

Sicherheitskonzept (DIN EN 1990 bis 1998)

1. Einleitung

In DIN EN 1990 "Grundlagen der Tragwerksplanung" sind Prinzipien und Anforderungen zur Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken genannt. DIN EN 1990 ist für die direkte Verwendung beim Entwurf, bei der Berechnung und Bemessung von Neubauten in Verbindung mit EN 1991 bis EN 1999 gedacht. In den Normen der Reihe DIN EN 1991 sind die für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken maßgebenden Einwirkungen festgelegt. DIN EN 1992 bis DIN EN 1999 behandelt die Bemessung und Konstruktion mit den Materialien Beton, Stahl, Holz, Mauerwerk und Aluminium sowie die Bemessung in der Gentechnik und die Auslegung von Bauwerken in Erdbebengebieten.

Die Normenstruktur ist nachfolgend dargestellt.



Grundsätzliches Ziel bei Planung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken ist die Sicherstellung einer angemessenen Zuverlässigkeit gegen Versagen und die Gewährleistung des vorgegebenen Nutzungszwecks für die vorgesehene Dauer unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Das Sicherheits- und Bemessungskonzept beruht auf dem Nachweis, dass diese Anforderungen erfüllt und sog. Grenzzustände nicht überschritten werden.

Ein Tragwerk ist so zu dimensionieren, dass es die geforderte

- **Tragfähigkeit und**
- **Gebrauchstauglichkeit und**
- **Dauerhaftigkeit**

erfüllt. Rein formal spricht man hierbei von **Grenzzuständen**, bei deren Überschreitung die vorgegebenen Anforderungen nicht mehr erfüllt werden. Praktisch bedeutet dies, dass für ein Tragwerk im Allgemeinen folgende Nachweise erbracht werden müssen:

Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

- Tragwerks- oder Querschnittsversagen (STR - structural)
(Bemessung für Biegung, Querkraft, Torsion, Durchstanzen)
- Lagesicherheit (EQU - equilibrium)
- Baugrundversagen (GEO- geotechnical)
- Ermüdungsversagen (FAT- fatigue)
- Baulicher Brandschutz

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

- Begrenzung von Stahl- und Betonspannungen
- Beschränkung der Rissweite
- Begrenzung der Verformungen

Nachweis der Dauerhaftigkeit

- Mindestbetondeckung und Mindestbetongüte
- Einhaltung von Konstruktionsregeln
- Bauausführung

Bei den o.g. Nachweisen werden Unsicherheiten in den Annahmen (System, Lasten, Material) durch Sicherheitsbeiwerte abgedeckt. Anstelle eines globalen Sicherheitsbeiwertes wie in der alten DIN 1045 von 1988 werden **Teilsicherheitsbeiwerte** (Index F = Force/Kraft, Index R = Resistance/Widerstand) benutzt.

γ_F Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen (Erhöhung der Lasten)

γ_R Teilsicherheitsbeiwerte für Material (Verminderung der Materialkennwerte)

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten wird den Unsicherheiten gezielt dort begegnet, wo sie auftreten. Diese Vorgehensweise ist in allen Eurocodes enthalten.

Da es unwahrscheinlich ist, dass alle veränderlichen Lasten (z.B. Wind und Schnee) gleichzeitig in voller Größe und ungünstigster Kombination wirken, dürfen die veränderlichen Lasten um einen **Kombinationsbeiwert** Ψ vermindert werden. Dieser hängt von dem zu untersuchenden Grenzzustand ab.

2. Einwirkungen E

‚Einwirkung‘ ist der übergeordnete Begriff für **Belastungen auf das Tragwerk**, mit denen die maßgebenden Schnittgrößen berechnet werden. Das sind z.B.

- Kräfte oder Lasten (direkte Einwirkungen)
- Zwang (indirekte Einwirkung), z.B. durch Temperatur, Setzungen, Schwinden.

2.1 Charakteristische Werte der Einwirkungen E_k

In DIN EN 1990 werden die unabhängigen charakteristischen Einwirkungen definiert. Werte der Einwirkungen werden in den jeweiligen Lastnormen (hier: DIN EN 1991 Teile 1 bis 9) festgelegt, wo die sog. **charakteristischen Werte (Index k)** entnommen werden können.

Dabei basieren die charakteristischen Werte der **ständigen Einwirkungen G_k** mit kleiner Variationsbreite im Allgemeinen auf dem **Mittelwert**.

Bei einer **veränderlichen Einwirkung Q_k** entspricht der charakteristische Wert Q_k entweder einem oberen Wert, der während der festgelegten Bezugsdauer mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird oder einem festgelegten Nennwert, wenn eine Wahrscheinlichkeitsverteilung unbekannt ist. Für eine zeitabhängige veränderliche Einwirkung ist der charakteristische Wert in der Regel so festgelegt, dass er mit einer Wahrscheinlichkeit von 98% während der Bezugsdauer von einem Jahr nicht überschritten wird bzw. nicht häufiger als einmal in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird.

