5 Stabilitätsversagen und Knicklänge von Mauerwerk

5.1 Grundlagen zum Stabilitätsversagen

Mauerwerkswände sind in den meisten baupraktischen Fällen überwiegend druckbeansprucht, da Mauerwerk diese Art der Belastung am besten abtragen kann (vgl. Kap. 1 und Kap. 2). Bei schlanken Wänden besteht neben dem Versagen durch Überschreiten der Druckfestigkeit (Spannungsversagen) jedoch stets die Gefahr eines Stabilitätsversagens, welches umgangssprachlich häufig als „Ausknicken“ bezeichnet wird. Diese Versagensart ist dadurch gekennzeichnet, dass bei einem überwiegend normalkraftbeanspruchten Bauteil die infolge Lastexzentrizität entstehenden Biegemomente nach Theorie I. und II. Ordnung bei Überschreiten einer kritischen Laststufe schneller anwachsen als die vom Querschnitt mit zunehmender Querschnittsverkrümmung aufnehmbaren Schnittgrößen. Theoretisch steigt bei linear-elastischem Werkstoffverhalten, exakt zentrischer Lasteinleitung und idealgerader Stabachse die aufnehmbare Normalkraft bis zu einem gewissen Wert – der Knicklast – ohne eine Querschnittsverkrümmung an und bei Überschreitung derselben versagt das Bauteil schlagartig. In der Praxis wird die Wand allerdings nie exakt lotrecht ausgeführt und immer mit gewissen Ausmittigkeiten hinsichtlich der Lasteinleitung behaftet sein, sodass bei einwirkender Normalkraft stets Biegemomente nach Theorie I. Ordnung entstehen. Diese wiederum führen zu Zusatzmomenten nach Theorie II. Ordnung, weshalb es sich im Versagensfall - bei Annahme linear-elastischen Werkstoffverhalten - immer um ein Spannungsversagen nach Theorie II. Ordnung handelt. Berücksichtigt man bei der Berechnung der aufnehmbaren Traglast hingegen realitätsnah das infolge Rissbildung in der Wand nichtlineare Last-Verformungs-Verhalten, so kann tatsächlich „echtes“ Stabilitätsversagen auftreten, d.h. der Versagenspunkt liegt innerhalb der maximalen Tragfähigkeitskurve bei Momenten-Normalkraft-Interaktion (s. Bild 5-1).

Im Allgemeinen werden die Schnittgrößen am unverformten System nach Theorie I. Ordnung ermittelt. Beeinflussen die Verformungen jedoch maßgeblich die Schnittkräfte, muss das Gleichgewicht am verformten System nachgewiesen werden. Bei einer druckbelasteten Stütze ergibt sich das Zusatzmoment nach Theorie II. Ordnung aus dem Produkt der Normalkraft und der Verformung. Die Größe der Verformung hängt außer von der Belastung und Geometrie des Systems auch von der Biegesteifigkeit des Stabes ab. Ist die Biegesteifigkeit konstant, kann die Verformung und damit das Zusatzmoment nach der Elastizitätstheorie ermittelt werden. Beim Mauerwerk handelt es sich jedoch um einen nichtlinearen Werkstoff, da sich durch Rissbildung die Steifigkeit des Mauerwerks ändert. Die Rissbildung ist abhängig von der Belastung. Ein Mauerwerksstab mit großer Normalkraft reißt bei einer höheren Momentenbelastung als ein Stab mit geringerer Normalkraft. Das nichtlineare Werkstoffverhalten wird auch als physikalische Nichtlinearität bezeichnet.

Bei schlanken, druckbeanspruchten Stützen ergeben sich wegen des nichtlinearen Materialverhaltens verschiedene Versagensmöglichkeiten, die sich mithilfe eines Interaktionsdiagramms erläutern lassen. Das Interaktionsdiagramm in Bild 5-1 zeigt die aufnehmbare Normalkraft in Abhängigkeit des Momentes. Erreicht der Stützenquerschnitt die Bruchschnittgrößen, versagt die Stütze. Diesen Zustand stellt die äußere Linie dar.

