

3 Wichtige Eigenschaften der Böden

3.1 Wasserempfindlichkeit bindiger Böden

Bei bindigen Böden ist die Konsistenz von entscheidender Bedeutung für die Eigenschaften des Bodens als Baustoff.

Wenn ein Boden vollständig wassergesättigt ist, kann die Zugabe von Wasser, beispielsweise also auch das Durchfließen von Sickerwasser oder Grundwasser, ihn nicht aufweichen, solange nicht gleichzeitig seine Dichte verringert wird. Eine dynamische Beanspruchung an der Oberfläche einer Erdschüttung, z.B. durch Befahren, führt jedoch zu einer Dichteverminderung und daher bei Wasserzugabe zu einem Aufweichen des Bodens. Bei unvermeidbarem Wasserzutritt (Niederschläge) sollte ein Boden also nicht gleichzeitig befahren werden.

Solange Boden nicht wassergesättigt ist, wird er durch kapillar bewirkten Porenwasserunterdruck stabilisiert. Mit der Wassersättigung entfallen diese stützenden Kapillarkräfte. Gleichzeitig wird der Wassergehalt erhöht und damit die Konsistenzzahl verringert.

Es ist stets darauf zu achten, dass derartige Destabilisierungen und Aufweichungen bei Erdbaumaßnahmen vermieden bzw. minimiert werden. Dazu sind folgende Maßnahmen zweckmäßig:

- Boden auch in Zwischendeponien stets verdichtet einbauen. Indem bei gegebenem Wassergehalt der Luftporengehalt minimiert, der Boden also möglichst weit bis zur Sättigungsgrenze hin verdichtet wird, kann er durch späteren Wasserzutritt nicht mehr destabilisiert werden.
- Oberflächen von Erdbauwerken, auch von Zwischendeponien, stets mit deutlichem Gefälle anlegen und dafür sorgen, dass zutretendes Wasser rasch abfließen kann; dazu in Arbeitspausen stets glatt abgewalzte Oberflächen herstellen.
- Bei Regen Erdarbeiten einstellen. In der Regel ist der Aufwand für die dabei entstehende Ausfallzeit geringer, als wenn nach einem Regen durch Befahren verursachte Aufweichungen entfernt werden müssen.

3 Wichtige Eigenschaften der Böden

3.2 Eigensetzungen von verdichteten Schüttungen (Auffüllungen)

Ein locker gelagerter Boden hat aufgrund der Schwerkraft das Bestreben, in eine dichtere Lagerung überzugehen, sobald durch äußere Einflüsse (Sickerwasser, Erschütterungen) haltende Kräfte zwischen den Bodenkörnern (Reibung, kapillar bedingte Kräfte, scheinbare Kohäsion) überwunden werden und eine Umlagerung von Körnern möglich ist.

Anders als bei natürlich abgelagerten Böden, die derartigen äußeren Einflüssen schon sehr lange ausgesetzt sind, ist bei Erdbauwerken (Geländeauffüllungen) stets ein Setzungspotential vor allem in den ersten Jahren nach Erstellung zu beachten. Dieses ist umso größer, je schlechter die hergestellte Auffüllung verdichtet wurde. Bei gering verdichtet eingebauten bindigen Böden können durchaus Eigensetzungen von mehr als 10 % der Schütthöhe auftreten. Aber auch bei gut verdichteten Erdbauwerken ist eine Verformung von 0,5 %, das sind 5 mm je Meter Auffüllhöhe ein realistisches Maß.

Eigensetzungen von Auffüllungen lassen sich minimieren durch

- Verwendung qualitativ möglichste hochwertiger Erdstoffe (nichtbindige, gut abgestufte Böden, z.B. GW).
- Verbesserung bzw. Verfestigung der als Auffüllmaterial vorgesehenen Böden mit Bindemitteln, die nach dem Abbinden die Umlagerung von Körnern verhindern.

Bei der Herstellung von Geländeauffüllungen aus gemischtkörnigen Böden sind Einlagerungen größerer Steine problematisch. Unter ihnen verbleiben zunächst viele kleine Hohlräume, die durch Sickerwasser und Erosionsvorgänge innerhalb des Boden im Lauf der Zeit verfüllt werden. Sie bedingen daher Umlagerungen und Setzungen.

4 Verdichtung der Böden

4.1 Aufgabe der Verdichtung

Das Ziel der Verdichtung von Boden ist grundsätzlich eine Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften eines geschütteten Bodenmaterials, z. B. eine Verringerung des Hohlraumgehaltes und damit des Porenvolumens, um einerseits die Scherfestigkeit des eingebauten Bodens zu steigern und andererseits die Zusammendrückbarkeit, die Wasserdurchlässigkeit und die Wasseraufnahme möglichst zu reduzieren.

Bei der Verdichtung muss ein Teil des mit Luft und Wasser gefüllten Porenvolumens aus dem Dreiphasengemisch „Boden“ ausgepresst werden. Der zeitliche Verlauf dieser Verdichtung hängt von der Porenstruktur und der Wasserdurchlässigkeit des zu verdichtenden Bodens ab, wobei bei Sanden und Kiesen dieses Auspressen schneller abläuft als bei bindigen Böden; stark bindige Böden (Tone) geben teilweise gar kein Wasser ab, sondern lassen nur ein Zusammenkneten der größeren Luftporen zu.

4.2 Kennwerte der Verdichtung

a) Nichtbindiger Boden

Bei der Verdichtung von nichtbindigen Böden wie bei Sanden und Kiesen werden die Körner in eine dichtere Packung umgelagert, wobei kleinere Körner die Poren zwischen größeren Körnern ausfüllen. Diese Umlagerung kann durch statische oder dynamische (Vibration) Verdichtung erreicht werden.

Am besten ist ein nichtbindiger Boden verdichtbar, wenn die Kornverteilungskurve sich der sog. Fuller-Parabel (Ungleichförmigkeitsgrad $U = d_{60}/d_{10} = 36,7$) annähert.

4 Verdichtung der Böden

b) Bindiger Boden

Die Verdichtbarkeit hängt bei diesen Böden sehr stark vom Wassergehalt ab. Feinkörnige Böden wie Schluff und Ton, aber auch gemischtkörnige Böden mit mehr als 15 % abschlämmbaren Bestandteilen < 0,063 mm, geben bei Verdichtung kaum Wasser ab. Böden mit **breiiger oder weicher** Konsistenz sind bedingt durch ihren zu hohem Wassergehalt **nicht ordnungsgemäß verdichtbar**. Der optimale Wassergehalt bindiger Böden bei Verdichtung liegt im Übergangsbereich von der steifen zur halbfesten Konsistenz.