Die Einwirkungen werden in drei Gruppen eingeteilt:

ständige Einwirkungen (G)	Eigenlast	G_k
	Vorspannung	P_k
	Erddruck	$G_{k,E}$
	Flüssigkeitsdruck	$G_{k,H}$
veränderliche Einwirkungen (Q)	Nutz- und Verkehrslast	Q_k
	Schnee- und Eislast	$Q_{k,S}$
	Temperatureinwirkung	$Q_{k,T}$
	Baugrundsetzung	$Q_{k,\Delta a}$
	Flüssigkeitsdruck	$Q_{k,H}$
außergewöhnliche Einwirkung (A)	Anpralllast, Explosionslast	A_k
	Erdbebenlast	$A_{E,k}$

2.2 Repräsentative Werte der Einwirkungen

Bei der Kombination der Einwirkungen werden die veränderlichen Einwirkungen mit **Kombinationsbeiwerten** multipliziert, um die Auftretenswahrscheinlichkeit mehrerer Einwirkungen zur selben Zeit zu berücksichtigen. Es wird davon ausgegangen, dass die maximalen Werte unabhängiger veränderlicher Einwirkungen wie zum Beispiel Schnee und Wind nicht gleichzeitig auftreten. Es wird deshalb **eine voll wirkende Leiteinwirkung** angesetzt und **die restlichen Einwirkungen durch Multiplikation mit Kombinationsbeiwerten Ψ_i reduziert**. Folgende repräsentativen Werte sind definiert:

Q_k	Charakteristischer Wert
$\Psi_0 \cdot Q_k$	Kombinationswert z.B. für den Nachweis der Tragfähigkeit
$\Psi_1 \cdot Q_k$	Häufiger Wert , z.B. für den Nachweis der Durchbiegung.
$\Psi_2 \cdot Q_k$	Quasi-Ständiger Wert , z.B. für den Nachweis der Rissweite.

Der Beiwert Ψ_0 ist so festgelegt, dass bei der Kombination von mehreren Lastfällen die angestrebte Zuverlässigkeit des Tragwerkes nicht unterschritten wird.

Der Beiwert Ψ_1 ist in der Regel so festgelegt, dass die Überschreitungshäufigkeit des häufigen Werts $\Psi_1 \cdot Q_k$ auf 300-mal je Jahr bzw. auf 5% begrenzt ist.

Der quasi-ständige Wert $\Psi_2 \cdot Q_k$ kann als zeitlicher Mittelwert betrachtet werden, der mit einer Häufigkeit von 50% über- bzw. unterschritten wird.

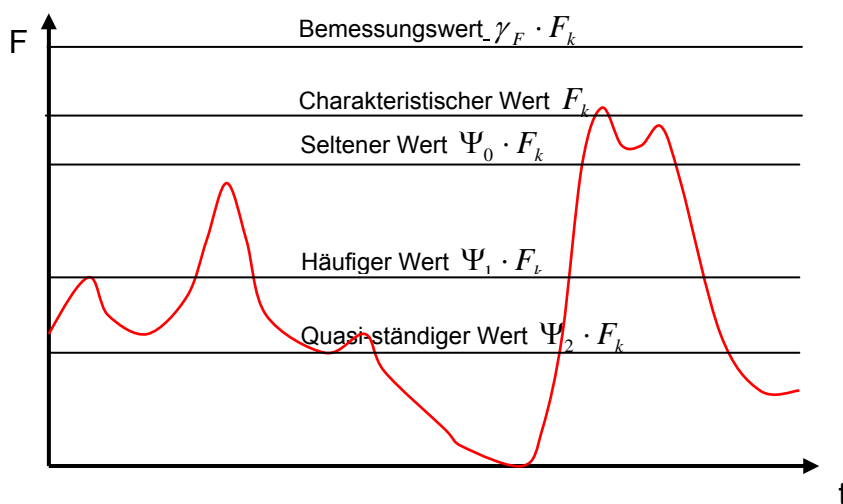


Bild: Repräsentative Werte und Bemessungswerte einer veränderlichen Einwirkung

Die Kombinationsbeiwerte für Hochbauten sind in DIN EN 1990/NA, Tabelle NA.A.1.1, angegeben:

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten im Hochbau (Kategorien siehe EN 1991-1-1) ^a			
— Kategorie A: Wohn- und Aufenthaltsräume	0,7	0,5	0,3
— Kategorie B: Büros	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	0,9	0,8
— Kategorie F: Verkehrsflächen, Fahrzeuglast ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
— Kategorie G: Verkehrsflächen, 30 kN \leq Fahrzeuglast ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
— Kategorie H: Dächer	0	0	0
Schnee- und Eislasten, siehe DIN EN 1991-1-3			
— Orte bis zu NN + 1 000 m	0,5	0,2	0
— Orte über NN + 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Windlasten, siehe DIN EN 1991-1-4	0,6	0,2	0
Temperatureinwirkungen (nicht Brand), siehe DIN EN 1991-1-5	0,6	0,5	0
Baugrundsetzungen, siehe DIN EN 1997	1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen ^{b,c}	0,8	0,7	0,5
<p>^a Abminderungsbeiwerte für Nutzlasten in mehrgeschossigen Hochbauten siehe DIN EN 1991-1-1.</p> <p>^b Flüssigkeitsdruck ist im allgemeinen als eine veränderliche Einwirkung zu behandeln, für die die ψ-Beiwerte standortbedingt festzulegen sind. Flüssigkeitsdruck, dessen Größe durch geometrische Verhältnisse begrenzt ist, darf als eine ständige Einwirkung behandelt werden, wobei alle ψ-Beiwerte gleich 1,0 zu setzen sind.</p> <p>^c ψ-Beiwerte für Maschinenlasten sind betriebsbedingt festzulegen.</p>			

Die in DIN EN 1991-1-1/NA definierten Kategorien T, Z, K und die Horizontallasten sind hinsichtlich der Einwirkungskombinationen den in Tabelle NA.A.1.1 angegebenen Kategorien für Nutzlasten im Hochbau zuzuordnen.

