

SCHWIMMENDE ESTRICHE (UNTERLAGSBÖDEN UB) AUF DÄMMSCHICHT ERGÄNZENDE AUSFÜHRUNGEN ZUM BERECHNUNGSTOOL / EXCEL - FILE* LINK: [Schwimmende Estriche UB Traglastnachweis 1 von 2.xlsx](#)

1. Anlass und Abgrenzung

In der Norm SIA 251 <Schwimmende Estriche: 2008> ist die Erstellung von Unterlagsböden über Dämmschicht (WD) oder Trittschalldämmung (TSD) je nach verwendetem Material reglementiert. Verschiedene Anforderungen bezüglich Materialqualitäten, Festigkeiten, Konstruktionsstärken sowie Lastkategorien, etc., welche es nach dieser Norm zu beachten gilt, sind dabei explizit aufgeführt. Weitere Randbedingungen werden stillschweigend vorausgesetzt, so namentlich die <starre Lagerung> des Belagsaufbaus, d.h. auf massiver Betondecke oder Fundamentplatte aufliegend. Die Lagerung eines gedämmten oder ungedämmten Hallenbodens <auf Erdreich> hingegen, oder die Lagerung des gedämmten Estrichs auf <nachgiebigem Tragwerk> hätten sowohl druckspannungs – bedingt als auch biegespannungs – bedingt andere Anforderungen an das UB – System zur Folge. Desgleichen ist der Einfluss von Lastgruppen (z.B. Regalfüsse im gegenseitigen Wirkungsbereich) in den angegebenen Minimalstärken laut Norm SIA 251 nicht berücksichtigt.

Andererseits erlaubt die Norm SIA 251 in Kapitel 03 „*Ausnahmen, wenn sie durch Theorie oder Versuche ausreichend begründet werden oder wenn neue Entwicklungen und Erkenntnisse dies rechtfertigen*“. Desgleichen wird in Ziffer 2.1.4 darauf hingewiesen, dass Estriche bei grösseren Einwirkungen als Einzellast mit $Q_k = 4.0$ kN nach den Regeln der Tragwerksnormen zu bemessen sind.

Mit dem eingangs erwähnten Berechnungstool ist die Möglichkeit gegeben, die baupraktisch oft vorliegenden „Ausnahmen“, wie: Kombinierte WD – und TSD – Dämmung, spezielle Last – Lage (Eckbereich bei Kreuzfugen), nicht – starre Lagerung, höhere Einzellasten oder Lastgruppen, etc. rechnerisch nachvollziehbar zu berücksichtigen.

2. Modellansatz

Grundsätzlich handelt es sich bei <Schwimmenden Estrichen> um elastisch gelagerte, biegesteife Platten, wobei für den Systemaufbau je nach Untergrund / Unterkonstruktion fallweise eine begrenzte Druckspannung in der Bettungsschicht (WD – und / oder TSD – Dämmung), oder die einzuhaltende Biegezugspannung (im definitionsgemäss unbewehrten Estrich) oder gar eine bestimmte Schubspannung (gegen Durchstanzen der Einzellast)

für die Materialstärke des UB massgebend werden kann.

Die im xls. – Berechnungstool verwendeten Ansätze basieren auf die Grundlagen zur <Elastischen Bettung> nach *Westergaard*, *Bousinessq* und *Oedmark*. Eine partielle Zusammenfassung dazu findet sich am Schluss dieser Ausführungen. Ausgehend von der generellen Modellbetrachtung kann dabei entweder eine Berechnung im Sinne der Nachweisführung für eine gewählte Konstruktion, oder ein Ansatz im Sinne der Dimensionierung der Materialschichten je nach Lastvorgabe vorgenommen werden. Aus verschiedenen Gründen ist die <Nachweisführung> vorzuziehen. Dementsprechend wird im xls. - Berechnungstool angegeben, welche (Einzel -) Last je nach UB – Stärke (und je nach allen sonst noch deklarierten Vorgaben → in „Gelbfeldern“) einerseits „druckspannungs – bedingt“, und andererseits „biegespannungs – bedingt“, bzw. „schubspannungs – bedingt“ auf Gebrauchslast – Niveau zugelassen werden darf. Die Ergebnisse gehen grundsätzlich – im Sinne von SIA 251 – von der Lastlage <Randbereich> bzw. von „Einzellast am Rand“ aus. Für Spezialfälle wie Lastlage <Feldbereich> resp. Lastlage <Eckbereich> werden Hinweise geliefert.