Für bindige und gemischtkörnige Böden, aber auch für gröbere, nicht bindige Böden verwendet man zur Beurteilung der Verdichtung den sog. **Proctorversuch nach DIN 18127**. Dabei handelt es sich zunächst um einen **reinen Laborversuch**, bei dem die mit einer bestimmten **definierten Verdichtungsarbeit** erreichbare Trockendichte des zu prüfenden Bodenmaterials ρ_{Pr} , die sog. Proctordichte, ermittelt wird.

Dieser **Laborwert** wird anschließend als **Bezugsgröße** für die Beurteilung der tatsächlich durch die Verdichtungstechnik auf der Baustelle erreichten Trockendichte ρ_d verwendet:

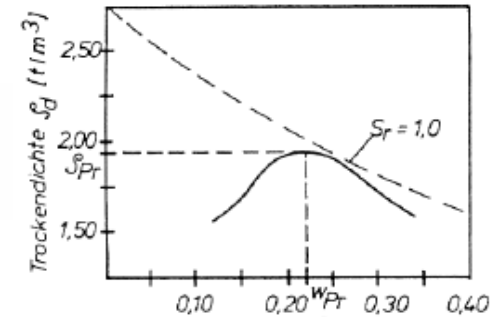
$$\text{Verdichtungsgrad } D_{pr} = \rho_d / \rho_{pr}.$$

Für die Untersuchung eines Bodenmaterials im Proctorversuch wird eine größere Bodenmenge bei unterschiedlicher Zugabe von Wasser zu 5 bis 6 Teilproben angemischt, homogenisiert und anschließend in 3 Lagen in den sog. Proctortopf, einen zylindrischen Stahltopf, eingebaut. Jede Lage wird mit einer vorgeschriebenen Anzahl von Schlägen eines Fallgewichtes aus vorgeschriebener Fallhöhe verdichtet, so dass näherungsweise eine Verdichtungsarbeit von 0,6 MNm/m³ für Ermittlung der sog. einfachen Proctordichte ρ_{Pr} in die gesamte Bodenprobe eingetragen wird.

4 Verdichtung der Böden

Die 5 - 6 Einzelversuche liefern nach der Verdichtung im Proctortopf (Volumen V), Wiegen der im Proctortopf enthaltenen feuchten Bodenmasse (m) und Ofentrocknung bei 105°C (trockene Bodenmasse m_d) schließlich 5 - 6 Wertepaare Wassergehalt w / Trockendichte ρ_d .

Wassergehalt $w = m_w/m_d$ [%]
 Dichte der Probe $\rho = m/V$ [g/cm^3]
 Trockendichte $\rho_d = m_d/V = \rho/(1 + w)$



Die 5 Wertepaare werden in der sog. Proctorkurve dargestellt. Der Scheitelwert der Proctorkurve liefert das gesuchte Laborversuchsergebnis als Wertepaar: die **Proctordichte** ρ_{Pr} und korrespondierend den **optimalen Wassergehalt** w_{Pr} . Die Proctorkurve nähert sich mit zunehmendem Wassergehalt der sog. Sättigungslinie an, die einen Verdichtungszustand beschreibt, bei dem sämtliche Poren mit Wasser gefüllt sind.

Der optimale Wassergehalt ist nur ein Anhaltswert, mit dem auf der Baustelle mit geringster Verdichtungsenergie ein ausreichender Verdichtungserfolg zu erwarten ist, jedoch wird die tatsächliche Verdichtungsarbeit immer von den Laborbedingungen abweichen. Der optimale Wassergehalt gibt jedoch einen Hinweis, ob ein Boden mit seinem natürlichen Wassergehalt überhaupt zu verdichten ist.

Die Größe der Proctordichte ist ein Hinweis auf die Verdichtbarkeit einer Bodenart und ein Merkmal für die Güte eines Schüttmaterials:

Proctordichte ρ_{Pr} (g/cm^3)	Eignung als Schüttmaterial
bis 1,6	sehr schlecht
1,60 - 1,75	schlecht
1,75 bis 1,95	ziemlich gut
1,95 bis 2,1	Gut
über 2,1	sehr gut

4 Verdichtung der Böden

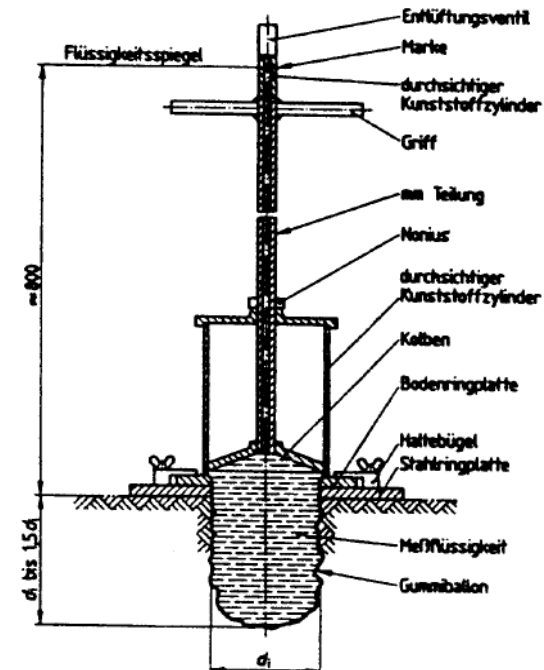
4.3 Bestimmung des Verdichtungsgrades mit direkten Methoden

Die eigentliche **Kontrolle des Verdichtungserfolges** erfolgt durch die **Bestimmung der Dichte im Feld** nach DIN 18125, Teil 2 durch die sog. **Ersatzverfahren**, z. B.

- das Densitometerverfahren (Ballon-Verfahren) oder
- durch das Sandersatzverfahren.

Geprüft wird die zuletzt verdichtete Bodenschicht, indem eine Probe aus der Oberfläche entnommen und anschließend das zugehörige Volumen durch Ersatz gegen ein anderes Medium bekannter Dichte (z.B. Wasser oder Sand mit bekannter Schüttdichte) bestimmt wird.

