LOCAFI+

Bewertung der Temperaturen eines einem lokalen Brand (LOCAl FIre) ausgesetzten vertikalen Bauteiles: Verbreitung der Ergebnisse

Fördervereinbarung Nr. 754072

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.1. Allgemeine Vorgehensweise

Schritt 1 : Definition der thermischen Belastung

Schritt 2 : Thermische Analyse

Schritt 3 : Mechanische Analyse

Die allgemeine Vorgehensweise ist Schritt-für-Schritt (Schritt 1 → Schritt 2 → Schritt 3) aber sie ist genauer, wenn in beiden Richtungen vorgegangen wird. Wenn einen solchen doppelten Ansatz nicht verwendet wird, muss der Ingenieur sich über die verbundenen Annahmen bewusst sein!

- Die Durchbiegung/Verschiebung eines Bauteils kann den Brandverlauf beeinflussen.
- Die Durchbiegung/Verschiebung eines Bauteils kann die thermische Beanspruchung beeinflussen.
- Eine Erhöhung der Temperatur in den Bauteilen kann die Energie in den Wänden/Fußböden beeinflussen.
- Plastizität und Rissbildung können die Wärmeentwicklung oder den Wärmeverlust verursachen.
- …

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.2. Definition des Brandszenarios

6.2.1. Brand in einem Brandabschnitt

- Standard Brandkurve (ISO-834, Hydrokarbon,…)
- Naturbrandkurve (parametrische Kurve nach Anhang A der EN 1991-1-2, OZone-Software basiert auf EN 1991-1-2 Anhänge D und E)

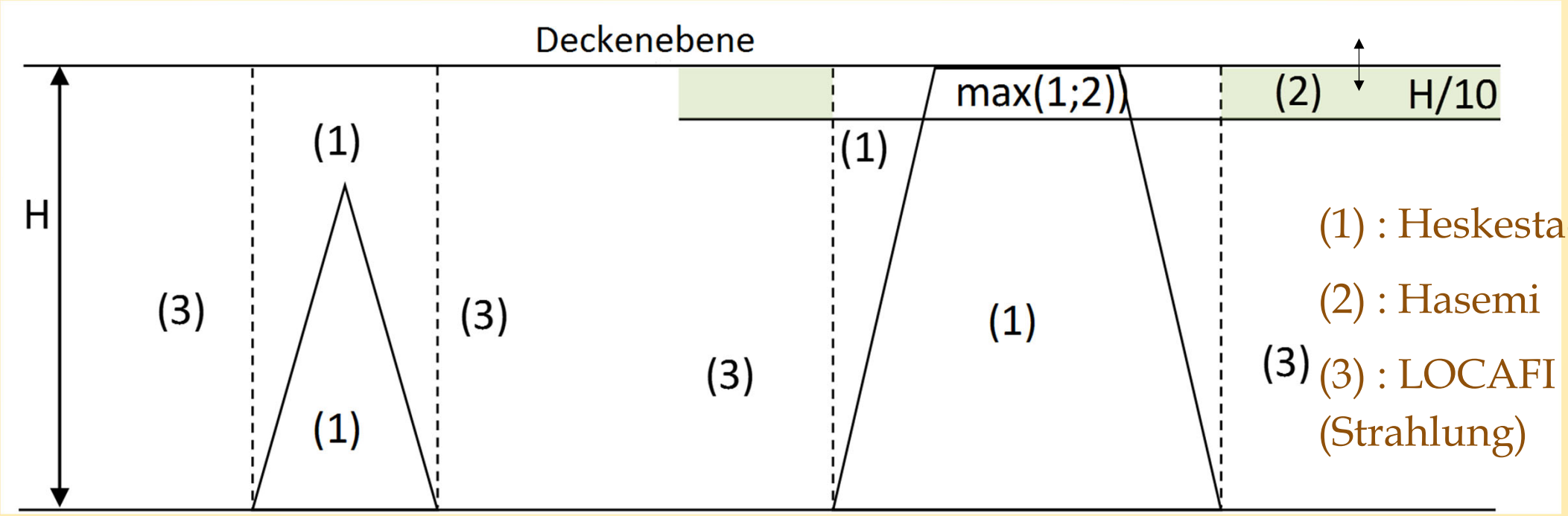
6.2.2. Lokaler Brand

- Das Brandszenario wird von dem Ingenieur / den Behörden definiert (Durchmesser, RHR)

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.2. Definition des Brandszenarios

6.2.2. Lokaler Brand



6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.3. Thermische Analyse

6.3.1. Stationäre Temperatur

Die stationäre Temperatur θ ist die Temperatur an der die empfangene Wärmestromdichte durch die abgegebene Wärmestromdichte (Konvektion und Strahlung) ausgeglichen wird.

