

Beläge auf Stelzlager**Merkblatt 15**Stand **16. März 2022**

ersetzt

Stand 28. Februar 2022

1 Einleitung

Hinweise auf Bodenbeläge mit Stelzlager finden bereits in vielen Merkblättern [4], [5], [7], [8] Berücksichtigung, ohne konstruktive Hinweise auf die erforderlichen Dicken des Belages. Die Ausführungen dieses Merkblattes beschränken sich ausschließlich auf Flächen mit Personenverkehr. Eine Befahrung der Flächen wird ausgeschlossen. Schwere Einzellasten wie z.B. Betonkamine, Brunnen aber auch Rollgerüste für die Fassadenreinigung erfordern eine Fachplanung mit statischem Nachweis der Beläge. Gegebenenfalls ist die Beseitigung der Beläge und eine Lastabtragung auf der tragenden Unterkonstruktion erforderlich. Beläge auf Stelzlager stellen Bodenaufbauten auf Balkonen, Loggien und Dachterrassen mit einem geringen Gewicht des Bodenaufbaus dar. Durch die Stelzlagerung der Platten ist eine Entwässerung der Nutzflächen einfach möglich.

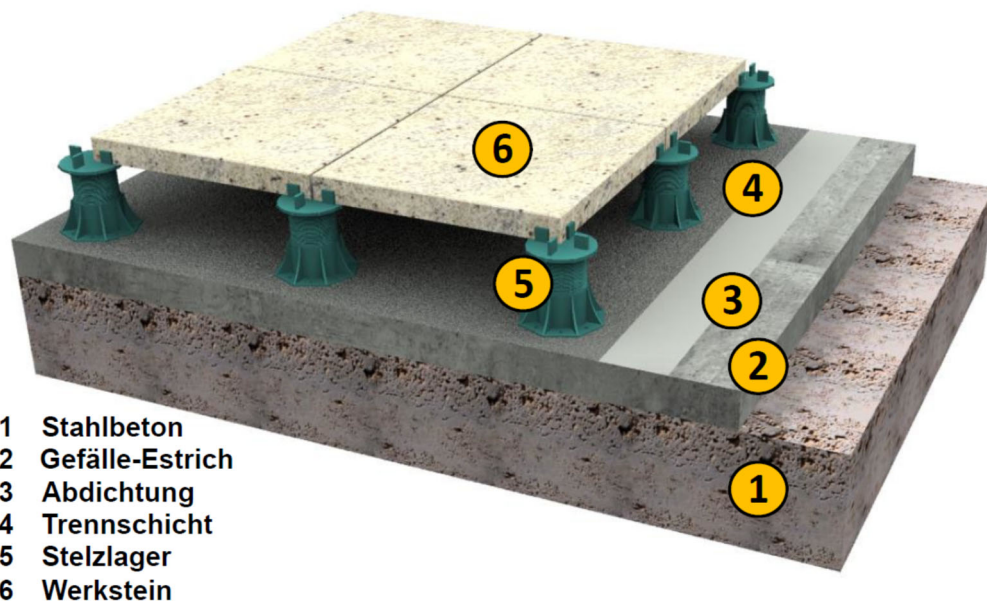
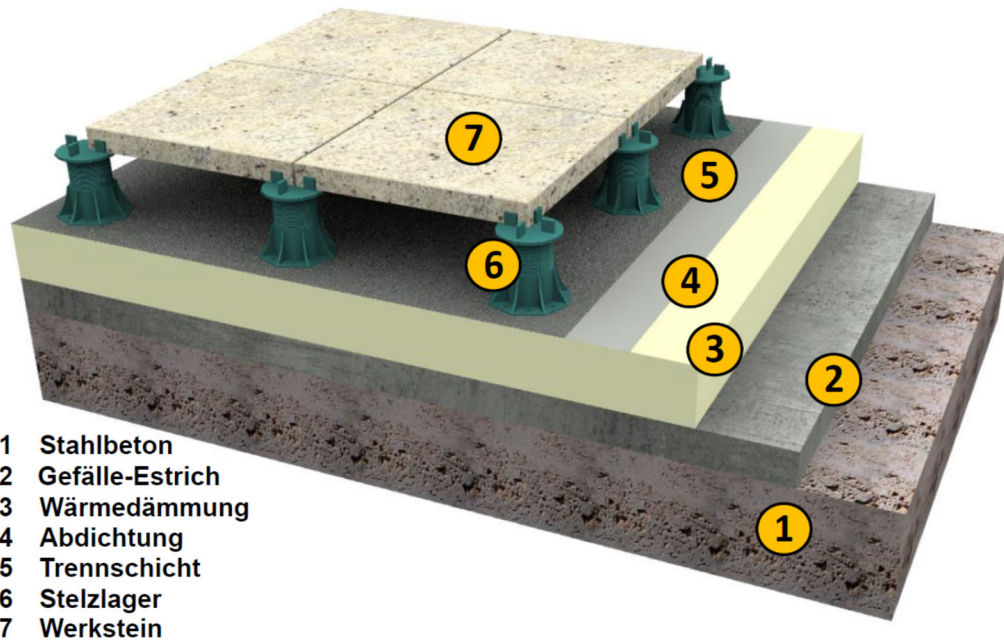


Bild 1: Ausführung auf Balkonen und Loggien

Die Abdichtung auf der Tragschicht soll an jeder Stelle ein Gefälle von mindestens 2 % aufweisen. Ein zu geringes Gefälle, zu hoch liegende Bodenabläufe, Unebenheiten, Falten in den Bitumenbahnen etc. führen zu Staunässe. Dies kann zu dauerhaften Ausblühungen, Fleckbildungen und bei Frost zur Eisbildung führen.



- 1 Stahlbeton
- 2 Gefälle-Estrich
- 3 Wärmedämmung
- 4 Abdichtung
- 5 Trennschicht
- 6 Stelzlager
- 7 Werkstein

Bild 2: Ausführung auf Dachterrassen

Die Stelzlager bestehen im Regelfall aus Kunststoffen. Hierdurch ergibt sich aufgrund des geringen Elastizitätsmoduls des Kunststoffs eine Federwirkung der Stelzlager. Bei der Herstellung von Belägen auf Stelzlager auf Dachterrassen (Bild 2) ergibt sich zusätzlich eine Nachgiebigkeit der Lagerung durch die Verformung der Dämmstoffe durch die Druckbelastung.

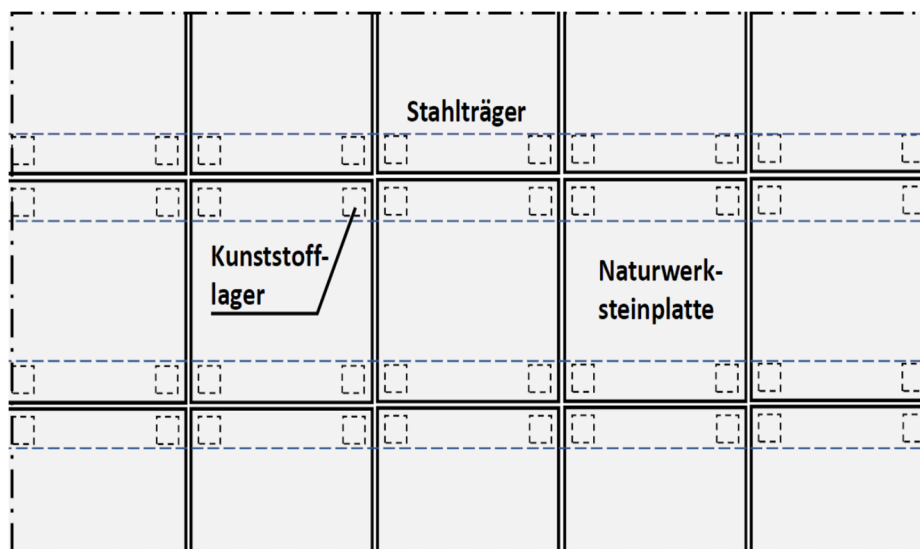


Bild 3: Ausführung auf einer Stahlunterkonstruktion

Bei einer Verlegung der Beläge auf einer Stahlkonstruktion (Bilder 3 und 4) kann die Verformung der Stahlkonstruktion zu einer Nachgiebigkeit der Lager führen.

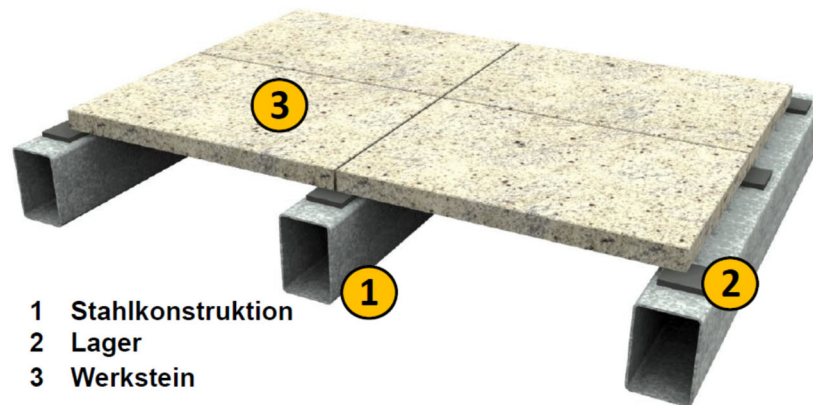


Bild 4: Ausführung auf einer Stahlunterkonstruktion

Es ist zu beachten, dass Werksteine zulässige Toleranzen in der Dicke aufweisen können, die bei der Nutzung eines Stelzlagers durch die Auflagerung mehrerer Platten ausgeglichen werden müssen. Geringe Höhenunterschiede aus der Unterkonstruktion oder Maßtoleranzen des Plattenbelags können durch Unterlage von Ausgleichsscheiben ausgeglichen werden. Die Fugen sind nicht verschlossen und führen das Niederschlagswasser schnell in die darunterliegende Ebene ab.

Stelzlager bestehen aus einer Fußplatte, einem Gewindeteil und einem Oberteil mit integrierten Fugenstegen. Die Stelzlager ermöglichen eine Zwischenräume unter den Terrassenplatten bis etwa 500 mm Höhe.

Für die Herstellung von Belägen auf Stelzlager werden die in den Bildern 5 und 6 dargestellten Verlegearten von den Herstellern angegeben.

