

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner**

Professor für Massivbau an der TU Darmstadt  
und Prüfenieur für Baustatik

Stresemannallee 30  
60596 Frankfurt am Main  
Telefon: 069/630008-0  
Fax: 069/630008-66

**Gutachten**  
**zur Tragfähigkeit und den Anwendungsgrenzen**  
**des UNIKA Pflanzstein-iD 10-1,4 248x240x240**  
**für die Erlangung**  
**einer allgemeinen Bauartgenehmigung**

Auftraggeber: Ruhrbaustoffwerke GmbH & Co. KG  
Moselstraße 1  
44579 Castrop-Rauxel

Aktenzeichen: 200157

Diese Stellungnahme umfasst 23 Seiten.

Frankfurt / Main, den 11. November 2020

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
1.1	Produktbeschreibung .....	3
1.2	Geometrie und Querschnittswerte .....	4
1.3	Materialeigenschaften .....	4
1.3.1	Steindruckfestigkeit .....	4
1.3.2	Steinzugfestigkeit .....	5
1.3.3	Haftscherfestigkeit.....	5
1.3.4	Wichte.....	6
1.4	Begrünungslasten .....	6
<b>2</b>	<b>Unterlagen .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Freistehende Pflanzsteinwand ohne Querriegel.....</b>	<b>9</b>
3.1	Anwendungsvoraussetzungen .....	9
3.2	Bemessung .....	9
3.2.1	Ermittlung der horizontalen Biegezugfestigkeit .....	9
3.2.2	Schnittgrößenermittlung infolge Windbeanspruchung.....	10
3.3	Sonderfall: Freistehende Pflanzsteinwand ohne seitliche Halterung .....	12
<b>4</b>	<b>Freistehende Pflanzsteinwand mit Querriegel.....</b>	<b>14</b>
4.1	Anwendungsvoraussetzungen .....	14
4.2	Bemessung .....	15
4.2.1	Ermittlung der zulässigen Ausfachungsflächen .....	15
4.2.2	Örtliches Versagen des Mauersteins .....	17
<b>5</b>	<b>Pflanzstein-Vorsatzschale für zweischaliges Mauerwerk.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>23</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Produktbeschreibung

Der in Abbildung 1 dargestellte Pflanzstein der Firma Ruhrbaustoffwerke GmbH & Co. KG soll als vertikale Begrünung in Form von freistehenden Wänden (z.B. als Schallschutz- oder Trennwand) sowie als Vorsatzschale für zweischaliges Mauerwerk eingesetzt werden. Er besteht aus Kalksandstein mit erhöhter Flüssigkeitsabsorption und unterscheidet sich durch seine besondere Querschnittsform von herkömmlichen Mauersteinen. Auf der Oberseite des Pflanzsteins ist eine Vertiefung zur Verlegung von Bewässerungsleitungen vorgesehen, welche während der Nutzungsphase für Wartungsarbeiten zugänglich bleiben muss. Weiterhin befindet sich in der Mitte des Querschnitts eine in Längsrichtung verlaufende Pflanzrinne, welche mit Pflanzsubstrat sowie extensiver Begrünung befüllt wird. Der Pflanzstein besitzt eine CE-Kennzeichnung nach DIN 771-2 [1].

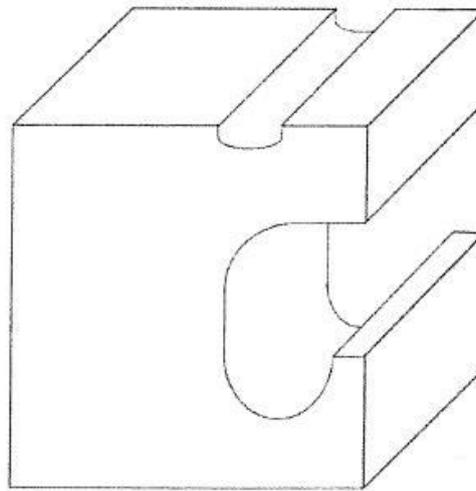


Abbildung 1: UNIKA Pflanzstein-iD 10-1,4 248x240x240

Mauerwerkswände, welche aus dem UNIKA Pflanzstein errichtet werden, entsprechen aufgrund der Querschnittsform nicht den Vorgaben von DIN EN 1996, weshalb für die Verwendung des UNIKA-Pflanzsteins eine allgemeine Bauartgenehmigung erforderlich ist. In diesem Kontext sollen mit dieser Stellungnahme die Tragfähigkeit sowie die Anwendungsgrenzen des Pflanzsteins untersucht werden. Hierzu werden statische Berechnungen für dessen einzelne Anwendungsfälle durchgeführt und individuelle Bemessungshilfen für praxisrelevante Randbedingungen entwickelt. Dabei wird zwischen den beiden Einsatzvarianten des Pflanzsteins (freistehende Wand oder Vorsatzschale) differenziert.

## 1.2 Geometrie und Querschnittswerte

Die Außenabmessungen des Pflanzsteins betragen 248 x 240 x 240 mm<sup>3</sup> (L x B x H). Weitere Abmessungen sind in Abbildung 2 dargestellt.

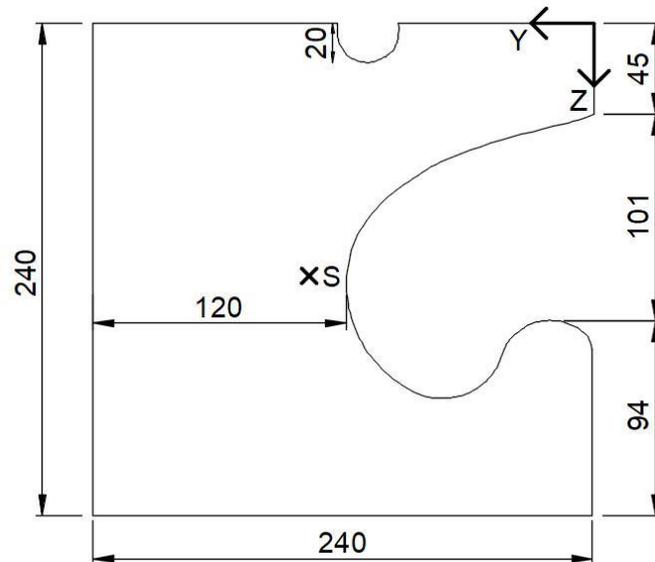


Abbildung 2: Abmessungen des Pflanzsteins in mm

Bemessungsrelevante Querschnittswerte wie die Querschnittsfläche, die Lage des Schwerpunkts sowie die Flächenträgheitsmomente wurden auf Grund der komplexen Geometrie softwaregestützt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Querschnittswerte des Pflanzsteins

Querschnittswert	Formelzeichen	Wert
Netto-Querschnittsfläche	$A_{\text{Netto}}$	454 cm <sup>2</sup>
Schwerpunkt	$S_y$	13,7 cm
	$S_z$	12,2 cm
Flächenträgheitsmoment	$I_y$	25.791 cm <sup>4</sup> 107.463 cm <sup>4</sup> /m
	$I_z$	20.395 cm <sup>4</sup> 84.979 cm <sup>4</sup> /m

## 1.3 Materialeigenschaften

### 1.3.1 Steindruckfestigkeit

Die Steindruckfestigkeit des Pflanzsteins wurde sowohl in Richtung der Steinhöhe als auch in Richtung der Steinlänge von der Kalksandstein-Dienstleistung GmbH experimentell bestimmt (Prüfbericht 22/2019 vom 30.12.2019). Der Versuchsumfang betrug jeweils 6 Probekörper pro Belastungsrichtung. Die in Tabelle 2 dargestellten Steindruckfestigkeiten beziehen sich auf die Bruttoquerschnittsfläche des Pflanzsteins und sind daher deutlich niedriger als die tatsächliche Materialfestigkeit.

Tabelle 2: Prüfergebnisse der Brutto-Steindruckfestigkeit

Prüfkörper	Steindruckfestigkeit in Richtung der Steinlänge [N/mm <sup>2</sup> ]	Steindruckfestigkeit in Richtung der Steinhöhe [N/mm <sup>2</sup> ]
1	18,0	11,6
2	19,8	11,5
3	18,9	12,5
4	19,2	11,8
5	18,0	11,7
6	19,4	12,4
Mittelwert	18,9	11,9
<b>f<sub>st,brutto</sub> (f = 1,2)</b>	<b>22,7</b>	<b>14,3</b>

Nach DIN 20000-402 Kapitel 4.6 [17] darf die mittlere Steindruckfestigkeit von Prüfkörpern mit einer Höhe  $\geq 238$  mm mit einem Formfaktor  $f = 1,2$  erhöht werden.

Die Netto-Steindruckfestigkeit (Material- bzw. Scherbruchdruckfestigkeit) des Pflanzsteins ergibt sich allgemein nach Gleichung (1):

$$f_{st,netto} = f_{st,brutto} \cdot \frac{A_{Brutto}}{A_{Netto}} \quad (1)$$

Berechnung der Netto-Steindruckfestigkeit bei Belastung in Richtung der Steinhöhe:

$$f_{st,netto} = 14,3 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{24cm \cdot 24,8cm}{12cm \cdot 24,8cm} = 28,6 \frac{N}{mm^2} \quad (2)$$

Berechnung der Netto-Steindruckfestigkeit bei Belastung in Richtung der Steinlänge:

$$f_{st,netto} = 22,7 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{24cm \cdot 24cm}{454cm^2} = 28,8 \frac{N}{mm^2} \quad (3)$$

Für die weiteren Berechnungen wird der kleinere Wert der Netto-Steindruckfestigkeit in Höhe von  $f_{st,netto} = 28,6$  N/mm<sup>2</sup> verwendet.

