

Bewehren von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045-1:2008-08

Nachweise der Tragfähigkeit - Querschnittsbemessung -

Arbeitsblatt 4
Überarbeitete Ausgabe 2010-12

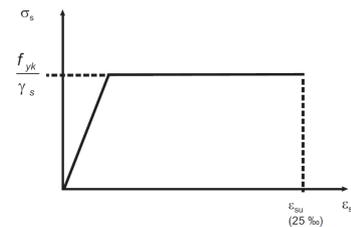
Gesamtherstellung und Herausgabe: Institut für Stahlbetonbewehrung e.V.
Prüfung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Zilch, (Dipl.-Ing. Andreas Rogge)
Überarbeitung (DIN 1045-1:2008)*: Dr.-Ing. N. Brauer, Dipl.-Ing. J. Ehmke

1 Bemessung für Biegung und Längskraft (DIN 1045-1, 10.2)

Für die Biegebemessung werden in der Norm zwei Möglichkeiten angeboten

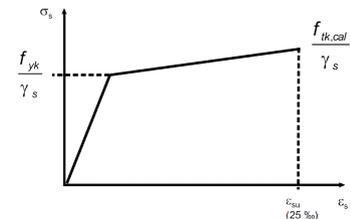
- Annahme eines horizontalen Verlaufs der Spannungs-Dehnungslinie nach Überschreiten der Streckgrenze des Betonstahls ($f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$) bis zu $\epsilon_{su} = 25 \text{ ‰}$.

⇒ Tabellen 3.1 ff



- Berücksichtigung der Verfestigung des Betonstahls nach Überschreitung der Streckgrenze ($f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$) bis zu einer rechnerischen Zugfestigkeit von $f_{tk,cal} = 525 \text{ N/mm}^2$, die bei $\epsilon_{su} = 25 \text{ ‰}$ erreicht wird. Für kleinere Stahldehnung $\epsilon_s < \epsilon_{su}$ ist der Bemessungswert der Stahlspannung σ_{sd} mit DIN 1045-1, Bild 27, zu ermitteln.

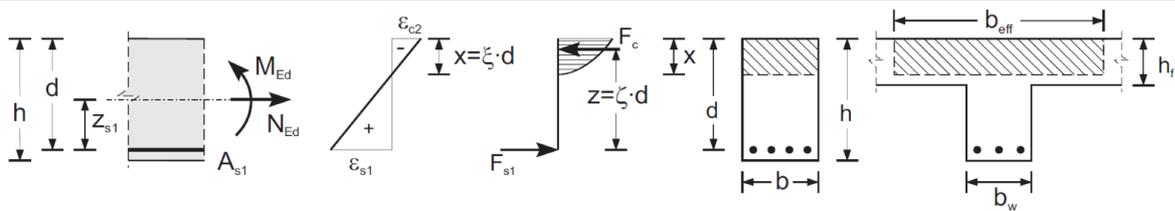
⇒ Tabellen 3.2 ff



2 Grundsätzliches

2.1 ω -Verfahren ohne Druckbewehrung ($\sigma_{sd} \leq f_{yd}$)

Die optimale Bewehrungsmenge ergibt sich bei Rechteckquerschnitten in der Regel, wenn nur eine Biegezugbewehrung A_{s1} angeordnet wird.



Auf die Lage der Zugbewehrung bezogenes Moment M_{Eds} :

$$M_{EDs} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}$$

mit: M_{Ed} Bemessungsmoment
 N_{Ed} Bemessungswert der Normalkraft
 z_{s1} Abstand Schwerelinie zu Biegezugbewehrung A_{s1}

F_{s1}	=	$f_{yd} \cdot A_{s1}$; Zuggurtkraft (Biegezugbewehrung)
F_c	=	$\alpha_R \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \xi \cdot d$; Druckgurtkraft (Betondruckzone)
mit f_{yd}	=	f_{yk} / γ_s ; Bemessungswert der Betonstahlstreckgrenze
γ_s	=	1,15; Materialteilsicherheitsbeiwert für Betonstahl
f_{cd}	=	$\alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c$; Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
α	=	Abminderungsfaktor für Langzeiteinwirkung
α_R	=	0,85 für Normalbeton; für Leichtbeton 0,75 (bzw. 0.80 bei Verwendung des bilinearen Spannungs-Dehnungs-Diagramms)
γ_c	=	Materialteilsicherheitsbeiwert für Beton = 1,5 für Beton bis C 50/60
α_R	=	$ \sigma_{cm} / f_{cd}$; Völligkeitsbeiwert
ξ	=	x / d ; bezogene Druckzonenhöhe
b, b_{eff}	=	Breite bzw. mitwirkende Breite
d	=	statische Höhe

