

New approach for spacing of movement joints in reinforced and unreinforced masonry veneer walls

Part 1: Unreinforced masonry

Neue Bemessungsmethode für die Abstände von Dehnungsfugen in bewehrten und unbewehrten Verblendmauerwerksschalen

Teil 1: Unbewehrtes Mauerwerk

The spacing of movement joints has been subject of many discussions. The current methods for the determination of the spacing of movement joints are based on local traditions and bad experience with cracked veneer walls. This has resulted in various design rules throughout Europe with very stringent limits for spacing of movement joints. According to EC6, one of the solutions for increasing the spacing of movement joints is to introduce bed joint reinforcement, although unfortunately no specific design rules are given. Until now, most scientific research has been focused on numerical simulations without taking time-dependent effects into account, which is a conservative approach. In this paper, a new approach is described. It is based on Peter Schubert's model and on practical experience with masonry buildings.

Keywords: movement joints; reinforced masonry; imposed deformation; restrained deformation

1 Introduction

To date no uniform design rules exist for the determination of the spacing of movement joints, which explains the large variety of prescriptive rules adopted in the National Annexes of EC6. From a scientific point of view, it cannot be explained why the spacing of movement joints should be different in neighbouring countries like Belgium, the Netherlands and Germany since the climatic circumstances in these countries are comparable. Only different building traditions and detailing may explain minor variations. Sometimes a very small spacing of not more than some metres is observed (Fig. 1) while for other buildings movement joints are situated every 20 m or more without (visible) cracking (Fig. 2).

In most analytical and numerical investigations concerning the spacing of movement joints ([10], [15]), the influence of the time-dependent behaviour of masonry subjected to imposed deformations is neglected and modelling is based on the no-cracking criterion. These assumptions are quite conservative and result in small and unrealistic values of the spacing of movement joints.

Über die Abstände von Dehnungsfugen wird häufig diskutiert. Gängige Methoden für die Bemessung des Abstands von Dehnungsfugen basieren auf lokalen Traditionen und schlechten Erfahrungen mit Rissbildung in Vorsatzschalen. Daraus resultieren europaweit vielerlei Bemessungsrichtlinien, die strenge Vorgaben für die Abstandsbemessung von Dehnungsfugen machen. Gemäß EC6 besteht eine Möglichkeit zur Abstandsvergrößerung von Dehnungsfugen darin, bewehrte Lagerfugen herzustellen. Leider werden dafür jedoch keine spezifischen Angaben gemacht. Bisher konzentrieren sich die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen auf numerische Simulationen. Trotz der Vernachlässigung zeitabhängiger Einflussfaktoren entspricht dies einem konservativen Ansatz. In diesem Bericht wird eine neue Herangehensweise beschrieben. Diese gründet auf dem Werk von Peter Schubert sowie praktischen Erfahrungen mit Mauerwerkskonstruktionen.

Stichworte: Dehnungsfugen; Mauerwerk, bewehrtes; Formänderungen; Spannungen

1 Einführung

Bis heute gibt es keine einheitlichen Entwurfsrichtlinien zur Abstandsbemessung von Dehnungsfugen, was die große Vielfalt an normierten Regelungen in den nationalen Anhängen des EC6 erklärt. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es unerklärlich, dass die Abstandsbemessung von Dehnungsfugen in Nachbarländern wie Belgien, den Niederlanden und Deutschland abweichend sein sollte, da die klimatischen Verhältnisse dieser Länder vergleichbar sind. Kleinere Abweichungen könnten nur durch unterschiedliche Bautraditionen und andere Methoden der Detailplanung erklärt werden. Manchmal betragen die Abstände nur wenige Meter (Bild 1), während die Dehnungsfugen bei anderen Konstruktionen einen Abstand von 20 m oder mehr, ohne (sichtbare) Rissbildung, aufweisen (Bild 2).

In den meisten analytischen und numerischen Untersuchungen bezüglich der Abstände von Dehnungsfugen ([10], [15]) wird der Einfluss von zeitabhängigem Verhalten des Mauerwerks unter Verformungbelastung vernachlässigt, die Modelle basieren stattdessen auf dem Kriterium der Rissvermeidung. Diese Annahmen sind sehr konserva-



Fig. 1. Building with small spacing of movement joints
Bild 1. Bauwerk mit engen Dehnungsfugenabständen

This paper deals with unreinforced and bed joint reinforced masonry veneer walls without openings. The new approach is based on the assumption that small cracks are acceptable as long as the units don't crack. Validation of the method for unreinforced masonry is based on observations in practice as has been described more in detail in [9].

2 Prescriptive Rules

In most former national standards and guidelines, prescriptive rules were given for the spacing of movement joints. These rules were inspired by specific situations where cracks occurred, not always due to restrained imposed deformations. Since the rules adopted in EC6 part 2 ([6], see Table 1) are a lower bound approach of former national standards, the recommended values are quite conservative.

3 Background of new approach

3.1 Cracking of masonry

Cracking in masonry veneer walls occurs when the tensile stresses in the wall exceed the tensile strength. A reliable estimate of the imposed deformation, the influence of the restraints and the stiffness of the masonry is necessary for the determination of the tensile stresses.

Table 1. Recommended values for spacing of vertical movement joints for URM walls according to EC6 [6]
Tabelle 1. Empfohlene Werte für den Abstand vertikaler Dehnungsfugen von unbewehrtem Mauerwerk gemäß EC6 [6]

Type of masonry / Mauerwerksart	l_m [m]
Clay brick masonry / Ziegelmauerwerk	12
Calcium silicate masonry / Mauerwerk aus Kalksandstein	8
Aggregate concrete and manufactured stone masonry / Mauerwerk aus Beton und Betonwerksteinen	6
Autoclaved aerated concrete masonry / Mauerwerk aus Porenbetonsteinen	6
Natural stone masonry / Natursteinmauerwerk	12



Fig. 2. Building without movement joints; no visible cracks
Bild 2. Bauwerk ohne Dehnungsfugen, keine sichtbaren Risse

tiv und führen zu niedrigen, unrealistischen Werten für die Abstandsbemessung von Dehnungsfugen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit unbewehrten und – in einer Fortsetzung des Beitrags in einem der nächsten Hefte – in den Lagerfugen bewehrten Verblendmauerwerksschalen ohne Öffnungen. Dieser neue Ansatz basiert auf der Annahme, dass kleine Risse akzeptabel sind, solange sich in den Mauersteinen keine Risse bilden. Die Validierung des Verfahrens für unbewehrtes Mauerwerk gründet auf praktischen Feststellungen und wird in [9] genauer beschrieben.

2 Verbindliche Vorschriften

In den meisten der ehemaligen nationalen Normen und Richtlinien werden verbindliche Entwurfsvorschriften aufgeführt. Diese Vorschriften sind durch spezifische Situationen bedingt, in denen Risse auftraten, jedoch nicht immer aufgrund von Zwangsverformungen im Mauerwerk. Da die erlassenen Richtlinien im Teil 2 des EC6 ([6], s. Tabelle 1) den Untergrenzen der ehemaligen nationalen Normen entsprechen, sind die Werte sehr konservativ bemessen.