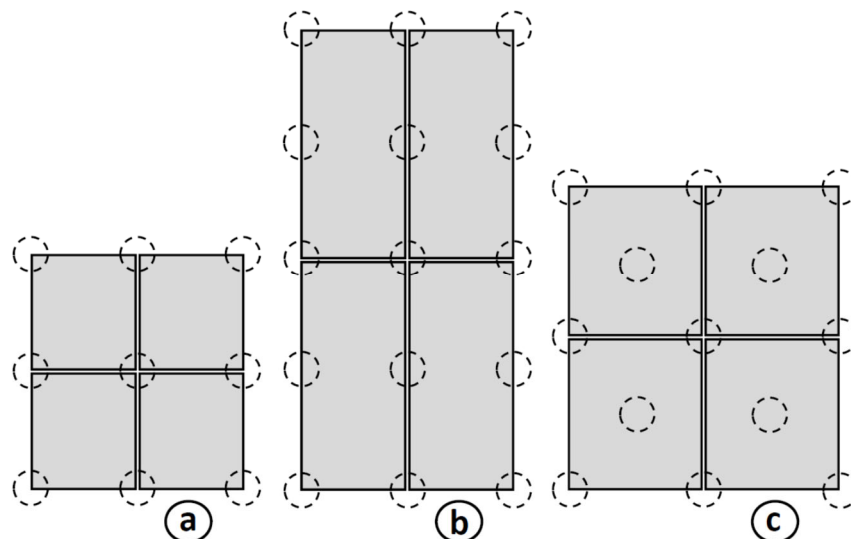


Bild 5: Verlegeschema Platten auf Stelzlager

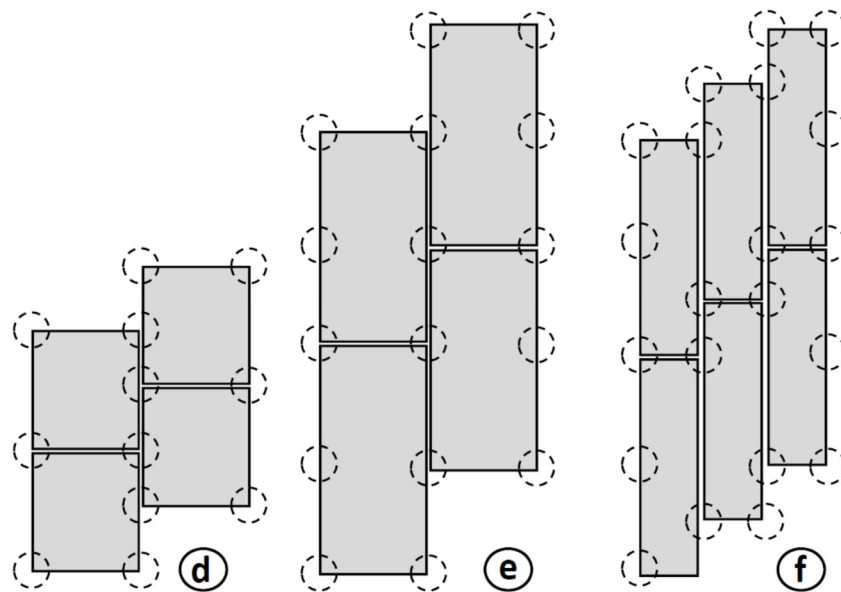


Bild 6: Verlegeschema Platten auf Stelzlager

Durch die Nachgiebigkeit der Stelzlager und der Unterkonstruktion ergeben sich bei mehr als vier Stelzlager komplizierte statische Systeme. Durch die Nachgiebigkeit lassen sich die Schnittgrößen nicht immer realitätsnah ermitteln. Lediglich die an vier Punkten gelagerte Platte führt zu eindeutigen Schnittgrößen und Bemessung. Bei der Nachgiebigkeit eine Lagers ergibt sich stets eine stabile und statisch bestimmte Lagerung der Platte auf drei Punkten.

Eine Lagerung auf mehr als vier Punkten führt nicht zwangsläufig zu einer erhöhten Sicherheit des Bodenbelages. Ein Bruch an der Mittelstützung und ein sicherer Zwischenstand (Bilder 7 bis 9) ist nicht zwangsläufig gegeben.

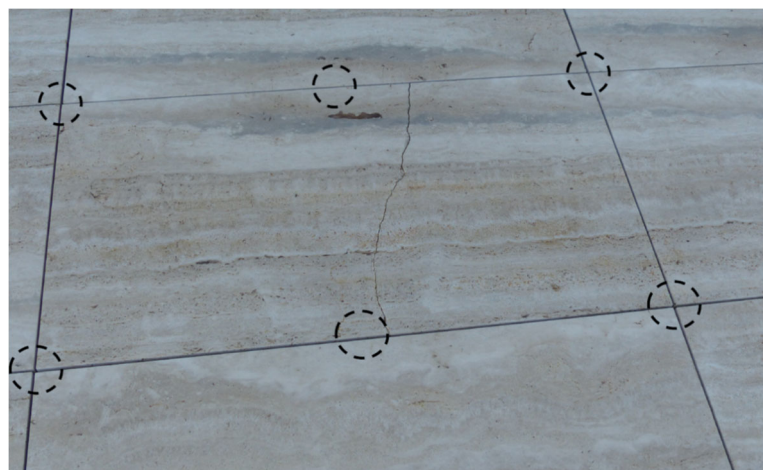


Bild 7: Schaden am Belag mit 6 Stelzlager

Je nach Höhe der Stelzlager ist eine Gefährdung von Personen bei einem Plattenbruch nicht ausgeschlossen.



Bild 8: Belag mit 6 Stelzlager



Bild 9: Belag mit 6 Stelzlager

2 Belastung

Bei einer handwerklichen Bemessung des Belages nach DIN EN 1341 wird die Belastung über eine fiktive Bruchlast multipliziert mit einem globalen Sicherheitsfaktor (Produkt aus den Teilsicherheiten der Belastung und des Materials) definiert.

Bei einer ingenieurmäßigen Bemessung wird die Belastung entsprechend der Nutzung nach DIN EN 1991-1-1 ermittelt. Die Bemessung erfolgt mit Teilsicherheiten für die Belastung und das Material.

2.1 DIN EN 1341

Die Bemessung von handwerklich ausgeführten Bodenbelägen erfolgt im Regelfall über den Nachweis der Bruchlast. Die erforderliche Bruchlast ist abhängig von der Nutzung der Fläche und der Lagerung der Platten. Dieses Rechenmodell ist Bestandteil sowohl des Merkblattes „Mechanisch hoch belastbare keramische Bodenbeläge“ als auch der DIN EN 1341. Die erforderliche Bruchlast korrespondiert nicht mit der Belastung nach EN 1991-1-1.

Für die Nutzung von Terrassenflächen und Balkonen ist nach DIN EN 1341 eine Bruchlast von 3,5 kN (Klasse 2) ohne Sicherheit erforderlich.

Klasse	Mindestbruchlast kN	Übliche Anwendung
0	keine Anforderung	Dekoration
1	0,75	Im Mörtelbett verlegte Platten, nur für Fußgängerbereiche
2	3,5	Fußgängerbereiche und Radwege
3	6,0	Gelegentliche Zufahrt von PKW, leichten Fahrzeugen und Motorrädern, Garageneinfahrten
4	9,0	Fußgängerzonen, Marktplätze, die gelegentlich von Liefer- und Rettungsfahrzeugen befahren werden
5	14,0	Fußgängerbereiche, die häufig von Schwerlasttransportern benutzt werden
6	25,0	Verkehrswege und Straßen, Tankstellen

Tabelle 1: Auszug DIN EN 1341

Der globale Sicherheitsfaktor ist abhängig von der Länge des Belages. Der Sicherheitsfaktor beträgt 3,0 bzw. 3,5 ab einer Länge des Belages von mehr als 600 mm.

Maß L mm	Sicherheitsfaktor (F_s)				
	Pflaster über		Pflaster über einen Spalt, gestützt		
	Beton mit Mörtel und Fugen (gebundene Bauweise)	Sand oder Gesteinskörnung (ungebundene Bauweise)	an 4 Seiten	an 2 Seiten	an 4 Ecken
≤ 600	1,2	1,8	2,4	2,7	3,0
> 600	1,8	2,4	2,7	3,1	3,5

Tabelle 2: Auszug DIN EN 1341

2.2 DIN EN 1991-1-1

Die Belastung (Tabelle 3) bei einer ingenieurmäßigen Berechnung ergibt sich entsprechend DIN EN 1991-1-1.

Kategorie	Nutzung	Beispiele	q_k kN/m ²	Q_k kN	
E	E1	Fabriken und Werkstätten, Ställe, Lager- räume und Zugänge, Flächen mit erheblichen Menschenansammlungen	Flächen in Fabriken und Werkstätten mit leichtem Betrieb und Flächen in Großviehställen	5,0	4,0
	E2		Lagerflächen, einschließlich Bibliotheken	6,0	7,0
	E3		Flächen in Fabriken und Werkstätten mit mittlerem oder schwerem Betrieb, Flächen mit regelmäßiger Nutzung durch erhebliche Menschenansammlungen, Tribünen ohne feste Bestuhlung.	7,5	10,0
T	Treppen und Treppenpodeste	T1	Treppen und Treppenpodeste der Kategorie A und B1 ohne nennenswerten Publikumsverkehr	3,0	2,0
		T2	Treppen und Treppenpodeste der Kategorie B1 mit erheblichen Publikumsverkehr, B2 bis E sowie alle Treppen, die als Fluchtweg dienen	5,0	2,0
		T3	Zugänge und Treppen von Tribünen ohne feste Sitzplätze, die als Fluchtweg dienen	7,5	3,0
Z	Zugänge, Balkone und Ähnliches	Dachterrassen, Laubengänge, Loggien usw., Balkone und Ausstiegspodest.	4,0	2,0	

Falls der Nachweis der örtlichen Mindesttragfähigkeit erforderlich ist (z.B. bei Bauteilen ohne ausreichende Querverteilung der Lasten), so ist er mit den charakteristischen Werten für die Einzellast Q_k ohne Überlagerung mit der Flächenlast q_k zu führen. Die Aufstandsfläche für Q_k umfasst ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 5 cm.

Tabelle 3: Auszug DIN 1991-1-1

Die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte (Tabelle 4) ergeben sich für die Belastung entsprechend DIN EN 1990 zu:

Belastung		
Teilsicherheit Belastung	γ_F	1,5
Material		
Werkstein	γ_M	1,8
Feinsteinzeug	γ_M	1,3

Tabelle 4: Teilsicherheitsbeiwerte

3 Materialkennwerte

Als Grundlage für die Bemessung des Belages dient die charakteristische (unterer Erwartungswert) Biegefestigkeit. Für Werksteine wird dieser Wert im Rahmen des Nachweises der Konformität des Produktes ausgewiesen.

Finden sich jedoch in den Datenblättern lediglich Angaben zum Mittelwert der Biegefestigkeit, so muss der charakteristische Wert näherungsweise ermittelt werden.

Entsprechend DIN EN 1341 ist die Berechnung des unteren Erwartungswertes mit einer logarithmischen Normalverteilung durchzuführen. Der untere Erwartungswert entspricht dem 5%-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung bei einem Vertrauensbereich von 75 %. Setzt man bei den verwendeten Materialien eine Varianz der Prüfwerte von 10% voraus, so ergibt sich für eine Serie von 10 Prüfkörpern folgender charakteristischer Wert auf der Basis des Mittelwertes zu:

$$\sigma_{Rk} = \sigma_{Rm} \cdot \left(1 - \frac{v}{100} K_S\right)$$

n	K_S	n	K_S
3	3,15	10	2,10
4	2,68	15	1,99
5	2,46	20	1,93
6	2,34	30	1,87
7	2,25	40	1,83
8	2,19	50	1,81
9	2,14	∞	1,64

Tabelle 5: K_S - Werte

Für eine Serie von $n = 10$ Prüfkörpern beträgt der Wert $K_S = 2,1$. Hieraus ergibt sich der charakteristische Wert der Biegefestigkeit zu:

$$\sigma_{Rk} = \sigma_{Rm} \cdot \left(1 - \frac{10}{100} 2,1\right) = 0,79 \cdot \sigma_{Rm} \quad (1)$$

K_S	Faktor Statistik
n	Anzahl Prüfkörper
v (%)	Varianz Prüfwerte
σ_{Rm} (N/mm ²)	mittlere Biegefestigkeit
σ_{Rk} (N/mm ²)	charakteristische Biegefestigkeit

4 Berechnung Belag

Für die Berechnung von Belägen auf Stelzlagern werden drei verschiedene Verfahren und deren Unterschied aufgezeigt.

4.1 Berechnung nach DIN EN 1341

Entsprechend dem Regelwerk ergibt sich die erforderliche Plattendicke zu:

$$t = \sqrt{\frac{1500 \cdot P \cdot L \cdot F_S}{W \cdot R_f}} \quad (2)$$

Die erforderliche charakteristische Biegefestigkeit des Belages ergibt sich zu:

$$P = 3,5 \text{ kN} \quad (\text{DIN EN 1341, Klasse 2, Tabelle A2})$$

$$\begin{aligned} R_f &= \frac{1500 \cdot P \cdot L \cdot F_S}{W \cdot t^2} \\ &= \frac{1500 \cdot 3,5 \cdot L \cdot F_S}{W \cdot t^2} \end{aligned} \quad (3)$$

t (mm)	Dicke der Platte
P (kN)	Bruchlast für die voraussichtliche Anwendung der Pflasterung;
L (mm)	Länge der Platte
W (mm)	Breite der Platte
F_S	Sicherheitsfaktor
R_f (N/mm ²)	erforderliche charakteristische Biegefestigkeit

Eine Bemessungshilfe für unterschiedliche Plattenformate (Seitenverhältnis $\varepsilon = B / L$) und Dicken befindet sich in der Anlage A1.