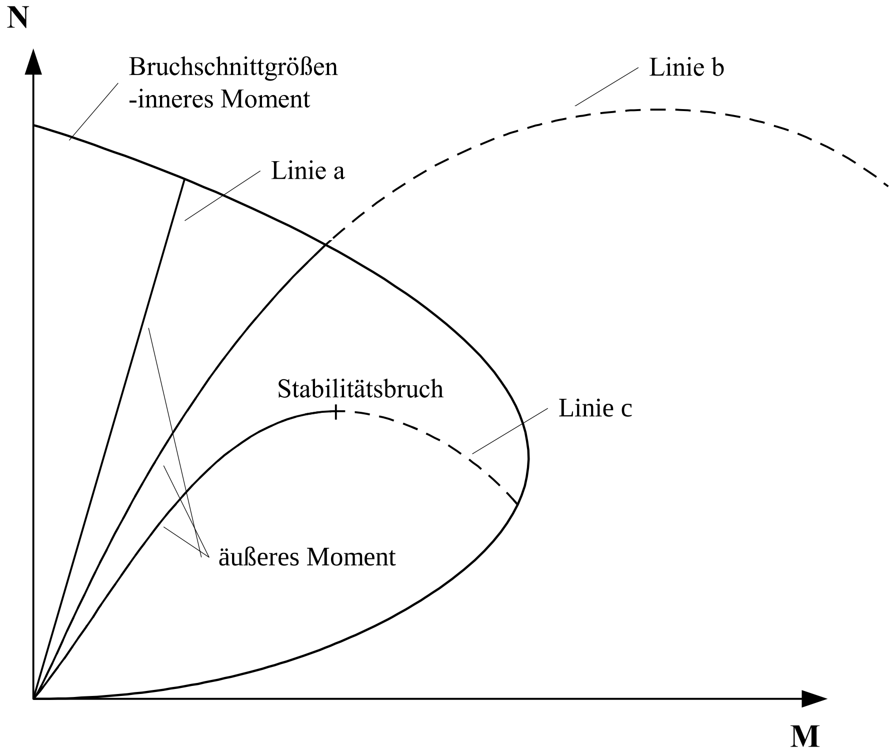


Bild 5-1: Darstellung der Versagensmöglichkeiten im Interaktionsdiagramm

Bei gedrungenen Stützen sind die auftretenden Verformungen und damit die zusätzlichen Momente vergleichsweise gering. Die Stütze versagt durch Erreichen der Bruchschnittgrößen (Linie a). Bei mäßig schlanken Stützen nehmen die Verformungen und damit die Zusatzschnittgrößen nach Theorie II. Ordnung zu, so dass die aufnehmbare Normalkraft abnimmt. Die Stütze versagt jedoch noch durch Erreichen der Bruchschnittgrößen (Linie b). Da die Verformungen einen Einfluss auf die aufnehmbare Normalkraft haben, spricht man hier von einem Spannungsproblem nach Theorie II. Ordnung. Wird die Schlankheit noch weiter vergrößert, nehmen die Verformungen sehr stark zu, die Stütze wird instabil. Das äußere Moment wächst schneller als das aufnehmbare innere Moment, dadurch tritt Versagen ein, ohne dass der Stützenquerschnitt die Bruchschnittgrößen erreicht hat (Linie c). Deshalb spricht man hier von einem Stabilitätsversagen.

Für den theoretischen Fall des Stabilitätsversagens bei linear-elastischem Werkstoffverhalten kann die Knicklast mathematisch exakt nach Gleichung (5.1) bestimmt werden. Demnach ist die maximal aufnehmbare Last lediglich von der Biegesteifigkeit EI und der Knicklänge h_{ef} abhängig. Diese Beziehung wurde als erstes von Leonhard Euler erkannt, der für vier statische Systeme - den sogenannten Eulerfällen - die Knicklängen bestimmt hat. In

Bild 5-2 sind diese vier Systeme dargestellt, wobei für die Knicklänge und die kritische Knicklast mit s_k bzw. N_{ki} die veralteten Bezeichnungen verwendet wurden.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{{h_{ef}}^2} \tag{5.1}$$