3 Hintergrundinformationen zur neuen Bemessungsmethode

3.1 Rissbildung im Mauerwerk

Risse in Verblendmauerwerksschalen entstehen, wenn Zugspannungen in der Wand die Zugfestigkeit des Materials übersteigen. Eine zuverlässige Einschätzung des Verformungsverhaltens, des Einflusses von Spannungen und der Steifheit des Mauerwerks ist unabdingbar, um Zugspannungen zu bestimmen.

3.2 Zeitabhängiges Verhalten

Im Gegensatz zu Betonwänden wird Ziegelmauerwerk nicht innerhalb kürzester Zeit hergestellt. Um die Stabilität der Wand zu gewährleisten, und um zu verhindern, dass die Steine aus den frischen Mörtelfugen gedrängt werden, wird nur ungefähr 1 m Wandhöhe pro Tag errichtet (Bild 3). Das führt dazu, dass der Mörtel des ersten Abschnitts bereits geschwunden ist, bevor der nächste Wandabschnitt aufgemauert wird.

3.3 Einflüsse durch die Fugen

Bei Mauerwerk sind Lager- und Stoßfugen allgegenwärtig. Im traditionellen Mauerwerk werden die Mörtelfugen so-

3.2 Time-dependent behaviour

In contrast to concrete walls, masonry walls are not built in a very short time. In order to assure the stability of the wall and to prevent squeezing out of the fresh mortar joints, no more than approximately one metre in height is built in a day (Fig. 3). As a result, the mortar of the first part to be built will have shrunk before the next part of the wall is placed on top of it.

3.3 Influence of joints

In masonry, bed and head joints are omnipresent. In traditional masonry, the mortar joints are raked out to a depth of 5 to 10 mm immediately after bricklaying and are normally pointed after finishing the complete building. As a result, cracks will occur in the joints in the early stage of building since the tensile bond strength at the joints is smaller than the tensile strength of the units. After pointing, the cracks in the joints are filled and will no longer be visible. For thin layer masonry, no pointing is required and the head joints are sometimes not even filled. In these situations, cracks will most likely occur at the joints without any detrimental effect on the appearance of the wall.

3.4 Hypotheses and assumptions

The following hypotheses and assumptions are adopted:

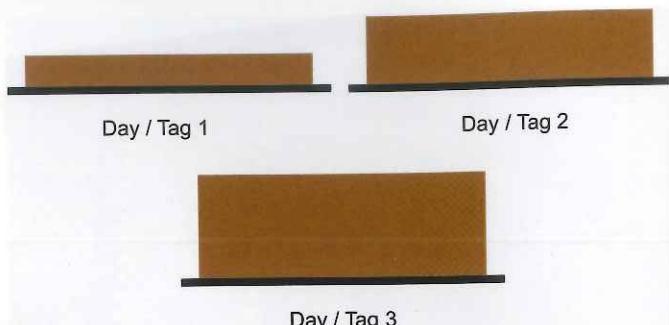
- The method is based on personal experience in addition with information found in scientific literature.
- The wall is built on a rigid foundation.
- For URM, it is assumed that, if the boundary conditions are met, the crack width will generally not be larger than 0.3 mm.
- For reinforced masonry, the crack width is calculated using Vandewalle's model for the determination of the anchorage length of the reinforcement.
- It is assumed that clay bricks do not shrink and that mortar shrinkage is partly restrained by the units.
- For concrete unit masonry, the shrinkage of the unit and the mortar is taken into account.

3.5 Design criteria for unreinforced masonry

Two situations of imposed deformations have to be considered: expansion and contraction. Expansion due to moisture and thermal movement has to be smaller than 60% of the width of the movement joint in order to avoid compression and buckling of the walls. Tensile stresses induced by restrained contraction of the wall should be less than the mean value of the tensile strength of the masonry, which implies that small cracks in the masonry are allowed. Based on experience in practice and former rules in standards and guidelines, the spacing of movement joints should not be less than 1.5 times the wall height and not exceed 30 m for clay bricks or 20 m for concrete bricks or blocks.

4 New design method for URM

In this paper, the most important background of the method is mentioned; a more detailed description of the new design method may be found in [9]. If the design is not



*Fig. 3. Building of masonry veneer walls
Bild 3. Errichtung von Verblendmauerwerksschalen*

fort nach der Verlegung ca. 5 bis 10 mm tief ausgekratzt und normalerweise nach der Fertigstellung komplett verfugt. Das führt dazu, dass im frühen Baustadium Risse in den Fugen auftreten, da die Haftzugfestigkeit in den Fugen geringer ist als die Zugfestigkeit der Steine. Nach dem Ausfügen werden die Risse in den Fugen verfüllt und sind deshalb später nicht mehr sichtbar. Bei dünnenschaligem Mauerwerk ist das Verfugen nicht notwendig und die Stoßfugen werden zum Teil gar nicht verfugt. In diesen Situationen bilden sich meist Risse in den Fugen, die aber keine nachteiligen Auswirkungen auf das äußere Erscheinungsbild der Wand haben.

3.4 Hypothesen und Annahmen

Folgende Hypothesen und Annahmen werden getroffen:

- Die Methode basiert auf persönlichen Erfahrungen verknüpft mit Informationen aus der Fachliteratur.
- Die Wand steht auf einem steifen Fundament.
- Für unbewehrtes Mauerwerk wird angenommen, dass die Rissbreite im Allgemeinen 0,3 mm nicht überschreitet, wenn die Randbedingungen entsprechend eingehalten werden.
- Bei bewehrtem Mauerwerk wird die zulässige Rissbreite nach Vandewalles Modell zur Bestimmung der Verankerungslänge der Bewehrung bestimmt.
- Es wird angenommen, dass Mauerziegel an sich nicht schwinden und dass das Schwinden des Mörtels teilweise durch die Mauersteine beschränkt wird.
- Bei Mauerwerk aus Betonsteinen wird das Schwinden von Steinen und Mörtel berücksichtigt.

3.5 Entwurfskriterien für unbewehrtes Mauerwerk

Zwei unterschiedliche Verformungsfälle müssen bedacht werden: Ausdehnung und Verkürzung. Um Komprimierung und Knicken der Wände zu vermeiden, darf die Ausdehnung durch Feuchtigkeit und Temperaturänderung höchstens 60% der Dehnungsfugenbreite betragen. Zugkräfte, die durch Spannungen in der Wand auftreten, sollten unter dem Mittelwert der Zugfestigkeit des Mauerwerks liegen. Das bedeutet, dass kleine Risse im Mauerwerk zulässig sind. Aufgrund praktischer Erfahrungen und ehemaliger Normen und Richtlinien sollten die Abstände zwischen den Dehnungsfugen nicht weniger als $1,5 \times$ Wandhöhe, höchstens aber 30 m für Mauerziegel und 20 m für Betonsteine oder -blöcke betragen.