### 1.3.2 Steinzugfestigkeit

Die rechnerische Steinzugfestigkeit  $f_{bt,cal}$  wird unter Annahme eines Vollsteins anhand der Netto-Steindruckfestigkeit auf Grundlage von DIN EN 1996-1-1/NA Kapitel 3.6.2 (3) [11] folgendermaßen abgeschätzt:

$$f_{bt,cal} = 0,032 \cdot f_{st,netto} = 0,032 \cdot 28,6 \frac{N}{mm^2} = 0,92 \frac{N}{mm^2} \quad (4)$$

### 1.3.3 Haftscherfestigkeit

Die Haftscherfestigkeit zwischen Stein und Mörtel wurde bei Ausführung mit Dünnbettmörtel von der quick-mix Gruppe GmbH & Co KG gesondert experimentell bestimmt (Prüfbericht vom 27.05.2020). Die Prüfung wurde nach DIN 18555-5 [16] durchgeführt und umfasste insgesamt 10 Probekörper. Zur Berechnung der charakteristischen Haftscherfestigkeit  $f_{vk0}$  wurde das statistische Verfahren nach DIN 1052-3 Kapitel 10.2.3 [3] angewendet. Hierbei wird der 5%-Fraktilewert der Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung des Versuchsumfangs und der vorhan-

denen Streuung berechnet. Als Verteilungstyp der Prüfergebnisse ist eine Log-Normalverteilung zu unterstellen. Die Versuchsergebnisse sowie die Berechnung der charakteristischen Haftscherfestigkeit sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Prüfergebnisse der Haftscherfestigkeit und Berechnung des charakteristischen Wertes

Prüfkörper	$f_{v0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Log( $f_{v0}$ )
1	0,96	-0,018
2	0,98	-0,009
3	0,99	-0,004
4	0,91	-0,041
5	0,95	-0,022
6	0,80	-0,097
7	1,01	0,004
8	0,95	-0,022
9	0,90	-0,046
10	1,00	0,000
Mittelwert	0,95	-0,03
Standardabweichung	0,06	0,03
Variationskoeffizient	0,07	
$k_n$		1,92
<b><math>f_{vk0}</math> (5%-Fraktilwert)</b>	<b>0,83 N/mm<sup>2</sup></b>	

#### 1.3.4 Wichte

Die Bruttotrockenrohdichte sowie die Scherbenrohdichte des UNIKA-Pflanzsteins wurden von der Kalksandstein-Dienstleistung GmbH experimentell bestimmt (Prüfbericht 22/2019 vom 30.12.2019). Die Prüfergebnisse der Bruttotrockenrohdichte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Prüfergebnisse der Brutto-Steindruckfestigkeit

Prüfkörper	Bruttotrockenrohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
1	1,39
2	1,40
3	1,39
4	1,40
5	1,39
6	1,40
<b>Mittelwert</b>	<b>1,40</b>

Die Scherbenrohdichte wurde im Prüfbericht mit 1,78 kg/dm<sup>3</sup> angegeben. Aus den Prüfergebnissen resultiert eine mittlere Nettowichte von ca. 17,8 kN/m<sup>3</sup> sowie eine mittlere Bruttowichte von ca. 14,0 kN/m<sup>3</sup>.

#### 1.4 Begrünungslasten

Die in der Pflanzrinne vorgesehene Vegetation sowie das dafür notwendige Pflanzsubstrat ruft eine exzentrisch angreifende Normalkraft hervor, welche auf eine Pflanzsteinwand während dessen Nutzungsdauer einwirken kann und statisch berücksichtigt werden sollte. Die aus der extensiven Begrünung innerhalb der Pflanzrinne resultierende Zusatzbelastung wird anhand gängiger Lastannahmen aus der Dachbegrünungsrichtlinie [18] wie folgt abgeschätzt:

- Extensive Vegetation  $\approx 0,10$  kN pro Quadratmeter bepflanzte Fläche
- Substrat bei vollständiger Wassersättigung  $\approx 20$  kN/m<sup>3</sup>

Die Querschnittsfläche der Pflanzrinne wird durch einen Halbkreis mit einem Radius von 4 cm angenähert:

$$A_{\text{Pflanzrinne}} \approx \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (4\text{cm})^2 \approx 25\text{cm}^2 \quad (5)$$

Die einwirkende Normalkraft infolge Begrünung ergibt sich somit pro Quadratmeter Wandfläche zu:

$$N_{\text{Ek, Begrünung}} = \left( 0,10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0,08\text{m} + 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,0025\text{m}^2 \right) \cdot \frac{1}{0,24\text{m}} \approx 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (6)$$

Der horizontale Abstand zwischen Schwerpunkt des Pflanzsteins und dem tiefsten Punkt der Pflanzrinne beträgt ca. 6 cm. Da das wassergesättigte Substrat den Hauptteil der Begrünungslast darstellt, kann dieser Abstand als Ausgangswert der einwirkenden Lastexzentrizität angesehen werden. Um einen eventuell vorhandenen Überhang der Bepflanzung zu berücksichtigen, wird diese Ausmitte zusätzlich pauschal um ein Drittel vergrößert, was zu einer Exzentrizität der gesamten Begrünungslast von  $e_{\text{Begrünung}} \approx 8$  cm führt.

Da die Pflanzsteine sowohl mit als auch ohne Begrünung ausgeführt werden können, wird die resultierende Zusatzeinwirkung aus Bepflanzung im Folgenden als veränderliche Einwirkung berücksichtigt. Generell lässt sich jedoch bereits vorab konstatieren, dass die Begrünungslast im Vergleich zum Wandeigengewicht ( $N_{\text{Ek}} = 3,36$  kN pro Quadratmeter Wandfläche) sowie zur Windbeanspruchung nahezu unerheblich ist und somit keine signifikanten statischen Auswirkungen hat.

## 2 Unterlagen

- [1] DIN EN 771-2: Festlegungen für Mauersteine – Teil 2: Kalksandsteine (2015).
- [2] DIN EN 772-18: Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 18: Bestimmung des Frostwiderstandes von Kalksandsteinen (2011).
- [3] DIN EN 1052-3: Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit) (2007).
- [4] DIN 1053-1: Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung (1996).
- [5] DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken (1986).
- [6] DIN EN 1991-1-4: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkung - Windlasten (2010).
- [7] DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkung - Windlasten (2010).
- [8] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (2011).
- [9] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (2013).
- [10] DIN EN 1996-1-1: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk (2013).
- [11] DIN EN 1996-1-1/NA: Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk (2012).
- [12] DIN EN 1996-2: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk (2010).
- [13] DIN EN 1996-2/NA: Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk (2012).
- [14] DIN EN 1996-3: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten (2010).
- [15] DIN EN 1996-3/NA: Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten (2012).
- [16] DIN 18555-5: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln (1986).
- [17] DIN 20000-402: Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 402: Regeln für die Verwendung von Kalksandsteinen nach DIN EN 771-2:2015-11 (2017).
- [18] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.: Dachbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen (2001).
- [19] Kirtschig, K.: Zur Biegetragfähigkeit von Ausfachungswänden. In: Funk, P. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 1998, S. 773-790.

### 3 Freistehende Pflanzsteinwand ohne Querriegel

#### 3.1 Anwendungsvoraussetzungen

Um die Tragfähigkeit einer freistehenden Mauerwerkswand aus UNIKA-Pflanzsteinen zu gewährleisten, muss diese auf einem Fundament aus Stahlbeton errichtet sowie durch in definiertem Abstand angeordnete, seitliche Stahlbetonstützen gehalten werden. Um die Zugänglichkeit der Bewässerungsöffnungen an den Oberseiten der Pflanzsteine während der Nutzungsphase sicherzustellen, dürfen die seitlichen Stahlbetonstützen nur den hinteren Vollquerschnitt des Pflanzsteins verdecken. Der Anschluss zwischen der Mauerwerkswand und den Stahlbetonstützen ist durch geeignete Lagerfugenanker sicherzustellen. Die maximal zulässige Gesamthöhe einer freistehenden Pflanzsteinwand ohne kopfseitigen Querriegel soll nach Vorgabe des Auftraggebers  $H \leq 2,50$  m betragen. Es ist möglich die Wand sowohl ein- als auch zweischalig auszuführen (siehe Abbildung 3). Die angrenzenden Stahlbetonbauteile (vertikale Stützen und Fundament) sind nach DIN EN 1992-1-1/NA [9] zu bemessen. Die Einwirkungen aus Wind sind nach DIN EN 1991-1-4/NA [7] zu ermitteln und über die entsprechenden Einzugsflächen auf die Stahlbetonbauteile aufzubringen.