mit

N_{cr} kritische Knicklast

EI Biegesteifigkeit

h_{ef} Knicklänge

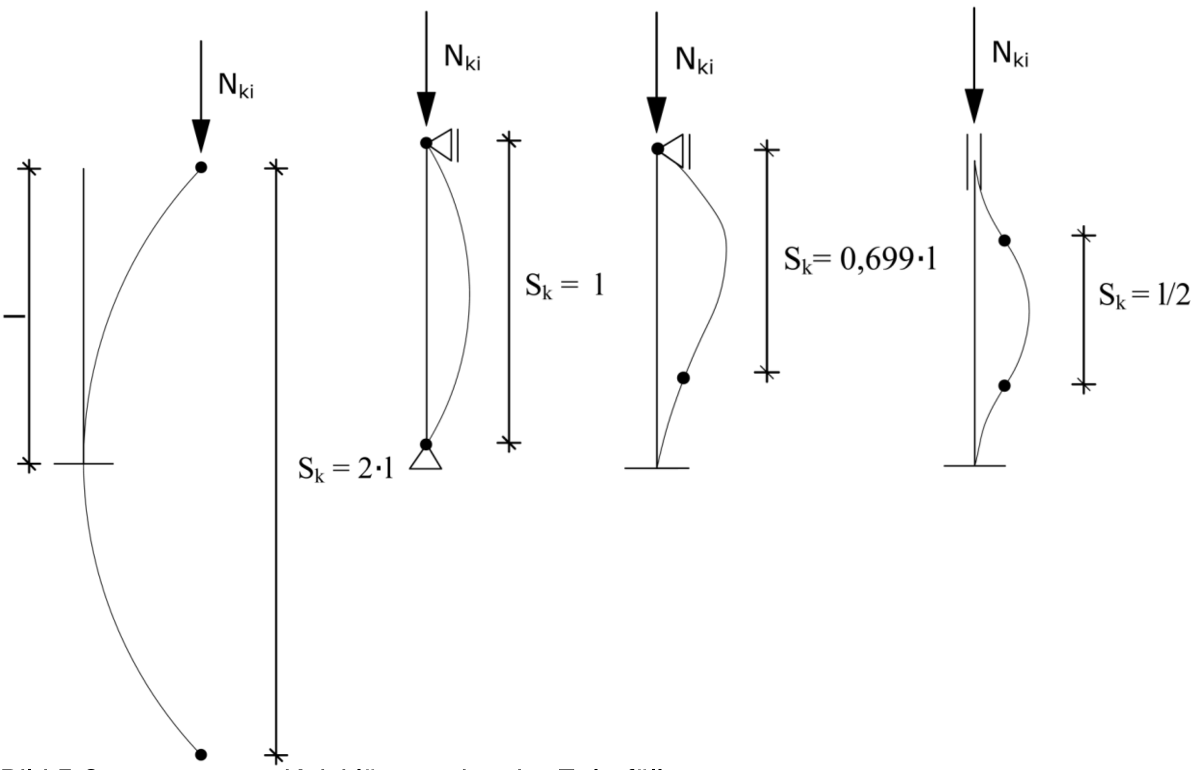


Bild 5-2: Knicklängen der vier Eulerfälle

Die theoretische Knicklast ist somit ausschließlich von den geometrischen Größen des betrachteten Bauteils abhängig. Die Knicklänge wird dabei aus dem Produkt eines Knicklängenbeiwerts ρ und der Systemlänge h bestimmt. Geometrisch gesehen entspricht die Knicklänge genau dem Abstand der Wendepunkte bei Betrachtung der Biegelinie des verformten Systems und stellt ein wesentliches Merkmal bei der Modellierung des Tragverhaltens schlanker Mauerwerkswände dar. Dies gilt auch bei Berücksichtigung eines wirklichkeitsnahen nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens.

Aus diesen theoretischen Überlegungen kann für Mauerwerkswände abgeleitet werden, dass die Knickgefahr mit der Vergrößerung der Wandschlankheit $\lambda = h / t$ anwächst bzw. die zugehörige Traglast entsprechend abnimmt. Auch bei großen Auflasten ist die Gefahr des Knickens deutlich erhöht. Des Weiteren haben die Lagerungsbedingungen der Wände insbesondere an den Wand-Decken-Knoten einen entscheidenden Einfluss darauf, wie groß die Knicklänge ist und damit ob die Wand als knickgefährdet zu betrachten ist oder nicht.

5.2 Knicklänge von Mauerwerkswänden

5.2.1 Knicklänge zweiseitig gehaltener Wände

Für den Knicksicherheitsnachweis von Druckstäben ist es im Allgemeinen üblich, die Lagerungsbedingungen an den Stabenden über die Knicklänge h_{ef} zu erfassen. Das Knickproblem wird damit auf den Eulerfall II des gelenkig gelagerten Ersatzstabes zurückgeführt. Dieses Prinzip lässt sich grundsätzlich sowohl auf zwei- als auch auf mehrseitig gehaltene Wände übertragen. Da im Mauerwerksbau das Ausknicken der Wände im Allgemeinen nur zwischen den Geschossdecken erfolgen kann, liegt es auf der sicheren Seite, dem Knicksicherheitsnachweis vereinfacht die lichte Geschosshöhe h zugrunde zu legen.

Für die Ermittlung der Knicklänge sind nach DIN EN 1996/NA im vereinfachten und allgemeinen Berechnungsverfahren zwei geringfügig unterschiedliche Vorgehensweisen zur Bestimmung des Knicklängenbeiwerts ρ möglich. In beiden Berechnungsverfahren wird die Knicklänge aber grundsätzlich mit dem gleichen Ansatz ermittelt:

$$h_{ef} = \rho_2 \cdot h \tag{5.2}$$

mit

h_{ef} Knicklänge

h lichte Geschosshöhe

ρ_2 Abminderungsbeiwert nach Tabelle 5-1 bzw. Tabelle 5-2

Mit der so ermittelten Knicklänge der Wand errechnet sich die Wandschlankheit λ nach Gleichung (5.3). Nach DIN EN 1996/NA ist die Schlankheit dabei auf $\lambda \leq 27$ zu begrenzen.