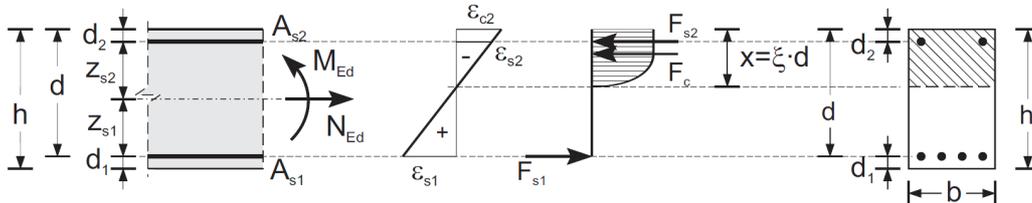
INSTITUT FÜR STAHLBETONBEWEHRUNG e.V.

2.2 Anordnung einer Biegedruckbewehrung A_{s2}

Eine Biegedruckbewehrung A_{s2} ist zur Sicherstellung ausreichender Verformungsfähigkeit für folgende Grenzwerte der bezogenen Druckzonenhöhe $\xi_{lim} = (x/d)_{lim}$ erforderlich:

$\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,617$ für Beton bis C 50/60	Dehnung der Zugbewehrung erreicht $\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$
$\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,45$ für Beton bis C 50/60 $\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,35$ für Beton ab C 55/67 und für Leichtbeton	Bei linear-elastischem Verfahren der Schnittgrößenermittlung ohne geeignete Umschnürung der Biegedruckzone. Eine geeignete Umschnürung kann angenommen werden bei Einhaltung der Regeln der Querbewehrung in DIN 1045-1, 13.1.1 (5).
$\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,25$ für Beton bis C 50/60 $\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,15$ für Beton ab C 55/67	Bei Berechnung zweiachsig gespannter Platten nach der Plastizitätstheorie ohne Nachweis der Rotationsfähigkeit.

2.3 ω - Verfahren mit Druckbewehrung ($\sigma_{sd} \leq f_{yd}$)



Auf die Lage der Zugbewehrung bezogenes Moment M_{Eds} :

$$M_{Eds} = M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}$$

mit M_{Ed} Bemessungsmoment
 N_{Ed} Bemessungswert der Normalkraft
 z_{s1} Abstand Schwerelinie zu Biegezugbewehrung A_{s1}

$F_{s1} = f_{yd} \cdot A_{s1}$; Zuggurkraft (Biegezugbewehrung)
 $F_{s2} = \sigma_{s2d} \cdot A_{s2}$; Druckgurkraft (Biegedruckbewehrung)
 $F_c = \alpha_R \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \xi \cdot d$; Druckgurkraft (Betondruckzone)
mit $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$; Bemessungswert der Betonstahlstreckgrenze
 $\gamma_s = 1,15$; Materialteilsicherheitsbeiwert für Betonstahl
 $f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck}/\gamma_c$; Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
 α Abminderungsfaktor für Langzeiteinwirkung
= 0,85 für Normalbeton;
= 0,75 für Leichtbeton (Parabel-Rechteck-Diagramm o. Spannungsblock)
= 0,80 für Leichtbeton (bilineares Spannungs-Dehnungs-Diagramm)
 γ_c Materialteilsicherheitsbeiwert für Beton = 1,5 für Beton bis C 50/60
 $\alpha_R = |\sigma_{cm}|/f_{cd}$; Völligkeitsbeiwert; = 0,81 für $\varepsilon_{cu} = -3,5 \text{‰}$ und Beton bis C 50/60
 $\xi = x/d$; bezogene Druckzonenhöhe
 b Breite
 d statische Höhe

bezogenes Moment μ_{Eds} :