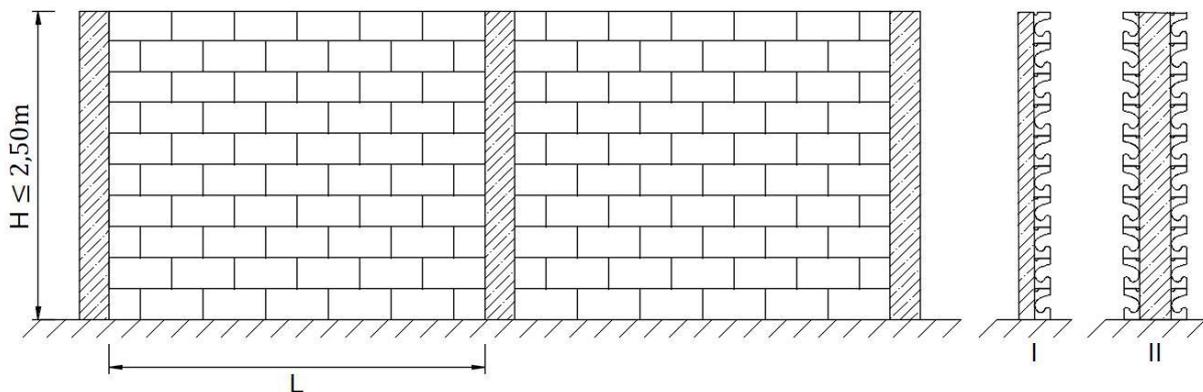


Abbildung 3: Schematische Front- und Seitenansicht einer freistehenden Pflanzsteinwand ohne Querriegel mit einschaliger (I) und zweischaliger (II) Ausführung

Der zulässige lichte Abstand der Stahlbetonstützen wird nachfolgend unter Annahme eines horizontalen Lastabtrags für die unterschiedlichen Windzonen im Binnenland berechnet. Die ermittelten Stützenabstände gelten nur bei Verwendung von Dünnbettmörtel, vermörtelten Stoßfugen sowie halbsteinigem Überbindemaß. Eine Stoßbelastung infolge Fahrzeuganprall ist durch geeignete Schutzmaßnahmen oder ausreichenden Abstand zu benachbarten Verkehrswegen auszuschließen.

#### 3.2 Bemessung

##### 3.2.1 Ermittlung der horizontalen Biegezugfestigkeit

Die charakteristische Biegezugfestigkeit mit Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen  $f_{xk2}$  lässt sich nach DIN EN 1996-1-1/NA (NA.8) bzw. (NA.9) [11] ermitteln. Im vorliegenden Fall wird eine eventuell vorhandene Auflast senkrecht zur Lagerfuge auf der sicheren Seite gänzlich vernachlässigt.

$$f_{xk2} = \min \left( \begin{array}{l} \left( \alpha \cdot f_{vk0} + 0,6 \cdot \sigma_d \right) \cdot \frac{l_{ol}}{h_u} = 0,43 \frac{N}{mm^2} \\ 0,5 \cdot f_{bt,cal} = 0,46 \frac{N}{mm^2} \\ 0,7 \frac{N}{mm^2} \end{array} \right) \quad (7)$$

Mit:

$\alpha = 1,0$  für vermörtelte Stoßfugen

$\sigma_d = 0,0 \text{ N/mm}^2$

$l_o/h_u = 12,4 \text{ cm} / 24 \text{ cm} = 0,52$

Unter den gegebenen Randbedingungen stellt Reibungsversagen gegenüber Steinzugversagen knapp den maßgebenden Versagensfall dar. Der Bemessungswert der horizontalen Biegezugfestigkeit  $f_{xd2}$  ergibt sich somit wie folgt:

$$f_{xd2} = \frac{f_{xk2}}{\gamma_M} = \frac{0,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5} = 0,29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (8)$$

### 3.2.2 Schnittgrößenermittlung infolge Windbeanspruchung

Die Berechnung der horizontalen Bemessungswindlast erfolgt nach Gleichung (9) und beruht auf den vereinfachten Geschwindigkeitsdrücken  $q_p$  für Bauwerke bis 25 m Höhe nach DIN EN 1991-1-4/NA Tabelle NA.B.3 [7] sowie den Druckbeiwerten für freistehende Wände und Brüstungen  $c_{p,net}$  nach DIN EN 1991-1-4 Tabelle 7.9 [6]. Der Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten beträgt  $\gamma_Q = 1,5$ .

$$w_{Ed} = \gamma_Q \cdot c_{p,net} \cdot q_p \quad (9)$$

Bei der Schnittgrößenermittlung wird aus Vereinfachungsgründen ausschließlich das ungünstige Randfeld der freistehenden Pflanzsteinwand mit den maßgebenden Anströmbereichen A und B betrachtet (siehe Abbildung 4).

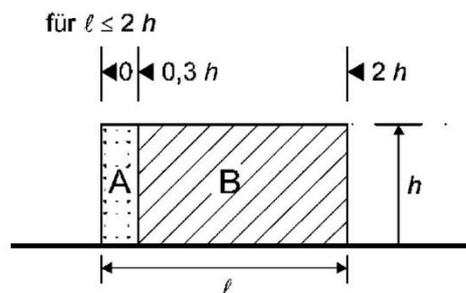


Abbildung 4: Randnahe Anströmbereiche bei freistehenden Wänden nach DIN EN 1991-1-4 [6]

Bei einem Verhältnis zwischen Länge und Höhe des Randfelds  $L/H \leq 3$  ergibt sich der Druckbeiwert im Anströmbereich A zu  $c_{p,net} = 2,3$  und im Anströmbereich B zu  $c_{p,net} = 1,4$ . Diese Werte berücksichtigen sowohl Windsog als auch Winddruck und gelten somit nur für die einschalige Ausführung der freistehenden Pflanzsteinwand ohne Querriegel. Bei zweischaliger Ausführung können Windsog und Winddruck nie gleichzeitig auf eine Schale wirken, weshalb in diesem Fall der Außendruckbeiwert für den Anströmbereich D vertikaler Wände von rechteckigen Gebäuden nach DIN EN 1991-1-4/NA Tabelle NA.1 [7] mit  $c_{pe,10} = 0,8$  konstant über die gesamte Wandlänge angesetzt wird. Die einwirkenden Bemessungswindlasten sind für die beiden Ausführungsvarianten und die jeweiligen Windzonen 1 – 4 des Binnenlands in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Einwirkende Bemessungswindlasten  $w_{Ed}$  bei freistehenden Pflanzsteinwänden ohne Querriegel mit einschaliger und zweischaliger Ausführung

Ausführung	Anströmbereich	Windzone 1 $q_p = 0,50 \text{ kN/m}^2$	Windzone 2 $q_p = 0,65 \text{ kN/m}^2$	Windzone 3 $q_p = 0,80 \text{ kN/m}^2$	Windzone 4 $q_p = 0,95 \text{ kN/m}^2$
Einschalig	A	1,73 kN/m <sup>2</sup>	2,24 kN/m <sup>2</sup>	2,76 kN/m <sup>2</sup>	3,28 kN/m <sup>2</sup>
	B	1,05 kN/m <sup>2</sup>	1,37 kN/m <sup>2</sup>	1,68 kN/m <sup>2</sup>	2,00 kN/m <sup>2</sup>
Zweischalig	D	0,60 kN/m <sup>2</sup>	0,78 kN/m <sup>2</sup>	0,96 kN/m <sup>2</sup>	1,14 kN/m <sup>2</sup>

Bei der Schnittgrößenermittlung wird auf der sicheren Seite ein ausschließlich einachsiger Lastabtrag in horizontaler Richtung sowie gelenkige Anschlüsse zwischen der Mauerwerkswand und den angrenzenden Stahlbetonstützen angenommen. Das statische System für die Berechnung einer einschaligen freistehenden Pflanzsteinwand ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

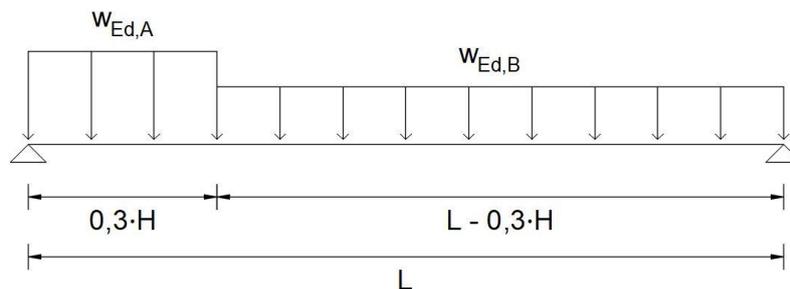


Abbildung 5: Statisches System für eine einschalige freistehende Pflanzsteinwand ohne Querriegel unter Windbelastung

Die auftretenden horizontalen Biegezugspannungen  $\sigma_{Ed}$  am Querschnittsrand werden unter Annahme linear-elastischen Werkstoffverhaltens mit Hilfe von Gleichung (10) berechnet. Maßgebend ist hierbei der Querschnittsrand auf Seite der Pflanzrinne, da dieser in Y-Richtung den maximalen Abstand zum Schwerpunkt aufweist.

$$\sigma_{Ed} = \frac{m_{Ed}}{I_z} \cdot y \quad (10)$$

Die einwirkenden Bemessungsmomente und die daraus resultierenden Biegezugspannungen können für die angegebenen maximal zulässigen lichten Stützenabstände L und die jeweiligen Windzonen aus Tabelle 6 entnommen werden. Bei den Berechnungen wird immer die maximal zulässige Gesamthöhe der Pflanzsteinwand ohne Querriegel ( $H = 2,50 \text{ m}$ ) zu Grunde gelegt.

Tabelle 6: Maximal zulässige Stützenabstände für freistehende Pflanzsteinwände ohne Querriegel mit einschaliger (I) und zweischaliger (II) Ausführung

Ausführung	Windzone 1		Windzone 2		Windzone 3		Windzone 4	
	I	II	I	II	I	II	I	II
<b>L [m]</b>	<b>3,55</b>	<b>4,85</b>	<b>3,10</b>	<b>4,25</b>	<b>2,75</b>	<b>3,80</b>	<b>2,50</b>	<b>3,50</b>
$m_{Ed}$ [kNm/m]	1,75	1,76	1,77	1,76	1,74	1,73	1,74	1,75
$\sigma_{Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28

Da der Bemessungswert der horizontalen Biegezugfestigkeit  $f_{xd2} = 0,29 \text{ N/mm}^2$  unter den angegebenen Randbedingungen in keinem Fall überschritten wird, ist der Tragfähigkeitsnachweis freistehender Pflanzsteinwände mit einer Wandhöhe  $H \leq 2,50 \text{ m}$  unter den genannten Anwendungskriterien und bei Einhaltung der zulässigen lichten Stützenabständen nach Tabelle 6 erfüllt.