Table 2. Temperature increase of masonry for different unit colours and wall orientations

Tabelle 2. Temperaturanstieg von Mauerwerk bei unterschiedlich gefärbten Steinen und Wandausrichtungen

Color of brick / Steinfarbe	South-West / Süd-West	North-East / Nord-Ost
Light-coloured / leichte Färbung ($\alpha \leq 0,2$)	+18	+0
Medium / mittlere Färbung ($0,2 \leq \alpha < 0,9$)	+30	+2
Dark / dunkle Färbung ($0,9 \leq \alpha$)	+42	+4

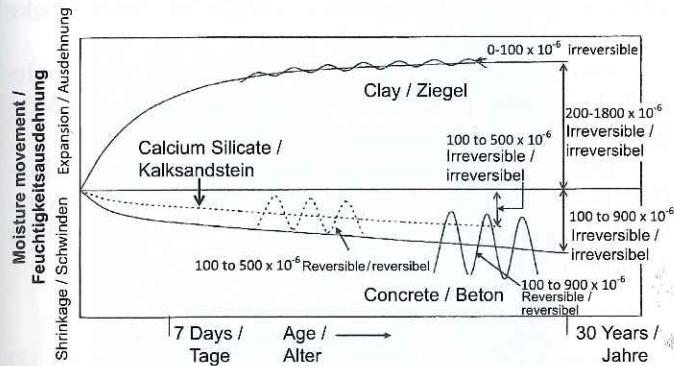


Fig. 4. Moisture expansion of clay bricks and shrinkage of concrete blocks and calcium silicate bricks [4]

Bild 4. Feuchtigkeitsausdehnung von Mauerziegeln und Schwinden von Betonblöcken und Kalksandsteinen [4]

compliant with the above-mentioned basic assumptions, the prescriptive rules in EC6 should be used, completed with the rules in the National Annex.

4.1 Imposed deformation

The imposed deformation is dependent on the mechanical properties of the masonry components and on the building method.

The colour of the units determines the absorption factor α , which in turn influences the temperature increase of the masonry (see Table 2) and the thermal deformation of the wall:

$$\theta_{\text{wall,max}} = \theta_{\text{air,max}} + \Delta_{\text{colour+orientation}} \quad (1)$$

with

- $\theta_{\text{wall,max}}$ maximum wall temperature
- $\theta_{\text{air,max}}$ maximum air temperature
- $\Delta_{\text{colour+orientation}}$ temperature increase (Table 2)

The shrinkage and moisture expansion are dependent on the type of units and mortar used. For clay brickwork, shrinkage should not be considered while a moisture expansion of 0.3 mm/m should be adopted. Since this moisture expansion occurs primarily during the first month after production (see Fig. 4), it is beneficial to lay the bricks at least 28 days after production. The same conclusion applies to concrete blocks and calcium silicate bricks.

Mortar shrinkage may be reduced by changing the components and the composition of the mortar (see Fig. 5).

In the proposed method, the influence of the thermal inertia of the wall is taken into account by multiplying the maximum wall temperature $\theta_{\text{wall,max}}$ by the following reduction factor (see Fig. 6):

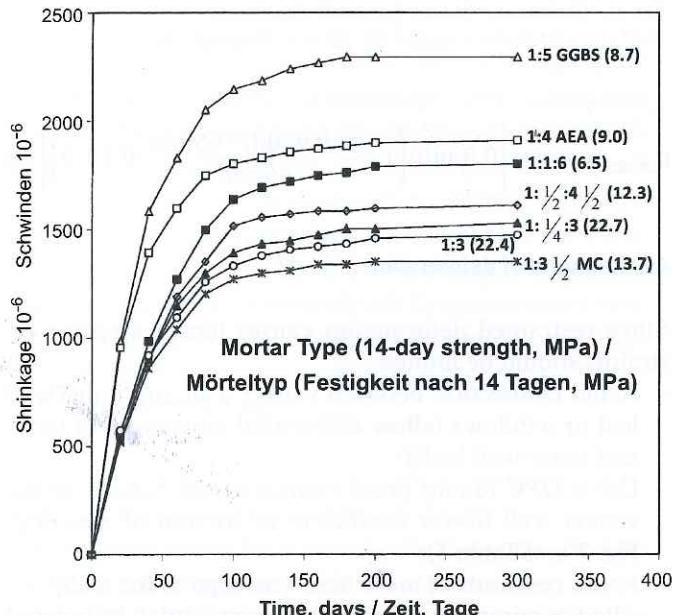


Fig. 5. Shrinkage of various types of mortar: GGBS ground granulated blast-furnace slag; AEA air-entraining agent; MC masonry cement [4]

Bild 5. Schwindverhalten unterschiedlicher Mörtelarten: GGBS gemahlene, granulierte Hochofenschlacke, AEA Luftporenbildner; MC Mauerwerkszement [4]

4 Neues Bemessungsverfahren für unbewehrtes Mauerwerk

In der vorliegenden Arbeit werden die wichtigsten Hintergründe des Verfahrens aufgezeigt. Eine ausführlichere Erklärung des neuen Bemessungsverfahrens kann in [9] nachgelesen werden. Wenn die Entwurfsaufgabe nicht den oben aufgeführten Grundannahmen entspricht, müssen die verbindlichen Vorschriften zusammen mit den Vorschriften im nationalen Anhang des EC6 angewandt werden.

4.1 Formänderungen

Formänderungen und Verformungen hängen von den mechanischen Eigenschaften der Mauerwerksbestandteile und der Bauweise ab.

Die Farbgebung der Steine bestimmt den Absorptionsfaktor α , welcher wiederum die Temperaturerhöhung im Mauerwerk (s. Tabelle 2) und die thermische Verformung der Wand beeinflusst:

$$\theta_{\text{Wand,max}} = \theta_{\text{Luft,max}} + \Delta_{\text{Farbe+Ausrichtung}} \quad (1)$$

mit

- $\theta_{\text{Wand,max}}$ maximale Wandtemperatur
- $\theta_{\text{Luft,max}}$ maximale Lufttemperatur
- $\Delta_{\text{Farbe+Ausrichtung}}$ Temperaturanstieg (Tabelle 2)

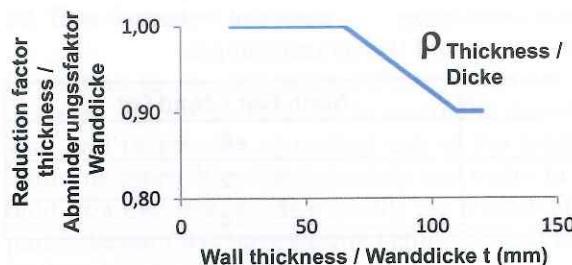


Fig. 6. Reduction factor for wall thickness
Bild 6. Abminderungsfaktor für die Wanddicke

$$\rho_{\text{thickness}} = \max \left[0.9; \min \left(1 - \frac{\text{unit width} - 65 \text{mm}}{45 \text{mm}} \cdot 0.1; 1.0 \right) \right] \quad (2)$$

4.2 Restraint of deformation

Since restrained deformation causes tensile stresses, restraints should be limited:

- Avoid connection between veneer wall and inner wall leaf or windows (allow differential movement of inner and outer wall leafs);
- Use a DPC (damp proof course) at the bottom of the veneer wall (lower coefficient of friction of masonry: Fig. 7 and Table 3);
- Avoid restraints at more than one edge of the wall;
- Allow a minimum time delay between brick-laying and pointing;
- Provide sufficient width of movement joint;
- Design walls with large aspect ratios (height-length ratios) or small length/height ratios in order to reduce the influence of the restraint at the top of the wall. Nanayakkara [11] has determined numerically the influence of the wall length/height ratio (Fig. 8). According to EC2 [5], the restraint factor at the top of the wall may be neglected for values of H/L larger than 0.20 or L/H smaller than 5 (Fig. 9).

