

7 Bemessung von unbewehrtem Mauerwerk für Normalkraft- und Biegebeanspruchung nach dem allgemeinen Nachweisverfahren

7.1 Grundlagen und Nachweisformat

Mit Hilfe des allgemeinen Nachweisverfahrens ist eine bessere Ausnutzung der Tragfähigkeit von unbewehrtem Mauerwerk möglich, indem man die Eigenschaften des Mauerwerks und das Tragverhalten der Konstruktion exakter erfasst. Die allgemeinen Regeln zur Bemessung dürfen für einzelne Bauteile ebenso angewendet werden, wie für einzelne Geschosse oder ganze Bauwerke. Mit dem allgemeinen Verfahren lassen sich größere Wandhöhen und schlankere Konstruktionen nachweisen. Es wird somit gegenüber den vereinfachten Bemessungsmethoden den Forderungen nach Wirtschaftlichkeit durch mögliche Materialeinsparungen und Wohnflächenvergrößerungen besser gerecht.

Im allgemeinen Verfahren sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgende Nachweise zu führen:

- Nachweis der Tragfähigkeit am Wand-Decken-Knoten unter Berücksichtigung eines realistischen Tragverhaltens im Einspannbereich des Wandkopfes oder Wandfußes
- Knicksicherheitsnachweis in Wandmitte unter Berücksichtigung planmäßiger und unplanmäßiger Exzentrizitäten sowie Zusatzverformungen nach Theorie II. Ordnung
- Nachweise für Querkrafttragfähigkeit in Scheiben- und Plattenrichtung (s. Kap. 8)
- Nachweis der Teilflächenpressung - falls erforderlich (s. Kap. 7.7)

Im allgemeinen Verfahren sind neben den Biegemomenten aus Deckeneinspannung bei Außenwänden mit Wanddicken $t < 24$ cm auch die aus Wind entstehenden Biegemomente beim Nachweis zu berücksichtigen.

Für den Knicksicherheitsnachweis ist eine genauere Ermittlung der anzusetzenden Knicklänge h_{ef} in Abhängigkeit der Steifigkeit von Wand und Decke möglich (s. Kap. 5). Grundsätzlich können die auftretenden Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung aber auch an einem Rahmensystem mit wirklichkeitsnahen Steifigkeiten ermittelt werden.

Die Bemessung erfolgt nach den allgemeinen Regeln unter Verwendung von Bemessungsschnittgrößen unter Ansatz einer starr-plastischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung ohne Berücksichtigung einer Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge. Eine Ausnahme bilden Wände aus Planelementen bei Windbeanspruchung.

Die Mindestdeckenaufлагertiefe gemäß DIN EN 1996-1-1/NA beträgt: $a \geq t/3 + 40$ mm, aber mindestens 100 mm. Die Mindestwanddicke für tragende Wände beträgt $t = 11,5$ cm.

Der Nachweis der Tragfähigkeit von Wänden unter zentrischer und exzentrischer (vertikaler) Druckbeanspruchung am Wandkopf, in Wandmitte und am Wandfuß gilt nach DIN EN 1996-1-1/NA als erfüllt, wenn der Bemessungswert der einwirkende Normalkraft N_{Ed} die aufnehmbare Bemessungsnormalkraft nicht überschreitet:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = \Phi_{o,u,m,i} \cdot f_d \cdot t \cdot l \quad (7.1)$$

mit

f_d, t, l nach dem vereinfachten Nachweisverfahren (Kap. 6.1.2)

$\Phi_{o,u,m,i}$ Abminderungsbeiwert an der betrachteten Stelle der Wand (Kopf, Mitte oder Fuß)

7.2 Bestimmung der Knotenmomente

Für die Berechnung der Traglastfaktoren werden im allgemeinen Berechnungsverfahren die Knotenmomente am Wandkopf und Wandfuß benötigt. Die sich aus der Deckenbelastung ergebenden Auflagerkräfte sowie die Eigenlasten des Mauerwerks dürfen wie im vereinfachten Verfahren nach Kap. 4.2.1 ermittelt werden. Die Stahlbetondecken können sich im Auflagerbereich - insbesondere bei darüber stehenden Wänden - jedoch nicht frei verdrehen, so dass Einspannmomente zwischen Decke und Wand entstehen. Während in der Stahlbetondecke diese Momente in der Regel durch Bewehrung konstruktiv abgedeckt werden, sind sie bei der Wandbemessung nach dem allgemeinen Verfahren explizit zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass bei Außenwänden mit einseitiger Wandauflagerung und bei Zwischenwänden mit unterschiedlicher angrenzender Deckenstützweite die Vertikallasten mit einer planmäßigen Exzentrizität $e = M_{Ed}/N_{Ed}$ angreifen. Zur Anwendung kommen die Bemessungswerte der Einwirkungen. Für eine genauere Bestimmung der an Wandkopf und Wandfuß angreifenden Biegemomente aus Deckeneinspannung wäre bei mehrgeschossigen Gebäuden eine Rahmenberechnung unter Ansatz der tatsächlichen Biegesteifigkeiten von Wänden und Decken erforderlich. Da jedoch ein derartiges Vorgehen wegen unterschiedlicher Auswirkungen der Rissbildung in den einzelnen Bauteilen die wirklichen Verhältnisse nur bedingt wiedergibt und eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuscht, ist es in den meisten baupraktischen Fällen mit hinreichender Gebäudeaussteifung sinnvoll, für die Ermittlung der Knotenmomente lediglich ein Teilsystem zu betrachten.

Zur Bestimmung der Knotenmomente stehen verschiedenen Rechenverfahren zur Verfügung. Neben dem in Anhang C von DIN EN 1996-1-1/NA angegebenen Verfahren existiert ein Näherungsverfahren nach Cross und Kani (sogenannte Cross-Kani-Verfahren). Im Folgenden soll hier nur auf das Verfahren nach DIN EN 1996-1-1/NA Anhang C eingegangen werden.

Die Berechnung der am Wandkopf oder Wandfuß auftretenden Biegemomente M_i kann vereinfacht entsprechend Bild 7-1 erfolgen. Hierzu werden die Schnittkräfte an einem Wand-Decken-Knoten ermittelt, der aus der Decke mit den ober- und unterhalb anschließenden Wänden gebildet und als Teil eines Rahmensystems betrachtet wird. Die Deckenlänge reicht hierbei bis zum Nachbarknoten, die Wandabschnitte über die Höhe der Wand und die Stabenden werden als eingespannt oder frei gelagert definiert. Die vom Knoten abliegenden Stabenden sollten daher als eingespannt modelliert werden, wenn diese in der Lage sind, Biegemomente aufzunehmen. Anderenfalls sind sie als gelenkig gelagert zu betrachten.

Für die Bemessung des Innenwandknotens - insbesondere am Wand-Decken-Knoten der 1. Innenwand - kann es in besonderen Fällen sinnvoll sein, am benachbarten Außenwandknoten mit geringer einwirkender Normalkraft (z.B. Außenwand im obersten Geschoss) eine gelenkige Deckenauflagerung im Teilsystem anzunehmen. Dies führt zu größeren Deckeneinspannmomenten im betrachteten Knoten und damit gegebenenfalls zu größeren Ausmitten der Deckenauflagerkraft.

Der Tragwerkplaner muss daher abwägen, welches Teilsystem der statischen Berechnung sinnvoll zugrunde gelegt werden kann. Zur Festlegung kann es zweckmäßig sein, unterschiedliche Teilsysteme zu untersuchen.

