

Tech-News 11/06 - Fachgebiet: Stahlbeton

Von Dr.-Ing. Klaus Wittemann
Prüfingenieur für Baustatik VPI
Wendtstrasse 3
76185 Karlsruhe

Von Dipl.-Ing. Jürgen Lorch
Prüfingenieur für Baustatik VPI
Eichenstrasse 11
71149 Bondorf

Nachweis gegen Ermüdung gemäß DIN 1045-1 Abschnitt 10.8

1. Allgemeines

Tragende Bauteile mit beträchtlichen Spannungsänderungen unter nicht vorwiegend ruhender Einwirkung (siehe DIN 1045-1 Abschnitt 3.1.3) müssen gegen Ermüdung (früher Nachweis der Schwingbreite , DIN 1045 –7/88) bemessen werden. Der Nachweis muss für Beton und Spann- bzw. Betonstahl getrennt geführt werden. Für Leichtbeton sind gesonderte Betrachtungen notwendig.

Der Ermüdungsbruch beim Beton ist mit einer großen Rotation in der Druckzone verbunden und würde sich im Gegensatz zum Betonstahl ankündigen. Der Ermüdungsbruch des Betonstahls ist deshalb gefährlicher, weil er als Bruch ohne Vorankündigung auftritt. Bei Stahlbetontragwerken versagt in der Regel die Biegezug- oder die Querkraftbewehrung.

Die vorliegende Tech-News behandelt den vereinfachten Nachweis nach DIN 1045-1 Abschnitt 10.8.4 und den Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 1045-1 Abschnitt 10.8.3 Absatz 5 und 6. Der explizite Nachweis der Betriebsfestigkeit nach Absatz 1, Schädigungssumme $D_{ED} \leq 1$, wird nicht behandelt. Außerdem werden die Besonderheiten bei Spannbetonbauwerken nicht angesprochen und auf die Besonderheit von Hochleistungsbeton wird ebenfalls nicht eingegangen. Für Tragwerke des üblichen Hochbaus (siehe DIN 1045-1 Abschnitt 3.1.1) ist im Allgemeinen kein Nachweis gegen Ermüdung zu führen.

In der DIN 1045-1 Abschnitt 10.8 wird im Zusammenhang mit der Gleichsetzung von $\Delta\sigma_{s,eq} = \max \sigma_s$ der Ausdruck übliche Hochbauten erwähnt. Was unter diesem Begriff zu verstehen ist, muss noch geklärt werden. Wir gehen davon aus, dass Industriebauten mit Gegengewichtsstaplern nach DIN 1055-3:2002-10 unter diesem Begriff behandelt werden können.

Die neue DIN 1055-3:2002-10 definiert im Abschnitt 6.4 die gleichmäßig verteilten Nutzlasten und Einzellasten bei nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen. Für die gleichmäßig verteilten Nutzlasten, die ringsherum die Grundrissfläche der Gegengewichtsstapler (früher Gabelstapler) umsäumen, muss der Schwingbeiwert $\phi \leq 1,4$ (früher ϕ) nicht angesetzt werden. Es gibt 6 Kategorien G1 bis G6 (zul. Gesamtlast von 31 bis 190 kN). Die Achslasten werden durch zwei Einzellasten Q_k ersetzt. Die Aufstandsfläche (0,20 x 0,20 m) bleibt gleich. Die Achsabstände haben sich geringfügig geändert. Formal muss darauf hingewiesen werden, dass für Kategorie G6 in der DIN 1055-100:2001-03 in der Tabelle A.2 keine Beiwerte ψ aufgeführt sind.

In der LTB (siehe pdf-Datei auf dieser website) ist die Zeile 1.2 (früher DIN 1072) gestrichen; d.h. Decken im Hoch- und Industriebau müssen formal nach den Fachberichten berechnet werden.

Hofkellerdecken, die nur im Brandfall von Feuerwehrfahrzeugen befahren werden, sind für die Brückenklasse 16/16 nach DIN 1072:1985-12 zu berechnen . Dabei ist jedoch nur ein Einzelfahrzeug in ungünstigster Stellung anzusetzen, auf den umliegenden Flächen ist die gleichmäßig verteilte Last der Hauptspur in Rechnung zu stellen. Die Nutzlast darf als vorwiegend ruhend eingestuft werden und somit ist ein Nachweis gegen Ermüdung nicht erforderlich. Es wird empfohlen, wenn eine Feuerwehrgasse im Baugesuch vorgeschrieben wird und die in einem Deckenbereich liegt, mit der Brandschutzbehörde Kontakt aufzunehmen, da einige Großstädte bestimmte Feuerwehrfahrzeuge, vor allem Leiterfahrzeuge, zum Einsatz bringen, die wesentliche höhere Einzellasten erzeugen.

In der DIN 1055-100 werden im Anhang A Tabelle 2 die Kombinationsbeiwerte ψ aufgeführt. Gegengewichtstapler werden in die Kategorie G (30 kN bis 160 kN) eingestuft, dabei wird vorausgesetzt, dass die Begriffe Fahrzeuglast und zul. Gesamtlast im Sinne der Einwirkungen identisch sind. Mit welchen Beiwerten ψ die Kategorie G6 (190 kN) zu beaufschlagen sind, muss noch geklärt werden.