$$0 = \underbrace{\alpha_c(\theta - 20)}_{\text{Netto durch Konvektion abgegebene Wärmestromdichte}} + \underbrace{\sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4]}_{\text{Netto durch Strahlung abgegebene Wärmestromdichte}} - \underbrace{\varepsilon * \dot{h}_{m,r}}_{\text{Empfangene Wärmestromdichte}}$$

Im Falle eines Brandes in einem Brandabschnitt muss die mittlere durch Strahlung empfangene Wärmestromdichte $\dot{h}_{m,r}$ ersetzt werden durch $\dot{h}_{m,tot}$, die Wärmeströme sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung beinhaltet.

$$\dot{h}_{m,tot} = min\left(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000\right) \qquad [W.m^{-2}]$$

Dieser vereinfachter Ansatz beachtet die thermische Trägheit des Bauteils nicht.

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.3. Thermische Analyse

6.3.2. Inkrementelle Vorgehensweise (gleichmäßige Temperatur)

Die Bauteiltemperatur wird mittels der Wärmebilanz des Bauteils berechnet.

$$\rho C_p(T)\frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V}\left[\dot{h}_{m,r} + \alpha_c(20-\theta) + \varepsilon\left(\sigma(293^4 - (\theta+273)^4)\right)\right]$$

ρ, C_p, und A_m/V sind die Dichte [kg.m^{-3}], spezifische Wärme [J.kg^{-1}.K^{-1}] und Profilfaktor [m^{-1}] des Bauteils.

Nach EN 1993-1-2 soll der Zeitschritt Δt nicht größer als 5 Sekunden sein.

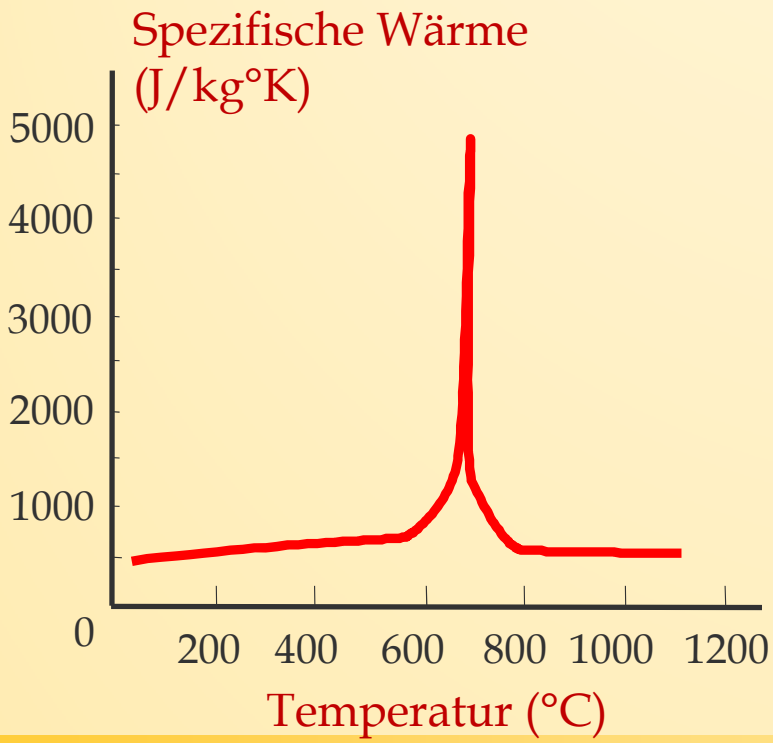
Im Falle eines Brandes in einem Brandabschnitt muss die mittlere durch Strahlung empfangene Wärmestromdichte $\dot{h}_{m,r}$ ersetzt werden durch $\dot{h}_{tot}$, die Wärmeströme sowohl durch Konvektion als auch durch Strahlung beinhaltet.

$$\dot{h}_{m,tot} = min\left(\dot{h}_{m,r} + \dot{h}_{m,c}; 100000\right) \qquad [\mathrm{W.m^{-2}}]$$