2.1 Lastmodell <Einzellast bei starrer Lagerung> oder bei <Erdreichlagerung>

Bei einem Belagsaufbau auf massiver Betondecke oder Fundamentplatte wird (namentlich beim Einbau von TSD) praktisch nie die erlaubte Druckspannung im Dämmstoff, sondern stets die begrenzte Biegezugspannung im UB massgebend. Der Grund liegt darin, dass die „weiche Bettung“ des biegesteifen UB auf Trittschalldämmung diesen zwingt, die Last über einen weiten Wirkungsbereich (- Radius, R) an seine Unterlage abzugeben, woraus sich nur minimale Druckspannungen in der Bettung, dafür aber relativ grosse Biegespannungen im UB – Querschnitt ergeben.

Handelt es sich um Hallenböden, welche mit oder ohne Dämmung auf gewachsenem oder verdichtetem Erdreich aufgebracht werden, so liegt (Ausnahme Fels) nicht mehr starre, sondern „mehr oder weniger“ elastische Lagerung vor. Tendenziell reduzieren sich dadurch als Folge eines tieferen Bettungsmoduls $[k_B]$ → $k_B = id.E_{WD/TSD} / \Sigma d_{WD/TSD}$ bei starrer Lagerung, bzw. $k_B = (\text{Hilfswert } \kappa) / d_{UB}$ bei Erdreichlagerung mit / ohne Dämmschichten – die Druckspannungen, wogegen die Biegezugspannungen zunehmen. Hierin berücksichtigt der Hilfswert κ die Abminderung des natürlichen Steifemoduls des Erdreichs $[E_U]$ je nach mitwirkendem E – Modul der Dämmschicht(en). Der Hilfswert ist so lange gültig, als $[E_U]$ grösser ist wie der gemittelte E - Modul der Bettungsschicht $[id.E_{WD/TSD}]$. Unter dieser Voraussetzung führt das xls.- Berechnungstool sowohl bei < starrer Lagerung> wie bei <Erdreichlagerung> zu realistischen Ergebnissen.

2.2 Lastmodell <Flächenlast bei starrer Lagerung>

Laut Norm SIA 251 ist entweder Einzellast Q_k [kN] oder Flächenlast q_k [kN/m²] zu berücksichtigen. Während die Einzellast in aller Regel biegezug – bedingt zu begrenzen ist, muss bei Flächenlast primär die erlaubte Druckspannung in der Bettungsschicht (bzw. die sich daraus ergebende Setzung!) beachtet werden. Geht man dabei aber (beispielsweise) von $q_k = 5$ kN/m² für „Beanspruchungskategorie D, Warenhäuser“ aus und rechnet noch ca. 1.5 kN/m² an Eigengewicht des UB hinzu, wird sofort ersichtlich, dass eine Bettungsschicht mit TSD (Zwischen -) Lage druckspannungsmässig eigentlich weit überschritten wird, denn: handelsübliche TSD weisen nach Normprüfung eine zulässige Langzeit – Druckspannung (σ_z) in der Bandbreite von bloss etwa 0.001 – 0.003 N/mm² (1 – 3 kN/m²!) auf.

Es ist daher zu vermuten, dass in der Norm SIA 251 zur Vermeidung eines „Widerspruchs“ auf die Festlegung von zulässigen Druckspannungen für TSD verzichtet wurde. Stattdessen gilt dort die generelle Bestimmung, wonach Trittschalldämmungen unter Estrich (UB) nicht mehr als 40 mm Stärke aufweisen dürfen.