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t} \leq 27 \tag{5.3}$$

mit

h_{ef} Knicklänge

t Wanddicke

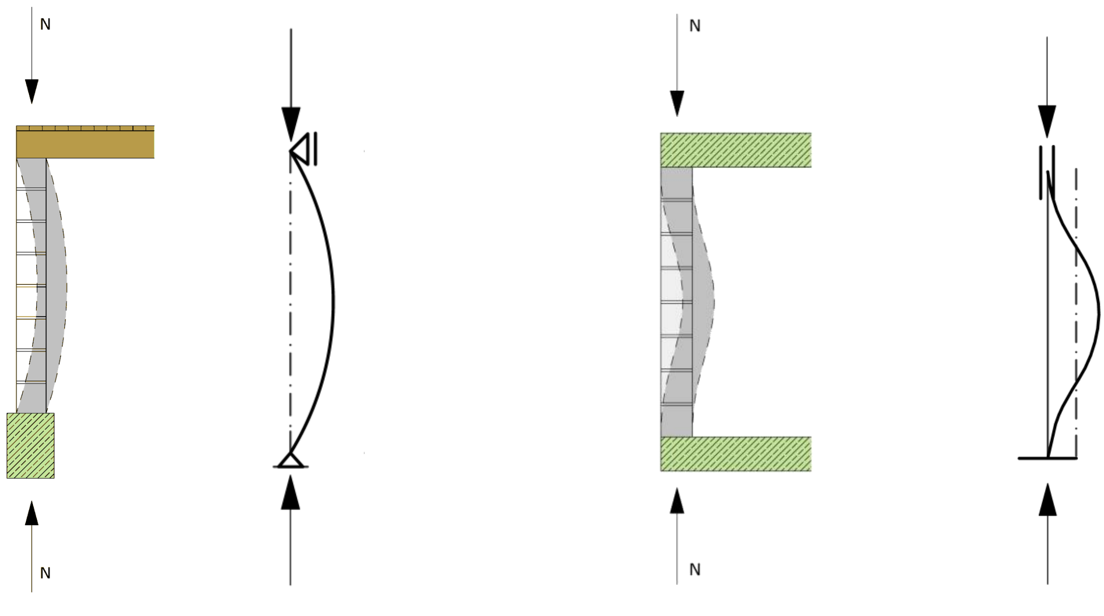


Bild 5-3: Einspannung von Geschossdecken und deren Auswirkung auf die Knicklänge

Bei flächig aufgelagerten massiven Plattendecken oder Rippendecken nach DIN EN 1992-1/NA mit lastverteilenden Balken darf bei 2-seitig gehaltenen Wänden die Einspannung der Wand in den Decken durch eine Abminderung der Knicklänge berücksichtigt werden, wenn keine größeren horizontalen Lasten als die planmäßigen Windlasten rechtwinklig auf die Wände einwirken (s. Bild 5-3). Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben - z. B. bei Wänden, die oben und unten nur durch Ringbalken mit ausreichender Steifigkeit horizontal gehalten sind oder bei Holzbalkendecken - ist ρ_2 = 1,0 anzusetzen.

Im vereinfachten Berechnungsverfahren nach DIN EN 1996-3/NA darf der Knicklängenbeiwert ρ_2 wegen der möglichen Einspannung „dünner Wände“ in die angrenzenden Decken vereinfacht in Abhängigkeit der Wanddicke t bestimmt werden, wenn die in Tabelle 5-1 angegebenen Bedingungen eingehalten sind. Andernfalls muss ein Knicklängenbeiwert von ρ_2 = 1,0 angesetzt werden.

Tabelle 5-1: Abminderungsbeiwert ρ_2 zur Ermittlung der Knicklänge h_{ef} für 2-seitig gehaltene Wände im vereinfachten Berechnungsverfahren

Wanddicke t [cm]	Abminderungsbeiwert ρ_2 [–]	Erforderliche Mindestauflagertiefe der Decke a [cm]
≤ 17,5	0,75	a = t
17,5 < t < 24	0,90	a = t
24 ≤ t ≤ 25	0,90	a ≥ 17,5
> 25	1,00	-

Bei Anwendung der allgemeinen Bemessungsregeln darf der Knicklängenbeiwert ρ_2 in Abhängigkeit der Exzentrizität der einwirkenden Normalkraft bestimmt werden. Für die Exzentrizität e ist hierbei die planmäßige Ausmitte des Bemessungswertes der Normalkraft am Wandkopf ohne Berücksichtigung einer ungewollten Ausmitte zu berücksichtigen. Eine Abminderung der Knicklänge ist jedoch nur zulässig, wenn die Auflagertiefe der Decke mindestens 2/3 der Wanddicke bzw. 10 cm beträgt (s. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Abminderungsbeiwert ρ_2 zur Ermittlung der Knicklänge h_{ef} für 2-seitig gehaltene Wände im allgemeinen Berechnungsverfahren nach [8]