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.3. Thermische Analyse

6.3.2. Inkrementelle Vorgehensweise (gleichmäßige Temperatur)



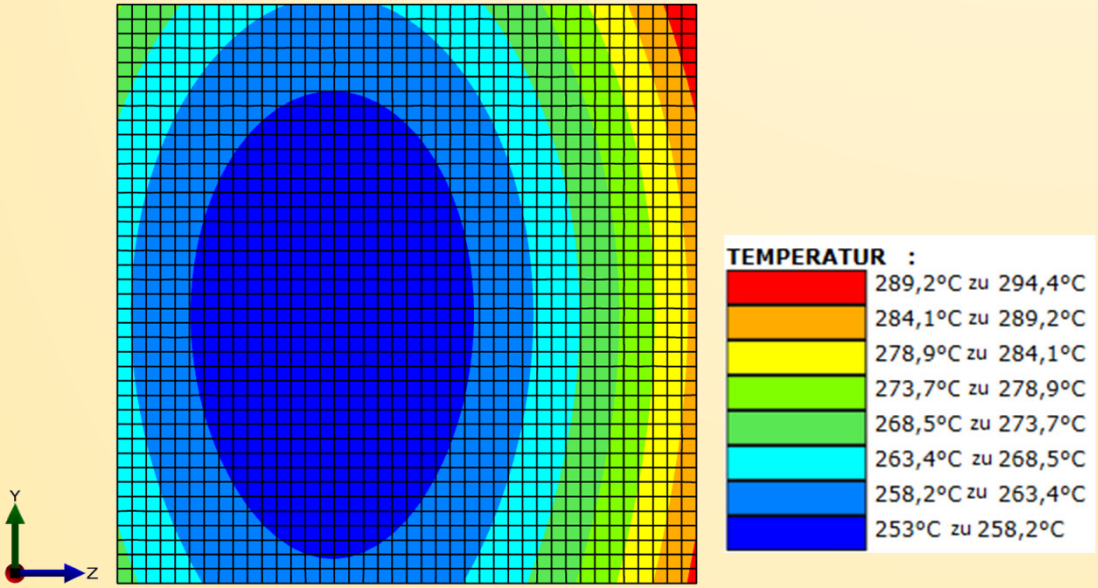
Dichte des Stahls: 7850 kg/m^3

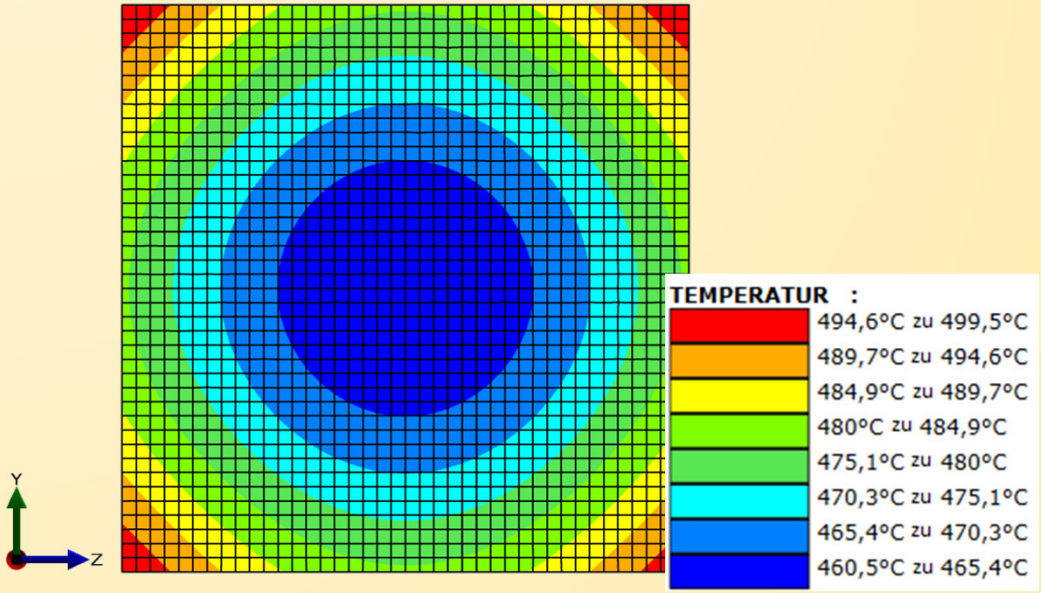
(temperaturunabhängig)

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.3. Thermische Analyse

6.3.3. Thermische FEA (ungleichmäßige Temperatur)





Temperaturverteilung [°C] nach 33 Minuten bei einer 3,36 m hohen Stütze mit einem quadratischen Querschnitt von 130 x 130 mm umgeben von 3 PKWs und 1 Lieferwagen: a) in einer Höhe von 0,94 m; b) in einer Höhe von 3,1 m.

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Allgemeine Regeln der EN 1993-1-2

Nur die lastabtragende Funktion der Stahlkonstruktion R wird durch die Bemessungsregeln der Eurocode 3 für den Brandfall umfasst.

