

HUBER + WALTER

INGENIEURE

HUBER + WALTER INGENIEURE

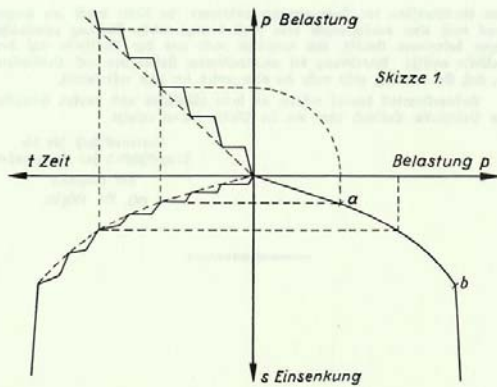
ALEX-MÜLLER-STR. 100
67657 KAISERSLAUTERN

TELEFON 0631 6 58 53
TELEFAX 0631 414 54 36
E-MAIL huber_walter@t-online.de
INTERNET www.huber-walter.de

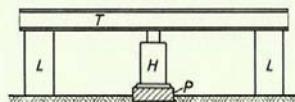
LABOR HAUPTSTRASSE 185 A
67691 HOCHSPEYER

Vom Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz anerkannte Prüfstelle für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau (RAP Stra 04), Fachgebiet Boden

EIN BEITRAG ZUR ABSCHÄTZUNG DER ERGEBNIS-
ZUVERLÄSSIGKEIT VON PLATTENDRUCKVERSUCHEN



L... Totlast
T... Träger
H... hydraul. Presse od.
Spindeltrieb.
P... Prüfplatte



Skizze 2.

einfacher und schneller Weise möglich, auch gleichmäßige Belastungsgeschwindigkeit, vor allem keine Gefahr für die Beobachtenden durch Umsturz oder Schiefstellung der Last.

e) Beobachtung der Einsenkung. Fernrohre oder Nivellierinstrumente weit genug entfernt von der Lastplatte. Stäben an dieser, möglichst an 3 Stellen des Umfanges, mindestens aber an 2 diametral gegenüberliegenden Stellen. Meßuhren von Zeiß und anderen. Diese aber nicht an

63

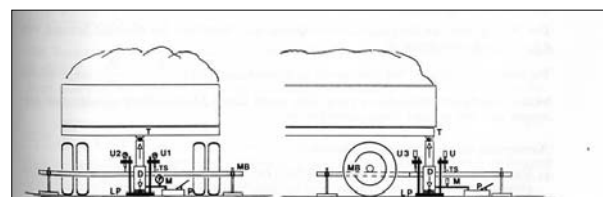
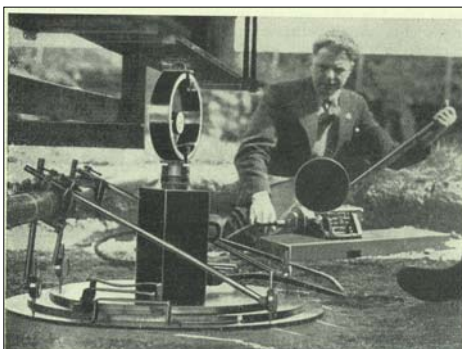


Abb. 81: Plattendruckversuch; Lkw als Gegengewicht; Ansicht von hinten und von der Seite; LP = Lastplatte; D = Druckstempel; T = Quertraverse; P = hydraul. Pumpe; M = Manometer; U = Uhren; MB = Meßbrücke

141

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 Vorbemerkungen	3
2 Auswertung von Plattendruckversuchen	3
2.1 DIN 18134, Ausgabe 09/2001	3
2.2 Gesetz von Hooke	3
2.3 Verformungsmodul	4
2.4 Rechenbeispiel	4
3 Messwertermittlung	6
3.1 Allgemeines	6
3.2 Methode 1	6
3.3 Methode 2	6
3.4 Systematische Abweichungen	6
4 Zusammenfassung und Beurteilungen	8

ANLAGENVERZEICHNIS

- Anlage 1 **Rechenbeispiel: Auswertung eines Plattendruckversuches**
- Anlage 2 **Rechenbeispiel: Auswertung mit systematischen Abweichungen**

1 VORBEMERKUNGEN

Von Seiten externer Dritter wurde dem Landesbetrieb Mobilität Kaiserslautern angetragen zu überprüfen, ob die Messmethode der von uns ausgeführten Plattendruckversuche regelkonform ist. Die nachfolgenden Erläuterungen beschreiben anhand einfach nachzuvollziehender Rechenbeispiele und mathematischer Ansätze die Zuverlässigkeit unserer Messungen und deren Konformität zur DIN 18134.