<table>
<tr><th>Exzentrizität
e</th><th>Abminderungsbeiwert
ρ₂
[–]</th></tr>
<tr><td>e ≤ t/6</td><td>0,75</td></tr>
<tr><td>e ≥ t/3</td><td>1,0</td></tr>
<tr><td colspan="2">Zwischenwerte dürfen interpoliert werden</td></tr>
<tr><td colspan="2">e = planmäßige Ausmitte des Bemessungswertes der Längsnormalkraft am Wandkopf (ohne Berücksichtigung einer ungewollten Ausmitte)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Eine Abminderung der Knicklänge ist jedoch nur zulässig, wenn folgende erforderliche Deckenauflagertiefen a auf der Wand gegeben sind:
t < 12,5 cm a ≥ 10,0 cm
t ≥ 12,5 cm a ≥ 2/3 · t</td></tr>
</table>

5.2.2 Knicklänge drei- und vierseitig gehaltener Wände

Bei Mauerwerkswänden ist es in vielen Fällen ausreichend, die Bemessung unter Ansatz einer zweiseitigen Halterung durchzuführen. Nur bei sehr ungünstigen Lastfällen oder beispielsweise bei Kellerwänden mit großen Horizontallasten bei kleiner Auflast ist ggf. die Berücksichtigung weiterer (seitlicher) Halterungen erforderlich. Derartige seitliche Halterungen sind dann immer auch in den Ausführungsunterlagen deutlich zu kennzeichnen, damit diese bei der Bauausführung als Sonderfall erkannt und die Wandanschlüsse entsprechend ausgebildet werden.

Der Ansatz einer zusätzlichen seitlichen Halterung der betreffenden Wand darf nur dann erfolgen, wenn ausreichend steife Querwände für den Lastabtrag vorhanden sind, deren Abstände gewisse Grenzen nicht überschreiten. Andernfalls geht die aussteifende Wirkung der Querwände verloren. Eine Reduzierung der Knicklänge von drei- und vierseitig gehaltenen Wänden ist daher nur bei folgenden Abständen der Querwände möglich:

$b' \leq 15 \cdot t$ bei dreiseitig gehaltenen Wänden

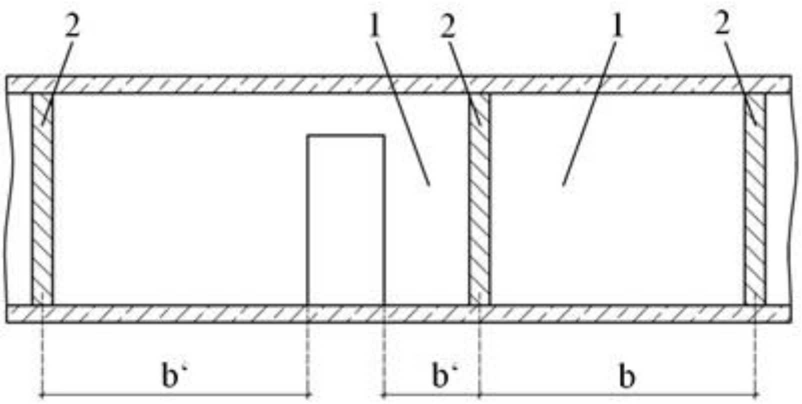
$b \leq 30 \cdot t$ bei vierseitig gehaltenen Wänden

mit

t Wanddicke

b, b‘ Abstand des freien Randes von der Mitte der aussteifenden Wand bzw. Mittenabstand der aussteifenden Wand nach Bild 5-4, Bild 5-5 und Bild 5-6. Unabhängig von der Lage eines vertikalen Schlitzes oder einer Aussparung ist an ihrer Stelle ein freier Rand anzunehmen, wenn die Restwanddicke kleiner als die halbe Wanddicke oder kleiner als 115 mm ist

In DIN EN 1996-1-1 wird zwar der Abstand der seitlichen Halterungen mit „l“ bezeichnet, im Nationalen Anhang (NA.15) dagegen der Buchstabe „b“ bzw. „b‘ “ verwendet. Hier wird die Bezeichnung daher dem Nationalen Anhang angepasst und die Wandabstände werden ebenfalls mit „b“ bzw. „b‘ “ verwendet.