Die lastabtragende Funktion einer Konstruktion wird nur erfüllt, wenn während der relevanten Brand-Beanspruchungsdauer t

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

wo $E_{fi,d,t}$: Bemessungswert der Beanspruchung (Eurocodes 0 und 1)

$R_{fi,d,t}$: zugehöriger Bemessungswert des Widerstands der Konstruktion zum Zeitpunkt t

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Allgemeine Regeln der EN 1993-1-2

<u>Beim Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)</u>

$$E_d = 1{,}35 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1{,}5 * Q_{k,1} + 1{,}5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

<u>Bei außergewöhnlichen Einwirkungen</u>

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Empfohlen; in der Praxis jeden <u>Nationalen Anhang</u> berücksichtigen

Einwirkungen	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Kategorie A: Wohnräume	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: Büroräume	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: Versammlungsräume	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: Verkaufsräume	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: Lagerräume	1	0,9	0,8
…	…	…	…

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Allgemeine Regeln der EN 1993-1-2

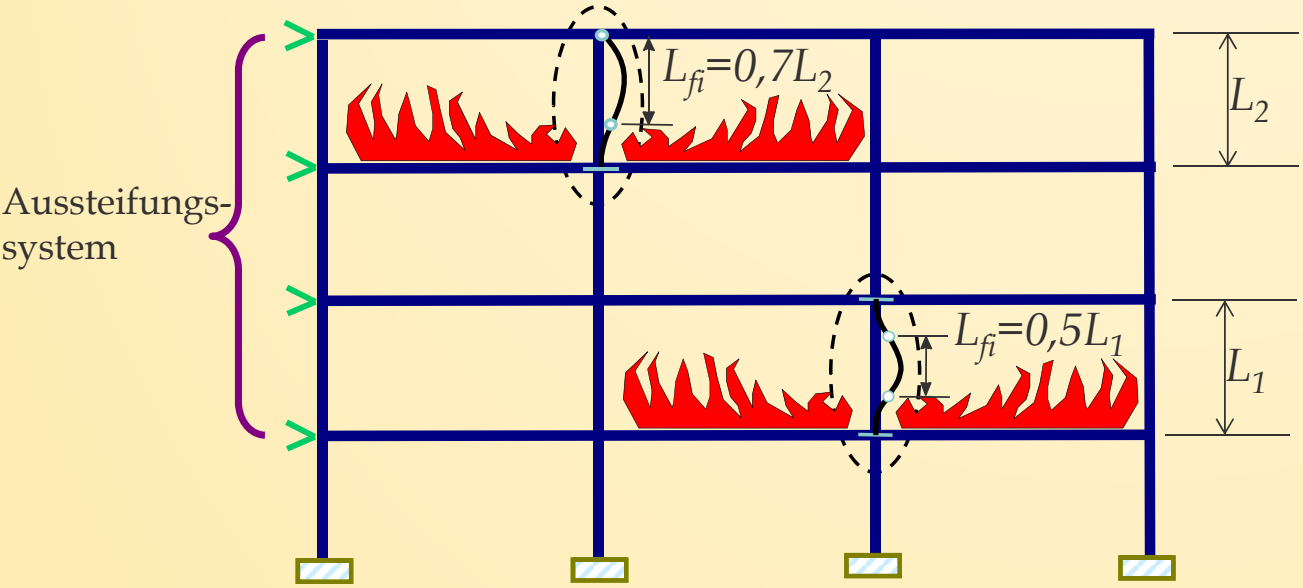
Teilsicherheitsbeiwerte für Stahl bei erhöhten Temperaturen

Art der Bauteile	Kalt-bemessung	Brand-bemessung
Querschnitte	$\gamma_{M0} = 1{,}0$	$\gamma_{M,fi} = 1{,}0$
Bauteile, die instabil sind	$\gamma_{M1} = 1{,}0$	$\gamma_{M,fi} = 1{,}0$
Zugglieder bis zum Bruch	$\gamma_{M2} = 1{,}25$	$\gamma_{M,fi} = 1{,}0$
Verbindungen	$\gamma_{M2} = 1{,}25$	$\gamma_{M,fi} = 1{,}0$

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Allgemeine Regeln der EN 1993-1-2



Bedingungen:

- ausgesteifte Konstruktionen
- die Stützen sind kontinuierlich oder bleiben unverändert über die Dauer der Beanspruchung
- es gibt die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit R zwischen den Stützen und den ausgesteiften Bodenbauteile

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Allgemeine Regeln der EN 1993-1-2

Brandschutztechnischer Nachweis nach einer der 3 folgenden Methoden:

Temperatur : $\theta_{cr,d} \geq \theta_d$

Einfachste und gängige Methode, nur gültig bei gleichmäßiger Temperatur

Lastwiderstand: $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

Realisierbar bei manueller Berechnung (reduzierte Kapazität nach bestimmter Zeit)

