow \sigma_{k_{zul}} = 16{,}5\ kN/cm^2$

$$\sigma_{k\,vorh} = \frac{31{,}83}{84{,}5} + \frac{19100}{1{,}07 \cdot 1160} = \underline{15{,}77\ kN/cm^2 < \sigma_{k\,zul} = 16{,}5} \checkmark$$

b) für $\underline{M_y = 114{,}6\ kNm}$

$l = 3{,}0\,m\ :\ \lambda_k \rightarrow \lambda_z = 57{,}74 \rightarrow \underline{\sigma_{k\,zul} = 13{,}62\ kN/cm^2}$

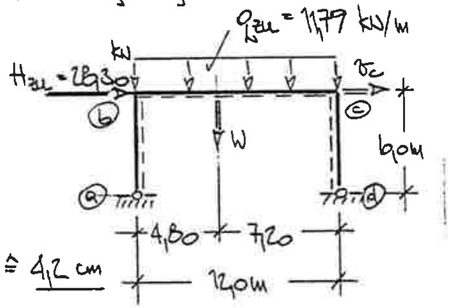
$$\sigma_{k\,vorh} = \frac{31{,}83}{84{,}5} + \frac{11460}{1{,}07 \cdot 1160} = \underline{9{,}61\ kN/cm^2 < \sigma_{k\,zul} = 13{,}62\ kN/cm^2} \checkmark$$

NACHWEIS GRENZ (b/t):

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4000 \quad \xi' = 1 - \xi$



M_1: $\Delta W = -0{,}004026$ m

M_k: $\Delta W = -0{,}03171$ m

q: $\Delta W = 0{,}06241$ m

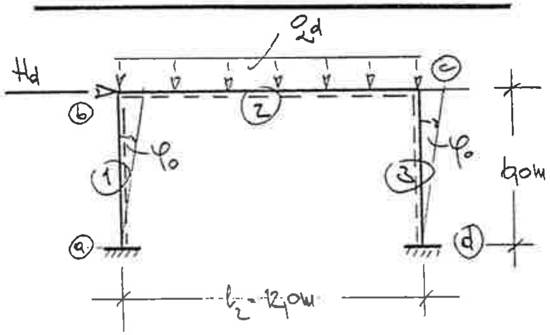
$W = 0{,}02667$ m $\hat{=}$ $\underline{2{,}7\ cm}$

$\underline{v_c} = \bar{v}_c / C = \frac{1}{C} \cdot [14{,}39 \cdot (2{,}0)] \cdot q = 0{,}04171\,m \ \hat{=}\ \underline{4{,}2\ cm}$

$$C = \frac{EJ}{l_1} = 8096\ kNm$$

A 4. $\boxed{\text{BEISPIEL } 4}$

A 4.1 ELASTIZITÄTSTHEORIE I. ORD.



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400 St 37

$J = 23\,130\ cm^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$\gamma_M = 1{,}1$

ZULÄSSIG FÜR: $\boxed{\frac{N_{Ki,d}}{N_d} \geq 10}$

$\underline{N_{Ki,d}} = \frac{\pi^2 \cdot (EJ)_d}{\beta_1^2 \cdot l_1} = \underline{7275\ kN}$ $\qquad \underline{\beta_1 = 1{,}29}$ (SIEHE VORHER)

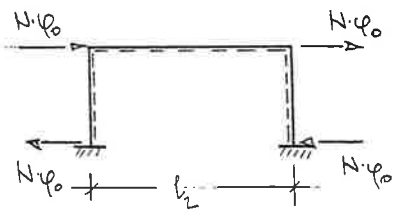
$\underline{N_d} = q_d \cdot [6{,}0 + 2 \cdot 0{,}225] = \underline{q_d \cdot 6{,}45}$ $\qquad \frac{7275}{q_d \cdot 6{,}45} \geq 10$

$\Rightarrow \boxed{q_d \leq 112{,}8\ kN/m}$ ZULÄSSIG

VORVERDREHUNG φ_0:

$\varphi_0 = 0{,}001948$ (SIEHE VORHER)

SCHNITTGR. INF. LF φ_0:



ENTSPRICHT LF H:

MIT: $H = (q_d \cdot l_2) \cdot \varphi_0 = q_d \cdot (l_2 \cdot \varphi_0)$

MIT: $N_{bc} = 0$

$A_{aH} = A_{dH} = 0$

FLIESSGELENKTH. I. ORD. ZULÄSSIG?

$$\boxed{\frac{\alpha}{1+\frac{J_s \cdot l_K}{J_K \cdot l_s}} \cdot \frac{(EJ)_d}{N \cdot l_s^2} \geq 10}$$

$\alpha = 6$ ... EINGESP. STIELE

N ... Σ DER VERT. LASTEN

$$\frac{6}{1+\frac{12}{6}} \cdot \frac{21 \cdot 23130}{N \cdot 6_{,0}^2 \cdot 1{,}1} \geq 10 \Rightarrow N \leq 245{,}3\,kN \quad \text{MIT} \quad N = l_2 \cdot q_2$$

ZULÄSSIG FÜR $\boxed{q_d \leq 20{,}44\,kN/m}$

A4.2 ELASTIZITÄTSTH. I. ORD. – (ELAST.-ELAST)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\quad q_d = 19{,}1\,kN/m \rightarrow H_d = 45{,}84\,kN$

$$\max M = M_c = q_2 \cdot [-9{,}60 - 1{,}350 \cdot (2{,}0 + 0{,}01948)] = -235{,}4\,kNm$$

(LF q_2 — LF H — LF φ_0)

$$M_b = q_2 \cdot [-9{,}60 + 1{,}350 \cdot (2{,}0 + 0{,}01948)] = -131{,}3\,kNm$$

$$\max Q = Q_{cb} = q_2 \cdot [-6{,}0 - 0{,}225 \cdot (2{,}0 + 0{,}01948)] = -123{,}3\,kN$$

$$\max N = N_{bc} = -123{,}3\,kN$$

NACHWEISE:

$\max \sigma$: $\quad \sigma = \frac{23540}{1160} + \frac{123{,}3}{84{,}5} = \underline{21{,}75\,kN/cm^2 < \sigma_{Rd} = 21{,}82\,kN/cm^2}$ ✓

$\max \tau$: $\quad \tau = \frac{123{,}3 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = \underline{4{,}054\,kN/cm^2 < \tau_{Rd} = 12{,}60\,kN/cm^2}$ ✓

$\sigma_V \leq \sigma_{Rd}$: GILT ALS ERFÜLLT, WENN $\sigma/\sigma_{Rd} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{Rd} < 0{,}5$ ✓

GRENZ (b/t) ERFÜLLT:

SIEHE FG.TH. I. ORD.

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ — STAB ②

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_2 \cdot l^2} = 0{,}4622 \quad (x_M = 5{,}546\,m)$$

$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2}\xi^2 \cdot q_2 \cdot l^2 = \underline{162{,}5\,kNm}$$

VERFORMUNGEN

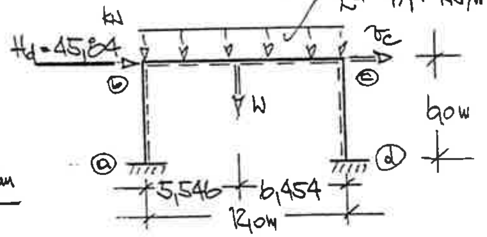
M_i: $\Delta w = -0{,}02728$ m

M_k: $\Delta w = -0{,}04650$ m

q: $\Delta w = 0{,}11600$ m

$\underline{w} = 0{,}04222$ m $\hat{=}$ $\underline{4{,}2 \text{ cm}}$

$\xi = 0{,}4622$, $\xi' = 1-\xi$



$\underline{v_c} = \bar{F}_c / C_d = \frac{1}{C_d} [3150 \cdot (2{,}0 + 0{,}01748)] \cdot q = 0{,}01651 \text{ m} \hat{=} \underline{1{,}7 \text{ cm}}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN:

SIEHE TH. II. ORD. (ELAST.-ELAST.)

A4.3 ELAST. TH. I. ORD – (ELAST.-PLAST)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$ $\underline{q_d = 22{,}8 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 54{,}72 \text{ kN}}$

$\max M = M_{cb} = -281{,}0$ kNm

$M_{bc} = -156{,}7$ kNm

$\max Q = Q_{cb} = -147{,}2$ kN

$\max N = N_{bc} = -147{,}2$ kN

FORMEL SIEHE VOR

$M_c^P = M_c^E \cdot q^P / q^E$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB 2

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0{,}4622$ $(x_M = 5{,}546 \text{ m})$

$\underline{\max M_F = 194{,}0 \text{ kNm}}$

NACHWEIS DER INTERAKTION:

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$: $\frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3515 > 0{,}33 \rightarrow \underline{M_{pl,c} = 282{,}1 \text{ kNm}}$

$\underline{M_{cb} = -281{,}0 \text{ kNm} < M_{pl,c} = -282{,}1 \text{ kNm}}$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t) SIEHE EG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN:

M_i: $\Delta w = -0{,}03250$ m

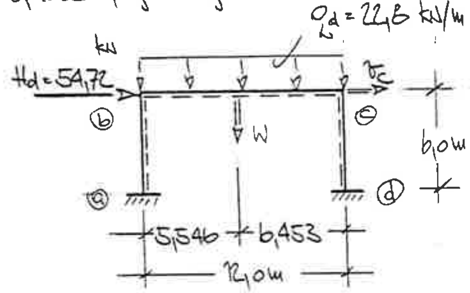
M_k: $\Delta w = -0{,}05551$ m

q: $\Delta w = 0{,}1385$ m

$\underline{w} = 0{,}05043$ m $\hat{=}$ $\underline{5{,}0 \text{ cm}}$

$\underline{v_c} = 0{,}01971$ m $\hat{=}$ $\underline{2{,}0 \text{ cm}}$

$\xi = 0{,}4622$, $\xi' = 1-\xi$



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE E-TH. II ORD. (ELAST.-PLAST.)

A 4.4 α – VERFAHREN (NÄHERUNG FÜR E.TH. II. ORD.) – (ELAST. – ELAST.)

ZULÄSSIG FÜR : $\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N_d} \geq 4$ $\qquad \alpha = \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{Ki,d}}}$

VORVERDREHUNG φ_0 :

$\varphi_0 = 0{,}002598$ (VERF. E.E.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$

$q_d = 19{,}0\ kN/m \rightarrow H_d = 45{,}60\ kN$

$$\eta_{Ki,d} = \frac{N_{Ki,d}}{N_d} = \frac{7275}{q_d \cdot 6{,}45} = 59{,}36 > 4 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 1{,}017$$

$$\max M = M_{ab} = q_d \cdot [-9{,}60 - \alpha \cdot 1{,}350 \cdot (2{,}0 + 0{,}02598)] = -235{,}2\ kNm$$

$$M_{bc} = q_d \cdot [-9{,}60 + \alpha \cdot 1{,}350 \cdot (2{,}0 + 0{,}02598)] = -130{,}0\ kNm$$

$$\max Q = Q_{ab} = q_d \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}2250 \cdot (2{,}0 + 0{,}02598)] = -122{,}8\ kN$$

$$\max N = N_{bc} = \qquad = -122{,}8\ kN$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB 2

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot l^2} = 0{,}4616 \qquad (x_M = 5{,}539\ m)$$

$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi^2 \cdot q_d \cdot l^2 = 161{,}5\ kNm$$

NACHWEISE :

$\max \sigma$: $\sigma = \frac{23520}{1160} + \frac{122{,}8}{85{,}4} = 21{,}71\ kN/cm^2 < \sigma_{R,d} = 21{,}82\ kN/cm^2$ ✓

$\max \tau$: $\tau = \frac{122{,}8 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = 4{,}037\ kN/cm^2 < \tau_{R,d} = 12{,}60\ kN/cm^2$ ✓

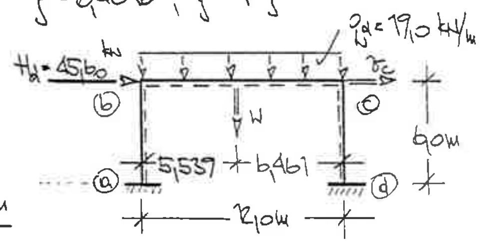
$\sigma_V \leq \sigma_{R,d}$: ERFÜLLT, FÜR $\sigma/\sigma_{R,d} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{R,d} < 0{,}5$ ✓

GRENZ (b/t) ERFÜLLT :

SIEHE E.TH. II. ORD. (ELAST. – ELAST.)

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4616$, $\xi' = 1 - \xi$



M_i :	$\Delta W = -0{,}02701$	m
M_k :	$\Delta W = -0{,}04644$	m
$-q$:	$\Delta W = 0{,}1154$	m
	$W = 0{,}04195\ m \triangleq 4{,}2\ cm$	

$$\delta_c = \delta_c / C_d = \frac{1}{C_d} \cdot [\alpha \cdot 3{,}150 \cdot (2{,}0 + 0{,}02598)] \cdot q_d = 0{,}01676 \triangleq 1{,}7\ cm$$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE E.TH. II. ORD. – (ELAST. ELAST.)

A4.5 α – VERFAHREN (NÄHERUNG F. E. TH. II. ORD) – (ELAST. PLAST.)

1. ANNAHME $\quad \underline{q_d = 22{,}7\ kN/m \rightarrow H_d = 54{,}48\ kN}$

$$\eta_{ki,d} = \frac{N_{ki,d}}{N_d} = \frac{7275}{q_d \cdot 6{,}45} = 49{,}69 > 4 \quad \rightarrow \quad \underline{\alpha = 1{,}021}$$

VORVERDREHUNG φ_0:

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VERF. ELAST. PLAST.)

$$\max M = M_{cb} = q_d \cdot [-9{,}60 - \alpha \cdot 1{,}350 \cdot (2{,}0 + 0{,}03896)] = -281{,}7\ kNm$$
$$M_{bc} = q_d \cdot [-9{,}60 + \alpha \cdot 1{,}350 \cdot (2{,}0 + 0{,}03896)] = -154{,}1\ kNm$$
$$\max Q = Q_{cb} = q_d \cdot [-6{,}0 - \alpha \cdot 0{,}2250 \cdot (2{,}0 + 0{,}03896)] = -146{,}8\ kN$$
$$\max N = N_{bc} = -146{,}8\ kN$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB 2

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q_d \cdot \ell^2} = 0{,}4610 \qquad (x_M = 5{,}532\ m)$$

$$\underline{\max M_F} = M_{ik} + \frac{1}{2} \cdot \xi^2 \cdot q_d \cdot \ell^2 = \underline{193{,}2\ kNm}$$

NACHWEISE

INTERAKTIONSBEZIEHUNG:

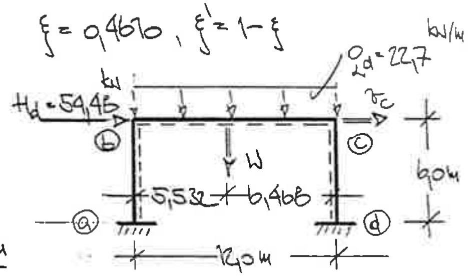
$$\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}10: \quad \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3505 \rightarrow M_{pl,c} = -282{,}3\ kNm$$

$$\underline{M_{cb} = -281{,}7\ kNm < M_{pl,c} = -282{,}3\ kNm} \ \checkmark$$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT – SIEHE FG. TH. II. ORD

VERFORMUNGEN:



M_i:	$\Delta W = -0{,}03203\ m$	
M_k:	$\Delta W = -0{,}05558\ m$	
q_d:	$\Delta W = 0{,}1378\ m$	
	$\underline{W} = 0{,}05019\ m \mathrel{\hat=} \underline{5{,}0\ cm}$	

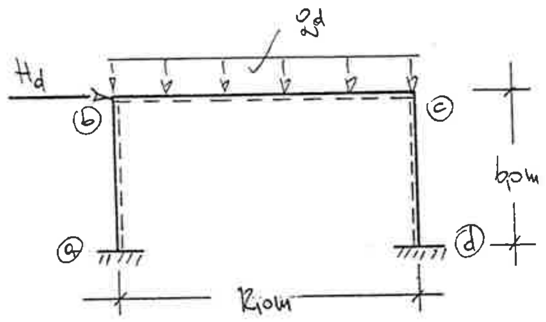
$$\underline{w_c} = \bar{w}_c / c_d = 1/c_d \cdot [\alpha \cdot 3{,}150 \cdot (2{,}0 + 0{,}03896)] \cdot q_d = 0{,}02023\ m \mathrel{\hat=} \underline{2{,}0\ cm}$$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE E. TH. II. ORD. – (ELAST.-PLAST.)

4.6 ERSATZSTABVERFAHREN (NÄHERUNG F. TH. II. ORD.) - ELAST. PLAST.

(NACH EUROCODE 3 – APRIL 1990)



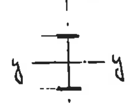
$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_r}{H_d} = 5}$$

IPE 400 St 37

$J = 23\,130\ cm^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$\gamma_M = 1{,}1$



$N_{ki,y} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_y}{A_1^2 \cdot l_1^2} = 8002\ kN$ $\qquad \underline{A_1 = 1{,}29}$ (SIEHE VOR)

$N_{ki,z_s} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l_k^2} = 6840\ kN$ $\qquad \underline{l_k = 2{,}0\ m}$ STIEL

$N_{ki,z_r} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l_k^2} = 3040\ kN$ $\qquad \underline{l_k = 3{,}0\ m}$ RIEGEL

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{ki}}}$ $\quad \bar{\lambda}_y = 0{,}5034$ $\quad$ KN.SP.LINIE ⓐ $- \alpha = 0{,}21$ $\quad \kappa_y = \underline{0{,}9232}$

$\bar{\lambda}_{z_s} = 0{,}5445$ $\qquad\qquad\qquad\qquad \kappa_{z_s} = \underline{0{,}8640}$

$\bar{\lambda}_{z_r} = 0{,}6168$ $\qquad$ ⓑ $- \alpha = 0{,}34$ $\qquad \kappa_{z_r} = \underline{0{,}7140}$

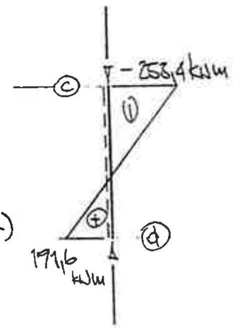
$\boxed{\text{1. ANNAHME:}}$ $\qquad \underline{q_d = 20{,}6\ kN/m \rightarrow H_d = 49{,}44\ kN}$

STAB ③ :

$M_{cd} = q_d \cdot [-9{,}60 - 1{,}350 \cdot 2{,}0] = -253{,}4\ kNm$

$M_{dc} = q_d \cdot [\ 4{,}80 + 2{,}250 \cdot 2{,}0] = 191{,}6\ kNm$

$N_{cd} = q_d \cdot [-6{,}0 - 0{,}2250 \cdot 2{,}0] = -132{,}9\ kN$ (DRUCK)



NACHWEIS:

$\psi = -0{,}7561 \qquad \beta_{M\psi} = 2{,}329 = \beta_{M,y}$

$\mu_y = \bar{\lambda}_y \cdot (2 \cdot \beta_{My} - 4) + \frac{W_{pl} - W_y}{W_y} = 0{,}5034 \cdot (2 \cdot 2{,}329 - 4) + \frac{1308 - 1160}{1160}$

$\underline{\mu_y = 0{,}4588}$

$\underline{k_y} = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_d}{\kappa_y \cdot \gamma_M \cdot N_{pl,d}} = 1 - \frac{0{,}4588 \cdot 132{,}9}{0{,}9232 \cdot 1{,}1 \cdot 1844} = \underline{0{,}9674}$

BIEGEKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N_d}{\kappa_{min} \cdot N_{pl,d}} + \frac{k_y \cdot M_{y,d}}{M_{pl,y,d}} = \frac{132{,}9}{0{,}8640 \cdot 1844} + \frac{0{,}9674 \cdot 253{,}4}{285{,}4} = \underline{0{,}9423 < 1} \checkmark$$

STAB ②

(VERGRÖSSERUNG DER " SWAY MOMENTS " IM RIEGEL UM $\boxed{1{,}2}$)

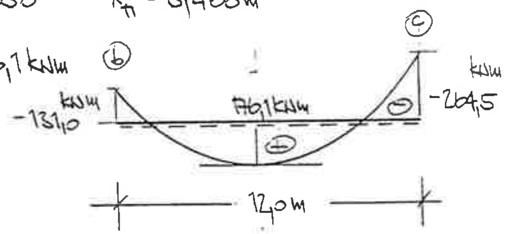
$M_{bc} = q_d \cdot [-9{,}60 + 1{,}2 \cdot 1{,}350 \cdot 2{,}0] = -131{,}0\ kNm$

$M_{cb} = q_d \cdot [-9{,}60 - 1{,}2 \cdot 1{,}350 \cdot 2{,}0] = -264{,}5\ kNm$

$N_{bc} = q_d \cdot [-2{,}40 - 0{,}60 \cdot 2{,}0] = -74{,}16\ kN$ (DRUCK)

$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{bc} - M_{ki}}{q_d \cdot l^2} = 0{,}4550 \qquad x_M = 5{,}460\ m$

$\max M_F = M_{ik} - \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot \xi^2 \cdot l_r^2 = 176{,}1\ kNm$



$\psi = 0{,}50\ ,\ \beta_{M\psi} = 1{,}450\ ,\ \beta_{MQ} = 1{,}3\ ,\ M_Q = 370{,}8\ kNm\ ,\ \Delta M = 440{,}6\ kNm$

$\beta_{M,y} = 1{,}323\ ,\ \mu_y = -0{,}5540\ ,\ \underline{k_y = 1{,}022}$

NACHWEIS:

$$\frac{74{,}16}{0{,}8640 \cdot 1844} + \frac{1{,}022 \cdot 264{,}5}{285{,}4} = \underline{0{,}9937 < 1} \checkmark$$

NACHWEIS GRENZ (b/t) ERFÜLLT

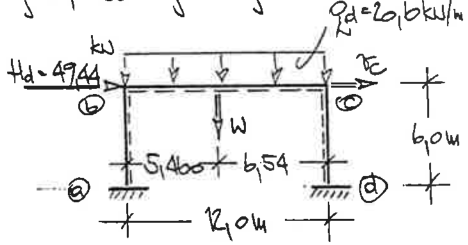
SIEHE EL. TH. II. ORD.

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

SIEHE E. TH. II. ORD. (ELAST. - PLAST.)

VERFORMUNGEN :

$\xi = 0{,}4550 \quad \xi' = 1 - \xi$



η_i : $\Delta w = -0{,}02725$ m

η_k : $\Delta w = -0{,}05187$ m

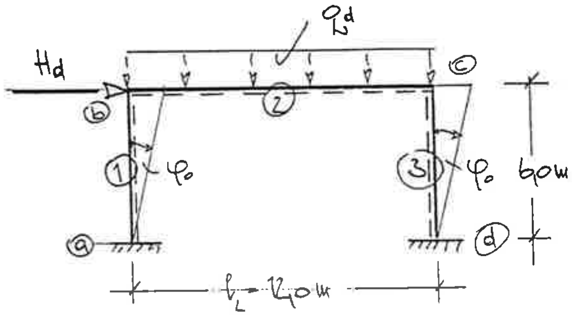
φ_k : $\Delta w = 0{,}1247$ m

$\underline{w} = 0{,}04555 \text{ m} \triangleq \underline{4{,}6 \text{ cm}}$

$\underline{v_c} = \bar{v}_c / C_d = \frac{1}{C_d} \cdot [3{,}150 \cdot (2{,}0 + 0{,}03896)] \cdot \varphi_k = 0{,}01798 \text{ m} \triangleq \underline{1{,}8 \text{ cm}}$

ANSATZ VON $\varphi_0 = 0{,}03896$ (VORVERDREHUNG)

A4.7 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD - (ELAST. ELAST)



$\boxed{-\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 5}$

IPE 400

$J = 23\,130 \text{ cm}^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}002598$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$q_d = 19{,}0 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 45{,}6 \text{ kN}$

S	N_s kN	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
1	116	1,0	0,2995	3,988	2,003	5,991	3,998	2,003	5,991
2	70	0,5	0,4776	3,967	2,008	–	1,985	1,004	–
3	125	1,0	0,3192	3,986	2,003	5,990	3,986	2,003	5,990

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$[A] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	LF
5,983	1,004	-0,9985	22,89
1,004	5,971	-0,9983	-22,89
-0,9985	-0,9983	0,6603	46,21
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	DET (A)
63,58	-28,44	123,1	> 0

$\varepsilon_s = \ell_s \cdot \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$

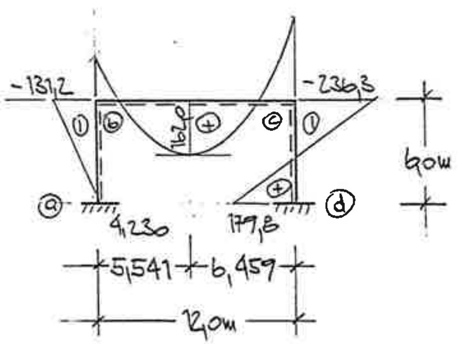
$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7360$ kNm

STABENDMOMENTE

		q_d = 19,0 kN/m	
S	i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
①	a	0	4,230
	b		-131,1
②	b	-228,9	-131,2
	c	-228,9	-236,3
③	c	0	-236,2
	d		179,8

M [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN STAB-ENDMOMENTEN N. TH. I. ORD.)