Diese Ausarbeitung werden wir für fachlich Interessierte auf unser homepage (www.huber-walter.de) veröffentlichen. Für Kritik und Anregungen steht der Autor zur Verfügung.

2 AUSWERTUNG VON PLATTENDRUCKVERSUCHEN

2.1 DIN 18134, Ausgabe 09/2001

Die Ausführung von Plattendruckversuchen ist in der DIN 18134, Ausgabe 09/2001, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte: Plattendruckversuch, geregelt. Darin ist vorgegeben, die Versuchsauswertung mit Hilfe elektronischer Hilfsmittel (Kapitel 8.2) durchzuführen. Sie basiert auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Fehlerquadratausgleichsrechnung), die die resultierenden Drucksetzungslinien als Polynome 2. Grades ermittelt.

Aus den Steigungen der Erst- und Zweitbelastung werden - im Unterschied zu vorherigen Ausgaben der DIN 18134 – die Verformungsmodule E_{v2} und E_{v1} nicht graphisch ermittelt sondern elektronisch errechnet. Unverändert gilt die Definition im Kapitel 3.3 „Verformungsmodul E_v : Kenngröße für die Verformbarkeit des Bodens; er wird durch die Drucksetzungslinie der Erst- oder Wiederbelastung aus der Neigung der Sekante zwischen den Punkten $0,3 \times \sigma_{max}$ und $0,7 \times \sigma_{max}$ definiert.“

2.2 Gesetz von Hooke

Die Ermittlung des Verformungsmoduls beruht im Wesentlichen auf dem Stoffgesetz von Hooke. Es stellt die Verknüpfung von Spannungen und Verformungen her. Der englische Naturforscher Robert Hooke (1635 bis 1703) fand 1678 die nach ihm benannte Gesetzmäßigkeit (Stoffgesetz): Die elastische Dehnung ist der vorhandenen Spannung

proportional. Erst 100 Jahre nach der erstmaligen Formulierung durch Hooke machte der englische Arzt und Naturforscher Thomas Young (1773 bis 1829) Angaben über den Proportionalitätsfaktor: Die Spannungen sind über einen Elastizitätsmodul E mit den Verformungen verknüpft. Es gilt: $\alpha = 1 / E$ und daraus folgt: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

2.3 Verformungsmodul

Also ist der Verformungsmodul $E_v = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ im o. g. Spannungsbereich, wobei innerhalb der Auswertung die benötigte Schichtdicke s bzw. die Einwirktiefe der Lastplatte durch eine empirisch ermittelte Konstante Berücksichtigung findet.

$$\Delta\varepsilon \approx \frac{\Delta s}{l} = \frac{\Delta s}{0,75 \cdot d} = \frac{\Delta s}{1,5 \cdot r}$$

Der Verformungsmodul errechnet sich dann anstatt wie zuvor $E_{v1,2} = 0,75 \cdot d \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s}$

$$\text{nunmehr } E_{v1,2} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{\max}}$$

2.4 Rechenbeispiel

In der **Anlage 1** ist beispielhaft die Ermittlung der Verformungsmodule der Erstbelastung E_{v1} , der Zweitbelastung E_{v2} sowie das Verhältnis E_{v2} / E_{v1} anhand einer Tabellenkalkulation mit der oben im Text genannten Methode der kleinsten Fehlerquadrate dargestellt. Zusätzlich sind die zugehörigen Konstanten der binomischen Gleichungen, die mittels Determinantengleichungen ermittelt sind, aufgenommen. Die aufgeführten Laststufen orientieren sich am Rechenbeispiel der DIN 18134, Tabelle A1. Die Ergebnisse lauten:

Plattendruckversuch nach DIN 18134 – 300

	E_{v1} [MN/m ²]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2} / E_{v1} [-]
LP 1	60,2	119,3	1,98

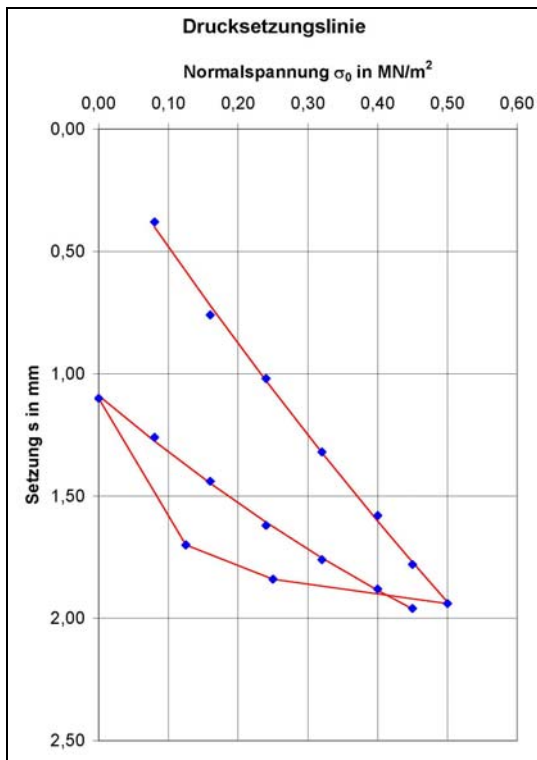


Abbildung 1: Drucksetzungslinie für LP 1

Die Drucksetzungslinie enthält die Messpunkte (blaue Punkte) sowie die errechneten Polynome (rote Linien). Die Entlastungskurve findet bei der Auswertung keine Berücksichtigung. In der graphischen Darstellung ist der erste Messpunkt grundsätzlich nicht wieder gegeben, weil es durch die Ausgleichsrechnung zu negativen Ordinatenwerten kommen kann. Diese Vorgehensweise wurde u. a. im Rahmen des Anerkennungsverfahrens als Bodenprüfstelle mit der Bundesanstalt für Straßenwesen abgestimmt.

3 MESSWERTERMITTLUNG

3.1 Allgemeines

In der Baustellenpraxis gibt es zwei unterschiedliche Methoden zur Messwertermittlung. Bei der ersten werden kraftgesteuert die vorgesehenen Laststufen angezielt und anschließend die Setzungen abgelesen. Diese Methode wird derzeit vom Autor praktiziert. Bei der zweiten Methode erfolgt die Ablesung der Messwerte Kraft bzw. Spannung sowie der Plattensetzung zeitgleich durch eine elektronische Messwerterfassung. Sinngemäß werden nachfolgend die Begriffe „Methode 1“ und „Methode 2“ verwendet. Es geht nun darum den Unterschied beider Methoden zu erläutern und deren „Ergebnis-Zuverlässigkeit“ abzuschätzen.

3.2 Methode 1

Zum Zeitpunkt t_1 wird die Spannung σ_1 abgelesen und zum Zeitpunkt t_2 die Plattensetzung s_1 . Dadurch, dass die avisierte Spannung σ_1 nicht explizit protokolliert werden muss, beträgt der Zeitunterschied zwischen t_1 und t_2 schätzungsweise 1 bis 2 Sekunden. Die Spannungsänderung $\Delta\sigma$ zwischen dem Zeitpunkten t_1 und t_2 verändert sich bei einem „idealen“ Boden in dieser Zeitspanne nicht. Realistisch bewegt sich die Abweichung aber im Prozentbereich.

3.3 Methode 2

Zum Zeitpunkt t_1 wird elektronisch die Spannung σ_1 und die Plattensetzung s_1 abgelesen.