1 gehaltene Wand
2 aussteifende Wände

Bild 5-4: Abstände der aussteifenden Wände bei drei- und vierseitig gehaltenen Wänden nach [8]

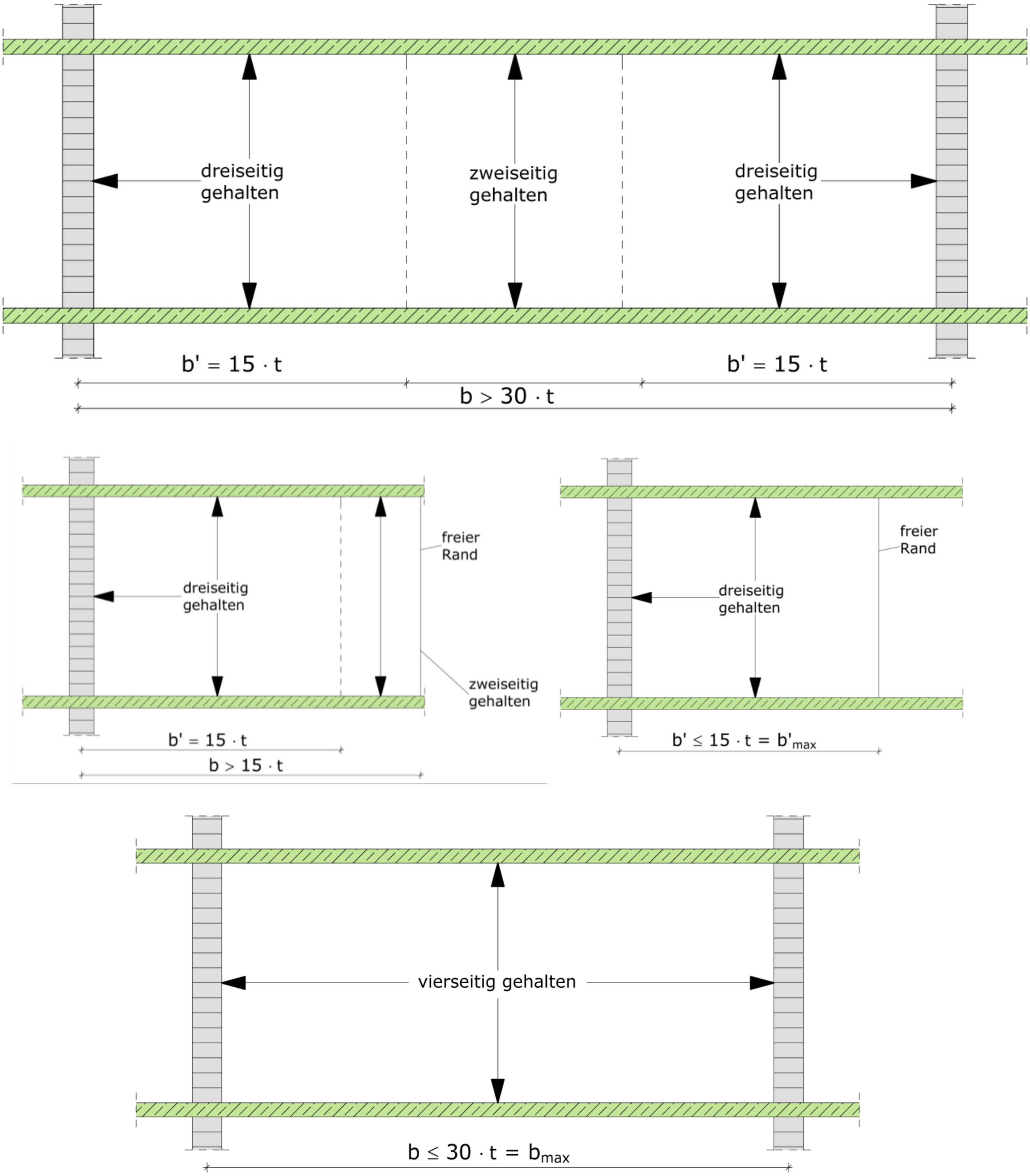
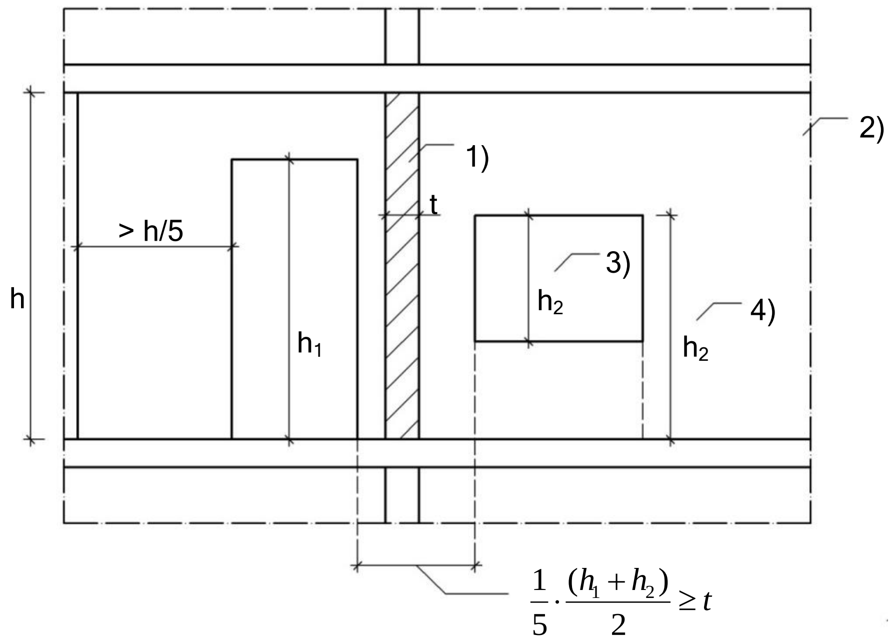