Die Stabendmoment M_o am Wandkopf und M_u am Wandfuß können mit den Gleichungen (7.2) und (7.3) berechnet werden.

$$M_o = \frac{\frac{n_{1,o} \cdot E_{1,o} \cdot I_{1,o}}{h_{1,o}}}{\frac{n_{1,o} \cdot E_{1,o} \cdot I_{1,o}}{h_{1,o}} + \frac{n_{2,o} \cdot E_{2,o} \cdot I_{2,o}}{h_{2,o}} + \frac{n_{3,o} \cdot E_{3,o} \cdot I_{3,o}}{L_{3,o}} + \frac{n_{4,o} \cdot E_{4,o} \cdot I_{4,o}}{L_{4,o}}} \cdot \left[\frac{q_{3,o} \cdot L_{3,o}^2}{4 \cdot (n_{3,o} - 1)} - \frac{q_{4,o} \cdot L_{4,o}^2}{4 \cdot (n_{4,o} - 1)} \right] \quad (7.2)$$

$$M_u = \frac{\frac{n_{1,u} \cdot E_{1,u} \cdot I_{1,u}}{h_{1,u}}}{\frac{n_{1,u} \cdot E_{1,u} \cdot I_{1,u}}{h_{1,u}} + \frac{n_{2,u} \cdot E_{2,u} \cdot I_{2,u}}{h_{2,u}} + \frac{n_{3,u} \cdot E_{3,u} \cdot I_{3,u}}{L_{3,u}} + \frac{n_{4,u} \cdot E_{4,u} \cdot I_{4,u}}{L_{4,u}}} \cdot \left[\frac{q_{3,u} \cdot L_{3,u}^2}{4 \cdot (n_{3,u} - 1)} - \frac{q_{4,u} \cdot L_{4,u}^2}{4 \cdot (n_{4,u} - 1)} \right] \quad (7.3)$$

mit

n_i Steifigkeitsfaktor des betrachteten Stabes i

$n = 3$ bei eingespannten Stäben am abliegenden Ende (z.B. Außenwand)

$n = 4$ bei gelenkiger Lagerung am abliegenden Ende (z.B. Innenwand)

E_i Elastizitätsmodul des betrachteten Stabes i

I_i Trägheitsmoment des betrachteten Stabes i

Bei zweischaligem Mauerwerk mit Luftschicht, bei dem nur eine Wandschale belastet ist, darf für I_i nur das Trägheitsmoment der belasteten Wandschale angenommen werden. In den meisten Fällen sind die wirksame Breite der Decke und die Breite der Wand gleich groß, d. h. es gilt $b_B/b_D = 1$. Bei Anordnung von Wandöffnungen oder Deckendurchbrüchen in Randnähe können die Breiten von Decke und Wand unterschiedlich sein.

h_1 lichte Höhe des Stabes 1

h_2 lichte Höhe des Stabes 2

l_3 lichte Spannweite des Stabes 3 (längeres Deckenfeld)

l_4 lichte Spannweite des Stabes 4 (kürzeres Deckenfeld)

q_3 die gleichmäßig verteilte Bemessungslast des Stabes 3 bei Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte für ungünstige Einwirkung nach Gleichung (7.4)

q_4 die gleichmäßig verteilte Bemessungslast des Stabes 4 bei Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte für ungünstige Einwirkung nach Gleichung (7.5)

o, u Fußzeiger Wandkopf und Wandfuß

Die anzusetzenden Bemessungslasten auf den Decken werden nach den Gleichungen (7.4) und (7.5) bestimmt.

Bemessungslast auf dem längeren Deckenfeld:

$$q_{3,o} = q_{3,u} = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k \quad (7.4)$$

Bemessungslast auf dem kürzeren Deckenfeld:

$$q_{4,o} = q_{4,u} = \gamma_{G,\text{sup}} \cdot g_k + \gamma_Q \cdot \frac{q_k}{2} \quad (7.5)$$

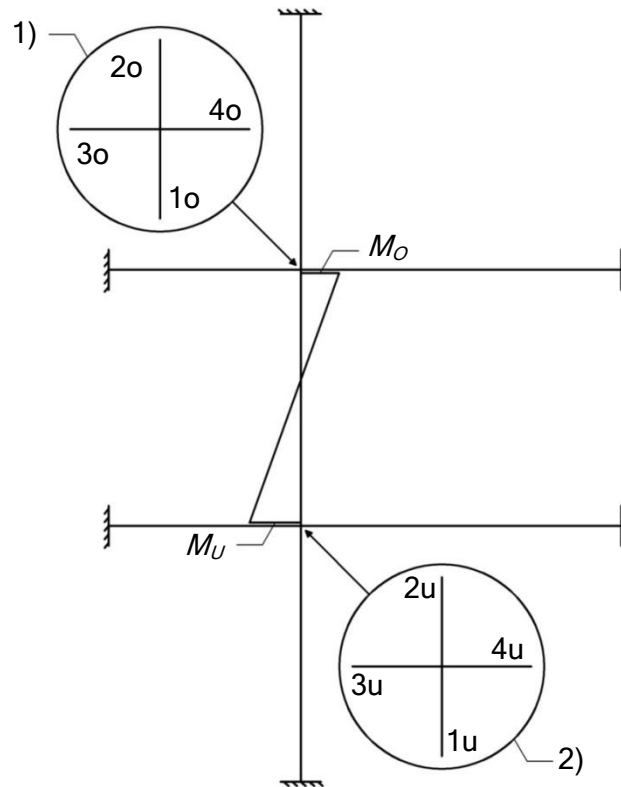


Bild 7-1: Vereinfachtes Rahmenmodell nach DIN EN 1996-1-1/NA Anhang C

Die sich nach Gleichung (7.2) und Gleichung (7.3) ergebenden Knotenmomente M_o und M_u dürfen aufgrund der Verträglichkeitsproblematik und der daraus resultierenden rechnerischen Rissbildung in Wand und Decke mit dem Faktor η_o nach Gleichung (7.6) (bzw. η_u mit Gleichung (7.7)) reduziert werden.

$$\eta_o = 1 - 0,25 \cdot \min \left\{ \frac{n_{3,o} \cdot \frac{E_{3,o} \cdot I_{3,o}}{l_{3,o}} + n_{4,o} \cdot \frac{E_{4,o} \cdot I_{4,o}}{l_{4,o}}}{n_{1,o} \cdot \frac{E_{1,o} \cdot I_{1,o}}{h_{1,o}} + n_{2,o} \cdot \frac{E_{2,o} \cdot I_{2,o}}{h_{2,o}}}; 2,0 \right\} \quad (7.6)$$

$$\eta_u = 1 - 0,25 \cdot \min \left\{ \frac{n_{3,u} \cdot \frac{E_{3,u} \cdot I_{3,u}}{l_{3,u}} + n_{4,u} \cdot \frac{E_{4,u} \cdot I_{4,u}}{l_{4,u}}}{n_{1,u} \cdot \frac{E_{1,u} \cdot I_{1,u}}{h_{1,u}} + n_{2,u} \cdot \frac{E_{2,u} \cdot I_{2,u}}{h_{2,u}}}; 2,0 \right\} \quad (7.7)$$

mit

- n_i Steifigkeitsfaktor des betrachteten Stabes i
 $n = 3$ bei eingespannten Stäben am abliegenden Ende (z.B. Außenwand)
 $n = 4$ bei gelenkiger Lagerung am abliegenden Ende (z.B. Innenwand)
- E_i Elastizitätsmodul des betrachteten Stabes i
- I_i Trägheitsmoment des betrachteten Stabes i
Bei zweischaligem Mauerwerk mit Luftschicht, bei dem nur eine Wandschale belastet ist, darf für I_i nur das Trägheitsmoment der belasteten Wandschale angenommen werden. In den meisten Fällen sind die wirksame Breite der Decke und die Breite der Wand gleich groß, d. h. es gilt $b_B/b_D = 1$. Bei Anordnung von Wandöffnungen oder Deckendurchbrüchen in Randnähe können die Breiten von Decke und Wand unterschiedlich sein.
- h_1 lichte Höhe des Stabes 1
- h_2 lichte Höhe des Stabes 2
- l_3 lichte Spannweite des Stabes 3
- l_4 lichte Spannweite des Stabes 4
- o, u Fußzeiger Wandkopf und Wandfuß