Da aus der normativen Langzeit – Prüfung mit ermitteltem σ_z auch der entsprechende Langzeit – Druckmodul abgeleitet werden kann (im Mittel etwa $E_{\text{Langzeit TDS}} \sim 0.05$ N/mm²), lässt sich aus der Beziehung $\delta_{\text{TDS}} = (d_{\text{TDS}} \leq 40) \cdot (q_{k(\sim \text{max})} \leq 0.0065 / E_{\text{Langzeit}} \sim 0.05)$ eine in der Norm offenbar gerade noch „einkalkulierte“ resp. erlaubte Einfederung aus Flächenlast von $\delta_{\text{TDS max.}} \sim 5$ mm errechnen. Dieses Grenzmass am System entspricht zufälligerweise (?) einer entsprechenden Limite in der Norm SIA 271 <Abdichtungen von Hochbauten: 2007>.

FAZIT: Auch wenn eine Bemessung, resp. der Nachweis für eine Konstruktion ausserhalb der Norm SIA 251 erfolgt, so ist die dortige Bestimmung, nämlich: $\Sigma d_{\text{TDS}} \leq 40$ mm, u. E. immer einzuhalten. Damit kann andererseits das Lastmodell <Flächenlast bei starrer Lagerung>, bzw. bei <Erdreichlagerung> ad acta gelegt werden.

2.3 Lastmodell <Lastgruppe bei starrer Lagerung>

Bei Einzellast auf elastischer Bettung (starr oder nachgiebig gelagert) verhält es sich so, dass sich die Druckspannungsverteilung unter der Platte „im Feldbereich“ in etwa kegelförmig um die verlängerte Lastachse ausbreitet. Der Wirkungsradius (R) ~ 3 mal „elastische Länge des UB“ ist dabei abhängig von der Biegesteifigkeit $(EJ)_{\text{UB}}$ des UB und vom Bettungsmodul $[k_B]$ aller Dämmschichten (inkl. allfälliger „Erdreichbettung“). In etwa gleicher Ausdehnung wirkt andererseits auch eine Einflusslinie für den Laststandort [M], deren Ordinatenwerte $[\eta_x] \rightarrow \eta_x \sim [1 - (x / R)]^2 < 1.0$ den Anteil an „Mitwirkung“ einer Nachbarlast im Abstand [x] zu [M] erfassen und welche – bei mehreren Nachbarlasten – kumulativ zu $Q_{\text{M vorh.}}$ aufzurechnen sind

($\rightarrow \Sigma Q_{Mvorh.}$). Dieser ausgewiesene Wert muss dann (immer noch) kleiner sein als die gemäss Ziffer 2.1 ermittelte, zulässige (biegezug – begrenzte) Einzellast. Im massgebenden „Randbereich“ der Platte gilt das Gesagte sinngemäss.

2.4 Lastmodell <Lasten bei nachgiebiger Tragkonstruktion>

Auch dieser Lastfall ist in Norm SIA 251 nicht berücksichtigt – obgleich er in der Praxis recht häufig vorkommt. Wird der Bodenaufbau über einem Stabtragwerk mit Pfetten und Rippenblech oder Schalung, oder als Renovationsmassnahme über einer alten Hourdisdecke oder Ähnlichem mit einachsiger Tragrichtung aufgebaut, so ist im Rahmen des normativ Zulässigen mit Durchbiegungen des Gesamtsystems zu rechnen. Geht man davon aus, dass sich dieses unter flächiger Nutzlast und / oder Einzellast um beispielsweise $1/300$ der „Spannweite in Tragrichtung“ durchbiegt, so übernimmt der fugenlose, erhärtete Estrich ungewollt, bzw. „unerwünschterweise“ anteilmässige Biegemomente mit entsprechenden Biegezugspannungen. In diesem Fall also hat auch die Flächenlast $[q_k]$ einen erheblichen Einfluss auf das Tragvermögen und die Gebrauchs-tauglichkeit des Estrichs.