4.3 Strength and stiffness of masonry

High tensile stresses will occur for high wall stiffness, while high values of unit tensile strength compared to the mortar bond strength will reduce the risk of cracking of the bricks. The use of cement-lime or lime mortar may reduce masonry stiffness resulting in smaller tensile stresses.

4.4 Material properties

Depending on the type of clay bricks, the tensile strength and modulus of elasticity may be determined in relation to the compressive strength as indicated in Table 4, while the mortar properties mentioned in Table 5 may be used. The coefficient of thermal expansion may be taken from EC6.

Since mortar shrinkage partly occurs before hardening, a reduction factor is introduced as shown in Table 5.

The age of the clay bricks at the moment of laying is taken into account by introducing a reduction factor for moisture expansion, which is equal to 0.90 if the age of the bricks is less than 28 days and 0.70 if it is more.

Das Schwinden und die Feuchtigkeitsausdehnung hängen von der Art des Steins und des eingesetzten Mörtels ab. Bei Mauerziegeln muss das Schwinden nicht beachtet werden, während die Feuchtigkeitsausdehnung mit einem Wert von 0,3 mm/m angenommen werden sollte. Da die Feuchtigkeitsausdehnung vorwiegend in den ersten Monaten nach der Herstellung auftritt (s. Bild 4), ist es von Vorteil, die Ziegel erst min. 28 Tage nach der Herstellung zu verlegen. Dieselbe Schlussfolgerung gilt für Betonblöcke und Kalksandsteine.

Das Schwinden von Mörtel kann durch eine Änderung der Zusammensetzung und der Bestandteile des Mörtels reduziert werden (s. Bild 5).

Die vorgeschlagene Methode berücksichtigt den Einfluss thermischer Trägheit, indem die maximale Wandtemperatur $\theta_{\text{Wand,max}}$ mit dem folgenden Minderungsfaktor multipliziert wird (s. Bild 6):

$$\rho_{\text{Dicke}} = \max \left[0.9; \min \left(1 - \frac{\text{Steinbreite} - 65 \text{mm}}{45 \text{mm}} \cdot 0.1; 1.0 \right) \right] \quad (2)$$

4.2 Spannungen

Da Spannungen im Mauerwerk Zugbelastung verursachen, sollten Spannungen durch folgende Maßnahmen begrenzt werden:

- Die Verbindung zwischen vorgehängter und innerer Wandscheibe oder Fenstern soll vermieden werden (d.h. Differenzbewegungen zwischen innerer und äußerer Wandscheiben zulassen).
- Verwendung einer Feuchtigkeitssperre am Wandfuß der Verblendschale (dadurch geringerer Reibungskoeffizient von Mauerwerk: Bild 7 und Tabelle 3)
- Spannungen an mehr als einem Wandende vermeiden.
- Die Zeitspanne zwischen dem Mauern und dem Ausfügen sollte minimal sein.
- Ausreichende Breite der Dehnungsfugen einplanen
- Wände mit großen Seitenverhältnissen (Höhen/Längen-Verhältnissen) planen, oder mit geringen Längen/Höhen-Verhältnissen, um den Einfluss von Spannungen am

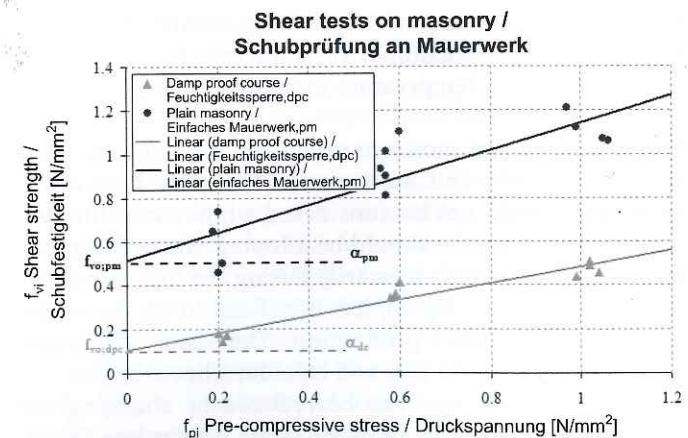


Fig. 7. Coefficient of friction of masonry with and without damp proof course determined in shear tests [8]
Bild 7. Reibungskoeffizient von Mauerwerk mit und ohne Feuchtigkeitssperre, durch Scherfestigkeitsprüfung ermittelt [8]

Table 3. Coefficient of friction of masonry with and without damp proof course determined in shear tests [8]
 Tabelle 3. Reibungskoeffizient von Mauerwerk mit und ohne Feuchtigkeitssperre, durch Scherfestigkeitsprüfung ermittelt [8]

Damp proof course material / Feuchtigkeitssperre	f_{vo} [N/mm ²]	$\tan \alpha$ [-]	trend line / Trendlinie f_v [N/mm ²]	f_{vko} [N/mm ²]	$\tan \alpha_k$ [-]	trend line / Trendlinie f_{vk} [N/mm ²]
No / Nein	0.51	0.63	$0.51 + 0.63 \dots f_{pi}$	0.41	0.50	$0.41 + 0.50 \dots f_{pi}$
Yes / Ja	0.10	0.38	$0.10 + 0.38 \dots f_{pi}$	0.08	0.31	$0.08 + 0.31 \dots f_{pi}$

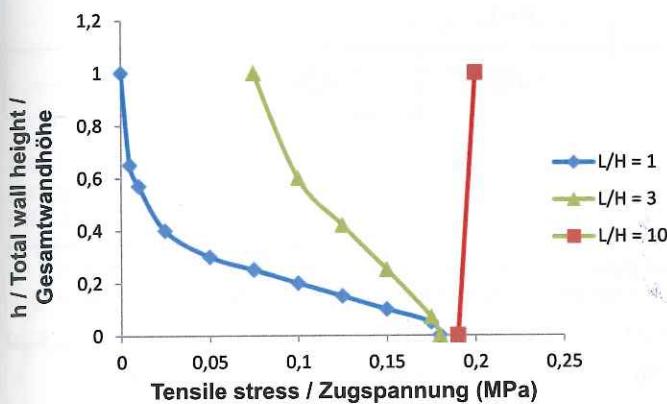


Fig. 8. Influence of length/height ratio on stress distribution in masonry walls subjected to imposed deformation and restrained at the bottom [11]

Bild 8. Einfluss des Längen/Höhen-Verhältnisses auf die Spannungsverteilung in Mauerwerk unter Formveränderung und Zwangsbeanspruchung am Wandfuß [11]

Wandkopf zu reduzieren. Nanayakkara [11] hat den Einfluss des Wand-Längen-Höhen-Verhältnisses numerisch bestimmt (Bild 8). Gemäß EC2 [5] kann der Faktor für Zwangsbeanspruchung am Wandkopf für Werte von $H/L > 0,20$ oder $L/H < 5$ vernachlässigt werden (Bild 9).