STABENDQUERKRÄFTE

		q_d = 19,0 kN/m
S	i-k	Q_{ik} kN
①	a	-22,86
	b	-21,91
②	b	105,8
	c	-123,1
③	c	68,50
	d	68,98

NORMALKRÄFTE

		q_d = 19,0 kN/m
S	i-k	N_{ik} kN
①	a-b	-105,2
②	b-c	-68,66
③	c-d	-122,8

($N < 0$ DRUCK)

STABENDKRÄFTE

		q_d = 19,0 kN/m	
S	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
①	a	0	-23,15
	b		
②	b	114,0	105,2
	c	-114,0	-122,8
③	c	0	68,66
	d		

$\Sigma H = 0$ ✓ , $\Sigma V = 0$ ✓

max FELDMOMENT M_F STAB ②

	q_d = 19,0 kN/m
M_0	11980
M_1	24280
v	0,01829
ξ_M	0,4617
x_M	5,541
max M	162,0

NACHWEISE :

max σ : KNOTEN c

$$\sigma = \frac{23630}{1160} + \frac{122{,}8}{84{,}5} = 21{,}82\ kN/cm^2 = \sigma_{R,d} = 21{,}82\ kN/cm^2 \checkmark$$

max τ : KNOTEN c

$$\tau = \frac{1231 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = 4{,}047\ kN/cm^2 < \tau_{Rd} = 12{,}60\ kN/cm^2 \checkmark$$

$\sigma_V \leq \sigma_{Rd}$ ERFÜLLT FÜR $\sigma/\sigma_{Rd} < 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{Rd} < 0{,}5$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t)

SIEHE FG. TH. II. ORD.

VERFORMUNGEN.

$\xi = 0{,}4617$, $\xi' = 1 - \xi$

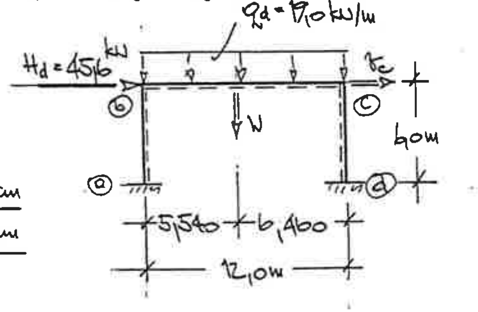
M_i : $\Delta W = -0{,}02792$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}04782$ m

$\underset{\sim}{0}$: $\Delta W = 0{,}1181$ m

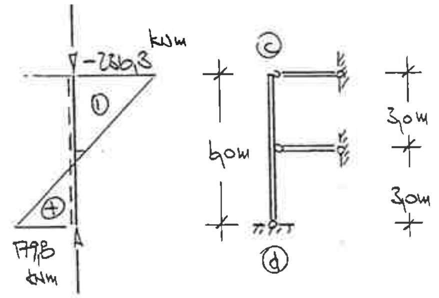
$\underline{W} = 0{,}04236$ m $\hat{=}$ 4,2 cm

$\underline{\tilde{v}_c} = \tilde{v}_c / C_d = 0{,}01673$ m $\hat{=}$ 1,7 cm



NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN!

RAHMENSTIEL (3)



$N = 122{,}8$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_K = l = 3{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)

$$N_{Ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_z}{l^2} = 3040\ kN$$

$$c^2 = \frac{J_{\omega} + 0{,}039 \cdot l^2 \cdot J_T}{J_z} = 470{,}7\ cm^2$$

$\psi = 0{,}12 \rightarrow \zeta = 1{,}678$ $\quad z_p = +$

$$M_{Ki,y} = \zeta \cdot N_{Ki,z} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0{,}25 \cdot z_p^2} + 0{,}5 \cdot z_p\right)$$

$M_{Ki,y} = 1107$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{Ki,y}}} = 0{,}5325$ $\quad n = 2{,}5$ $\quad \underline{k_M = 0{,}9834}$

$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{Ki,z}}} = 0{,}8168$ KNICKSP.LINIE b $\rightarrow \alpha = 0{,}34$ $\quad \underline{k_z = 0{,}7140}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

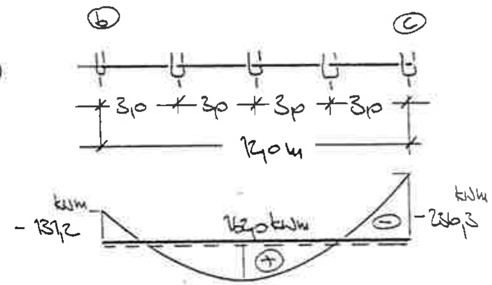
$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} \cdot k_y = \frac{122{,}8}{0{,}7140 \cdot 1844} + \frac{236{,}3}{0{,}9834 \cdot 285{,}4} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}9352 < 1} \checkmark$$

RIEGEL (2):

$N = 68{,}66$ kN

$\boxed{s_K = l = 3{,}0\ m}$ (GABELLAGERUNG)

$k_z = 0{,}7140$ (SIEHE VOR)



a) FÜR $M_y = 162{,}0$ kNm

$z_p = -20$ cm, $\psi = 1{,}0 \rightarrow \zeta = 1{,}0$ $\boxed{}$

$M_{Ki,y} = 422{,}2$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}8623$ $\quad k_N = 0{,}8$ $\quad \bar{n} = 2{,}0$ $\quad \underline{k_M = 0{,}8025}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

$$\frac{68{,}66}{0{,}7140 \cdot 1844} + \frac{162{,}0}{0{,}8025 \cdot 2854} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}7595 < 1{,}0} \checkmark$$

b) FÜR $\underline{M_y = -236{,}3 \text{ kNm}}$

$z_p \doteq 0 \quad \psi \doteq 0 \quad \zeta = 1{,}77$

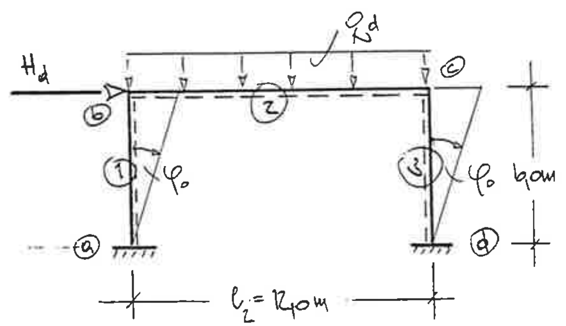
$M_{Ki,y} = 1167 \text{ kNm} \quad \bar{\lambda}_M = 0{,}5186 \quad n = 2{,}5 \quad \underline{\kappa_M = 0{,}9854}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

$$\frac{68{,}66}{0{,}7140 \cdot 1844} + \frac{236{,}3}{0{,}9854 \cdot 2854} \cdot 1{,}0 = \underline{0{,}8924 < 1} \checkmark$$

=> VARIANTE RIEGEL : $s_K = l = 4{,}0 \text{ m}$ MÖGLICH

A4.8 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST.-PLAST.)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400
$J = 23\,130 \text{ cm}^3$
$E = 2{,}1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$
$\gamma_M = 1{,}1$
$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME :}}$ $\quad \underline{q_d = 22{,}6 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 54{,}24 \text{ kN}}$

Ⓢ	N_s kN	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
①	130	1,0	0,3256	3,986	2,004	5,989	3,986	2,004	5,989
②	85	0,5	0,5265	3,963	2,009	–	1,982	1,005	–
③	150	1,0	0,3497	3,984	2,004	5,988	3,984	2,004	5,988

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG $\quad [A] \cdot \{X\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	LF
5,968	1,005	-0,9982	272,5
1,005	5,966	-0,9980	-272,5
-0,9982	-0,9980	0,6590	55,33
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	DET (A)
76,13	-33,70	148,2	> 0

$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$

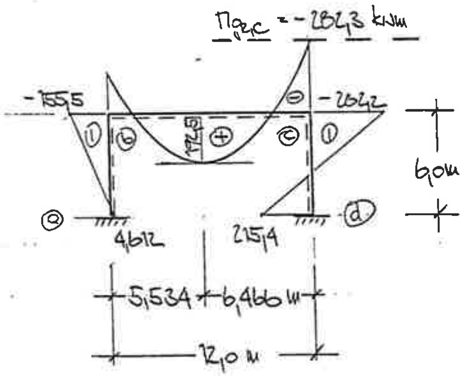
$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7360 \text{ kNm}$

STABENDMOMENTE :

(S)	i-k	$q_d = 22{,}6$ kN/m M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	4,612
	b		-155,5
2	b	-272,5	-155,5
	c	-272,5	-282,2
3	c	0	-282,2
	d		215,4

MOMENTE [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN STAB-
ENDMOMENTEN NACH TH. I. ORD.)

STABENDQUERKRÄFTE

(S)	i-k	$q_d = 22{,}6$ kN/m Q_{ik} kN
1	a	-27,12
	b	-25,78
2	b	125,9
	c	-146,6
3	c	81,75
	d	82,43

NORMALKRÄFTE

(S)	i-k	$q_d = 22{,}6$ kN/m N_{ik} kN
1	a-b	-125,0
2	b-c	-81,85
3	c-d	-146,2

(N < 0 DRUCK)

STABENDKRÄFTE

(S)	i-k	$q_d = 22{,}6$ kN/m R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a	0	-27,63
	b		
2	b	135,6	125,0
	c	-135,6	-146,2
3	c	0	81,85
	d		

$\Sigma H = 0$ ✓ , $\Sigma V = 0$ ✓

max FELDMOMENT M_F STAB 2

	$q_d = 22{,}6$ kN/m
M_0	11740
M_1	23860
v	902041
ξ_M	0,4612
x_M	5,535
max M_F	192,5

NACHWEISE

INTERAKTIONSBEZIEHUNG

$\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}1$ $\qquad \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}3500 \rightarrow M_{pl,c} = -282{,}3 \text{ kNm}$

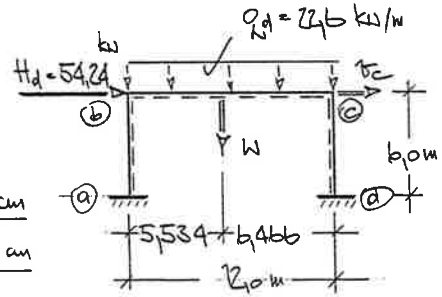
$\underline{M_{cb} = -282{,}2 \text{ kNm} \doteq M_{pl,c} = -282{,}3 \text{ kNm}}$ ✓

NACHWEIS GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. II. ORD

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4612 \;,\; \xi' = 1 - \xi$



M_i : $\Delta W = -0{,}03326$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}05736$ m

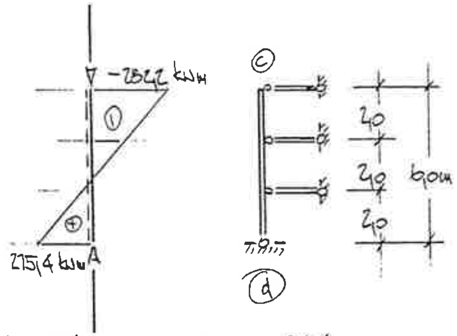
q : $\Delta W = 0{,}1412$ m

$\underline{W} = 0{,}05056 \text{ m} \hat{=} \underline{5{,}1 \text{ cm}}$

$\underline{v_c} = F_c / C_d = 0{,}02014 \text{ m} \hat{=} \underline{2{,}0 \text{ cm}}$

NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

RAHMENSTIEL (3)



$N = 146{,}2$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_K = \ell = 2{,}0 \text{ m}}$ (GABELLAGERUNG)

$N_{ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{\ell^2} = 6840$ kN

$\bar{\lambda}_z = 0{,}5445$ KNICKSP.LINIE (b) $\rightarrow \alpha = 0{,}34 \rightarrow \underline{k_z = 0{,}8640}$

$z_p \doteq +\;,\; c^2 = 415{,}4 \text{ cm}^2 \quad \psi = 0{,}41 \rightarrow \zeta = 1{,}454 \quad M_{ki,y} = 2027 \text{ kNm}$

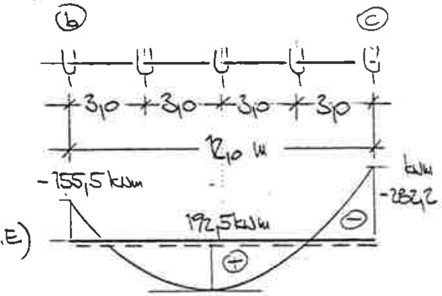
$\bar{\lambda}_M = 0{,}3935 \rightarrow \underline{k_M = 1{,}0}$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS

$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{146{,}2}{0{,}8640 \cdot 1844} = \underline{0{,}09176 < 0{,}10} \rightarrow$

$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{282{,}2}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = \underline{0{,}9888 < 1{,}0}$ ✓

RIEGEL (2)



$N = 81{,}65$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_z = \ell = 3{,}0 \text{ m}}$ (GABELLAGERUNG)

$\underline{k_z = 0{,}7140}$ SIEHE E.TH. II.ORD (E.E)

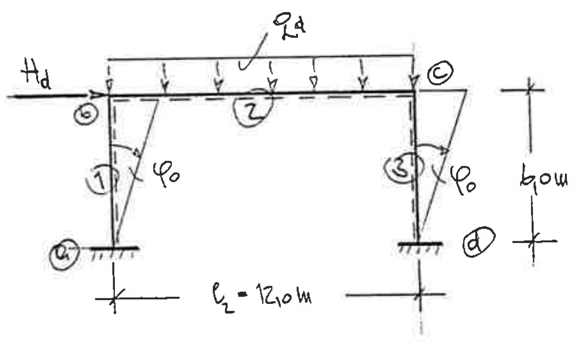
a) FÜR $\underline{M_y = 192{,}5 \text{ kNm}} \rightarrow k_M = 0{,}8025$

$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \underline{0{,}06217 < 0{,}10} : \frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{192{,}5}{0{,}8025 \cdot 285{,}4} = \underline{0{,}8405 < 1{,}0}$ ✓

b) FÜR $\underline{M_y = -282{,}2 \text{ kNm}} \rightarrow k_M = 0{,}9854$

$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \underline{0{,}06217 < 0{,}10} : \frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{282{,}2}{0{,}9854 \cdot 285{,}4} = \underline{1{,}0 \leq 1{,}0}$ ✓

4.9 FLIESSGELENKTHEORIE II. ORD. – (PLAST. PLAST.)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 5}$$

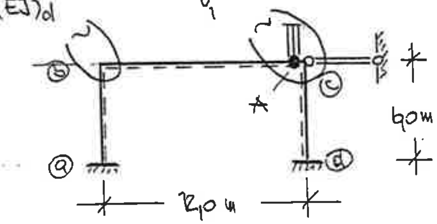
IPE 400
$J = 23130\ cm^4$
$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$
$\gamma_M = 1{,}1$
$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME: $q_d = 26{,}1\ kN/m \rightarrow H_d = 67{,}44\ kN$

(S)	N_s kN	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	$\varkappa_s$	λ_s	γ_s
①	165	1,0	0,3668	3,982	2,005	5,987	3,982	2,005	5,987
②	95	0,5	0,5566	3,959	2,010	—	1,979	1,005	—
③	175	1,0	0,3777	3,981	2,005	5,986	3,981	2,005	5,986

$$\varepsilon_s = \ell_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}} \qquad C_d = \frac{(EJ)_d}{\ell_1} = 7360\ kNm$$

SYSTEM MIT FG ∗ IN ⓒ



LF $\bar{\varphi}_b = 1{,}0$:

$a_{11} = \varkappa_1 + \varkappa_2 = \underline{5{,}961}$
$a_{21} = a_{12} = \lambda_2 = \underline{1{,}005}$
$a_{31} = a_{13} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \gamma_1 = \underline{-0{,}9978}$ $\qquad a_{41} = a_{14} = -\lambda_2 = \underline{-1{,}005}$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{22} = \varkappa_2 + \varkappa_3 = \underline{5{,}960}$ $\qquad a_{32} = a_{23} = -\frac{1}{\ell_3} \gamma_3 = \underline{-0{,}9977}$
$a_{42} = a_{24} = -\varkappa_2 = \underline{-1{,}979}$

LF $\bar{\tau}_c = 1{,}0$:

$a_{33} = \frac{1}{\ell_1^2} \cdot 2 \cdot \gamma_1 - \frac{N_1}{\ell_1 \cdot C_d} + \frac{1}{\ell_3^2} \cdot 2 \cdot \gamma_3 - \frac{N_3}{\ell_3 \cdot C_d} = \underline{0{,}6575}$
$a_{43} = a_{34} = 0$

LF $\bar{\varrho}_A = 1{,}0$:

$a_{44} = \varkappa_2 = \underline{1{,}979}$

LF q, H:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08377 \cdot q \cdot \ell_2^2 = -339{,}0\ kNm$
$a_{10} = -a_{20} = \underline{-339{,}0\ kNm}$
$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = \underline{-68{,}76\ kNm}$
$a_{40} = M^0_{cb} = \underline{-339{,}0\ kNm}$ $\qquad M_\ast = M_{pl,c} = \underline{-273{,}7\ kNm}$ (ANNAHME)

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG: $[A] \cdot \{X\} + \{B\} = \{0\}$

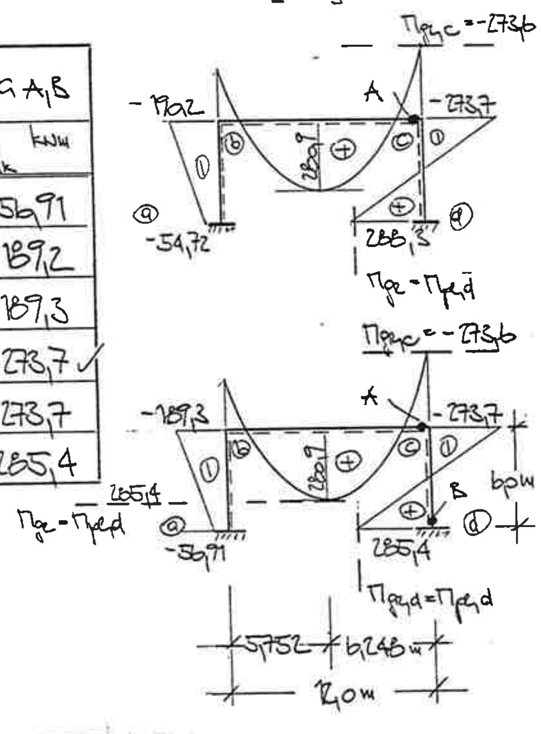
$a_{11} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{12} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{13} \cdot \bar{\tau}_c + a_{14} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{10} = 0$
$a_{21} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{22} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{23} \cdot \bar{\tau}_c + a_{24} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{20} = 0$
$a_{31} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{32} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{33} \cdot \bar{\tau}_c + a_{34} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{30} = 0$
$a_{41} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{42} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{43} \cdot \bar{\tau}_c + a_{44} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{40} = M_\ast$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\varrho}_A$	$\bar{\varrho}_B$	LF	
5,961	1,005	-0,9978	-1,005	0	339,0	$[A] \cdot \{X\} = -\{B\}$
1,005	5,960	-0,9977	-1,979	-2,005	-339,0	
-0,9978	-0,9977	0,6575	0	0,9977	68,76	
-1,005	-1,979	0	1,979	0	65,30	$= 339{,}0 - 273{,}7$
0	-2,005	0,9977	0	3,981	285,4	$= M_{pl,d}$
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\varrho}_A$	$\bar{\varrho}_B$	DET (A)	
123,9	7,385	303,8	103,3	—	> 0	$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$
124,5	7,460	307,2	103,7	-1,539	> 0	

STABENDMOMENTE

q_d = 28,1 kN/m			FG A	FG A,B
S	i-k	M^o_{ik} kNm	M_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-54,72	-56,91
	b		-190,2	-189,2
2	b	-339,0	-190,2	-189,3
	c	-339,0	-273,7 ✓	-273,7 ✓
3	c	0	-273,7	-273,7
	d		288,3	285,4

M [kNm]



STABENDQUERKRÄFTE

q_d = 28,1 kN/m		FG A	FG A,B
S	i-k	Q_{ik} kN	Q_{ik} kN
1	a	-23,72	-23,20
	b	-20,94	-20,41
2	b	163,2	163,2
	c	-175,6	-175,5
3	c	92,64	92,14
	d	92,46	91,96

NORMALKRÄFTE

q_d = 28,1 kN/m		FG A	FG A,B
S	i-k	N_{ik} kN	N_{ik} kN
1	a-b	-161,6	-161,6
2	b-c	-91,78	-91,28
3	c-d	-175,6	-175,6

STABENDKRÄFTE

q_d = 28,1 kN/m			FG A	FG A,B
S	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a	0	-24,36	-23,84
	b			
2	b	168,6	161,6	161,6
	c	-168,6	-175,6	-175,6
3	c	0	91,78	91,28
	d			

max FELDMOMENT M_F STAB 2

q_d = 28,1 kN/m	FG A	FG A,B
M_0	13060	13060
M_1	26680	26680
V	0,01139	0,01152
ξ_M	0,4795	0,4793
x_M	5,754	5,752
max M_F	280,9	280,9

$\Sigma H = 0$ ✓, $\Sigma V = 0$ ✓

NACHWEISE :

INTERAKTIONSBEZIEHUNG

$\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}16$:

STAB ② : $Q_{Ali} = -177{,}9$ kN $\quad \frac{Q_{Ali}}{Q_{pl,d}} = 0{,}4225 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c} = -273{,}6$ kNm

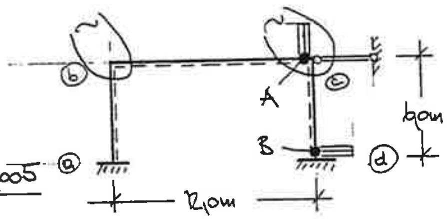
$M_{cb} = -273{,}7$ kNm $\doteq M_{pl,c} = -273{,}6$ kNm ✓

STAB ③ : $Q_{dc} = 92{,}46$ kN $\quad \frac{Q_{dc}}{Q_{pl,d}} = 0{,}2208 < 0{,}33 \quad M_{pl,d} = M_{pl,d}$

$M_{dc} = 286{,}3$ kNm $> M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm $\Rightarrow$

$\rightarrow$ FLIESSGELENK B IN ⓓ EINFÜHREN

SYSTEM MIT FG A,B :



LF $\bar{\varphi}_B = 1{,}0$:

$a_{15} = a_{51} = 0$, $a_{25} = a_{52} = -\lambda_3 = -2{,}005$

$a_{35} = a_{53} = \frac{1}{\ell_3} \cdot \gamma_s = 0{,}9977$

$a_{45} = a_{54} = 0$, $a_{55} = \alpha_3 = 3{,}981$

LF q, H :

$a_{50} = 0 \qquad M_B = 285{,}4$ kNm $= M_{pl,d}$

GLEICHGEW. BED. AM FG. B :

$a_{51} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{52} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{53} \cdot \bar{\psi}_c + a_{54} \cdot \bar{\varphi}_A + a_{55} \cdot \bar{\varphi}_B + a_{50} = M_B$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG SIEHE VOR

NACHWEISE :

INTERAKTIONSBEZIEHUNG : $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}16$:

STAB ② :

$\frac{Q_{Ali}}{Q_{pl,d}} = 0{,}4223 \rightarrow M_{pl,c} = -273{,}6$ kNm $\doteq M_{cb} = -273{,}7$ kNm ✓

$\max M_F = 280{,}9$ kNm $< M_{pl} = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm UND

$M_{bc} = -169{,}3$ kNm $< M_{pl,b} = -277{,}6$ kNm $\Rightarrow$

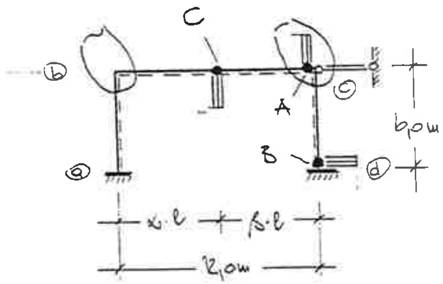
SYSTEM HAT NOCH PLAST. RESERVE ($q_d = 26{,}1$ kN/m $< q_{TRAGLAST}$) $\Rightarrow$
FLIESSGELENK C IM FELD b–c

2. ANNAHME :

$q_d = 27{,}9$ kN/m $\rightarrow H_d = 71{,}76$ kN

Ⓢ	N_s kN	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
①	165	1,0	0,3884	3,980	2,005	5,985	3,980	2,005	5,985
②	95	0,5	0,5566	3,959	2,010	–	1,979	1,005	–
③	165	1,0	0,3884	3,980	2,005	5,985	3,980	2,005	5,985

SYSTEM MIT FG A,B,C



LAGE DES FG's C :

$\beta \leq \frac{1}{\varepsilon} \cdot \arccos \frac{M_b + M_{ki}}{M_b + M_f}$ $\qquad M_b = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \varrho_i \cdot \ell_2^2 = 13900$ kNm

$M_{ki} = -271{,}8$ kNm (ANNAHME)

$M_f = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$\beta \leq 0{,}5052$

ANNAHME : $\beta = 0{,}5 \rightarrow \alpha = 0{,}5$

LF $\bar{\varphi}_c = 1{,}0$:

$a_{16} = a_{61} = -(\ell_1/\ell_2) \cdot F_{12} = -0{,}5065$ $\qquad a_{26} = a_{62} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{13} = 0{,}5065$

$a_{36} = a_{63} = 0$ $\qquad a_{46} = a_{64} = -(\ell_1/\ell_2) \cdot F_{13} = -0{,}5065$ $\qquad a_{56} = a_{65} = 0$

$a_{66} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{14} = 0{,}4870$

LF q_d, H :

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08377 \cdot \varrho_i \cdot \ell_2^2 = -360{,}7$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = -360{,}7$ kNm

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = -73{,}20$ kN

$a_{40} = -360{,}7$ kNm $\qquad M_A = -271{,}8$ kNm (ANNAHME)

$a_{50} = 0$ $\qquad M_B = 285{,}4$ kNm $(= M_{pl,d})$

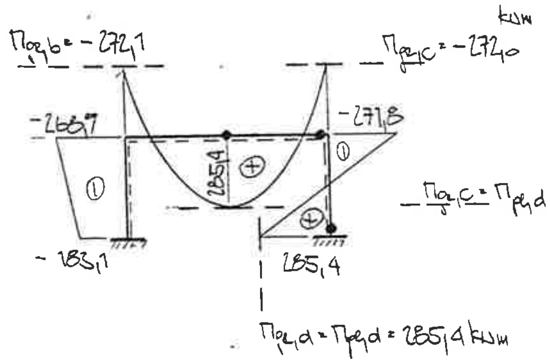
$a_{60} = -M^0_c = -181{,}0$ kNm $\qquad M_c = 285{,}4$ kNm $(= M_{pl,d})$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\sigma}_c$	$\bar{\varrho}_A$	$\bar{\varrho}_B$	$\bar{\varrho}_C$	LF
5,959	1,005	-0,9975	-1,005	0	-0,5065	360,7
1,005	5,959	-0,9975	-1,979	-2,005	0,5065	-360,7
-0,9975	-0,9975	0,6566	0	0,9975	0	73,20
-1,005	-1,979	0	1,979	0	-0,5065	88,90
0	-2,005	0,9975	0	3,980	0	285,4
-0,5065	0,5065	0	-0,5065	0	0,4870	-164,4
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\sigma}_c$	$\bar{\varrho}_A$	ϱ_B	$\bar{\varrho}_C$	DET (A)
228,9	64,17	643,7	292,0	-57,29	260,6	> 0

STABENDMOMENTE

(S)	i-k	$q_d = 29{,}9$ kN/m: M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-183,1
	b		-268,9
2	b	-360,7	-268,7
	c	-360,7	-271,9 ✓
3	c	0	-271,8
	d		285,4 ✓
2	C	181,0	285,4 ✓

M [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN STABENDMOMENTEN N. TH. I. ORD.)