Im Anhang A.2 Satz 2 wird folgendes ausgeführt: Bei mehreren gleichzeitig auftretenden Nutzlasten oder Verkehrslasten ist der jeweils größte Beiwert ψ nach Tabelle A.2 zu verwenden. Ob diese Festlegung auch zukünftig in allen Fällen bestehen bleibt, darf angezweifelt werden. Einsprüche wurden schon eingereicht. Die Kategorie E (Lagerräume) erhöht somit die Kategorie G (Fahrzeuglasten bzw. Gegengewichtstapler) wesentlich.

2. Einwirkungskombination für das Verfahren DIN 1045-1 Abschnitt 10.8.4

Für den vereinfachten Nachweis ist die Einwirkungskombination des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach DIN 1055-100 , **häufige Lastkombination**, anzuwenden. Es ist anzumerken, dass der Nachweis gegen Ermüdung eigentlich ein Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist. Diese Mischung ist nicht sehr glücklich gewählt. Hier liegt auch ein wesentlicher Unterschied zum Verfahren nach Abschnitt 10.8.3 (Betriebsfestigkeitsnachweis)

$$E_{d, \text{frequ}} = G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

3. Betonspannungen nach 10.8.4 infolge Biegemoment

Für Beton unter Druckspannungen infolge von Biegemomenten ist folgende Gleichung einzuhalten :

$$\left| \sigma_{cd, \max} \right| / f_{cd, \text{fat}} \leq 0,50 + 0,45 \left| \sigma_{cd, \min} \right| / f_{cd, \text{fat}} \leq 0,90 \text{ bis C50/60 } (2)$$

$\left| \sigma_{cd, \max} \right|$ ist die maximale Betondruckspannung (absoluter Betrag) unter der häufigen Einwirkungskombination

$\left| \sigma_{cd, \min} \right|$ ist die minimale Betondruckspannung (absoluter Betrag) unter der häufigen Einwirkungskombination, an der gleichen Stelle wie die zugehörige max. Spannung.
Bei Zugspannungen ist $\left| \sigma_{cd, \min} \right| = 0$ (Berichtigung 1 zur DIN 1045-1)
Bei der Grenzwertbetrachtung $\sigma_{cd, \min} = 0$ stellt man fest, dass das Verhältnis $\sigma_{cd, \max} / f_{cd, \text{fat}}$ auf 0,50 begrenzt wird.

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit $f_{cd, \text{fat}}$ bei Ermüdungsbeanspruchung wird nach folgender Formel ermittelt :

$$f_{cd, \text{fat}} = \beta_{cc}(t_0) * [1 - f_{ck} / 250] * f_{cd} ; f_{ck} \text{ und } f_{cd} \text{ in N/ mm}^2 \quad (3)$$

f_{ck} ist die charakteristische Betondruckfestigkeit des Betons, z.B für C20/25 gilt $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$,
 $f_{cd} = \alpha * f_{ck} / \gamma_{c, \text{fat}}$

$\alpha = 0,85$ für Normalbeton, $\gamma_{c, \text{fat}} = 1,50$

Die Erhärtungsformel berücksichtigt die Nacherhärtung des Betons über die 28-Tage-Festigkeit :

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{0,2(1-\sqrt{28/t_0})} \quad (4)$$

t_0 = Zeitpunkt der Erstbelastung , bei 28 Tage nimmt β_{cc} den Wert 1,0 an.

4. Beispiel (1) für die Betondruckspannungen nach 10.8.4 infolge Biegemomente:

Die Gleichungen (2) bis (6) sollen an einem Beispiel erläutert werden :

$M_{max,d} = 50$ kNm, $M_{min,d} = 20$ kNm für die häufige Einwirkungskombination nach Gleichung (1)
 Betonquerschnitt $b/h = 100 / 35$ cm, $d = 30$ cm, vorh. $A_s = 12,5$ cm²,

Betongüte C30/37 (B35 gemäß Zuordnungstabelle, siehe Tech-News 02/03),
 Erstbelastung der Decke nach einem Jahr = 365 Tage

$\alpha_e = E_s / E_{c,eff}$, nach DIN 1045 Abschnitt 10.8.2 Absatz 2 darf beim Nachweis gegen Ermüdung mit $\alpha_e = 10$ gerechnet werden. In den nachfolgenden Beispiele wird $\alpha_e = 10$ angesetzt.

Zur Ermittlung der Betondruckspannungen ist es notwendig die Druckzonenhöhe x im Betonquerschnitt unter Vernachlässigung der Zugfestigkeit des Betons zu ermitteln. Für Rechteckquerschnitte lautet die Gleichung wie folgt:

$$x = -\alpha_e * A_s/b + [(\alpha_e * A_s/b)^2 + 2 \alpha_e * A_s * d / b]^{0,50} \quad (5)$$

Für Plattenbalken liegt i.d.R. die Nulllinie in der Platte. Man kann dann ein Ersatzrechteck wählen und somit zur Bestimmung von x die o.a. Gleichung verwenden. Es ist unbedingt zu beachten, dass „ d “ die Nutzhöhe definiert und „ h “ die Gesamthöhe des Querschnitts bezeichnet. An diese Umbenennung gegenüber der DIN 1045 –7/ 88 muss man sich erst gewöhnen. Die Ableitung der Gleichung (5) kann man im Betonkalender 1996 – Autoren Grasser/Kupfer – nachvollziehen. Dort findet man auch Gleichungen für den Rechteckquerschnitt mit Druckbewehrung.