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :

$$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

erf. Biegedruckbewehrung A_{s2} :

$$A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}}$$

2.4 Ermittlung der maßgebenden Breiten

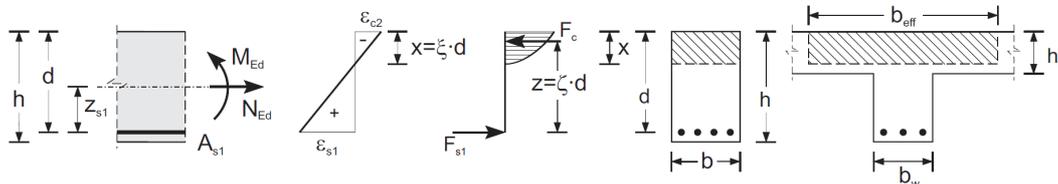
Bemessungsquerschnitt	Nulllinie	Maßg. Breite		Bemerkung
	-	b	bezogenes Moment μ_{Eds} : $\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$	
	$x \leq h_f$	$b = b_{eff}$	mech. Bewehrungsgrad: $\omega_1 = \frac{A_s^*}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}; A_s^* = A_{s1} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$	Ermittlung von b_{eff} nach \Rightarrow Arbeitsblatt 3 7.2.1
	$x > h_f$	$b = b_f$	erf. Bewehrungsquerschnitt: $A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$	Berechnung von b_f siehe DAfStb - Heft 220
	$x > h_f$	$b = b_f$	erf. Bewehrungsquerschnitt: $A_{s1} = \frac{1}{f_{yd}} \cdot \left(\frac{M_{Eds}}{d - h_f / 2} + N_{Ed} \right)$	Nachweis der Druckspannung erforderlich

2.5 Rechengrößen für Betonstahl BSt 500 mit $f_{yk}=500 \text{ N/mm}^2$ und für Beton bis C 50/60									
Beton	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
$f_{cd} [\text{N/mm}^2]$	6,8	9,1	11,3	14,2	17,0	19,8	22,7	25,5	28,3
f_{yd}/f_{cd}	63,9	48,0	38,4	30,7	25,6	21,9	19,2	17,1	15,3

3 Bemessungstabellen für die Verfahren nach 1 (Bemessung für Biegung und Längskraft (DIN 1045-1, 10.2))

3.1 Horizontaler Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls (ohne Verfestigung)

3.1.1 ω - Tabellen, ohne Druckbewehrung, für Beton bis C 50/60 ($\sigma_{sd} \leq f_{yd}$)



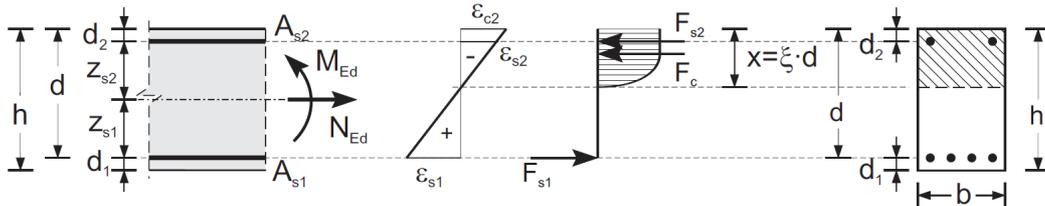
N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds} :		erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :				mech. Bewehrungsgrad ω_1 :		
$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$		$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$				$\omega_1 = \frac{A_s^*}{b \cdot d} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}; A_s^* = A_{s1} - \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$		
μ_{Eds} [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	σ_{sd} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,01	0,0101	0,030	0,990	-0,77	25	434,8	0,337	0,35
0,02	0,0203	0,044	0,985	-1,15	25	434,8	0,464	0,353
0,03	0,0306	0,055	0,980	-1,46	25	434,8	0,553	0,360
0,04	0,0410	0,066	0,976	-1,76	25	434,8	0,622	0,368
0,05	0,0515	0,076	0,971	-2,06	25	434,8	0,676	0,377
0,06	0,0621	0,086	0,967	-2,37	25	434,8	0,718	0,387
0,07	0,0728	0,097	0,962	-2,68	25	434,8	0,751	0,396
0,08	0,0836	0,107	0,956	-3,01	25	434,8	0,778	0,405
0,09	0,0946	0,118	0,951	-3,35	25	434,8	0,801	0,413
0,10	0,1057	0,131	0,946	-3,5	23,29	434,8	0,810	0,416
0,11	0,1170	0,145	0,940	-3,5	20,71	434,8	0,810	0,416
0,12	0,1285	0,159	0,934	-3,5	18,55	434,8	0,810	0,416
0,13	0,1401	0,173	0,928	-3,5	16,73	434,8	0,810	0,416
0,14	0,1518	0,188	0,922	-3,5	15,16	434,8	0,810	0,416
0,15	0,1638	0,202	0,916	-3,5	13,80	434,8	0,810	0,416
0,16	0,1759	0,217	0,910	-3,5	12,61	434,8	0,810	0,416
0,17	0,1882	0,232	0,903	-3,5	11,55	434,8	0,810	0,416
0,18	0,2007	0,248	0,897	-3,5	10,62	434,8	0,810	0,416
0,18	0,2024	0,250	0,896	-3,5	10,50	434,8	0,810	0,416
0,19	0,2134	0,264	0,890	-3,5	9,78	434,8	0,810	0,416
0,20	0,2263	0,280	0,884	-3,5	9,02	434,8	0,810	0,416
0,21	0,2395	0,296	0,877	-3,5	8,33	434,8	0,810	0,416
0,22	0,2529	0,312	0,870	-3,5	7,71	434,8	0,810	0,416
0,23	0,2665	0,329	0,863	-3,5	7,13	434,8	0,810	0,416
0,24	0,2804	0,346	0,856	-3,5	6,60	434,8	0,810	0,416
0,25	0,2946	0,364	0,849	-3,5	6,12	434,8	0,810	0,416
0,26	0,3091	0,382	0,841	-3,5	5,67	434,8	0,810	0,416
0,27	0,3239	0,400	0,834	-3,5	5,25	434,8	0,810	0,416
0,28	0,3391	0,419	0,826	-3,5	4,86	434,8	0,810	0,416
0,29	0,3546	0,438	0,818	-3,5	4,49	434,8	0,810	0,416
0,296	0,3643	0,450	0,813	-3,5	4,28	434,8	0,810	0,416
0,30	0,3706	0,458	0,810	-3,5	4,15	434,8	0,810	0,416
0,31	0,3869	0,478	0,801	-3,5	3,82	434,8	0,810	0,416
0,32	0,4038	0,499	0,793	-3,5	3,52	434,8	0,810	0,416
0,33	0,4211	0,520	0,784	-3,5	3,23	434,8	0,810	0,416
0,34	0,4391	0,542	0,774	-3,5	2,95	434,8	0,810	0,416
0,35	0,4576	0,565	0,765	-3,5	2,69	434,8	0,810	0,416
0,36	0,4768	0,589	0,755	-3,5	2,44	434,8	0,810	0,416
0,37	0,4968	0,614	0,745	-3,5	2,20	434,8	0,810	0,416
0,371	0,4994	0,617	0,743	-3,5	2,174	434,8	0,810	0,416