Bild 5-5: Grenzbreiten von drei- und vierseitig gehaltenen Wänden

Darüber hinaus müssen aussteifende Querwände die nachfolgenden Anforderungen erfüllen:

- Wandlänge $l_w \geq 1/5 \cdot h$ (h = lichte Geschosshöhe)
- Mindestdicke der aussteifenden Wände 1/3 der Dicke der auszusteifenden Wand, mindestens aber t = 11,5 cm
- Im Bereich von Tür- und Fensteröffnungen gelten für die Länge der aussteifenden Wände die Bedingungen nach Bild 5-6

Sollen tragende Wände durch Querwände ausgesteift werden, so darf nach DIN EN 1996/NA eine unverschiebliche Halterung nur dann angenommen werden, wenn die Wände aus Baustoffen mit annähernd gleichem Verformungsverhalten bestehen und diese gleichzeitig im Verband hochgeführt werden. Anstelle des Verbandes zwischen Längs- und Querwand darf die zug- und druckfeste Verbindung aber auch durch andere konstruktive Maßnahmen sichergestellt werden. Als solche gilt z.B. der Wandanschluss in Stumpfstoßtechnik.



Legende
1) auszusteifende Wand
2) aussteifende Wand
3) h_2 (Fenster)
4) h_2 (Tür)

Bild 5-6: Bedingungen für aussteifende Wände

Die Knicklänge mehrseitig gehaltener Wände kann mit den Gleichungen (5.4), (5.5) und (5.6) ermittelt werden. Mit Hilfe der Anpassungsfaktoren α_3, α_4 nach Tabelle 5-3 kann eine verminderte horizontale Biegesteifigkeit von Mauerwerk mit verringertem Überbindemaß bei großformatigen Steinen erfasst werden. Für klein- und mittelformatiges Mauerwerk sowie großformatiges Elementmauerwerk mit einem planmäßigen Überbindemaß lol/hu ≥ 0,4 betragen die Anpassungsfaktoren $\alpha_3 = \alpha_4 = 1{,}0$.

Für dreiseitig gehaltene Wände gilt:

$$h_{ef} = \frac{1}{1 + \left(\alpha_3 \cdot \frac{\rho_2 \cdot h}{3 \cdot b'} \right)^2} \cdot \rho_2 \cdot h \geq 0{,}3 \cdot h \qquad (5.4)$$

Für vierseitig gehaltene Wände gilt:

$$h_{ef} = \frac{1}{1 + \left(\alpha_4 \cdot \frac{\rho_2 \cdot h}{b} \right)^2} \cdot \rho_2 \cdot h \qquad \text{für} \qquad \alpha_4 \cdot \frac{h}{b} \leq 1 \qquad (5.5)$$

$$h_{ef} = \alpha_4 \cdot \frac{b}{2} \qquad \text{für} \qquad \alpha_4 \cdot \frac{h}{b} > 1 \qquad (5.6)$$

mit

ρ_2 Abminderungsbeiwert nach Tabelle 5-1 bzw. Tabelle 5-2

h Wandhöhe

b, b‘ Abstand des freien Randes von der Mitte der aussteifenden Wand bzw. Mittenabstand der aussteifenden Wand nach Bild 5-4, Bild 5-5 und Bild 5-6. Unabhängig von der Lage eines vertikalen Schlitzes oder einer Aussparung ist an ihrer Stelle ein freier Rand anzunehmen, wenn die Restwanddicke kleiner als die halbe Wanddicke oder kleiner als 115 mm ist

α_3, α_4 Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Eigenschaften von großformatigen Steinen nach Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3: Anpassungsfaktoren α_3 und α_4 zur Abschätzung der Knicklänge von Wänden aus Elementmauerwerk mit verringertem Überbindemaß $0,2 \leq l_{ol}/h_u < 0,4$