4.2 Vereinfachte Berechnung

Für die Berechnung der Schnittgrößen wird eine Lastausbreitung (Bild 10) bis zur Mitte der Plattendicke unter einem Neigungswinkel von 45 Grad berücksichtigt. Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt sowohl für eine Randbelastung als auch für eine Belastung in Plattenmitte.

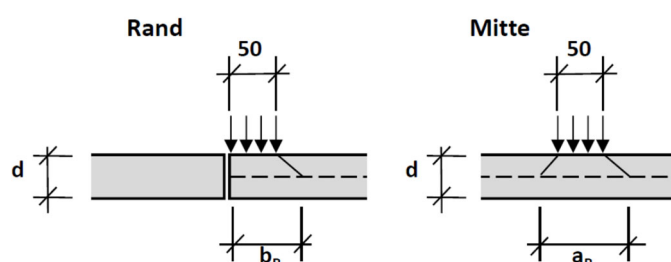


Bild 10: rechnerische Aufstandsfläche

Die Berechnung (Bild 11) erfolgt für einen Träger auf zwei Stützen. In der Mitte des Trägers wird die mitwirkende Breite (Bilder 12 und 13) für den Nachweis der erforderlichen Biegespannung ermittelt.

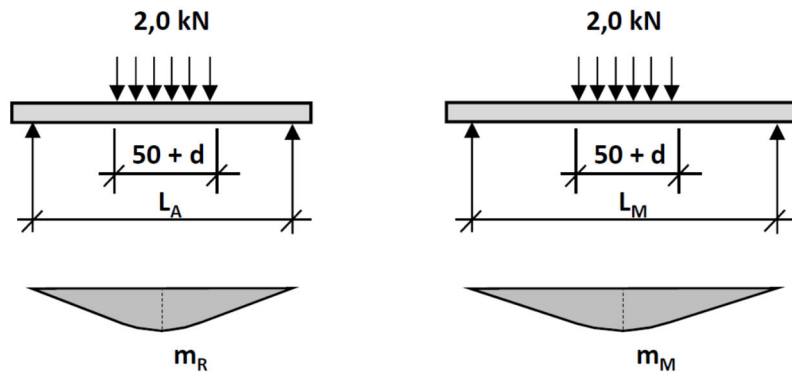


Bild 11: statisches System

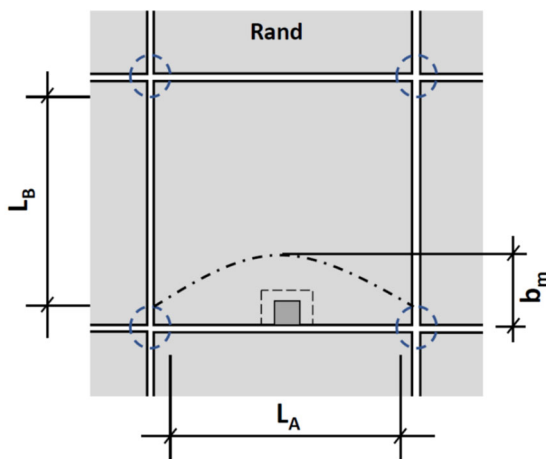


Bild 12: Randbelastung

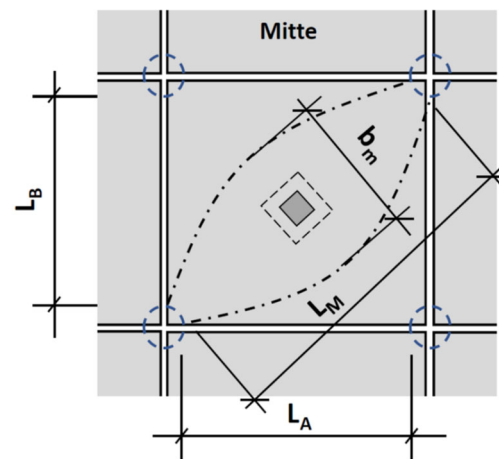


Bild 13: Belastung Belagmitte

Beanspruchung Rand: $L_A = L - 2 \cdot a$ (4)

$L_B = B - 2 \cdot a$ (5)

$b_m = \frac{L_A}{5} + 50 + \frac{d}{2}$ (6)

$m_R = \frac{1000 \cdot F \cdot (L_A - 50 - d)}{4 \cdot b_m} = \frac{250 \cdot F \cdot (L_A - 50 - d)}{b_m}$

$m_{R,2} = \frac{500 \cdot L_A}{b_m} \quad (F = 2,0 \text{ kN})$ (7)

$$\sigma_{Rk} = \frac{6 \cdot m_R}{d^2} \cdot \gamma_F \cdot \gamma_M \quad (\text{erforderliche Biegefestigkeit}) \quad (8)$$

Beanspruchung Mitte:

$$L_M = \sqrt{L_A^2 + L_B^2} \quad (9)$$

$$b_m = \frac{L_M}{2,5} + 50 + d \quad (10)$$

$$m_M = \frac{1000 \cdot F \cdot (L_M - 50 - d)}{4 \cdot b_m} = - \frac{250 \cdot F \cdot (L_M - 50 - d)}{b_m}$$

$$m_{M,2} = \frac{500 \cdot L_M}{b_m} \quad (F = 2,0 \text{ kN}) \quad (11)$$

$$\sigma_{Rk} = \frac{6 \cdot m_M}{d^2} \cdot \gamma_F \cdot \gamma_M \quad (\text{erforderliche Biegefestigkeit}) \quad (12)$$

d (mm)	Dicke der Platte
F (kN)	Punktbelastung nach DIN EN 1991-1-1
L (mm)	Länge der Platte
B (mm)	Breite der Platte
a (mm)	Randabstand Stelzlager
L_A (mm)	Stützweite längs
L_B (mm)	Stützweite quer
L_M (mm)	Stützweite Diagonal
γ_F	Teilsicherheit Belastung
γ_M	Teilsicherheit Material
m_R (Nm/m)	Biegemoment längs
m_M (Nm/m)	Biegemoment diagonal
σ_{Rk} (N/mm ²)	erforderliche charakteristische Biegefestigkeit

Maßgebend für die Bemessung des Belages ist stets die Belastung am Plattenrand. Eine Bemessungshilfe für unterschiedliche Plattenformate (Seitenverhältnis $\varepsilon = B / L$) und Dicken befindet sich in der Anlage A2. Für den Randabstand der Stelzlager wird ein Wert von 5% der Plattenlänge angenommen.

4.3 Ingenieurmäßige Berechnung

Die ingenieurmäßige Bemessung von Belägen auf Stelzlager kann mit Hilfe von FE-Programmen erfolgen. Real vorhandene Systeme können unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Stelzlager, für beliebige Lagerungen und unter Ausschluss von Zugkräften in den Stelzlager berechnet werden.

Für Werksteine und Feinsteinzeug befinden sich Bemessungshilfen für unterschiedliche Plattenformate (Seitenverhältnis $\varepsilon = B / L$) und Dicken in den Anlagen A3 und A4. Für den Randabstand der Stelzlager wird ein Wert von 5% der Plattenlänge angenommen.

4.4 Ersatzsysteme

Für die angewandten Lagerungen (Bilder 5 und 6) von Platten auf Stelzlager werden Ersatzsysteme ermittelt, die eine einfache konstruktive Ausbildung von Belägen auf Stelzlager ermöglichen. Bei der Ermittlung der Ersatzsysteme werden Zugkräfte in den Stelzlager ausgeschlossen. Als Ersatzsystem wird eine Platte auf vier Eckstützen gewählt.

4.4.1 Platten mit 6 Stelzlager

Beläge mit 6 Stelzlager können lediglich die Stützweite reduzieren eine Durchlaufwirkung kann aufgrund der abhebenden Lager nicht genutzt werden.

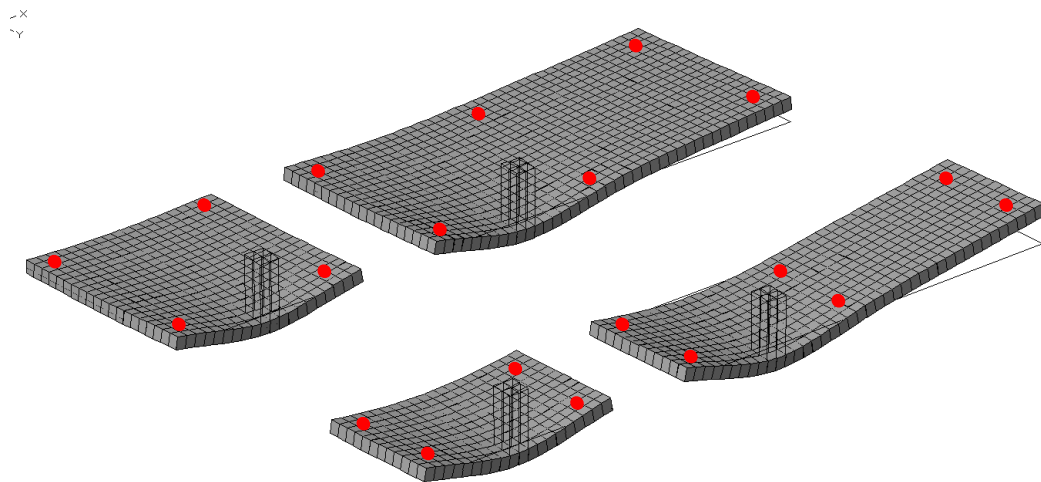


Bild 14: Verformung Belag

Als Ersatzsystem ergibt sich eine an vier Punkten gelagerte Platte mit dem gleichen Abstand der Stelzlager wie auf der Längsseite der Platte mit sechs Stelzlager.

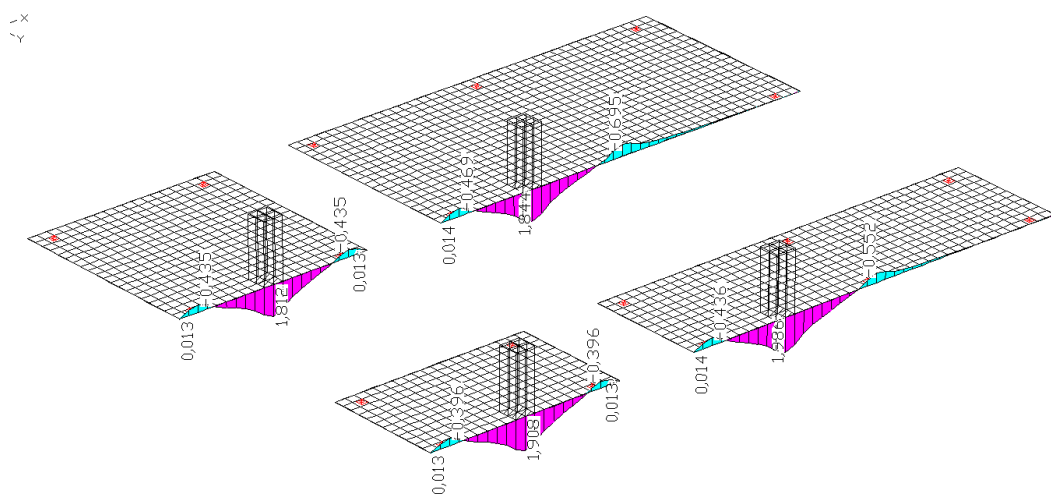


Bild 15: Biegemoment Belag

Das Ersatzsystem ist im Bild 16 dargestellt.