3.1.2 ω - Tafeln, mit Druckbewehrung, für $\xi_{lim}=(x/d)_{lim} = 0,617$, für Beton bis C 50/60 ($\sigma_{sd} \leq f_{yd}$)

$\mu_{Eds,lim}$ [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ϵ_{c2} [‰]	$\epsilon_{s1,lim}$ [‰]	σ_{sd} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,3712	0,4994	0,617	0,743	-3,50	2,174	434,8	0,810	0,416



N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds} :

erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :

erf. Biegedruckbewehrung A_{s2} :

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

$$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

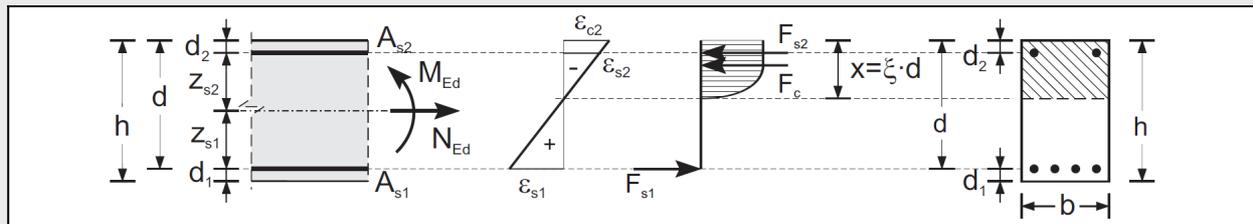
$$A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}}$$

Beton	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
f_{cd} [N/mm ²]	6,8	9,1	11,3	14,2	17,0	19,8	22,7	25,5	28,3
f_{yd} / f_{cd}	63,9	48	38,4	30,7	25,6	21,9	19,2	17,1	15,3