2.3 Bemessungswerte der Einwirkungen E_d

Bemessungswerte (Index d = design) ergeben sich durch Multiplikation der charakteristischen/repräsentativen Werte mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten: $G_d = \gamma_G \cdot G_k$ $Q_d = \gamma_Q \cdot Q_k$

Mit den Bemessungswerten werden Schnittgrößen ermittelt wie z.B. Momente oder Querkräfte, mit denen dann die Querschnittsbemessung vorgenommen wird. Allgemein spricht man von E_d , dem **Bemessungswert einer Einwirkung (Schnittgröße)** bzw. der aufzunehmenden Schnittgröße.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sind in Tabelle 1.2 der DIN EN 1990/NA festgelegt:

Nachweis	Einwirkung		Symbol	Bemessungssituation		
				P/T ¹⁾	A ¹⁾	
Lagesicherheit des Tragwerks (EQU)	Ständige Einwirkungen:					
	Eigenlast des Tragwerks und von Ausbauten; ständige Einwirkungen, vom Baugrund herrührend; Grundwasser und frei anstehendes Wasser	destab.	$\gamma_{G,dst}$	1,10	1,00	
		stabil.	$\gamma_{G,stab}$	0,90	0,95	
	Bei kleinen Schwankungen der ständigen Einwirkung (z. B. Nachweis der Auftriebsicherheit)	destab.	$\bar{\gamma}_{G,dst}$	1,05	1,00	
		stabil.	$\bar{\gamma}_{G,stab}$	0,95	0,95	
	Ständige Einwirkungen für kombinierte Nachweise der Lagesicherheit unter Einschluss des Widerstands der Bauteile (z. B. Zugverankerung)	destab.	$\gamma_{G,dst}^*$	1,35	1,00	
stabil.		$\gamma_{G,stab}^*$	1,15	0,95		
Veränderliche Einwirkungen	destab.	γ_Q	1,50	1,00		
Außergewöhnliche Einwirkungen	destab.	γ_A	–	1,00		
Versagen des Tragwerks od. der Gründung, durch Bruch, überm. Verformung (STR/GEO)	Unabhängige ständige Einwirkungen (siehe oben)		ungünstig günstig	$\gamma_{G,sup}$ $\gamma_{G,inf}$	1,35 1,00	1,00 1,00
	Unabhängige veränderliche Einwirkungen		ungünstig günstig	γ_Q $\bar{\gamma}_Q$	1,50 –	1,00 –
	Außergewöhnliche Einwirkungen		ungünstig	γ_A	–	1,00
Baugrundversagen durch Böschungs- od. Geländebruch (GEO)	Unabhängige ständige Einwirkungen (s. o.)			γ_G	1,00	1,00
	Unabhängige veränderliche Einwirkungen		ungünstig günstig	γ_Q $\bar{\gamma}_Q$	1,30 –	1,00 –
	Außergewöhnliche Einwirkungen		ungünstig	γ_A	–	1,00

¹⁾ P: Ständige Situation; T: Vorübergehende Situation; A: Außergewöhnliche Situation

Es ist zu beachten, dass das Eigengewicht, je nachdem, ob es günstig oder ungünstig wirkt, mit verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten zu multiplizieren ist!

Bei **Fertigteilen** kann für **Bauzustände für die Biegebemessung ein einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{G/Q} = 1,15$** angenommen werden.

Zwang gilt grundsätzlich als **veränderliche Einwirkung**. Bei linearer Schnittgrößenermittlung im Zustand I mit $E = E_{cm}$ darf der Teilsicherheitsbeiwert bei ungünstigen Auswirkungen reduziert werden, d.h. $\gamma_Q = 1,0$

Hinsichtlich einer übersichtlichen und sinnvollen Lastweiterleitung ist es bei linearer Schnittgrößenermittlung zu empfehlen, die Schnittgrößen und Auflagerreaktionen zunächst ohne Teilsicherheitsbeiwerte zu berechnen und diese erst bei der Bemessung einzurechnen.

3. Tragwiderstand R_d am Beispiel Stahlbeton

Die Baustoffeigenschaften (Index c = concrete/Beton, Index y = yield/Stahl) werden ebenfalls durch **charakteristische Werte (Index k)** festgelegt, sie können DIN EN 1992-1-1 (EC 2) entnommen werden, z.B.

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von Beton
 f_{yk} charakteristischer Wert der Streckgrenze von Betonstahl

Die **Bemessungswerte (Index d)** ergeben sich i. A. durch Division der charakteristischen Werte durch die entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte, z.B. im Stahlbetonbau $f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$ $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$

α ist hierbei ein Faktor zur Berücksichtigung von Lastdauer, Maßstabeffekten, Feuchte, Temperatur, usw. Für **Beton** gilt einheitlich wegen Festigkeitsverlust infolge Dauerbelastung $\alpha = 0,85$

Kombination	Beton (γ_c)	Betonstahl, Spannstahl (γ_s)
Grundkombination	1,50 ¹⁾	1,15
Außergewöhnliche Kombination	1,30	1,00
¹⁾ Bei Fertigteilen (werksmäßige Herstellung und ständige Überwachung) darf $\gamma_{c,red} = 1,35$ gesetzt werden (EC2-1-1/NA, A.2.3).		

Tabelle 2.1DE EC2-1-1: Teilsicherheitsbeiwerte für die Bestimmung des Tragwiderstandes

Für Beton ab der Festigkeitsklasse C55 muss wegen größeren Streuungen der Materialeigenschaften der Teilsicherheitsbeiwert γ_c mit dem folgenden Faktor

multipliziert werden: $\gamma_c' = \frac{1}{1,1 - \frac{f_{ck}}{500}} \geq 1,0$

Der Bemessungswert des Tragwiderstandes R_d ergibt sich in Abhängigkeit von dem für die Schnittgrößenermittlung gewählten Verfahren:
Bei der linear-elastischen Berechnung oder Verfahren auf Basis der Plastizitätstheorie

$$R_d = R \left\{ \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma_c}; \frac{f_{yk}}{\gamma_s}; \frac{f_{pk}}{\gamma_s} \right\}$$

Bei nichtlinearen Verfahren der Schnittgrößenermittlung

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot R \{ f_{cR}; f_{yR}; f_{tR}; f_{pR} \}$$

4. Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

4.1 Nachweis

Ein Bauteil im Grenzzustand der Tragfähigkeit versagt nicht, wenn **an jeder Stelle des Bauteils** der Bemessungswert der entsprechenden Einwirkung (Schnittgröße) E_d kleiner oder gleich dem Bemessungswert des Tragwiderstandes R_d ist:

$$E_d \leq R_d$$

Praktisch wird dieser Nachweis geführt, indem für eine berechnete Schnittgröße E_d eine Querschnittsbemessung gemacht wird (z.B. Biege/Schubbemessung).