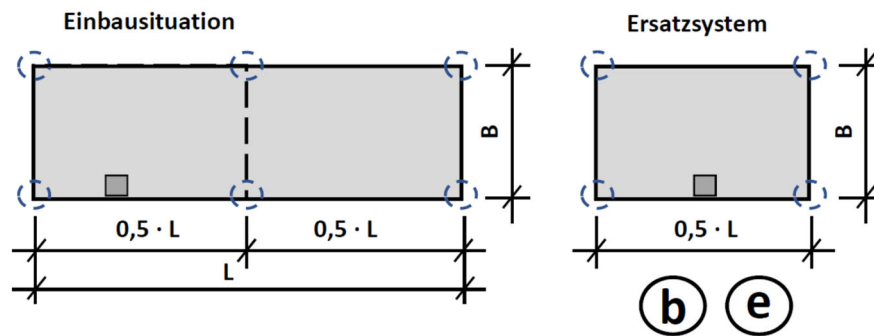


Bild 16: Ersatzsystem Belag

4.4.2 Platten mit 5 Stelzlager

Beläge mit 5 Stelzlager besitzen durch das Abheben der Platte von den äußeren Stelzlager die gleiche Tragfähigkeit wie Beläge auf vier Stelzlager. Das zusätzliche Stelzlager kann somit technisch nicht genutzt werden.

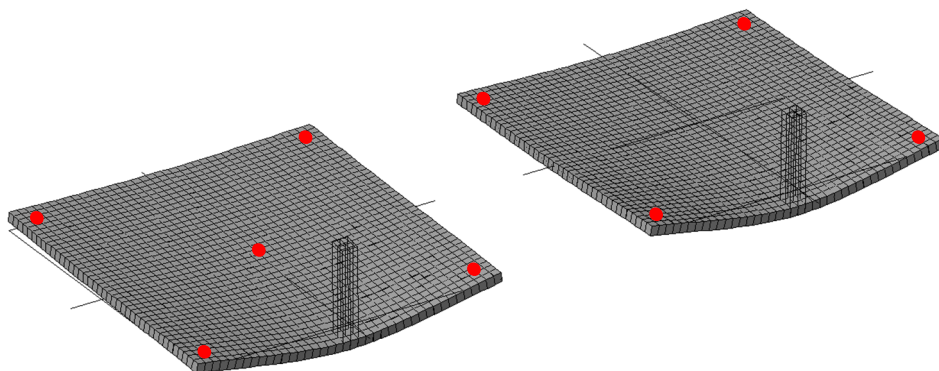


Bild 17: Verformung Belag (Stelzlager Plattenmitte)

Als Ersatzsystem ergibt sich eine an vier Punkten gelagert Platte ohne zusätzliches Mittel- oder Randstelzlager.

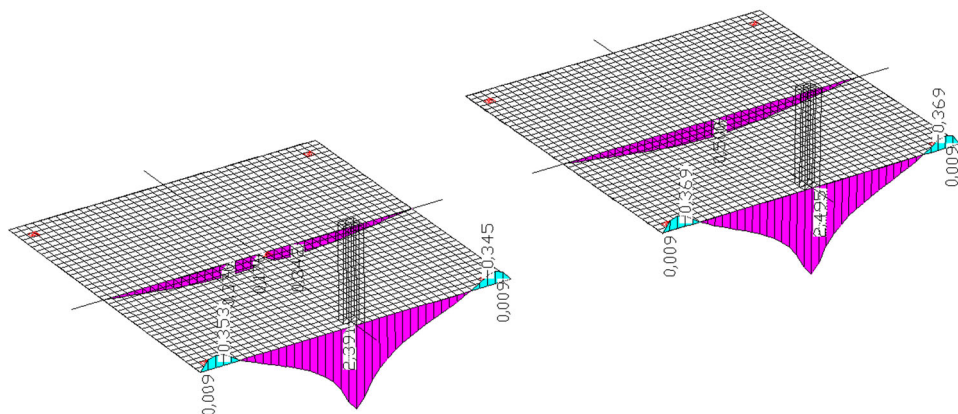


Bild 18: Biegemoment Belag (Stelzlager Plattenmitte)

Die Ersatzsysteme sind in den Bildern 19 und 22 dargestellt.

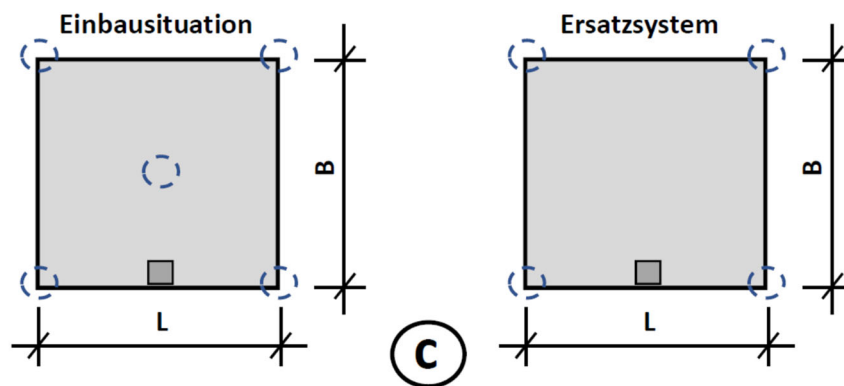


Bild 19: Ersatzsystem Belag

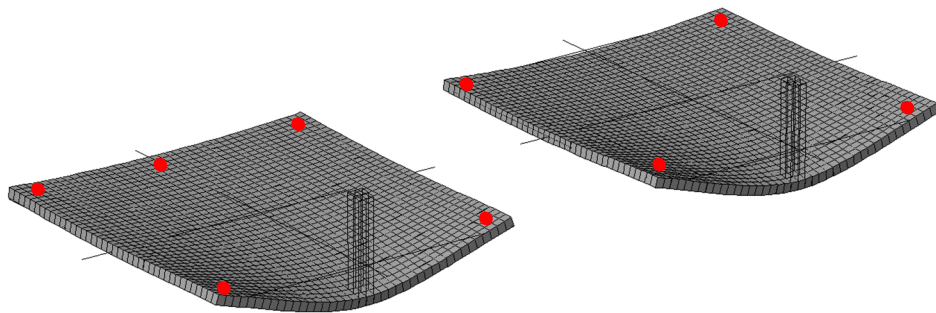


Bild 20: Verformung Belag (Stelzlager Mitte Plattenrand)

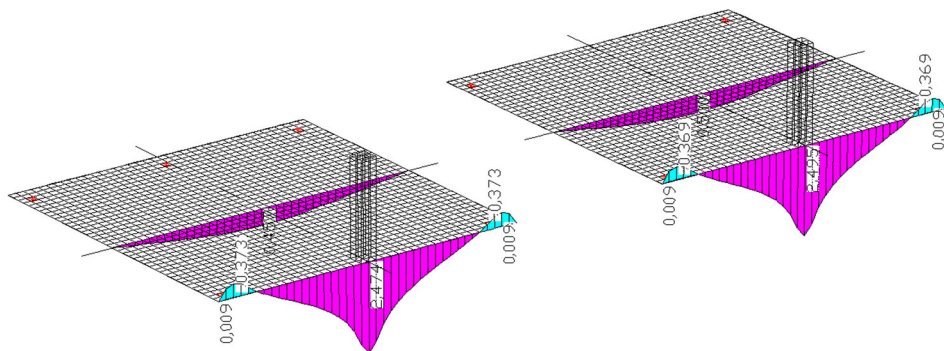


Bild 21: Biegemoment Belag (Stelzlager Mitte Plattenrand)

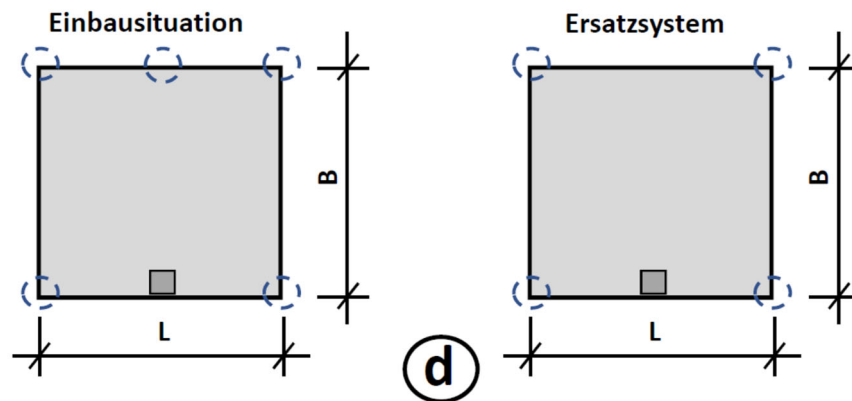


Bild 22: Ersatzsystem Belag

4.4.3 Platten mit Läuferverband

Die Verlegung von Belägen im Läuferverband führt zu 6 Stelzlager mit unsymmetrischer Anordnung der Stelzlager. Bei einer Randbelastung stellt sich durch das Abheben der Platte von den Eckstelzen eine Lagerung auf drei Punkten ein.

Als Ersatzsystem ergibt sich eine an vier Punkten gelagert Platte mit einem Ersatzabstand der Stelzlager, der zu gleichen Beanspruchung führt wie eine Platte mit sechs Stelzlager.

Die Ersatzsysteme sind in den Bildern 23 und 24 dargestellt.