Die Bodenprobe wird später im Labor in feuchtem Zustand sowie nach Ofentrocknung bei 105°C gewogen, so dass dann der Wassergehalt w und die Trockendichte ρ_d [g/cm³] Der geprüften Lage in situ bekannt sind. Die Trockendichte kann nun auf den Laborwert der Proctordichte für den gleichen Boden bezogen werden, so dass man den Verdichtungsgrad D_{pr} erhält.



Der direkte Nachweis des Verdichtungsgrades erfordert also einerseits die Ermittlung der Dichte im Feld, andererseits auch die Ermittlung der Proctordichte als Bezugswert im Labor. Einschränkend kann nur eine geringe Tiefe bis ca. 30 cm unter dem aktuellen Planum geprüft werden, so dass auf jeder Schüttlage nach der vorgeschätzten Anzahl von Verdichtungsübergängen eine Prüfung notwendig ist.

4 Verdichtung der Böden

4.4 Bestimmung des Verdichtungsgrades mit indirekten Methoden

Der große Aufwand für die direkte Verdichtungsprüfung hat zur Entwicklung von sog. indirekten Prüfverfahren geführt, bei denen über andere mechanische Bodenwiderstände aufgrund von **Erfahrungswerten** auf den zugehörigen Verdichtungsgrad geschlossen wird:

- statischer Lastplattendruckversuch nach DIN 18134:

Kriterium für die Qualität der Verdichtung ist der Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} und der Verformungsmodul E_{v2} . Die „Einwirkungstiefe“ der Lastplatte ist auf den ca. 2,5-fachen Plattendurchmesser D beschränkt. Bei Auffüllungen größerer Mächtigkeit wird somit die Durchführung von Plattendruckversuchen auf mindestens jeder dritten Einbaulage erforderlich (bei einem lagenweisen Einbau mit Schüttstärken von 30 cm).

Lastplattendruckversuche sind recht schnell und einfach ausführbar und daher **bei entsprechender Eichung für den zu prüfenden Boden** auch für eine systematische Kontrolle des Verdichtungsgrades geeignet.

In der ZTVE-StB 94 sind für verschiedene Bodenarten nichtbindige Böden Richtwerte angegeben, die zum indirekten Nachweis eines entsprechenden Verdichtungsgrades einzuhalten sind:

Boden- gruppen	Verdichtungsgrad D_{Pr} in %	Verformungsmodul E_{v2} in MN/m^2
GW, GI	≥ 100	≥ 100
	≥ 98	≥ 80
	≥ 97	≥ 70
GE, SE, SW, SI	≥ 100	≥ 80
	≥ 98	≥ 70
	≥ 97	≥ 60

Verdichtungsgrad D_{Pr}	Verhältniswert E_{v2}/E_{v1}
$\geq 100\%$	$\leq 2,3$
$\geq 98\%$	$\leq 2,5$
$\geq 97\%$	$\leq 2,6$

4 Verdichtung der Böden

- dynamischer Lastplattendruckversuch nach TP BF-StB:

Beim dynamischen Lastplattendruckversuch wird die Lastplatte nicht statisch, sondern durch eine Fallmasse belastet, die aus definierter Höhe ausgeklinkt und auf ein Federpaket auf der Platte fallen gelassen wird (elastischer Stoß). Die zugehörige Plattenbeschleunigung ist ein Maß für die Zusammendrückbarkeit des Bodens darunter und damit auch **indirekt** für seinen **Verdichtungsgrad**. Zu berücksichtigen ist die begrenzte Prüftiefe (Einwirktiefe) des Versuchs, welcher somit keine Aussagekraft bezüglich der Tragfähigkeit bzw. Verdichtung des tieferen Untergrundes hat.

- Rammsondierungen nach DIN 4094

Rammsondierungen liefern über den Eindringwiderstand N_{10} als Anzahl der Rammschläge für 10 cm Sondeneindringung ein **indirektes Maß** für die Zusammendrückbarkeit und die Scherfestigkeit und damit letzten Endes auch über den Verdichtungsgrad. Diese Methode bietet den **Vorteil**, auch **große Tiefen** prüfen zu können, sofern im aufgeschütteten Boden keine größeren Steine als Rammhindernisse vorkommen.

Allerdings stehen in DIN 4094 nur für sehr wenige Bodenarten Eichkurven zur Verfügung, die den Sondierwiderstand in Beziehung zur Lagerungsdichte bringen, jedoch noch nicht allgemein zur Proctordichte bzw. zum Verdichtungsgrad. Insofern ist bei Einsatz von Sondierungen für die zu prüfende Bodenart immer eine örtliche Eichung mit Hilfe von Proctorversuchen durchzuführen.

4 Verdichtung der Böden

4.5 Verdichtungsanforderungen

Da der Erdbau vor allem im Verkehrswegebau eine überragende Rolle spielt, haben das Bundesministerium für Verkehr sowie die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Regelwerke herausgegeben, in denen spezifische Regeln und Anforderungen definiert sind.

Hier wird besonders verwiesen auf die ZTVE-StB 94, die von FLOSS (1997) kommentiert ist. Die ZTVE-StB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau) sind auch außerhalb des Straßenbaus regelmäßige Grundlage für Erdarbeiten.

In der ZTVE-StB 94 sind an die Verdichtung in Abhängigkeit von Bodengruppen und der Lage des eingebauten Erdstoffes z.B. folgende Verdichtungsanforderungen gestellt:

Bereich	Bodengruppen	D_{Pr} in %
Planum bis 1,0 m Tiefe bei Dämmen und bis 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GW, GI, GE SW, SI, SE	100
1,0 m unter Planum bis Dammsohle	GW, GI, GE SW, SI, SE	98

Bereich	Bodengruppen	D_{Pr} in %
Planum bis 0,5 m Tiefe	GU, GT, SU, ST	100
	GU*, GT*, SU*, ST* U, T, OK, OU, OT	97
0,5 m unter Planum bis Dammsohle	GU, GT, SU, ST OH, OK	97
	GU*, GT*, SU*, ST* U, T, OU, OT	95

Außerdem wird für das Planum (Schnittstelle zwischen Erdbauwerk und Straßenoberbau) im Regelfall die Anforderung gestellt, dass ein Verformungsmodul E_{v2} von 45 MN/m² erreicht wird. Im Straßenbau bezieht sich diese Forderung entsprechend der ZTVE auf frostempfindlichen Untergrund bzw. Unterbau (also gemischt- und feinkörnige Böden). Bei frostsicherem Untergrund (also Kies und Sand) wird ein Verformungsmodul von i.d.R. $E_{v2} = 120 \text{ MN/m}^2$ verlangt.