Außerdem ist bei der sog. **Lagesicherheit** nachzuweisen, dass die Beanspruchungen aus destabilisierenden Einwirkungen kleiner oder gleich den Beanspruchungen infolge der stabilisierenden Einwirkungen sind:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

dst = destabilisierend, stb = stabilisierend

4.2 Kombination von Einwirkungen

Bei der Ermittlung der maßgebenden Schnittgrößen werden die veränderlichen Einwirkungen üblicherweise in ungünstigster Anordnung berücksichtigt. Sofern mehrere, voneinander unabhängige veränderliche Einwirkungen vorhanden sind (z.B. Wind/Schnee/Nutzlast), dann brauchen sie nicht alle gleichzeitig in voller Größe angesetzt zu werden. Somit ergeben sich verschiedene Kombinationsmöglichkeiten.

Bei der **Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen** wird **eine veränderliche Lastart in voller Größe (=Leiteinwirkung)** berücksichtigt, alle anderen veränderlichen Lastarten werden mit dem Kombinationsbeiwert Ψ_0 abgemindert:

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Kombination für außergewöhnliche Bemessungssituationen (z.B. Anprall):

$$E_{dA} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{PA} \cdot P_k \oplus A_d \oplus \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Dabei bedeutet \oplus „in Kombination mit“.

Wenn die **Schnittkraftermittlung auf Grundlage der linearen Elastizitätstheorie** erfolgt, dürfen **vereinfachte Kombinationsregeln** verwendet werden:

Die veränderlichen Einwirkungen werden bis auf eine vorherrschende Einwirkung aufsummiert und mit dem Größtwert der Kombinationsbeiwerte multipliziert. Der Sicherheitswert für alle veränderlichen Einwirkungen beträgt $\gamma_Q = 1,5$.

Die charakteristischen Werte der unabhängigen Schnittgrößen (Auswirkungen) E_{Gk} , E_{Pk} , $E_{Qk,i}$ und E_{Ad} dürfen getrennt nach den unabhängigen Einwirkungen G_k , P_k , $Q_{k,i}$ und A_d linear berechnet werden. Die unabhängigen veränderlichen Auswirkungen dürfen durch Kombination ihrer ungünstigen charakteristischen Werte als repräsentative Größen $E_{Q,unf}$ (unf=unfavourable, ungünstig) zusammengefasst werden:

$$E_{Q,unf} = E_{Qk,1} + \Psi_{0,Q} \cdot \sum_{i>1(unf)} E_{Qk,i}$$

mit der vorherrschenden unabhängigen veränderlichen Schnittgröße:

$$E_{Qk,1} = \max E_{Qk,i} \text{ oder } \min E_{Qk,i}$$

Der Beiwert $\Psi_{0,Q}$ ist der bauwerksbezogene Größtwert Ψ_0

Die Schnittgröße aus den ständigen Lasten ergibt sich aus:
$$E_{Gk} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \right\}$$

Im Allgemeinen kann man bei üblichen Biegeträgern von vorn herein die maßgebende Kombination erkennen und so den Rechenaufwand reduzieren. Bei überwiegend auf Druck beanspruchten Bauteilen ist das schwierig, da man erst nach der Bemessung erkennen kann, welche Kombination maßgebend war.

Die Zahl der Kombinationen erhöht sich exponentiell, wenn bei der Lastweiterleitung alle dabei erfassten Bauteile mit der Kombinationsregel bearbeitet werden. Deshalb ist es normalerweise angebracht, die Zahl der Lastkombinationen sinnvoll zu reduzieren.

Beispiel:

Einfeldträger mit Kragarm und Belastung $g_{k1} = 10,0 \text{ kN/m}^2$ (Eigenlasten), $q_{k1} = 7,5 \text{ kN/m}^2$ (Nutzlast in Büroräumen) und $Q_{k2} = 5,0 \text{ kN/m}$ (Schneelast; Lage bis NN +1000).

Nachweis der Lagesicherheit

Maßgebende Lastfallkombination mit Q_{k2} als Leiteinwirkung (s.u.)

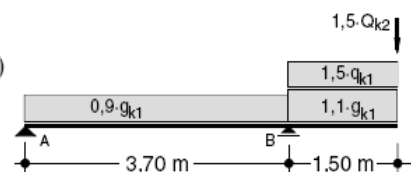
$$- s_{G,sup} \cdot g_{k1} \oplus \gamma_Q \cdot Q_{k2} \oplus \gamma_Q \cdot \Psi_0 \cdot q_{k1}$$

$$- s_{G,inf} \cdot g_{k1}$$

$$A_{d,dst} = 1,1 \cdot 10,0 \cdot 1,5^2 / (2 \cdot 3,7) + 1,5 \cdot 5,0 \cdot 1,5 / 3,7 + 1,5 \cdot (0,7 \cdot 7,5) \cdot 1,5^2 / (2 \cdot 3,7) = 8,8 \text{ kN/m}$$

$$A_{d,stb} = 0,9 \cdot 10,0 \cdot 3,70 / 2 = 16,7 \text{ kN/m}$$

$$A_{d,dst} = 8,8 \text{ kN/m} < A_{d,stb} = 16,7 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{Nachweis erfüllt}$$