### 3.3 Sonderfall: Freistehende Pflanzsteinwand ohne seitliche Halterung

Bei Pflanzsteinwänden mit sehr geringer Wandhöhe kann die einwirkende horizontale Windbeanspruchung, abweichend zu den Anwendungsvoraussetzung aus Kapitel 3.1, auch ohne eine seitliche Einfassung durch Stahlbetonstützen abgetragen werden. Der Lastabtrag erfolgt in diesem Fall ausschließlich in vertikaler Richtung. Eine freistehende Pflanzsteinwand ohne Halterung kann auf einem Stahlbetonfundament in unbegrenzter Länge sowohl ein- als auch zweischalig ausgeführt werden. Es muss Dünnbettmörtel verwendet werden. Eine Stoßbelastung infolge Fahrzeuganprall ist durch geeignete Schutzmaßnahmen oder ausreichenden Abstand zu benachbarten Verkehrswegen auszuschließen.

Da in der vorliegenden Belastungssituation Biegezugversagen senkrecht zur Lagerfuge maßgebend wird, berechnet sich das aufnehmbare Moment unter Annahme eines ungerissenen Querschnitts mit linear-elastischem Materialverhalten folgendermaßen:

$$m_{Rd} = W \cdot \left( \frac{f_{xk1}}{\gamma_M} + \frac{n_{Ed, \min}}{t} \right) \quad (11)$$

Wie in Abbildung 6 dargestellt, wird das aufnehmbare Moment der freistehenden Pflanzsteinwand ohne seitliche Halterung an zwei kritischen Schnitten bestimmt: Zum einen an der dünnsten Stelle des hinteren Vollquerschnitts (Schnitt 1) und zum anderen in der Lagerfuge (Schnitt 2).

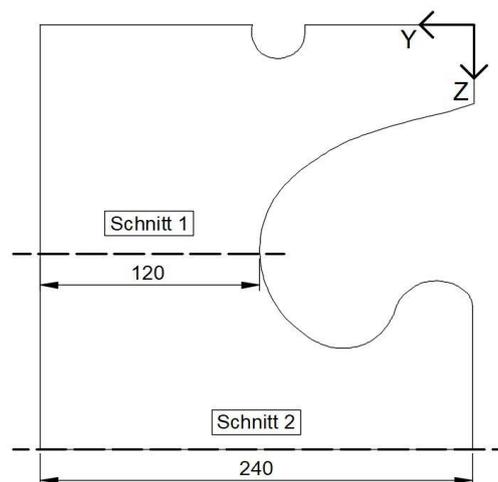


Abbildung 6: Kritische Schnitte für Biegezugversagen senkrecht zur Lagerfuge (Maße in mm)

Der charakteristische Wert der vertikalen Biegezugfestigkeit  $f_{xk1}$  entspricht in Schnitt 1 der Steinzugfestigkeit des Pflanzsteins  $f_{bt, cal} = f_{xk1} = 0,92 \text{ MN/m}^2$ . In Schnitt 2 wird die charakteristische Biegezugfestigkeit auf Basis von DIN EN 1996-1-1 Kapitel 3.6.4 [10] mit  $f_{xk1} = 0,20 \text{ MN/m}^2$  angenommen. Der materialeitige Teilsicherheitsbeiwert wird in beiden Schnitten mit  $\gamma_M = 1,5$  angesetzt.

Die einwirkende minimale Normalkraft am Wandfuß lässt sich mit Gleichung (12) bestimmen.

$$n_{Ed, \min} = \gamma_{MW} \cdot t \cdot H \quad (12)$$

Für die Ermittlung der Biegebeanspruchung wird die freistehende Pflanzsteinwand ohne seitliche Halterung als Kragarm idealisiert. Das maximal einwirkende Moment am Wandfuß ergibt sich somit nach Gleichung (13).

$$m_{Ed} = \frac{w_{Ed} \cdot H^2}{2} \quad (13)$$

Da der randnahe Anströmbereich A bei freistehenden Wänden mit sehr geringer Wandhöhe vernachlässigbar klein ist, wird die einwirkende horizontale Windlast im Folgenden im Anströmbereich B mit einem Druckbeiwert  $c_{pe,10} = 2,1$  nach DIN EN 1991-1-4 Tabelle 7.9 [6] ermittelt. Hierbei wird auf der sicheren Seite liegend ein Verhältnis von Wandlänge zu Wandhöhe von  $L/H \geq 10$  unterstellt. Die zu Grunde gelegten Bemessungswindlasten für die Windzonen 1 bis 4 des Binnenlands sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Einwirkende Bemessungswindlasten  $w_{Ed}$  bei freistehenden Pflanzsteinwänden ohne seitliche Halterung

	Windzone 1 $q_p = 0,50 \text{ kN/m}^2$	Windzone 2 $q_p = 0,65 \text{ kN/m}^2$	Windzone 3 $q_p = 0,80 \text{ kN/m}^2$	Windzone 4 $q_p = 0,95 \text{ kN/m}^2$
$w_{Ed} \text{ [kN/m}^2\text{]}$	1,58	2,05	2,52	2,99

Auf Basis der genannten Randbedingungen ergeben sich für Pflanzsteinwände ohne seitliche Halterung die in Tabelle 8 aufgeführten zulässigen Wandhöhen.

Tabelle 8: Zulässige Wandhöhen für freistehende Pflanzsteinwände ohne seitliche Halterung für Windzonen 1 – 4 des Binnenlands

	Windzone 1	Windzone 2	Windzone 3	Windzone 4
<b>H [m]</b>	<b>1,36</b>	<b>1,18</b>	<b>1,06</b>	<b>0,97</b>
$n_{Ed,min} \text{ [kN/m]}$	4,57	3,96	3,57	3,26
$m_{Ed} \text{ [kNm/m]}$	1,46	1,43	1,42	1,41
$m_{Rd,S1} \text{ [kNm/m]}$	1,56	1,55	1,54	1,54
$m_{Rd,S2} \text{ [kNm/m]}$	1,46	1,44	1,42	1,41

Aus Tabelle 8 geht hervor, dass sich die maßgebende Versagensstelle in der Lagerfuge (Schnitt 2) befindet. Freistehende Pflanzsteinwände ohne seitliche Halterung können in Windzone 1 bis zu einer Höhe von fünf Steinreihen nachgewiesen werden. In Windzonen 2 und 3 beträgt die maximale Höhe vier Steinreihen. In Windzone 4 sind drei Steinreihen möglich.

## 4 Freistehende Pflanzsteinwand mit Querriegel

### 4.1 Anwendungsvoraussetzungen

Um freistehende Pflanzsteinwände mit Bauhöhen  $H > 2,50$  m realisieren zu können oder den lichten Stützenabstand bei Bauhöhen  $H \leq 2,50$  m zu erhöhen, sind diese vierseitig mit einer Stahlbetonskelettkonstruktion einzufassen. Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ist die Pflanzsteinwand stets auf einem Stahlbetonfundament zu errichten und muss durch seitliche Stahlbetonstützen gehalten werden. Die seitliche Halterung ist auch hier mit geeigneten Lagerfugenankern zu gewährleisten. Zusätzlich ist ein Querriegel aus Stahlbeton am Wandkopf vorzusehen, welcher kraftschlüssig mit den Pflanzsteinen zu verbinden ist. Die lichte Höhe eines Ausfachungsfeldes ist prinzipiell auf  $h \leq 3,75$  m zu begrenzen. Der lichte Stützenabstand darf maximal  $L \leq 6,00$  m betragen. Es können höchstens zwei Ausfachungsfelder übereinander angeordnet werden, wobei ein zusätzlicher Querriegel in Wandhöhenmitte vorzusehen ist (siehe Abbildung 7). Um eine teilweise Auflagerung des darüber liegenden Ausfachungsfeldes zu vermeiden, muss der mittlere Querriegel dieselbe Breite wie die Pflanzsteinwand aufweisen. Die maximal zulässige Bauhöhe einer freistehenden Pflanzsteinwand beträgt  $H \leq 8$  m.