Elementgeometrie ***h_u / l_u***	**0,5**	**0,625**	**1,0**	**2,0**
3-seitige Halterung *α_3*	1,0	0,90	0,83	0,75
4-seitige Halterung *α_4*	1,0	0,75	0,67	0,60
h_u = Steinhöhe l_u = Steinlänge				

Überschreitet der Abstand von aussteifenden Querwänden den zulässigen Grenzwert nach Bild 5-5, muss die Wand als zweiseitig gehalten betrachtet werden. Bild 5-7 veranschaulicht beispielhaft die mögliche Reduzierung der Knicklänge infolge einer seitlichen Halterung der Wand. Die schwarzen Linien zeigen den Verlauf des Knicklängenabminderungsbeiwertes ρ_3 für dreiseitig gehaltene Wände bei unterschiedlichen Faktoren für die zweiseitig gehaltene Wand. Die blauen Kurven zeigen den Verlauf der Beiwerte für vierseitig gehaltene Wände. Es ist zu erkennen, dass bei größeren Verhältnissen h/b die Knicklängenbeiwerte schnell relativ stark abnehmen.

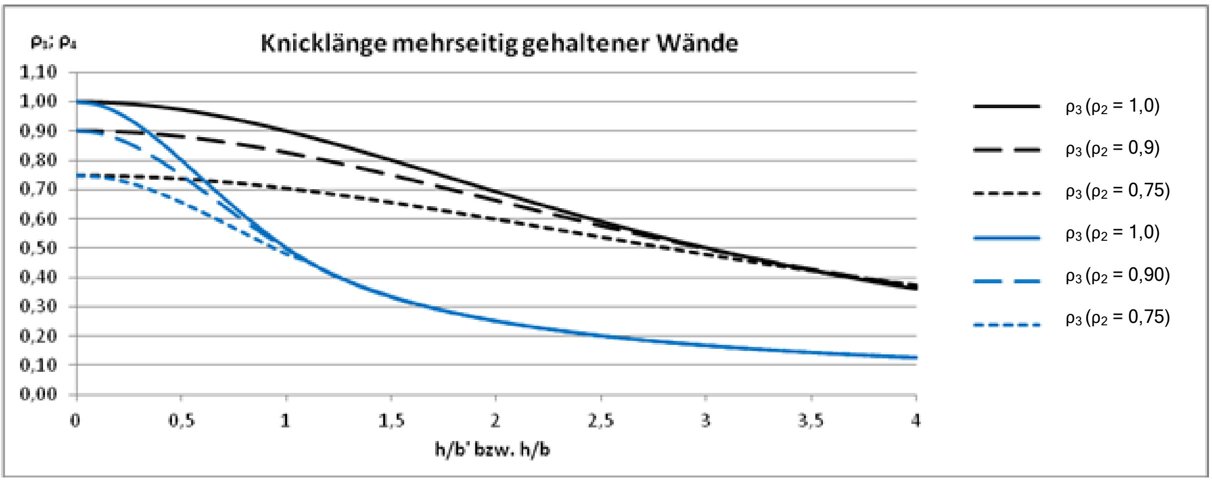


Bild 5-7: Knicklänge mehrseitig gehaltener Wände

5.2.3 Knicklänge von freistehenden Wänden

Freistehende Wände kommen im Mauerwerksbau im Regelfall nur bei windbeanspruchten Giebelwänden oder Gartenmauern ohne große Auflasten vor. Unter Annahme einer vollen Einspannung am Wandfuß kann mit den vorhandenen Normalkräften $N_{Ed,o}$ am Wandkopf und $N_{Ed,u}$ am Wandfuß nach DIN EN 1996-1-1/NA folgende Knicklänge angesetzt werden:

$$h_{ef} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1 + 2 \cdot N_{Ed,o} / N_{Ed,u}}{3}} \cdot h \qquad (5.7)$$

mit

$N_{Ed,0}$ Bemessungswert der Normalkraft am Wandkopf
$N_{Ed,u}$ Bemessungswert der Normalkraft am Wandfuß
h Wandhöhe

Die Knicklänge h_{ef} ist für freistehende Wände stets größer als die Wandhöhe h. Für den Grenzfall $N_{Ed,0} = 0$ (z. B. Gartenmauer) ergibt sich aus Gleichung (5.7) $h_{ef} = 1{,}15 \cdot h$. Für den Fall, dass die freistehende Wand nur am Wandkopf durch $N_{Ed,0}$ belastet und das Wandeigengewicht vernachlässigt wird ($N_{Ed,0} = N_{Ed,u}$), gilt $h_{ef} = 2 \cdot h$.