Dies setzt in beiden Fällen sowohl ein geeignetes (weitgestufte nichtbindige Böden) bzw. aufbereitetes (verfestigte bindige Böden) Material als auch eine sorgfältige Verdichtungsarbeit voraus.

5 Bodenverbesserungen und -verfestigungen

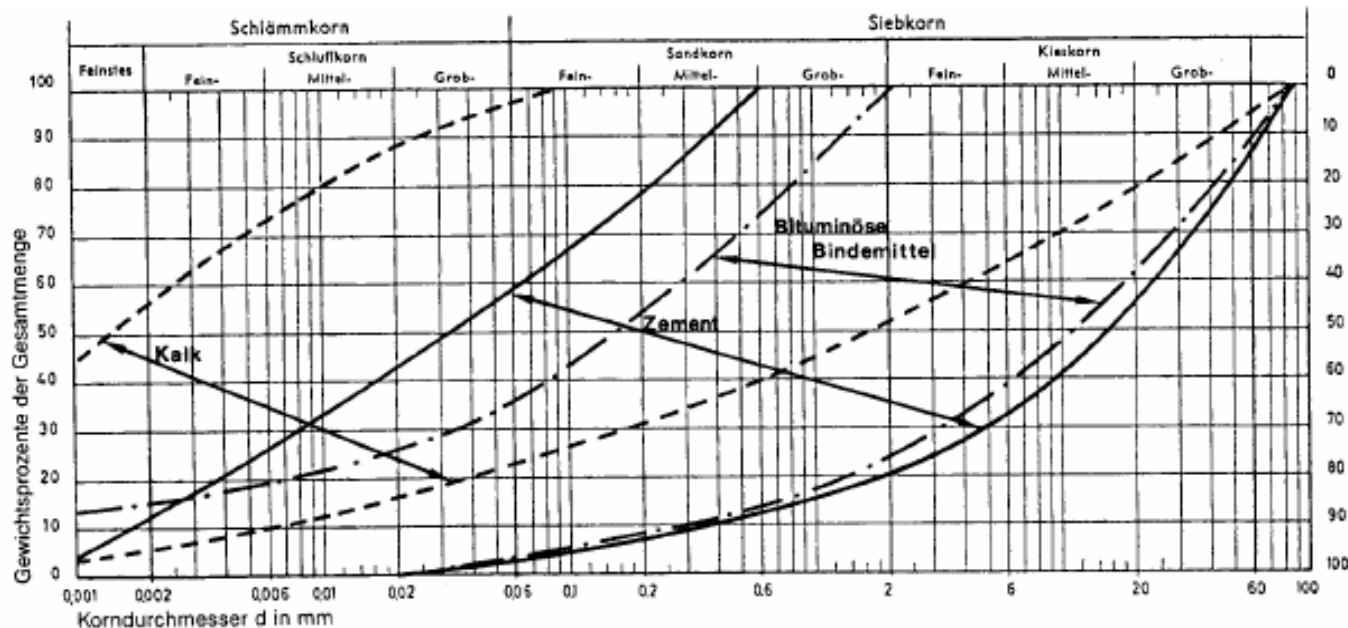
Bodenverbesserung:

Die **Einbaufähigkeit** und die **Verdichtbarkeit** des Bodens soll verbessert werden. Eine Bodenverbesserung erfolgt mit Feinkalk oder Kalkhydrat, mit hydraulischen Bindemitteln oder durch Zugabe von Mineralkorn ohne Bindemittel.

Bodenverfestigung:

Mit hydraulischen Bindemitteln (Zement oder hydraulischer Kalk) oder mit bituminösen Bindemitteln sollen eine **verbesserte Tragfähigkeit**, **geringere Setzungen** und/oder eine **höhere Widerstandsfähigkeit** gegen Wasser und Frost **dauerhaft** erreicht werden.

Eignung der verschiedenen Bindemittel in Abhängigkeit von der Bodenart:



5 Bodenverbesserung und -verfestigungen

Zemente

werden nur für **Verfestigungen** eingesetzt. Die Verfestigung beruht auf dem chemischen Kristallisationsvorgang des Zements, durch den die Bodenteilchen gebunden werden. Es werden übliche Normzemente verwendet.

Zur Festlegung der erforderlichen Zugabemenge in Abhängigkeit vom natürlichen Wassergehalt der zu verfestigenden Böden ist grundsätzlich eine Eignungsprüfung durchzuführen.

Orientierende Richtwerte (Erfahrungswerte) für die Menge des zuzumischenden Zementes:

Bodenart nach DIN 18196		Zementanteil in Gew.-Teilen bezogen auf auf 100 GT des bei 105 °C getrockneten Bodens
1	GW, GI, GE, SW, SI	4 bis 7
2	SE	8 bis 12
3	GU, GT, SU, ST	6 bis 10
4	GÜ, GÜ, SÜ, SÜ	7 bis 12
5	UL, TL	7 bis 12
6	UM, UA, TM, TA	10 bis 16

Kalke

Es wird Branntkalk (CaO) oder Kalkhydrat (Ca(OH)_2) verwendet. Diese Kalke binden an der Luft unter Aufnahme von CO_2 ab, wobei langsam wieder Calciumkarbonat (CaCO_3) entsteht. Das Hauptanwendungsgebiet der Feinkalke und Kalkhydrate liegt bei den **Bodenverbesserungen** kommen Feinkalk oder Kalkhydrat für die Bodenverfestigung in Betracht, muß der Bindemittelanteil mindestens 4 Gew.% betragen.

Richtwerte für die Zugabemenge an Kalk:

	Feinkalk	Kalkhydrat
Bodenverbesserung (Sofortwirkung)	2 bis 4	2 bis 5
Bodenverfestigung (Langzeitwirkung)	4 bis 6	4 bis 8

5 Bodenverbesserung und -verfestigungen

Wirkung von Kalk bei der Bodenverbesserung:

- Reduktion des Wassergehaltes: Bei allen Kalkarten wird der Wassergehalt des Bodens um etwa 4% bis 7% vermindert; jedes Gewichtsprozent Branntkalk (CaO) reduziert durch das Ablöschen und durch die Erwärmung des Bodens den Wassergehalt zusätzlich um 1% bis 2%.
- Krümelung des Bodens: Die bindigen Bodenteilchen werden zu wasserbeständigen größeren Konglomeraten zusammengeballt.
- Veränderung der Verdichtungseigenschaften: Der optimale Wassergehalt wird erhöht, die Proctordichte nimmt ab.