Die Betonspannungen infolge Biegemoment ergibt sich zu :

$$\sigma_c = 2 * M_{max / min} / [b * x * (d - x/3)] \quad (6)$$

Hinweis : Gleichung (6) hat nur gültig für reine Biegung ; d.h. ohne Normalkrafteinfluss. Die Betonspannungen sind Druckspannungen, auf eine Vorzeichenreglung wird verzichtet, da in Gleichung (2) nur Beträge eingesetzt werden.

$$\alpha_e = 10$$

$$x = - 10 * 12,5 / 100 + [1,25^2 + 2 * 10 * 12,5 * 30 / 100]^{0,50} = 7,50 \text{ cm}$$

$$\sigma_{cd,max} = 2 * 50 * 10^{-3} / [1,0 * 0,075 * (0,30 - 0,075/3)] = 4,85 \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_{cd,min} = 1,94 \text{ N / mm}^2$$

$$\beta_{cc} = e^{0,2(1-\sqrt{28/365})} = 1,16$$

$$f_{cd,fat} = 1,16 * [1 - 30 / 250] * 0,85 * 30 / 1,5 = 17,3 \text{ N/mm}^2$$

nach Gleichung (2) ergibt sich :

$$4,85 / 17,3 = 0,28 \leq 0,5 + 0,45 * 1,94 / 17,3 = 0,55 \leq 0,90$$

Hinweis:

Im Gegensatz dazu wird beim Nachweis des Betontahls nur ein Wert für $\Delta\sigma$ bemessungsrelevant.

5. Betondruckspannungen nach 10.8.4 in querkraftbeanspruchten Bauteilen:

Die Gleichung (2) ist auch für die Druckstreben von querkraftbeanspruchten Bauteilen mit Querkraftbewehrung gültig. In der Gleichung (3) ist $f_{cd,fat}$ zusätzlich mit Faktor $\alpha_c = 0,75 \eta_1$ abzumindern, mit $\eta_1 = 1,0$ für Normalbeton. Dieser Abminderungsbeiwert berücksichtigt die schiefwinkelig kreuzende Risse im Bereich der Druckstreben. Der Faktor α_c ersetzt nicht den Faktor α in der Gleichung : $f_{cd} = \alpha * f_{ck} / \gamma_{c,fat}$, sondern Gleichung (3) lautet für diesen Fall :

$$f_{cd,fat} = \alpha_c * \beta_{cc}(t_0) * [1 - f_{ck} / 250] * f_{cd} \quad (3a)$$

Für Betonteile unter Querkraftbeanspruchung ohne Querkraftbewehrung werden 2 Fälle unterschieden:

für $V_{Ed,min} / V_{Ed,max} \geq 0$, kein Vorzeichenwechsel im selben Querschnitt

$$|V_{Ed,max}| / |V_{Rd,ct}| \leq 0,50 + 0,45 |V_{Ed,min}| / |V_{Rd,ct}| \leq 0,90 \text{ bis C50/60} \quad (7)$$

für $V_{Ed,min} / V_{Ed,max} < 0$, ein Vorzeichenwechsel im selben Querschnitt

$$|V_{Ed,max}| / |V_{Rd,ct}| \leq 0,50 - |V_{Ed,min}| / |V_{Rd,ct}| \quad (8)$$

$V_{Rd,ct}$ ist der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gleichung 70 der DIN 1045-1, weitere Erläuterungen siehe Beispiel (3)

6. Betonstahlspannungen nach 10.8.4

Wenn unter der häufigen Einwirkungskombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Schwingungsbreite

$$\Delta\sigma_s \leq 70 \text{ N/mm}^2$$

eingehalten wird, darf im vereinfachten Nachweisverfahren ein ausreichender Ermüdungswiderstand angenommen werden. Dies ist aber nur für ungeschweißte Bewehrungsstähle unter Zugbeanspruchung im Nachweisbereich gültig. Die DIN 1045-1 Abschnitt 10.8.4 unterscheidet nicht mehr zwischen geraden und gekrümmten Stäben wie bei DIN 1045-7/88 Abschnitt 17.8. Diese Vereinfachung gilt aber nicht für den Nachweis nach Abschnitt 10.8.3.

Für geschweißte Stäbe muss zusätzlich der Querschnitt im Bereich der Schweißstellen unter der häufigen Einwirkungskombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit vollständig überdrückt sein.

$$\sigma_{c, frequ} \leq 0 \text{ N/mm}^2$$

Die Stahlspannungen können näherungsweise (ohne Normalkräfte) nach folgender Formel ermittelt werden:

$$\Delta\sigma_s = (M_{\max} - M_{\min}) / (A_s * z) \quad (9)$$

der innere Hebelarm beträgt bei linearer Spannungsverteilung $z = d - x/3$.