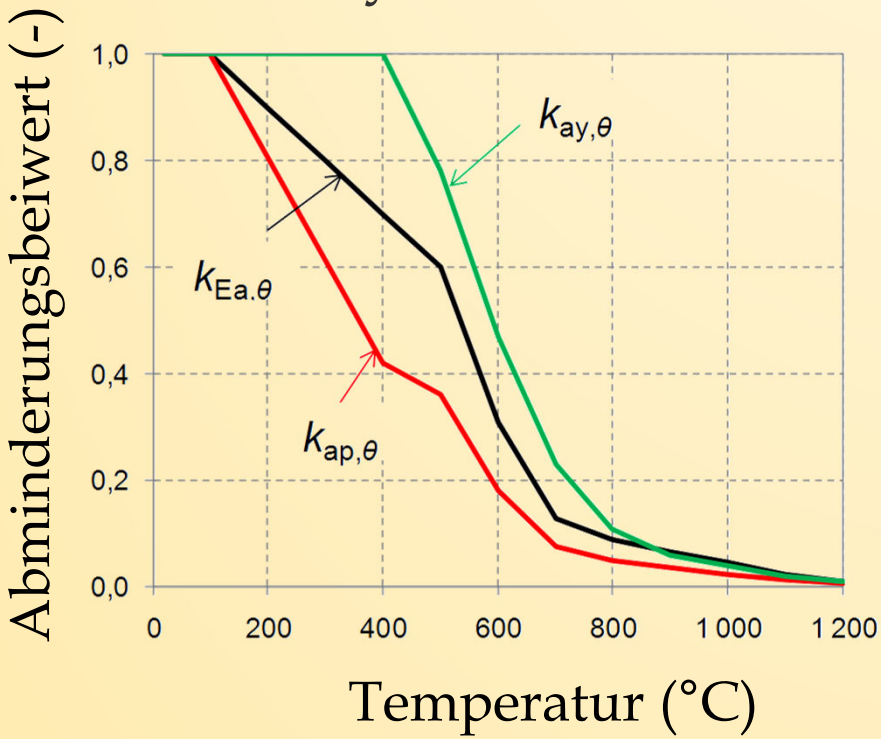
Zeit: $t_{fi,d} \geq t_{fi,required}$

Nur realisierbar mit hochentwickelte Werkzeuge wie Finite-Element-Modelle

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.2. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2



Temperatur

$k_{y,\theta}$: Abminderung der Streckgrenze

$k_{E,\theta}$: Abminderung des Elastizitätsmoduls

$k_{p,\theta}$: Abminderung der Proportionalitätsgrenze

Die aktuelle Fassung der EN 1993-1-2 gilt für die Stahlgüten S235 bis S460

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.2. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Temperatur

Außergewöhnliche kombinierte Beanspruchung

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Empfohlen; in der Praxis jeden Nationalen Anhang berücksichtigen

$$E_d = 1{,}35 * \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1{,}5 * Q_{k,1} + 1{,}5 * \sum_{i \geq 2} \Psi_{0,i}\, Q_{k,i}$$

Abminderungsbeiwert für das Lastniveau

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d,t}}{E_d}$$

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Temperatur

Abminderungsfaktor für das Lastniveau

Tragwerksbemessung im Brandfall bei außergewöhnlichen Einwirkungen

γ_{GA} = 1,0 Dauerlasten;

$\psi_{2.1}$ = 0,3 Kombinationsbeiwert; variable Lasten, Büros

Umgebungstemperatur, GZT-Bemessung

γ_G = 1,35 Dauerlasten;

$\gamma_{Q.1}$ = 1,50 Kombinationsbeiwert; variable Lasten

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{2.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}}$$

$Q_{k,1}/G_k$	η_{fi}
0	0,74
1	0,53
2	0,46
4	0,41

EN 1993-1-2 empfiehlt η_{fi} = 0,65 (außer Kategorie E, η_{fi} = 0,7)

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.2. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Temperatur

Kombination von außergewöhnlichen Einwirkungen

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Empfohlen, in der Praxis jeden Nationalen Anhang berücksichtigen

Abminderungsbeiwert für das Lastniveau

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} < \eta_{fi}$$

Ambient temperature design resistance

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Temperatur

Ausnutzungsgrad

$$\mu_0 = \left(\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} \right) = \eta_{fi,t} \left(\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M0}} \right)$$

- Berücksichtigt Teilsicherheitsbeiwerte bei Raum- und erhöhter Temperatur (normalerweise sind beide Werte 1,0)
- Ermöglicht eine direkte Berechnung der kritischen Temperatur
- Umfasst das Versagen-Modus Instabilitäten, ist das abgeminderte dimensionslose Schlankheitsgrad erforderlich.

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Temperatur

$\bar{\lambda}_{fi,0}$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
μ_0											
0,04	1000	977	949	913	880	839	787	742	696	678	659
0,06	900	885	866	837	795	756	700	679	656	630	602
0,08	860	839	811	785	749	697	674	647	616	588	564
0,10	820	797	780	752	703	677	648	614	585	557	527
0,12	792	777	755	719	685	656	622	588	559	526	474
0,14	775	757	730	694	668	636	597	567	533	487	373
0,16	758	737	705	681	652	615	580	546	507	408	
0,18	742	717	691	668	636	596	563	524	453		
0,20	725	698	680	655	619	582	545	503	384		
0,22	708	689	669	641	603	568	528	457			
0,24	696	679	658	628	591	554	511	406			
0,26	688	670	647	615	579	540	485				
0,28	679	660	636	602	568	526	446				
…	…	…	…	…	…	…	…				