STABENDKRÄFTE :

(S)	i-k	$q_d = 29{,}9$ kN/m: R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a	0	-17,72
	b		
2	b	179,4	179,1
	c	-179,4	-179,7
3	c	0	89,45
	d		

STABENDQUERKRÄFTE

$q_d = 29{,}9$ kN/m		
(S)	i-k	Q_{ik} kN
①	a	$-17{,}00$
	b	$-11{,}25$
②	b	$182{,}1$
	c	$-178{,}9$
③	c	$91{,}78$
	d	$90{,}17$

NORMALKRÄFTE

$q_d = 29{,}9$ kN/m		
(S)	i-k	N_{ik} kN
①	a-b	$-179{,}1$
②	b-c	$-89{,}45$
③	c-d	$-179{,}7$

(N < 0 DRUCK)

NACHWEISE:

INTERAKTIONSBEZIEHUNG: $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}1$

STAB ②: $\frac{Q_{bc}}{Q_{pl,d}} = 0{,}9348 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,b} = -272{,}1$ kNm

$M_{bc} = -266{,}7$ kNm $< M_{pl,b} = -272{,}1$ kNm ✓

$\frac{Q_{Ae}}{Q_{pl}} = 0{,}9862 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c} = -272{,}0$ kNm

$M_{cb} = -271{,}9$ kNm $\doteq M_{pl,c} = -272{,}0$ kNm ✓

$Q_c \doteq 0$ $\quad M_c = 265{,}4$ kNm $= M_{pl,c} = M_{pl,d} = 265{,}4$ kNm ✓

STAB ③: $\frac{Q_{dc}}{Q_{pl,d}} < 0{,}33 \rightarrow M_{pl,d} = M_{pl,d} = 265{,}4$ kNm

$M_{dc} = 265{,}4$ kNm $= M_{pl,d} = 265{,}4$ kNm ✓

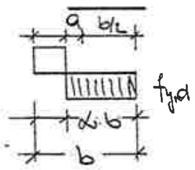
$\Rightarrow$ $q_d = q_{TRAGLAST} = 29{,}9$ kN/m $\rightarrow H_d = 71{,}76$ kN

NACHWEIS GRENZ (b/t)

(n. DIN 18800 T.1, TAB 15 S.29)
FÜR $M = 265{,}4$ kNm UND $N = 180{,}0$ kN (DRUCK)

IPE 400: (FÜR DAS GESAMTE SYSTEM)

STEG:

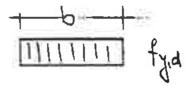


$t = 0{,}86$ cm $\quad b = h - 2\cdot(t_F + r) = 33{,}1$ cm

$b\cdot\alpha = b/2 + a \quad a = \frac{N}{2\cdot f_{y,d}\cdot t} = 4{,}48$ cm $\rightarrow \alpha = 0{,}635$

$\text{VORH.}(b/t) = 38{,}49 < \text{GRENZ}(b/t) = \frac{32}{\alpha}\sqrt{\frac{240}{f_{y,k}}} = 50{,}39$ ✓

FLANSCH:



$t = 1{,}35$ cm $\quad b = (\bar{b} - t_s - 2\cdot r)\cdot\frac{1}{2} = 6{,}47$ cm

$\text{VORH}(b/t) = 4{,}793 < \text{GRENZ}(b/t) = \frac{9}{\alpha}\sqrt{\frac{240}{f_{y,k}}} = 9$ ✓

NACHWEIS FÜR QS MIT FG ERBRACHT, BZW. AUCH FÜR ALLE ÜBRIGEN QS (IPE 400), DA GRENZ (b/t) FÜR QS OHNE FG GÜNSTIGER.

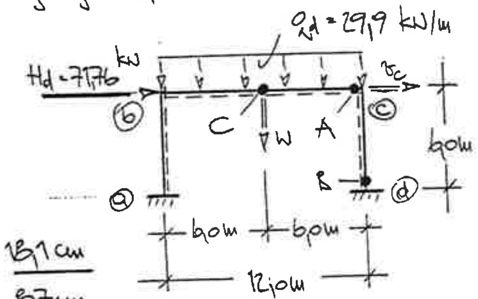
NACHWEIS VON α_{pl}:

VORH $\alpha_{pl} = 1{,}126 <$ GRENZ $\alpha_{pl} = 1{,}25$ ✓

VERFORMUNGEN:

$\xi = \xi' = 0{,}5$

M_i:	$\Delta W = -0{,}05659$ m	
M_k:	$\Delta W = -0{,}05726$ m	
q:	$\Delta W = 0{,}1888$ m	
ϱ_c:	$\Delta W = 0{,}1062$ m	
	$\underline{W} = 0{,}1812$ m	$\hat{=}$ $\underline{18{,}1\text{ cm}}$
	$\underline{v_c} = v_c / C_d = 0{,}08746$ m	$\hat{=}$ $\underline{8{,}7\text{ cm}}$

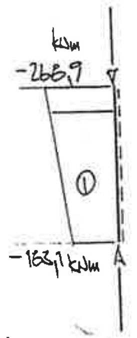


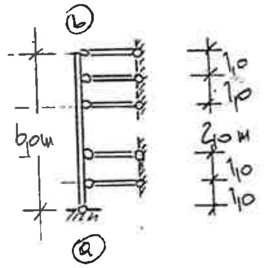
NACHWEIS BIEGEDRILLKNICKEN

RAHMENSTIEL ①

$N = 179{,}1$ kN (DRUCK)

$\boxed{s_k = l = 1{,}0\text{ m}}$ (GABELLAGERUNG)





$N_{Ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l^2} = 27360$ kN

$c^2 = 396{,}1\text{ cm}^2$, $z_p = +$, $\psi = 1{,}0$, $\zeta = 1{,}0$

$M_{Ki,y} = 5445$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}2289 < 0{,}4 \rightarrow \underline{k_M = 1{,}0}$

$\bar{\lambda}_z = 0{,}2596$ KN.SP.LINIE ⓑ $\alpha = 0{,}34$ $\underline{k_z = 0{,}9788}$

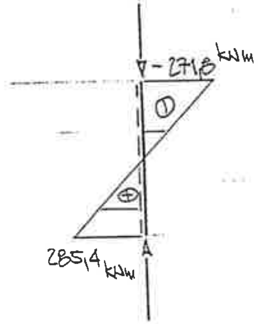
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

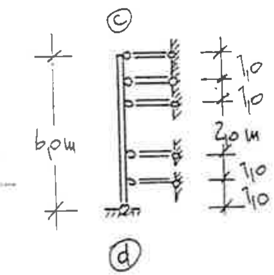
$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{179{,}1}{0{,}9788 \cdot 1844} = \underline{0{,}09923 < 0{,}1}:$$

$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{266{,}9}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = \underline{0{,}9422 \leq 1{,}0} ✓$$

RAHMENSTIEL ③

$N = 179{,}7$ kN (DRUCK)





a) FÜR $\boxed{s_k = l = 1{,}0\text{ m}}$, $M_y = -271{,}8$ kNm (GABELLAGERUNG)

$\underline{k_z = 0{,}9788}$ (SIEHE VOR)

$\underline{k_M = 1{,}0}$ (SIEHE VOR)

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} \underline{< 0{,}1}: \quad \frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{271{,}8}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = \underline{0{,}9523 < 1{,}0} ✓$$

b) FÜR $\boxed{s_k = l = 1{,}0\text{ m}}$, $M_y = 285{,}4$ kNm (GABELLAGERUNG)

$N_{Ki,z} = \frac{\pi^2 \cdot EJ_z}{l^2} = 27360$ kN

$c^2 = 396{,}1\text{ cm}^2$, $z_p = +$, $\psi = 0{,}67$, $\zeta = 1{,}254$

$M_{Ki,y} = 6625$ kNm $\quad \bar{\lambda}_M = 0{,}2144 < 0{,}4 \rightarrow k_M = 1{,}0$

$\bar{\lambda}_z = 0{,}2723$ KN.SP.LINIE ⓑ $\alpha = 0{,}34$ $\underline{k_z = 0{,}9742}$

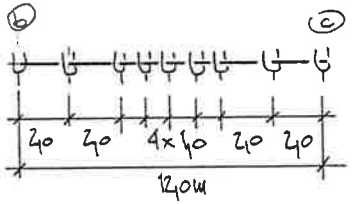
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

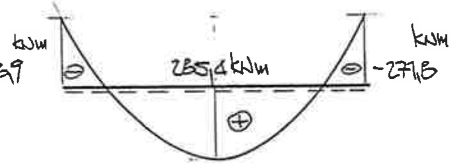
$$\frac{N}{k_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{179{,}7}{0{,}9742 \cdot 1844} = \underline{0{,}09970 < 0{,}1}:$$

$$\frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{285{,}4}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = \underline{1{,}0 \leq 1{,}0} ✓$$

RIEGEL ②

$N = 89{,}45\ kN$ (DRUCK)





a) FÜR $M_y = 285{,}4\ kNm$

$\boxed{s_k = l = 1{,}0m}$ (GABELLAGERUNG)

$\kappa_z = 0{,}9742$ (SIEHE VOR)

$N_{Ki,z} = 27360\ kN$, $c^2 = 396{,}1\ cm^2$, $z_p = -20{,}0\ cm$, $\psi \doteq 1{,}0 \rightarrow \zeta = 1{,}0$

$M_{Ki,y} = 3358\ kNm$ $\bar{\lambda}_M = 0{,}3057 < 0{,}4 \rightarrow k_M = 1{,}0$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

$$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} < 0{,}10 : \quad \frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{285{,}4}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = 1{,}0 \le 1{,}0 \checkmark$$

b) FÜR $M_y = -271{,}8\ kNm$

$\boxed{s_k = l = 2{,}0m}$ (GABELLAGERUNG)

$\kappa_z = 0{,}8830$ (SIEHE VOR)

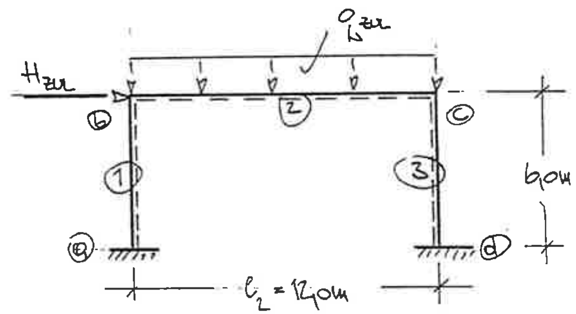
$N_{Ki,z} = 6840\ kN$, $c^2 = 415{,}4\ cm^2$, $z_p \doteq +$, $\psi \doteq \pm$, $\zeta = 1{,}77$

$M_{Ki,y} = 2468\ kNm$ $\bar{\lambda}_M = 0{,}3009 < 0{,}40 \rightarrow k_M = 1{,}0$

BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

$$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} < 0{,}1 : \quad \frac{M}{k_M \cdot M_{pl,d}} = \frac{271{,}8}{1{,}0 \cdot 285{,}4} = 0{,}9523 \le 1{,}0 \checkmark$$

A4.1b GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT – (EINGESPANNTE STIELE)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

I PE 400 St 37

$J = 23130\ cm^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

ANNAHME : KEIN ANSATZ VON VORVERFORMUNGEN

TEILSICHERHEITSBEIWERTE : $\gamma_F = 1{,}0$, $\psi = 1{,}0$ (ANNAHME)

$\gamma_M = 1{,}0$

q_{zul}, H_{zul} :

STÄNDIGE EINWIRKUNG ... $\gamma_F = 1{,}35$

VERÄNDERL. –"– ... $\gamma_F = 1{,}5$ $\psi = 0{,}9 \rightarrow \gamma_F \cdot \psi = 1{,}35$

$q_d = g \cdot \gamma_F + p \cdot \gamma_F \cdot \psi = 1{,}35 \cdot q_{zul}$

n. TH. I. ORD.

q_d kN/m	–	19,1	22,8
q_{zul}	1,0	14,15	16,89
M_b	-6,90	-97,64	-116,5
M_c	-12,30	-174,0	-207,7
ξ_M	–	0,4625	0,4625
max M	–	120,3	143,6
$\bar{v}_c$	6,30	89,15	106,4

	Δw [m]	
q_{zul}	14,15	16,89
M_b :	-0,01644	-0,02200
M_c :	-0,03126	-0,03731
q :	0,07612	0,09325
w =	0,02842	0,03394
v_c =	0,01101	0,01314

C = 8096 kNm

n. TH. II ORD – α-VERFAHREN

	α = 1,017		α = 1,021	
q_d [kN/m]	–	19,0	–	22,7
q_{zul}	1,0	14,07	1,0	16,81
Π_b	-6,854	-96,44	-6,843	-115,0
Π_c	-12,35	-173,8	-12,36	-207,8
ξ_Π	–	0,4618	–	0,4617
max Π	–	119,6	–	143,0
$\bar{\tau}_c$	6,407	90,15	6,432	168,1

ΔW [m]		
q_{zul}	14,07	16,81
Π_b:	-0,01822	-0,02172
Π_c:	-0,03120	-0,05730
φ:	0,07766	0,09278
W =	0,02624	0,03376
τ_c =	0,01114	0,01335

n. TH. II. ORDNUNG (EXAKT)

$$\varepsilon = l\sqrt{\frac{N}{EJ}}$$

q_d = 19,0 kN/m → q_{zul} = 14,07 kN/m									
(S)	N_s	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
1	80,0	1,0	0,2435	3,992	2,002	5,994	3,992	2,002	5,994
2	55,0	0,5	0,4038	3,978	2,005	–	1,989	1,003	–
3	95,0	1,0	0,2653	3,991	2,002	5,993	3,991	2,002	5,993

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
5,981	1,003	-0,9990	169,3
1,003	5,980	-0,9988	-169,3
-0,9990	-0,9988	0,6623	33,77

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$
46,84	-21,19	89,69

$[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$

$\varphi_i = \bar{\varphi}/C$

$C = 8096$ kNm

q_d = 22,6 kN/m → q_{zul} = 16,74 kN/m									
(S)	N_s	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
1	95	1,0	0,2653	3,991	2,002	5,993	3,991	2,002	5,993
2	65	0,5	0,4390	3,974	2,006	–	1,987	1,003	–
3	110	1,0	0,2855	3,989	2,003	5,992	3,989	2,003	5,992

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
5,978	1,003	-0,9988	201,5
1,003	5,976	-0,9987	-201,5
-0,9988	-0,9987	0,6616	40,18

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$
55,80	-25,22	166,9

$[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$

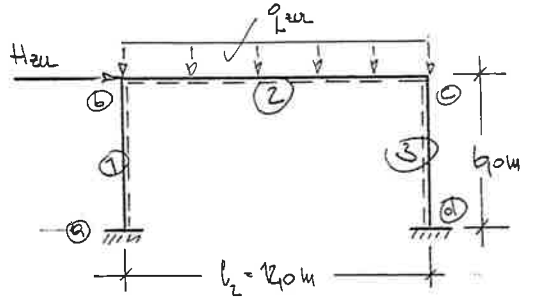
q_d = 29,9 kN/m → q_{zul} = 22,15 kN/m									
(S)	N_s	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
1	135	1,0	0,3163	3,987	2,003	5,990	3,987	2,003	5,990
2	80	0,5	0,4870	3,968	2,008	–	1,984	1,004	–
3	140	1,0	0,3221	3,986	2,003	5,990	3,986	2,003	5,990

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	LF
5,971	1,004	-0,9983	266,9
1,004	5,970	-0,9983	-266,9
-0,9983	-0,9983	0,6579	54,23

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$
74,48	-33,00	144,9

$[A]\cdot\{X\} = -\{B\}$

A4.11 BERECHNUNG NACH Ö-NORM B 4600 – (EINGESPANNTE STIELE)



$$\boxed{\frac{q_{zul} \cdot l_2}{H_{zul}} = 5}$$

I PE 400
St 360 EF
$J = 23\,130$ cm^4
$E = 2,1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

1. ANNAHME: $\quad q_{zul} = 15,46$ kN/m $\rightarrow H_{zul} = 37,10$ kN

$$\max M = M_{cd} = q \cdot [-9,60 - 1,35 \cdot (2,0)] = -190,2 \text{ kNm}$$
$$M_{bc} = q \cdot [-9,60 + 1,35 \cdot (2,0)] = -106,7 \text{ kNm}$$
$$M_{dc} = q \cdot [\ 4,80 + 2,25 \cdot (2,0)] = 143,8 \text{ kNm}$$
$$\max Q = Q_{cb} = q \cdot [-6,0 - 0,225 \cdot (2,0)] = -99,72 \text{ kN}$$
$$N_{cd} = \quad = -99,72 \text{ kN}$$
$$N_{bc} = q \cdot [-2,40 - 0,60 \cdot (2,0)] = -55,66 \text{ kN}$$

ORT UND GRÖSSE VON $\max M_F$ – STAB 2

$$\xi_M = \frac{1}{2} - \frac{M_{ik} - M_{ki}}{q \cdot l^2} = 0,4625 \qquad x_M = 5,550 \text{ m}$$
$$\max M_F = M_{ik} + \frac{1}{2} \xi^2 \cdot q \cdot l^2 = 131,4 \text{ kNm}$$

NACHWEISE:

ALLGEM. SPANNUNGSNACHWEIS:

$$\max \sigma: \quad \frac{N}{A} + \frac{M}{1,07 \cdot W} = \frac{99,72}{84,5} + \frac{19020}{1,07 \cdot 1160} = 16,50 \text{ kN/cm}^2 = \sigma_{zul} \checkmark$$

$$\max \tau: \quad \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \frac{99,72 \cdot 654}{23130 \cdot 0,86} = 3,279 \text{ kN/cm}^2 \leq \tau_{zul} = 10 \text{ kN/cm}^2 \checkmark$$

q_{zul} kN/m	14,07	16,74	22,15
M_b	-97,38	-115,9	-152,3
M_c	-174,2	-207,4	-276,2
M_0	12430	12510	13450
M_1	25100	25300	27280
V	0,01526	0,01661	0,01884
ξ_M	0,4622	0,4622	0,4613
$\max M_F$	121,1	141,7	192,4

ΔW [m]			
q_{zul} kN/m	14,07	16,74	22,15
M_b:	-0,01870	-0,02233	-0,02949
M_c:	-0,03163	-0,03603	-0,05083
q:	0,07898	0,09427	0,1253
W =	0,02645	0,03391	0,04498
τ_c =	0,01108	0,01320	0,01796

$M_{el} = f_{yd} \cdot W_{el} = 24,0/1,10 \cdot 1160 = \underline{278,4 \text{ kNm}} \rightarrow$

$\rightarrow$ REIN ELAST. VERHALTEN DER SYSTEME

VERGLEICHSSPANNUNG

$\sigma = 17{,}58\ \mathrm{kN/cm^2}$ $\quad \tau = \dfrac{55{,}66 \cdot 469{,}6}{23130 \cdot 0{,}86} = 1{,}314\ \mathrm{kN/cm^2}$

$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = 17{,}73\ \mathrm{kN/cm^2} < \beta_p = 19{,}0\ \mathrm{kN/cm^2}$ ✓

KNICKNACHWEIS:

(VERSCHIEBL. SYSTEM ; DOPPELTSYM. QS.)