Das Einbringen von Bindemitteln in den Boden kann stationär in Zwangsmischern vorgenommen werden, was optimale Dosierung und geringe Staubemissionen zur Folge hat, aber deutlich höhere Kosten verursacht als das übliche dosierte Aufstreuen in der Fläche und Einfräsen am Einbauort.

Das Einfräsen setzt **steinfreie Böden** voraus. In steinhaltigen Böden können Bindemittel auch mit Eggen oder Reißzähnen eingebracht werden. Die Wirkung ist hierbei jedoch wegen der schlechteren Durchmischung geringer, bzw. es wird mehr Bindemittel benötigt.



6 Zulässige Bodenpressungen

6.1 Zulässige Bodenpressungen in Regelfällen nach DIN 1054

In DIN 1054 sind zulässige Bodenpressungen in Regelfällen angegeben (Tab. 1-6):

Tabelle 1: Nichtbindiger Baugrund und setzungsempfindliches Bauwerk

Kleinste Einbindetiefe des Fundaments in m	Zulässige Bodenpressung in kN/m ² ⁽¹⁾ bei Streifenfundamenten mit Breiten b bzw. b' von					
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	2,0 m	2,5 m	3,0 m
0,5	200	300	330	280	250	220
1,0	270	370	360	310	280	240
1,5	340	440	390	340	290	260
2,0	400	500	420	360	310	280
bei Bauwerken mit Gründungstiefen t ab 0,3 m und mit Fundamentbreiten b ab 0,3 m	150					
⁽¹⁾ Für Kraftgrößen wird nach DIN 1301 die Einheit kN (Kilonewton) 1 kN = 10 ³ N verwendet (1 kN = 1000/9,80665 kp, 1 kN = 100 kp bzw. 1 kN/m ² = 0,010 kp/cm ²)						

Tabelle 2: Nichtbindiger Baugrund und setzungsunempfindliches Bauwerk

Kleinste Einbindetiefe des Fundaments in m	Zulässige Bodenpressung in kN/m ² bei Streifenfundamenten mit Breiten b bzw. b' von			
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	2,0 m
0,5	200	300	400	500
1,0	270	370	470	570
1,5	340	440	540	640
2,0	400	500	600	700
bei Bauwerken mit Gründungstiefen t ab 0,3 m und mit Fundamentbreiten b ab 0,3 m	150			

6 Zulässige Bodenpressungen

Tabelle 3: Reiner Schluff ⁽¹⁾

Kleinste Einbindetiefe des Fundaments in m	Zulässige Bodenpressung in kN/m ² bei Streifenfundamenten mit Breiten b bzw. b' von 0,5 bis 2 m und steifer bis halbfester Konsistenz
0,5	130
1,0	180
1,5	220
2,0	250

⁽¹⁾ Entspricht der Bodengruppe UL nach DIN 18 196, Ausgabe Juni 1970

Tabelle 4: Gemischtkörniger Boden, der Korngrößen vom Ton- bis in den Sand-, Kies- oder Steinbereich enthält⁽¹⁾

Kleinste Einbindetiefe des Fundaments in m	Zulässige Bodenpressung in kN/m ² bei Streifenfundamenten mit Breiten b bzw. b' von 0,5 bis 2 m und einer Konsistenz		
	steif	halbfest	fest
0,5	150	220	330
1,0	180	280	380
1,5	220	330	440
2,0	250	370	500

⁽¹⁾ Entspricht den Bodengruppen SU, ST, ST, GU, GT nach DIN 18 196, Ausgabe Juni 1970

Tabelle 5: Tonig schluffiger Boden (1)

Kleinste Einbindetiefe des Fundaments in m	Zulässige Bodenpressung in kN/m ² bei Streifenfundamenten mit Breiten b bzw. b' von 0,5 bis 2 m und einer Konsistenz		
	steif	halbfest	fest
0,5	120	170	280
1,0	140	210	320
1,5	160	250	360
2,0	180	280	400

⁽¹⁾ Entspricht den Bodengruppen UM, TL und TM nach DIN 18 196, Ausgabe Juni 1970

6 Zulässige Bodenpressungen

Tabelle 6: Fetter Ton ⁽¹⁾

Kleinste Einbindetiefe des Fundaments in m	Zulässige Bodenpressung in kN/m ² ⁽²⁾ bei Streifenfundamenten mit Breiten b bzw. b' von 0,5 bis 2 m und einer Konsistenz		
	steif	halbfest	fest
0,5	90	140	200
1,0	110	180	240
1,5	130	210	270
2,0	150	230	300

⁽¹⁾ Entspricht den Bodengruppe TA nach DIN 18 196, Ausgabe Juni 1970

Einschränkungen:

Regelfälle im Sinne der DIN 1054 sind Flächengründungen (Streifenfundamente), welche die in den Tafeln genannten Abmessungen besitzen und die auf den in den Tafeln genannten typischen Bodenarten ausgeführt werden.

Voraussetzung für die Anwendung der Tafeln ist, dass der Baugrund ausreichend erkundet ist und seine Eigenschaften zuverlässig eingeschätzt werden können.

Ferner muss die Schichtung annähernd waagrecht und die Baugrundverhältnisse unterhalb der Fundamentsohle bis in eine Tiefe von $d \geq 2b$ (b = Fundamentbreite) annähernd gleichmäßig sein und das Fundament darf nicht überwiegend oder regelmäßig dynamisch beansprucht werden.

Voraussetzung ist ferner, dass keine ungünstigen Erfahrungen an benachbarten Bauwerken vorliegen und dass die Spannung in der Bodenfuge gleichmäßig verteilt angenommen werden kann.

Ferner muss die Gründungssohle frostfrei liegen, d.h. mindestens 80 cm unter Geländeoberkante (in Süddeutschland ggf. auch tiefer).

6 Zulässige Bodenpressungen

Weitere Einschränkungen und Anwendungsvoraussetzungen:

Die in den Tafeln 1 und 2 angegebenen Werte der zulässigen Bodenpressungen in Regelfällen gelten nur für lotrecht und mittig belastete Streifenfundamente auf nichtbindigem Baugrund (GE, GW, GI, SE, SW, SI, GU, GT, SU nach DIN18196) mit **ausreichender Tragfähigkeit**.