Im xls.- Berechnungstool ist der Zusammenhang wie nachstehend beschrieben erfasst. Selbstverständlich muss dabei die Tragsicherheit der Decke durch das (Stab -) Tragwerk allein, unter anderem über eine entsprechende Biegesteifigkeit, sichergestellt sein. Für die Dimensionierung des UB muss diese Biegesteifigkeit des Tragwerks $[(EJ)_{Trg.w.}]$ in Tragrichtung $[L_x]$ abgeschätzt und mitberücksichtigt werden. Ausgehend von den einwirkenden Lasten (inkl. Eigengewicht UB), der Spannweite $[L_x]$ und der „erlaubten“ Durchbiegung $[\delta_x]$ von (beispielsweise) $\delta_x = (1/300) \cdot L_x$, ist durch Umformung der Berechnungsformel die erforderliche Biegesteifigkeit des Tragwerks (am einfachen Balken) bestimmt. Die „unerwünschten Tragbeteiligungen“ je nach gewählter Estrichstärke mit zugehörigem $(EJ)_{UB}$ ergeben sich nun entsprechend der anteilmässigen Steifigkeiten von Tragwerk und Estrich. Daraus wiederum resultieren mit dem entsprechenden Lastanteil <Flächenlast> (jetzt ohne Eigengewicht Estrich) Biegezugspannungen im UB allein als Folge der Durchbiegung des Tragwerks. Nur was nach Abzug dieser Randspannung von der zulässigen Biegezugspannung allenfalls „übrigbleibt“, könnte somit noch von einer gleichzeitig wirkenden, und entsprechend reduzierten Einzellast $red.zul.\varphi \cdot Q_{bz}$ konsumiert werden.

2.5 Lastmodell <Lastgruppe bei nachgiebiger Tragkonstruktion>

Dieser Spezialfall (Beispiel: Regalfüsse eines Hochregallagers entlang einer UB – Dilatations - fuge in Tragrichtung einer nachgiebigen Decke) stellt eine Kombination der Lastfälle 2.3 + 2.4 dar. Diese Ausgangslage zwingt häufig zu „umgekehrter Fragestellung“, indem – ausgehend

von einer maximal realisierbaren UB – Stärke (z. B. $d = 200 \text{ mm}$) mit zulässiger Einzellast (red.zul $\varphi \cdot Q$, nach Lastfall 2.4) und gemäss massgebendem Mitwirkungsfaktor $[M]$ – lediglich noch „zurückgerechnet“ werden kann, welche Nominallast jeder der mitwirkenden Regalfüsse je nach gegenseitigem Abstand $[x]$ zueinander noch aufweisen darf. Siehe dazu das entsprechende Beispiel im xls.- Berechnungstool.

3. Diskussion um Materialkennwerte

Da es sich um ein Nachweisverfahren handelt, sind ergänzend zu den gewählten resp. vorgegebenen Materialstärken auch die zulässigen Festigkeiten (max. zul. Druckspannungen sowie E – Moduli der Dämmschichten, zul. Biegezugspannung und E – Modul des vorgesehenen Estrichs wie auch dessen zul. Schubspannung) vorzugeben. Dabei eröffnen sich verschiedene Diskussionspunkte mit entsprechendem Interpretationsbedarf.

Bezüglich der Druckspannungen würde – bei kombinierten Dämmschichten - als Bemessungsvorgabe an sich nur der tiefste zulässige Wert interessieren. Die „Problematik“ und deren „Lösung“ bei Vorliegen von Trittschalldämmungen ist dazu in Abschnitt 2.2 skizziert. Gelangen ausschliesslich Wärmedämmschichten (mit Mindestanforderung an σ_{10}) zur Anwendung, so sind deren zulässige Dauerdruckspannungen je nach Materialbasis (XPS, EPS, FOAMGLAS, o. a.) einzusetzen.

Wie eingangs aufgeführt, ist zwar nur in sehr seltenen Fällen die zulässige Druckspannung des Dämmstoffs für die Bemessung des UB massgebend. Aber: Diese Druckspannung ist (nebst der Dämmstärke) zugleich eine massgebende Einflussgrösse für die Bestimmung des gewogenen, d.h. ideellen Steifemoduls der Bettungsschicht [$\text{id.}\Sigma E_{\text{WD/TSD}}$] und des daraus bestimmten Bettungsmoduls [k_B] für den Estrich. Deshalb sind bei Vorliegen von TSD (- Kombinationen) nicht nur deren individuelle E – Moduli, sondern auch die tiefste zulässige Druckspannung anzugeben.