STIEL (3) :

KN – IN DER MOMENTENEBENE

$\beta_3 = 1{,}29$ (SIEHE VORHER) , $s_k = 1{,}29 \cdot 600 = 774{,}0\ \mathrm{cm}$, $i_y = 16{,}5\ \mathrm{cm}$

$\lambda_y = 46{,}91 \rightarrow \sigma_{k\,zul} = 14{,}4\ \mathrm{kN/cm^2}$

$$\frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{k\,zul}} \cdot \frac{N}{A} + 0{,}9 \cdot \frac{M}{W} = \frac{16{,}5}{14{,}4} \cdot \frac{99{,}72}{84{,}5} + 0{,}9 \cdot \frac{17020}{1160} = 15{,}94\ \mathrm{kN/cm^2}$$

$\sigma_{k\,vorh} = 15{,}94\ \mathrm{kN/cm^2} < \sigma_{zul} = 16{,}5\ \mathrm{kN/cm^2}$ ✓

KN – ⊥ ZUR MOMENTENEBENE

$s_k = 3000\ \mathrm{cm}$ (SIEHE BDKN) , $i_z = 3{,}95\ \mathrm{cm}$

$\lambda_z = 75{,}95 \rightarrow \sigma_{k\,zul} = 12{,}1\ \mathrm{kN/cm^2}$

$\sigma_{k\,vorh} = \dfrac{99{,}72}{84{,}5} = 1{,}180 < \sigma_{k\,zul} = 12{,}1\ \mathrm{kN/cm^2}$ ✓

RIEGEL (2) :

KN – IN DER MOMENTENEBENE

β_2 AUS $N_{Ki\,SYSTEM}$ $\rightarrow \lambda_y$ GLEICH λ_y STIEL UND $N_{RIEGEL} < N_{STIEL}$

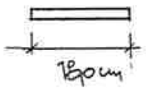
→ NW. ERBRACHT – SIEHE STIEL

KN ⊥ ZUR MOMENTENEBENE

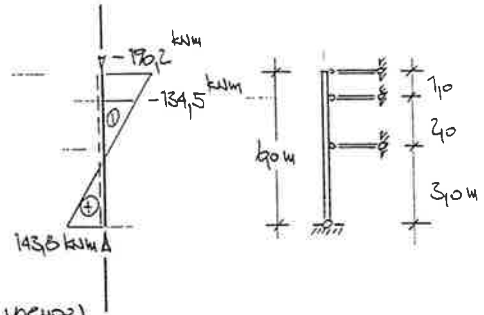
$s_k = 3{,}0\ \mathrm{m}$ $\quad N_{RIEGEL} < N_{STIEL}$ → NACHWEIS ERBRACHT (SIEHE STIEL)

BIEGEDRILLKNICKEN:

$b < h$ → VEREINFACHTER NACHWEIS DURCH KNICKNACHWEIS DES GURTES



$i_z = 5{,}196\ \mathrm{cm}$



STIEL (3)

$N = 99{,}72\ \mathrm{kN}$ (DRUCK)

a) FÜR $M_y = -19{,}2\ \mathrm{kNm}$

$l = 1{,}0\ \mathrm{m}$

$P_0/P_1 = 0{,}73 \rightarrow \beta = 0{,}935$ (SIEHE VORHER)

$\lambda_z = \dfrac{93{,}5}{5{,}196} = 18{,}09 \rightarrow \sigma_{k\,zul} = 16{,}5\ \mathrm{kN/cm^2}$

$\sigma_{k\,vorh} = \dfrac{99{,}72}{84{,}5} + \dfrac{1920}{1{,}07 \cdot 1160} = 16{,}5\ \mathrm{kN/cm^2} = \sigma_{k\,zul}$ ✓

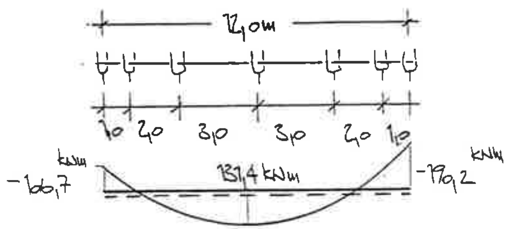
b) FÜR $M_y = 143{,}8\ \mathrm{kNm}$

$l = 3{,}0\ \mathrm{m} \doteq s_k$ $\quad \lambda_z = 57{,}74 \rightarrow \sigma_{k\,zul} = 13{,}62\ \mathrm{kN/cm^2}$

$\sigma_{k\,vorh} = \dfrac{99{,}72}{84{,}5} + \dfrac{14380}{1{,}07 \cdot 1160} = 12{,}77\ \mathrm{kN/cm^2} < \sigma_{k\,zul} = 13{,}62\ \mathrm{kN/cm^2}$ ✓

RIEGEL (2)

$N = 55{,}66\ \mathrm{kN}$ (DRUCK)



a) FÜR $M_y = 131{,}4$ kNm

$\ell = 3{,}0\,m \doteq s_K \qquad \lambda_z = 57{,}74 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = 13{,}62\ kN/cm^2$

$$\sigma_{K_{vorh}} = \frac{55{,}66}{84{,}5} + \frac{13140}{1{,}07 \cdot 1160} = \underline{11{,}25\ kN/cm^2 < \sigma_{K_{zul}}} = \underline{13{,}62\ kN/cm^2}\ ✓$$

b) FÜR $M_y = 190{,}2$ kNm

$\ell = 1{,}0\,m \quad P_0/P_1 \doteq 0{,}6 \quad \beta \doteq 0{,}901 \quad \lambda_z = 17{,}34 \rightarrow \sigma_{K_{zul}} = \underline{16{,}5\ kN/cm^2}$

$$\sigma_{K_{vorh}} = \frac{55{,}66}{84{,}5} + \frac{19020}{1{,}07 \cdot 1160} = \underline{15{,}98\ kN/cm^2 < \sigma_{K_{zul}}}\ ✓$$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

a) STEG

$h = \bar{h} - 2 t_F - r = 35{,}2\,cm \quad t = 0{,}86\,cm \qquad \lambda = 46{,}91 \leq 70$

$$\text{VORH}\,(h/t) = \frac{35{,}2}{0{,}86} = \underline{40{,}93 < \text{GRENZ}\,(h/t) = 42}\ ✓$$

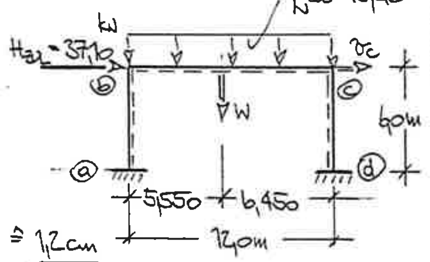
b) FLANSCH:

$h_1 = b/2 = 9{,}0\,cm, \quad t = t_F = 1{,}35\,cm \qquad \lambda = 46{,}91 \leq 80$

$$\text{VORH}\,(h/t) = \frac{9{,}0}{1{,}35} = \underline{6{,}67 < \text{GRENZ}\,(h/t) = 8 + 0{,}1 \cdot \lambda = 12{,}7}\ ✓$$

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4625 \quad , \xi' = 1 - \xi$



M_i: $\Delta W = -0{,}02015\ m$

M_k: $\Delta W = -0{,}03417\ m$

q: $\Delta W = 0{,}08536\ m$

$\underline{W} = 0{,}03104\ m \mathrel{\hat{=}} \underline{3{,}1\,cm}$

$$\underline{\varphi_c} - \bar{F}_c / C = \frac{1}{C} \cdot \left[3{,}150 \cdot (2{,}0)\right] \cdot q = 0{,}01203\ m \mathrel{\hat{=}} \underline{1{,}2\,cm}$$

$$C = \frac{EJ}{\ell_1} = 8096\ kNm$$

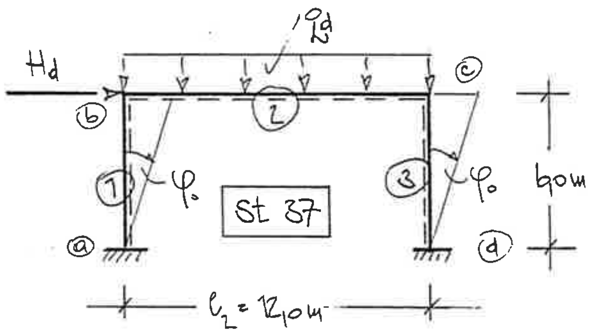
A5. BEISPIEL 5

A5.1 BERÜCKSICHTIGUNG DER KNOTENNACHGIEBIGKEIT

INFORM EINER MOMENTENFEDER MIT ENTSPRECHENDER FEDERCHARAKTERISTIK JE NACH KNOTENAUSBILDUNG UND PROFILTYPEN

DIE NACHGIEBIGKEIT DER KNOTEN WIRD DURCH ÜBERLAGERUNG VON "KNICKWINKELN" BERÜCKSICHTIGT, NICHT DURCH SYSTEMÄNDERUNG!

SYSTEM UND BELASTUNG



$$\boxed{-\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 5}$$

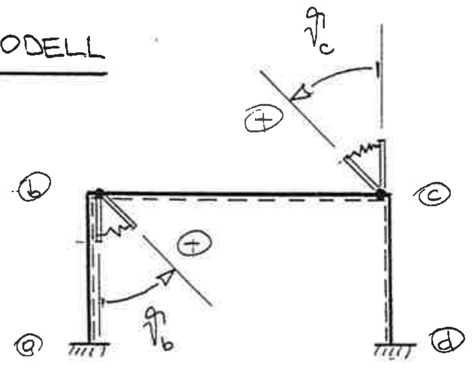
I PE 400

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

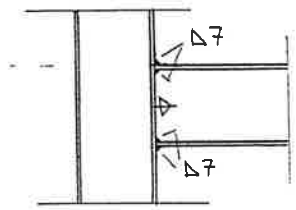
$G = 8{,}1 \cdot 10^3\ kN/cm^2$

$\gamma_M = 1{,}1$

MODELL



FEDERCHARAKTERISTIK



5.2 STEIFENLOSER KNOTEN

EINLEITUNGSFEDER :

ELAST. BEREICH :

$l_e = t_R + 2\cdot\sqrt{2}\cdot a + 2\cdot(r_s + t_s)$ ANNAHME: $a = 7\,mm$ $(\geq t_R/2)$

$l_e = 1{,}35 + 2\cdot\sqrt{2}\cdot 0{,}7 + 2\cdot(2{,}1 + 1{,}35)$ $= 10{,}23\,cm$

$A_e = l_e \cdot s_s = 10{,}23 \cdot 0{,}86$ $= 8{,}798\,cm^2$

$(h_R - t_R) = 40{,}0 - 1{,}35$ $= 39{,}65\,cm$

$f_{y,k} = 24{,}0\,kN/cm^2$ $f_{y,d} = f_{y,k}/\gamma_M = 21{,}82\,kN/cm^2$

$M_{eE} = f_y \cdot A_e \cdot (h_R - t_R)$

$\underline{M_{eE} = 87{,}61\,kNm}$ $\underline{M_{eE,d} = 74{,}20\,kNm}$

$C_E = \frac{(h_R - t_R)^2}{2} \cdot c_E$ $c_E = 12000\,kN/cm$

$\underline{C_E = 8{,}963 \cdot 10^4\,kNm/RAD = C_{E,d}}$

PLAST. BEREICH :

$l_p = t_R + 2\cdot\sqrt{2}\cdot a + 5\cdot(r_s + t_s)$

$l_p = 1{,}35 + 2\cdot\sqrt{2}\cdot 0{,}7 + 5\cdot(2{,}1 + 1{,}35)$ $= 20{,}58\,cm$

$A_p = l_p \cdot s_s = 20{,}58 \cdot 0{,}86$ $= 17{,}70\,cm^2$

$M_{pE} = f_y \cdot A_p \cdot (h_R - t_R)$

$\underline{M_{pE} = 164{,}2\,kNm}$ $\underline{M_{pE,d} = 149{,}3\,kNm}$

QUERKRAFTFEDER

ELAST. BEREICH

$M_{eQ} = Q_{ps} \cdot (h_R - t_R)$

$Q_{ps} = 460{,}6\,kN$ $Q_{ps,d} = 418{,}8\,kN$ (SIEHE VORHER)

$\underline{M_{eQ} = 178{,}0\,kNm}$, $\underline{M_{eQ,d} = 161{,}9\,kNm}$

$C_Q = s_s \cdot (h_R - t_R) \cdot (h_s - t_s) \cdot G$

$\underline{C_Q = 1{,}041 \cdot 10^5\,kNm/RAD}$, $\underline{C_{Q,d} = 9{,}460 \cdot 10^4\,kNm/RAD}$

$\vartheta_{eQ} = \frac{M_{eQ}}{C_Q}$

$\underline{\vartheta_{eQ} = 1{,}71 \cdot 10^{-3}\,RAD}$, $\underline{\vartheta_{eQ,d} = 1{,}71 \cdot 10^{-3}\,RAD}$

PLAST. BEREICH

$\kappa_K = \left(1 + 2\cdot\frac{r_s}{t_s}\right)\cdot\frac{b_s \cdot t_s^2}{s_s \cdot (h_s - t_s)\cdot(h_K - t_K)} = 0{,}1050$

$M_{pQ} = \left(0{,}866\cdot\left(1 + \frac{h_K - t_K}{240\cdot t_s}\right) + 2{,}624\cdot\kappa_K\cdot\left(1 - \frac{0{,}024\cdot s_s}{h_K - t_K}\right)\right)\cdot Q_{ps}\cdot(h_K - t_K)$

$\underline{M_{pQ} = 180{,}5\,kNm}$, $\underline{M_{pQ,d} = 164{,}1\,kNm}$

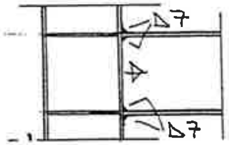
$\vartheta_{pE}, \vartheta_{pQ} = ?$

ABSCHÄTZUNG VON ϑ_{pE} UND ϑ_{pQ} ANHAND DER TABELLEN FÜR HEA - IPE ÜBER $M_{pe} = 313{,}7\,kNm$ UND $M_{pE} = 164{,}2\,kNm$ UND $M_{pQ} = 180{,}5\,kNm$ ⇒

ANNAHME FÜR ϑ_{pE} : HEA 300 - IPE 400 $\underline{\vartheta_{pE} = 15{,}3 \cdot 10^{-3}\,RAD}$

ANNAHME FÜR ϑ_{pQ} : HEA 260 - IPE 400 $\underline{\vartheta_{pQ} = 15{,}4 \cdot 10^{-3}\,RAD}$

A5.3 KNOTEN MIT EINLEITUNGSSTEIFEN



DIE EINLEITUNGSSTEIFEN WERDEN SO GEWÄHLT, DASS

$M_{pE} = M_{pQ} = 180{,}5$ kNm – (QUERKRAFTFEDER MASSGEBEND)

EINLEITUNGSFEDER:

PLAST. BEREICH:

$\underline{M_{pE}} = f_y \cdot A_p\,(h_R - t_R) + \underbrace{f_y \cdot A_{St} \cdot (h_R - t_R)}_{\Delta M_{St}} \overset{!}{=} \underline{180{,}5 \text{ kNm}}$, $\underline{M_{pE,d} = 164{,}1 \text{ kNm}}$

$M_{pE} = 164{,}2 + \Delta M_{St} = 180{,}5$ kNm $\rightarrow \Delta M_{St} = 16{,}30$ kNm

$\Rightarrow \underline{\text{ERF } A_{St}} = \dfrac{\Delta M_{St}}{f_y \cdot (h_R - t_R)} = \underline{1{,}757 \text{ cm}^2}$

ELAST. BEREICH:

$\underline{M_{eE}} = 81{,}61 \text{ kNm} + \Delta M_{St} = \underline{97{,}91 \text{ kNm}}$, $\underline{M_{eE,d} = 89{,}01 \text{ kNm}}$

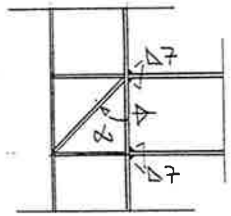
$C_E = \left(1 + \dfrac{A_{St}}{A_e}\right) \cdot \dfrac{(h_R - t_R)^2}{2} \cdot c_E$ $\qquad c_E = 12000$ kNcm/RAD

$\underline{C_E = 1{,}075 \cdot 10^5 \text{ kNm/RAD} \quad \hat{=}\ C_{E,d}}$

QUERKRAFTFEDER:

UNVERÄNDERT

A5.4 KNOTEN MIT EINLEITUNGS- UND DIAGONALSTEIFEN



DIE STEIFEN WERDEN SO GEWÄHLT, DASS $M_{pE} = M_{pQ} - M_{pe\,RIEGEL} = 313{,}9$ kNm

($M_{pE,d} = 285{,}4$ kNm)

EINLEITUNGSFEDER

PLAST. BEREICH:

$\underline{M_{pE}} = 164{,}2 + \Delta M_{St} \overset{!}{=} \underline{313{,}9 \text{ kNm}}$, $\underline{M_{pe,d} = 285{,}4 \text{ kNm}}$

$\Rightarrow \underline{\text{ERF } A_{St}} = \dfrac{\Delta M_{St}}{f_y\,(h_R - t_R)} = \underline{16{,}14 \text{ cm}^2}$ $\qquad \underline{\Delta M_{St} = 149{,}7 \text{ kNm}}$

$\underline{\Delta M_{St,d} = 136{,}1 \text{ kNm}}$

ELAST. BEREICH:

$\underline{M_{eE}} = 81{,}61 + \Delta M_{St} = \underline{231{,}7 \text{ kNm}}$, $\underline{M_{eE,d} = 210{,}3 \text{ kNm}}$

$C_E = \left(1 + \dfrac{A_{St}}{A}\right) \cdot \dfrac{(h_R - t_R)^2}{2} \cdot c_E$ $\qquad c_E = 12000$ kNcm/RAD

$\underline{C_E = 2{,}541 \cdot 10^5 \text{ kNm/RAD} \quad \hat{=}\ C_{E,d}}$

QUERKRAFTFEDER:

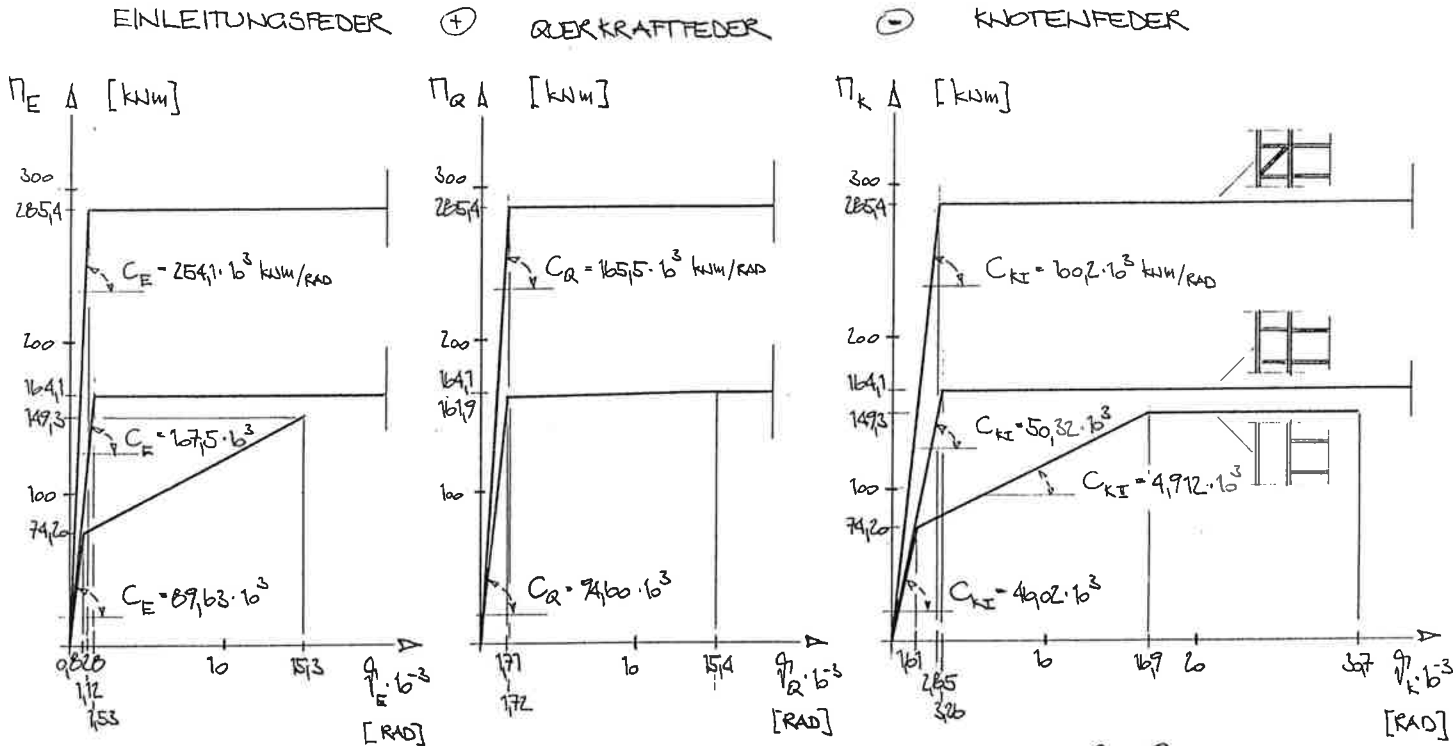
PLAST. BEREICH:

$\underline{M_{pQ}} = 180{,}5 + \Delta Q_{ps} \cdot (h_R - t_R) \overset{!}{=} \underline{313{,}7 \text{ kNm}}$ $\qquad \underline{M_{pQ,d} = 285{,}4 \text{ kNm}}$

$\Rightarrow \Delta Q_{ps} = 345{,}1$ kN, $\qquad \Delta Q_{ps,d} = 313{,}8$ kN

<u>ANNAHME</u>: DIAGONALSTEIFE:

$\Delta Q_{ps} = A_{St} \cdot f_y \sin\alpha$



$$C_{KI} = \frac{C_E \cdot C_Q}{C_E + C_Q}$$

A 5.5 FEDERCHARAKTERISTIKA - TRAGLASTZUSTAND

$\text{ERF } A_{st} = \dfrac{\Delta Q_{ps}}{f_y \cdot \sin\alpha} = \underline{20{,}34\ cm^2}$

ELAST. BEREICH:

$\Pi_{eQ} = 1790 + \Delta Q_{ps} \cdot (h_R - t_R) = \underline{311{,}4\ kNm}$ $\qquad \underline{\Pi_{eQ,d} = 283{,}2\ kNm}$

$\bar{s}_s = s_s + \dfrac{A_{st} \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{3}}{(h_s - t_s)} = 1{,}505\ cm$ (FÜR DIAGONALSTEIFE)

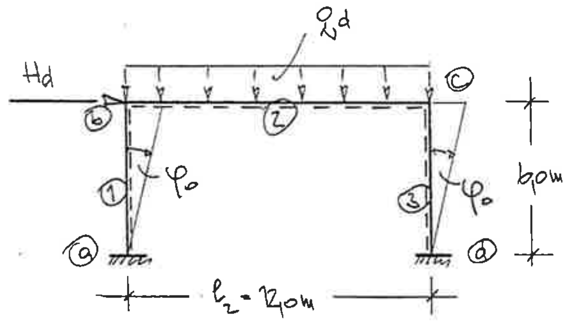
$C_Q = \bar{s}_s \cdot (h_R - t_R) \cdot (h_s - t_s) \cdot G = \underline{1{,}821 \cdot 10^5\ kNm/RAD}$

$\underline{C_{Q,d} = 1{,}655 \cdot 10^5\ kNm/RAD}$

$\vartheta_{eQ} = \dfrac{\Pi_{eQ}}{C_Q} = \underline{1{,}71 \cdot 10^{-3}\ RAD}$ $\qquad \underline{\vartheta_{eQ,d} = 1{,}71 \cdot 10^{-3}\ RAD}$

A5.7.1 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST. ELAST.)