Die für die Bemessung zugrunde zu legenden Biegemomente lauten somit:

$$M_{o,red} = \eta_o \cdot M_o \quad (7.8)$$

$$M_{u,red} = \eta_u \cdot M_u \quad (7.9)$$

mit

- η_o Faktor zur Abminderung des Knotenmomentes am Wandkopf nach Gleichung (7.6)
- η_u Faktor zur Abminderung des Knotenmomentes am Wandfuß nach Gleichung (7.7)
- M_o Bemessungswert des Knotenmomentes am Wandkopf nach Gleichung (7.2)
- M_u Bemessungswert des Knotenmomentes am Wandfuß nach Gleichung (7.3)
- o, u Fußzeiger Wandkopf und Wandfuß

7.3 Traglastfaktoren am Wand-Decken-Knoten

Der Nachweis der aufnehmbaren Normalkraft wird analog zum vereinfachten Verfahren ebenfalls an den Bemessungsstellen Wandkopf und -fuß geführt. Nach dem allgemeinen Verfahren müssen die Traglastfaktoren Φ_o am Wandkopf und Φ_u am Wandfuß zwar nach der gleichen Formel, jedoch getrennt voneinander unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Schnittgrößen bzw. Ausmitten berechnet werden.

DIN EN 1996-1-1/NA verwendet zur Bestimmung des Bemessungswertes der Normalkraft ein starr-plastisches Werkstoffgesetz. Dies hat den Vorteil, dass eine Unterscheidung zwischen gerissenem und ungerissenem Querschnitt bei der Bestimmung der aufnehmbaren Traglast nicht erforderlich ist. Eine eventuelle, geringfügige Überschätzung der Tragfähigkeit des Mauerwerks wird durch den Sicherheitsbeiwert abgedeckt.

Die Traglastfaktoren Φ_o bzw. Φ_u zur Berücksichtigung der Lastexzentrizität berechnen sich wie folgt:

$$\Phi_{o,u} = 1 - 2 \cdot \frac{e_{o,u}}{t} \quad (7.10)$$

mit

$e_{o,u}$ Lastexzentrizität am Wandkopf (o) bzw. Wandfuß (u) nach Gleichung (7.11)
t Wanddicke

Dabei ist die Exzentrizität der Last e_i am Kopf (o) bzw. Fuß (u) der Wand nach Gleichung (7.11) zu bestimmen:

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} \geq 0,05 \cdot t \quad (7.11)$$

mit

M_{id} Bemessungswert des Biegemomentes aus der Exzentrizität der Deckenauflegerkraft am Kopf bzw. Fuß der Wand
 N_{id} Bemessungswert der am Kopf bzw. Fuß der Wand wirkenden Vertikalkraft
 e_{he} Exzentrizität am Kopf oder Fuß der Wand infolge horizontaler Lasten (z.B. Wind)
t Wanddicke

Zur Berücksichtigung unvermeidbarer Imperfektionen ist grundsätzlich eine Mindestausmitte von $e = 0,05 \cdot t$ anzusetzen (vgl. Gleichung (7.11)).

Des Weiteren werden Decken häufig nicht über die gesamte Wanddicke t , sondern nur mit einer Auflagertiefe a von beispielsweise $a = 2/3 \cdot t$ ausgeführt. Dadurch liegt die Resultierende der Deckenauflegerkraft nicht in Wandmitte, sondern etwas exzentrisch, was beim Nachweis der Tragfähigkeit der Wand am Wand-Decken-Knoten durch die explizite Berücksichtigung der Lastausmitte berücksichtigt werden kann.

Darüber hinaus muss dies aber auch bei der Bestimmung der Knotenmomente beachtet werden. Daher wird bei der Ermittlung der Knotenmomente am Rahmensystem für die Dicke der entsprechenden Wand rechnerisch nur die tatsächliche Auflagertiefe ($t = a$) angesetzt. Der Nachweis am Wandkopf und am Wandfuß wird anschließend ebenfalls unter Ansatz eines ideellen Querschnitts mit der Wanddicke ($t = a$) geführt. In Wandhöhenmitte darf

dagegen die tatsächliche Wanddicke t beim Nachweis in Ansatz gebracht werden. Dies gilt auch für die Ermittlung der Wandschlankheit.

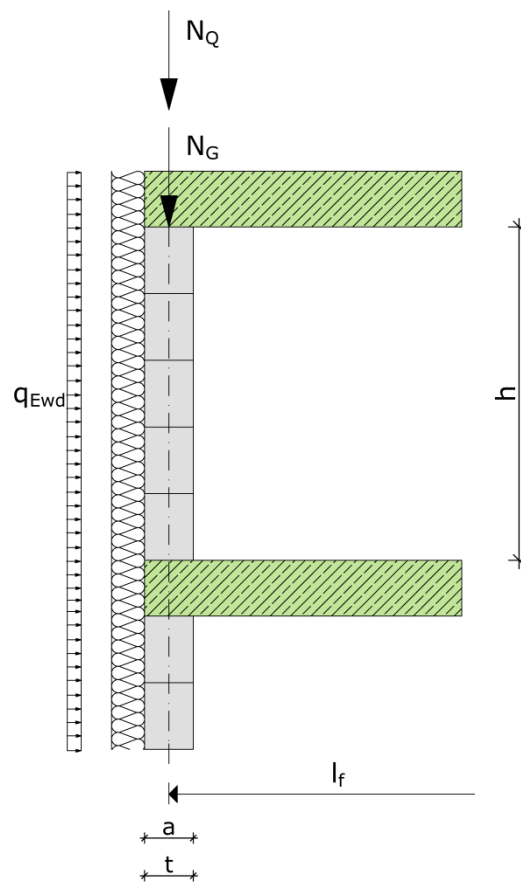


Bild 7-2: Einschalige Wand mit vollaufliegender Decke

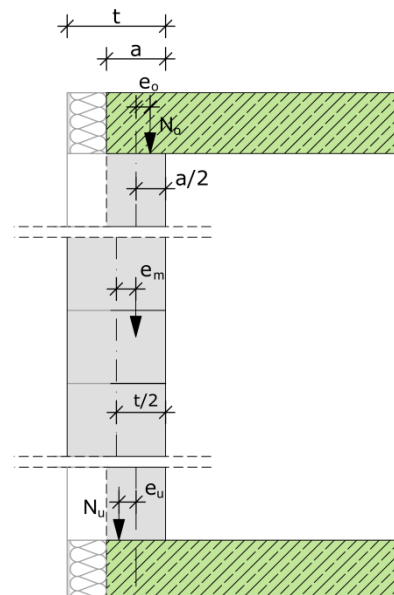


Bild 7-3: Ideelle Wanddicke und Ausmitten bei teilaufliegender Decke

Eine Besonderheit stellen Wände mit großer Lastexzentrizität dar, bei denen bei geringer Auflast gleichzeitig große Biegemomente aus Deckeneinspannung auftreten. Hier kann die Lastexzentrizität theoretisch außerhalb des Wandquerschnitts liegen ($e \geq t/2$). Da in diesen

Fällen das Mauerwerk jedoch vollständig plastizieren würde, darf die sogenannte „Rücksetzregel“ angewandt werden. Ist die rechnerische Ausmitte der resultierenden Last aus Decken und darüber befindlichen Geschossen infolge der Knotenmomente am Kopf bzw. Fuß der Wand größer als 1/3 der Wanddicke t , darf die resultierende Last auch vereinfacht über einen am Rand des Querschnittes angeordneten Spannungsblock mit der Ordinate f_d abgetragen werden, dessen Breite höchstens gleich 1/3 der Wanddicke sein darf (Bild 7-4).