3.4 Systematische Abweichungen

Bei einer angenommenen, systematischen und konstanten Abweichung von 5 %, zum Beispiel bei der maximalen Laststufe $\sigma = 0,50 \text{ MN/m}^2$, beträgt die gemessene Spannung anstatt σ nun $\sigma_1 = \sigma \times 0,95 = 0,475 \text{ MN/m}^2$. Bezogen auf das Rechenbeispiel der **Anlage 1** ergeben sich bei dieser Annahme (5 % Abweichung) innerhalb aller Laststufen folgende Versuchsergebnisse (Zeile LP 2, vgl. **Anlage 2**):

Plattendruckversuch nach DIN 18134 – 300

	E_{v1} [MN/m ²]	E_{v2} [MN/m ²]	E_{v2} / E_{v1} [-]
LP 1	60,2	119,3	1,98

LP 2	57,2	113,3	1,98
Ergebnisabweichung	5 %	5 %	-

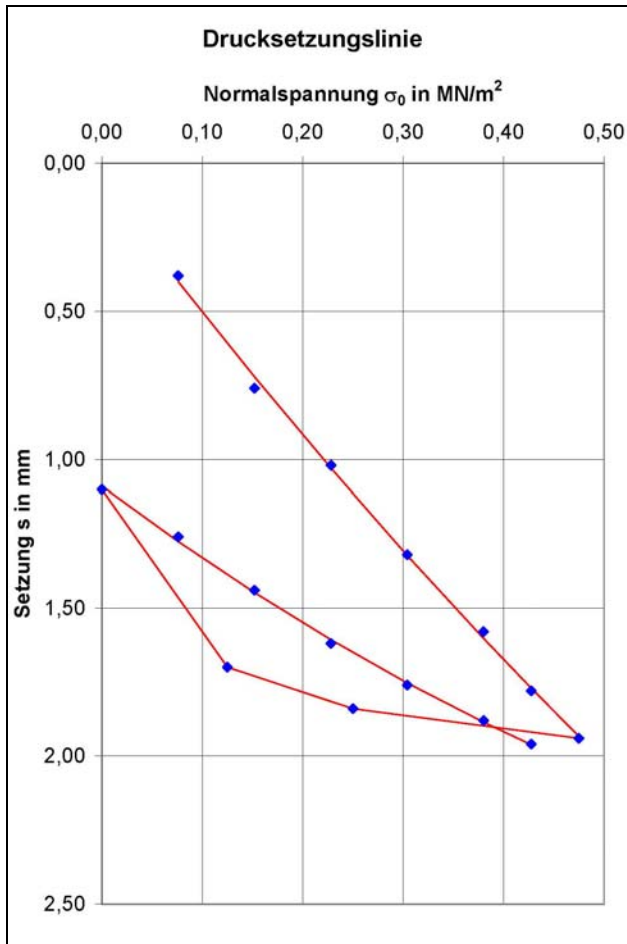


Abbildung 2: Drucksetzungslinie für LP 2 (mit abgeminderten Messwerten)

Unter Berücksichtigung der Definition, dass der Verformungsmodul der Sekantensteigung zweier Spannungsbereiche entspricht ($E_v = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$), ergibt eine systematische Abminderung, zum Beispiel durch eine ungewollte Ableseungenauigkeit, erwartungsgemäß ebenfalls eine lineare Abminderung um 5 %.

Dadurch dass sich die Spannungsdifferenz verringert wird die Sekantensteigung größer, in der graphischen Darstellung steiler, die Verformungsmodule kleiner.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND BEURTEILUNGEN

Aus den vorangestellten Überlegungen und Betrachtungen lassen sich einige allgemeine gültige Aussagen ableiten:

Die gleichzeitige elektronische Messung der Eingangsgrößen Spannung und Setzung (**Methode 2**) während der Durchführung von Plattendruckversuchen stellt unzweifelhaft die genaueste Messmethode dar.

Eine systematische Abminderung innerhalb der **Methode 1**, zum Beispiel durch eine ungewollte und unvermeidbare Ableseungenauigkeit bewirkt eine Abminderung der Versuchsergebnisse. Stark vereinfacht ausgedrückt, liegen die dadurch erzielten Ergebnisse auf der sicheren Seite bzw. die Verformbarkeit des Bodens wird etwas konservativer abgeschätzt als mit der **Methode 2**.