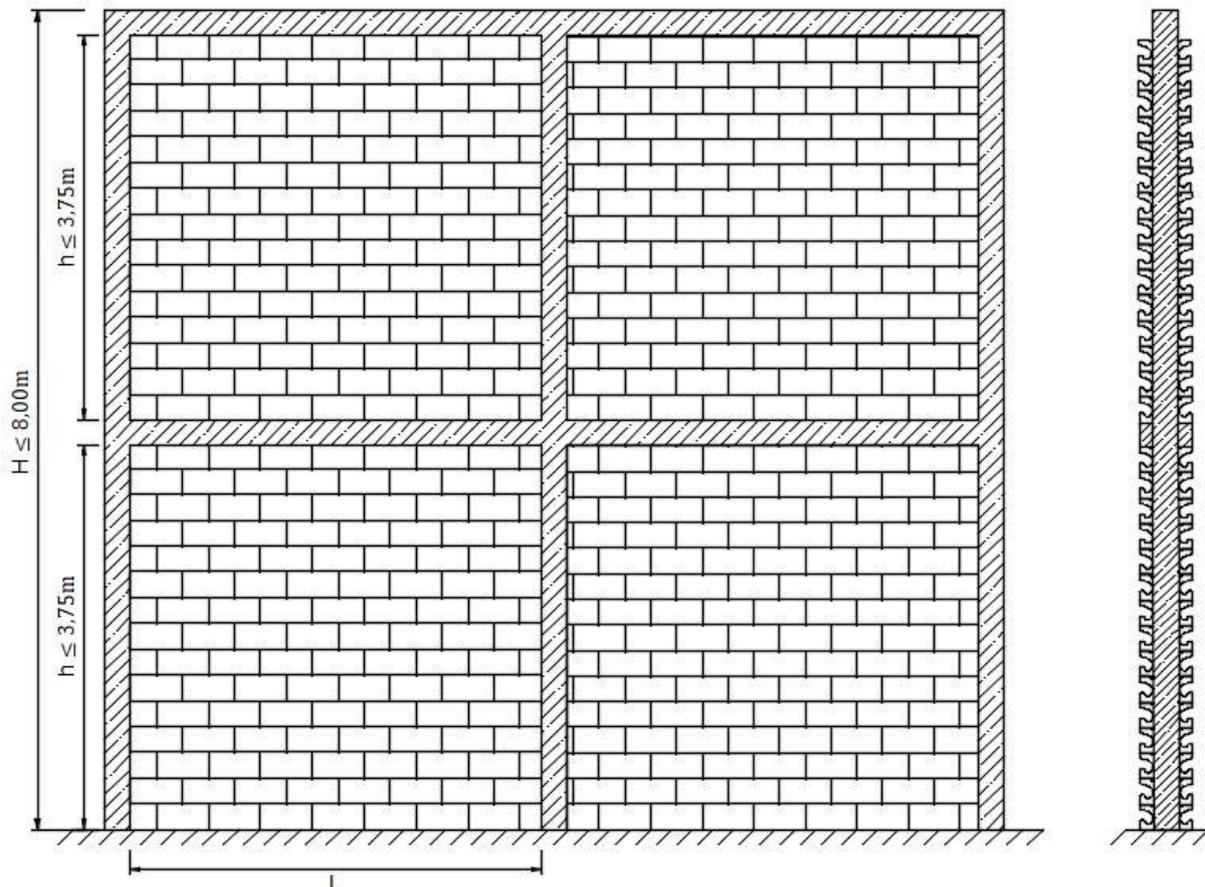


Abbildung 7: Schematische Front- und Seitenansicht einer freistehenden Pflanzsteinwand mit Querriegeln an Wandkopf und in Wandhöhenmitte

Die Standsicherheit der die Wandfläche stützenden Stahlbetonkonstruktion ist in jedem Einzelfall statisch nach DIN EN 1992-1-1/NA [9] nachzuweisen. Die Einwirkungen aus Wind sind nach DIN EN 1991-1-4/NA [7] zu ermitteln und über die entsprechenden Einzugsflächen auf die Stahlbetonbauteile aufzubringen. Eine freistehende Pflanzsteinwand mit Querriegel darf ausschließlich zweischalig ausgeführt werden. Eine Luftschicht zwischen den beiden Schalen hat keine negativen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Mauerwerks. Es muss Dünnbettmörtel verwendet werden. Eine Stoßbelastung infolge Fahrzeuganprall ist durch geeignete Schutzmaßnahmen oder ausreichenden Abstand zu benachbarten Verkehrswegen auszuschließen.

## 4.2 Bemessung

### 4.2.1 Ermittlung der zulässigen Ausfachungsflächen

Bei einer freistehenden Pflanzsteinwand mit Querriegel handelt es sich um eine nichttragende Ausfachungsfläche, welche vorrangig durch horizontale Windlast beansprucht wird. Nach DIN EN 1996-3/NA Anhang NA.C [15] kann die zulässige Ausfachungsfläche einer Mauerwerkswand in Abhängigkeit der Wanddicke, des Verhältnisses zwischen Höhe und Länge der Ausfachungsfläche sowie der Höhe über Gelände mit Hilfe von Tabellenwerten ohne rechnerischen Nachweis bestimmt werden. Die Anwendung dieses Verfahrens setzt eine vierseitige Halterung der Ausfachungswand sowie die Verwendung von Dünnbettmörtel oder Normalmörtel mindestens der Gruppe M 5 voraus. Beide Kriterien werden von einer freistehenden Pflanzsteinwand mit Querriegel erfüllt. Nichtsdestotrotz ist die Gültigkeit der Tabellenwerte für die vereinfachte Ermittlung der zulässigen Ausfachungsfläche umstritten. Das besagte Verfahren wurde bei Einführung des Eurocode 6 unverändert aus DIN 1053-1:1996 [4] übernommen, ohne die erhöhten Windlasten des Eurocode 1 im Vergleich zur DIN 1055-4:1986 [5] zu berücksichtigen. Auf Grund dessen wird im vorliegenden Fall zur Ermittlung der zulässigen Ausfachungsflächen auf ein analytisches Berechnungsverfahren nach Kirtschig [19] zurückgegriffen, welches es ermöglicht die aktuell gültigen Windlasten nach DIN EN 1991-1-4/NA [7] explizit in die Berechnung einzubeziehen. Da das vereinfachte Tabellenverfahren nach DIN EN 1996-3/NA [15] schon lange angewendet wird und keine signifikante Zahl an Versagensfällen festgestellt werden konnte, wird dieses zunächst mit dem Verfahren nach Kirtschig [19] gegenübergestellt, um zu zeigen, dass die analytische Berechnung der zulässigen Ausfachungsflächen konservative Ergebnisse liefert.

Da die seitlichen Stahlbetonstützen stets ausschließlich den hinteren Teil des Pflanzsteins einfassen, wird für die Bestimmung der maximal zulässigen Ausfachungsflächen nach DIN EN 1996-3/NA [15] auf der sicheren Seite liegend eine rechnerische Wanddicke von  $t = 115 \text{ mm}$  angesetzt. Nach Fußnote (d) der normativen Tabelle darf die zulässige Ausfachungsfläche bei einer Wanddicke von  $t = 115 \text{ mm}$  und Verwendung von Steinen der Festigkeitsklasse  $\geq 12$  um ein Drittel vergrößert werden. Mit einer Netto-Steindruckfestigkeit von  $f_{st,netto} = 28,8 \text{ N/mm}^2$  ist der ungeschwächte Querschnittsbereich des Pflanzsteins nach DIN 20000-402 Tabelle 10 [17] der Steindruckfestigkeitsklasse 20 zuzuordnen, was die Anwendung der Fußnote (d) rechtfertigt.

Die zulässige Ausfachungsfläche nach Kirtschig [19] berechnet sich mit Hilfe von Gleichung (14):

$$A_{zul} = \frac{t^2 \cdot f_{xd2} \cdot v}{6 \cdot w_{Ed} \cdot \alpha} \quad (14)$$

Als statisch relevante Wanddicke wird hierbei analog zum Nachweis nach DIN EN 1996-3/NA [15] und auf der sicheren Seite liegend ein ungeschwächter Vollquerschnitt mit einer Stärke von  $t = 0,115 \text{ m}$  angesetzt. Der Bemessungswert der horizontalen Biegezugfestigkeit wurde zu  $f_{xd2} = 0,29 \text{ MN/m}^2$  bestimmt (siehe Gleichung (8)). Der Beiwert  $v$  stellt das Verhältnis zwischen Höhe und Länge der Ausfachungsfläche dar ( $v = h/L$ ).

Der Bemessungswert der einwirkenden Windlast wird auf Basis von DIN EN 1991-1-4/NA [7] mit Hilfe von Gleichung (9) berechnet. Der Staudruck  $q_p$  wurde hierbei für die einzelnen Windzonen des Binnenlands nach DIN EN 1991-1-4/NA Tabelle NA.B.3 [7] für eine Gebäudehöhe von  $H \leq 10 \text{ m}$  bestimmt. Da die freistehende Pflanzsteinwand mit Querriegel ausschließlich zweischalig ausgeführt wird, wirken Windsog und Winddruck nie gleichzeitig auf eine Schale der Ausfachungswand. Der maßgebende Fall ist somit analog zu Kapitel 3.2.2 alleiniger Winddruck mit einem Außendruckbeiwert von  $c_{pe,10} = 0,8$ . Die Bemessungswindlasten für eine freistehende Pflanzsteinwand mit Querriegel sind für die jeweiligen Windzonen in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Einwirkende Bemessungswindlasten  $w_{Ed}$  bei freistehenden Pflanzsteinwänden mit Querriegel

	Windzone 1 $q_p = 0,50 \text{ kN/m}^2$	Windzone 2 $q_p = 0,65 \text{ kN/m}^2$	Windzone 3 $q_p = 0,80 \text{ kN/m}^2$	Windzone 4 $q_p = 0,95 \text{ kN/m}^2$
$w_{Ed} \text{ [kN/m}^2\text{]}$	0,60	0,78	0,96	1,14

Durch den Beiwert  $\alpha$  in Gl. (14) wird der Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die zulässige Ausfachungsfläche berücksichtigt. Bei vierseitiger Halterung ergibt sich  $\alpha$  zu:

$$\alpha = \frac{f_{xk2}}{f_{xk1}} \cdot v^2 \cdot \frac{\eta^2}{24} \cdot \left[ \sqrt{3 + \frac{\eta^2}{\xi^2}} - \frac{\eta}{\xi} \right]^2 \quad (15)$$

Die charakteristische Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge wird auf Basis von DIN EN 1996-1-1 Kapitel 3.6.4 [10] mit  $f_{xk1} = 0,20 \text{ MN/m}^2$  berücksichtigt.