Daraus ergibt sich bei Verwendung von Mineralfaser – Dämmstoffen nun aber ein „Problem“:

Bei Ermittlung der druckspannungs – bedingt zulässigen Einzellast ist die tiefste zulässige Druckspannung (mit -) bestimmend. Ein komplementärer MF – Dämmstoff mit höherer zulässiger Druckspannung wird dabei nicht voll ausgenutzt, was bedeutet, dass dessen vorgegebener E – Modul (i. d. R. auf die zulässige Dauerdruckspannung bezogen) ebenfalls nicht „ausgenutzt“ wird. Der Estrich wird liegt damit weicher auf, als in der Berechnung durch [$\text{id.}\Sigma E_{\text{WD/TSD}}$] vorgegeben. Die druckspannungs – bedingt zulässige Einzellast ist damit höher als in der Berechnung ausgewiesen (sichere Seite).

Bezüglich der meist massgebenden, biegezug – begrenzten Einzellast stellt sich die Situation dagegen gerade umgekehrt dar. Da für diesen Fall selbst die tiefste vorgegebene Druckspannung nicht ausgeschöpft wird und sich daraus auch ein tieferer ideeller Steifemodul der Bettungsschicht [id. $\Sigma E_{WD/TSD}$] als rechnerisch vorgegeben einstellt, wird der Estrich entsprechend stärker beansprucht. Oder anders gesagt: Die zulässige Biegezugspannung wird mit einer etwas geringeren Einzellast erreicht, als in der Rechnung ausgewiesen. Der „Fehler“ ist aber – nach vorgenommener Parameterstudie – für den Bereich aller baupraktisch realistischen Schichtkombinationen und – Stärken vernachlässigbar, bzw. im Toleranzbereich aller übrigen (Modell -) Vorgaben. Es wird demnach im xls.- Berechnungstool mit dem ideellen Steifemodul der Bettungsschicht [id. $\Sigma E_{WD/TSD}$] gerechnet, wie er sich aus den „unbereinigten“ Einzel - E – Moduli nach Vorgabewerten errechnet.

Hinsichtlich der zulässigen Biegezugspannung im UB ergibt sich ebenfalls Diskussionsbedarf. Laut Norm SIA 251 (bzw. solange wir uns innerhalb dieser Norm bewegen), sind sogenannte <Bestätigungsprüfungen> im eingebauten Zustand zu erbringen, wobei die tiefste erhobene Bruchspannung einen bestimmten Minimalwert (je nach deklariertes Estrichqualität) nicht unterschreiten darf. Ist dieser eingehalten wird angenommen, dass der Belag der (maximalen) Normlast von Q_k von 4 kN mit ausreichender Sicherheit widersteht.

Diese Annahme steht an sich im Widerspruch zum allgemein gültigen Tragsicherheitskonzept, welches fordert, dass:

<Nennlast [Q_k] · Teilsicherheitsbeiwert Last [$\gamma_F = 1.4$] ≤ Charakteristische Festigkeit [f_c] / Teilsicherheitsbeiwert Modell [$\gamma_M = 1.3$]>.

Als <Charakteristische Festigkeit> ist dabei in der Regel die 5% - Fraktile für ein definiertes Vertrauensniveau einzusetzen.

Da es sich bei der Lastvorgabe Q_k (oder q_k) definitionsgemäss um den <Charakteristischen Wert> handelt, müsste die nach „Bestätigungsprüfung“ real erhobene Biegebruchspannung eigentlich noch um die Faktoren [$\gamma_F \cdot \gamma_M \sim 1.82$] auf „Nennlast – Niveau“ reduziert werden, wenn sie als zulässige Biegezugspannung gelten soll. Doch wie gesagt: So lange wir uns innerhalb von Norm SIA 251 bewegen, erübrigen sich solche Erwägungen.