Als „ausreichend tragfähig“ sind derartige Böden bei einer **durchgängig mindestens mitteldichten Lagerung** anzusehen. Dies entspricht einem **Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \geq 98$ %**, welcher durch geeignete Verfahren nachzuweisen ist (z.B. Rammsondierungen oder direkte Dichtebestimmungen). Sollen die Tabellenwerte bei geringerer Lagerungsdichte angesetzt werden, so ist der Baugrund entsprechend nachzuverdichten.

Bei Ansatz der Tafelwerte gemäß DIN 1054 Tabelle 1 muss mit maximalen Setzungen gerechnet werden, die bei Fundamenten mit Breiten $\leq 1,5\text{m}$ bis zu **1cm** und bei Fundamenten mit Breiten $> 1,5\text{m}$ bis zu **2cm** betragen. Im Falle einer wesentlichen Drucküberlagerung unter benachbarten Fundamenten sind auch größere Setzungsbeträge nicht auszuschließen.

Der Ansatz der Tafelwerte gemäß DIN 1054 Tabelle 2 kann bei Fundamenten mit Breiten $\leq 1,5\text{m}$ zu Setzungen von ca. **2cm** und bei Fundamenten mit Breiten $> 1,5\text{m}$ zu „**wesentlich höheren Setzungen**“ führen.

Weitere Einschränkungen bei der Anwendung der Tabellen 1 und 2 (z.B. Grundwassereinfluss, Horizontalkräfte, etc.): **siehe DIN 1054**.

6 Zulässige Bodenpressungen

Die für bindige Böden in den Tabellen 3 bis 6 angegebenen Werte der zulässigen Bodenpressungen in Regelfällen gelten nur für lotrecht und mittig belastete Streifenfundamente auf der jeweils angegebenen Bodenart mit der angegebenen Konsistenz.

Bindige Böden von weicher Konsistenz stellen somit keinen Regelfall gemäß DIN 1054 dar. Die Tabellenwerte dürfen in diesem Fall nicht angesetzt werden.

Bei einem Untergrund von steifer Konsistenz setzt die Anwendung der Tabellenwerte voraus, dass die Fundamentbelastung nur allmählich wächst. Wird das Fundament innerhalb sehr kurzer Zeit (etwa innerhalb von 15 Tagen) voll belastet, so dürfen die Tabellenwerte nicht angesetzt werden (kein Regelfall).

Die in den Tabellen 3 bis 6 angegebenen Bodenpressungen können bei nicht zu engem Fundamentabstand ($e > 3m$ und $e > 3b$) zu Setzungen führen, die in den Größenordnungen **2 bis 4cm** liegen (bei wesentlicher Beeinflussung benachbarter Fundamente auch mehr).

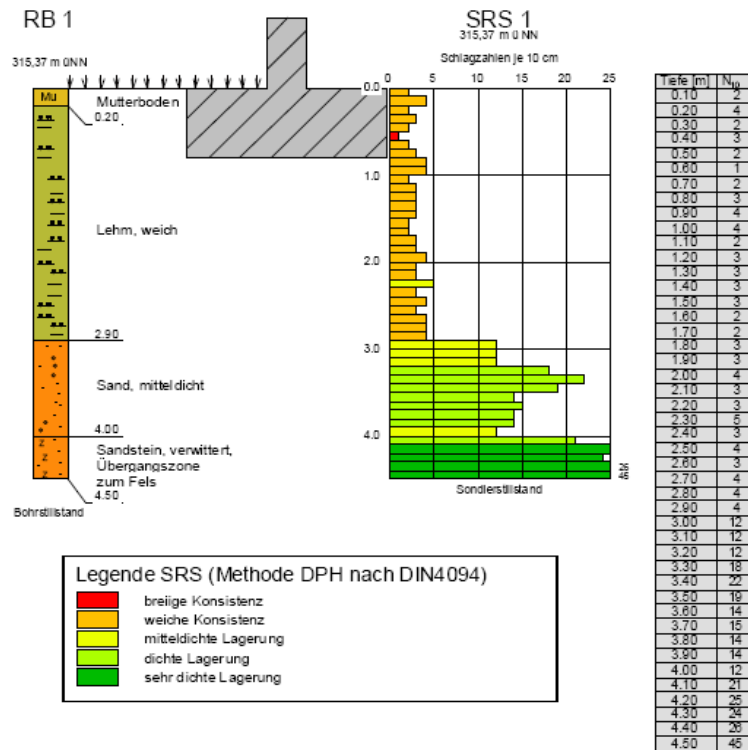
Weitere Einschränkungen bei der Anwendung der Tabellen 3 bis 6: siehe DIN 1054.

Sind die Voraussetzungen zur Einstufung als Regelfall gemäß DIN 1054 nicht erfüllt (z.B. lockere Lagerung oder weiche Konsistenz), oder sollen die angegebenen Werte der zulässigen Bodenpressung überschritten werden, oder können die zu erwartenden Setzungsbeträge nicht in Kauf genommen werden, so ist die zulässige Bodenpressung im Einzelfall rechnerisch nachzuweisen.

6 Zulässige Bodenpressungen

6.2 Beispiel:

Geplantes Gründungsniveau: 0,8 m uGOK






Kenngrößen der Schichtglieder:

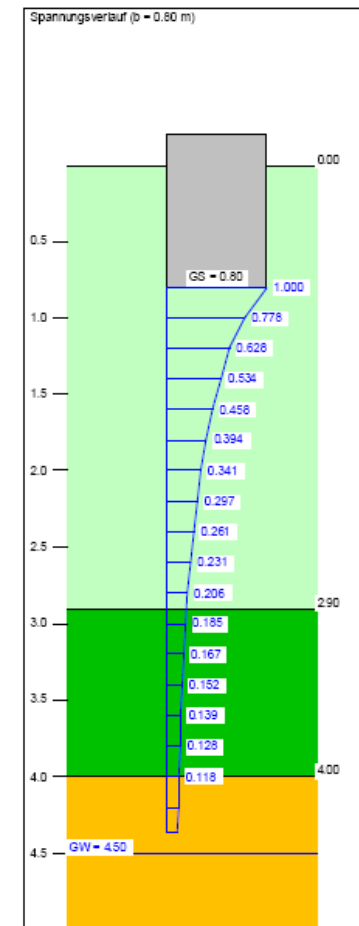
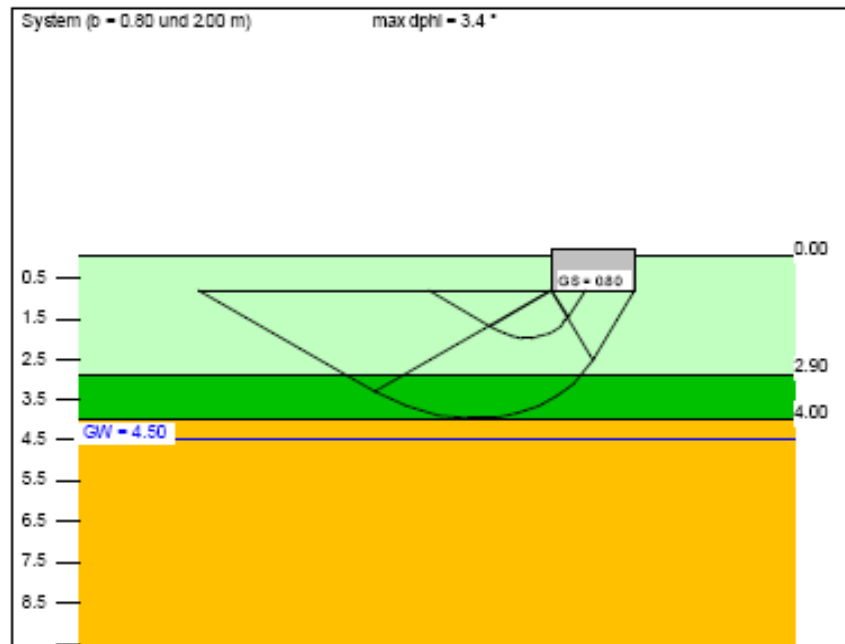
	SG I Lehme	SG II Sand	SG III Übergangszon e
Bodengruppe (DIN 18196)	TL	SU	GU
Bodenklasse (DIN 18300)	4	3	5
Konsistenz Lagerungsdichte	weich ---	---	---
Wichte (DIN 1055) cal γ [kN/m ³] cal γ' [kN/m ³]	20 10	19,5 11,5	22 12
Reibungswinkel ϕ' (DIN 1055) [Grad]	27,5	32,5	35
Kohäsion (DIN 1055) cal c_u [kN/m ²] cal c' [kN/m ²]	0 0	---	---
Steifemodul E_s [MN/m ²]	5	50	80

6 Zulässige Bodenpressungen

Grundbruch- und Setzungsberechnung nach DIN 4017 und DIN 4019

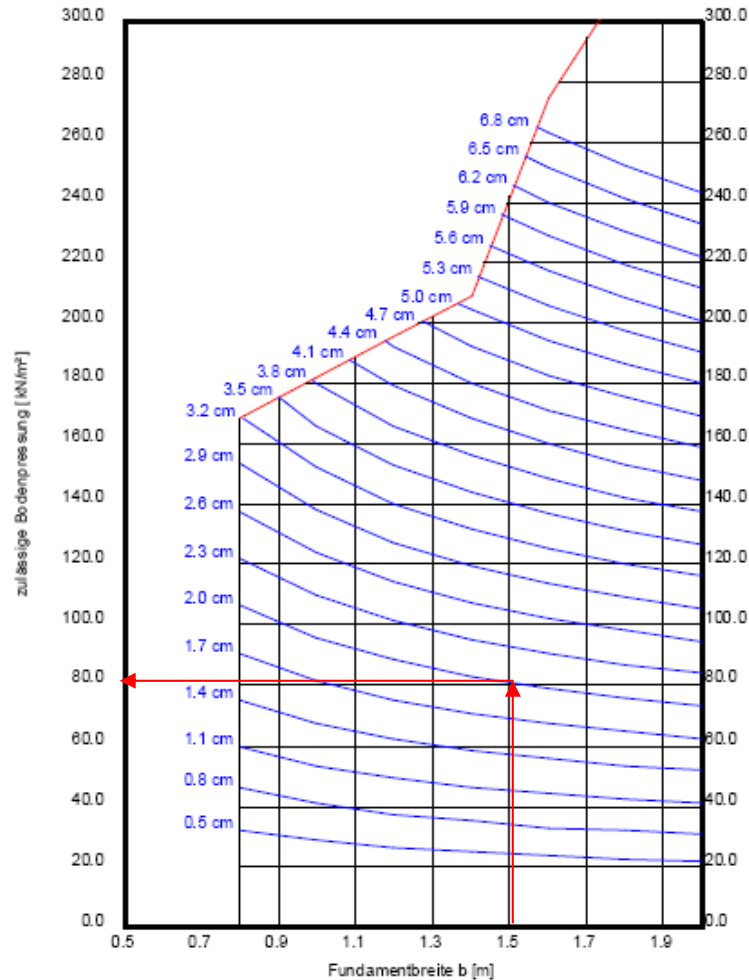
Boden	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kN/m ²]	E_s [MN/m ²]	v [-]	Bezeichnung
	20.0	10.0	27.5	0.0	5.0	0.00	Lehm, weich
	19.5	11.5	32.5	0.0	50.0	0.00	Sand
	22.0	12.0	35.0	0.0	80.0	0.00	Übergangszone

Berechnungsgrundlagen:
 Beispiel
 Globalsicherheitskonzept
 Streifenfundament (a = 10.00 m)
 Bezugsgröße: Last
 Grundbruchsicherheit = 2.00
 Gründungssohle = 0.80 m
 Grundwasser = 4.50 m
 Grenztiefe mit p = 20.0 %



6 Zulässige Bodenpressungen

Grundbruch- und Setzungsberechnung nach DIN 4017 und DIN 4019



a [m]	b [m]	zul σ [kN/m ²]	zul V [kN/m]	s [cm]	cal φ [°]	cal c [kN/m ²]	γ_s [kN/m ³]	σ_{θ} [kN/m ²]	t_p [m]	UK LS [m]
10.00	0.80	168.2	134.5	3.18	27.5	0.00	20.00	16.00	4.36	1.96
10.00	1.00	182.0	182.0	3.84	27.5	0.00	20.00	16.00	4.97	2.25
10.00	1.20	195.6	234.7	4.48	27.5	0.00	20.00	16.00	5.58	2.54
10.00	1.40	209.0	292.6	5.11	27.5	0.00	20.00	16.00	6.17	2.83
10.00	1.60	274.8	439.7	7.11	29.1	0.00	19.97	16.00	7.44	3.25
10.00	1.80	314.0	565.2	8.50	29.6	0.00	19.94	16.00	8.32	3.61
10.00	2.00	348.4	696.7	9.80	30.0	0.00	19.90	16.00	9.12	3.96

- Vorgabe Tragwerksplaner: **zulässige Setzung: 2 cm**
- zul Bodenpressung 100 kN/m² bei b = 0,9m (90 kN/m)
 - zul Bodenpressung 80 kN/m² bei b = 1,5m (120 kN/m)

7 Hallenbodenplatten

Industrieböden aus Stahlfaserbeton

Die Hallenbodenplatten müssen vollflächig auf einer in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit des Untergrundes (Erdplanum) dimensionierten Tragschicht aufliegen. Die Dicke der Tragschicht ist im Einzelfall auf die maßgebende Belastung der Bodenplatte und die Tragfähigkeit des Untergrundes abzustimmen. In der Regel werden Tragschichten in einer Stärke von 20 - 30 cm als Kiestragschichten oder Schottertragschichten ausgeführt. Die Mindestdicke von 15 cm sollte keinesfalls unterschritten werden.