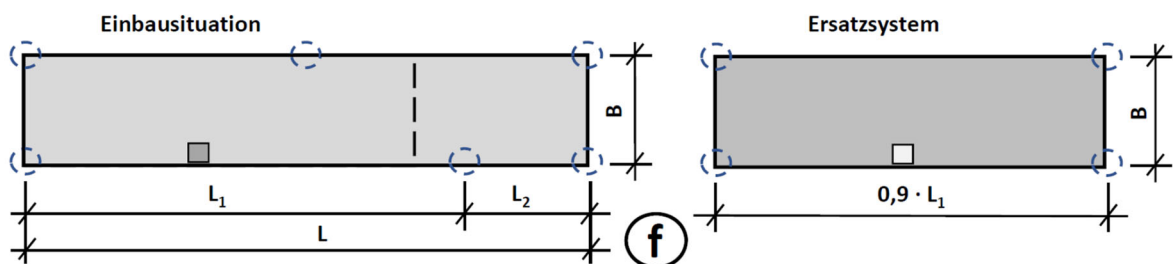


Bild 23: Ersatzsystem Belag

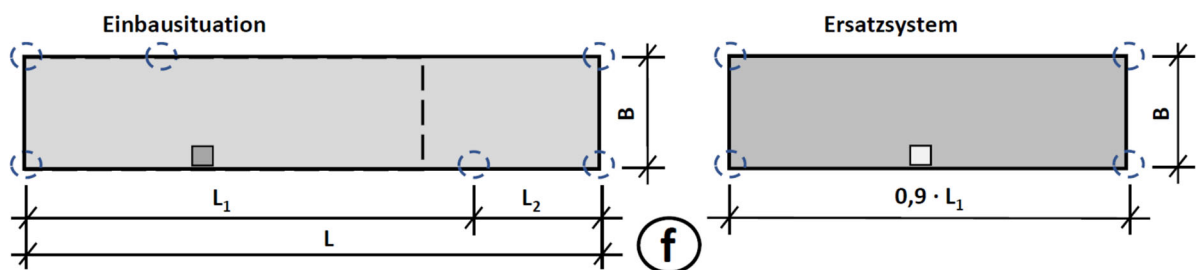


Bild 24: Ersatzsystem Belag

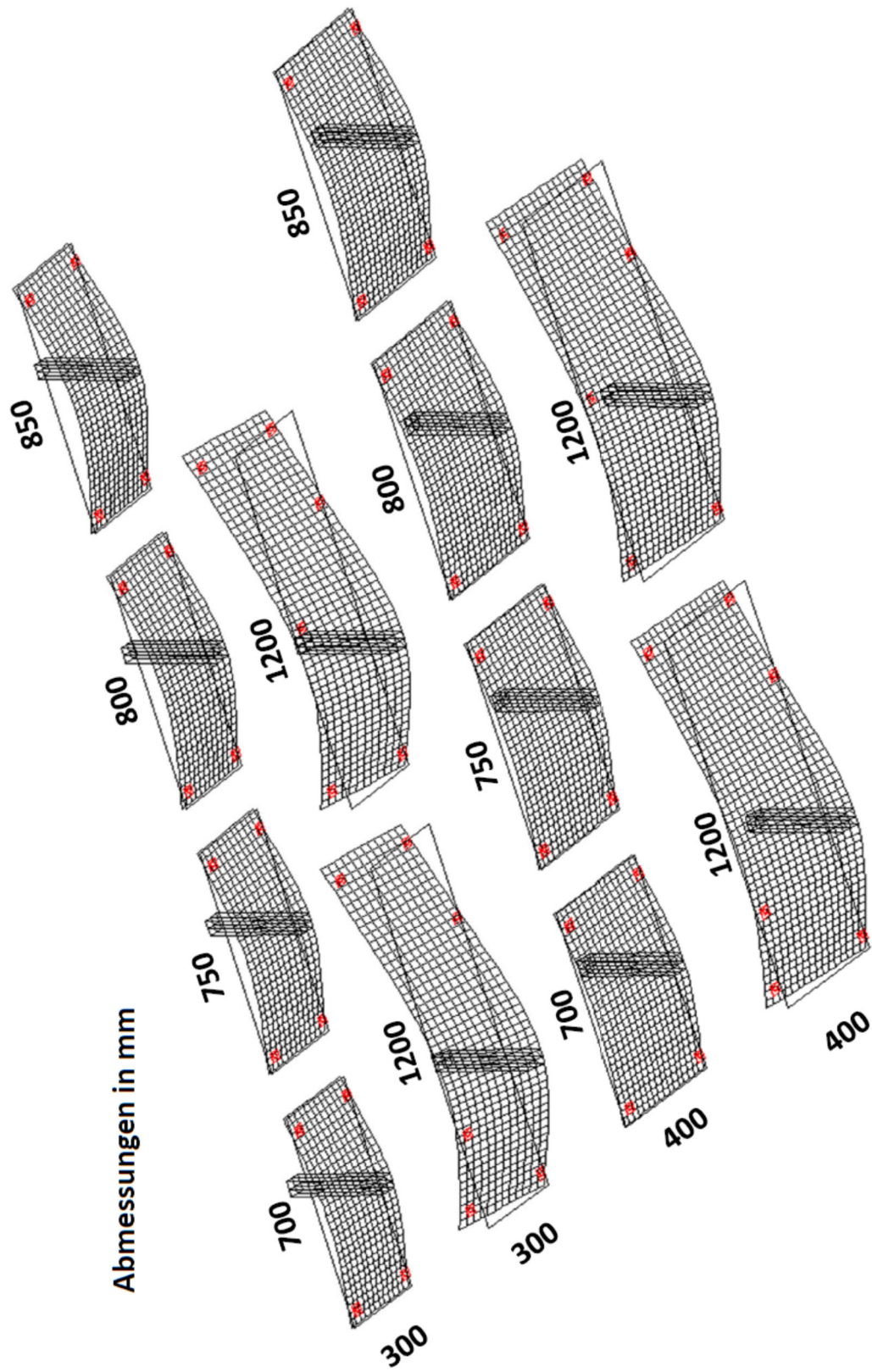


Bild 25: Verformung Belag (überhöht)

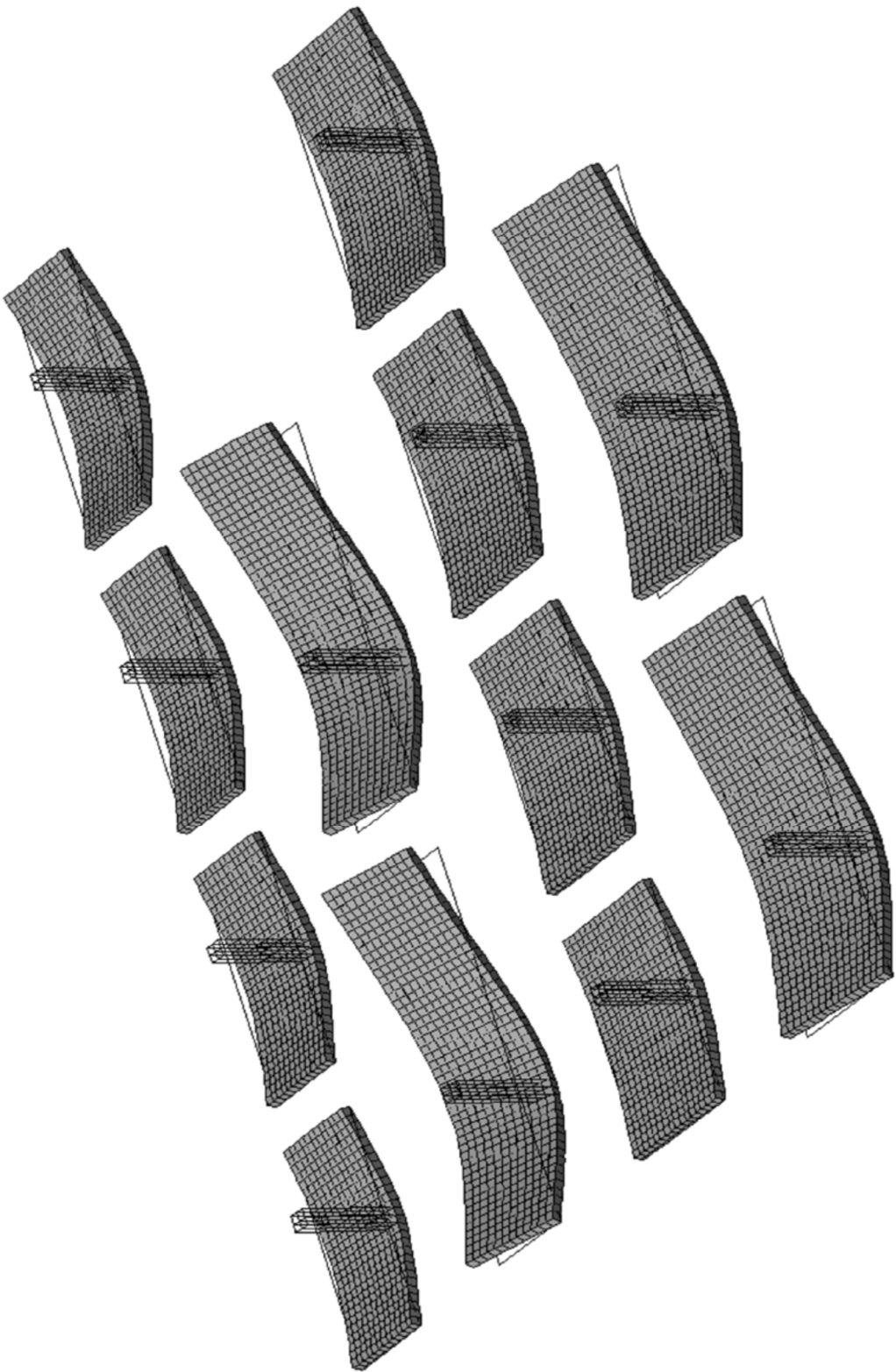


Bild 26: Verformung Belag (überhöht)

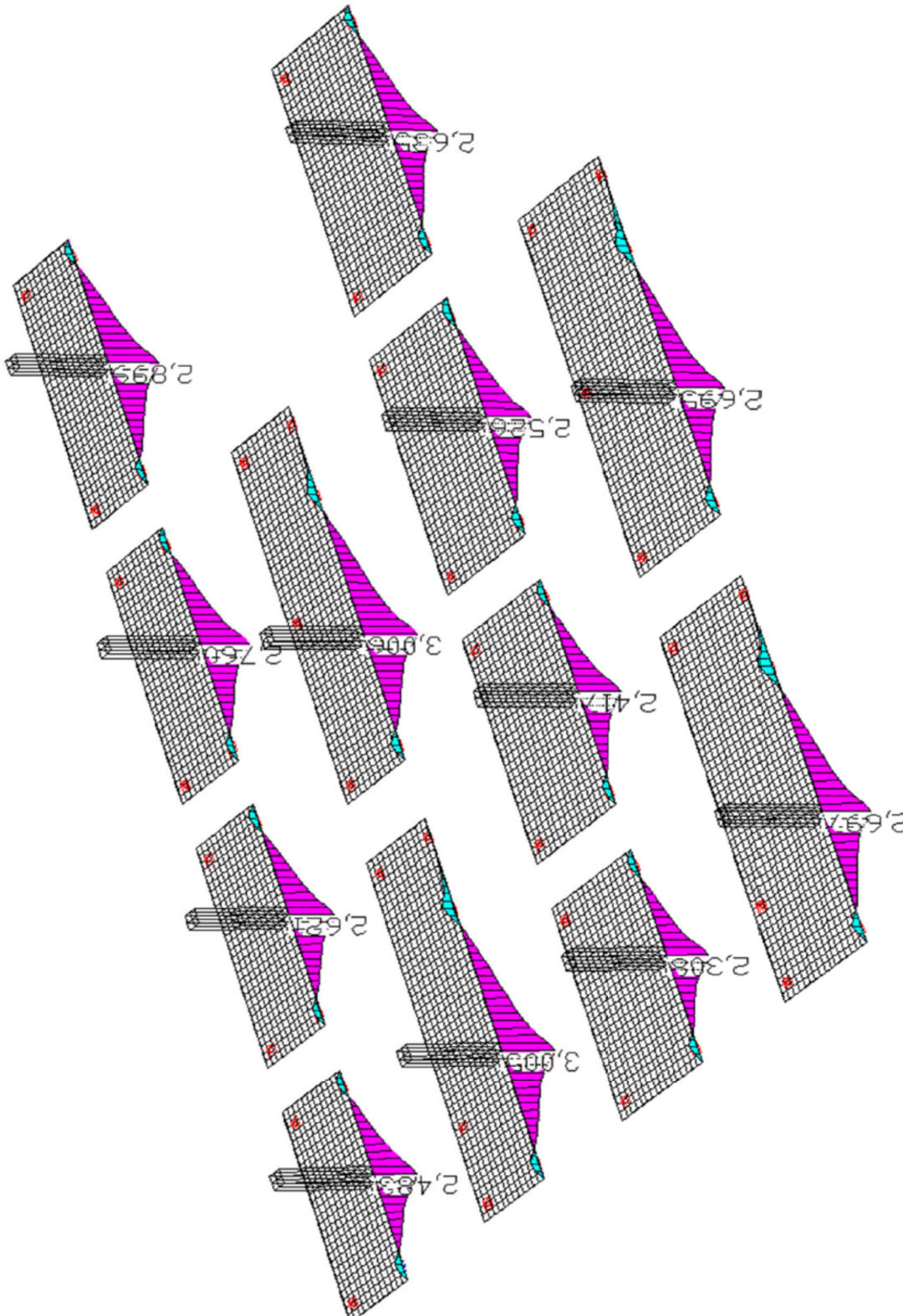


Bild 27: Biegemoment Belag

4.5 Vergleich Bemessungsverfahren

Am Beispiel einer Belagplatte mit den Abmessungen 600 x 600 x 40 mm wird der Unterschied der jeweiligen Bemessungsverfahren aufgezeigt. Berücksichtigt wird das Plattenformat über das Seitenverhältnis $\varepsilon = B / L$.