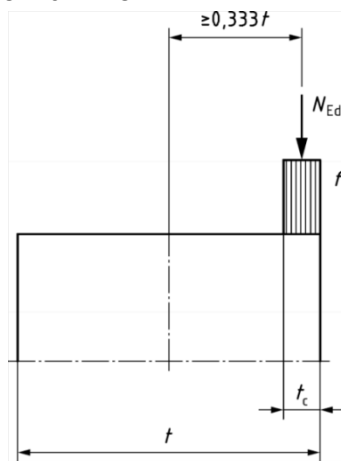
Ist die Ungleichung in Gleichung (7.12) erfüllt, dann darf die überdrückte Länge des Wandquerschnitts t_c nach Gleichung (7.13) bestimmt werden, wobei diese dann kleiner sein muss als $t/3$.

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} \geq \frac{1}{3} \cdot t \quad (7.12)$$

$$t_c = \frac{N_{id}}{f_d} \leq \frac{1}{3} \cdot t \quad (7.13)$$

Mit Anwendung der Gleichungen (7.12) und (7.13) ist der Nachweis der Biegetragfähigkeit geführt. Die Berechnung des Traglastbeiwertes $\phi_{o,u}$ ist hier nicht zusätzlich erforderlich. Die aus dem Nachweis resultierenden Schnittgrößen am Wandkopf bzw. -fuß müssen dann auch bei der Schnittgrößenermittlung in Wandmitte angesetzt werden und sind ggf. mit denen aus Wind zu überlagern.

Zu beachten ist bei derart belasteten Wänden, dass Rissbildungen an der der Last gegenüber liegenden Seite der Wand infolge der dabei entstehenden Deckenverdrehung auftreten können. Diesen ist - wenn dies für die Gebrauchstauglichkeit erforderlich ist - durch konstruktive Maßnahmen entgegenzuwirken.



t_c = überdrückte Länge $\leq 0,333 \cdot t$

t = Wanddicke

N_{Ed} = Bemessungswert der einwirkenden Vertikallast

f_d = Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit

Bild 7-4: Ausmitte der Bemessungslast bei Aufnahme durch den Spannungsblock [8]

7.4 Traglastfaktor in Wandhöhenmitte

Nach Eurocode wird der Knicksicherheitsnachweis vereinfachend immer als Vergleich der Bemessungswerte nach Theorie II. Ordnung am verformten System in halber Geschosshöhe geführt. Dies bedeutet, dass zusätzlich zu der planmäßigen Exzentrizität $e_m = M_{md}/N_{md}$ infolge vertikaler und e_{hm} infolge horizontaler Lasten eine unplanmäßige Ausmitte e_{init} der Stabachse sowie die sich nach Theorie II. Ordnung ergebende Zusatzausmitte e_{II} zu berücksichtigen ist. Da die Wandverformung mit der Schlankheit $\lambda_v = h_{ef}/t$ anwächst, wird der die Tragfähigkeit vermindern Einfluss größerer Schlankheiten über das Zusatzmoment $\Delta M_u = N_u \cdot e_{II}$ erfasst, während die ungewollte Ausmitte der planmäßigen Lastexzentrizität zugeschlagen wird. Gleiches gilt für die Lastausmitte infolge Kriechen des Baustoffs. Die ungewollte Ausmitte e_{init} wird durch einen parabelförmigen Ansatz über die Geschosshöhe erfasst (s. Bild 7-5). Der Größtwert in halber Geschosshöhe ist mit $e_{init} = h_{ef}/450$ festgelegt.

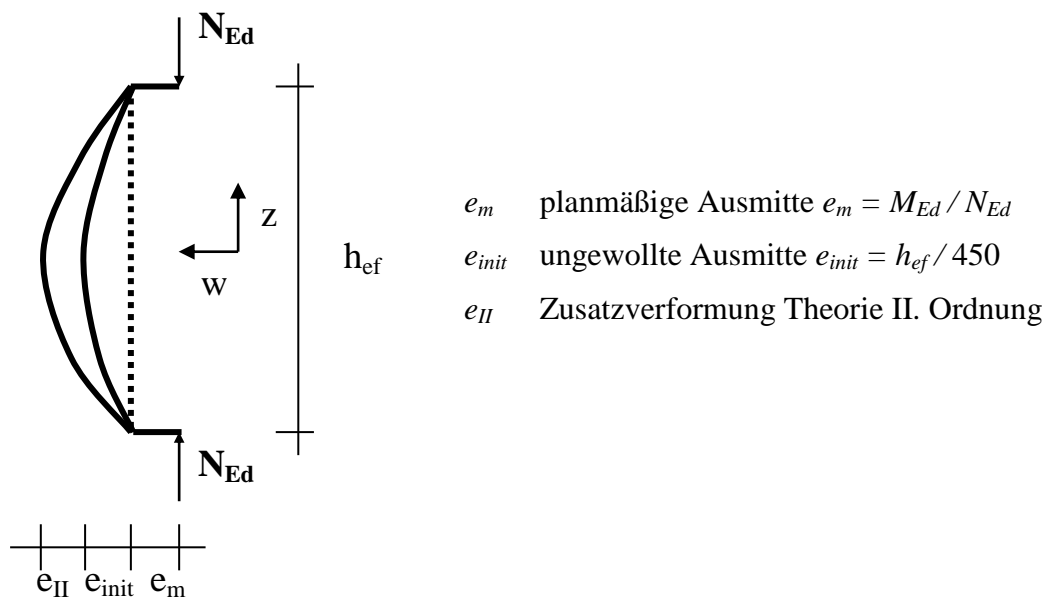


Bild 7-5: Ersatzstab zur Berechnung der Verformung nach Theorie II. Ordnung

Für den Knicksicherheitsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit in Wandhöhenmitte wird die aufnehmbare Normalkraft ebenfalls nach Plastizitätstheorie bestimmt. Nach DIN EN 1996/NA gelten für den Nachweis folgende Voraussetzungen:

- Lineare Spannungsverteilung und Ebenbleiben der Querschnitte
- Keine Mitwirkung des Mauerwerks auf Zug in der Lagerfuge
- Parabelförmiger Verlauf der ungewollten Wandausmitte mit dem Maximalwert von $e_{init} = h_{ef}/450$ in Wandmitte
- Berechnung der Wandverformungen mit einem Elastizitätsmodul von $E_0 = 700 \cdot f_k$
- Berücksichtigung der Kriechverformungen bei großen Wandschlankheiten mit einer von der Grenzschlankheit abhängigen Kriechzahl ϕ_{∞}
- Berücksichtigung der Deckeneinspannungen sowie der Arte der Auflagerung (zwei-, drei- oder vierseitig) über eine Abminderung der Knicklänge

Der Nachweis der Knicksicherheit in Wandhöhenmitte erfolgt analog zum Nachweis der Tragfähigkeit am Wand-Decken-Knoten nach Gleichung (7.1), wobei die traglastmindernden Einflüsse über den Abminderungsbeiwert Φ_m berücksichtigt werden. Die von der

Wandschlankheit abhängigen Zusatzbeanspruchungen infolge Theorie II. Ordnung werden damit - wie bereits dargestellt - nicht auf der Einwirkungsseite erfasst, sondern durch die Abminderung der aufnehmbaren Normalkraft berücksichtigt. Daher hängt der Traglastbeiwert Φ_m nicht nur von der Lastexzentrizität nach Theorie I. Ordnung, sondern auch von der Wandschlankheit ab.