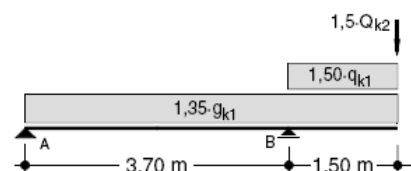


Versagen an der Stütze B auf Biegung (Einwirkung)

Maßgebende Lastfallkombination mit Q_{k2} als Leiteinwirkung*)

$$- s_{G,sup} \cdot g_{k1} \oplus \gamma_Q \cdot Q_{k2} \oplus \gamma_Q \cdot \Psi_0 \cdot q_{k1}$$

$$M_{Ed,B} = 1,35 \cdot 10,0 \cdot 1,5^2 / 2 + 1,50 \cdot 5,0 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot (0,7 \cdot 7,5) \cdot 1,5^2 / 2 = 35,3 \text{ kNm/m}$$



5. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Zu den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit im Stahlbetonbau zählen üblicherweise die folgenden Nachweise:

- Begrenzung von Stahl- und Betonspannungen
- Beschränkung der Rissweite
- Begrenzung der Durchbiegung

Dafür sind die folgenden Einwirkungskombinationen festgelegt. Welche davon für welchen Nachweis anzuwenden ist, kann der DIN EN 1992-1-1 entnommen werden. Der **Bemessungswert des Bauteilwiderstandes** ist in der Regel mit $\gamma_R = 1,0$ anzusetzen, d.h. es wird mit realistischen Materialkennwerten gerechnet.

Seltene Kombination:
$$E_{d,rare} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Häufige Kombination:
$$E_{d,frequ} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Quasi-ständige Kombination:
$$E_{d,perm} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Im **üblichen Hochbau** dürfen die **Einwirkungskombinationen** folgendermaßen **vereinfacht** werden, wobei die jeweils ungünstigste Kombination maßgebend ist:

Seltene Kombination zu:
$$E_{d,rare} = E_{Gk} + E_{Pk} + E_{Q,unf}$$

Häufige Kombination:
$$E_{d,frequ} = E_{Gk} + E_{Pk} + \Psi_{1,Q} \cdot E_{Q,unf}$$

Der Beiwert $\Psi_{1,Q}$ ist der bauwerksbezogene Größtwert Ψ_1

Quasi-ständige Kombination:
$$E_{d,perm} = E_{Gk} + E_{Pk} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot E_{Qk,i}$$

Fortsetzung des Beispiels

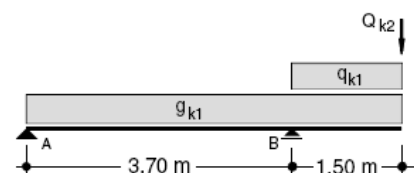
Biegemoment an Stütze B, z. B. in der häufigen Kombination

Maßgebende Lastfallkombination mit q_{k1} als Leiteinwirkung²⁾

$$- g_{G,sup} \cdot g_{k1} \oplus \Psi_{1,1} \cdot q_{k1} \oplus \Psi_{2,2} \cdot Q_{k2}$$

$$M_{frequ,B} = 10,0 \cdot 1,5^2 / 2 + (0,5 \cdot 7,5) \cdot 1,5^2 / 2 + (0,0 \cdot 5,0) \cdot 1,5$$

$$= 15,47 \text{ kNm/m}$$



6. Allgemeines Beispiel

Das folgende Beispiel einer Decke (Büro) mit Belastungen aus einem Dachstuhl (Wind, Schnee, Eigengewicht) soll die Anwendung der Kombinationsregeln verdeutlichen:

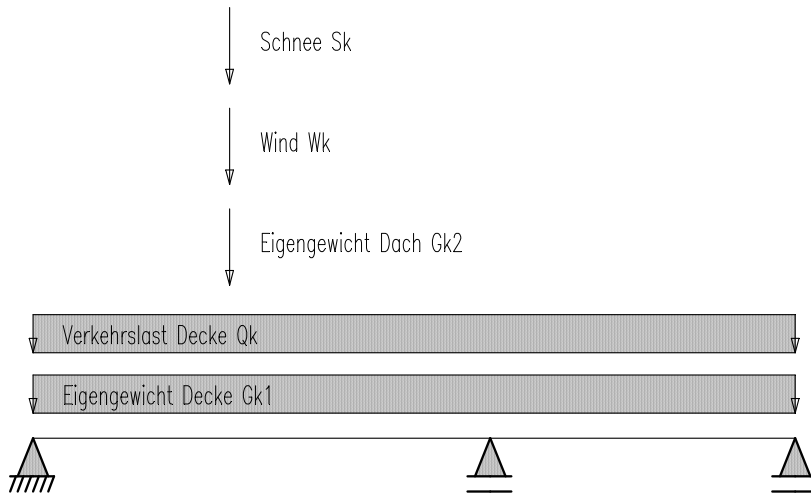


Bild: Beispiel Bürodecke mit Dachlasten

Die Kombinationsbeiwerte ergeben sich zu:

- Verkehrslast der Decke (Büro) Q $\Psi_0 = 0,7$
- Windlast W $\Psi_0 = 0,6$
- Schneelast S (Höhe über 1000 m) $\Psi_0 = 0,7$

Daraus resultieren folgende Grundkombinationen:

Nr.	Ständige Einwirkungen	Veränderliche Einwirkungen	
		Leiteinwirkung	Übrige Einwirkungen
1	$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}$	$\gamma_Q \cdot Q_k$	$\gamma_Q \cdot 0,6 \cdot W_k + \gamma_Q \cdot 0,7 \cdot S_k$
2	$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}$	$\gamma_Q \cdot W_k$	$\gamma_Q \cdot 0,7 \cdot Q_k + \gamma_Q \cdot 0,7 \cdot S_k$
3	$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}$	$\gamma_Q \cdot S_k$	$\gamma_Q \cdot 0,7 \cdot Q_k + \gamma_Q \cdot 0,6 \cdot W_k$