Die Variablen  $\eta$  und  $\xi$  lassen sich mit Gleichung (16) und (17) bestimmen:

$$\eta = \frac{2}{\sqrt{1 + \kappa} + \sqrt{1 + \gamma}} \quad (16)$$

$$\xi = \frac{2}{v \cdot \left[ \sqrt{\frac{f_{xk2}}{f_{xk1}} + \delta} + \sqrt{\frac{f_{xk2}}{f_{xk1}} + \varepsilon} \right]} \quad (17)$$

Hierbei kann durch  $\kappa$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  und  $\varepsilon$  der Einspanngrad der Ausfachungsfläche an jeder Wandseite individuell berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall könnte durch die Verbindung zwischen Ausfachungsmauerwerk und den vertikalen Stahlbetonbauteilen mittels Lagerfugenanker sowie der breiteren Aufstandsfläche der Pflanzsteine von  $t = 0,24 \text{ m}$  an Wandkopf und Wandfuß zumindest von einer Teileinspannung an jeder Wandseite ausgegangen werden. Nachfolgend wird jedoch auf der sicheren Seite liegend an allen Seiten eine gelenkige Lagerung angenommen ( $\kappa = \gamma = \delta = \varepsilon = 0$ ) womit sich der Beiwert  $\eta = 1$  ergibt.

In Tabelle 7 sind die maximal zulässigen Ausfachungsflächen sowie die zugehörigen zulässigen lichten Stützenabstände für unterschiedliche Ausfachungshöhen mit dem analytischen Verfahren nach Kirtschig [19] sowie dem Tabellenverfahren nach DIN EN 1996-3/NA [15] berechnet worden. Um die Vergleichbarkeit der beiden Verfahren zu gewährleisten, wird innerhalb der analytischen Berechnung die Windlast in Windzone 4 des Binnenlands nach DIN EN 1991-1-4/NA [7] zu Grunde gelegt.

Tabelle 10: Gegenüberstellung der zulässigen Ausfachungsflächen sowie zugehörigen zulässigen lichten Stützenabständen nach Kirtschig und DIN EN 1996-3/NA für Windlasten in Windzone 4 (Binnenland)

Lichte Höhe der Ausfachungsfläche	Kirtschig		DIN EN 1996-3/NA	
	A <sub>zul</sub> [m <sup>2</sup> ]	L <sub>zul</sub> [m]	A <sub>zul</sub> [m <sup>2</sup> ]	L <sub>zul</sub> [m]
$h \leq 1,75 \text{ m}$	k.E.	k.E.	10,7	6,10
$1,75 \text{ m} < h \leq 2,00 \text{ m}$	10,6	5,28	10,7	5,33
$2,00 \text{ m} < h \leq 2,25 \text{ m}$	9,4	4,17	11,1	4,93
$2,25 \text{ m} < h \leq 2,50 \text{ m}$	9,1	3,63	12,7	5,07
$2,50 \text{ m} < h \leq 2,75 \text{ m}$	9,1	3,33	14,2	5,15
$2,75 \text{ m} < h \leq 3,00 \text{ m}$	9,4	3,15	15,5	5,17
$3,00 \text{ m} < h \leq 3,25 \text{ m}$	9,7	2,99	15,5	4,78
$3,25 \text{ m} < h \leq 3,50 \text{ m}$	10,2	2,92	14,9	4,27
$3,50 \text{ m} < h \leq 3,75 \text{ m}$	10,6	2,83	14,3	3,80

Das analytische Verfahren nach Kirtschig ist nur für Verhältnisse zwischen Höhe und Länge der Ausfachungsfläche von  $0,25 \leq h/L \leq 2,0$  definiert. Bei kleinen Ausfachungshöhen in Kombination mit großen rechnerisch zulässigen Stützenabständen kann es somit vorkommen, dass das Verhältnis  $h/L$  außerhalb des Definitionsbereichs liegt und das Verfahren nach Kirtschig keine Einschränkung der Ausfachungsfläche (k.E.) liefert. In diesem Fall wird der zulässige lichte Stützenabstand auf  $L \leq 6,00 \text{ m}$  begrenzt.

Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 10 ist deutlich zu erkennen, dass die analytische Berechnung etwas kleinere zulässige Ausfachungsflächen als DIN EN 1996-3/NA [15] liefert. Das Verfahren nach Kirtschig liegt somit im Vergleich zum normativen Tabellenverfahren unter den eingangs definierten Randbedingungen auf der sicheren Seite und wird daher im Folgenden zur Ermittlung der zulässigen Ausfachungsflächen für verschiedene Windzonen herangezogen.

In Tabelle 9 sind die sich nach Gl. (14) ergebenden zulässigen Ausfachungsflächen sowie die sich daraus in Abhängigkeit der Wandhöhe ergebenden zulässigen Stützenabstände für die verschiedenen Windzonen (Binnenland) angegeben.

Tabelle 11: Zulässige Ausfachungsflächen sowie zugehörige zulässige lichte Stützenabstände nach Kirtschig für Windzonen 1 – 4 im Binnenland

Lichte Höhe der Ausfachungsfläche	Windzone 1		Windzone 2		Windzone 3		Windzone 4	
	A <sub>zul</sub> [m <sup>2</sup> ]	L <sub>zul</sub> [m]	A <sub>zul</sub> [m <sup>2</sup> ]	L <sub>zul</sub> [m]	A <sub>zul</sub> [m <sup>2</sup> ]	L <sub>zul</sub> [m]	A <sub>zul</sub> [m <sup>2</sup> ]	L <sub>zul</sub> [m]
$h \leq 1,75 \text{ m}$	k.E.	k.E.	k.E.	k.E.	k.E.	k.E.	k.E.	k.E.
$1,75 \text{ m} < h \leq 2,00 \text{ m}$	k.E.	k.E.	k.E.	k.E.	14,9	7,45	10,6	5,28
$2,00 \text{ m} < h \leq 2,25 \text{ m}$	k.E.	k.E.	16,6	7,38	11,9	5,29	9,4	4,17
$2,25 \text{ m} < h \leq 2,50 \text{ m}$	k.E.	k.E.	14,6	5,86	10,9	4,38	9,1	3,63
$2,50 \text{ m} < h \leq 2,75 \text{ m}$	20,1	7,30	13,5	4,90	10,8	3,91	9,1	3,33
$2,75 \text{ m} < h \leq 3,00 \text{ m}$	18,3	6,11	13,3	4,42	10,9	3,62	9,4	3,15
$3,00 \text{ m} < h \leq 3,25 \text{ m}$	17,3	5,33	13,3	4,09	11,2	3,42	9,7	2,99
$3,25 \text{ m} < h \leq 3,50 \text{ m}$	17,2	4,92	13,6	3,89	11,5	3,30	10,2	2,92
$3,50 \text{ m} < h \leq 3,75 \text{ m}$	17,4	4,63	14,0	3,73	11,9	3,18	10,6	2,83

#### 4.2.2 Örtliches Versagen des Mauersteins

Bei nichttragendem Mauerwerk kann im Allgemeinen von vergleichsweise kleinen einwirkenden Normalkräften ausgegangen werden. Diese können in Kombination mit hohen Biegebeanspruchungen zu einer großen Lastexzentrizität führen. Im Folgenden wird untersucht, ob die Auskragungen des Pflanzsteins ober- und unterhalb der Pflanzrinne bei großer Lastausmitte

bruchgefährdet sind. Hierbei sollte allerdings erwähnt werden, dass ein Abbrechen der Auskragungen zwar eine unschöne Beschädigung des Pflanzsteins darstellt, jedoch nicht relevant für die Tragfähigkeit der Ausfachungsfläche ist, da im Nachweisverfahren nur der hintere Vollquerschnitt angesetzt wurde und die Auskragungen nicht zur rechnerischen Tragfähigkeit beitragen.

Wie in Abbildung 8 dargestellt, können an den Auskragungen zwei bruchgefährdete Schnitte identifiziert werden. Zum einen Schnitt 1 an der oberen Auskragung, welche durch die Bewässerungsöffnung geschwächt ist, und zum anderen Schnitt 2, welcher sich an der unteren Auskragung am tiefsten Punkt der Pflanzrinne befindet.

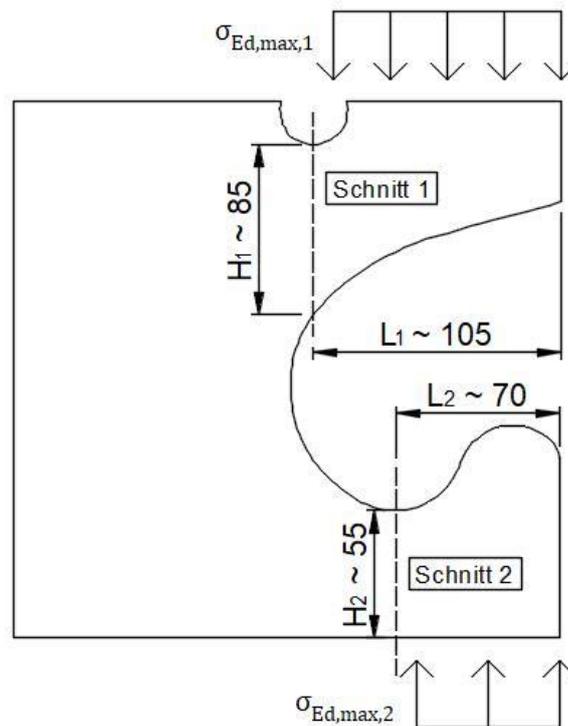


Abbildung 8: Kritische Schnitte der Auskragungen (Maße in mm)