MIT ELAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN (STEIFENLOS)



$$-\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5$$

IPE 400 – St 37

$J = 23\,130\ cm^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$

$\gamma_n = 1{,}1$

$\varphi_o = 0{,}002598$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME:

$q_d = 6{,}74\ kN/m \rightarrow H_d = 16{,}18\ kN$

$$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}} \quad , \quad C_d = \frac{(EJ)_d}{l_1} = 7360\ kNm$$

(S)	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	χ_s	λ_s	η_s
①	40	1,0	0,1866	3,996	2,001	5,997	3,996	2,001	5,997
②	25	0,5	0,2855	3,989	2,003	–	1,995	1,002	–
③	45	1,0	0,1975	3,995	2,001	5,996	3,995	2,001	5,996

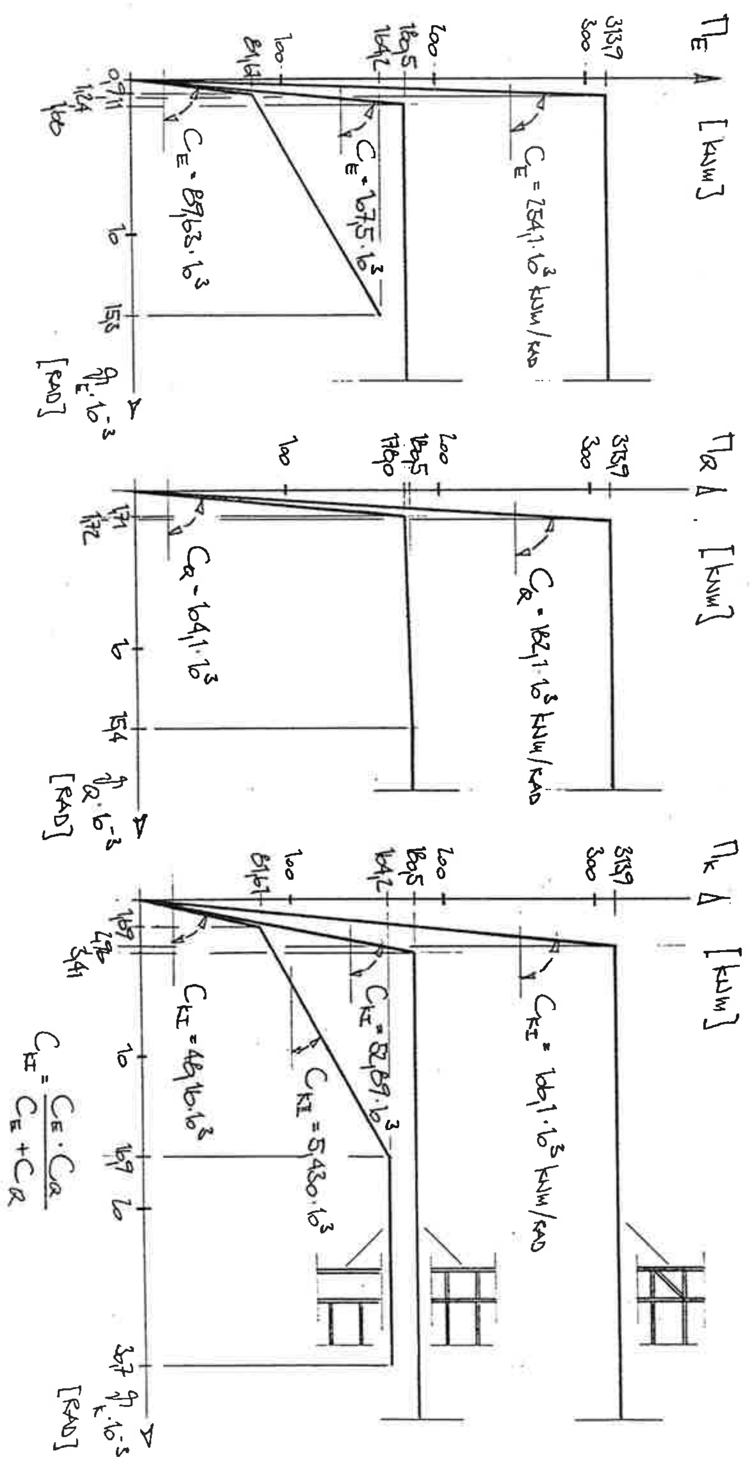
BERECHNUNG NACH DER DEFORMATIONSMETHODE

$$[A] \cdot \{X\} + \{B\} = \{0\}$$

UNBEKANNTEN:

$\varphi_b, \varphi_c, \tau_c, \vartheta_b, \vartheta_c$ (SYSTEM MIT NACHGIEBIGEN KNOTEN)

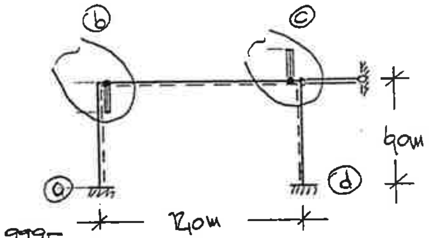
EINLEITUNGSFEDER ⊕ QUERKRAFTFEDER ⊜ KNOTENFEDER



$$C_{KI} = \frac{C_E \cdot C_Q}{C_E + C_Q}$$

A5.6 FEDERCHARAKTERISTIKA – GEBRAUCHSLASTZUSTAND

KOEFFIZIENTEN :



LF $\bar{\varphi}_b = 1,0$:

$a_{11} = \varkappa_1 + \varkappa_2 = \underline{5,991}$

$a_{21} = \lambda_2 = \underline{1,002}$ $\quad a_{31} = -\frac{1}{\ell_1} \cdot \gamma_1 = \underline{-0,9995}$

$a_{41} = -\varkappa_2 = \underline{-1,995}$ $\quad a_{51} = -\lambda_2 = \underline{-1,002}$

LF $\bar{\varphi}_c = 1,0$:

$a_{22} = \varkappa_2 + \varkappa_3 = \underline{5,990}$ $\quad a_{12} = a_{21} = \underline{1,002}$ $\quad a_{32} = -\frac{1}{\ell_3} \cdot \gamma_3 = \underline{-0,9993}$

$a_{42} = -\lambda_2 = \underline{-1,002}$ $\quad a_{52} = -\varkappa_2 = \underline{-1,995}$

LF $\bar{\psi}_c = 1,0$:

$a_{13} = a_{31} = \underline{-0,9995}$ $\quad a_{23} = a_{32} = \underline{-0,9993}$

$a_{33} = \frac{1}{\ell_1^2} \cdot 2 \cdot \gamma_1 - \frac{N_1}{\ell_1 \cdot C_d} + \frac{1}{\ell_3^2} \cdot 2 \cdot \gamma_3 - \frac{N_3}{\ell_3 \cdot C_d} = \underline{0,6644}$ $\quad \underline{a_{43} = a_{53} = 0}$

LF $\bar{\vartheta}_b = 1,0$:

$a_{14} = a_{41} = -\varkappa_2 = \underline{-1,995}$ $\quad a_{24} = a_{42} = -\lambda_2 = \underline{-1,002}$

$a_{34} = 0$ $\quad a_{44} = \varkappa_2 = \underline{1,995}$ $\quad a_{54} = \lambda_2 = \underline{1,002}$

LF $\bar{\vartheta}_c = 1,0$:

$a_{15} = a_{51} = -\lambda_2 = \underline{-1,002}$ $\quad a_{25} = a_{52} = -\varkappa_2 = \underline{-1,995}$ $\quad \underline{a_{35} = a_{53} = 0}$

$a_{45} = a_{54} = \lambda_2 = \underline{1,002}$ $\quad a_{55} = \varkappa_2 = \underline{1,995}$

LF q_{d1}, H_d :

$\Pi^{\circ}_{bc} = \Pi^{\circ}_{cb} = -0,08345 \cdot q_2 \cdot \ell_2^2 = -80,99 \text{ kNm}$

$a_{10} = -a_{20} = \Pi^{\circ}_{bc} = \underline{-80,99 \text{ kNm}}$

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = \underline{-16,40 \text{ kN}}$

$a_{40} = -\Pi^{\circ}_{bc} = \underline{80,99 \text{ kNm}}$

$\underline{\Pi_{bc}(\bar{\vartheta}_b)} = C_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_b = C_{KI}/C_d \cdot \bar{\vartheta}_b = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_b = \underline{6,253 \cdot \bar{\vartheta}_b}$

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

$a_{50} = \Pi^{\circ}_{cb} = \underline{-80,99 \text{ kNm}}$

$\underline{\Pi_{cb}(\bar{\vartheta}_c)} = -C_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_c = -C_{KI}/C_d \cdot \bar{\vartheta}_c = -\bar{C}_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_c = \underline{-6,253 \cdot \bar{\vartheta}_c}$

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG :

$$
\begin{aligned}
a_{11} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{12} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{13} \cdot \bar{\psi}_c + a_{14} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{15} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{10} &= 0 \\
a_{21} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{22} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{23} \cdot \bar{\psi}_c + a_{24} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{25} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{20} &= 0 \\
a_{31} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{32} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{33} \cdot \bar{\psi}_c + a_{34} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{35} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{30} &= 0 \\
a_{41} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{42} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{43} \cdot \bar{\psi}_c + a_{44} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{45} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{40} &= -\Pi_{bc}(\bar{\vartheta}_b) \\
a_{51} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{52} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{53} \cdot \bar{\psi}_c + a_{54} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{55} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{50} &= \Pi_{cb}(\bar{\vartheta}_c)
\end{aligned}
$$

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{b\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	LF
5,991	1,002	-0,9995	-1,995	-1,002	80,99
1,002	5,990	-0,9993	-1,002	-1,995	-80,99
-0,9995	-0,9993	0,6644	0	0	16,40
-1,995	-1,002	0	8,248 (x)	1,002	-80,99
-1,002	-1,995	0	1,002	8,248 (*)	80,99
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	DET $[\bar{A}]$
22,57	-6,222	49,30	-6,552	11,65	> 0

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7300 \text{ kNm}$

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1,995 + 6,253 = 8,248$

(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1,995 + 6,253 = 8,248$

- - - . . SYSTEM MIT IDEAL STARREN KNOTEN

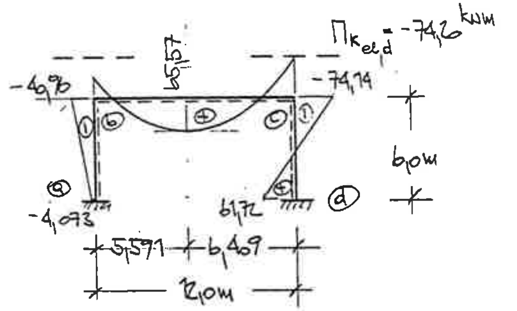
STABENDMOMENTE

$$M_{ik} = M_{ik}^{0} + \varkappa_s \cdot (\bar{\varphi}_i - \bar{\bar{\psi}}_i - \bar{v}/\ell_s) + \lambda_s \cdot (\bar{\varphi}_k - \bar{\bar{\psi}}_k - \bar{v}/\ell_s)$$

$$M_{ki} = M_{ki}^{0} - \lambda_s \cdot (\bar{\varphi}_i - \bar{\bar{\psi}}_i - \bar{v}/\ell_s) - \varkappa_s \cdot (\bar{\varphi}_k - \bar{\bar{\psi}}_k - \bar{v}/\ell_s)$$

		$q_d = 6{,}74$ kN/m	
S	i-k	M_{ik}^{0} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-4,073
	b	0	-40,99
2	b	-80,99	-40,96
	c	-80,99	-74,14
3	c	0	-74,12
	d	0	61,72

MOMENTE [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN ENDMOMENTEN NACH TH. I. ORD.)

KONTROLLE : $M_{bc}(\bar{\bar{\psi}}_b) = 6{,}253 \cdot \bar{\bar{\psi}}_b = -40{,}97$ kNm ✓

$M_{co}(\bar{\bar{\psi}}_c) = -6{,}253 \cdot \bar{\bar{\psi}}_c = -74{,}6$ kNm ✓

STABENDKRÄFTE R_{ik}

$$R_s = -\frac{1}{\ell_s} \cdot (M_{ik} - M_{ki}) - N_s \cdot \left(\bar{v}/\ell_s C_d + \varphi_0\right)$$

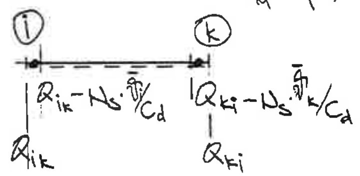
R_{ik}^{L} .. QUERKRAFT INFOLGE QUERBELASTUNG

		$q_d = 6{,}74$ kN/m	
S	i-k	R_{ik}^{L} kN	R_{ik} kN
1	a / b	0	-6,301
2	b	40,44	37,68
	c	-40,44	-43,21
3	c / d	0	22,47

$\Sigma H = 0$ ✓ , $\Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

$$Q_{ik} = R_{ik} + N_s \cdot (\bar{\varphi}_i / C_d + \varphi_0)$$



		$q_d = 6{,}74$ kN/m
S	i-k	Q_{ik} kN
1	a	-6,197
	b	-6,074
2	b	37,76
	c	-43,23
3	c	22,55
	d	22,57

STABENDNORMALKRÄFTE N_s

AUS GLEICHGEW. (N<0 DRUCK)

		$q_d = 6{,}74$ kN/m
S	i-k	N_s kN
1	a-b	-37,68
2	b-c	-22,47
3	c-d	-43,21

max FELDMOMENT M_F - STAB 2 b-c

$q_d = 6{,}74$ kN/m	
M_0	119,6
M_1	239,50
v	0,009788
ξ_m	0,4659
x_m	5,591
max M_F	65,57

$$M_0 = \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot p \cdot \ell^2 , \quad M_1 = \frac{M_{ik} + M_{ki} + 2 \cdot M_0}{\cos \varepsilon/2}$$

$$v = \frac{M_{ik} - M_{ki}}{M_1 \cdot \sin \varepsilon/2} , \quad \xi_m = \frac{1}{2} - \frac{1}{\varepsilon} \operatorname{arctg} v$$

$$x_m = \xi_m \cdot \ell \ [m] \qquad \max M = \frac{1}{2}(\sqrt{1+v^2}) \cdot M_1 - M_0$$

[kNm]

NACHWEISE

$\max M = -74{,}14$ kNm — KNOTENMOMENT IN ©

$M_{el,d} = 253{,}1$ kNm (RIEGEL BZW. STÜTZE) ⇒ KNOTENFEDER IST MASSGEBEND (SIEHE FEDERCHARAKTERISTIK)

$\max M = -74{,}14 \text{ kNm} < M_{k_{el,d}} = -74{,}20$ kNm ✓

$\max \tau$: $\tau = \dfrac{43{,}23 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = 1{,}421 \text{ kN/cm}^2 < \tau_{Rd} = 12{,}60 \text{ kN/cm}^2$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. I. ORD.

VERFORMUNGEN :

$\xi = 0{,}4659$, $\xi' = 1 - \xi$

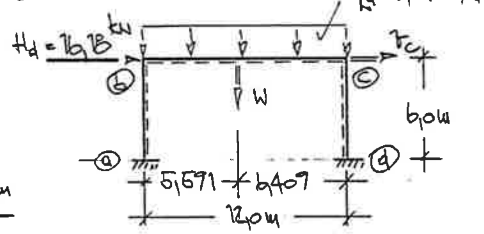
M_i : $\Delta w = -0{,}005355$ m

M_k : $\Delta w = -0{,}008235$ m

q_d : $\Delta w = 0{,}04132$ m

$w = 0{,}02773 \text{ m} \hat{=} 2{,}8 \text{ cm}$

$v_c = \dfrac{E}{C_d} = 0{,}006698 \text{ m} \hat{=} 0{,}67 \text{ cm}$



BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

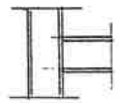
SIEHE BEISPIEL E.TH. II. ORD.

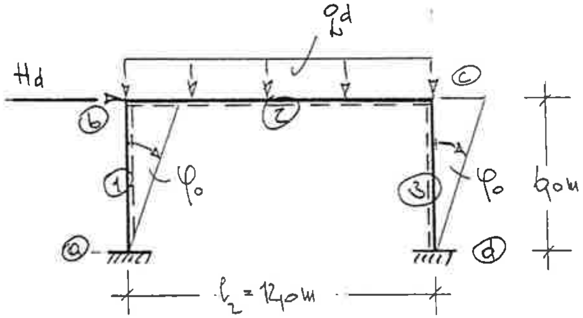
BERECHNUNG DES SYSTEMS MIT STEIFENLOSEN KNOTEN NACH DEM VERFAHREN – ELAST. PLAST. IST WEGEN DER GROSSEN NICHTLINEARITÄT DER KNOTENFEDER UNZULÄSSIG.

(SIEHE FEDERCHARAKTERISTIK)

A5.7.2 FLIESSGELENKTHEORIE II. ORD. – (PLAST. PLAST.)

MIT ELAST., PLAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN (STEIFENLOS)





$\boxed{\dfrac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$

IPE 400 St 37

$J = 23130 \text{ cm}^4$

$E = 2{,}1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

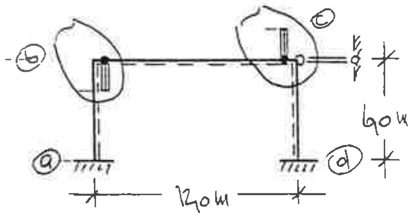
$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$

$q_d = 22{,}9 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 54{,}96$ kN

$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\dfrac{N_s}{(EJ)_d}}$ $C_d = 7360$ kNm

(S)	N_s kN	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
1	140	1,0	0,3378	3,985	2,004	5,989	3,985	2,004	5,989
2	70	0,5	0,4778	3,969	2,008	–	1,985	1,004	–
3	145	1,0	0,3438	3,984	2,004	5,988	3,984	2,004	5,988

KOEFFIZIENTEN



UNBEKANNTEN :

$\varphi_b, \varphi_c, v_c, \vartheta_b, \vartheta_c$

ERMITTLUNG WIE VOR (SIEHE E. TH. II. ORD. ELAST. ELAST)

LF q_{2d}, H_d

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08365 \cdot q_{2d} \cdot l_2^2 = -275{,}8$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = M^0_{bc} = \underline{-275{,}8 \text{ kNm}}$

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = \underline{-56{,}07 \text{ kN}}$

$a_{40} = -M^0_{bc} = \underline{275{,}8 \text{ kNm}}$

$M_{bc}(\bar{\vartheta}_b) = M_k + \bar{C}_{kII} \cdot \bar{\vartheta}_b = \underline{-66{,}29 + 0{,}6674 \cdot \bar{\vartheta}_b}$

FÜR DIE ANNAHME, DASS $M_{bc} < 0$ UND $74{,}20 \le |M_{bc}| \le 149{,}3$ kNm

SIEHE FEDERCHARAKTERISTIK – PLAST. BEREICH

$a_{50} = M^0_{cb} = \underline{-275{,}80 \text{ kNm}}$

$\underline{M_{cb}(\bar{\vartheta}_c) = -149{,}3 \text{ kNm}} = M_{k,pl,d} = \text{const.}$

GLEICHUNGSSYSTEM WIE VOR

$$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{a\}$$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{\varrho}_A$	LF
5,970	1,004	-0,9982	-1,985	-1,004	-0,5344	275,8
1,004	5,969	-0,9980	-1,004	-1,985	0,4752	-275,8
-0,9982	-0,9980	0,6589	0	0	0	56,07
-1,985	-1,004	0	2,652 (*)	1,004	0,5344	-209,5
-1,004	-1,985	0	1,004	1,985	-0,4752	126,5
-0,5344	0,4752	0	0,5344	-0,4752	0,4916	-147,2
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{\varrho}_A$	DET($\bar{A}$)
98,16	33,95	285,1	-57,97	177,6	–	> 0
107,8	39,90	308,9	-82,55	219,3	81,07	> 0

(*) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{kII} = 1{,}985 + 0{,}6674 = 2{,}652$

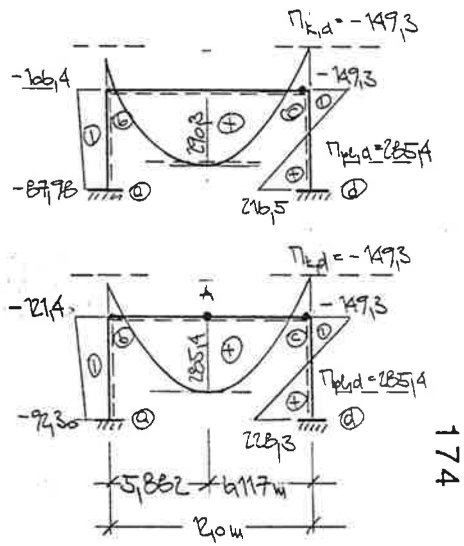
STABENDMOMENTE

$M_{ik} = M^0_{ik} + \varkappa_s \cdot (\varphi_i - \bar{\vartheta}_i - \psi/l_s) + \lambda_s \cdot (\varphi_k - \bar{\vartheta}_k - \psi/l_s) - (l_1/l_s) \cdot F_{I2} \cdot \varrho t$

$M_{ki} = -M^0_{ki} - \lambda_s \cdot (\varphi_i - \bar{\vartheta}_i - \psi/l_s) - \varkappa_s \cdot (\varphi_k - \bar{\vartheta}_k - \psi/l_s) - (l_1/l_s) \cdot F_{I3} \cdot \varrho t$

q_{2d} = 22,9 kN/m			–	FG A
S	i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-87,98	-92,30
	b	0	-166,4	-121,2
2	b	-275,8	-166,3	-121,4
	c	-275,8	-149,4 ✓	-149,3 ✓
3	c	0	-149,3	-149,3
	d	0	216,5	228,3
2	A	138,2	–	285,4 ✓

MOMENTE [kNm]



STABENDKRÄFTE R_{ik}

q_{2d} = 22,9 kN/m			–	FG A
S	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a / b	0	-4,519	-6,341
2	b	137,4	133,8	135,1
	c	-137,4	-141,0	-139,7
3	c / d	0	59,47	61,35

$\Sigma H = 0$ ✓ , $\Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q

$q_d = 22{,}9$ kN/m		—	FG A
(S)	i-k	Q_{ik} kN	Q_{ik} kN
①	a	-3,974	-5,796
	b	-2,168	-3,745
②	b	134,7	136,1
	c	-140,7	-139,3
③	c	60,70	62,70
	d	60,03	61,91

STABNORMALKRÄFTE N_S

$q_d = 22{,}9$ kN/m		—	FG A
(S)	i-k	N_S kN	N_S kN
①	a-b	-133,8	-135,1
②	b-c	-59,47	-61,35
③	c-d	-141,0	-139,7

(N<0 DRUCK)

MAX. FELDMOMENT M_F – STAB ② b–c

$q_d = 22{,}9$ kN/m	
M_0	144,40
M_1	294,60
v	0,006168
ξ_M	0,4871
x_M m	5,845
max M_F kNm	290,3

NACHWEISE:

KNOTEN:

$\max M = M_{cb} = -149{,}3$ kNm $= M_{k,d}$ ✓

$\max \varphi = \varphi_{cl} = \bar{\varphi}_c / C_d = 24{,}13 \cdot 10^{-3}$ RAD $< \varphi_{kd} = 80{,}7 \cdot 10^{-3}$ RAD ✓

=> WEITERE ROTATION MÖGLICH!

ANMERKUNG: BEI STEIFENLOSEN KNOTEN IST DIE MÖGLICHE ROTATION BEGRENZT! SIEHE KNOTENCHARAKTERISTIK

STÄBE:

NACHWEIS DER INTERAKTION:

$\dfrac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$: $\dfrac{\max Q_{cb,i}}{Q_{pl,d}} = 0{,}3400 \rightarrow M_{pl,c} = -285{,}5$ kNm

$M_{cb} = -149{,}3$ kNm $< M_{pl,c} = -285{,}5$ kNm ✓

$\max M = M_F = 290{,}3$ kNm $\quad Q_F \doteq 0 \Rightarrow M_{pl} = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$M_F = 290{,}3$ kNm $> M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm $\rightarrow$ FG

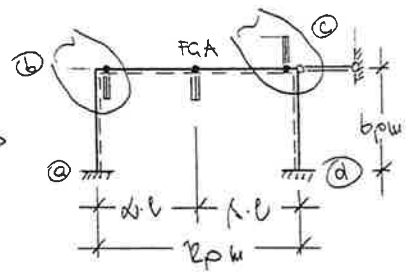
SYSTEM MIT FG A IM FELD (STAB ②)

LAGE DES FG's → β-BEDINGUNG

$\beta \le \dfrac{1}{\varepsilon} \cdot \arccos \dfrac{M_0 + M_{ki}}{M_0 + M_F}$

$\beta \le \dfrac{1}{0{,}4778} \cdot \arccos \dfrac{144{,}40 - 149{,}3}{144{,}40 + 285{,}4} = 0{,}5098$

$\beta = 0{,}5098 \rightarrow \alpha = 0{,}4902$



UNBEKANNTEN: $\varphi_b, \varphi_c, v_c, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_A$

LF $\bar{\varrho}_A = 1{,}0$:

$\underline{a_{1b} = a_{b1}} = -(\ell_1/\ell_2) \cdot F_{12} = -\underline{0{,}5344}$ $\quad$ $\underline{a_{2b} = a_{b2}} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{13} = \underline{0{,}4752}$

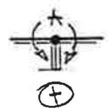
$\underline{a_{3b} = a_{b3}} = 0$ $\quad$ $\underline{a_{4b} = a_{b4}} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{12} = \underline{0{,}5344}$

$\underline{a_{5b} = a_{b5}} = -(\ell_1/\ell_2) \cdot F_{13} = -\underline{0{,}4752}$ $\quad$ $\underline{a_{6b}} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{14} = \underline{0{,}4910}$

$$M_A^0 = \frac{\sin\varepsilon \cdot \xi'}{\sin\varepsilon} \cdot M_{ik}^0 + \frac{\sin\varepsilon \cdot \xi}{\sin\varepsilon} \cdot M_{ki}^0 + \frac{1}{\varepsilon^2}\left[\frac{\cos\varepsilon \cdot (0{,}5-\xi)}{\cos\varepsilon/2} - 1\right] \cdot q \cdot \ell^2$$

$\xi' = \beta$, $\xi = \alpha$, $\varepsilon_2 = 0{,}4778$, $\ell_2 = 12{,}0\,m$, $M_{ik}^0 = M_{ki}^0 = -275{,}6\,kNm$

$\underline{a_{b0}} = -M_A^0 = -138{,}2\,kNm$



$\underline{M_A} = M_{pl,d} = \underline{285{,}4\,kNm}$

GLEICHGEWICHTSBEDINGUNG FÜR KG A :

$$a_{b1} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{b2} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{b3} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{b4} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{b5} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{b6} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{b0} = -M_A$$

LÖSUNG SIEHE VORHER

NACHWEISE :

KNOTEN (c) MASSGEBEND

$\max M_k = M_{cb} = -149{,}3\,kNm = M_{k\,pl,d} = -149{,}3\,kNm$ ✓

$\max \vartheta = \vartheta_c = \bar{\vartheta}_c / C_d = 29{,}80 \cdot 10^{-3}$ RAD $\leq \vartheta_{k,d} = 30{,}7 \cdot 10^{-3}$ RAD

(BEI STEIFENLOSEN KNOTEN IST DIE ROTATION BEGRENZT – PROBLEMATIK : TABELLEN BZW. WERTE FÜR DIE KOMBINATION IPE – IPE)

STÄBE :

NACHWEIS DER INTERAKTION FÜR $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}1$:

$\max Q = Q_{cbli} = -141{,}4\,kN$ $\quad$ $\frac{Q_{cbli}}{Q_{pl,d}} = 0{,}3376 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c} = -283{,}6\,kNm$

$\underline{M_{cb} = -149{,}3\,kNm \leq M_{pl,c} = -283{,}6\,kNm}$ ✓

$\underline{\max M = M_A = 285{,}4\,kNm = M_{pl,d}}$ ✓

$\Rightarrow \quad \underline{q_d = 22{,}9\,kN/m = q_{TRAGLAST}}$ $\quad$ $(H_d = 54{,}96\,kN)$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL KG. TH. II. ORD

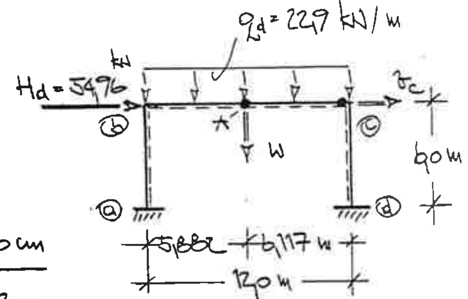
VERFORMUNGEN :

$\xi = 0{,}4962$, $\xi' = 1 - \xi$

M_i :	$\Delta W = -0{,}02550\,m$
M_k :	$\Delta W = -0{,}03096\,m$
q :	$\Delta W = 0{,}1433\,m$
ϱ_A :	$\Delta W = 0{,}03303\,m$

$\underline{W} = 0{,}1199\,m \;\hat{=}\; \underline{12{,}0\,cm}$

$\underline{\vartheta_E} = \bar{\vartheta}_E / C_d = 0{,}04197\,m \;\hat{=}\; \underline{4{,}2\,cm}$



BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

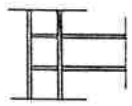
STIELE : SIEHE E. TH. II. ORD (ELAST. – PLAST.)