4.3 Festigkeit und Steifigkeit von Mauerwerk

Bei einer hohen Wandsteifigkeit treten große Zugkräfte auf, während eine hohe Zugfestigkeit der Steine gegenüber der Haftfestigkeit des Mörtels das Risiko der Rissbildung im Stein mindert. Die Verwendung von Kalkzement oder Kalkmörtel kann die Steifigkeit des Mauerwerks mindern, was zu geringeren Zugspannungen führt.

4.4 Materialeigenschaften

Abhängig vom Mauerziegeltyp können die Zugfestigkeit und die Elastizitätsmoduln (E-Moduln) in Bezug auf die Druckfestigkeit, wie in Tabelle 4 angegeben, bestimmt werden, während die Mörtelleigenschaften aus Tabelle 5 angewandt werden. Der Temperaturausdehnungskoeffizient kann dem EC6 entnommen werden.

Da der Mörtel vor der Aushärtung schwindet, wurde wie in Tabelle 5 angegeben, ein Abminderungsfaktor eingeführt.

Das Alter der Mauerziegel zum Zeitpunkt der Verlegung wird ebenfalls berücksichtigt. Zu diesem Zweck wurde ein Reduktionsfaktor für feuchte Ausdehnung eingeführt. Dieser liegt bei 0,90 für Ziegel neuer als 28 Tage und bei 0,70 für ältere.

Bei Verfugung später als sechs Monate nach der Ziegelverlegung wird die Feuchtigkeitsausdehnung der Ziegel um den Faktor 0,70 reduziert.

Eine vergleichbare Vorgehensweise wird für das Schwinden von Mörtel angewandt.

4.5 Festigkeiten von Mauerwerk

Die Zugfestigkeit von Mauerwerk wird aufgrund der mechanischen Eigenschaften der Steine und des Mörtels sowie der Abmessungen der Steine und Fugen berechnet. Dabei werden zwei Ausprägungen von Rissen berücksichtigt: verzahnte Risse (in den Fugen) und vertikale gerade Risse durch Fugen und Ziegel (Bild 10).

Die Zugfestigkeit von Mauerwerk $f_{t2,c}$ für verzahnte Risse berechnet sich wie folgt:

$$f_{l2,c} = \frac{(f_{vk0} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot u + (h_b \cdot f_{vk0} \cdot \phi_{\text{Stoßfuge}})}{h_b + h_j} \quad (3)$$

If pointing is carried out more than 6 months after bricklaying, the moisture movement of the bricks is reduced by a factor 0.70.

A comparable approach is adopted for mortar shrinkage.

Table 4. Material properties for clay bricks

Tabelle 4. Materialeigenschaften von Mauerziegeln

clay brick / Ziegel	moisture expansion / Feuchtigkeitsausdehnung [mm/m]	compressive strength / Druckfestigkeit [MPa]	E-mod / E-Modul [MPa]	cracking strain / Rissdehnung [mm/m]	tensile strength / Zugfestigkeit [MPa]
molded soft mud clay brick / industriell geformte Ziegel	0.30	30.00	6000	0.10	1.20
soft mud clay brick / Handformziegel	0.30	20.00	5000	0.10	0.95
wire cut clay brick / Strangpressziegel	0.30	60.00	15000	0.20	1.67

Table 5. Material properties for mortars

Tabelle 5. Materialeigenschaften von Mörtel

mortar / Mörtel	E-mod / E-Modul [MPa]	shrinkage / Schwinden [mm/m]	bond strength / Haftscherfestigkeit [MPa]	reduction shrinkage / Schwindreduktion [-]	reduction restraint / Spannungsreduktion [-]
general purpose mortar / Normalmauermörtel M 10	12000	0.80	0.30	0.50	0.90
cement-lime mortar / Kalkzementmörtel M 5	6000	0.70	0.20	0.50	0.90
lime mortar / Kalkmörtel M 5	3600	0.70	0.15	0.50	0.70
thin layer mortar / Dünnbettmörtel M 15	15000	2.00	0.50	0.60	1.00

4.5 Tensile strength of masonry

The tensile strength of the masonry may be calculated from the mechanical properties of units and mortar and the dimensions of units and joints. Two cracking patterns are considered: cogged cracks (in the joints) and vertical straight cracks crossing joints and bricks (Fig. 10).

The tensile strength of the masonry $f_{t2,c}$ for cogged cracks equals:

$$f_{t2,c} = \frac{(f_{vk0} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot u + (h_b \cdot f_{vk0} \cdot \phi_{headjoint})}{h_b + h_j} \quad (3)$$

where:

- f_{vk0} characteristic value of initial shear strength
- μ coefficient of friction
- σ_d compressive stress perpendicular to the bed joints at mid-height of the wall (self-weight)
- u overlap of bricks
- h_b brick height
- h_j joint thickness
- $\phi_{headjoint}$ reduction factor for partially bonded head joint
 - = 0 thin layer mortar (unfilled joints)
 - = 0.5 for masonry mortar (partly filling of head joints)

In the case of vertical cracks crossing units, the tensile strength of the masonry $f_{t2,v}$ is determined using the following formula:

wobei:

- f_{vk0} charakteristischer Wert der Haftscherfestigkeit ohne Auflast
- μ Reibungskoeffizient
- σ_d Druckbelastung orthogonal zu den Lagerfugen auf mittlerer Wandhöhe (Eigengewicht)
- u Überbindemaß
- h_b Ziegelhöhe
- h_j Fugenstärke
- $\phi_{Stoßfuge}$ Abminderungsfaktor für teilweise verfügte Stoßfugen
- = 0 Dünnbettmörtel (unverfügt)
- = 0,5 für Mauermörtel (teilweise verfügte Stoßfugen)

Im Falle von vertikalen Rissen durch die Steine wird die Zugfestigkeit von Mauerwerk $f_{t2,v}$ mit Hilfe der folgenden Formel bestimmt:

$$h_b f_{bt} = 2(h_b + h_j) f_{t2,v} \quad (4)$$

$$f_{t2,v} = \frac{f_{bt}}{2} \frac{h_b}{h_b + h_j} \quad (5)$$

wobei:

- f_{bt} Zugfestigkeit der Ziegel
- h_b Ziegelhöhe (Bild 11)
- h_j Fugenstärke (Bild 11)

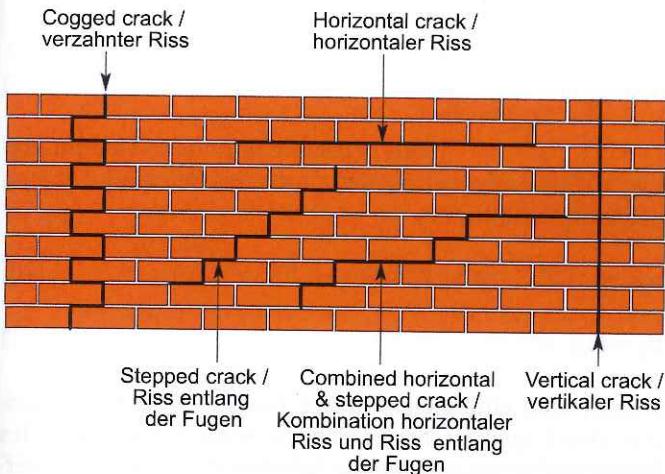


Fig. 10. Cogged cracks (on the left) and vertical cracks (on the right) in unreinforced masonry

Bild 10. Verzahnte Risse (links) und vertikale Risse (rechts) in unbewehrtem Mauerwerk

$$h_b f_{bt} = 2(h_b + h_j) f_{t2,v} \quad (4)$$

$$f_{t2,v} = \frac{f_{bt}}{2} \frac{h_b}{h_b + h_j} \quad (5)$$

where

f_{bt} tensile strength of bricks

h_b brick height (Fig. 11)

h_j joint thickness (Fig. 11)

The mean value of the tensile strength of the masonry is calculated by multiplying the minimum value of $f_{t2,c}$ and $f_{t2,v}$ by a factor 1.30.