Nach DIN EN 1996-1-1 Anhang G wird der Traglastfaktor Φ_m nach den Gleichungen (7.14) und (7.15) berechnet, wobei diesem Ansatz eine Exponentialfunktion zu Grunde liegt. Der Traglastfaktor Φ_m ist darüber hinaus in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls, der Schlankheit und der Ausmitte in einem Diagramm dargestellt, und kann so relativ einfach bestimmt werden.

$$\Phi_m = \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t}\right) \cdot e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (7.14)$$

$$u = \frac{\frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{\frac{f_k}{E}} - 0,063}{0,73 - 1,17 \frac{e_{mk}}{t}} \quad (7.15)$$

mit

- e_{mk} Ausmitte der Last einschließlich Kriechen in halber Wandhöhe nach Gleichung (7.17)
- t Wanddicke
- h_{ef} Knicklänge der Wand nach Kap. 5.2
- t_{ef} effektive Wanddicke nach DIN EN 1996-1-1 Kap. 5.5.1.3
- f_k Mauerwerksdruckfestigkeit
- E Elastizitätsmodul

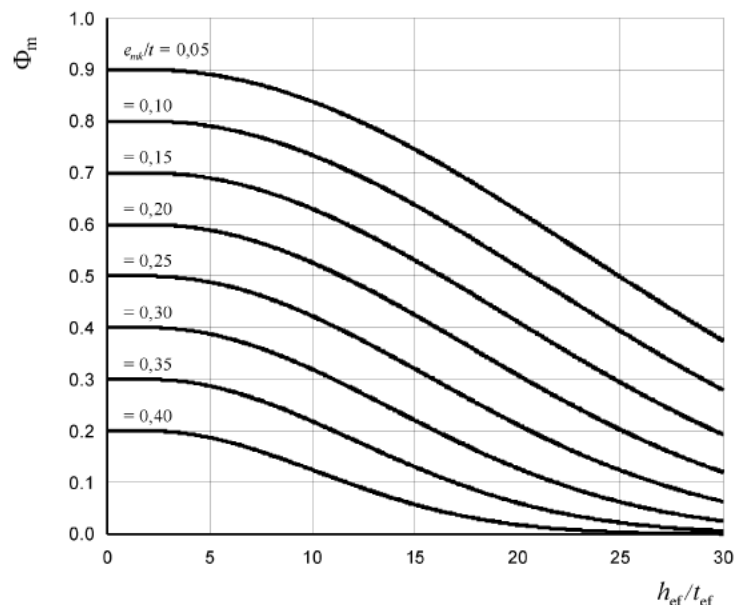


Bild 7-6: Φ_m in Abhängigkeit von der Schlankheit bei verschiedenen Ausmitten für $E=1000 \cdot f_k$ nach DIN EN 1996-1-1

In Deutschland wurde dieser Teil der DIN EN 1996-1-1 jedoch gestrichen und im Nationalen Anhang durch eine eigene Gleichung zur Bestimmung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte ersetzt. Demnach errechnet sich Φ_m wie folgt:

$$\Phi_m = 1,14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t}\right) - 0,024 \cdot \frac{h_{ef}}{t} \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t} \quad (7.16)$$

mit

- e_{mk} Ausmitte der Last einschließlich Kriechen in halber Wandhöhe nach Gleichung (7.17)
- t Wanddicke
- h_{ef} Knicklänge der Wand nach Kap. 5.2

Im ersten Teil der Gleichung (7.16) wird die Exzentrizität der Beanspruchung nach Theorie I. Ordnung bei der Ermittlung des Traglastfaktors berücksichtigt. Der Erhöhungsfaktor in Höhe von 1,14 ist zur Kalibrierung der Bestimmungsgleichung an die Ergebnisse der strengen theoretischen Lösung aus Basis der Differentialgleichung erforderlich. Da der Term $(1 - 2 \cdot e_{mk}/t)$ bereits die Berücksichtigung des Spannungsblockes bei der Bemessung druckbeanspruchter Wände darstellt, ist für geringe Exzentrizitäten e_{mk} sowie bei kleinem Schlankheitsgrad h_{ef}/t die Obergrenze des Spannungsblockes zu beachten. Der Einfluss einer schlankheitsabhängigen Traglastminderung nach Theorie II. Ordnung wird somit erst für Werte $\Phi_m < (1 - 2 \cdot e_{mk}/t)$ maßgebend.

Der zweite Anteil der Gleichung erfasst die Effekte der Traglastminderung infolge der Verformungsanteile nach Theorie II. Ordnung. Sie werden vereinfachend durch eine vom Schlankheitsgrad h_{ef}/t abhängige lineare Abminderung des Traglastfaktors berücksichtigt. Hierbei dient der Faktor 0,024 der Anpassung an das tatsächliche Tragverhalten schlanker Wände aus Mauerwerk.

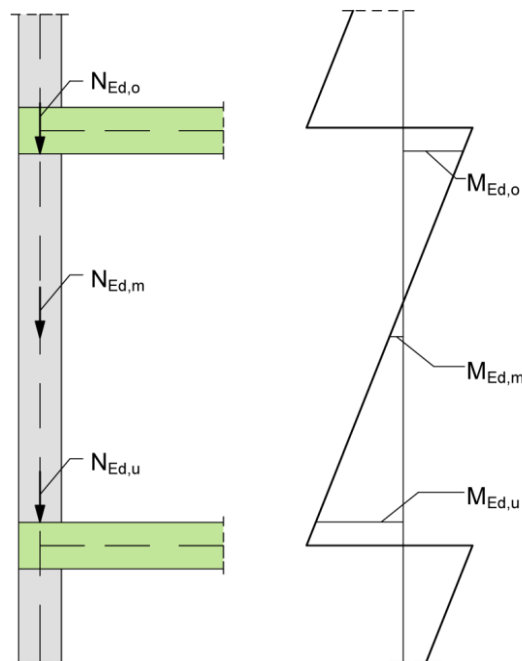


Bild 7-7: Qualitativer Momentenverlauf über die Wandhöhe bei vollaufliedender Decke

Die Ausmitte e_{mk} der Last in halber Wandhöhe setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0,05 \cdot t \quad (7.17)$$

mit

e_m Ausmitte der Last in halber Wandhöhe nach Gleichung (7.18)

e_k Ausmitte aus Kriechinflüssen nach Gleichung (7.19)

t Wanddicke

Hierbei wird die Exzentrizität der einwirkenden Lasten in halber Geschosshöhe wie folgt berechnet:

$$e_m = e_{Last} + e_{hm} + e_{init} = \frac{M_{md}}{N_{md}} + \frac{M_{hmd}}{N_{md}} + \frac{h_{ef}}{450} \quad (7.18)$$

mit

e_{Last} Ausmitte in halber Wandhöhe infolge M_{md} / N_{md}

M_{md} Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes in halber Geschosshöhe resultierend aus den Momenten am Kopf und Fuß der Wand, einschließlich der Biegemomente aus allen anderen ausmittig angreifenden Lasten (z.B. Auflagerkonsolen)

N_{md} Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft in halber Geschosshöhe einschließlich aller anderen ausmittigen Lasten

e_{hm} Ausmitte in halber Geschosshöhe infolge M_{hmd} / N_{md}

M_{hmd} Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes in halber Geschosshöhe resultierend aus horizontalen Lasten (z.B. Wind)

e_{init} ungewollte Ausmitte mit dem Vorzeichen, mit dem der absolute Wert für e_i erhöht wird. Die Ausmitte von $e_{init} = h_{ef} / 450$ darf als parabolisch über die Wandhöhe verteilt angenommen werden.

h_{ef} Knicklänge der Wand nach Kap. 5.2

Bei teilauffliegenden Decken kann der Knicksicherheitsnachweis in Wandhöhenmitte ebenfalls mit den am Rahmensystem ermittelten Schnittgrößen mit der tatsächlichen Wanddicke t geführt. Zu beachten ist hier jedoch, dass sich die Ausmitte e_m in Wandhöhenmitte im Vergleich zum Wandkopf bzw. zum Wandfuß um das Maß $(t - a) / 2$ (aufgrund der größeren Wanddicke) vergrößert (s. Bild 7-3).