In Abhängigkeit von der Größe der als Einzellast wirkenden, maßgebenden Belastung des Betonbodens werden an die Tragfähigkeit des Untergrundes (Erdplanum) und der Tragschicht die nachfolgenden Anforderungen gestellt (vgl. Lohmeyer, „Betonböden im Industriebau, Hallen und Freiflächen“, Bundesverband der deutschen Zementindustrie, 5. Auflage, 1996):

Erdplanum:

Belastung max. Einzellast Q in kN	Verformungsmodul E_{v2} in MN/m ²
≤ 32,5	≥ 30
≤ 60	≥ 45
≤ 100	≥ 60
≤ 150	≥ 80
≤ 200	≥ 100

Tragschicht:

Belastung max. Einzellast Q in kN	Verformungsmodul E_{v2} in MN/m ²
≤ 32,5	≥ 80
≤ 60	≥ 100
≤ 100	≥ 120
≤ 150	≥ 150
≤ 200	≥ 180

Die Tragfähigkeiten sind mittels Lastplattenversuchen nach DIN 18134 nachzuweisen.

Dabei soll das Verhältnis der Verformungsmoduln nach Lohmeyer $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ sein.

7 Hallenbodenplatten

Basierend auf Erfahrungen ist das Erreichen der obigen Mindestwerte auf dem anstehenden Erdplanum oftmals ohne zusätzliche technische Maßnahmen (Bodenverfestigung oder Teilbodenaustausch) nicht gewährleistet. Entsprechende Maßnahmen sollten im Rahmen der Ausschreibung daher generell als Bedarfspositionen einkalkuliert werden.

Zur Abschätzung des Umfangs gegebenenfalls erforderlich werdender Sondermaßnahmen ist die Durchführung von Lastplattendruckversuchen im Vorfeld der Baumaßnahme auf Testfeldern zu empfehlen.

Bemessungsverfahren

Grundlage ist die Berechnung von Spannungen aus Schnittgrößen auf Basis der Elastizitätstheorie. Als statisches System wird die Berechnung einer elastisch gebetteten Platte herangezogen. Die Ermittlung der Bettungsbedingungen basiert auf **vereinfachten Annahmen** der Theorie des elastischisotropen Halbraumes. Auf Grund der Forderung nach Rissefreiheit des Industriebodens im Gebrauchszustand werden die ermittelten Spannungen mit Sicherheiten beaufschlagt und mit den Erstrissfestigkeiten des Stahlfaserbetons verglichen (Bemessung nach Zustand I).

In der Praxis haben sich die folgenden Beanspruchungen monolithischer Bodenplatten als maßgebend gezeigt:

- Spannungen aus statischen Punktlasten
- Spannungen aus beweglichen Punktlasten
- Spannungen aus Schwindbeanspruchung
- Spannungen aus Blocklasten
- Spannungen aus Temperaturbeanspruchungen

7 Hallenbodenplatten

Punktlasten sind jene Lasten, die auf Grund ihrer konzentrierten Lasteinleitung, die massivsten Beanspruchungen von Platten hervorrufen. Die Berechnung von Spannungen erfolgt nach dem **modifizierten Verfahren von Westergaard / Odemark**. Dabei wird eine auf Federn gelagerte Platte untersucht, deren Federsteifigkeiten durch den Bettungsmodul k gekennzeichnet sind. Der Bettungsmodul der durch die Punktlast beanspruchten Platte wird hierbei näherungsweise wie folgt angesetzt:

$$k = E_{v2}/D \quad \text{mit} \quad D = 0,83 \times d \times (E_b/E_{v2})^{0,333}$$

D Ersatzdicke der Platte

d Plattendicke

E_b E - Modul Beton

E_{v2} Verdichtungsmodul der Tragschicht (Plattendruckversuch)

Die Berechnung der Spannungen erfolgt je nach Laststellung:

Lastfall Plattenmitte:

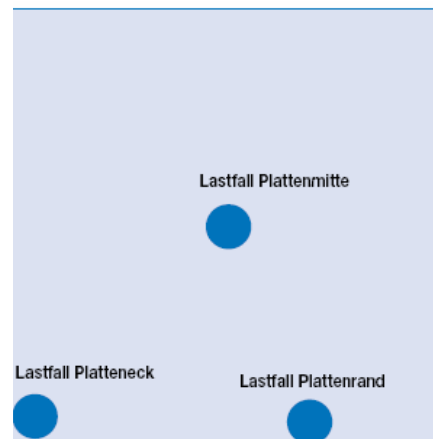
$$\sigma_{M} = 0,316 \times P/d^2 \times (\lg(E \times d^3/(k \times b^4)) - 0,436)$$

Lastfall Plattenrand:

$$\sigma_{R} = 0,572 \times P/d^2 \times (\lg(E \times d^3/(k \times b^4)) + \lg(0,1 \times b/0,978) - 1,08)$$

Lastfall Platteneck:

$$\sigma_{E} = 3 \times P/d^2 \times (1 - (117300 \times k/(E \times d^3))^{0,3} \times (0,141 \times a)^{1,2})$$



- mit Belastungsradius $a = (P/(p \times \pi))^{0,5}$
- mit Ersatzradius $b = (1,6 \times a^2 + d^2)^{0,5} - 0,675 \times d$
- mit Kontaktdruck p [N/mm²]
- mit Plattendicke d [mm]
- mit Einzellast P [N]
- mit Bettungsmodul k [N/mm³]
- mit Beton - E Modul E [N/mm²]
- mit Querdehnungszahl 0,15