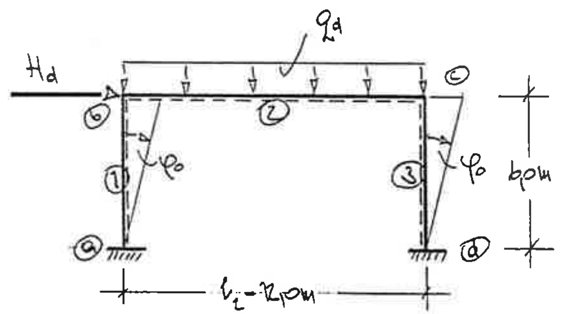
RIEGEL : SIEHE KG. TH. II. ORD (PLAST. – PLAST.)

MIT $S_k = \ell = 12{,}0\,m$

A5.6.1 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST. – ELAST.)

MIT ELAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN
(EINLEITUNGSSTEIFEN)





$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400 – St 37
$J = 23\,130\ cm^4$
$E = 2{,}1 \cdot 10^4\ kN/cm^2$
$\Gamma_M = 1{,}1$
$\varphi_0 = 0{,}002598$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$q_d = 8{,}00\ kN/m \rightarrow H_d = 19{,}20\ kN$

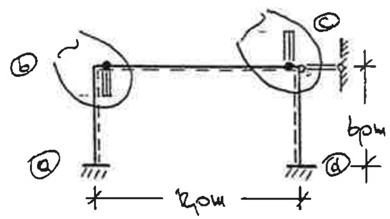
$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$ $\qquad C_d = 7360\ kNm$

(S)	N_s [kN]	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	η_s
1	50	1,0	0,2619	3,995	2,001	5,996	3,995	2,001	5,996
2	30	0,5	0,3128	3,987	2,003	–	1,993	1,002	–
3	55	1,0	0,2118	3,994	2,001	5,996	3,994	2,001	5,996

KOEFFIZIENTEN

UNBEKANNTEN:

$\varphi_b, \varphi_c, v_c, \vartheta_b, \vartheta_c$



ERMITTLUNG WIE UNTER E.TH. I. ORD. (EE)
(STEIFENLOSER KNOTEN)

LF q_d, H_d:

$M^0_{bc} = M_{cb} = -0{,}08347 \cdot q \cdot l^2 = -96{,}16\ kNm$

$a_{10} = -a_{20} = M^0_{bc} = \underline{-96{,}16\ kNm}$

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = \underline{-19{,}47\ kN}$

$a_{40} = -M^0_{bc} = \underline{96{,}16\ kNm}$

$M_{bc}(\bar{\vartheta}_b) = C_{KI}/C_d \cdot \bar{\vartheta}_b = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_b = \underline{6{,}837 \cdot \bar{\vartheta}_b}$

FÜR $M_{bc}(\bar{\vartheta}_b) \leq M_{k_{el},d} = 89{,}01\ kNm$ (SIEHE FEDER-CHARAKTERISTIK)

$a_{50} = M^0_{cb} = \underline{-96{,}16\ kNm}$

$M_{cb}(\bar{\vartheta}_c) = -\bar{C}_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_c = \underline{-6{,}837 \cdot \bar{\vartheta}_c}$

GLEICHUNGSSYSTEM
(SIEHE VORHER)

$$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	LF
5,988	1,002	-0,9993	-1,993	-1,002	96,16
1,002	5,987	-0,9993	-1,002	-1,993	-96,16
-0,9993	-0,9993	0,6638	+	+	19,47
-1,993	-1,002	+	8,830 (x)	1,002	-96,16
-1,002	-1,993	+	1,002	8,830 (*)	96,16
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	DET $(\bar{A})$
26,83	-7,731	58,08	-7,188	13,07	> +

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7360\ kNm$

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}993 + 6{,}837 = 8{,}830$

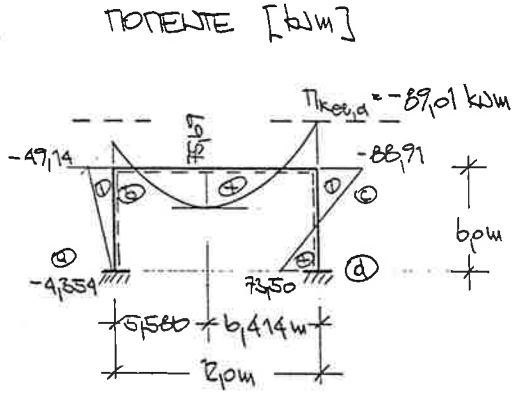
(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1{,}993 + 6{,}837 = 8{,}830$

– – ┘ . . SYSTEM MIT IDEAL STARREN KNOTEN

STABENDMOMENTE :

	$q_d = 8{,}00$ kN/m	
(S) i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
① a	0	−4,354
① b	0	−49,14
② b	−96,16	−47,14
② c	−96,16	−88,91
③ c	0	−88,91
③ d	0	73,50

MOMENTE [kNm]



KONTROLLE : $M_{bc}(\bar{\varphi}_b) = 6{,}837 \cdot \bar{\varphi}_b = -49{,}14$ kNm ✓

$M_{cb}(\bar{\varphi}_c) = -6{,}837 \cdot \bar{\varphi}_c = -88{,}95$ kNm ✓

STABENDKRÄFTE R_{ik}

	$q_d = 8{,}00$ kN/m	
(S) i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
① a-b	0	−7,660
② b	48,00	44,69
② c	−48,00	−51,31
③ c-d	0	26,85

$\Sigma H = 0$ ✓ , $\Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

	$q_d = 8{,}00$ kN/m	
(S)	i-k	Q_{ik} kN
①	a	−7,530
①	b	−7,348
②	b	44,80
②	c	−51,34
③	c	26,94
③	d	26,99

STABNORMALKRÄFTE N_s

	$q_d = 8{,}00$ kN/m	
(S)	i-k	N_s kN
①	a-b	−44,69
②	b-c	−26,85
③	c-d	−51,31

(N < 0 DRUCK)

MAX. FELDMOMENT   STAB ② b-c

$q_d = 8{,}00$ kN/m	
M_0	11770
M_1	23670
v	0,01078
ξ_m	0,4655
x_m m	5,586
$\max M_F$ kNm	75,69

NACHWEISE :

KNOTEN : → ⓒ MASSGEBEND

$\max M_k = M_{cb} = -88{,}95$ kNm ≤ $-89{,}01$ kNm $= M_{kel,d}$ ✓

STÄBE:

$\max M = M_c = -88{,}91$ kNm

$\max \sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{51{,}31}{84{,}50} + \frac{8891}{1160} = 8{,}272$ kN/cm²

$\max \sigma = -8{,}272$ kN/cm² $< \sigma_{R,d} = -21{,}82$ kN/cm² ✓

$\max \tau = \frac{51{,}34 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = 1{,}688$ kN/cm² $< \tau_{R,d} = 12{,}60$ kN/cm² ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL FG. TH. II. ORD, (IDEAL STARRER KNOTEN)

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4655 \quad , \xi' = 1 - \xi$

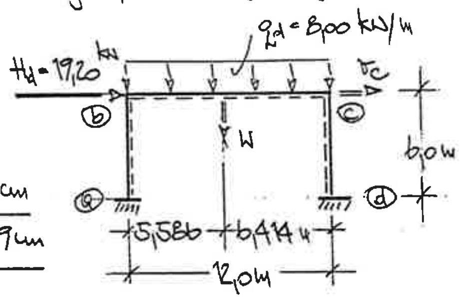
M_i : $\Delta w = -0{,}01030$ m

M_k : $\Delta w = -0{,}01781$ m

q : $\Delta w = 0{,}04913$ m

$w = 0{,}02102$ m $\hat{=} 2{,}1$ cm

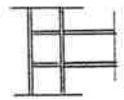
$v_c = \bar{v}_c / C_d = 0{,}007891$ m $\hat{=} 0{,}79$ cm



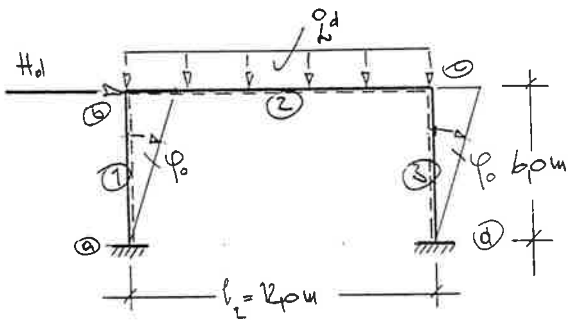
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS

SIEHE E.-TH. II. ORD (E.E) - IDEAL STARRER KNOTEN

A5.B.2 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. - (ELAST. PLAST.)



MIT ELAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN (EINLEITUNGSSTEIFEN)



$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$

IPE 400 - St 37

$J = 23130$ cm⁴

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm²

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$q_d = 14{,}6$ kN/m $\rightarrow H_d = 35{,}04$ kN

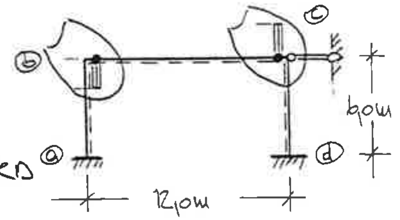
$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$ $\qquad C_d = 7360$ kNm

(S)	N_s kN	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
1	85	1,0	0,2632	3,991	2,002	5,993	3,991	2,002	5,993
2	55	0,5	0,4235	3,976	2,006	-	1,988	1,003	-
3	95	1,0	0,2783	3,990	2,003	5,992	3,990	2,003	5,992

KOEFFIZIENTEN

UNBEKANNTEN: $\varphi_b, \varphi_c, v_c, \vartheta_b, \vartheta_c$

ERMITTLUNG WIE UNTER E-TH. II. ORD (E.E) - STEIFENLOSER KNOTEN



LF q_d, H_d:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08358 \cdot q_d \cdot l_2^2 = -175{,}7$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = M^0_{bc} = -175{,}7$ kNm

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = -35{,}74$ kN

$a_{40} = -M^0_{bc} = 175{,}7$ kNm

$M_{bc}(\bar\psi_b) = C_{KI}/C_d \cdot \bar\psi_b - \bar C_{KI} \cdot \bar\psi_b = 6{,}837 \cdot \bar\psi_b$

FÜR $M(\psi_b) \le M_{k,pl,d} = 164{,}1$ kNm SIEHE FEDER-CHARAKTERISTIK

$a_{50} = M^0_{cb} = -175{,}7$ kNm

$M_{cb}(\bar\psi_c) = -\bar C_{KI} \cdot \bar\psi_c = -6{,}837 \cdot \bar\psi_c$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$[\bar A] \cdot \{X\} = -\{B\}$

$\bar\varphi_b$	$\bar\varphi_c$	$\bar\tau_c$	$\bar\psi_b$	$\bar\psi_c$	LF
5,779	1,003	-0,9988	-1,988	-1,003	175,7
1,003	5,776	-0,9988	-1,003	-1,988	-175,7
-0,9988	-0,9988	0,6618	0	0	35,74
-1,988	-1,003	0	8,825 (x)	1,003	-175,7
-1,003	-1,988	0	1,003	8,825 (*)	175,7

$\varphi_i = \bar\varphi_i / C_d$

$C_d = 7360$ kNm

$\bar\varphi_b$	$\bar\varphi_c$	$\bar\tau_c$	$\bar\psi_b$	$\bar\psi_c$	DET $(\bar A)$
49,30	-14,01	107,3	-13,11	23,85	> 0

(x) $\bar a_{44} = a_{44} + \bar C_{KI} = 1{,}788 + 6{,}837 = 8{,}625$

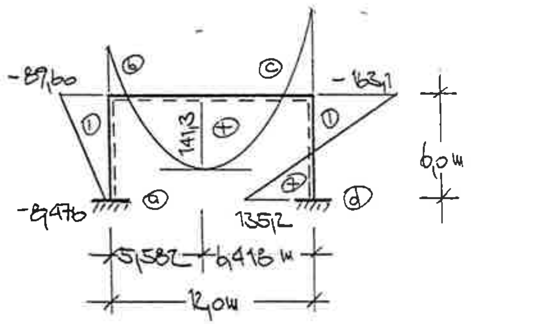
* $\bar a_{55} = a_{55} + C_{KI} = 1{,}788 + 6{,}837 = 8{,}625$

– – –┘ . . . SYSTEM MIT IDEAL STARREN KNOTEN

STABENDMOMENTE :

(S)	i-k	$q_d = 14{,}6$ kN/m: M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-8,476
1	b	0	-89,58
2	b	-175,7	-89,60
2	c	-175,7	-163,0
3	c	0	-163,1
3	d	0	135,2

MOMENTE [kNm]



VERLAUF ZWISCHEN DEN ENDMOMENTEN NACH TH. I. ORD.

KONTROLLE :

$M_{bc} = 6{,}837 \cdot \bar\psi_b = -89{,}63$ kNm ✓

$M_{cb} = -6{,}837 \cdot \bar\psi_c = -163{,}1$ kNm ✓

STABENDKRÄFTE R_{ik}

(S)	i-k	$q_d = 14{,}6$ kN/m: R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a, b	0	-14,06
2	b	87,60	81,48
2	c	-87,60	-93,72
3	c, d	0	49,12

$\Sigma H = 0$ ✓, $\Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

$q_d = 14{,}6$ kN/m		
Ⓢ	i-k	Q_{ik} kN
①	a	-13,73
	b	-13,16
②	b	81,05
	c	-93,62
③	c	49,31
	d	49,49

STABNORMALKRÄFTE N_S

$q_d = 14{,}6$ kN/m		
Ⓢ	i-k	N_S kN
①	a-b	-81,48
②	b-c	-49,12
③	c-d	-93,72

(N < + DRUCK)

MAX. FELDMOMENT M_F STAB ② b-c

$q_d = 14{,}6$ kN/m	
M_0	117,20
M_1	237,20
V	0,01472
ξ_M	0,4652
x_M m	5,583
max M_F kNm	141,3

NACHWEISE :

KNOTEN : MASSGEBEND ©

$\max M_k = M_{cb} = -163{,}1 \text{ kNm} \leq M_{kpl,d} = -164{,}1 \text{ kNm}$ ✓

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

STÄBE :

NACHWEIS DER INTERAKTION FÜR $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$:

$\max Q = Q_{cb} = -93{,}62 \text{ kN} \rightarrow \frac{\max Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}2240 \rightarrow M_{pl,Q} = M_{pl,d}$

$\max M = M_{cb} = -163{,}1 \text{ kNm} \leq M_{pl,d} = -285{,}4 \text{ kNm}$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. I. ORD. - IDEAL STARRE KNOTEN

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}4652$, $\xi' = 1-\xi$

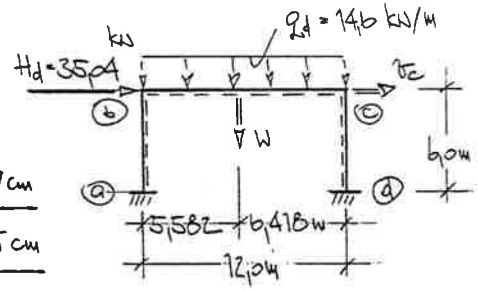
M_i : $\Delta w = -0{,}01894$ m

M_k : $\Delta w = -0{,}03292$ m

q : $\Delta w = 0{,}07040$ m

$\underline{w} = 0{,}03854 \text{ m} \mathrel{\hat=} \underline{3{,}9 \text{ cm}}$

$\underline{v_c} = \bar{F}_c / C_d = 0{,}01456 \text{ m} \mathrel{\hat=} \underline{1{,}5 \text{ cm}}$

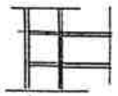


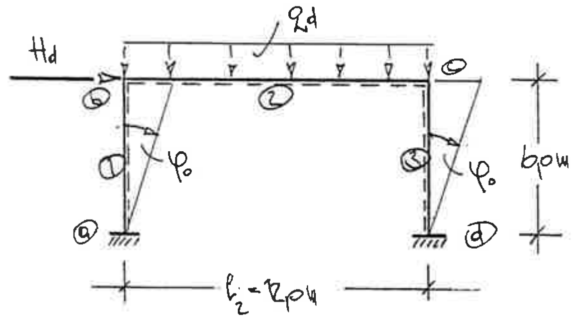
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS

SIEHE BEISPIEL E-TH. II. ORD - (EE) MIT IDEAL STARREN KNOTEN

A5.6.3 FLIESSGELENKTHEORIE I. ORD. – (PLAST.-PLAST)

MIT ELAST.,PLAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN
(EINLEITUNGSSTEIFEN)





$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$

IPE 400 – St 37

$J = 23\,130$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_o = 0{,}003896$ (VORVERF.)

1. ANNAHME

$q_d = 24{,}5$ kN/m $\rightarrow$ $H_d = 58{,}8$ kN

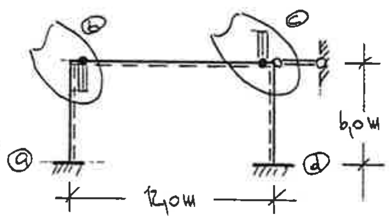
$\varepsilon_s = l_s \cdot \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$ $C_d = 7360$ kNm

(S)	N_s kN	l_i/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	η_s
1	150	1,0	0,3497	3,984	2,004	5,988	3,984	2,004	5,988
2	75	0,5	0,4946	3,967	2,008	–	1,984	1,004	–
3	150	1,0	0,3497	3,984	2,004	5,988	3,984	2,004	5,988

KOEFFIZIENTEN:

UNBEKANNTEN:

$\varphi_b, \varphi_c, \vartheta_c, \vartheta_b, \vartheta_c$



ERMITTLUNG WIE UNTER E-TH. I. ORD. (E.E.) – STEIFENLOSE KNOTEN

LF q_d, H_d:

$M^o_{bc} = M^o_{cb} = -0{,}08366 \cdot p \cdot l_2^2 = -295{,}2$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = M^o_{bc} = -295{,}2$ kNm

$a_{30} = -H - \varphi_o \cdot (N_1 + N_3) = -57{,}97$ kN

$a_{40} = -M^o_{bc} = 295{,}2$ kNm

$M_{bc}(\bar{\vartheta}_b) = C_{KI}/C_d \cdot \bar{\vartheta}_b = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_b = 6{,}837 \cdot \bar{\vartheta}_b$

FÜR $M_{bc}(\bar{\vartheta}_b) \le M_{Kpl,d} = 164{,}1$ kNm SIEHE KNOTEN-FEDERCHARAKTERISTIK

$a_{50} = M^o_{cb} = -295{,}2$ kNm

$M_{cb}(\bar{\vartheta}_c) = M_{Kpl,d} = -164{,}1$ kNm = const.

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$[\bar{A}] \cdot \{X\} = -\{B\}$

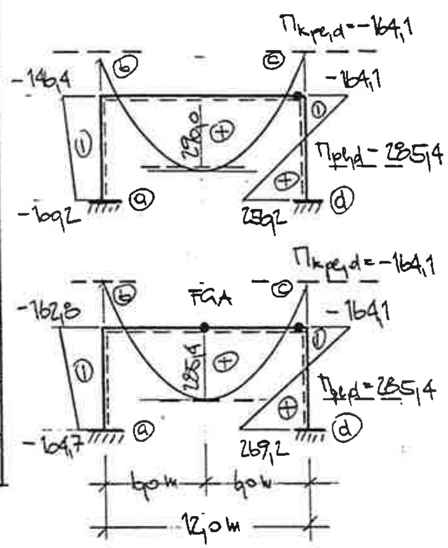
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{S}_A$	LF
5,968	1,004	-0,9980	-1,984	-1,004	-0,5051	295,2
1,004	5,968	-0,9980	-1,004	-1,984	0,5051	-295,2
-0,9980	-0,9980	0,6585	∅	∅	∅	57,97
-1,984	-1,004	∅	8,821 (x)	1,004	0,5051	-295,2
-1,004	-1,984	∅	1,004	1,984	-0,5051	131,1
-0,5051	0,5051	∅	0,5051	-0,5051	0,4898	-137,3
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{S}_A$	DET($\bar{A}$)
124,4	46,54	359,2	-21,40	186,4	–	> ∅
135,1	53,04	376,2	-23,80	211,5	46,88	> ∅

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}984 + 6{,}837 = 8{,}821$

STABENDMOMENTE

q_d = 24,5 kN/m			–	FG A
S	i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-100,2	-164,7
	b	0	-146,1	-162,8
2	b	-275,2	-146,4	-162,7
	c	-275,2	-164,1 ✓	-164,0 ✓
3	c	0	-164,1	-164,1
	d	0	256,2	269,2
2	A	148,1	–	285,4 ✓

MOMENTE [kNm]



STABENDKRÄFTE R_{ik}

q_d = 24,5 kN/m			–	FG A
S	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a / b	0	-9,424	-11,55
2	b	147,0	145,5	146,7
	c	-147,0	-148,5	-147,1
3	c / d	0	68,28	70,35

$\Sigma H = 0$, $\Sigma V = 0$

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

q_d = 24,5 kN/m		–	FG A
S	i-k	Q_{ik} kN	Q_{ik} kN
1	a	-8,840	-6,97
	b	-6,304	-8,212
2	b	146,8	148,3
	c	-148,0	-146,6
3	c	69,81	72,02
	d	68,80	70,93

STABNORMALKRÄFTE N_s

q_d = 24,5 kN/m		–	FG A
S	i-k	N_s kN	N_s kN
1	a-b	-145,5	-146,7
2	b-c	-68,28	-70,35
3	c-d	-148,5	-147,1

($N < 0$ DRUCK)

MAX. FELDMOMENT M_F STAB 2 b-c

q_d = 24,5 kN/m	
M_0	1442,0
M_1	2942,0
v	0,002458
ξ_M	0,4950
x_M m	5,940
max M_F kNm	290,0

NACHWEISE :

KNOTEN :

$\max M = M_{cb} = -164,1$ kNm $= M_{k,pl,d} = -164,1$ kNm ✓

(ROTATION "NICHT" BEGRENZT)

STÄBE:

NACHWEIS DER INTERAKTION FÜR $\frac{\max N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$:

$$\frac{\max Q_{cb,li}}{Q_{pl,d}} = \frac{-149{,}9}{-418{,}8} = 0{,}3579 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c} = -281{,}4 \text{ kNm}$$

$$\underline{M_{cb} = -164{,}1 \text{ kNm} < M_{pl,c} = -281{,}4 \text{ kNm}} \checkmark$$

$$\max M = \underline{M_F = 290{,}0 \text{ kNm} > M_{pl,d} = 285{,}4 \text{ kNm}} \Rightarrow \text{FG A}$$

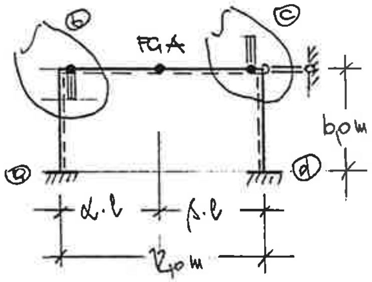
SYSTEM MIT FG A IM FELD (STAB ②)

LAGE DES FG'S → β-BEDINGUNG

$$\beta \leq \frac{1}{2} \cdot \arccos \frac{M_0 + M_{ki}}{M_b + M_f}$$

$$\beta \leq \frac{1}{0{,}4946} \cdot \arccos \frac{1442{,}0 - 164{,}1}{1442{,}0 + 285{,}4} = 0{,}5012$$

$$\rightarrow \underline{\beta = \alpha = 0{,}5}$$



UNBEKANNTEN: $\varphi_b, \varphi_c, \delta_c, \vartheta_b, \vartheta_c, \xi_A$

LF $\bar{\xi}_A = 1{,}0$:

$\underline{a_{1b} = a_{b1}} = -(l_1/l_2) \cdot F_{12} = \underline{-0{,}5051}$

$a_{3b} = a_{b3} = 0$

$\underline{a_{5b} = a_{b5}} = -(l_1/l_2) \cdot F_{13} = \underline{-0{,}5051}$

$M_A^0 = 148{,}1 \text{ kNm}$

$\underline{a_{b0}} = -M_A^0 = \underline{-148{,}1 \text{ kNm}}$

$\underline{M_A} = M_{pl,d} = \underline{285{,}4 \text{ kNm}}$

$\underline{a_{2b} = a_{b2}} = (l_1/l_2) \cdot F_{13} = \underline{0{,}5051}$

$\underline{a_{4b} = a_{b4}} = (l_1/l_2) \cdot F_{12} = \underline{0{,}5051}$

$\underline{a_{bb}} = (l_1/l_2) \cdot F_{14} = \underline{0{,}4898}$

GLEICHGEWICHTSBEDINGUNG FÜR FG A:

$$a_{b1} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{b2} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{b3} \cdot \bar{\delta}_c + a_{b4} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{b5} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{bb} \cdot \bar{\xi}_A + a_{b0} = -M_A$$

LÖSUNG SIEHE VORHER

NACHWEISE:

KNOTEN:

KN ⓒ: $\underline{M_{cb} = -164{,}1 \text{ kNm}} = M_{k\,pl,d} = \underline{-164{,}1 \text{ kNm}} \checkmark$

KN ⓑ: $\underline{M_{bc} = -162{,}8 \text{ kNm}} < M_{k\,pl,d} = \underline{-164{,}1 \text{ kNm}} \checkmark$

(→ KEIN WEITERES FG MEHR MÖGLICH!
KINEMAT. BALKENKETTE

STÄBE:

INTERAKTION FÜR $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$

$$\frac{\max Q_{cb,li}}{Q_{pl,d}} = \frac{-148{,}8}{-418{,}8} = 0{,}3553 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c} = -281{,}7 \text{ kNm}$$

$$\underline{M_{cb} = -164{,}1 \text{ kNm} < M_{pl,c} = -281{,}7 \text{ kNm}} \checkmark$$

$$\max M = M_A = \underline{285{,}4 \text{ kNm} = M_{pl,d}} \checkmark$$

$$\Rightarrow q_d = \underline{q_{TRAGLAST} = 24{,}5 \text{ kN/m} \;\therefore\; H_d = 58{,}80 \text{ kN}}$$

NACHWEIS VON GRENZ (b/t):

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL FG. TH. II. ORD. - IDEAL STARRE KNOTEN

VERFORMUNGEN

$\xi = 0{,}5 \quad , \quad \xi' = 1 - \xi$

η_i : $\Delta W = -0{,}03403$ m

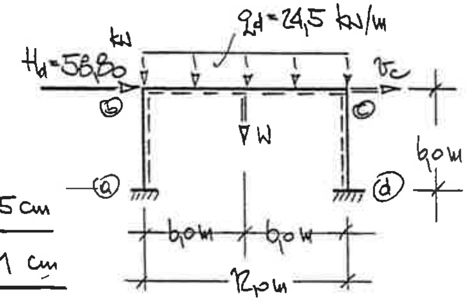
η_k : $\Delta W = -0{,}03433$ m

ρ_L : $\Delta W = 0{,}1537$ m

$-\rho_A$: $\Delta W = 0{,}01711$ m

$\underline{W} = 0{,}1045$ m $\hat{=}$ $\underline{10{,}5 \text{ cm}}$

$\underline{v_c} = \bar{v}_c / C_d = 0{,}05114$ m $\hat{=}$ $\underline{5{,}1 \text{ cm}}$

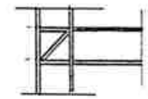


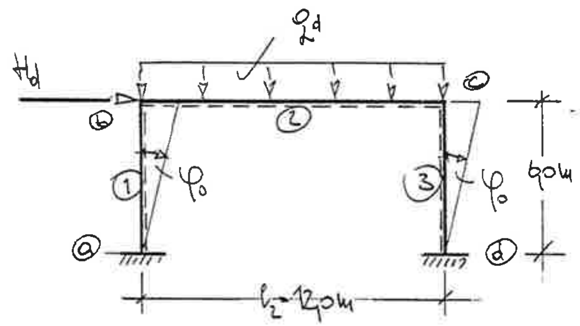
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS :

SIEHE BEISPIEL FG. TH. II. ORD. - IDEAL STARRE KNOTEN

A.5.9.1 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. - (ELAST.-ELAST.)

MIT ELAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN
(EINLEITUNGS- UND QUERKRAFTSTEIFEN)





$\boxed{\dfrac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 5}$

IPE 400 - St 37

$J = 23\,130$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}002578$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME

$\underline{q_d = 17{,}6 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 42{,}72 \text{ kN}}$

$\varepsilon_s = \ell_s \sqrt{\dfrac{N_s}{(EJ)_d}}$ $\qquad C_d = 7360$ kN/m

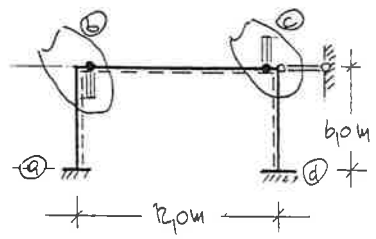
S	N_s kN	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	χ_s	λ_s	η_s
1	100	1,0	0,2855	3,989	2,003	5,992	3,989	2,003	5,992
2	65	0,5	0,4604	3,972	2,007	–	1,986	1,004	–
3	115	1,0	0,3062	3,987	2,003	5,991	3,987	2,003	5,991

KOEFFIZIENTEN :

UNBEKANNTEN : $\varphi_b, \varphi_c, v_c, \vartheta_b, \vartheta_c$

ERMITTLUNG WIE UNTER E-TH. II. ORD.

E.E. - STEIFENLOSER KNOTEN



LF q_d, H_d :

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08363 \cdot q \cdot \ell_2^2 = -214{,}4$ kNm

$a_{10} = -a_{20} = M^0_{bc} = -214{,}4$ kNm $a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = -43{,}28$ kN

$a_{40} = -M^0_{bc} = 214{,}4$ kNm

$M_{bc}(\bar{\eta}_b) = C_{KI}/C_d \cdot \bar{\eta}_b = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\eta}_b = 13{,}61 \cdot \bar{\eta}_b$

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

$a_{50} = M^0_{cb} = -214{,}4$ kNm

$M_{cb}(\bar{\eta}_c) = -C_{KI}/C_d \cdot \bar{\eta}_c = -\bar{C}_{KI} \cdot \bar{\eta}_c = -13{,}61 \cdot \bar{\eta}_c$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

(SIEHE VORHER)

$$[\bar{A}] \cdot \{X\} = -\{B\}$$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$	LF
5,975	1,004	-0,9987	-1,986	-1,004	214,4
1,004	5,973	-0,9985	-1,004	-1,986	-214,4
-0,9987	-0,9985	0,6609	0	0	43,28
-1,986	-1,004	0	15,60 (x)	1,004	-214,4
-1,004	-1,986	0	1,004	15,60 (*)	214,4

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$	DET ($\bar{A}$)
59,70	-21,71	122,9	-8,529	15,37	> 0

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7360$ kNm

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1,986 + 13,61 = 15,60$

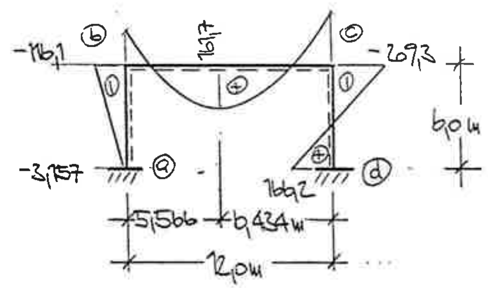
(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1,986 + 13,61 = 15,60$

--- ... SYSTEM MIT IDEAL STARREN KNOTEN

STABENDMOMENTE

(S)	i-k	$q_d = 17{,}8$ kN/m M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
1	a	0	-3,157
	b	0	-115,4
2	b	-214,4	-116,1
	c	-214,4	-269,3
3	c	0	-269,3
	d	0	166,2

MOMENTE [kNm]



(VERLAUF ZWISCHEN DEN ENDMOMENTEN N. TH. I. ORD.)

KONTROLLE : $M_{bc}(\bar{\eta}_b) = 13{,}61 \cdot \bar{\eta}_b = -116{,}1$ kNm ✓

$M_{cb}(\bar{\eta}_c) = -13{,}61 \cdot \bar{\eta}_c = -269{,}2$ kNm ✓

STABENDKRÄFTE R_{ik}

(S)	i-k	$q_d = 17{,}8$ kN/m R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
1	a, b	0	-19,25
2	b	166,8	99,03
	c	-166,8	-114,6
3	c, d	0	61,96

$\Sigma H = 0, \quad \Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

$q_d = 17{,}8$ kN/m		
(S)	i-k	Q_{ik} kN
1	a	$-13{,}99$
	b	$-18{,}18$
2	b	$99{,}56$
	c	$-114{,}8$
3	c	$61{,}92$
	d	$62{,}26$

STABNORMALKRÄFTE N_s

$q_d = 17{,}8$ kN/m		
(S)	i-k	N_s kN
1	a-b	$-99{,}03$
2	b-c	$-61{,}96$
3	c-d	$-114{,}6$

($N < 0$ DRUCK)

MAX. FELDMOMENT M_F STAB 2 b-c

$q_d = 17{,}8$ kN/m	
M_0	$12{,}090$
M_1	$24{,}500$
V	$0{,}01667$
ξ_M	$0{,}4638$
x_M m	$5{,}566$
$\max M_F$ kNm	$161{,}7$

NACHWEISE:

KNOTEN: → (c) MASSGEBEND

$\max M_K = M_{cb} = -209{,}3$ kNm $\le M_{K\,el,d} = -210{,}3$ kNm ✓

STÄBE:

$\max M = M_c = -209{,}3$ kNm , $N = 114{,}6$ kN (DRUCK)

$\max \sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{114{,}6}{84{,}5} + \frac{20930}{1160} = 19{,}40$ kN/cm²

$\max \sigma = -17{,}40$ kN/cm² $\le \sigma_{Rd} = -21{,}82$ kN/cm² ✓

$\max \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot t} = \frac{114{,}8 \cdot 654}{23130 \cdot 0{,}86} = 3{,}77$ kN/cm² $< \tau_{Rd} = 12{,}60$ kN/cm² ✓

$\sigma_v \le \sigma_{Rd}$

ERFÜLLT, FÜR $\sigma/\sigma_{Rd} \le 0{,}5$ ODER $\tau/\tau_{Rd} \le 0{,}5$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL FG. TH. I. ORD. – IDEAL STARRE KNOTEN

VERFORMUNGEN:

$\xi = 0{,}4638$ $\xi' = 1 - \xi$

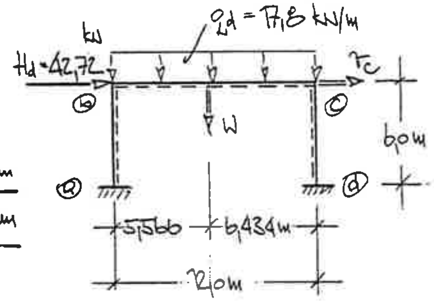
M_i: $\Delta w = -0{,}02464$ m

M_k: $\Delta w = -0{,}04236$ m

q: $\Delta w = 0{,}1105$ m

$w = 0{,}04350$ m $\hat{=}$ 4,4 cm

$\underline{\varphi_c} = \bar{\varphi}_c / C_d = 0{,}01670$ m $\hat{=}$ 1,7 cm

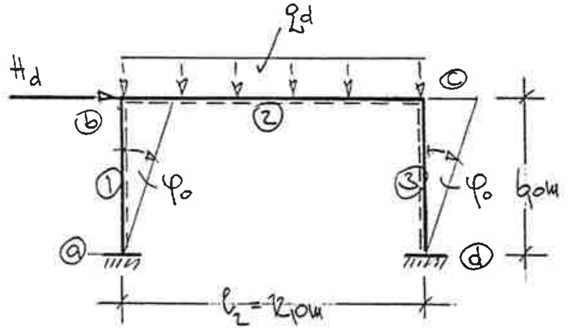


BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

SIEHE E.-TH. II. ORD. (E.E.) – IDEAL STARRE KNOTEN

A5.9.2 ELASTIZITÄTSTHEORIE II. ORD. – (ELAST.-PLAST.)

MIT ELAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN
(EINLEITUNGS- UND QUERKRAFTSTEIFEN)



$$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400 – St 37
$J = 23130$ cm^4
$E = 2,1 \cdot 10^4$ kN/cm^2
$\gamma_M = 1,1$
$\varphi_0 = 0,003896$ (VORVERDR.)

1. ANNAHME :

$q_d = 23,7$ kN/m $\rightarrow H_d = 56,88$ kN

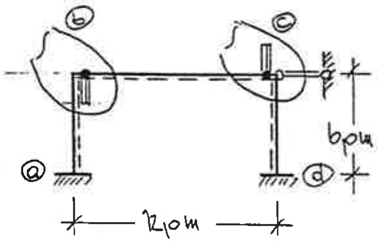
$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}}$ $\qquad C_d = 7360$ kNm

ⓢ	N_s kN	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
①	135	1,0	0,3318	3,985	2,004	5,989	3,985	2,004	5,989
②	85	0,5	0,5265	3,963	2,009	–	1,981	1,005	–
③	155	1,0	0,3555	3,983	2,004	5,987	3,983	2,004	5,987

KOEFFIZIENTEN :

UNBEKANNTEN : $\varphi_b, \varphi_c, \psi_c, \bar{\varphi}_b, \bar{\varphi}_c$

ERMITTLUNG WIE UNTER E-TH. II ORD.
E.E. – STEIFENLOSER KNOTEN



LF q_d, H_d :

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0,08372 \cdot q_d \cdot l_2^2 = -285,7$ kNm

$\underline{a_{10}} = -a_{20} = M^0_{bc} = \underline{-285,7 \text{ kNm}}$

$\underline{a_{30}} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_3) = \underline{-58,01 \text{ kN}}$

$\underline{a_{40}} = -M^0_{bc} = \underline{285,7 \text{ kNm}}$

$\underline{M_{bc}(\bar{\varphi}_b)} = C_{KI}/C_d \cdot \bar{\varphi}_b = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\varphi}_b = \underline{13,61 \cdot \bar{\varphi}_b}$

FÜR $M_{bc}(\bar{\varphi}_b) \le M_{kpl,d} = 285,4$ kNm (SIEHE KNOTEN-FEDERCHARAKTERISTIK)

$\underline{a_{50}} = M^0_{cb} = \underline{-285,7 \text{ kNm}}$

$\underline{M_{bc}(\bar{\varphi}_c)} = -C_{KI}/C_d \cdot \bar{\varphi}_c = -\bar{C}_{KI} \cdot \bar{\varphi}_c = \underline{-13,61 \cdot \bar{\varphi}_c}$ $\quad$ FÜR $M_{bc}(\bar{\varphi}_c) \le M_{kpl,d}$

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	$\bar{\bar{\varphi}}_b$	$\bar{\bar{\varphi}}_c$	LF
5,966	1,005	-0,9982	-1,981	-1,005	285,7
1,005	5,964	-0,9978	-1,005	-1,981	-285,7
-0,9982	-0,9978	0,6588	∅	∅	58,01
-1,981	-1,005	∅	15,59 (x)	1,005	-285,7
-1,005	-1,981	∅	1,005	15,59 (*)	285,7

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7360$ kNm

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\psi}_c$	$\bar{\bar{\varphi}}_b$	$\bar{\bar{\varphi}}_c$	DET$(\bar{A})$
80,24	-28,66	166,2	-11,30	20,59	> ∅

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1,981 + 13,61 = 15,59$

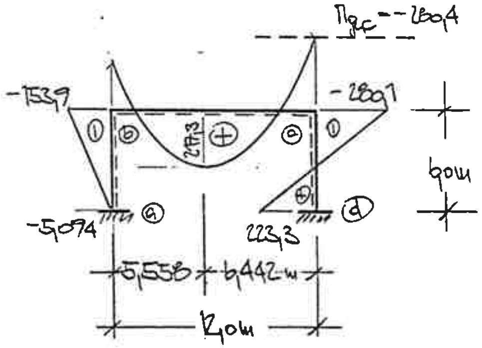
(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1,981 + 13,61 = 15,59$

– – ┘ . . . SYSTEM MIT IDEAL STARREN KNOTEN

STABENDMOMENTE :

	$q_d = 23{,}7$ kN/m	
(S) i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kN
① a	0	-5,094
① b	0	-153,9
② b	-285,7	-153,9
② c	-285,7	-280,1
③ c	0	-280,0
③ d	0	223,3

MOMENTE [kNm]



(VERLAUF ZW. DEN ENDMOMENTEN NACH TH. I. ORD.)

KONTROLLE: $M_{bc}(\bar{\varphi}_b) = 13{,}61 \cdot \bar{\varphi}_b = -153{,}8$ kNm ✓

$M_{cb}(\bar{\varphi}_c) = -13{,}61 \cdot \bar{\varphi}_c = -280{,}2$ kNm ✓

STABENDKRÄFTE R_{ik}:

	$q_d = 23{,}7$ kN/m	
(S) i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
① a / b	0	-25,84
② b	142,2	131,7
② c	-142,2	-152,7
③ c / d	0	82,70

$\Sigma H = 0, \Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

	$q_d = 23{,}7$ kN/m
(S) i-k	Q_{ik} kN
① a	-25,31
① b	-23,84
② b	132,6
② c	-153,0
③ c	82,70
③ d	83,30

STABNORMALKRÄFTE N_S

	$q_d = 23{,}7$ kN/m
(S) i-k	N_S kN
① a-b	-131,7
② b-c	-82,70
③ c-d	-152,7

(N < 0 DRUCK)

MAX. FELDMOMENT M_F STAB ② b-c

	$q_d = 23{,}7$ kN/m
M_0	12,310
M_1	25,050
V	0,01936
ξ_M	0,4632
x_M m	5,559
max M_F kNm	217,3

NACHWEISE :

KNOTEN : → © MASSGEBEND

$\max M_K = M_{cb} = -280{,}1$ kNm $\leq M_{K,pl,d} = 285{,}4$ kNm ✓

STÄBE:

NACHWEIS DER INTERAKTION FÜR $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$

$\underline{\max Q = Q_{cb}}$: $\frac{Q_{cb}}{Q_{pl,d}} = \frac{-153{,}0}{-418{,}8} = 0{,}3653 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c}^{*} = -280{,}4$ kNm

$\underline{M_{cb} = -280{,}1 \text{ kNm} < M_{pl,c} = -280{,}4 \text{ kNm}}$ ✓

$\underline{\max M = M_{dc}}$: $\frac{Q_{dc}}{Q_{pl,d}} \leq 0{,}33 \rightarrow M_{pl,d} = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$\underline{M_{dc} = 223{,}8 \text{ kNm} < M_{pl,d} = 285{,}4 \text{ kNm}}$ ✓

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE BEISPIEL FG. TH. II. ORD. - IDEAL STARRE KNOTEN

VERFORMUNGEN:

$\xi = 0{,}4632 \quad \xi' = 1 - \xi$

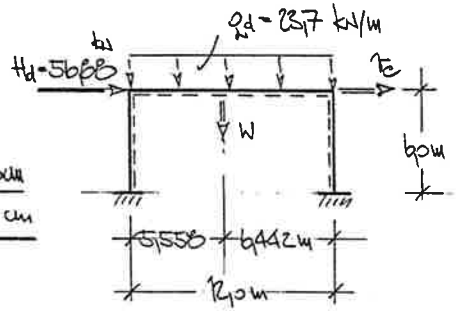
M_i : $\Delta W = -0{,}03290$ m

M_k : $\Delta W = -0{,}05706$ m

$\underline{\vartheta_i}$: $\Delta W = 0{,}1482$ m

$\underline{W} = 0{,}05824 \text{ m} \triangleq \underline{5{,}8 \text{ cm}}$

$\underline{r_c} = \bar{r}_c / C_d = 0{,}02258 \text{ m} \triangleq \underline{2{,}3 \text{ cm}}$



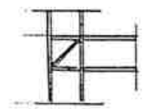
BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS:

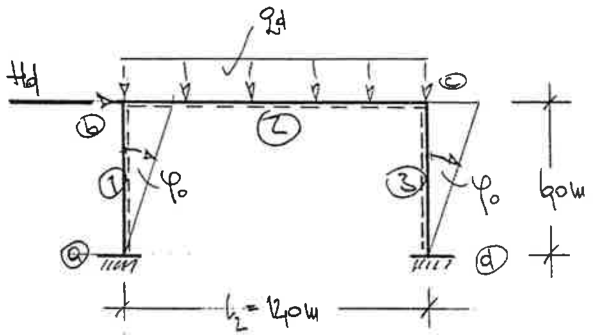
SIEHE E-TH. II. ORD.-(E.P.) - IDEAL STARRE KNOTEN

MIT $s_k = l = 2{,}0$ m FÜR DEN RIEGEL

A5.9.3 FLIESSGELENKTHEORIE II. ORD - (PLAST.-PLAST.)

MIT ELAST., PLAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN
(EINLEITUNGS- UND QUERKRAFTSTEIFEN)





$\boxed{\frac{q_d \cdot l_2}{H_d} = 5}$

IPE 400 - St 37

$J = 23\,130$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$\gamma_M = 1{,}1$

$\varphi_0 = 0{,}003896$ (VORVERF.)

$\boxed{\text{1. ANNAHME}}$

$\underline{q_d = 29{,}8 \text{ kN/m} \rightarrow H_d = 71{,}52 \text{ kN}}$

$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{(EJ)_d}} \qquad C_d = 7360$ kNm

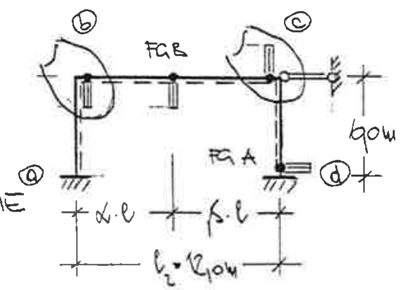
(S)	N_s kN	l_s/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	γ_s	λ_s	ψ_s
1	180	1,0	0,3831	3,980	2,005	5,985	3,980	2,005	5,985
2	75	0,5	0,5566	3,959	2,010	-	1,979	1,005	-
3	180	1,0	0,3831	3,980	2,005	5,985	3,980	2,005	5,985

KOEFFIZIENTEN:

UNBEKANNTEN:

$\varphi_b, \varphi_c, r_c, \vartheta_b, \vartheta_c, \rho_A, \rho_B$

ERMITTLUNG FÜR $\varphi_b, \varphi_c, r_c, \vartheta_b, \vartheta_c$ WIE UNTER E-TH. II. ORD. (E.E) - STEIFENLOSE KNOTEN



LF $\bar{\varrho}_A = 1{,}0$

$a_{1b} = a_{b1} = 0$ $\quad a_{2b} = a_{b2} = -\lambda_2 = -2{,}005$ $\quad a_{3b} = a_{b3} = \frac{1}{\ell_2} \cdot \eta_2 = 0{,}9975$

$a_{4b} = a_{b4} = 0$ $\quad a_{5b} = a_{b5} = 0$ $\quad a_{bb} = \kappa_2 = 3{,}980$

$a_{b0} = 0$ $\quad M_A = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$M_B^0 = 180{,}4$ kNm

$a_{70} = -M_B^0 = -180{,}4$ kNm $\quad M_B = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

LF $\bar{\varrho}_B = 1{,}0$:

LAGE DES FG's B ?

$\beta \le \frac{1}{2} \cdot \arccos \frac{M_b + M_{ki}}{M_0 + M_f}$ $\quad M_b = 13850$ kNm , $M_{ki} = M_{pl,c} = -272{,}1$ kNm (ANNAHME)

$M_f = M_B = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$\beta \le 0{,}5063$ $\quad$ ANNAHME: $\beta = \alpha = 0{,}5$

$a_{17} = a_{71} = -(\ell_1/\ell_2) \cdot F_{12} = -0{,}5065$ $\quad a_{27} = a_{72} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{13} = 0{,}5065$

$a_{37} = a_{73} = 0$ $\quad a_{47} = a_{74} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{12} = 0{,}5065$

$a_{57} = a_{75} = -(\ell_1/\ell_2) \cdot F_{13} = -0{,}5065$ $\quad a_{67} = a_{76} = 0$

$a_{77} = (\ell_1/\ell_2) \cdot F_{14} = 0{,}4870$

LF q_d, H_d:

$M^0_{bc} = M^0_{cb} = -0{,}08377 \cdot q \cdot \ell_2^2 = -357{,}5$ kNm

$a_{b} = -a_{20} = M^0_{bc} = -357{,}5$ kNm

$a_{30} = -H - \varphi_0 \cdot (N_1 + N_2) = -72{,}92$ kN

$a_{40} = -M^0_{bc} = 357{,}5$ kNm

$M_{bc}(\bar{\vartheta}_b) = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\vartheta}_b = 13{,}61 \cdot \bar{\vartheta}_b$ $\quad$ FÜR $M_{bc}(\vartheta_b) \le M_{k,pl,d} = 285{,}4$ kNm

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK).