#### 4.2.2.1 Ermittlung der zulässigen Normalspannung

Bei Lasteinleitung nahe des Schwerpunkts kann davon ausgegangen werden, dass sich die einwirkende Normalkraft nicht bis in die Auskragungen ausbreitet, sondern hauptsächlich vom hinteren Vollquerschnitt abgetragen wird. In diesem Fall besteht keine Abbruchgefahr der Auskragungen. Bei großer Lastausmitte kann es jedoch vorkommen, dass sich der Pflanzstein „auf die Vorderkante stellt“ und die resultierende Normalkraft einen Spannungsblock auf den Auskragungen erzeugt. Damit die Biegezugfestigkeit des Pflanzsteins an den kritischen Schnitten nicht überschritten wird, ist die Höhe der einwirkenden Normalspannungen auf  $\sigma_{Ed,max,1}$  bzw.  $\sigma_{Ed,max,2}$  zu begrenzen. Die zulässigen Normalspannungen können nach Idealisierung der Auskragungen als Kragarme unter Gleichstreckenlast nach Gleichung (18) berechnet werden. Alle verwendeten Schnittgrößen und Querschnittswerte werden an den in Abbildung 8 eingezeichneten kritischen Schnitten berechnet.

$$\frac{m_{Ed,1/2}}{W_{1/2}} = \frac{\sigma_{Ed,max,1/2} \cdot \frac{L_{1/2}^2}{2}}{W_{1/2}} \leq \frac{f_{bt,cal}}{\gamma_M} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{Ed,max,1/2} = \frac{2 \cdot f_{bt,cal} \cdot W_{1/2}}{L_{1/2}^2 \cdot \gamma_M} \quad (18)$$

$$\sigma_{Ed,max,1} = \frac{2 \cdot 0,92 \frac{MN}{m^2} \cdot \frac{(0,085m)^2}{6}}{(0,105m)^2 \cdot 1,5} = 0,134 \frac{MN}{m^2} \quad (19)$$

$$\sigma_{Ed,max,2} = \frac{2 \cdot 0,92 \frac{MN}{m^2} \cdot \frac{(0,055m)^2}{6}}{(0,07m)^2 \cdot 1,5} = 0,126 \frac{MN}{m^2} \quad (20)$$

Aus den Berechnungen geht hervor, dass Versagen in Schnitt 2 maßgebend gegenüber Schnitt 1 ist und die einwirkenden Normalspannungen auf der unteren Auskrägung somit auf  $\sigma_{Ed,max,2} = 0,126 \text{ MN/m}^2$  zu begrenzen sind.

#### 4.2.2.2 Ermittlung der einwirkenden Normalspannung

Die einwirkende Normalkraft setzt sich aus dem Eigengewicht der Pflanzsteine und den Begrünungslasten zusammen. In den folgenden Nachweisen wird sowohl die minimale als auch die maximale Normalkraft am Wandfuß und in Wandmitte untersucht. Die Berechnung der minimalen Normalkräfte erfolgt unter Vernachlässigung der Begrünungslast und mit einem Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten  $\gamma_G = 1,0$ . Die maximale Normalkraft wird dahingegen mit  $\gamma_G = 1,35$  und  $\gamma_Q = 1,50$  bestimmt. Als maßgebender Fall wird nachfolgend die maximal zulässige Ausfachungshöhe mit  $h = 3,75 \text{ m}$  betrachtet.

$$n_{Ed,Mitte,min} = \gamma_G \cdot \gamma_{MW} \cdot t \cdot \frac{h}{2} = 1,0 \cdot 14 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,24m \cdot \frac{3,75m}{2} = 6,30 \frac{kN}{m} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} n_{Ed,Mitte,max} &= \gamma_G \cdot \gamma_{MW} \cdot t \cdot \frac{h}{2} + \gamma_Q \cdot N_{Ek,Begrünung} \cdot \frac{h}{2} \\ &= 1,35 \cdot 14 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,24m \cdot \frac{3,75m}{2} + 1,50 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{3,75m}{2} = 9,21 \frac{kN}{m} \end{aligned} \quad (22)$$

$$n_{Ed,Fuß,min} = \gamma_G \cdot \gamma_{MW} \cdot t \cdot h = 1,0 \cdot 14 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,24m \cdot 3,75m = 12,60 \frac{kN}{m} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} n_{Ed,Fuß,max} &= \gamma_G \cdot \gamma_{MW} \cdot t \cdot h + \gamma_Q \cdot N_{Ek,Begrünung} \cdot h \\ &= 1,35 \cdot 14 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,24m \cdot 3,75m + 1,50 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot 3,75 = 18,42 \frac{kN}{m} \end{aligned} \quad (24)$$

Für die Ermittlung der Biegebeanspruchung infolge Windlast wird der zweiachsige Lastabtrag auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt und in vertikaler Richtung ein beidseitig eingespannter Einfeldträger angenommen. Damit im Bereich der Auskrägungen eine Druckbeanspruchung entsteht, ist in Wandmitte Winddruck und am Wandfuß Windsog anzusetzen. Bei der Berechnung der Windlasten nach DIN EN 1991-1-4/NA [7] werden Windzone 4 (Binnenland) und Außendruckbeiwerte in Höhe von  $c_{pe,Druck} = 0,8$  und  $c_{pe,Sog} = -0,5$  angesetzt. Die einwirkenden Biegemomente ergeben sich somit wie folgt:

$$m_{Ed,Mitte,Wind} = \frac{\gamma_Q \cdot q_p \cdot c_{pe,Druck} \cdot h^2}{24} = \frac{1,50 \cdot 0,95 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,8 \cdot (3,75m)^2}{24} = 0,67 \frac{kNm}{m} \quad (25)$$

$$m_{Ed,Fuß,Wind} = \frac{\gamma_Q \cdot q_p \cdot c_{pe,Sog} \cdot h^2}{12} = -\frac{1,50 \cdot 0,95 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,5 \cdot (3,75m)^2}{12} = -0,83 \frac{kNm}{m} \quad (26)$$

Zur Berechnung der Gesamtexzentrizität muss bei Betrachtung der maximalen Normalkraft zusätzlich die ausmittig angreifende Begrünungslast mit  $e_{Begrünung} = 0,08 m$  berücksichtigt werden. Weiterhin wird in Wandmitte eine ungewollte Ausmitte in Höhe von  $e_{init} = h/450$  angesetzt.

$$e_{Mitte,min} = \frac{m_{Ed,Mitte,Wind}}{n_{Ed,Mitte,min}} + e_{init} = \frac{0,67 \frac{kNm}{m}}{6,30 \frac{kN}{m}} + \frac{3,75m}{450} = 0,115m \quad (27)$$

$$e_{Mitte,max} = \frac{m_{Ed,Mitte,Wind} + N_{Ed,Begrünung} \cdot \frac{h}{2} \cdot e_{Begrünung}}{n_{Ed,Mitte,max}} + e_{init} \quad (28)$$

$$= \frac{0,67 \frac{kNm}{m} + 1,50 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{3,75m}{2} \cdot 0,08m}{9,21 \frac{kN}{m}} + \frac{3,75m}{450} = 0,087m$$

$$e_{Fuß,min} = \frac{|m_{Ed,Fuß,Wind}|}{n_{Ed,Fuß,min}} = \frac{\left| -0,83 \frac{kNm}{m} \right|}{12,60 \frac{kN}{m}} = 0,066m \quad (29)$$

$$e_{Fuß,max} = \frac{|m_{Ed,Fuß,Wind}| + n_{Ed,Begrünung} \cdot h \cdot e_{Begrünung}}{n_{Ed,Fuß,max}} \quad (30)$$

$$= \frac{\left| -0,83 \frac{kNm}{m} \right| + 1,50 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot 3,75m \cdot 0,08m}{18,42 \frac{kN}{m}} = 0,051m$$

Die ermittelten Exzentrizitäten stellen den Abstand in lokaler Y-Richtung zwischen der Lastresultierenden und dem Schwerpunkt des Pflanzsteins dar. Die überdrückte Wanddicke lässt sich unter Annahme starr-plastischen Materialverhaltens mit Gleichung (31) berechnen. Weiterhin wird unterstellt, dass die überdrückte Wanddicke mindestens gleich der Länge der unteren Auskrantung ist.

$$t_c = 2 \cdot (S_y - e) \geq L_2 \quad (31)$$

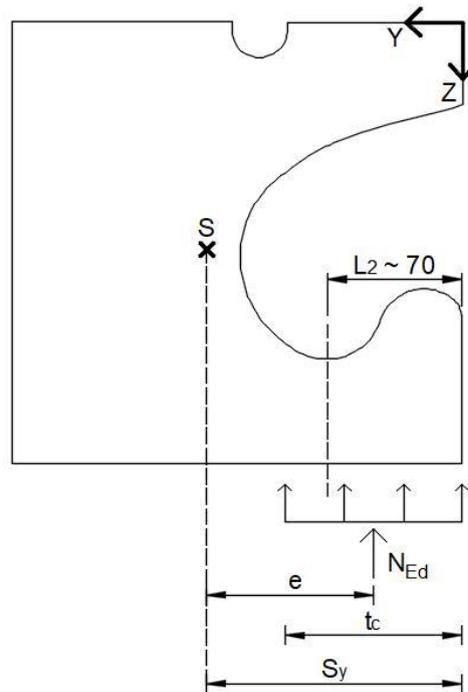


Abbildung 9: Ermittlung der überdrückten Wanddicke (Maße in mm)

Mit Hilfe der überdrückten Wanddicke lässt sich die einwirkende Normalspannung auf der Auskragung für die verschiedenen Nachweisstellen und Lastfälle berechnen:

$$\sigma_{Ed} = \frac{n_{Ed}}{t_c} \quad (32)$$

Die Auswertung von Gleichungen (31) und (32) kann Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Nachweis gegen Abbrechen der Auskragungen

Nachweisstelle	Lastfall	e [m]	t <sub>c</sub> [m]	n <sub>Ed</sub> [kN/m]	σ <sub>Ed</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]
Wandmitte	Min N	0,115	0,070	6,30	0,090
	Max N	0,087	0,100	9,21	0,092
Wandfuß	Min N	0,066	0,142	12,60	0,089
	Max N	0,051	0,172	18,42	0,107

Da die zulässige Normalspannung in Höhe von  $\sigma_{Ed,max,2} = 0,126 \text{ MN/m}^2$  an keiner Nachweisstelle überschritten wird, ist ein Versagen des Mauersteins im Bereich der Auskragungen bei einer Wandhöhe von  $h \leq 3,75 \text{ m}$  nicht zu befürchten.