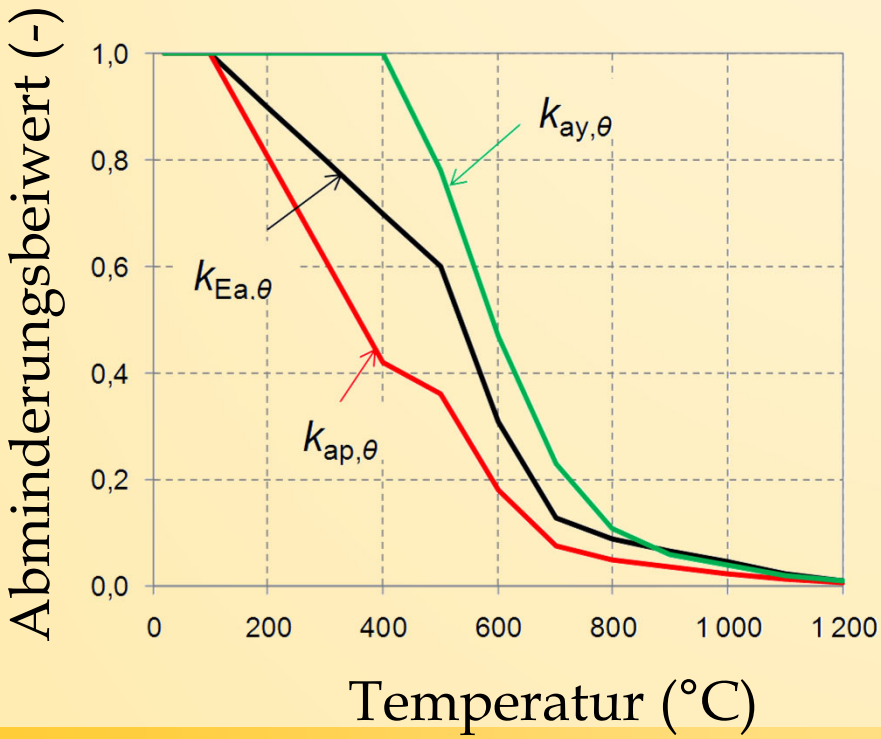
Kritische Temperatur des Stahlbauteils bei Instabilität unter Anwendung spezifischer tabellarischen Daten auf der Basis von :

- einem dimensionslosen Schlankheitsgrad zum Zeitpunkt 0
- und einem spezifischen Lastniveau $\mu_0 = N_{fi,d,t} / N_{pl,fi,0}$
- Jede Stahlgüte hat seine eigenen tabellarischen Daten.

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.2. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2



Lastwiderstand

$k_{y,\theta}$: Abminderung der Streckgrenze

$k_{E,\theta}$: Abminderung des Elastizitätsmoduls

$k_{p,\theta}$: Abminderung der Proportionalitätsgrenze

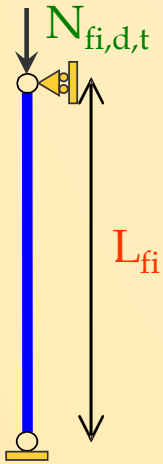
Die aktuelle Fassung der EN 1993-1-2 gilt für die Stahlgüten S235 bis S460

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

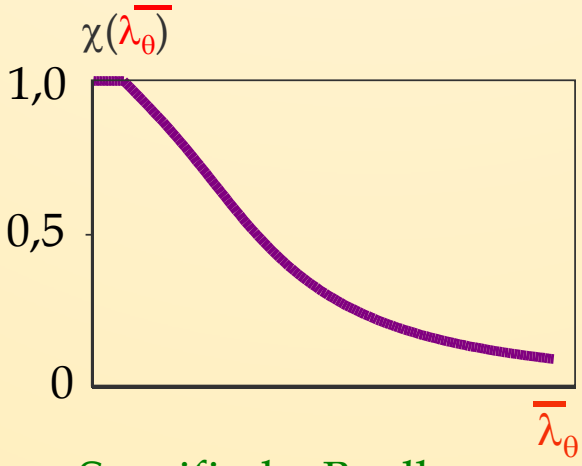
6.4. Mechanische Analyse

6.4.1. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Lastwiderstand



Querschnitt und Temperatur



Spezifische Beulkurve

$$\alpha = 0.65\sqrt{\frac{235}{f_y}} \qquad \overline{\lambda_\theta} = \overline{\lambda}\sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha\overline{\lambda_\theta} + \overline{\lambda_\theta}^2\right]$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \overline{\lambda_\theta}^2}}$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi}\, A\, k_{y,\theta}\, f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.2. Analytische Verifizierung der Stütze nach EN 1993-1-2