Muss aber im Sinne von Ziffer 2.1.4 die Bemessung nach den Tragwerksnormen erfolgen, kommt zwangsläufig das oben gezeigte Sicherheitskonzept zur Anwendung. Daran anlehnend basieren deshalb alle Nachweise im xls.- Berechnungstool auf Folgendem:
Als <Charakteristischer Wert> der Biegezugfestigkeit wird der in der Namensgebung

normativ verwendete Kennwert – $F_{\underline{t}}$ (z.B. CTF C35 - $F_{\underline{t}} = 7 \text{ N/mm}^2$) verwendet. Dieser wird um einen Divisor [$\gamma_F \cdot \gamma_M = 1.75$] auf „Gebrauchslast – Niveau“ reduziert (für F7 somit auf $\text{zul.}\sigma_{bz} = 4.0 \text{ N/mm}^2$) – es sei denn, der zu erfüllende Bestätigungswert sei kleiner. (z.B. → CT C30 – F5: Bestätigungswert 2.5 N/mm^2 < $F_5 / 1.75 = 2.86 \text{ N/mm}^2$).

Die auf diesem Weg bestimmte, zulässige Einzellast $\text{zul.}\varphi \cdot Q_k$, welche mit der Nennlast – Vorgabe $Q_{k\text{vorh.}}$ zu vergleichen ist, genügt damit dem Sicherheitskonzept nach Tragwerksnormen. Dabei bedeutet $\text{zul.}\varphi \cdot Q_k$ immer: „unter Einschluss eines allfälligen Stosszuschlags [φ]“. Selbstverständlich ist je nach Lastvorgabe dabei auch die normativ zugewiesene oder die reale Aufstandsfläche zu berücksichtigen (z.B.: PW in einem Ausstellungsraum: $Q_k = 10 \text{ kN / Rad}$, $A = 200 \times 200 \text{ mm}^2$). Die Aufstandsfläche hat einen grossen Einfluss auf die Biegezugspannung!

Was den Elastizitätsmodul (Biege – E – Modul) des UB anbelangt, so kann dieser bei hydraulisch gebundenen Produkten als in etwa proportional zur entsprechenden Druckfestigkeit angenommen werden. Siehe Literatur. Liegt ein produktspezifischer Wert vor, ist selbstverständlich dieser zu übernehmen. Bei Gussasphalt ist als Folge der Temperaturempfindlichkeit eine sehr grosse Spannweite gegeben.

Für den Nachweis der Schubfestigkeit (Durchstanzen) des Estrichs schliesslich, wird – ausgehend von einem mittleren $\tau_{cd} \sim 1.05 \text{ N/mm}^2$ für Zementestrich C30 bis C35, mit entsprechendem $\text{zul.}\tau \sim 0.75 \text{ N/mm}^2$ auf Gebrauchslastniveau – der jeweilige Rechenwert je nach Estrichmaterial proportional zu dessen angenommenem Elastizitätsmodul variiert.

4. Beispiele im Excel – Berechnungstool

Die hier gemachten Ausführungen sind als Ergänzung zum Berechnungstool / LINK:

[Schwimmende Estriche UB Traglastnachweis 1 von 2.xls](#) zu verstehen, wobei dort weitere Präzisierungen und Randbedingungen zum Rechenmodell aufgeführt sind.

Speziell hervorgehoben werden vier Beispiele, welche die vorstehend erwähnten <Lastmodelle> konkretisieren und entsprechende Vergleichsbetrachtungen ermöglichen. Da das Rechenprogramm in seiner Online – Version schreibgeschützt ist, können die gewählten Vorgabewerte für eigene Berechnungen beliebig geändert werden. Beim Verlassen des Programms wird der Benutzer gefragt, ob er „die Änderungen“ speichern möchte. Will er das tun, so kann er dazu einen beliebigen Speicherort auf seinem PC angeben. Diese Kopie mit der erfolgten Berechnung ist dann aber nicht mehr schreibgeschützt, so dass der Schreibschutz für künftigen „Nicht – Online – Gebrauch ab eigenem Rechner“ unter <Eigenschaften> erst wieder aktiviert werden muss.