4.6 Imposed deformations

The maximum value of the imposed expansion of the masonry wall ε^+ equals:

$$\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \cdot (\theta_{max,w} - \theta_{execution}) \cdot \rho_{thickness} \quad (6)$$

$$\varepsilon^+ = \varepsilon_{hygr} + \varepsilon_{th} \quad (7)$$

where

ε_{hygr} moisture expansion

ε_{th} thermal expansion

$\theta_{execution}$ air temperature at execution

The maximum value of the contraction of the masonry wall is a combination of shrinkage and thermal contraction.

The mortar shrinkage is partly restrained by the clay bricks which do not shrink. Based on the assumption that cross-sections remain plane after deformation, the contraction of the masonry can be calculated using the geometric properties of units and joints (Fig. 11).

The horizontal strain and the E-modulus of layer 1 is equal to:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_b \cdot l_b + \varepsilon_j \cdot l_j}{l_b + l_j} \quad (8)$$

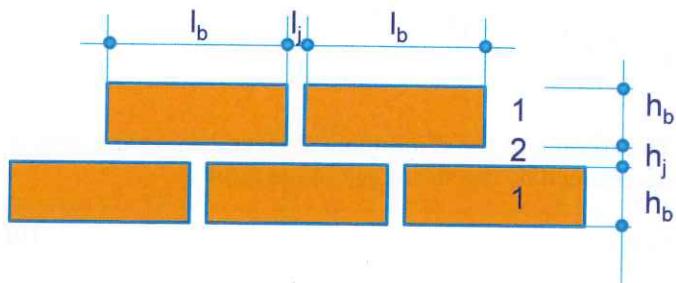


Fig. 11. Definition of geometric properties and layers
Bild 11. Definition geometrischer Eigenschaften und Lagen

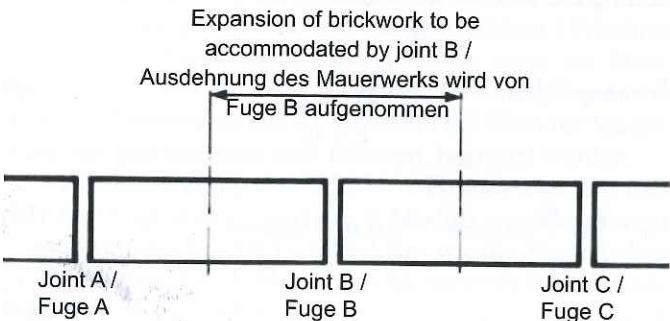


Fig. 12. Criterion of expansion
Bild 12. Ausdehnungskriterium

Die Mittelwert der Zugfestigkeit von Mauerwerk wird durch das Multiplizieren der Mindestwerte $f_{t2,c}$ und $f_{t2,v}$ mit dem Faktor 1,30 berechnet.

4.6 Formänderungen

Der Höchstwert der Formänderung im Mauerwerk ε^+ beträgt:

$$\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \cdot (\theta_{max,w} - \theta_{Ausführung}) \cdot \rho_{Stärke} \quad (6)$$

$$\varepsilon^+ = \varepsilon_{hygr} + \varepsilon_{th} \quad (7)$$

wobei:

ε_{hygr} Feuchtigkeitsausdehnung

ε_{th} Temperaturdehnung

$\theta_{Ausführung}$ Lufttemperatur bei Ausführung

Der Höchstwert der Verkürzung im Mauerwerk ist eine Kombination aus Schwinden und Wärmekontraktion.

Das Schwinden des Mörtels wird teilweise durch die Mauerziegel beschränkt, die selbst nicht schwinden. Basierend auf der Annahme, dass die Querschnitte nach der Verformung eben bleiben, kann das Schwinden von Mauerwerk auf Grundlage der geometrischen Eigenschaften von Steinen und Fugen berechnet werden (Bild 11).

Die Horizontalbelastung und die E-Moduln von Lage 1 entsprechen:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_b \cdot l_b + \varepsilon_j \cdot l_j}{l_b + l_j} \quad (8)$$

$$E_1 = \frac{E_b \cdot E_m \cdot (l_b \cdot l_j)}{E_m \cdot l_b + E_j \cdot l_j} \quad (9)$$

The strain and the E-modulus of layer 2 (mortar joints) is determined by the shrinkage of the mortar:

$$\epsilon_2 = \epsilon_j \quad (10)$$

$$E_2 = E_m \quad (11)$$

Assuming equal strain for both horizontal layers gives the shrinkage strain of the masonry $\epsilon_{\text{shrinkage}}$ and finally, by adding the thermal deformation, the contraction strain ϵ^- .

$$\epsilon_{\text{shrinkage}} = \epsilon_{s,m} = \epsilon_1 - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{1 + \frac{E_1 \cdot h_b}{E \cdot h_j}} \quad (12)$$

$$\epsilon_{th} = \alpha_{th} \cdot (\theta_{\text{execution}} - \theta_{\max,w}) \cdot \rho_{\text{thickness}} \quad (13)$$

$$\epsilon^- = \epsilon_{\text{shrinkage}} + \epsilon_{th} \quad (14)$$

4.7 Spacing of movement joints

Since expansion of the masonry wall has to be accommodated by the movement joints, the spacing of these joints is limited to the allowable variation of the width of the joint divided by the expansion strain of the masonry (Fig. 12):

$$L_1 = \frac{\Delta v}{\epsilon^+} \quad (15)$$

where

Δv allowable variation of joint width [mm]
 ϵ^+ maximum expansion strain [mm/m]

The criterion for restrained contraction is based on the analytical model of Peter Schubert (Fig. 13) published in the "Mauerwerk-Kalender" [12]:

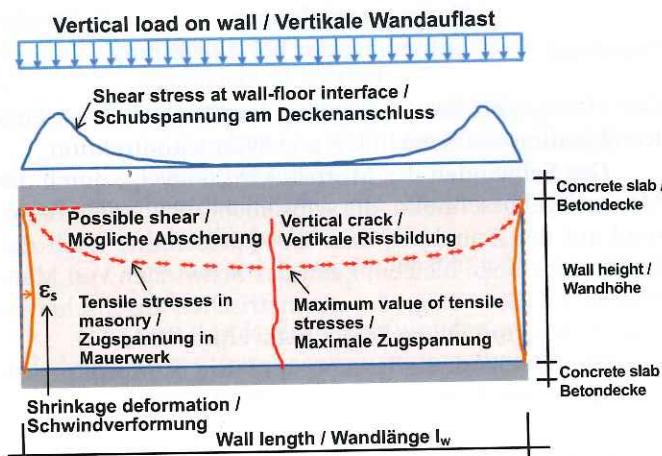


Fig. 13. Schubert's model [3]
Bild 13. Modell nach Schubert [3]

$$E_1 = \frac{E_b \cdot E_m \cdot (l_b \cdot l_j)}{E_m \cdot l_b + E_j \cdot l_j} \quad (9)$$

Die Belastung und die E-Moduln von Lage 2 (Mörtelfugen) werden durch das Schwindverhalten des Mörtels bestimmt:

$$\epsilon_2 = \epsilon_j \quad (10)$$

$$E_2 = E_m \quad (11)$$

Nimmt man eine gleichförmige Belastung für beide horizontalen Lagen an, ergibt sich die Schwindspannung des Mauerwerks $\epsilon_{\text{Schwind}}$. Durch Addition der Temperaturverformung ergibt sich dann die Schwindspannung ϵ^- .

$$\epsilon_{\text{Schwind}} = \epsilon_{s,m} = \epsilon_1 - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{1 + \frac{E_1 \cdot h_b}{E \cdot h_j}} \quad (12)$$

$$\epsilon_{th} = \alpha_{th} \cdot (\theta_{\text{Ausführung}} - \theta_{\max,w}) \cdot \rho_{\text{Stärke}} \quad (13)$$

$$\epsilon^- = \epsilon_{\text{Schwind}} + \epsilon_{th} \quad (14)$$

4.7 Abstandsbemessung von Dehnungsfugen

Da die Ausdehnung gemaueter Wände von den Dehnungsfugen aufgenommen werden muss, werden die Abstände dieser Fugen auf die zulässige Abweichung der Fuge, geteilt durch die Ausdehnungsverformung des Mauerwerks, begrenzt (Bild 12):

$$L_1 = \frac{\Delta v}{\epsilon^+} \quad (15)$$

wobei:

Δv zulässige Abweichung der Fugenbreite [mm]
 ϵ^+ maximale Ausdehnungsverformung [mm/m]

Das Kriterium für begrenztes Schwinden basiert auf dem analytischen Modell von Peter Schubert (Bild 13), das im „Mauerwerk-Kalender 1988“ [12] veröffentlicht wurde:

$$L_2 = l_R \leq -\ln \left(1 - \frac{\beta_{Z,mw}}{E_{Z,mw} \cdot \text{ges } \epsilon \cdot R} \right) \frac{h_w}{0,23} \quad (16)$$

wobei:

$\beta_{Z,mw}$ Zugfestigkeit von Mauerwerk in horizontaler Richtung
 $E_{Z,mw}$ Elastizitätsmodul von Mauerwerk in horizontaler Richtung
 $\text{ges } \epsilon$ Mauerwerksbelastung durch Schwinden und Temperaturabnahme
 R Lagerungsfaktor am Wandfuß (für vollständige Einspannung: $R = 1,0$)
 h_w Wandhöhe

$$L_2 = l_R \leq -\ln \left(1 - \frac{\beta_{Z,mw}}{E_{Z,mw} \cdot \text{ges } \epsilon \cdot R} \right) \frac{h_w}{0,23} \quad (16)$$

where

$\beta_{Z,mw}$	tensile strength of masonry in horizontal direction
$E_{Z,mw}$	modulus of elasticity of masonry in horizontal direction
ges ϵ	masonry strain due to shrinkage and temperature reduction
R	restraint factor at the bottom of the wall (for fully restraint: $R = 1.0$)
h_w	wall height

This formula is only valid for a length/height ratio not more than 5. For other ratios the maximum value of the spacing of movement joints should be limited to 30 m for clay brick masonry and 20 m for concrete brick and block masonry.

Applying Schubert's formula requires introduction of the tensile strength and the E-modulus of the masonry. The determination of the tensile strength is explained in section 4.5. The E-modulus of the masonry E_m may be calculated as follows (Fig. 14):

$$E_1 = \frac{E_j \cdot (\phi \cdot h_b + 2h_j) + E_b \cdot h_b}{2(h_b + h_j)} \quad (17)$$

$$E_2 = \frac{E_j \cdot h_j + E_b \cdot h_b}{h_b + h_j} \quad (18)$$

$$E_m = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot (l_b \cdot l_j)}{E_1 \cdot l_b + E_2 \cdot l_j} \quad (19)$$

where

E_b	E-modulus of bricks
E_j	E-modulus of mortar joints
h_b	height of bricks
h_j	height of joints
l_b	length of bricks
l_j	length of head joints
ϕ	reduction factor for imperfect bonding in the head joint

For unfilled head joints ϕ has to be taken as zero while for masonry with general purpose mortar and filled head joints, a factor of 0.50 is recommended.

4.8 Example

Consider a 3m high unreinforced masonry wall built on a DPC layer with the following characteristics:

- light-coloured clay bricks
- dimensions of bricks: $210 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ ($L \times W \times H$)
- general purpose mortar M10
- Northern orientation
- age of bricks less than 28 days
- pointing immediately after bricklaying.
- outside air temperature between -10°C and $+35^\circ\text{C}$
- width of movement joint 12 mm

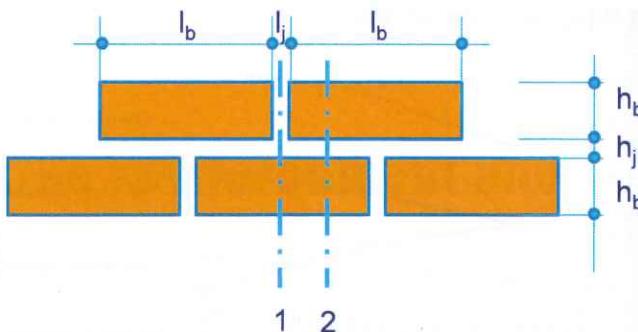


Fig. 14. Definition of geometrical properties
Bild 14. Definition geometrischer Eigenschaften

Diese Formel gilt nur für ein Längen/Höhen-Verhältnis unter 5. Bei abweichenden Verhältnissen sollte der Maximalwert für den Abstand zwischen Dehnungsfugen auf 30 m für Mauerwerk aus Ziegeln, und auf 20 m für Mauerwerk aus Betonsteinen und Blöcken, begrenzt werden.