Grenzwerte der Spannungsschwingbreiten für einen vereinfachten Nachweis gemäß Heft 525 für eine Lastwechselzahl von 10^8 ; d.h. teilweise kann der Wert 70 N/mm^2 überschritten werden:

Tabelle 1

Betonstahl	$\Delta\sigma_s$
Gerader Stab $d_s \leq 28 \text{ mm}$	100 N/mm ²
Gerader Stab $d_s > 28 \text{ mm}$	80 N/mm ²
Gebogener Stab $d_s \leq 28 \text{ mm}$ $d_{br} \geq 15 d_s$	75 N/mm ²
Gebogener Stab $d_s \leq 28 \text{ mm}$ $d_{br} \geq 10 d_s$	60 N/mm ²
Gebogener Stab $d_s \leq 28 \text{ mm}$ $d_{br} \geq 5 d_s$	48 N/mm ²
Matten, Schweißverbindungen	30 N/mm ²

7. Beispiel (2) für die Betonstahlspannungen nach 10.8.4 infolge Biegemomente

Die Angaben von Beispiel 1 werden übernommen. Einwirkungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit häufige Lastkombination : $M_{\max,d} = 50 \text{ kNm}$ und $M_{\min,d} = 20 \text{ kNm}$, $x = 7,50 \text{ cm}$, vorh. $A_s = 12,5 \text{ cm}^2$

$$\Delta\sigma_s = (50 - 20) * 10^{-3} / 12,5 * 10^{-4} * (0,30 - 0,075/3) = 87,3 \text{ N/mm}^2 > 70,0 \text{ N/mm}^2$$

Die vorhandene Bewehrung muss um ca. 24 % erhöht werden, um die Schwingbreite von 70 N/mm^2 einzuhalten. Handelt es sich um gerade Stäbe mit einem Durchmesser $\leq 28 \text{ mm}$, so wäre der Nachweis erfüllt, da $87,3 \text{ N/mm}^2 < 100,0 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tab. 1 oben)

8. Nachweis gegen Ermüdung nach 10.8.3

Nach Abschnitt 10.8.3 Absatz 5 der DIN 1045-1 darf der Nachweis gegen Ermüdung für den Betonstahl als erbracht angesehen werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\gamma_{F,fat} * \gamma_{Ed,fat} * \Delta\sigma_{s,equ} \leq \Delta\sigma_{Rsk} (N^*) / \gamma_{s,fat}$$

Nach DIN 1045-1 Abschnitt 5.3.3 Absatz 2 ist $\gamma_{F,fat}$ und $\gamma_{Ed,fat} = 1,0$ und für **übliche Hochbauten**, nicht zu verwechseln mit üblicher Hochbau nach DIN 1045-1 Abschnitt 3.1.1, darf näherungsweise $\Delta\sigma_{s,equ} = \max \Delta\sigma_s$ angenommen werden, $\max \Delta\sigma_s$ ist die maximale Spannungsamplitude unter der maßgebenden ermüdungswirksamen Einwirkungskombination. Der Teilsicherheitsbeiwert für den Betonstahl beträgt $\gamma_{s,fat} = 1.15$, siehe Tabelle 2 DIN 1045-1 Abschnitt 5.3.3.

Somit vereinfacht sich die o.a. Gleichung :

$$\Delta\sigma_s \leq \Delta\sigma_{Rsk} / 1,15 \quad (10)$$

Nach Tabelle 16 DIN 1045-1 ergibt sich für gerade und gebogene Stäbe der Wert zu $\Delta\sigma_{Rsk} = 195 \text{ N/mm}^2$. Dabei ist zu beachten, dass bei einem Biegeradius $d_{br} \leq 25 d_s$ ein Reduktionsfaktor zu berücksichtigen ist, dieser lautet $\xi_1 = 0,35 + 0,026 d_{br} / d_s$. Bei einem Bügel $d_s = 10 \text{ mm}$ und einem $d_{br} = 4 * d_s = 40 \text{ mm}$ ergibt sich $\xi_1 = 0,45$

Außerdem ist gemäß Berichtigung 1 vom Juli 2002 zur DIN 1045-1 zu beachten, dass für Stäbe $> 28 \text{ mm}$ ein weiterer Reduktionsfaktor $\xi_2 = 0,80$ zu berücksichtigen ist.

Hinweis:

Es muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Gleichung 10 eine Vereinfachung darstellt. Die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite beinhaltet die Berechnung der Schädigungssumme unter Betriebslasten. Dieser numerisch aufwändige Schritt kann durch sog. Betriebslastfaktoren vereinfacht werden. Diese Betriebslastfaktoren sind aber für den Anwendungsbereich der DIN 1045-1 nicht verfügbar. Deshalb werden die schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreiten näherungsweise mit $\Delta\sigma_s$ gleich gesetzt. Dies ist laut DIN 1045-1 nur für übliche Hochbauten gültig. Dieser Begriff ist jedoch nicht endgültig definiert. Nach Heft 525 DAfStb wird aber für diese Vereinfachung eine Einschränkung gemacht. Es muss sicher gestellt werden, dass $\Delta\sigma_s$ höchstens N^* -mal auftritt. Dies ist bei maschinen induzierte Schwingungen sicher nicht immer gewährleistet, bei Belastung durch Gegengewichtsstaplern ist dies eher der Fall. Eine Überprüfung der möglichen Lastwechselanzahl durch den Tragwerksplaner in Abstimmung mit dem Objektplaner ist angezeigt und es ist empfehlenswert, diesen Punkt schriftlich festzuhalten.

In einigen EDV-Programme beschränkt sich der Nachweis gegen Ermüdung oft auf den Nachweis der Betonstahlspannungen. Außerdem ist zu bemängeln, dass die Eingabe der Einwirkungen nicht eindeutig definiert wird. Es wird zwischen Abschnitt 10.8.3 und Abschnitt 10.8.4 nicht klar unterschieden. Vor Anwendung dieses Programmteils (Ermüdungsnachweis) ist auf jeden Fall eine Handrechnung erforderlich, um die Grenzen des Programms zu ermitteln. Der Nachweis der Schubspannungen infolge Beanspruchung durch die Querkraft wird oft nicht geführt.