Sinngemäß dazu liegen die Versuchsergebnisse einer ungewollten aber nicht systematischen Abminderung ebenfalls auf der sicheren Seite. Erfahrungsgemäß entspricht dieser Fall der Baustellenpraxis. Die Abweichung beträgt pro Laststufe maximal ca. 1 %.

Die Frage der baustellengerechten Messgenauigkeit lässt sich im Rahmen dieser Betrachtung nicht beantworten. Beide Methoden, sowohl die Methode 1 als auch die Methode 2 sind konform zu den Vorgaben der DIN 18134. Aus Sicht des Autors wird sich in Zukunft die Methode 2 durchsetzen. Es bleibt zu hoffen, dass dadurch das zur Versuchsauswertung gehörende elementare Ingenieurwissen mit einfachsten bodenmechanischen Zusammenhängen nicht in den Hintergrund gedrängt wird oder ganz verloren geht.

Dazu kommt, dass es in der Natur der Sache liegt, dass die Methode 2 u. a. bei ungünstiger Witterung wegen der dadurch bedingten Störanfälligkeit der Elektronik gegenüber der Methode 1 an ihre Anwendungsgrenzen stoßen kann.

Der Autor ist dankbar für das Interesse externer Dritter an den Tätigkeiten unserer Prüfstelle und den daraus entstandenen Anregungen und der Motivation diese Problematik publik zu machen.

ANLAGE 1

BEISPIEL: Auswertung eines Plattendruckversuches nach DIN 18134 (Sep. 2001), Anhang B

MESSWERTE DER ERSTBELASTUNG												
Nr	Kraft		Normalspannung σ_0 MN/m ²	Meßuhr- Ableseung s_m mm	s im Platten-Zentrum s mm	Normal- spannung						Approximation s mm
	kN	t				σ	σ^2	σ^3	σ^4	s x σ	s x σ^2	
0	0,00		0,000	0,000	0,00	0,00	-	-	-	-	-	0,065
1	5,65	0,6	0,080	0,190	0,38	0,08	0,00640	0,00051	0,00004	0,03040	0,00243	0,400
2	11,31	1,1	0,160	0,380	0,76	0,16	0,02560	0,00410	0,00066	0,12160	0,01946	0,721
3	16,96	1,7	0,240	0,510	1,02	0,24	0,05760	0,01382	0,00332	0,24480	0,05875	1,029
4	22,62	2,3	0,320	0,660	1,32	0,32	0,10240	0,03277	0,01049	0,42240	0,13517	1,323
5	28,27	2,8	0,400	0,790	1,58	0,40	0,16000	0,06400	0,02560	0,63200	0,25280	1,603
6	31,81	3,2	0,450	0,890	1,78	0,45	0,20250	0,09113	0,04101	0,80100	0,36045	1,771
7	35,34	3,5	0,500	0,970	1,94	0,50	0,25000	0,12500	0,06250	0,97000	0,48500	1,933
-												
MAX:	35,34	3,5	0,50	0,97	max $\sigma_1 =$		0,50					
7	Summen		8,78	2,15	0,80450	0,33133	0,14361	3,22220	1,31406	-	-	-

HUBER + WALTER Ingenieure GmbH, Kaiserslautern

MESSWERTE DER ENTLASTUNG												
Nr	Kraft		Normalspannung σ_0 MN/m ²	Meßuhr- Ableseung s_m mm	s im Platten-Zentrum s mm	Normal- spannung						Approximation s mm
	kN	t				σ	σ^2	σ^3	σ^4	s x σ	s x σ^2	
	35,34	3,53	0,500	0,970	-	-	-	-	-	-	-	-
8	17,67	1,8	0,250	0,920	1,84	0,25	-	-	-	-	-	-
9	8,84	0,9	0,125	0,850	1,70	0,13	0,01563	0,00195	0,00024	0,21250	0,02656	-
10	0,00	0,0	0,000	0,550	1,10	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-
-												
MIN	0,00	0,00	0,00	0,55								