Bei Außenwänden entstehen auch infolge einer horizontal einwirkenden Belastung z.B. aus Wind oder Erddruck Biegemomente und Querkräfte in der Wand. Daher sind diese Einwirkungen bei Anwendung der allgemeinen Regeln zur Bemessung stets zu berücksichtigen und die entstehenden Biegemomente sind mit den Biegemomenten aus Eigen- und Verkehrslasten zu überlagern. In Wandmitte ergeben sich dadurch zusätzliche planmäßige Lastexzentrizitäten, die im Knicksicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind.

Für die Überlagerung dürfen die aus Querlasten entstehenden Momente innerhalb gewisser Grenzen umgelagert werden. So ist es im Sinne der Plastizitätstheorie zulässig, an Wandkopf und/oder Wandfuß gelenkige Lagerung, teilweise Einspannung oder Volleinspannung anzunehmen. Dadurch besteht die Möglichkeit, durch gezielte Schnittgrößenumlagerung die Bemessungsmomente an Wandkopf, Wandfuß oder in Wandmitte zu beeinflussen. Die möglichen Momentenverteilungen infolge Windbelastung zeigt Bild 7-8.

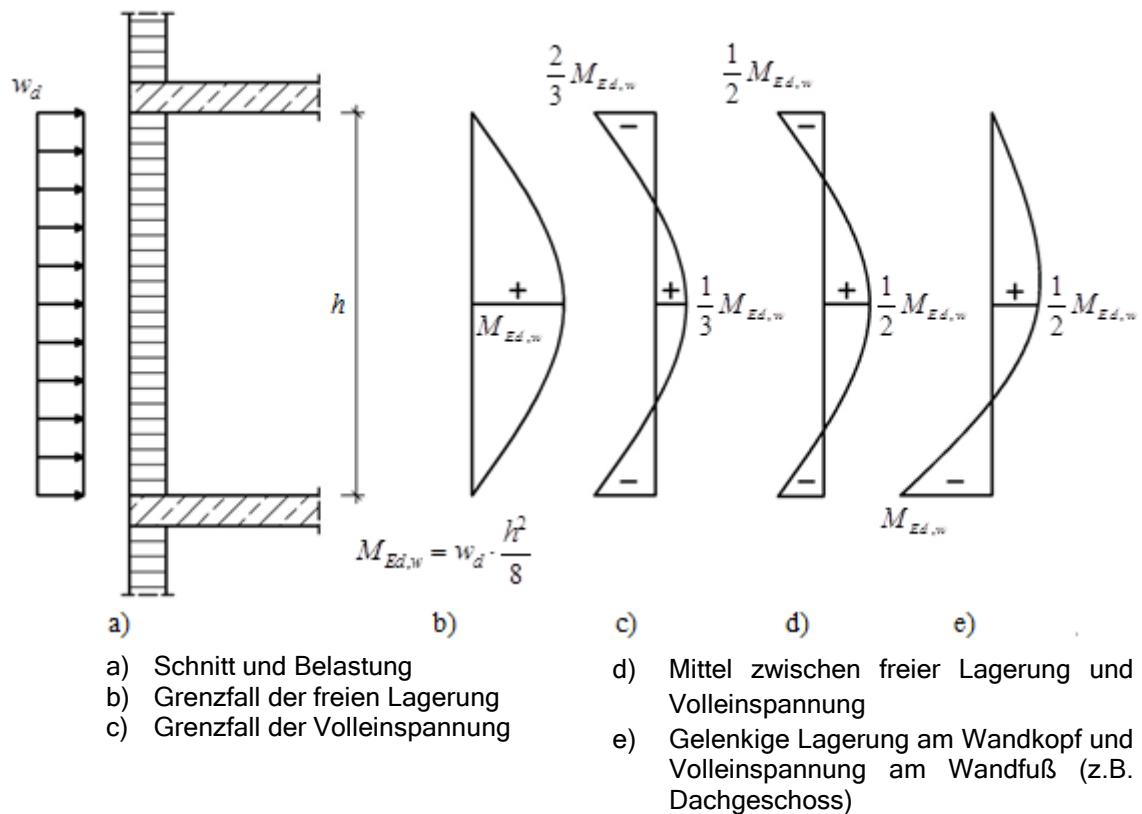


Bild 7-8: Mögliche Schnittgrößenumlagerungen bei Windbeanspruchung nach [15]

Für Wände mit Schlankheiten kleiner oder gleich der Grenzschlankheit λ_c darf die Ausmitte infolge Kriechens e_k unberücksichtigt bleiben. Wird die Grenzschlankheit λ_c überschritten, so darf der Kriecheinfluss nicht mehr vernachlässigt werden. Die Ausmitte e_k ist dann nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$e_k = 0,002 \cdot \phi_\infty \cdot \frac{h_{ef}}{t} \cdot \sqrt{t \cdot e_m} \quad (7.19)$$

mit

ϕ_∞ Endkriechzahl

h_{ef} Schlankheit der Wand nach Kapitel 5.2

t Wanddicke

e_m Ausmitte der einwirkenden Lasten in halber Geschosshöhe nach Gleichung (7.18)

Die Exzentrizität infolge Kriechen ist jedoch in den meisten Fällen nur relativ gering. Aus diesem Grund soll diese mit der nächsten Änderung der DIN EN 1996-1-1/NA aus der Norm gestrichen werden, sodass in Zukunft nur noch die Ausmitte e_m berechnet werden muss.

7.5 Traglastfaktor in Scheibenrichtung

Bei Aussteifungsscheiben, die den Abtrag horizontaler Einwirkungen in Scheibenrichtung übernehmen, entstehen Biegemomente um die starke Achse der Wand. Muss ein Aussteifungsnachweis geführt werden, so ist dies nach den allgemeinen Regeln zur Bemessung nach DIN EN 1996-1-1/NA möglich. In diesem Zusammenhang ist auch ein Biegnachweis in Scheibenrichtung erforderlich.

Für diesen Nachweis ist es zunächst von Bedeutung, auf welche Art die Schnittgrößen ermittelt worden sind, da sich die gewählte Modellierung bei der Schnittgrößenermittlung auf den rechnerischen Tragwiderstand auswirkt. Grundsätzlich stehen hierfür das Kragarmmodell oder das Verfahren nach Anhang K von DIN EN 1996-1-1/NA zur Auswahl (vgl. Kap. 4.2.2).