Juni 2012 / Ba.

6

Anhang

Begriffe und Formeln zu den Bemessungstafeln

Begriffe

- φQ = Aufstandslast inkl. Stoßzuschlag
- d_{nom} = Nutzplattenstärke
- μ = Querdehnungszahl (Beton $\sim 0,15$)
- E_{nom} = Elastizitätsmodul Nutzplatte
- k = Bettungsmodul für Nutzplatte ($k = \kappa/d_{\text{nom}}$)
- κ = Substitution für: $E_u / [\beta \cdot \alpha^{-1} + 0,83 (E_{\text{nom}}/E_u)^{1/3} - \beta]$
- E_u = Elastizitätsmodul des Halbraums ($E_u < \infty$)
- α = $\overline{E_{\text{WD}}}/E_u$
- $\overline{E_{\text{WD}}}$ = Gemittelter E-Modul aller Bettungslagen der Bettungsschicht z.B. für 3 Schichten:
- $$\overline{E_{\text{WD}}} = E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 \cdot \frac{d_1 + d_2 + d_3}{E_1 \cdot E_2 \cdot d_3 + E_1 \cdot E_3 \cdot d_2 + E_2 \cdot E_3 \cdot d_1}$$
- β = $d_{\text{WD}}/d_{\text{nom}}$
- d_{WD} = allgemein Summe der Schichtstärken aller Bettungslagen (= Schichtstärke der Bettungsschicht)
speziell, im Kopf der Bemessungstafeln: (nur) Stärke der Dämmschicht
- b = Ersatzkreisradius ($b \sim r$)
- r = definierter Last-Aufstandsradius ($r = 100 \text{ mm}$)
- L_c = Elastische Länge der Nutzplatte
- a = Einflußbreite "Rand-/Ecke"
($a = 2L_c$, je ab Fuge gemessen)
- σ_{WD} = Pressung der Bettungsschicht
- Q' = Wirksame Aufstandslast bezüglich Durchstanzen

- γ = Substitution für :
 $2 \sigma_{h \text{ Basis}} \cdot \pi \cdot \rho [E_{\text{nom}}/E = 30 \text{ kN/mm}^2]$
- ρ = Scherflächenanteil: Innenfeldbereich $\rho = 1,0$
 Rand-/Eckbereich $\rho = 0,5$
- $\sigma_{h \text{ Basis}}$ = zulässige Schubspannung Nutzplatte,
 Basiswert = $0,75 \text{ N/mm}^2$

Basisformeln Westergaard:

- Biegezugspannung im Innenfeldbereich der Nutzplatte:

$$\sigma_r = \frac{0,275 (1 + \mu)}{d_{\text{nom}}^2} \cdot \varphi \cdot Q_{\text{vorh}} \cdot \left[\text{Log} \left(\frac{E_{\text{nom}} \cdot d_{\text{nom}}^3}{k \cdot b^4} \right) - 0,436 \right] (\text{N/mm}^2)$$

- Einsenkung unter Last im Innenfeldbereich der Nutzplatte:

$$y = \frac{\varphi Q_{\text{vorh}}}{8 \cdot k \cdot L_c^2} (\text{mm})$$

- Elastische Länge der Nutzplatte:

$$L_c = \left[\frac{E_{\text{nom}} \cdot d_{\text{nom}}^3}{12 \cdot k} \right]^{1/4} (\text{mm})$$

- Pressung der Bettungsschicht unter Last im Innenfeldbereich:

$$\sigma_{\text{WD}} = \frac{\varphi Q_{\text{vorh}}}{8 \cdot L_c^2} (\text{N/mm}^2)$$

Bemessung der Nutzplatte auf zulässige Schubspannung:

(Für alle Lagerungsarten, bei wirksamer Pressung σ_{WD})

$$d_{\text{nom erf}} = \frac{1}{2} \cdot \left[(10000 + 6 Q'/\gamma)^{1/2} - 100 \right] (\text{mm})$$

$$\text{wobei } Q' = [\varphi Q_{\text{vorh}} - R] (\text{N})$$

$$\text{mit } R = \sigma_{\text{WD}} \cdot r^2 \cdot \pi$$

$$\text{und } \gamma = 1,5 \cdot \pi \cdot \rho (E_{\text{nom}}/E = 30 \text{ kN/mm}^2) (\text{s. auch "Begriffe"})$$

Abgeleitete Grundformeln für Nutzplattenbemessung bei wirksamer Bettungspressung σ_{WD} (Grundlage der Bemessungstabeln)

Kriterium (κ siehe "Begriffe") (alle Werte in N und mm)	Bettungsschicht über Halbraum/Erdreich mit $\bar{E}_{WD} \leq E_u < \infty$	Bettungsschicht über starrer Unterkonstruktion mit $\bar{E}_{WD} \leq E_u = \infty$
Einfluß-Breite Rand-/Ecke a (mm)	$1,0745 \cdot \left[\frac{E_{nom}}{\kappa} \right]^{1/4} \cdot d_{nom}$	$1,0745 \cdot \left[\frac{E_{nom} \cdot d_{nom}^3 \cdot d_{WD}}{\bar{E}_{WD}} \right]^{1/4}$
Erf. Nutzplattenstärke $d_{nom\ erf}$ (mm)	iterativ bestimmen ! $x \cdot \left[\frac{\kappa}{E_{nom}} \right]^{1/4} \cdot \left[\frac{\varphi Q_{vor}}{\sigma_{WD}} \right]^{1/2}$	$x \cdot \left[\frac{\bar{E}_{WD}}{E_{nom} \cdot d_{WD}} \right]^{1/3} \cdot \left[\frac{\varphi Q_{vor}}{\sigma_{WD}} \right]^{2/3}$
für Innenfeldbereich für R-/E-Bereich verdübelt für R-/E-Bereich un verdübelt	x = 0,658; y = 2,3; z = 1,0 x = 1,231; y = 0,6631; z = 2,0 x = 1,677; y = 0,3535; z = 2,0	x = 0,572; y = 2,3; z = 1,0 x = 1,315; y = 0,663; z = 2,0 x = 2,00; y = 0,3535; z = 2,0
Zul. Aufstandslast φQ_{zul} (N)	$y \cdot \sigma_{WD} \cdot d_{nom}^2 \cdot \left[\frac{E_{nom}}{\kappa} \right]^{1/2}$ durch d_{nom} bestimmt!	$y \cdot \sigma_{WD} \cdot d_{nom}^{3/2} \cdot d_{WD}^{1/2} \cdot \left[\frac{E_{nom}}{\bar{E}_{WD}} \right]^{1/2}$
Resultierende Biege(zug-)spannung	$z \cdot \frac{0,275 (1 + \mu)}{d_{nom}^2}$	$z \cdot \frac{0,275 (1 + \mu)}{d_{nom}^2}$
in Nutzplatte $\sigma_{r\ result}$	$\left\{ \log \left[\frac{E_{nom} \cdot d_{nom}^4}{\kappa \cdot b^4} \right] - 0,436 \right\} \cdot \varphi Q_{vorh}$ durch d_{nom} bestimmt	$\left\{ \log \left[\frac{E_{nom} \cdot d_{nom}^3 \cdot d_{WD}}{\bar{E}_{WD} \cdot b^4} \right] - 0,436 \right\} \cdot \varphi Q_{vorh}$

pro memoria : $\kappa_{iterativ} = \left[\frac{d_{WD}}{d_{nom}} \cdot \left(\frac{1}{\bar{E}_{WD}} - \frac{1}{E_u} \right) + \frac{0,83 \cdot E_{nom}^{1/3}}{E_u^{4/3}} \right]^{-1}$

(siehe auch "Begriffe")

└ annehmen, variieren, bis aus $\kappa_{iterativ}$
Nutzplattenstärke $d_{nom\ erf} \equiv d_{nom}$ - Annahme.
Für Innenfeld- und Randbereiche resultieren
unterschiedliche κ -Werte !