Bei Anwendung der vereinfachten Kombinationsregel erhält man folgende Kombinationsmöglichkeiten:

Nr.	Ständige Einwirkungen	Veränderliche Einwirkungen
1	$\gamma_G \cdot \sum_j G_{k,j}$	$\gamma_Q \cdot (Q_k + 0,7 \cdot (W_k + S_k))$

7. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Rechenaufwand zur Bestimmung der maßgebenden Kombination durch die Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte gestiegen ist. Bei Systemen mit nur einer Nutzlast hält sich der Mehraufwand in Grenzen. Deutlich mehr Aufwand muss man bei der Bemessung von Stützen treiben, da durch die Kombination von Normalkraft und Biegemoment die maßgebende Kombination nicht von vornherein erkannt werden kann.

Da die vereinfachten Verfahren nur eine mäßige Rechenerleichterung bringen, wird man bei Computerberechnungen immer die allgemeinen Verfahren bevorzugen. Für Übersichtsrechnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Bemessung), besonders wenn eine Nutzlast deutlich größer als der Rest ist, bietet es sich an, die Kombinationsbeiwerte auf 1 zu setzen. Die veränderlichen Lasten können dann wie bisher einfach zusammenaddiert werden und man erhält eine Einwirkung (z.B. Moment), die auf der sicheren Seite liegt.

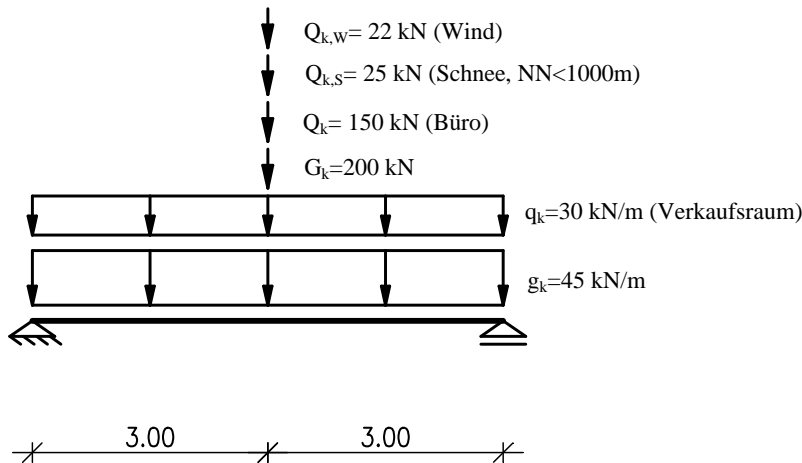
8. Literatur

- [1] DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln.
- [1] DIN EN 1991: Einwirkungen auf Tragwerke.
- [2] Holschemacher (Hrsg.): Entwurfs- und Berechnungstabellen für Bauingenieure, Bauwerk Verlag.
- [3] Wetzell (Hrsg.): Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln, Teubner Verlag.
- [4] Schneider (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure, Werner Verlag.

9. Beispiele

9.1 Einfeldträger mit mehreren veränderlichen Einwirkungen

Für den unten dargestellten Abfangträger soll das maximale Feldmoment für verschiedene Grenzzustände berechnet werden.



Im Folgenden sind die charakteristischen Momente in Feldmitte getrennt nach den einzelnen Einwirkungen zusammengestellt:

Ständige Lasten:

$$M_{k,G} = \frac{45 \text{ kN/m} \cdot (6 \text{ m})^2}{8} + \frac{200 \text{ kN} \cdot 6 \text{ m}}{4} = 202,5 \text{ kNm} + 300 \text{ kNm} = 502,5 \text{ kNm}$$

Nutzlasten:

$$M_{k,Q} = \frac{30 \text{ kN/m} \cdot (6 \text{ m})^2}{8} + \frac{150 \text{ kN} \cdot 6 \text{ m}}{4} = 135 \text{ kNm} + 225 \text{ kNm} = 360 \text{ kNm}$$

Schnee:

$$M_{k,S} = 25 \text{ kN} \cdot 6 \text{ m} / 4 = 37,5 \text{ kNm}$$

Wind:

$$M_{k,W} = 22 \text{ kN} \cdot 6 \text{ m} / 4 = 33 \text{ kNm}$$

Grenzzustand der Tragfähigkeit

Leiteinwirkung Nutzlasten:

$$M_{d1} = 1,35 \cdot 502,5 \text{ kNm} + 1,5 \cdot (360 \text{ kNm} + 0,5 \cdot 37,5 \text{ kNm} + 0,6 \cdot 33 \text{ kNm}) = 1276,2 \text{ kNm}$$

Leiteinwirkung Schnee:

$$M_{d2} = 1,35 \cdot 502,5 \text{ kNm} + 1,5 \cdot (37,5 \text{ kNm} + 0,7 \cdot 360 \text{ kNm} + 0,6 \cdot 33 \text{ kNm}) = 1142,3 \text{ kNm}$$

Leiteinwirkung Wind:

$$M_{d3} = 1,35 \cdot 502,5 \text{ kNm} + 1,5 \cdot (33 \text{ kNm} + 0,7 \cdot 360 \text{ kNm} + 0,5 \cdot 37,5 \text{ kNm}) = 1134 \text{ kNm}$$

Die maßgebende Kombination ist M_{d1} . Da in diesem Beispiel die Nutzlast deutlich größer als die Wind- und Schneelast ist, wird im Weiteren nur der Fall mit Leiteinwirkung Nutzlast verfolgt.