HUBER + WALTER Ingenieure GmbH, Kaiserslautern

MESSWERTE DER ZWEITBELASTUNG												
Nr	Kraft		Normalspannung σ_0 MN/m ²	Meßuhr- Ableseung s_m mm	s im Platten-Zentrum s mm	Normal- spannung						Approximation s mm
	kN	t				σ	σ^2	σ^3	σ^4	s x σ	s x σ^2	
11	0,00	0,0	0,000	0,550	1,10	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,090
12	5,65	0,6	0,080	0,630	1,26	0,08	0,00640	0,00051	0,00004	0,10080	0,00806	1,275
13	11,31	1,1	0,160	0,720	1,44	0,16	0,02560	0,00410	0,00066	0,23040	0,03686	1,448
14	16,96	1,7	0,240	0,810	1,62	0,24	0,05760	0,01382	0,00332	0,38880	0,09331	1,607
15	22,62	2,3	0,320	0,880	1,76	0,32	0,10240	0,03277	0,01049	0,56320	0,18022	1,753
16	28,27	2,8	0,400	0,940	1,88	0,40	0,16000	0,06400	0,02560	0,75200	0,30080	1,885
17	31,81	3,2	0,450	0,980	1,96	0,45	0,20250	0,09113	0,04101	0,88200	0,39690	1,961
-												
					max $\sigma_2 =$		0,45					
7	Summen		11,02	1,65	0,55	0,20633	0,08111	2,91720	1,01616	-	-	-

HUBER + WALTER Ingenieure GmbH, Kaiserslautern

AUSWERTUNG												
ERSTBELASTUNG						ZWEITBELASTUNG						
Determinante				Determinante				σ_0 max		1. Belastung	2. Belastung	
7	2,15	0,80	8,78	7	1,65	0,55	11,02	a_0	[MN/m ²]	0,50	0,45	
2,15	0,80	0,33	3,22	1,65	0,55	0,21	2,92	a_1	[mm/MN/m ²]	0,065	1,090	
0,80	0,33	0,14	1,31	0,55	0,21	0,08	1,02	a_2	[mm/MN/m ²]	4,275	2,408	
D =	0,00195			D =	0,00306			$E_v =$	[mm/MN ² /m ²]	-1,078	-1,045	
D ₀	0,00013			D ₀	0,00334			$E_{v2}/E_{v1} =$	[MN/m ²]	60,2	119,3	
D ₁	0,00832			D ₁	0,00738				[-]	1,98		
D ₂	-0,00210			D ₂	-0,00320							

ANLAGE 2

BEISPIEL: Auswertung eines Plattendruckversuches nach DIN 18134 (Sep. 2001), Anhang B

MESSWERTE DER ERSTBELASTUNG

Nr	Kraft		Normalspannung σ_0 MN/m ²	Meßuhr- Ablesung s_m mm	s im Platten-Zentrum s mm	Normal- spannung						Approximation s mm
	kN	t				σ MN/m ²	σ^2 MN ² /m ⁴	σ^3 MN ³ /m ¹⁶	σ^4 MN ¹⁹ /m ²⁵⁶	s x σ mm x MN/m ²	s x σ^2 mm x MN ² /m ⁴	
0	0,00		0,000	0,000	0,00	0,00	-	-	-	-	-	0,065
1	5,37	0,5	0,076	0,190	0,38	0,08	0,00578	0,00044	0,00003	0,02888	0,00219	0,400
2	10,74	1,1	0,152	0,380	0,76	0,15	0,02310	0,00351	0,00053	0,11552	0,01756	0,721
3	16,12	1,6	0,228	0,510	1,02	0,23	0,05198	0,01185	0,00270	0,23256	0,05302	1,029
4	21,49	2,1	0,304	0,660	1,32	0,30	0,09242	0,02809	0,00854	0,40128	0,12199	1,323
5	26,86	2,7	0,380	0,790	1,58	0,38	0,14440	0,05487	0,02085	0,60040	0,22815	1,603
6	30,22	3,0	0,428	0,890	1,78	0,43	0,18276	0,07813	0,03340	0,76095	0,32531	1,771
7	33,58	3,4	0,475	0,970	1,94	0,48	0,22563	0,10717	0,05091	0,92150	0,43771	1,933
-												
MAX:	33,58	3,4	0,48	0,97	max $\sigma_1 =$ 0,48							
7			Summen		8,78	2,04	0,72606	0,28407	0,11697	3,06109	1,18594	-