Lastwiderstand

Außergewöhnliche kombinierte Beanspruchung

$$E_{fi,d,t} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \Psi_{2,1}\, Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i}$$

Empfohlen; in der Praxis jeden Nationalen Anhang berücksichtigen

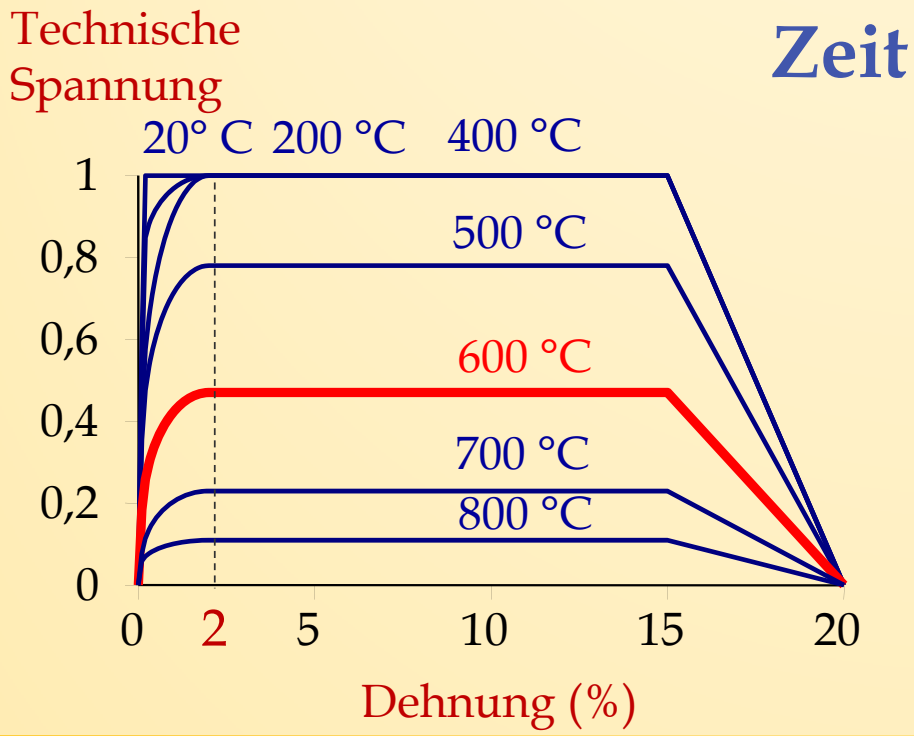
Bemessungskriterien

$$\mathbf{R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}}$$

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.3. Finite-Element-Analyse

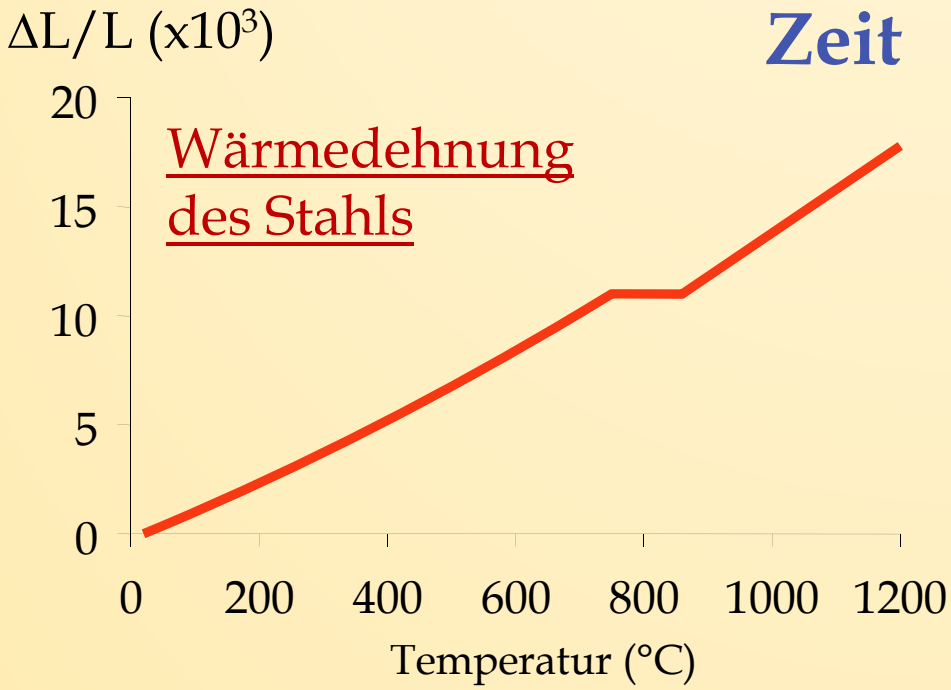


- Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Stahl ist nicht-linear (elastisch, parabolisch, Plateau, absteigender Bereich)
- Die Streckgrenze bei 600 °C ist um über 50 % abgemindert.