$a_{50} = M^0_{cb} = -357{,}5$ kNm

$M_{cb} = M_{pl,c} = -272{,}1$ kNm (ANNAHME)

(STAB MASSGEBEND – AUS INTERAKTION!, DENN $M_{k,pl,d} = 285{,}4$ kNm)

GLEICHUNGSSYSTEM UND LÖSUNG

$a_{11} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{12} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{13} \cdot \bar{v}_c + a_{14} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{15} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{16} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{17} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{10} = 0$

$a_{21} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{22} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{23} \cdot \bar{v}_c + a_{24} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{25} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{26} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{27} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{20} = 0$

$a_{31} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{32} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{33} \cdot \bar{v}_c + a_{34} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{35} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{36} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{37} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{30} = 0$

$a_{41} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{42} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{43} \cdot \bar{v}_c + a_{44} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{45} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{46} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{47} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{40} = -M_{bc}(\bar{\vartheta}_b)$

$a_{51} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{52} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{53} \cdot \bar{v}_c + a_{54} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{55} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{56} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{57} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{50} = M_{cb}$

$a_{61} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{62} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{63} \cdot \bar{v}_c + a_{64} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{65} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{66} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{67} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{60} = M_A$

$a_{71} \cdot \bar{\varphi}_b + a_{72} \cdot \bar{\varphi}_c + a_{73} \cdot \bar{v}_c + a_{74} \cdot \bar{\vartheta}_b + a_{75} \cdot \bar{\vartheta}_c + a_{76} \cdot \bar{\varrho}_A + a_{77} \cdot \bar{\varrho}_B + a_{70} = -M_B$

$[\bar{A}] \cdot \{X\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{\varrho}_A$	$\bar{\varrho}_B$	LF
5,959	1,005	-0,9975	-1,979	-1,005	0	-0,5065	357,5
1,005	5,959	-0,9975	-1,005	-1,979	-2,005	0,5065	-357,5
-0,9975	-0,9975	0,6568	0	0	0,9975	0	72,92
-1,979	-1,005	0	15,57 (x)	1,005	0	0,5065	-357,5
-1,005	-1,979	0	1,005	1,979	0	-0,5065	87,40
0	-2,005	0,9975	0	0	3,980	0	285,4
-0,5065	0,5065	0	0,5065	-0,5065	0	0,4870	-165,0
$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\vartheta}_b$	$\bar{\vartheta}_c$	$\bar{\varrho}_A$	$\bar{\varrho}_B$	DET($\bar{A}$)
225,8	62,29	633,0	-19,65	30,62	-55,55	293,4	> 0

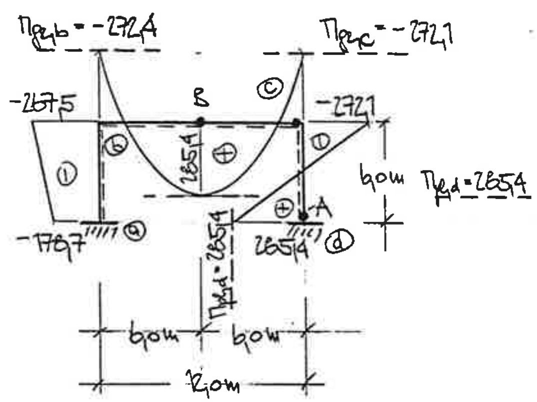
(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}979 + 13{,}61 = 15{,}59$ $\quad \varphi_i = \bar{\varphi}_i / C_d$

$C_d = 7360$ kNm

STABENDMOMENTE

	$q_d = 29{,}8$ kN/m		
Ⓢ	i-k	M^0_{ik} kNm	M_{ik} kNm
①	a	0	$-178{,}7$
	b	0	$-267{,}3$
②	b	$-357{,}5$	$-267{,}5$
	c	$-357{,}5$	$-272{,}1$ ✓
③	c	0	$-272{,}1$
	d	0	$285{,}4$ ✓
②	s	$180{,}5$	$285{,}5$ ✓

MOMENTE [kNm]



KONTROLLE : $M_{bc}(\bar{\varphi}_b) = 13{,}61 \cdot \bar{\varphi}_b = -267{,}4$ kNm ✓

STABENDKRÄFTE R_{ik}

	$q_d = 29{,}8$ kN/m		
Ⓢ	i-k	R^L_{ik} kN	R_{ik} kN
①	a	0	$-18{,}05$
	b		
②	b	$178{,}8$	$178{,}4$
	c	$-178{,}8$	$-179{,}2$
③	c	0	$89{,}63$
	d		

$\Sigma H = 0,\ \Sigma V = 0$ ✓

STABENDQUERKRÄFTE Q_{ik}

	$q_d = 29{,}8$ kN/m	
Ⓢ	i-k	Q_{ik} kN
①	a	$-17{,}35$
	b	$-11{,}83$
②	b	$181{,}3$
	c	$-178{,}4$
③	c	$91{,}85$
	d	$90{,}33$

STABNORMALKRÄFTE N_s

	$q_d = 29{,}8$ kN/m	
Ⓢ	i-k	N_s kN
①	a-b	$-178{,}4$
②	b-c	$-89{,}63$
③	c-d	$-179{,}2$

($N < 0$ DRUCK)

NACHWEISE :

KNOTEN :

ⓑ : $M_{bc} = -267{,}5$ kNm $\leq M_{k,pl,d} = -285{,}4$ kNm ✓

© : $M_{cb} = -272{,}1$ kNm $\leq M_{k,pl,d} = -285{,}4$ kNm ✓

STÄBE :

NACHWEIS DER INTERAKTION FÜR $\frac{N}{N_{pl,d}} < 0{,}10$:

$\max Q = Q_{cb,li} = -182{,}4$ kN $\quad \frac{Q_{cb,li}}{Q_{pl,d}} = 0{,}4355 > 0{,}33 \rightarrow M_{pl,c} = -272{,}1$ kNm

$M_{cb} = -272{,}1$ kNm $= M_{pl,c} = -272{,}1$ kNm ($\hat{=}$ ANNAHME) ✓

FG A : (IN ⓓ) : $\frac{Q}{Q_{pl,d}} = 0{,}2157 < 0{,}33 \rightarrow M_{pl,d} = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$M_d = M_s = 285{,}4$ kNm $= M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm ($\hat{=}$ ANNAHME) ✓

FG B : $\alpha \doteq \phi \rightarrow M_{pl,j,d} = M_{pl,d} = 285{,}4$ kNm

$M_k = M_{pl,j,d} = 285{,}4$ kNm ($\hat{=}$ ANNAHME) ✓

ⓑ : $\frac{\alpha_{bc}}{\alpha_{pl,d}} = 0{,}4329 \rightarrow M_{pl,b} = -272{,}4$ kNm

$M_{bc} = -267{,}5$ kNm $\leq M_{pl,b} = -272{,}4$ kNm ✓

=> WEITERES FG IN ⓑ → KIN. BALKENKETTE =>

$q_d = q_{TRAGLAST} = 29{,}8$ kN/m ($\rightarrow H_d = 71{,}52$ kN)

NACHWEIS VON GRENZ (b/t)

ERFÜLLT, SIEHE FG. TH. II. ORD. – IDEAL STARRE KNOTEN

VERFORMUNGEN:

$\xi = 0{,}5 \quad \xi' = 1 - \xi$

M_i : $\Delta W = -0{,}05634$ m

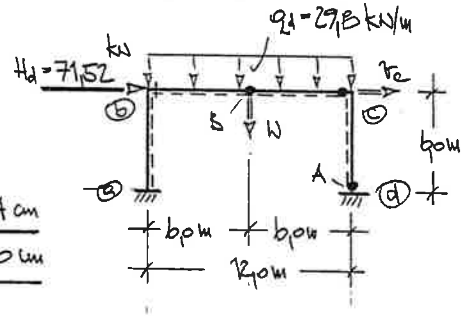
M_k : $\Delta W = -0{,}05731$ m

q : $\Delta W = 0{,}1881$ m

φ_c : $\Delta W = 0{,}1196$ m

$W = 0{,}1941$ m $\hat{=}$ 19,4 cm

$\varphi_c = \bar{\varphi}_c / C_d = 0{,}08601$ m $\hat{=}$ 8,6 cm

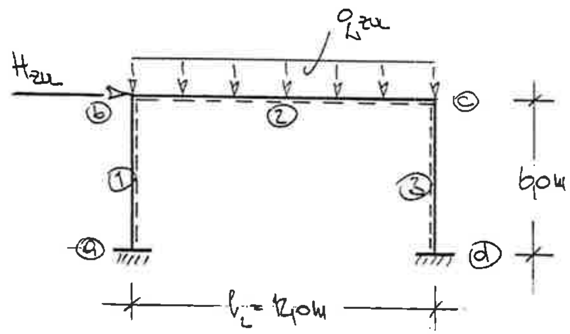


BIEGEDRILLKNICKNACHWEIS

SIEHE FG. TH. II. ORD. – IDEAL STARRE KNOTEN

A 5.10 GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT – (EINGESPANNTE STIELE)

MIT ELAST., PLAST. NACHGIEBIGEN KNOTEN – TH. II ORD



$$\boxed{\frac{q_d \cdot \ell_2}{H_d} = 5}$$

IPE 400 St 37

$J = 23130$ cm^4

$E = 2{,}1 \cdot 10^4$ kN/cm^2

$C = \frac{E \cdot J}{\ell_1} = 8096$ kNm

ANNAHME : KEIN ANSATZ VON VORVERFORMUNGEN

TEILSICHERHEITSBEIWERTE : $\gamma_F = 1{,}0 \quad \psi = 1{,}0$ (ANNAHME)

$\gamma_M = 1{,}0$

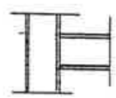
q_{zul}, H_{zul} :

STÄNDIGE EINWIRKUNG ... $\gamma_F = 1{,}35$

VERÄNDERL. – " – $\gamma_F = 1{,}5$ $\quad \psi = 0{,}9 \rightarrow \gamma_F \cdot \psi = 1{,}35$

$q_d = g \cdot \gamma_F + p \cdot \gamma_F \cdot \psi = 1{,}35 \cdot q_{zul}$

STEIFENLOSER KNOTEN



$\varepsilon_s = \ell_s \cdot \sqrt{\frac{N_s}{EJ}}$

$q_d = 6{,}74$ kN/m → $q_{zul} = 4{,}99$ kN/m									
ⓢ	N_s kN	ℓ_1/ℓ_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	α_s	λ_s	γ_s
①	30	1,0	0,1491	3,997	2,001	5,998	3,997	2,001	5,998
②	20	0,5	0,2435	3,992	2,002	–	1,996	1,001	–
③	35	1,0	0,1611	3,997	2,001	5,997	3,997	2,001	5,997

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\hat{\varphi}}_b$	$\bar{\hat{\varphi}}_c$	LF
5,993	1,001	-0,9997	-1,996	-1,001	59,94
1,001	5,993	-0,9995	-1,001	-1,996	-59,94
-0,9997	-0,9995	0,6651	+	+	11,98
-1,996	-1,001	+	7,945 (x)	1,001	-59,94
-1,001	-1,996	+	1,001	7,945 (*)	59,94

$[\bar{A}]\cdot\{x\}=-\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\hat{\varphi}}_b$	$\bar{\hat{\varphi}}_c$
16,62	-4,558	36,15	-5,094	9,135

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1,996 + 5,949 = 7,945$

(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1,996 + 5,949 = 7,945$

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

$\bar{C}_{KI} = C_{KI} / C$

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK – GEBRAUCHSLAST)

$q_d = 22,9$ kN/m → $q_{zul} = 16,96$ kN/m									
(S)	N_S [kN]	l_k/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
(1)	105	1,0	0,2790	3,990	2,003	5,992	3,990	2,003	5,992
(2)	55	0,5	0,4038	3,978	2,005	–	1,989	1,003	–
(3)	110	1,0	0,2855	3,989	2,003	5,992	3,989	2,003	5,992

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\hat{\varphi}}_b$	$\bar{\hat{\varphi}}_c$	LF	
5,979	1,003	-0,9987	-1,989	-1,003	264,1	$[\bar{A}]\cdot\{x\}=-\{B\}$
1,003	5,978	-0,9987	-1,003	-1,989	-264,1	
-0,9987	-0,9987	0,6614	+	+	40,70	
-1,989	-1,003	+	2,660 (x)	1,003	-131,7	$= 72,43 - 264,1$
-1,003	-1,989	+	1,003	1,989	39,70	$= -164,2 + 264,1$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\hat{\varphi}}_b$	$\bar{\hat{\varphi}}_c$
58,55	-5,826	141,1	-30,17	58,97

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KII} = 1,989 + 0,6707 = 2,660$

$\underline{\Pi_{bc}(\hat{\varphi}_b)} = \Pi_K + \bar{C}_{KII}\,\bar{\hat{\varphi}}_b = \underline{-72,43 + 0,6707\cdot\bar{\hat{\varphi}}_b}$

$\underline{\Pi_{cb}(\hat{\varphi}_c)} = \Pi_{K,pe} = \underline{-164,2\text{ kNm}}$

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

⇒ <u>KNOTEN</u> VERFORMEN SICH UNTER DER GEBRAUCHSLAST ($q_{zul} = 16,96$ kN/m → $H_{zul} = 40,70$ kN) <u>PLASTISCH ?</u>

<u>VERFORMUNGEN</u>

q_{zul} [kN/m]	4,99	16,96
Π_b	-30,30	-92,67
Π_c	-54,34	-164,2
Π_o	12 120	14980
Π_1	24 340	30320
v	0,008132	0,01176
ξ_Π	0,4666	0,4709
max Π_F	50,40	181,0

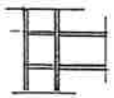
ΔW [m]		
q_{zul} [kN/m]	4,99	16,96
Π_b:	-0,005749	-0,01774
Π_c:	-0,009862	-0,03025
q_v:	0,02776	0,09547
u =	0,01215	0,04748
v_c =	0,004465	0,01743

<u>STÄBE</u>:

$\underline{\Pi_{el}} = f_{y,d}\cdot W_{el} = 24,0/1,0 \cdot 1160 = \underline{278,4\text{ kNm}}$ ⇒

REIN ELAST. VERHALTEN DER STÄBE

KNOTEN MIT EINLEITUNGSSTEIFEN



$\varepsilon_s = l_s \sqrt{\frac{N_s}{EJ}}$

$q_d = 8{,}00$ kN/m → $q_{zu} = 5{,}93$ kN/m

S	N_s kN	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	γ_s	λ_s	η_s
1	40	1,0	0,1722	3,996	2,001	5,997	3,996	2,001	5,997
2	25	0,5	0,2722	3,990	2,002	–	1,995	1,001	–
3	40	1,0	0,1722	3,996	2,001	5,997	3,996	2,001	5,997

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$	LF
5,991	1,001	-0,9995	-1,995	-1,001	71,25
1,001	5,991	-0,9995	-1,001	-1,995	-71,25
-0,9995	-0,9995	0,6647	+	+	14,23
-1,995	-1,001	+	8,528 (x)	1,001	-71,25
-1,001	-1,995	+	1,001	8,528 (**)	71,25

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$
19,76	-5,699	42,55	-5,575	9,995

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}995 + 6{,}533 = 8{,}528$ $\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

* $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1{,}995 + 6{,}533 = 8{,}528$

$q_d = 14{,}6$ kN/m → $q_{zu} = 10{,}81$ kN/m

S	N_s kN	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	γ_s	λ_s	η_s
1	65	1,0	0,2195	3,994	2,002	5,995	3,994	2,002	5,995
2	45	0,5	0,3652	3,982	2,004	–	1,991	1,002	–
3	75	1,0	0,2358	3,993	2,002	5,994	3,993	2,002	5,994

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$	LF
5,985	1,002	-0,9992	-1,991	-1,002	130,0
1,002	5,984	-0,9990	-1,002	-1,991	-130,0
-0,9992	-0,9990	0,6632	+	+	25,94
-1,991	-1,002	+	8,524 (x)	1,002	-130,0
-1,002	-1,991	+	1,002	8,524 (**)	130,0

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$
36,14	-6,40	77,90	-10,18	18,27

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}991 + 6{,}533 = 8{,}524$ $\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

(**) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1{,}991 + 6{,}533 = 8{,}524$

$q_d = 24{,}5$ kN/m → $q_{zu} = 18{,}15$ kN/m

S	N_s kN	l_1/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	γ_s	λ_s	η_s
1	115	1,0	0,2919	3,989	2,003	5,991	3,989	2,003	5,991
2	55	0,5	0,4038	3,978	2,005	–	1,989	1,003	–
3	115	1,0	0,2919	3,989	2,003	5,991	3,989	2,003	5,991

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$	LF
5,978	1,003	-0,9985	-1,989	-1,003	218,4
1,003	5,978	-0,9985	-1,003	-1,989	-218,4
-0,9985	-0,9985	0,6609	+	+	43,56
-1,989	-1,003	+	8,522 (x)	1,003	-218,4
-1,003	-1,989	+	1,003	1,989	37,90

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$= -180{,}5 + 218{,}4$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{\tau}_c$	$\bar{\eta}_b$	$\bar{\eta}_c$
68,41	-4,630	162,3	-16,97	57,48

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}989 + 6{,}533 = 8{,}522$

$\Pi_{bc}(\bar{\varphi}_b) = \bar{C}_{KI} \cdot \bar{\varphi}_b = 6{,}533 \cdot \bar{\varphi}_b$

$\Pi_{cb}(\bar{\varphi}_c) = \Pi_{K,pl} = -160{,}5$ kNm

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

$\Rightarrow$ KNOTEN Ⓑ: ELAST. VERHALTEN

KNOTEN Ⓒ: PLAST. VERFORMUNGEN

VERFORMUNGEN

q_{zul} [kN/m]	5,93	10,81	18,15
Π_b	-36,42	-66,51	-116,9
Π_c	-65,30	-117,4	-180,5
Π_0	11530	11670	16030
Π_1	23170	23550	32430
V	0,009187	0,01237	0,01070
ξ_Π	0,4663	0,4661	0,4735
maxΠ_F	55,49	165,9	185,9

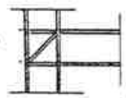
q_{zul} [kN/m]	ΔW [m]		
	5,93	10,81	18,15
Π_b:	-0,006919	-0,01271	-0,02121
Π_c:	-0,01186	-0,02183	-0,03333
ϱ_2:	0,03302	0,06056	0,1022
W =	0,01424	0,02602	0,04766
$\bar{\varphi}_c$ =	0,005256	0,009622	0,02005

STÄBE:

$\Pi_{el} = f_{y,d} \cdot W_{el} = 24{,}0/1{,}0 \cdot 1160 = 278{,}4$ kNm $\Rightarrow$

REIN ELAST. VERHALTEN DER STÄBE

KNOTEN MIT EINLEITUNGS- UND QUERKRAFTSTEIFEN



$$\varepsilon_s = l_s \cdot \sqrt{\frac{N_s}{EJ}}$$

$q_d = 17{,}8$ kN/m $\rightarrow$ $q_{zul} = 13{,}19$ kN/m									
Ⓢ	N_s [kN]	l_k/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
①	75	1,0	0,2356	3,993	2,002	5,994	3,993	2,002	5,994
②	50	0,5	0,3850	3,980	2,005	–	1,990	1,002	–
③	85	1,0	0,2510	3,992	2,002	5,994	3,992	2,002	5,994

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{r}_c$	$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	LF
5,983	1,002	-0,9990	-1,990	-1,002	158,7
1,002	5,982	-0,9990	-1,002	-1,990	-158,7
-0,9990	-0,9990	0,6627	0	0	31,66
-1,990	-1,002	0	15,10 (x)	1,002	-158,7
-1,002	-1,990	0	1,002	15,10 (*)	158,7

$[\bar{A}]\{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{r}_c$	$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$
44,01	-16,08	89,88	-6,556	11,75

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KI} = 1{,}990 + 13{,}11 = 15{,}10$

(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KI} = 1{,}990 + 13{,}11 = 15{,}10$

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

$q_d = 23{,}7$ kN/m $\rightarrow$ $q_{zul} = 17{,}56$ kN/m									
Ⓢ	N_s [kN]	l_k/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	κ_s	λ_s	η_s
①	100	1,0	0,2722	3,990	2,002	5,993	3,990	2,002	5,993
②	65	0,5	0,4390	3,974	2,006	–	1,987	1,003	–
③	115	1,0	0,2919	3,989	2,003	5,991	3,989	2,003	5,991

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\psi}_b$	$\bar{\psi}_c$	LF
5,977	1,003	-0,9988	-1,987	-1,003	211,4
1,003	5,976	-0,9985	-1,003	-1,987	-211,4
-0,9988	-0,9985	0,6614	0	0	42,14
-1,987	-1,003	0	15,10 (x)	1,003	-211,4
-1,003	-1,987	0	1,003	15,10 (*)	211,4

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\psi}_b$	$\bar{\psi}_c$
58,76	-21,43	12,01	-8,732	15,66

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KT} = 1{,}987 + 13{,}11 = 15{,}10$

(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KT} = 1{,}987 + 13{,}11 = 15{,}10$

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

$g_d = 29{,}8$ kN/m $\rightarrow$ $q_{zul} = 22{,}07$ kN/m								
(S)	N_S kN	l_k/l_s	ε_s	F_1	F_2	F_3	δ_s	λ_s	γ_s
(1)	135	1,0	0,3163	3,987	2,003	5,990	3,987	2,003	5,990
(2)	70	0,5	0,4555	3,972	2,007	–	1,986	1,004	–
(3)	140	1,0	0,3221	3,986	2,003	5,990	3,986	2,003	5,990

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\psi}_b$	$\bar{\psi}_c$	LF
5,973	1,004	-0,9983	-1,986	-1,004	265,8
1,004	5,972	-0,9983	-1,004	-1,986	-265,8
-0,9983	-0,9983	0,6599	0	0	52,97
-1,986	-1,004	0	15,16 (x)	1,004	-265,8
-1,004	-1,986	0	1,004	15,10 (*)	265,8

$[\bar{A}] \cdot \{x\} = -\{B\}$

$\bar{\varphi}_b$	$\bar{\varphi}_c$	$\bar{v}_c$	$\bar{\psi}_b$	$\bar{\psi}_c$
74,02	-26,91	151,5	-6,97	19,71

$\varphi_i = \bar{\varphi}_i / C$

(x) $\bar{a}_{44} = a_{44} + \bar{C}_{KT} = 1{,}986 + 13{,}11 = 15{,}10$

(*) $\bar{a}_{55} = a_{55} + \bar{C}_{KT} = 1{,}986 + 13{,}11 = 15{,}16$

$\underline{M_{bc}(\bar{\psi}_b)} = \bar{C}_{KT} \cdot \bar{\psi}_b = \underline{13{,}11 \cdot \bar{\psi}_b}$

$\underline{M_{cb}(\bar{\psi}_c)} = \bar{C}_{KT} \cdot \bar{\psi}_c = \underline{13{,}11 \cdot \bar{\psi}_c}$

(SIEHE KNOTENFEDERCHARAKTERISTIK)

$\Rightarrow$ KNOTEN (b) VERFORMT SICH UNTER DER GEBRAUCHSLAST ($q_{zul} = 22{,}07$ kN/m $\rightarrow$ $H_{zul} = 52{,}97$ kN) ELASTISCH!,

KNOTEN (c) PLASTISCH!

VERFORMUNGEN:

q_{zul} kN/m	13,17	17,56	22,07
M_b	-85,95	-114,5	-143,8
M_c	-154,0	-205,3	-258,4
M_0	12810	13120	15320
M_1	25860	26560	31040
γ	0,01375	0,01570	0,01635
ξ	0,4643	0,4642	0,4641
max M_F	121,2	161,6	202,1

ΔW [m]			
q_{zul} kN/m	13,17	17,56	22,07
M_b:	-0,01647	-0,02205	-0,02772
M_c:	-0,02815	-0,03771	-0,04753
q:	0,07898	0,09896	0,1245
W =	0,02936	0,03920	0,04925
v_c =	0,01110	0,01483	0,01871

STÄBE:

$\underline{M_{el}} = f_{yd} \cdot W_{el} = 24{,}0/1{,}0 \cdot 1160 = \underline{278{,}4 \text{ kNm}}$ $\rightarrow$

REIN ELAST. VERHALTEN DER STÄBE