Folgende Einwirkungskombination ist anzusetzen:

- ständige Einwirkungen
- wahrscheinlicher Wert der Setzung , sofern ungünstig wirkend
- häufiger Wert der Temperatureinwirkung, sofern ungünstig wirkend
- Einwirkung aus Nutz- und Verkehrslasten

Für **Beton unter Druckbeanspruchung** darf ein ausreichender Widerstand gegen Ermüdung angenommen werden, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$E_{cd,max,eq} + 0,43 * (1 - R_{equ})^{0,5} \leq 1,0$$

Eine Umformung ergibt folgende Gleichung:

$$\sigma_{cd,max,eq} / f_{cd,fat} + 0,43 * (1 - \sigma_{cd,min,eq} / \sigma_{cd,max,eq})^{0,5} \leq 1,0 \quad (11)$$

Hinweis: die Betondruckspannungen werden in der Gleichung (11) im Gegensatz zu den anderen Nachweisen in DIN 1045-1 positiv definiert. Für den Fall, dass die Unterspannung null ist (Schwellbeanspruchung), reduziert sich die Gleichung (11) auf die Beziehung : $\sigma_{cd,max,eq} / f_{cd,fat} + 0,43 \leq 1,0$; d.h. die bezogene Oberspannung darf den Wert 0,57 nicht überschreiten. Bei Durchlaufträgern mit ungünstigen Spannweitenverhältnissen kann die bezogene Unterspannung negativ werden und somit der Wurzelausdruck $> 1,0$ werden. Der zul. Wert der bezogenen Oberspannung muss dann $< 0,57$ bleiben.

9. Beispiel (3) - Stahlbetondecke mit Gabelstaplerverkehr

Im folgenden Beispiel wird eine Stahlbetondecke als Zweifeldträger mit Stützweiten von 6,0 m für Gegengewichtsstapler G2 nach DIN 1055-3 Tabelle 4 untersucht.

Querschnitt: Decke $h / d / c_{nom} = 24 / 20 / 2$ cm

Beton : C30/37 , XC1, XM2 mit Oberflächenbehandlung

Hinweis:

Nach alter DIN 1045 war für diese Decke eine Betongüte B25 möglich. Aufgrund der Expositionsklasse XM2 ist jedoch ohne besondere Oberflächenbehandlung eine Betongüte von C35/45 (= B45 gemäß Zuordnungstabelle, siehe Tech-News 02/03) erforderlich.

Lasten: $g_k = 6,0$ kN/m² , $q_k = 15$ kN/m², $2 * Q_k = 40$ kN, $\phi \leq 1,40 \rightarrow \phi * 2 * Q_k = 1,4 * 40 = 56$ kN
auf $b = 1,1$ m verteilt $\rightarrow \phi * 2 * Q_k' = 1,4 * 40 / 1,1 = 56 / 1,1 = 51$ kN

Hinweis:

Der Kunststoffbelag wird bei den Lastansätzen vernachlässigt. Die mitwirkende Breite gemäß Heft 240 wird vereinfachend vernachlässigt, da unmittelbar neben der Aufstandsfläche ebenfalls $q_k = 15,0 \text{ kN/m}^2$ vorhanden ist.

Abmessungen Gegengewichtstapler nach Tabelle 5 der DIN 1055-3 : $a = 0,95\text{m}$, $b = 1,1\text{m}$, $l = 3,0 \text{ m}$
Schnittkräfte und Bemessungsergebnisse (ohne Ermüdungsnachweis) für die untersuchte Laststellung, Einzellast in Feldmitte, wird in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

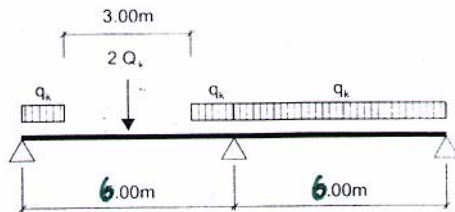


Bild 1: Stellung für Stützmoment dargestellt, für Feldmoment keine Verkehrslast im Feld 2, für Querkraft Einzellast 0,6 m von der Innenstütze und Restfläche mit q_k in beiden Feldern

	Feld	Stütze	Querkraft
	M (kNm/m)	M (kNm/m)	V (kN/m)
gk	+15,12	-27,00	22,50
$q_k + 2 * Q_k'$	max =+73,76, min -19,60	-72,98	76,50
	As (cm ² /m)	As (cm ² /m)	asw (cm ² /m ²)
erforderlich	16,7	19,0	7,2
gewählt (ohne Einfluss der Ermüdung)	Ø 14/ 9 (17,1 cm ² /m)	Ø 14/ 8 (19,24 cm ² /m)	Ø 8/15/48 (13,9 cm ² /m ²)

Tabelle 1

Hinweise:

Gemäß Tab. 31 der DIN 1045-1 liegt die Bewehrung in der Zeile 1, Mindestabstand $0,7 * h = 16,8 \text{ cm}$ in Längsrichtung und Bügelabstand in Querrichtung $h = 48 \text{ cm}$ (Einzelschenkel 24 cm)

Bei einer direkten Auflagerung werden die Auflagerkräfte über Druckspannungen am unteren Querschnittsrand eingetragen. Im Auflagerbereich wird ein fächerartiger Verlauf der Druckspannungstrajektorien ausgebildet. In diesem Bereich stützt sich die Druckstrebe des Fachwerkmodells direkt in das Auflager ab. Für diesen Anteil der Druckstrebenkraft ist keine Querkraftbewehrung erforderlich. Die DIN 1045-1 Abschnitt 10.3.2 Absatz 1 berücksichtigt diesen Effekt dadurch, dass die einwirkende Querkraft V_{Ed} bei gleichmäßig verteilter Last in einer Entfernung d vom Auflagerrand ermittelt werden darf.