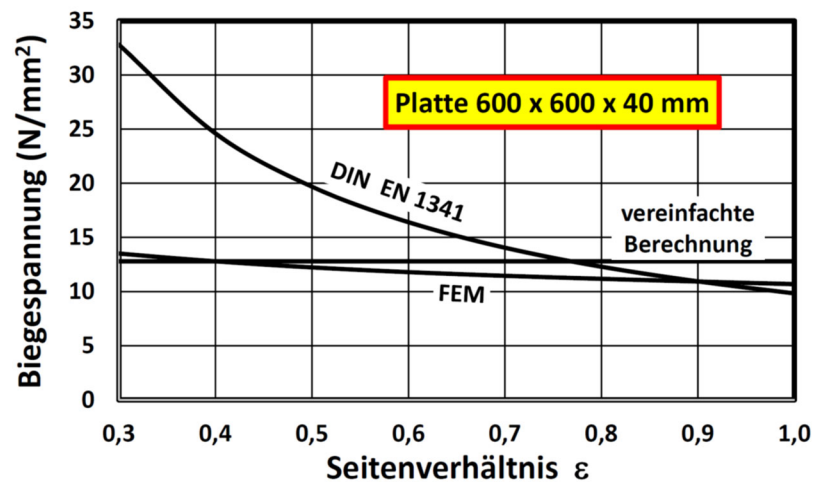


Bild 28: Vergleich Bemessungsverfahren

Es zeigt sich (Bild 28), dass die vereinfachte Berechnung und die Berechnung mit FEM eine qualitativ gute Übereinstimmung aufzeigen. Die Bemessung nach DIN EN 1341 führt bei rechteckigen Formaten zu einer größeren Plattendicke.

5 Literaturhinweise

- [1] EN 1341 Platten aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren
- [2] EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [3] EN 1991-1-1 Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
- [4] BTI 1.4 Bodenbeläge außen
Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V.
Sanderstrasse 4, 97070 Würzburg
- [5] BIV-Merkblatt 6.01
Bodenbeläge im Außenbereich
Bundesverband Deutscher Steinmetze
Weißkirchener Weg 16, 60439 Frankfurt am Main
- [6] Hoch belastete Beläge
Mechanisch hoch belastbare keramische Bodenbeläge
Fachverband Fliesen und Naturstein
Im Zentralverband Deutsches Baugewerbe e.V., Berlin
- [7] Belagskonstruktionen mit Fliesen und Platten außerhalb von Gebäuden
Fachverband Fliesen und Naturstein
Im Zentralverband Deutsches Baugewerbe e.V., Berlin
- [8] Merkblatt Nr. 002
Punktlagerbauweise mit Plattenbelägen aus Beton, Keramik und Naturstein
Qualitätssicherung Pflasterbauarbeiten e.V.
Großwallstädter Str. 7a, 63843 Niedernberg

Anlagen (Informativ)

A Bemessungstabellen

A1: Nachweis nach DIN EN 1341

Nachweis nach DIN EN 1341 (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
20	1,0	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	45,9	45,9	45,9	45,9
	0,9	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	51,0	51,0	51,0	51,0
	0,8	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2	57,4	57,4	57,4	57,4
	0,7	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	65,6	65,6	65,6	65,6
	0,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	73,1	73,1	73,1	73,1
	0,5	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	91,9	91,9	91,9	91,9
25	1,0	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	29,4	29,4	29,4	29,4
	0,9	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	32,7	32,7	32,7	32,7
	0,8	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	36,8	36,8	36,8	36,8
	0,7	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	42,0	42,0	42,0	42,0
	0,6	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	46,8	46,8	46,8	46,8
	0,5	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4	58,8	58,8	58,8	58,8
30	1,0	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	20,4	20,4	20,4	20,4
	0,9	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	22,7	22,7	22,7	22,7
	0,8	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	25,5	25,5	25,5	25,5
	0,7	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	29,2	29,2	29,2	29,2
	0,6	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	32,5	32,5	32,5	32,5
	0,5	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	40,8	40,8	40,8	40,8
35	1,0	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	15,0	15,0	15,0	15,0
	0,9	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	16,7	16,7	16,7	16,7
	0,8	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	18,8	18,8	18,8	18,8
	0,7	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	21,4	21,4	21,4	21,4
	0,6	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	23,9	23,9	23,9	23,9
	0,5	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	30,0	30,0	30,0	30,0
40	1,0	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	11,5	11,5	11,5	11,5
	0,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	12,8	12,8	12,8	12,8
	0,8	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	14,4	14,4	14,4	14,4
	0,7	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	16,4	16,4	16,4	16,4
	0,6	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	19,2	19,2	19,2	19,2
	0,5	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	23,0	23,0	23,0	23,0
45	1,0	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	9,1	9,1	9,1	9,1
	0,9	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	10,1	10,1	10,1	10,1
	0,8	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	11,3	11,3	11,3	11,3
	0,7	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	13,0	13,0	13,0	13,0
	0,6	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	14,4	14,4	14,4	14,4
	0,5	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	18,2	18,2	18,2	18,2
50	1,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	7,4	7,4	7,4	7,4
	0,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,2	8,2	8,2	8,2
	0,8	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	9,2	9,2	9,2	9,2
	0,7	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	10,5	10,5	10,5	10,5
	0,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,7	11,7	11,7	11,7
	0,5	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	14,7	14,7	14,7	14,7

Tabelle A1

A2: Nachweis mit vereinfachten Verfahren

Vereinfachter Nachweis (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
20	1,0	44,5	48,1	51,3	54,1	56,7	58,9	61,0	62,8	64,5
	0,9	44,5	48,1	51,3	54,1	56,7	58,9	61,0	62,8	64,5
	0,8	44,5	48,1	51,3	54,1	56,7	58,9	61,0	62,8	64,5
	0,7	44,5	48,1	51,3	54,1	56,7	58,9	61,0	62,8	64,5
	0,6	44,5	48,1	51,3	54,1	56,7	58,9	61,0	62,8	64,5
	0,5	44,5	48,1	51,3	54,1	56,7	58,9	61,0	62,8	64,5
25	1,0	27,5	29,8	31,9	33,7	35,4	36,8	38,2	39,4	40,5
	0,9	27,5	29,8	31,9	33,7	35,4	36,8	38,2	39,4	40,5
	0,8	27,5	29,8	31,9	33,7	35,4	36,8	38,2	39,4	40,5
	0,7	27,5	29,8	31,9	33,7	35,4	36,8	38,2	39,4	40,5
	0,6	27,5	29,8	31,9	33,7	35,4	36,8	38,2	39,4	40,5
	0,5	27,5	29,8	31,9	33,7	35,4	36,8	38,2	39,4	40,5
30	1,0	18,4	20,0	21,5	22,8	23,9	25,0	25,9	26,8	27,6
	0,9	18,4	20,0	21,5	22,8	23,9	25,0	25,9	26,8	27,6
	0,8	18,4	20,0	21,5	22,8	23,9	25,0	25,9	26,8	27,6
	0,7	18,4	20,0	21,5	22,8	23,9	25,0	25,9	26,8	27,6
	0,6	18,4	20,0	21,5	22,8	23,9	25,0	25,9	26,8	27,6
	0,5	18,4	20,0	21,5	22,8	23,9	25,0	25,9	26,8	27,6
35	1,0	13,0	14,3	15,3	16,3	17,1	17,9	18,6	19,3	19,9
	0,9	13,0	14,3	15,3	16,3	17,1	17,9	18,6	19,3	19,9
	0,8	13,0	14,3	15,3	16,3	17,1	17,9	18,6	19,3	19,9
	0,7	13,0	14,3	15,3	16,3	17,1	17,9	18,6	19,3	19,9
	0,6	13,0	14,3	15,3	16,3	17,1	17,9	18,6	19,3	19,9
	0,5	13,0	14,3	15,3	16,3	17,1	17,9	18,6	19,3	19,9
40	1,0	9,6	10,6	11,4	12,1	12,8	13,4	14,0	14,5	15,9
	0,9	9,6	10,6	11,4	12,1	12,8	13,4	14,0	14,5	15,9
	0,8	9,6	10,6	11,4	12,1	12,8	13,4	14,0	14,5	15,9
	0,7	9,6	10,6	11,4	12,1	12,8	13,4	14,0	14,5	15,9
	0,6	9,6	10,6	11,4	12,1	12,8	13,4	14,0	14,5	15,9
	0,5	9,6	10,6	11,4	12,1	12,8	13,4	14,0	14,5	15,9
45	1,0	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
	0,9	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
	0,8	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
	0,7	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
	0,6	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
	0,5	7,3	8,1	8,7	9,3	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
50	1,0	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,9	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,8	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,7	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,6	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,5	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2

Tabelle A2

A3: Nachweis auf Basis FEM (Werkstein)

Nachweis mit FEM (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
20	1,0	40,5	42,4	44,1	45,7	47,2	48,7	50,1	51,4	52,7
	0,9	41,3	43,2	44,9	46,5	48,1	49,5	50,9	52,2	53,5
	0,8	42,2	44,1	45,8	47,4	49,0	50,4	51,8	56,2	54,4
	0,7	43,3	45,2	46,9	48,5	50,1	51,5	52,9	54,2	55,5
	0,6	44,6	46,4	48,2	49,8	51,3	52,8	54,2	55,5	56,8
	0,5	46,1	48,0	49,7	51,3	52,9	54,3	55,7	57,1	58,3
25	1,0	25,3	26,4	27,5	28,5	29,5	30,4	31,2	32,1	32,9
	0,9	25,8	26,9	28,0	29,0	30,0	30,9	31,7	32,6	33,4
	0,8	26,4	27,5	28,6	29,6	30,6	31,5	32,3	33,2	34,0
	0,7	27,0	28,2	29,3	30,3	31,3	32,2	33,0	33,9	34,7
	0,6	27,9	29,0	30,1	31,1	32,1	33,0	33,8	34,7	35,5
	0,5	28,8	30,0	31,1	32,1	33,1	34,0	34,8	35,7	36,5
30	1,0	17,1	17,9	18,6	19,3	20,0	20,6	21,2	21,7	22,3
	0,9	17,5	18,3	19,0	19,7	20,3	20,9	21,5	22,1	22,6
	0,8	17,9	18,7	19,4	20,1	20,7	21,3	21,9	22,5	23,0
	0,7	18,3	19,1	19,9	20,6	21,2	21,8	22,4	23,0	23,5
	0,6	18,9	19,7	20,4	21,1	21,8	22,4	23,0	23,5	24,1
	0,5	19,6	20,4	21,1	21,8	22,4	23,1	23,7	24,2	24,8
35	1,0	12,3	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,2	15,6	16,0
	0,9	12,6	13,1	13,6	14,1	14,6	15,0	15,5	15,9	16,3
	0,8	12,9	13,4	13,9	14,4	14,9	15,3	15,8	16,2	16,5
	0,7	13,2	13,8	14,3	14,8	15,2	15,7	16,1	16,5	16,9
	0,6	13,6	14,1	14,7	15,2	15,7	16,1	16,5	16,9	17,3
	0,5	14,1	14,7	15,2	15,7	16,2	16,6	17,0	17,4	17,8
40	1,0	9,2	9,6	10,0	10,4	10,7	11,1	11,4	11,7	12,0
	0,9	9,4	9,8	10,2	10,6	10,9	11,3	11,6	11,9	12,2
	0,8	9,6	10,1	10,5	10,8	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4
	0,7	9,9	10,3	10,7	11,1	11,4	11,8	12,1	12,4	12,7
	0,6	10,2	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,4	12,7	13,0
	0,5	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,5	12,8	13,1	13,4
45	1,0	7,1	7,5	7,8	8,0	8,3	8,6	8,8	9,0	9,3
	0,9	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,7	9,0	9,2	9,4
	0,8	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	8,9	9,2	9,4	9,6
	0,7	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,1	9,4	9,6	9,8
	0,6	7,9	8,3	8,6	8,8	9,1	9,4	9,6	9,9	10,1
	0,5	8,2	8,6	8,9	9,1	9,4	9,7	9,9	10,2	10,4
50	1,0	5,7	5,9	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
	0,9	5,8	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5
	0,8	5,9	6,2	6,4	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,6
	0,7	6,1	6,4	6,6	6,8	7,1	7,3	7,5	7,6	7,8
	0,6	6,3	6,6	6,8	7,0	7,3	7,5	7,7	7,8	8,0
	0,5	6,6	6,8	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3

Tabelle 5

A4: Nachweis auf Basis FEM (Feinsteinzeug)