Die Anwendung von Schuberts Formel setzt den Einsatz der Zugfestigkeit und des E-Moduls von Mauerwerk voraus. Im Abschnitt 4.5 wird erklärt, wie die Zugfestigkeit bestimmt wird. Der E-Modul von Mauerwerk E_m kann wie folgt berechnet werden (Bild 14):

$$E_1 = \frac{E_j \cdot (\phi \cdot h_b + 2h_j) + E_b \cdot h_b}{2(h_b + h_j)} \quad (17)$$

$$E_2 = \frac{E_j \cdot h_j + E_b \cdot h_b}{h_b + h_j} \quad (18)$$

$$E_m = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot (l_b \cdot l_j)}{E_1 \cdot l_b + E_2 \cdot l_j} \quad (19)$$

wobei:

E_b	E-Modul der Steine
E_j	E-Modul der Mörtelfugen
h_b	Ziegelhöhe
h_j	Fugenhöhe
l_b	Ziegellänge
l_j	Länge der Stoßfugen
ϕ	Abminderungsfaktor für unvollständige Hafung in der Stoßfuge

Bei nichtverfügten Stoßfugen muss ϕ mit Null angenommen werden, während für Mauerwerk mit Normalmauermörtel und verfüllten Stoßfugen der Faktor 0,50 empfohlen wird.

4.8 Beispiel

Angenommen, es handelt sich um eine 3 m hohe unbewehrte Mauerwerkswand, auf einer Feuchtigkeitssperre errichtet, mit den folgenden Eigenschaften:

- helle Mauerziegel
- Abmessung der Ziegel: $210 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ($L \times B \times H$)
- Normalmauermörtel M10
- Ausrichtung nach Norden

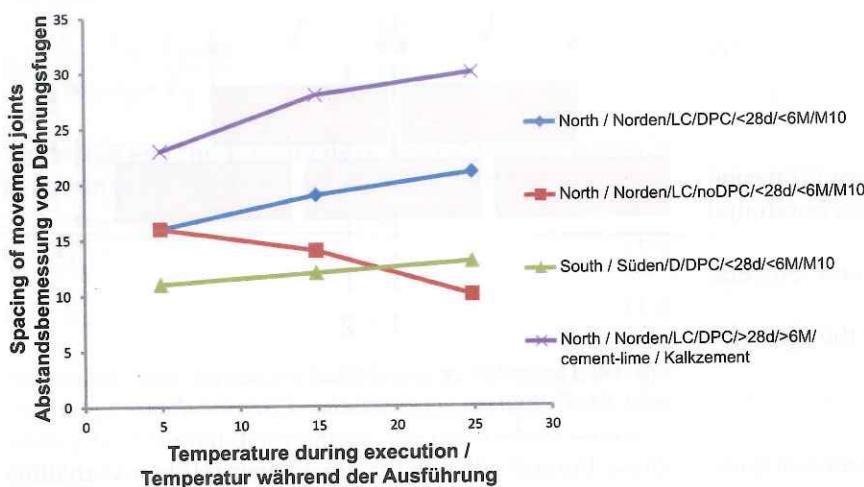


Fig. 15. Overview of spacing of movement joints for various situations; LC = light-coloured unit; DPC = with DPC, no DPC = without DPC, <28d = age of units < 28 days; <6M = pointing within 6 months after bricklaying; M10 = general purpose mortar with strength class M10

Bild 15. Übersicht über Dehnungsfugenabstände in unterschiedlichen Situationen, heller Stein, DPC = mit Feuchtigkeits sperre, no DPC = ohne Feuchtigkeits sperre, <28 T = Alter der Ziegel < 28 Tage; <6M = Verfugung innerhalb von 6 Monaten nach dem Mauern; M10 = Normalmauermörtel der Festigkeitsklasse M10

Using the new design method the spacing of the movement joints may be 21 m if the wall is built during summer time ($\theta_{\text{execution}} = 25^\circ\text{C}$).

Spacings of movement joints for other situations are shown in Fig. 15.

Acknowledgements

This research has been commissioned by Bekaert, MBI, Wienerberger, Jordahl and Weber-Beamix. The author thanks these companies for their financial support and their advice during the research process.

From: Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges; Modena, da Porto & Valluzzi (Eds); Copyright © 2016; Taylor & Francis Group. Reproduced (in parts) with permission of Taylor & Francis Books UK.

- Alter der Ziegel weniger als 28 Tage
- Ausfugung sofort nach dem Mauern
- Außentemperatur zwischen -10°C und $+35^\circ\text{C}$
- Breite der Dehnungsfugen 12 mm

Bei Anwendung des neuen Bemessungsverfahrens kann der Abstand zwischen den Dehnungsfugen 21 m betragen, wenn die Wand im Sommer errichtet wird ($\theta_{\text{Ausführung}} = 25^\circ\text{C}$).

Der Abstand der Dehnungsfugen für andere Situationen ist im Bild 15 dargestellt.

Danksagung

Diese Untersuchung wurde von Bekaert, MBI, Wienerberger, Jordahl und Weber-Beamix in Auftrag gegeben. Der Autor dankt diesen Firmen für ihre finanzielle Unterstützung und ihren Rat während des Forschungsverlaufs.

References – Literatur

- [1] BDRI: Design note 1D. 1979.
- [2] BIA: Technical Notes on Brick Construction 18A, Movement Design and detailing of movement joints Part II. 1991.
- [3] Brameshuber, W., Schubert, P., Schmidt, U., Hannawald, J.: Rissfreie Wandlänge von Porenbetonmauerwerk. Mauerwerk 10 (2006) H. 4, S. 132–139. DOI: 10.1002/dama.200600279
- [4] Brooks, J. J.: Concrete and Masonry Movements Oxford, El-sevier 2015.
- [5] EN 1992-3 Eurocode 2, 2006 – Design of Concrete Structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures. Brussels: CEN.
- [6] EN 1996-2 Eurocode 6, 2006 – Design of Masonry Structures – Part 2: Design considerations, selection of materials and execution of masonry. Brussels: CEN.
- [7] Martens, D. R. W., Vermeltfoort, A. T.: The Mystery of Movement Joints in Veneer Walls. 9th CMS Fredericton 2001.
- [8] Martens, D. R. W., Bertram, G.: Shear Strength of Clay Brick Masonry including Damp Proof Course. 14th IB2MaC, Sydney 2008.
- [9] Martens, D. R. W.: New Method for determining spacing of movement joints in solid unreinforced veneer walls. 16th IB2MaC, Padua 2016.
- [10] Molnar, M.: In-plane Tension Behaviour of Masonry, Lund Institute of Technology. PhD Report TVKB-1028, Lund 2004.
- [11] Nannayakkara, D.: Specifications of Movement Joints for Masonry Structures in Sri Lanka. University of Moratuwa, PhD/C/01/94, 2011.
- [12] Schubert, P.: Zur rissfreien Länge von nichttragenden Mauerwerkswänden. In: Mauerwerk-Kalender 13 (1988), S. 473–488. Berlin: Ernst & Sohn.
- [13] Taylor Launder Bersten: Technical notes, The Expansion of Clay Brickwork. 2009.
- [14] Nilsson, M.: Restraint Factors and Partial Coefficients for Crack Risk Analyses of Early Age Concrete Structures. Lulea University of Technology, Technical Report 2003-11.
- [15] Zijl van, G.: Computational Modelling of Masonry Creep and Shrinkage. Technische Universiteit Delft. PhD, Meinema: Delft 1999.

Author – Autor:

Prof. Ir.arch. Dirk R.W. Martens
Chair of Masonry Structures
Unit Structural Design
Department of the Built Environment
Den Dolech 2
5600 MB Eindhoven
d.r.w.martens@tue.nl