## 5 Pflanzstein-Vorsatzschale für zweischaliges Mauerwerk

Der Pflanzstein soll neben den bereits erläuterten Anwendungsfällen ebenfalls als nichttragende Vorsatzschale für zweischaliges Mauerwerk eingesetzt werden. Hierbei kann der Schalenzwischenraum aus einer Luft- oder Dämmschicht oder einer Kombination aus beidem bestehen. Die Pflanzstein-Vorsatzschale soll wahlweise in Dünnbett- oder in Normalmörtel ausgeführt werden.

Bei der Planung und der Ausführung einer Vorsatzschale aus Pflanzsteinen sind die Planungs- und Ausführungsregeln für zweischaliges Mauerwerk nach DIN EN 1996-1-1/NA Kapitel 8.5.2.2 [11] bzw. DIN EN 1996-2/NA Anhang NA.D [13] einzuhalten. Die dort geforderte Frostbeständigkeit wurde bereits gemäß DIN 772-18 [2] von der Kalksandstein-Dienstleistung GmbH nachgewiesen (Prüfbericht 22/2019 vom 30.12.2019).

Zum Abtrag einwirkender Horizontalbeanspruchungen muss die Vorsatzschale in der tragenden Schale rückverankert werden. Hierzu sind für die verwendete Mörtelart (Normalmörtel oder Dünnbettmörtel) zugelassene Maueranker zu verwenden. Auch wenn der Pflanzstein auf Grund seiner außergewöhnlichen Geometrie nicht nach DIN 20000-402 [17] klassifiziert werden kann, ist kein Grund ersichtlich warum Maueranker, welche für die Verankerung von Vorsatzschalen aus Kalksandsteinen geeignet sind und eine allgemeine bauaufsichtlicher Zulassung besitzen, nicht auch zur Verankerung der Pflanzstein-Vorsatzschale eingesetzt werden können. Der Einbindebereich des Mauerankers in der Lagerfuge wird durch die Geometrie des Pflanzsteins bis zu einer Tiefe von 12 cm nicht negativ beeinträchtigt. Günstigerweise liegt der Schwerpunkt des Pflanzsteins auf Grund der Aussparung an der Vorderseite näher an der Tragschale, was einem Aufklaffen der Lagerfuge im Einbindebereich des Mauerankers zusätzlich entgegenwirkt. Geeignete Maueranker für die Rückverankerung des Pflanzsteins wären z.B. BEVER Multi-Luftschichtanker Plus oder BEVER Dübelanker Typ ZV-Welle.

Da der Pflanzstein im ungeschwächten Bereich einen Vollquerschnitt mit einer Stärke von 12 cm aufweist, sollte er bezüglich der Abfanghöhe sowie des zulässigen Überstands zwischen Vorsatzschale und Auflager wie eine Außenschale der Dicke 115 mm gemäß DIN EN 1996-2/NA NA.D.1 (4d) [9] behandelt werden. Hieraus geht hervor, dass alle 12 m eine Abfangung der Vorsatzschale vorzusehen ist und der Überstand zwischen Vorsatzschale und Auflager bis zu 25 mm betragen darf. Ist die Außenschale nicht höher als zwei Geschosse oder wird sie alle zwei Geschosse abgefangen, darf sie bis zu 38 mm über ihr Auflager vorstehen. Im vorliegenden Fall ist der Überstand gleich dem Abstand zwischen Auflagerkante und der Vorderkante des Pflanzsteins.

Bei Ausnutzung der normativ zulässigen Abfanghöhe von  $H = 12$  m entsteht eine maximal einwirkende Normalkraftbeanspruchung am Wandfuß der Pflanzsteinschale in Höhe von:

$$\begin{aligned}n_{Ed, Fuß} &= \gamma_G \cdot \gamma_{MW} \cdot t \cdot H + \gamma_Q \cdot N_{Ek, Begrünung} \cdot H \\ &= 1,35 \cdot 14 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,24m \cdot 12m + 1,5 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot 12m = 58,9 \frac{kN}{m}\end{aligned}\quad (33)$$

Bezogen auf den ungeschwächten Vollquerschnitt mit einer Stärke von 12 cm und unter Annahme eines vollständig überdrückten Querschnitts berechnet sich daraus eine einwirkende Normalspannung von ca. 0,49 N/mm<sup>2</sup>, welche durch den Pflanzstein offensichtlich aufgenommen werden kann. Die Annahme eines vollständig überdrückten Querschnitts ist auf Grund der regelmäßigen Rückverankerung und der daraus resultierenden verringerten Biegebeanspruchung der Vorsatzschale gerechtfertigt. Da sich die Normalkraft bei nahezu zentrischem Lastangriff nicht bis in die Auskragungen ausbreitet, ist nicht zu befürchten, dass diese abbrechen könnten.

## 6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Gutachten wurde die Tragfähigkeit und die Anwendungsvoraussetzungen des UNIKA Pflanzstein-ID 10-1,4 248x240x240 untersucht. Hierfür wurden zunächst notwendige Materialkennwerte durch Auswertung vorliegender Prüfgutachten oder durch plausible Annahmen bestimmt. Weiterhin wurden bemessungsrelevante Querschnittswerte ermittelt.

Bei Ausführung einer freistehenden Pflanzsteinwand ohne Querriegel ist sowohl eine ein- als auch zweischalige Ausführung bis zu einer Bauhöhe von  $H \leq 2,50$  m möglich. Die zulässigen lichten Stützenabstände in Abhängigkeit der vorliegenden Windzone im Binnenland kann Tabelle 13 entnommen werden. Weiterhin ist es möglich, dass freistehende Pflanzsteinwände mit einer geringen Bauhöhe ohne seitliche Halterung ausgeführt werden.

Tabelle 13: Zulässiger lichter Stützenabstand freistehender Pflanzsteinwände mit Wandhöhe  $H \leq 2,5$  m ohne Querriegel für die Windzonen 1 – 4 (Binnenland)

Ausführung	Zulässiger lichter Stützenabstand			
	Windzone 1	Windzone 2	Windzone 3	Windzone 4
Einschalig	$L \leq 3,55$ m	$L \leq 3,10$ m	$L \leq 2,75$ m	$L \leq 2,50$ m
Zweischalig	$L \leq 4,85$ m	$L \leq 4,25$ m	$L \leq 3,80$ m	$L \leq 3,50$ m

Führt man die freistehende Pflanzsteinwand mit Querriegel aus, lässt sich diese als vierseitig gehaltene Ausfachungswand bis zu einer maximalen Bauhöhe von  $H \leq 8,00$  m nachweisen. Hierbei ist zwangsläufig eine zweischalige Ausführung notwendig. In Tabelle 14 sind die zulässigen lichten Stützenabstände für verschiedene lichte Ausfachungshöhen angegeben. Die Werte gelten für die Windzonen 1 – 4 im Binnenland.

Tabelle 14: Zulässige lichte Stützenabstände freistehender Pflanzsteinwände mit Querriegel in Abhängigkeit der Windzonen 1 – 4 (Binnenland)

Lichte Höhe der Ausfachungsfläche	Windzone 1	Windzone 2	Windzone 3	Windzone 4
	$L_{zul}$ [m]	$L_{zul}$ [m]	$L_{zul}$ [m]	$L_{zul}$ [m]
$h \leq 1,75$ m	6,00	6,00	6,00	6,00
$1,75$ m < $h \leq 2,00$ m	6,00	6,00	6,00	5,25
$2,00$ m < $h \leq 2,25$ m	6,00	6,00	5,25	4,15
$2,25$ m < $h \leq 2,50$ m	6,00	5,85	4,35	3,60
$2,50$ m < $h \leq 2,75$ m	6,00	4,90	3,90	3,30
$2,75$ m < $h \leq 3,00$ m	6,00	4,40	3,60	3,15
$3,00$ m < $h \leq 3,25$ m	5,30	4,05	3,40	2,95
$3,25$ m < $h \leq 3,50$ m	4,90	3,85	3,30	2,90
$3,50$ m < $h \leq 3,75$ m	4,60	3,70	3,15	2,80

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die Auskragungen des Pflanzsteins auch bei stark exzentrischer Lasteinleitung bei Ausfachungshöhen von  $h \leq 3,75$  m nicht bruchgefährdet sind.

Bei Einsatz des Pflanzsteins als Vorsatzschale für zweischaliges Mauerwerk sind die Planungs- und Ausführungsregeln nach DIN EN 1996-1-1/NA [11] sowie DIN EN 1996-2/NA [13] zu berücksichtigen. Die Rückverankerung in die tragende Schale sollte mit einem geeigneten Maueranker geschehen, welcher eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Vorsatzschalen aus Kalksandsteinen besitzt.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Maximilian Brinkmann M.Sc.