Im Abschnitt 10.3.2.Absatz 2 der DIN 1045-1 darf der Anteil der Querkraft einer im Abstand $x \leq 2,5 d$ vom Auflagerbereich wirkenden Einzellast mit dem Beiwert $\beta = x / 2,5 * d$ abgemindert werden. Die Abminderung findet natürlich nur auf der Einwirkungsseite statt.

Diese Erleichterungen sind jedoch nicht für die Bemessung der Druckstrebe (Betonspannungen beim Nachweis gegen Ermüdung) gültig.! Bei der Ermittlung der Schnittkräfte mit Hilfe eines EDV-Programms ist darauf zu achten, dass diese Ansätze nicht einfließen.

Ermüdungsnachweis:

1. Feldbewehrung nach Abschnitt 10.8.4

Bestimmung des inneren Hebelarms im Gebrauchszustand nach Gleichung (5):

$$x = -10 \cdot 17,1/100 + [1,71^2 + 2 \cdot 10 \cdot 17,1 \cdot 20/100]^{0,50} = 6,74 \text{ cm}$$

$$z = 20 - 6,74/3 = 17,7 \text{ cm}$$

$$\Delta M = \psi_1 \cdot (73,76 + 19,6) = 0,5 \cdot 93,36 = 46,68 \text{ kNm/m}$$

Hinweis:

Bei der Ermittlung von ΔM werden auf der sicheren Seite liegend und in Anlehnung an das Rechenbeispiel im Betonkalender 2006 die beiden Werte für die Momente an der Stelle des größten Feldmomentes aufaddiert. Man kann auch den Standpunkt vertreten, dass das negative Moment durch den Beton aufgenommen und der Betonstahl nur wenig beansprucht (Verbundbaustoff) wird. In diesem Fall könnte man dann für $\Delta M = 73,76 \text{ kNm/m}$ ansetzen. Da aber sicherlich mit der Zeit durch Kriechen des Betons zwangsläufig eine Umlagerung erfolgt, die nicht einfach zu ermitteln ist, empfehlen wir unseren Ansatz zu wählen. Bei den im Hochbau üblichen Spannweiten ist dieser Einfluss nicht so ausgeprägt wie im Brückenbau.

Außerdem haben wir angenommen, weil keine anderen Erfahrungswerte vorliegen, dass die Lastanteile $q_k + 2 Q_k$ einen Beitrag zur Ermüdung leisten. Bei Hochregallagern mit ausgeprägten Fahrgassen ist dies per se nicht gegeben. Die Lastwechselanzahl für die gleichmäßig verteilte Nutzlast q_k ist sicherlich wesentlich geringer und außerdem ist nur bei sehr breiten Fahrgassen eine Anordnung der Nutzlast q_k vor und hinter dem Gegengewichtsstapler möglich. Bei Decken ohne die Ausweisung von Fahrgassen im Baugesuch empfehlen wir von der aufgezeigten Möglichkeit keinen Gebrauch zu machen. In beiden Fällen ist es aber unbedingt notwendig mit dem Auftraggeber eine schriftliche Vereinbarung über die Lastansätze und die Lastwechselzahl (siehe hierzu die weiter unten aufgezeigte Möglichkeit) zu treffen.

DIN 1055-100 Tabelle A.2 Verkehrslasten Kategorie G ergibt sich für die häufige Kombination im Fall der Gebrauchstauglichkeit $\psi_1 = 0,50$

$$\Delta \sigma_s = 0,0466 / (0,177 \cdot 17,1 \cdot 10^{-4}) = 154 \text{ N/mm}^2 > 70 \text{ N/mm}^2 \text{ nach DIN 1045-1} \\ > 100 \text{ N/mm}^2 \text{ Heft 525}$$

Eine Erhöhung der Längsbewehrung infolge Ermüdung um 54 % bei Anwendung von Heft 525 ist erforderlich $\rightarrow \text{Ø } 20 / 12 (26,18 \text{ cm}^2/\text{m})$

Eine Erhöhung der Längsbewehrung infolge Ermüdung um 120 % bei Anwendung 1045-1 ist erforderlich $\rightarrow \text{Ø } 25 / 13 (37,76 \text{ cm}^2/\text{m})$

2. Feldbewehrung nach Abschnitt 10.8.3 Absatz 4 und 5

$$\Delta M = 93,36 \text{ kNm/m}$$

$$\Delta \sigma_{s, \text{equ}} = 0,09336 / (0,177 \cdot 17,1 \cdot 10^{-4}) = 308 \text{ N/mm}^2 > 195/1,15 = 170 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{Erhöhung erforderlich} \\ \text{um } 81\% \rightarrow \text{Ø } 20 / 10 (31,42 \text{ cm}^2/\text{m})$$

$$\Delta \sigma_{\text{Rsk}} = 195 / 1,15 = 170 \text{ N/mm}^2 \text{ siehe (10) bei einer Lastwechselzahl } n = 10^6$$