Nachweis mit FEM (Feinsteinzeug)											
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm²)											
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)									
		400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
20	1,0	29,1	30,5	31,7	32,9	34,0	35,0	36,0	37,0	37,9	39,7
	0,9	29,8	31,1	32,4	33,5	34,6	35,7	36,7	37,7	38,6	40,3
	0,8	30,5	31,8	33,1	34,3	35,4	36,4	37,4	38,4	39,3	41,1
	0,7	31,4	32,7	33,9	35,1	36,2	37,3	38,3	39,3	40,2	41,9
	0,6	32,4	33,7	35,0	36,1	37,3	38,3	39,3	40,3	41,2	43,0
	0,5	33,6	34,9	36,2	37,4	38,5	39,6	40,6	41,5	42,5	44,2
	0,4	35,2	36,5	37,8	38,9	40,1	41,1	42,1	43,1	44,0	45,8
	0,3	37,4	38,6	39,9	41,1	42,2	43,2	44,3	45,2	46,1	47,9

Tabelle A4

B Beispiele

B1: Werksteinplatte (quadratisches Format)

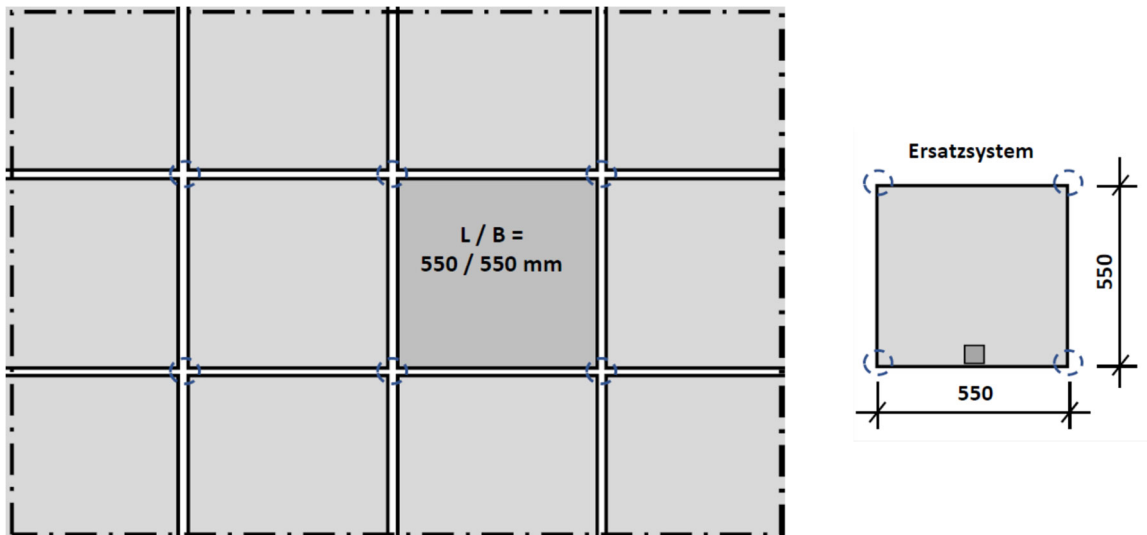


Bild B1: Abmessungen

Belastung: Die Berechnung erfolgt nach drei verschiedenen Verfahren für eine Werksteinplatte mit einer Dicke von 50 mm.

DIN EN 1991-1-1 Punktbelastung $F = 2 \text{ kN}$
 Lastsicherheit $\gamma_F = 1,5$
 Materialsicherheit $\gamma_M = 1,8$

DIN EN 1341 Punktbelastung $P = 3,5 \text{ kN}$
 Sicherheitsfaktor $F_s = 3,0$

Die erforderliche charakteristische Biegefestigkeit ergibt sich zu:

Nachweis nach DIN EN 1341 (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ϵ	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
50	1,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	7,4	7,4	7,4	7,4
	0,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,2	8,2	8,2	8,2
	0,8	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	9,2	9,2	9,2	9,2
	0,7	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	10,5	10,5	10,5	10,5
	0,6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,7	11,7	11,7	11,7
	0,5	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	14,7	14,7	14,7	14,7

Auszug Tabelle A1

Vereinfachter Nachweis (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
50	1,0	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,9	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,8	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,7	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,6	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2
	0,5	5,7	6,3	6,9	7,4	7,8	8,2	8,5	8,9	9,2

Auszug Tabelle A2

Nachweis mit FEM (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
50	1,0	5,7	5,9	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
	0,9	5,8	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5
	0,8	5,9	6,2	6,4	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,6
	0,7	6,1	6,4	6,6	6,8	7,1	7,3	7,5	7,6	7,8
	0,6	6,3	6,6	6,8	7,0	7,3	7,5	7,7	7,8	8,0
	0,5	6,6	6,8	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3

Auszug Tabelle A3

Die Berechnungen zeigen, dass für quadratische Plattenformate die Berechnungsverfahren zu gleichwertigen Ergebnissen führen.

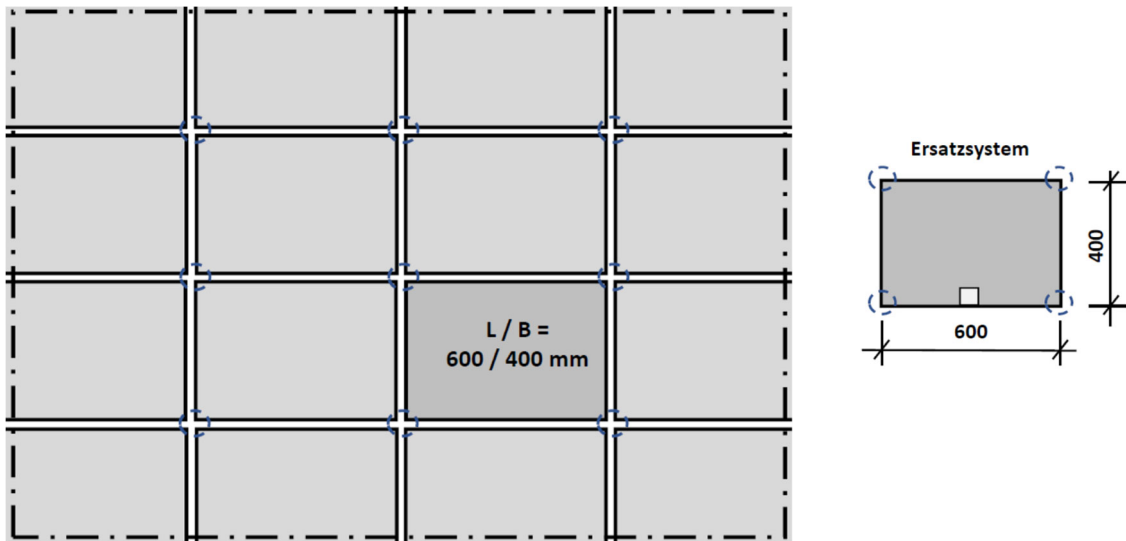
B2: Werksteinplatte (rechteckiges Format)

Bild B2: Abmessungen

Die Berechnungen zeigen den Unterschied der Rechenverfahren bei rechteckigen Plattenformaten auf.

Belagmaterial:	Kalkstein	
	Belagdicke	$d = 40 \text{ mm}$
	Seitenverhältnis	$\varepsilon = 0,667$
	Biegefestigkeit	$\sigma_{Rk} = 11,8 \text{ N/mm}^2$

Belastung: Die Berechnung erfolgt nach zwei verschiedenen Verfahren für eine Werksteinplatte.

DIN EN 1991-1-1	Punktbelastung	$F = 2 \text{ kN}$
	Lastsicherheit	$\gamma_F = 1,5$
	Materialsicherheit	$\gamma_M = 1,8$
DIN EN 1341	Punktbelastung	$P = 3,5 \text{ kN}$
	Sicherheitsfaktor	$F_S = 3,0$

Die erforderliche charakteristische Biegefestigkeit ergibt sich zu:

Nachweis nach DIN EN 1341 (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
40	1,0	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	11,5	11,5	11,5	11,5
	0,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	12,8	12,8	12,8	12,8
	0,8	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	14,4	14,4	14,4	14,4
	0,7	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	16,4	16,4	16,4	16,4
	0,6	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	18,3	18,3	18,3	18,3
0,5	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	23,0	23,0	23,0	23,0	

Auszug Tabelle A1

$$\begin{aligned}\sigma_{Rk} &= 15,7 - (15,7 - 14,1) \frac{0,666 - 0,6}{0,7 - 0,6} \\ &= 14,6 \text{ N/mm}^2 \\ &> 11,8 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nutzgrad: } \eta &= 14,6 / 11,1 \\ &= 1,24\end{aligned}$$

Nachweis mit FEM (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
40	1,0	9,2	9,6	10,0	10,4	10,7	11,1	11,4	11,7	12,0
	0,9	9,4	9,8	10,2	10,6	10,9	11,3	11,6	11,9	12,2
	0,8	9,6	10,1	10,5	10,8	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4
	0,7	9,9	10,3	10,7	11,1	11,4	11,8	12,1	12,4	12,7
	0,6	10,2	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,4	12,7	13,0
0,5	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,5	12,8	13,1	13,4	

Auszug Tabelle A3

$$\begin{aligned}\sigma_{Rk} &= 11,8 - (11,8 - 11,4) \frac{0,666 - 0,6}{0,7 - 0,6} \\ &= 11,5 \text{ N/mm}^2 \\ &< 11,8 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Nutzgrad: } \eta &= 11,5 / 11,8 \\ &= 0,97\end{aligned}$$

Die Berechnung zeigt, dass das Rechenverfahren nach DIN EN 1341 bei Rechteckformaten das Tragverhalten nicht korrekt beschreiben kann.

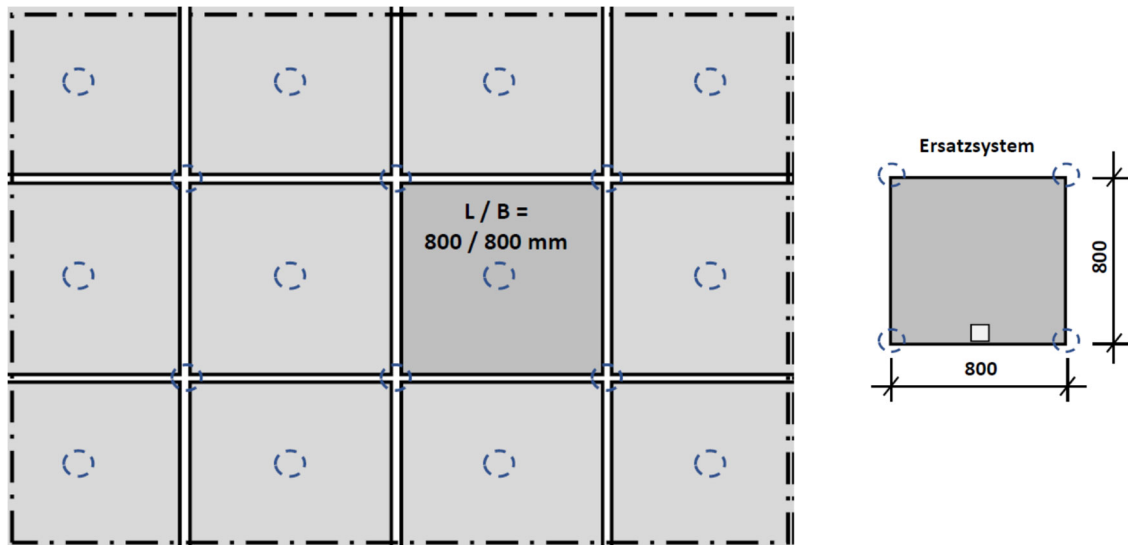
B3: Feinsteinzeugplatte (quadratisches Format mit Mittelstütze)

Bild B3: Abmessungen

Die Berechnungen erfolgt mit Hilfe eines Ersatzsystems für eine Belagplatte mit Mittelstütze.