Vereinfachtes Verfahren im Hochbau mit Leiteinwirkung Nutzlasten:

$$M_{Q,unf} = M_{Qk,1} + \Psi_{0,Q} \cdot \sum_i M_{Qk,i} = 360kNm + 0,7 \cdot (37,5kNm + 33kNm) = 409,4kNm$$

$$M_{d4} = 1,35 \cdot 502,5kNm + 1,5 \cdot 409,4kNm = 1292,4kNm$$

Zum Vergleich ohne Kombinationsbeiwerte ($\Psi_0 = 1$):

$$M_{d5} = 1,35 \cdot 502,5kNm + 1,5 \cdot (360kNm + 37,5kNm + 33kNm) = 1324,1kNm$$

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Es wird nur das allgemeine Verfahren der Kombination gezeigt, da das vereinfachte Verfahren keine echte Vereinfachung bringt. Bei der häufigen und quasi-ständigen Kombination ist zu beachten, dass die Kombinationsbeiwerte Ψ_1 bei der Leiteinwirkung für Verkaufsräume $\Psi_1 = 0,7$ und für Büroräume $\Psi_1 = 0,5$ betragen.

Seltene Kombination (mit Ψ_0):

$$M_{rare} = 502,5kNm + 360kNm + 0,5 \cdot 37,5kNm + 0,6 \cdot 33kNm = 901kNm$$

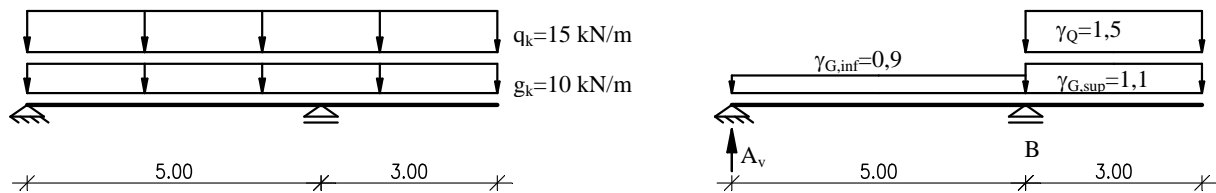
Häufige Kombination (mit Ψ_1 und Ψ_2):

$$M_{frequ} = 502,5kNm + (0,7 \cdot 135kNm + 0,5 \cdot 225kNm) + 0 + 0 = 709,5kNm$$

Quasi-ständige Kombination (mit Ψ_2):

$$M_{perm} = 502,5kNm + (0,6 \cdot 135kNm + 0,3 \cdot 225kNm) + 0 + 0 = 651kNm$$

9.2 Beispiel zur Lagesicherheit



Das Beispiel zeigt einen Einfeldträger mit einem Kragarm, der durch eine charakteristische ständige Gleichstreckenlast von 10 kN/m und eine charakteristische Nutzlast von 15 kN/m belastet wird. Aufgrund der großen Kragarmlänge ist mit einem Abheben des Auflagers A zu rechnen. Deshalb wird ein Nachweis zur Lagesicherheit geführt.

Allgemein gilt im Hochbau:

$$E_{d,dst} = 1,1 \cdot E_{Gk,dst} + 1,1 \cdot E_{Pk,dst} + 1,5 \cdot E_{Q,unf} \leq 0,9 \cdot E_{Gk,stb} + 0,9 \cdot E_{Pk,stb} + R_d = E_{d,stb}$$

Dabei ist R_d der Bemessungswiderstand der Verankerung, sofern erforderlich.

Die ständige Last wird beim Nachweis der Lagesicherheit feldweise ungünstig angesetzt.

Destabilisierendes Moment um Lager B (rechtsdrehend):

$$M_{B,dst} = 1,1 \cdot 10 \text{ kN/m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} + 1,5 \cdot 15 \text{ kN/m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} = 150,75 \text{ kNm}$$

Stabilisierendes Moment um B (linksdrehend):

$$M_{B,stb} = 0,9 \cdot 10 \text{ kN/m} \cdot 5 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m} - A_{v,d} \cdot 5 \text{ m} = 112,5 \text{ kNm} - A_{v,d} \cdot 5 \text{ m}$$

Das stabilisierende Moment muss mindestens so groß wie das destabilisierende Moment sein:

$$M_{B,stb} = 112,4 \text{ kNm} - A_{v,d} \cdot 5 \text{ m} = M_{B,dst} = 150,75 \text{ kNm}$$

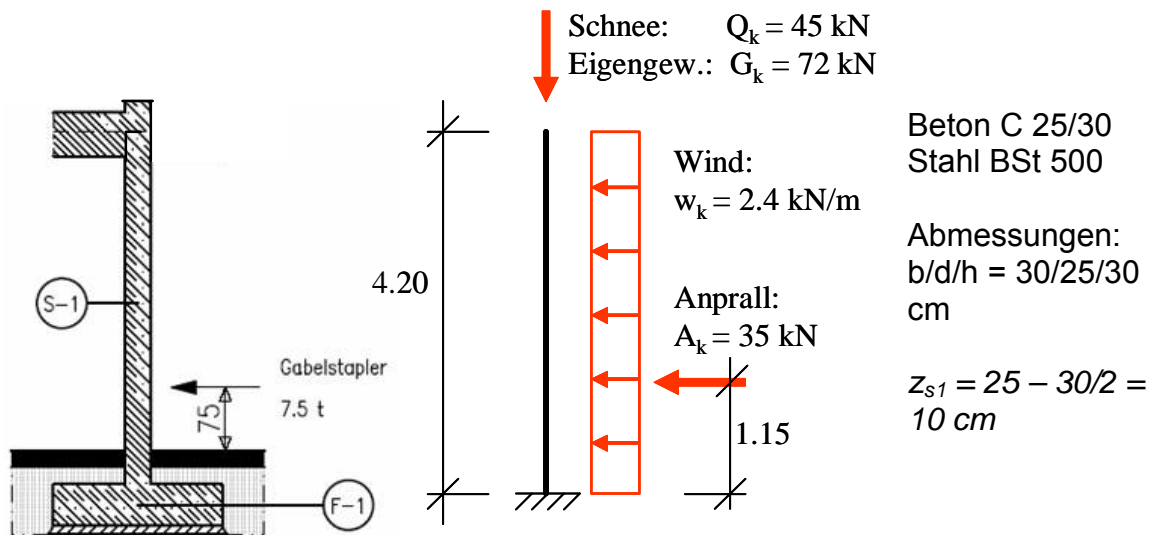
$$\Rightarrow A_{v,d} = -7,65 \text{ kN (Zug)}$$