6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.3. Finite-Elemente-Analyse



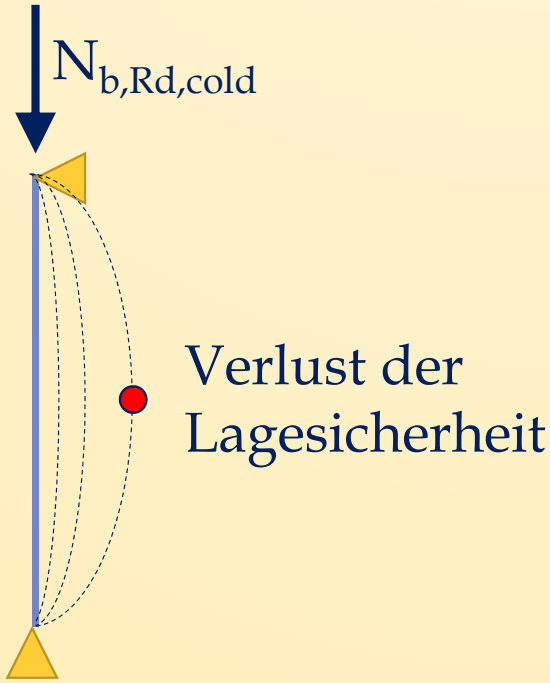
6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.3. Finite-Elemente-Analyse

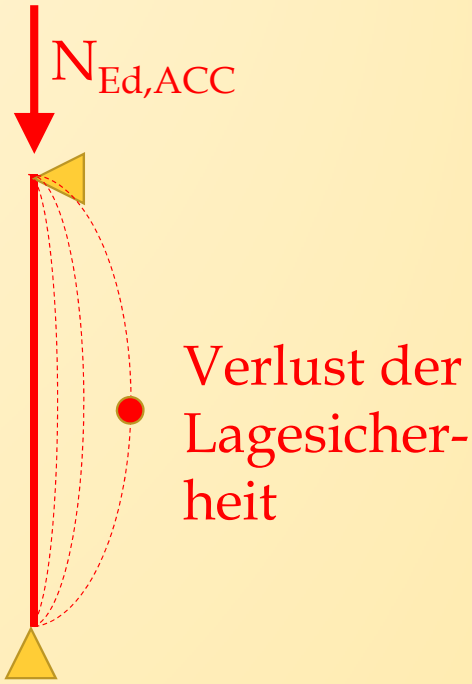
<u>Kalte Bemessung</u>

- Ausgangs-imperfektion
- Last steigt bis zum Versagen



<u>Heiße Bemessung</u>

- Ausgangs-imperfektion
- Ausgangs-beanspruchung
- Temperatur steigt bis zum Versagen

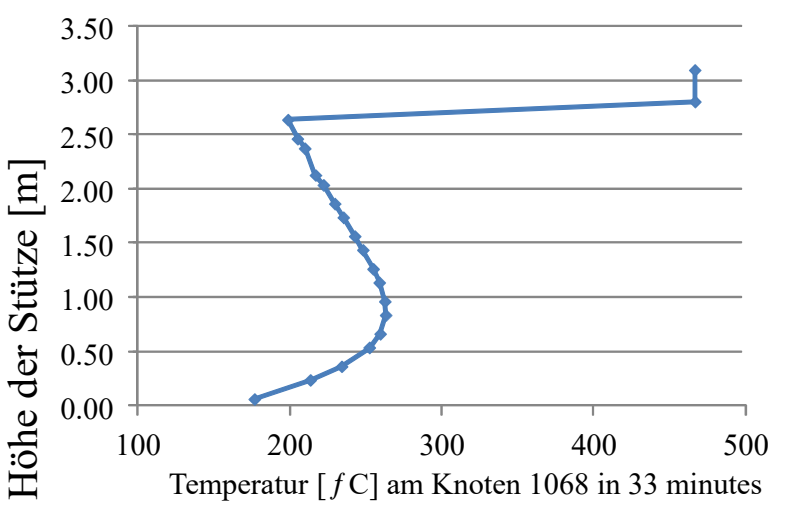


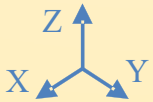
6. Überblick der Feuerwiderstandsfähigkeit

6.4. Mechanische Analyse

6.4.3. Finite-Elemente-Analyse

Zeit





li.: Temperaturverteilung beim Knoten 1068 nach 33 Minuten bei einer 3,36 m hohen Stütze mit einem quadratischen Querschnitt von 130 x 130 mm umgeben von 3 PKWs und 1 Lieferwagen

r.: Form der Verschiebung beim Versagen (Skalierungsfaktor = 1) bei einer 3,36 m hohen Stütze mit einem quadratischen Querschnitt von 130 x 130 mm umgeben von 3 PKWs und 1 Lieferwagen