Bei Verwendung des Kragarmmodells ergibt sich der Abminderungsbeiwert Φ unter Annahme eines starr-plastischen Materialverhaltens zu:

$$\Phi = 1 - 2 \cdot \frac{e_w}{l} \quad (7.20)$$

mit

- e_w Exzentrizität der einwirkenden Normalkraft in Wandlängsrichtung mit $e_w = M_{Ewd}/N_{Ed}$
- M_{Ewd} Bemessungswert des in Wandlängsrichtung einwirkenden Momentes unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_{Q,sup} = 1,5$
- N_{Ed} Bemessungswert der maßgebenden einwirkenden Normalkraft (min N_{Ed} oder max N_{Ed}) nach (7.21) bzw. (7.23)
- l Länge der Wandscheibe

Bei Aussteifungsscheiben sind durch Vernachlässigung der Kombinationsbeiwerte ψ_0 in der Regel zwei Einwirkungskombinationen zu untersuchen, da die aufnehmbare Normalkraft maßgeblich von der vorhandenen Exzentrizität e und damit von der Einwirkung abhängt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die vorhandene Lastexzentrizität von der Nachweisstelle (Wandmitte oder Wandfuß) abhängig ist. Die Nachweise sind dann wie folgt zu führen:

1. Einwirkungskombination (maximales Biegemoment aus Horizontallasten und zugehörige minimale Normalkraft)

$$\min N_{Ed} = 1,0 \cdot N_{Gk} \leq N_{Rd} = \Phi_{\min} \cdot A \cdot f_d \quad (7.21)$$

mit

- N_{Gk} minimale charakteristische Normalkraft aus Eigengewicht
- N_{Rd} Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft
- Φ_{\min} minimaler Abminderungsbeiwert in Wandmitte nach Gl. (7.22)
- A Gesamtfläche des Querschnitts
- f_d Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Kap. 2.2.2

$$\Phi_{\min} = 1 - 2 \cdot \frac{M_{Ewd}}{\min N_{Ed} \cdot l} \quad (7.22)$$

mit

- M_{Ewd} Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
- $\min N_{Ed}$ Bemessungswert der minimalen Normalkraft
- l Wandlänge

2. Einwirkungskombination (maximale Normalkraft und zugehöriges Moment)

$$\max N_{Ed} = 1,35 \cdot N_{Gk} + 1,5 \cdot N_{Qk} \leq N_{Rd} = \Phi_{\max} \cdot A \cdot f_d \quad (7.23)$$

mit

- N_{Gk} charakteristische Normalkraft aus Eigengewicht
- N_{Qk} charakteristische Normalkraft aus Verkehrslast
- N_{Rd} Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft
- Φ_{\max} maximaler Abminderungsbeiwert in Wandmitte nach Gl.(7.24)
- A Gesamtfläche des Querschnitts
- f_d Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Kapitel 2.2.2

$$\Phi_{\max} = 1 - 2 \cdot \frac{M_{Ewd}}{\max N_{Ed} \cdot l} \quad (7.24)$$

mit

- M_{Ewd} Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
- $\max N_{Ed}$ Bemessungswert der maximalen Normalkraft
- l Wandlänge

Hinweis: Bei zentrischer Einleitung der Normalkraft unterscheiden sich die Biegemomente in den 2 untersuchten Einwirkungskombinationen nicht. Jedoch können im Fall von exzentrisch eingeleiteten Normalkräften (exzentrisch aufliegende Decken) zusätzliche Biegemomente entstehen, welche für die Einwirkungskombination 2 das einwirkende Biegemoment erhöhen.

Erfolgt die Schnittgrößenermittlung nach Anhang K von DIN EN 1996-1-1/NA unter Berücksichtigung von Rückstellkräften und Einspannwirkungen der Wandscheiben in die anschließenden Decken, so kann der Abminderungsbeiwert Φ_i für den Biegenachweis um die starke Achse in der jeweiligen Einwirkungskombination modifiziert angenommen werden zu:

$$\Phi_i = 1 - 2 \cdot \frac{V_{Ed}}{N_{Ed}} \cdot \lambda_v \quad (7.25)$$

mit

- V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft in der jeweiligen Einwirkungskombination
- N_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft in der jeweiligen Einwirkungskombination
- $\lambda_v = \psi \cdot h / l$ Schubschlankheit der Wand nach Anhang K von DIN EN 1996-1-1/NA
- ψ Kennwert zur Beschreibung der Momentenverteilung

Auch in diesem Fall sind die beiden Einwirkungskombinationen mit maximaler und minimaler einwirkender Normalkraft zu betrachten. Hierbei ist der Traglastbeiwert an der maßgebenden Nachweisstelle am Wandkopf bzw. am Wandfuß sowie bei kombinierter Beanspruchung in Wandhöhenmitte anzusetzen.

7.6 Kombinierte Beanspruchung

Bei einer kombinierten Beanspruchung aus Biegung um die starke Achse y und Biegung um die schwache Achse z ist der Nachweis der Doppelbiegung an der maßgebenden Stelle zu führen. Vereinfachend dürfen die Traglastbeiwerte Φ multiplikativ kombiniert werden. Der Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft ergibt sich zu:

$$N_{Rd} = \Phi_y \cdot \Phi_z \cdot A \cdot f_d \quad (7.26)$$

mit

Φ_z Traglastbeiwert für Biegung um die schwache Achse nach Kapitel 6.1.2 bzw. Kapitel 7.3 oder 7.4. Dabei ist ebenfalls nach den betrachteten Nachweisstellen zu differenzieren.

Φ_y Traglastbeiwert für Biegung um die starke Achse nach Kapitel 7.5

A Gesamtfläche des Querschnitts

f_d Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Kap. 2.2.2

Biegemomente um die starke Achse y dürfen vernachlässigt werden, wenn diese auf die Tragfähigkeit der Wand nur einen geringen Einfluss haben.

Zu beachten ist, dass bei Vernachlässigung der Kombinationsbeiwerte ψ_0 (siehe 3.1.3) nur die Einwirkungskombination mit maximaler Normalkraft untersucht werden muss. Sollen auf Grund der wirtschaftlichen Ausnutzung der Aussteifungsscheibe die Kombinationsbeiwerte hingegen berücksichtigt werden, müssen weitere Einwirkungskombinationen untersucht werden. Hierbei ist auf Grund der Kombinationsbeiwerte und der dadurch bedingten Abminderung der vertikalen Lasten nicht von vorne herein erkennbar, welche Einwirkungskombination maßgebend wird.

7.7 Nachweis bei Teilflächenbelastung

Sind Wände und Pfeiler vertikal auf Druck beansprucht und erfolgt dabei die Einleitung der Belastung punktuell und nicht gleichmäßig über den gesamten Wandquerschnitt verteilt, darf bei der Bemessung der günstig wirkende Effekt eines mehrachsigen Spannungszustands berücksichtigt werden. Dies erfolgt über eine Erhöhung der zulässigen Teilflächenpressung im Lasteinleitungsbereich. Die Erhöhung der Tragfähigkeit gilt uneingeschränkt nur bei Mauerwerk aus Vollsteinen und ist bei Mauerwerk mit vermindertem Überbindemaß ($l_{ol} < 0,4 \cdot h_u$) nicht zulässig.

Die rechnerische Erhöhung der zulässigen Teilflächenpressung ist nur gestattet, wenn die auftretenden Spaltzugkräfte innerhalb der Wand aufgenommen werden können. In der Regel kann dies bei einem Überbindemaß von $l_{ol} \geq 0,4 \cdot h_u$ vorausgesetzt werden. Falls erforderlich, darf der höher beanspruchte Wandbereich auch mit Mauerwerk einer höheren Druckfestigkeit ausgeführt werden.

Nach DIN EN 1996-1-1/NA ist für Teilflächenlasten eine konstruktive Mindestauflagertiefe von 90 mm einzuhalten.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit muss der Bemessungswert einer vertikalen Einzellast N_{Ed} kleiner oder gleich dem für diese Beanspruchung geltenden Bemessungswert des Tragwiderstandes der Wand N_{Rd} sein:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = \beta \cdot A_b \cdot f_d \quad (7.27)$$

mit

- β Erhöhungsfaktor bei Teilflächenlasten nach Gleichung (7.28) bzw. (7.30)
- A_b belastete Teilfläche
- f_d Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Kapitel 2.2.2

Für die Berechnung des Erhöhungsfaktors β muss zwischen Voll- und Lochsteinen unterschieden werden. Weiterhin sind die Regelungen bei randnahen Einzellasten verschärft.