Am Auflager A muss eine Zugverankerung vorgesehen werden, die mindestens eine Designkraft von 7,65 kN übertragen kann.

(Würde man, was aber falsch ist, einen konstanten Teilsicherheitsfaktor $\gamma_G = 1,35$ für die ständige Belastung ansetzen, so ergäbe sich eine Auflagerkraft von $A_{v,d} = 1,35 \text{ kN}$ (Druck) und folglich wäre keine Zugverankerung erforderlich.)

9.3 Stütze mit Anprall

Dieses Beispiel ist etwas umfangreicher, da durch die beiden Schnittgrößen N und M an der Einspannstelle nicht leicht der für die Bemessung ungünstigste Fall erkannt werden kann. Besonderer Wert wird außerdem auf die Behandlung des Teilsicherheitskonzepts im Zusammenhang mit einer außergewöhnlichen Bemessungssituation (Anprall) gelegt.



Ermittlung der einwirkenden charakteristischen Schnittgrößen:

Infolge Wind: $M_{wk} = 2,4 \text{ kN/m} \cdot (4,2 \text{ m})^2 / 2 = 21,2 \text{ kNm}$

Infolge Anprall: $M_{Ak} = 35 \text{ kN} \cdot 1,15 \text{ m} = 40,3 \text{ kNm}$

Der Einfluss der aussteifenden Aufgabe der Stütze wird durch eine zusätzliche Lastausmitte erfasst.

Infolge Schiefstellung: $e_a = \frac{1}{100 \cdot \sqrt{4,20}} \cdot 4,20 = 0,02 \text{ m}$

Infolge Th. II. Ordn.:

$$e_2 = K_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{l_0^2}{10} = 1,0 \cdot \frac{2 \cdot 1,0 \cdot 2,174 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 0,30} \cdot \frac{2 \cdot 4,20}{10} = 0,014 \text{ m}$$

Zusätzliche Ausmitte: $e_{tot} = e_a + e_2 = 0,02 + 0,014 = 0,034 \text{ m}$
 $\Delta M = N \cdot e_{tot}$

Ständige und vorübergehende Bemessungssituation (ohne Anpralllasten)

Kombinationsregel: $E_d (\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i})$

$$\gamma_G = 1,35$$

mit $\gamma_Q = 1,5$ $\psi_0 = 0,6$ Wind
 $\psi_0 = 0,5$ Schnee

Kombination 1, Leiteinwirkung Schnee:

$$N_{Ed} = -1,35 \cdot 72kN - 1,5 \cdot 45kN = -165kN \quad (\text{größte Druckkraft})$$

$$M_{Ed} = 165kN \cdot 0,034m + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 21,2kNm = 24,7kNm$$

Kombination 2, Leiteinwirkung Wind:

$$N_{Ed} = -1,35 \cdot 72kN - 1,5 \cdot 0,5 \cdot 45kN = -131kN$$

$$M_{Ed} = 131kN \cdot 0,034m + 1,5 \cdot 21,2kNm = 36,3kNm \quad (\text{maximales Moment})$$

Kombination 3, Leiteinwirkung Wind, ohne Schnee:

$$N_{Ed} = -1,0 \cdot 72kN = -72kN \quad (\text{kleinste Druckkraft})$$

$$M_{Ed} = 72kN \cdot 0,034m + 1,5 \cdot 21,2kNm = 34,2kNm$$

Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit infolge Einwirkungen für eine außergewöhnliche Bemessungssituation (mit Anpralllasten)

Kombinationsregel: $E_d (\sum \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus A \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i})$

$$\gamma_{GA} = 1,0$$

mit $\psi_1 = 0,5$ $\psi_2 = 0$ Wind
 $\psi_1 = 0,2$ $\psi_2 = 0$ Schnee

Kombination 1', Leiteinwirkung Schnee:

$$N_{Ed} = -1,0 \cdot 72kN - 0,2 \cdot 45kN = -81kN \quad (\text{größte Druckkraft})$$

$$M_{Ed} = 81kN \cdot 0,034m + 40,3kNm + 0 \cdot 21,2kNm = 43,1kNm$$

Kombination 2', Leiteinwirkung Wind:

$$N_{Ed} = -1,0 \cdot 72kN - 0 \cdot 45kN = -72kN$$

$$M_{Ed} = 72kN \cdot 0,034m + 40,3kNm + 0,5 \cdot 21,2kNm = 53,3kNm \quad (\text{maximales Moment})$$

Kombination 3', Leiteinwirkung Wind, ohne Schnee:

$$N_{Ed} = -1,0 \cdot 72kN = -72kN \quad (\text{kleinste Druckkraft})$$

$$M_{Ed} = 72kN \cdot 0,034m + 40,3kNm + 0,5 \cdot 21,2kNm = 53,3kNm$$

Es wird darauf hingewiesen, dass bei der außergewöhnlichen Bemessungssituation die Teilsicherheitsfaktoren für Beton $\gamma_c = 1,3$ und für Betonstahl $\gamma_s = 1,0$ sind.