Belagmaterial:	Feinsteinzeug	
	Belagdicke	$d = 20 \text{ mm}$
	Seitenverhältnis	$\varepsilon = 1,00$
	Mittelwert Biegefestigkeit	$\sigma_{Rm} = 60,0 \text{ N/mm}^2$
	Varianz	$v \leq 10 \%$
	charakt. Biegefestigkeit	$\sigma_{Rk} \approx 60 - 0,1 \cdot 60 \cdot 2,1$ $= 47,4 \text{ N/mm}^2$

Belastung: Die Berechnung erfolgt ingenieurmäßig

DIN EN 1991-1-1	Punktbelastung	$F = 2 \text{ kN}$
	Lastsicherheit	$\gamma_F = 1,5$
	Materialsicherheit	$\gamma_M = 1,3$

Die erforderliche charakteristische Biegefestigkeit ergibt sich zu:

Nachweis mit FEM (Feinsteinzeug)											
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)											
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)									
		400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
20	1,0	29,1	30,5	31,7	32,9	34,0	35,0	36,0	37,0	37,9	39,7
	0,9	29,8	31,1	32,4	33,5	34,6	35,7	36,7	37,7	38,6	40,3
	0,8	30,5	31,8	33,1	34,3	35,4	36,4	37,4	38,4	39,3	41,1
	0,7	31,4	32,7	33,9	35,1	36,2	37,3	38,3	39,3	40,2	41,9
	0,6	32,4	33,7	35,0	36,1	37,3	38,3	39,3	40,3	41,2	43,0
	0,5	33,6	34,9	36,2	37,4	38,5	39,6	40,6	41,5	42,5	44,2
	0,4	35,2	36,5	37,8	38,9	40,1	41,1	42,1	43,1	44,0	45,8
	0,3	37,4	38,6	39,9	41,1	42,2	43,2	44,3	45,2	46,1	47,9

Auszug Tabelle A4

$$\sigma_{Rk} = 37,9 \text{ N/mm}^2 < 47,4 \text{ N/mm}^2$$

Nutzgrad: $\eta = 37,9 / 47,4 = 0,80$

B4: Werksteinplatte (Rechteckformat mit mehr als 4 Stützen)

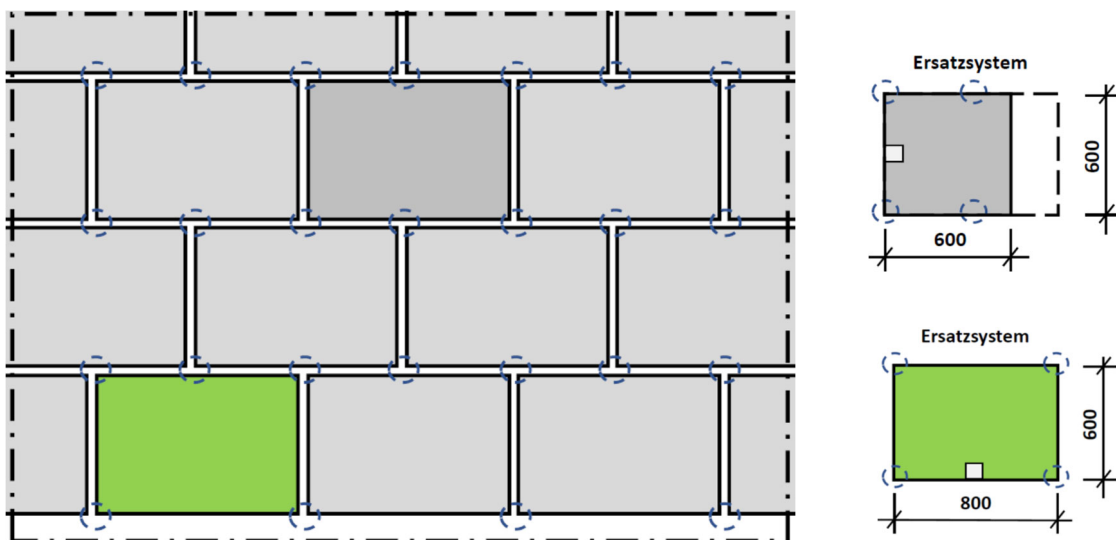


Bild B4: Abmessungen

Die Berechnungen erfolgt mit Hilfe von Ersatzsystemen für eine Belagplatte mit bis zu 6 Stützen.

- Belagmaterial:**
- Naturwerkstein Gabbro
 - Belagdicke $d = 40 \text{ mm}$
 - Seitenverhältnis $\epsilon = 0,75$
 - Biegefestigkeit $\sigma_{Rk} = 20,8 \text{ N/mm}^2$

Belastung: Die Berechnung erfolgt ingenieurmäßig

DIN EN 1991-1-1 Punktbelastung $F = 2 \text{ kN}$
 Lastsicherheit $\gamma_F = 1,5$
 Materialsicherheit $\gamma_M = 1,8$

Die erforderliche charakteristische Biegefestigkeit ergibt sich zu:

Nachweis mit FEM (Werkstein)										
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)										
Dicke (mm)	ϵ	Länge Belag (mm)								
		400	450	500	550	600	650	700	750	800
40	1,0	9,2	9,6	10,0	10,4	10,7	11,1	11,4	11,7	12,0
	0,9	9,4	9,8	10,2	10,6	10,9	11,3	11,6	11,9	12,2
	0,8	9,6	10,1	10,5	10,8	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4
	0,7	9,9	10,3	10,7	11,1	11,4	11,8	12,1	12,4	12,7
	0,6	10,2	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,4	12,7	13,0
	0,5	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,5	12,8	13,1	13,4

Auszug Tabelle A4

$$\begin{aligned} \sigma_{Rk} &= 0,5 \cdot (12,4 + 12,7) \\ &= 12,5 \text{ N/mm}^2 \\ &< 20,8 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Nutzgrad: $\eta = 12,5 / 20,8$
 $= 0,60$

B5: Feinsteinzeugplatte (Bahnenverlegung)

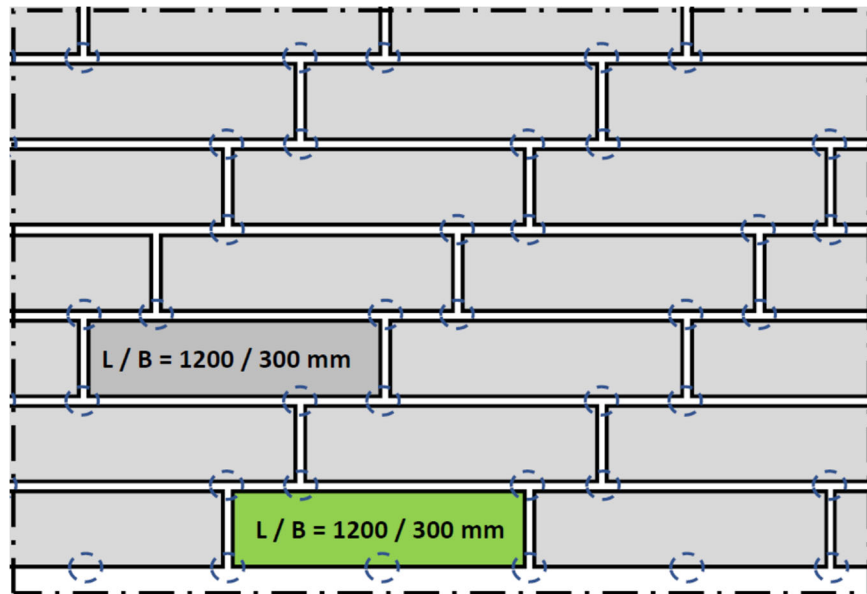


Bild B5: Abmessungen

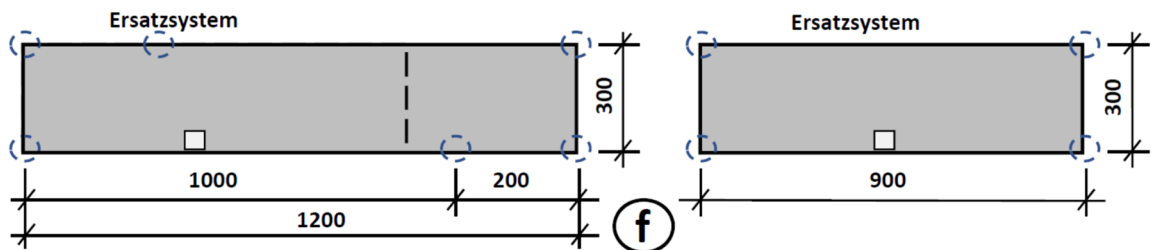


Bild B6: Ersatzsystem Mittelplatte

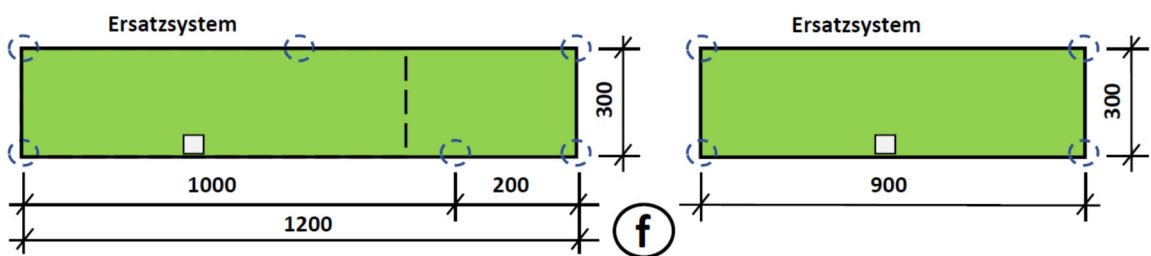


Bild B7: Ersatzsystem Randplatte

Die Berechnungen erfolgt mit Hilfe eines Ersatzsystems für eine Belagplatte mit Mittelstütze.

Belagmaterial: Feinsteinzeug
 Belagdicke $d = 20 \text{ mm}$
 Seitenverhältnis $\varepsilon = 0,25$
 Mittelwert Biegefestigkeit $\sigma_{Rm} = 60,0 \text{ N/mm}^2$
 Varianz $v \leq 10 \%$
 charakt. Biegefestigkeit $\sigma_{Rk} \approx 60 - 0,1 \cdot 60 \cdot 2,1 = 47,4 \text{ N/mm}^2$

Belastung: Die Berechnung erfolgt ingenieurmäßig

DIN EN 1991-1-1 Punktbelastung $F = 2 \text{ kN}$
 Lastsicherheit $\gamma_F = 1,5$
 Materialsicherheit $\gamma_M = 1,3$

Die erforderliche charakteristische Biegefestigkeit ergibt sich zu:

Nachweis mit FEM (Feinsteinzeug)											
erforderliche charakteristische Biegefestigkeit (N/mm ²)											
Dicke (mm)	ε	Länge Belag (mm)									
		400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
20	1,0	29,1	30,5	31,7	32,9	34,0	35,0	36,0	37,0	37,9	39,7
	0,9	29,8	31,1	32,4	33,5	34,6	35,7	36,7	37,7	38,6	40,3
	0,8	30,5	31,8	33,1	34,3	35,4	36,4	37,4	38,4	39,3	41,1
	0,7	31,4	32,7	33,9	35,1	36,2	37,3	38,3	39,3	40,2	41,9
	0,6	32,4	33,7	35,0	36,1	37,3	38,3	39,3	40,3	41,2	43,0
	0,5	33,6	34,9	36,2	37,4	38,5	39,6	40,6	41,5	42,5	44,2
	0,4	35,2	36,5	37,8	38,9	40,1	41,1	42,1	43,1	44,0	45,8
	0,3	37,4	38,6	39,9	41,1	42,2	43,2	44,3	45,2	46,1	47,9

Auszug Tabelle A4

Ersatzlänge $L = 900 \text{ mm}$
 Seitenverhältnis $\varepsilon = 0,333$

$$\sigma_{Rk} = 46,1 - (46,1 - 44,0) \frac{0,333 - 0,3}{0,4 - 0,3} < 45,4 \text{ N/mm}^2$$

Nutzgrad: $\eta = 45,4 / 47,4 = 0,96$