Hinweis: die Lastwechselzahl wird durch den Bauherrn verantwortlich festgelegt

Überprüfung des inneren Hebelarms infolge Erhöhung der Bewehrung:

$$x = -10 * 31,42/100 + [3,14^2 + 2 * 10 * 31,42 * 20/100]^{0,50} = 8,5 \text{ cm} \quad z =$$

$$z = 20 - 8,5/3 = 17,2 \text{ cm} \approx 17,7 \text{ cm}$$

3. Überprüfung der Betondruckspannungen nach Abschnitt 10.8.4

$$\max M = 15,12 + 0,5 * 73,76 = 52,0 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma_{cd,max} = 2 * 0,052 / (1,0 * 0,085 * 0,172) = 7,11 \text{ N/mm}^2$$

$$\min M = 15,12 - 0,5 * 19,6 = 5,3 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma_{cd,min} = 2 * 0,0053 / (1,0 * 0,085 * 0,172) = 0,73 \text{ N/mm}^2$$

Hinweis: es werden die Hebelarme infolge Erhöhung der Bewehrung angesetzt

Für die Nacherhärtung des Betons werden 365 Tage angesetzt.

$$\beta_{cc} = e^{0,2 * (1 - \sqrt{28/365})} = 1,16$$

$$f_{cd,fat} = 1,16 * [1 - 30 / 250] * 0,85 * 30 / 1,5 = 17,3 \text{ N/mm}^2$$

nach Gleichung (2) ergibt sich :

$$7,11 / 17,3 = 0,41 \leq 0,5 + 0,45 * 0,73 / 17,3 = 0,52 \leq 0,90$$

Wir empfehlen den Nachweis Ermüdung für die Betondruckspannungen nach dem Abschnitt 10.8.4 zu führen, weil im Gegensatz zu den Stahlspannungen bei den Betondruckspannungen nicht eindeutig festgelegt wurde, dass man näherungsweise $\Delta\sigma_{cd,eq} = \max \Delta\sigma_{cd}$ setzen darf. Hier müssen die Auslegungen abgewartet werden.

4. Stützbewehrung

Die Abweichungen im Stützbereich sind gering. Die Erhöhung kann nach dem gleichen Verfahren wie im Feldbereich durchgeführt werden, nur ist zu beachten, dass betragsmäßig aus der Verkehrslast $\min M = 0$ ist.

5. Ermüdungsnachweis für die Bügelbewehrung nach 10.8.4

$$\Delta V_{Ed,fat} = 0,5 * 77,6 = 38,8 \text{ kN/m}, \quad z = d - 2 * c_{nom,1} = 20 - 2 * 2,8 = 14,4 \text{ cm} \quad \text{DIN 1045-1 10.3.4 (2)}$$

$$\cot \theta_{fat} = \sqrt{3} = 1,73 \quad \text{gemäß DIN 1045-1 Abschnitt 10.8.2 Absatz 5}$$

$$\Delta\sigma_{sw} = \Delta V_{Ed,fat} / (a_{sw} * z * \cot \theta_{fat}) = 0,0388 / (13,9 * 10^{-4} * 0,144 * 1,73) = 112,0 \text{ N/mm}^2 > 70 \text{ N/mm}^2$$

→ eine weitere Erhöhung ist erforderlich (22,2 cm² / m²)

Hinweis:

Legt man die üblichen Biegerollendurchmesser gemäß Tabelle 23 für die Bügel zugrunde, muss der Mindestwert d_{br} auf $5 d_s$ erhöht werden und die zul. Stahlspannung muss nach Heft 525 auf 48 N/mm² ermäßigt werden. Ein Widerspruch in sich, gegen die Anwendung von 70 N/mm² kann aber nichts eingewendet werden.

6. Nachweis der Betondruckstrebe nach 10.8.4

Die Vereinfachungen für die Bügelbewehrung bezüglich der Laststellungen können für den Nachweis der Druckstrebe nicht angesetzt werden. Es wird deshalb ein Rad als auflagernahe Einzellast betrachtet im Abstand von d zur Auflagerkante, als Verteilbreite wird eine Lastausbreitung unter 45° angenommen.

Es gibt auch Tafeln von Prof. Bornscheuer (Universität Stuttgart), die für diesen Fall auf der Grundlage der Plattentheorie genaue Werte angeben. Auf keinen Fall kann die Querkraft aus der Berechnung nach der Methode der finiten Elemente ohne weiteres entnommen werden.

$$Q_k = 1,4 * 20 = 28 \text{ kN}, \quad b_{\text{eff}} = 0,2 + 2*0,20 = 0,6 \text{ m}$$

$$\max V_{\text{Ed}} = 0,625 * 1 * g_k + \psi_1 * Q_k / b_{\text{eff}} = 0,625 * 6,0 * 6,0 + 0,50 * 28 / 0,60 = 22,5 + 23,33 = 45,8 \text{ kN/m}$$

$$\min V_{\text{Ed}} = 22,5 \text{ kN/m}$$

$$\sigma_{\text{cd,max}} = 0,0458 * (3 + 1/3) / (1,0 * 0,144) = 1,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{cd,min}} = 0,0225 * (3 + 1/3) / (1,0 * 0,144) = 0,52 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{cd,max}} / (0,75 * f_{\text{cd,fat}}) = 1,06 / (0,75 * 17,3) = 0,082 < 0,5 + 0,45 * 0,52 / (0,75 * 17,3) = 0,52$$

Nachweis erfüllt.