Für Vollsteine berechnet sich der Erhöhungsfaktor nach Gleichung (7.28), wobei auch die Bedingung nach Gleichung (7.29) einzuhalten ist. Hierbei soll die Lastausmitte, gemessen von der Schwerachse der Wand nicht größer als $t/4$ sein (s. Bild 7-9).

$$\beta = 1,0 \leq \left(1 + 0,3 \cdot \frac{a_1}{h_c} \right) \cdot \left(1,5 - 1,1 \cdot \frac{A_b}{A_{ef}} \right) \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \\ 1,25 + \frac{a_1}{2 \cdot h_c} \end{array} \right. \quad (7.28)$$

mit

- a_1 Abstand vom Wandende zu dem am nächsten gelegenen Rand der belasteten Fläche
- h_c Höhe der Wand bis zur Ebene der Lasteintragung
- A_b belastete Teilfläche
- $A_{ef} = l_{efm} \cdot t$; wirksame Wandfläche
- l_{efm} wirksame Basis des Trapezes, unter dem sich die Last ausbreitet, ermittelt in halber Wand- oder Pfeilerhöhe
- t Wanddicke

$$\frac{A_b}{A_{ef}} \leq 0,45 \quad (7.29)$$

mit

A_b belastete Teilfläche

$A_{ef} = l_{efm} \cdot t$; wirksame Wandfläche

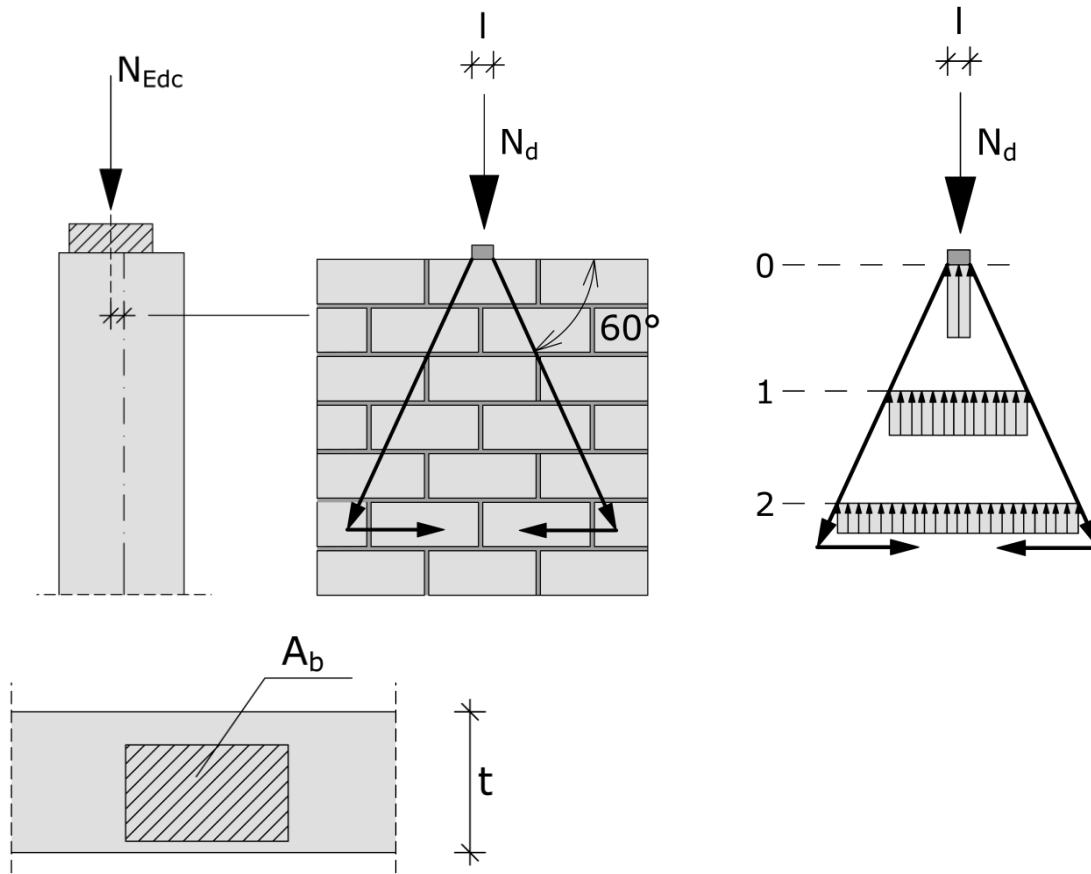


Bild 7-9: Wände unter Teilflächenlasten

Für Lochsteine und generell für randnahe Einzellasten ($a_1 \leq 3 \cdot l_1$) kann ein erhöhter Wert β mit Gleichung (7.30) berechnet werden (Bild 7-10), wenn die folgenden Bedingungen eingehalten sind:

- Die Belastungsfläche ist auf $A_b \leq 2 \cdot t^2$ begrenzt
- Die Exzentrizität des Schwerpunktes der Teilfläche ist $e < t/6$.

$$\beta = 1 + 0,1 \cdot \frac{a_1}{l_1} \leq 1,50 \quad (7.30)$$

mit

a_1 Abstand vom Wandende zu dem am nächsten gelegenen Rand der belasteten Fläche

l_1 Breite der Lasteinleitung

Falls der Abstand der Last zum Wandende $a_1 = 0$ beträgt, ist somit keine Erhöhung zulässig. Der Faktor β ist in diesem Fall mit 1,0 anzusetzen.

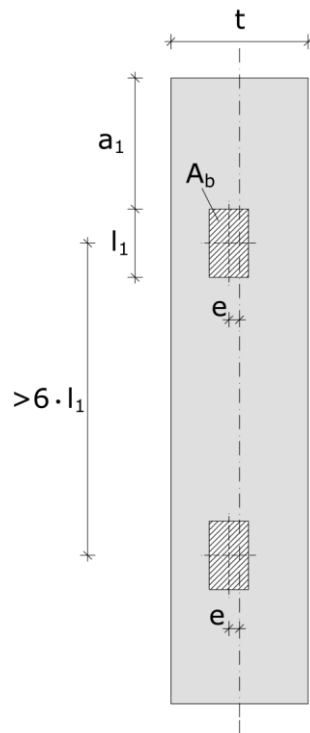


Bild 7-10: Teilflächenpressung bei randnaher Einzellast

Der Nachweis der Teilflächenpressung unter einer konzentrierten Einzellast ersetzt nicht den Nachweis der gesamten Wand und den Nachweis der Knicksicherheit. Daher muss stets auch immer die zulässige vertikale Tragfähigkeit in halber Wandhöhe eingehalten sein. Dies gilt einschließlich der Beanspruchungen durch andere Vertikallasten und insbesondere bei dicht nebeneinander liegenden Teilflächenlasten mit Überschneidung der Lastausbreitungsflächen.

Hohe Teilflächenlasten sollten nach Möglichkeit auf Vollsteinen aufliegen, deren Länge gleich der erforderlichen Auflagerlänge zuzüglich eines beidseitigen Überstandes ist. Dieser ergibt sich unter der Annahme einer Lastverteilung von 60° bis zur Grundfläche des Vollmaterials. Bei Auflagerung am Wandende ist ein Überstand a_1 zur Stirnseite erforderlich, wenn eine erhöhte Teilflächenpressung berücksichtigt wird.

Für Teilflächenbelastungen rechtwinklig zur Wandebene ist der Bemessungswert der Tragfähigkeit mit $\beta = 1,3$ zu bestimmen. Bei horizontalen Lasten $F_{Ed} > 4,0$ kN ist zusätzlich die Querkrafttragfähigkeit in den Lagerfugen der belasteten Steine in Plattenrichtung nachzuweisen. Bei Loch- und Kammersteinen ist z. B. durch lastverteilende Zwischenlagen (Elastomerlager o. ä.) sicherzustellen, dass die Druckkraft auf mindestens 2 Stege eines Mauersteines übertragen wird.