HUBER + WALTER Ingenieure GmbH, Kaiserslautern

MESSWERTE DER ENTLASTUNG

Nr	Kraft		Normalspannung σ_0 MN/m ²	Meßuhr- Ablesung s_m mm	s im Platten-Zentrum s mm	Normal- spannung						Approximation s mm
	kN	t				σ MN/m ²	σ^2 MN ² /m ⁴	σ^3 MN ³ /m ¹⁶	σ^4 MN ¹⁹ /m ²⁵⁶	s x σ mm x MN/m ²	s x σ^2 mm x MN ² /m ⁴	
	33,58	3,36	0,475	0,970	-	-	-	-	-	-	-	-
8	17,67	1,8	0,250	0,920	1,84	0,25	-	-	-	-	-	-
9	8,84	0,9	0,125	0,850	1,70	0,13	0,01563	0,00195	0,00024	0,21250	0,02656	-
10	0,00	0,0	0,000	0,550	1,10	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-
-												
MIN	0,00	0,00	0,00	0,55								

HUBER + WALTER Ingenieure GmbH, Kaiserslautern

MESSWERTE DER ZWEITBELASTUNG

Nr	Kraft		Normalspannung σ_0 MN/m ²	Meßuhr- Ablesung s_m mm	s im Platten-Zentrum s mm	Normal- spannung						Approximation s mm
	kN	t				σ MN/m ²	σ^2 MN ² /m ⁴	σ^3 MN ³ /m ¹⁶	σ^4 MN ¹⁹ /m ²⁵⁶	s x σ mm x MN/m ²	s x σ^2 mm x MN ² /m ⁴	
11	0,00	0,0	0,000	0,550	1,10	0,00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,090
12	5,37	0,5	0,076	0,630	1,26	0,08	0,00578	0,00044	0,00003	0,09576	0,00728	1,275
13	10,74	1,1	0,152	0,720	1,44	0,15	0,02310	0,00351	0,00053	0,21888	0,03327	1,448
14	16,12	1,6	0,228	0,810	1,62	0,23	0,05198	0,01185	0,00270	0,36936	0,08421	1,607
15	21,49	2,1	0,304	0,880	1,76	0,30	0,09242	0,02809	0,00854	0,53504	0,16265	1,753
16	26,86	2,7	0,380	0,940	1,88	0,38	0,14440	0,05487	0,02085	0,71440	0,27147	1,885
17	30,22	3,0	0,428	0,980	1,96	0,43	0,18276	0,07813	0,03340	0,83790	0,35820	1,961
-												
					max $\sigma_2 =$ 0,43							
7			Summen		11,02	1,57	0,50	0,17690	0,06606	2,77134	0,91709	-

HUBER + WALTER Ingenieure GmbH, Kaiserslautern

AUSWERTUNG

ERSTBELASTUNG				ZWEITBELASTUNG				σ_0 max		1. Belastung	2. Belastung
Determinante				Determinante				a_0	[MN/m ²]		
7	2,04	0,73	8,78	7	1,57	0,50	11,02	a_1	[mm/MN/m ²]	0,065	1,090
2,04	0,73	0,28	3,06	1,57	0,50	0,18	2,77	a_2	[mm/MN/m ²]	4,500	2,534
0,73	0,28	0,12	1,19	0,50	0,18	0,07	0,92	$E_v =$	[mm/MN ² /m ⁴]	-1,194	-1,158
D = 0,00143				D = 0,00225				$E_{v2}/E_{v1} =$	[MN/m ²]	57,2	113,4
D ₀ 0,00009				D ₀ 0,00245					[-]	1,98	
D ₁ 0,00644				D ₁ 0,00571							
D ₂ -0,00171				D ₂ -0,00261							