10. Zusätzliche Hinweise:

Die Frage, ob die Nutzlast Kategorie E die Verkehrslast Kategorie G bezüglich der Kombinationsbeiwerte dominiert, muss vom Auslegungsausschuss geklärt werden. Solange ist es empfehlenswert, die ungünstigeren Kombinationen zu wählen. Dies ist nicht nur für den Nachweis Ermüdung sondern auch für andere Nachweise zu beachten.

Die Frage, ob die Lasten der DIN 1055-3 Tab. 4 Spalte 4 und 5 unabhängige oder abhängige Einwirkungen darstellen, ist ebenfalls von den zuständigen Gremien zu klären.

Wenn die Betondruckspannungen maßgebend werden, so ist der Nachweis nach 10.8.4 zu empfehlen, solange kein eindeutiger Kommentar zu den schädigungsäquivalenten Betonspannungen nach 10.8.3 vorliegen.

Im Brückenbau sind für den Nachweis Ermüdung die Fachberichte 101 und 102 zu beachten. Das Grundprinzip der DIN 1045-1 ist auch hier gültig, doch durch die Fachberichte werden Ermüdungslastmodelle und Korrekturbeiwerte λ_s zur Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite vorgegeben.

Für geschweißte Betonstäbe einschließlich geschweißter Heftverbindungen sind reduzierte Spannungsschwingbreiten zu beachten. Eventuell Sonderdyn-Matten verwenden.

Für mechanische Verbindungen sind die jeweiligen Zulassungen zu beachten. Beim Hin- und Zurückbiegen (DIN 1045-1 Abschnitt 12.3.2) ist bei nicht vorwiegend ruhender Einwirkung der Biegerollendurchmesser zu erhöhen und die Schwingbreite der Stahlspannung darf 50 N/mm² nicht überschreiten.

Bei Gitterträger ist unbedingt die Zulassung zu beachten, nicht alle Gitterträger sind für nicht vorwiegend ruhende Belastung zugelassen. Bei Gitterträgern, die zur Schubbewehrung im Lastfall Ermüdung herangezogen werden müssen, ist unbedingt zu beachten, dass die Forderungen der DIN 1045-1 Abschnitt 12.7 Abschnitt (2) eingehalten werden. Dies ist sehr häufig in der Praxis nicht der Fall, weil die Gitterträger gleichzeitig als Abstandshalter für die obere Lage dienen.

In den Beispielen wurde der Nachweis für die untere Längsbewehrung geführt. Die Nachweise sind auch für die Querbewehrung zu erbringen.

Bauteile, die den Expositionsklassen XC2 – XC4 zugeordnet werden, sind besonders sorgfältig zu planen. Bei den Nachweisen nach Abschnitt 10.8.3 Abschnitt (5) und 10.8.4 ist der Einfluss der Korrosion nicht ersichtlich. In der Tabelle 16 – Parameter der Wöhlerlinie für Betonstahl - wird ein Hinweis für den Einfluss der Expositionsklasse gegeben. Es wird empfohlen auf den Ausführungszeichnungen nicht nur die übliche Betondeckung anzugeben, sondern alle Merkmale (Leistungsbeschreibung), siehe auch Tech-News 02/03 Folge 2 Seite 2, anzuführen, die einen ausreichenden Korrosionsschutz gewährleisten.

Zur Abschätzung der Lastzyklen je Lebensdauer bei üblichen Hochbauten ist folgende Formel dienlich:

$$N = \text{Jahre} * (\text{Arbeitstage} / \text{Jahr}) * (\text{Betriebstunden} / \text{Tag}) * (\text{Lastzyklen} / \text{Stunde})$$

Beispiel: Decke über UG in einer Produktionshalle ,
50 Jahre , 300 Arbeitstage/ Jahr,
10 Stunden / Tag, 100 Zyklen/Stunde

$$N = 50 * 300 * 10 * 100 = 15 * 10^6$$

Man ist als Tragwerksplaner gut beraten, die mögliche Beanspruchung mit dem Objektplaner und Bauherrn abzuklären. In diesem Beispiel liegen die Lastzyklen größer als 10⁶ ; d.h. für gerade Stäbe muss der Wert $\Delta\sigma_{Rsk} = 195 \text{ N/mm}^2$ abgemindert werden. Gemäß Arbeitsblatt 9 Ausgabe 2002-1 vom Institut für Stahlbetonbewehrung e.V. Abschnitt 3.3 ist ein Wert von ca. 150 N/mm² anzusetzen. Bei einem Außenbauteil (Expositionsklasse > XC1) ist dieser Wert auf 123 N/mm² abzumindern.

Selbstverständlich ist eine Erhöhung von $\Delta\sigma_{Rsk} = 195 \text{ N/mm}^2$ möglich, wenn die Lastzyklen kleiner als 10⁶ sind. Auf die entsprechende Literatur für diese Sonderfälle wird verwiesen.

Ein Nachweis gegen Ermüdung ist bei folgenden Bauwerken und Bauteilen nicht erforderlich. Diese Aufzählung ist nicht in der DIN 1045-1 enthalten, wird aber im DIN- Fachbericht 102 erwähnt.

- Geh- und Radwegbrücken
- Bogen- und Rahmentragwerke mit einer Erdüberdeckung $\geq 1,0 \text{ m}$ bei Straßenbrücken
- Fundamente von Straßenbrücken
- Widerlager, Pfeiler und Stützen, die nicht biegesteif mit dem Überbau verbunden sind
- Stützwände (außer Platten und Wände von Hohlwiderlagern)