μ_{Eds} [-]	$d_2/d=0,05$		$d_2/d=0,10$		$d_2/d=0,15$		$d_2/d=0,20$	
	$\epsilon_{s2,lim} = -3,22\text{‰}$		$\epsilon_{s2,lim} = -2,93\text{‰}$		$\epsilon_{s2,lim} = -2,65\text{‰}$		$\epsilon_{s2,lim} = -2,37\text{‰}$	
	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]
0,38	0,5086	0,0092	0,5091	0,0097	0,5097	0,0103	0,5103	0,0110
0,39	0,5191	0,0198	0,5202	0,0209	0,5214	0,0221	0,5228	0,0235
0,40	0,5296	0,0303	0,5313	0,0320	0,5332	0,0339	0,5353	0,0360
0,41	0,5402	0,0408	0,5424	0,0431	0,5450	0,0456	0,5478	0,0485
0,42	0,5507	0,0513	0,5535	0,0542	0,5567	0,0574	0,5603	0,0610
0,43	0,5612	0,0619	0,5647	0,0653	0,5685	0,0691	0,5728	0,0735
0,44	0,5717	0,0724	0,5758	0,0764	0,5803	0,0809	0,5853	0,0860
0,45	0,5823	0,0829	0,5869	0,0875	0,5920	0,0927	0,5978	0,0985
0,46	0,5928	0,0934	0,5980	0,0986	0,6038	0,1044	0,6103	0,1110
0,47	0,6033	0,1040	0,6091	0,1097	0,6156	0,1162	0,6228	0,1235
0,48	0,6139	0,1145	0,6202	0,1209	0,6273	0,1280	0,6353	0,1360
0,49	0,6244	0,1250	0,6313	0,1320	0,6391	0,1397	0,6478	0,1485
0,50	0,6349	0,1356	0,6424	0,1431	0,6509	0,1515	0,6603	0,1610
0,51	0,6454	0,1461	0,6535	0,1542	0,6626	0,1633	0,6728	0,1735
0,52	0,6560	0,1566	0,6647	0,1653	0,6744	0,1750	0,6853	0,1860
0,53	0,6665	0,1671	0,6758	0,1764	0,6861	0,1868	0,6978	0,1985
0,54	0,6770	0,1777	0,6869	0,1875	0,6979	0,1986	0,7103	0,2110
0,55	0,6875	0,1882	0,6980	0,1986	0,7097	0,2103	0,7228	0,2235

3.1.3 ω - Tafeln, mit Druckbewehrung, für $\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,45$, für Beton bis C 50/60 ($\sigma_{sd} \leq f_{yd}$)

$\mu_{Eds,lim}$ [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ε_{s2} [‰]	$\varepsilon_{s1,lim}$ [‰]	σ_{sd} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,2961	0,3643	0,450	0,813	-3,50	4,278	434,8	0,810	0,416



N_{Ed} ist als Druckkraft negativ

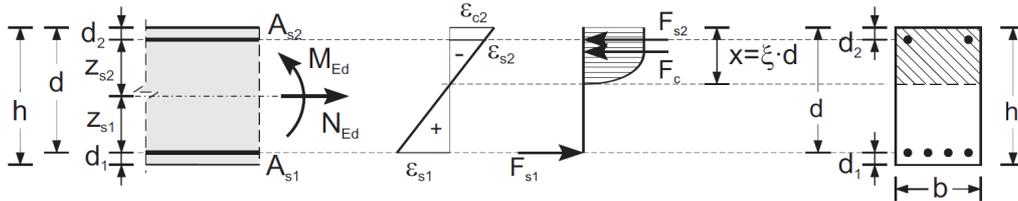
a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds} :		erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :				erf. Biegedruckbewehrung A_{s2} :			
$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$		$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$				$A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}}$			
Beton	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
f_{cd} [N/mm ²]	6,8	9,1	11,3	14,2	17,0	19,8	22,7	25,5	28,3
f_{yd} / f_{cd}	63,9	48,0	38,4	30,7	25,6	21,9	19,2	17,1	15,3

μ_{Eds} [-]	$d_2/d=0,05$		$d_2/d=0,10$		$d_2/d=0,15$		$d_2/d=0,20$	
	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]
0,30	0,3684	0,0041	0,3686	0,0043	0,3689	0,0046	0,3692	0,0055
0,31	0,3789	0,0146	0,3797	0,0154	0,3806	0,0164	0,3817	0,0194
0,32	0,3894	0,0252	0,3908	0,0266	0,3924	0,0281	0,3942	0,0334
0,33	0,4000	0,0357	0,4020	0,0377	0,4042	0,0399	0,4067	0,0474
0,34	0,4105	0,0462	0,4131	0,0488	0,4159	0,0517	0,4192	0,0614
0,35	0,4210	0,0567	0,4242	0,0599	0,4277	0,0634	0,4317	0,0753
0,36	0,4316	0,0673	0,4353	0,0710	0,4395	0,0752	0,4442	0,0893
0,37	0,4421	0,0778	0,4464	0,0821	0,4512	0,0869	0,4567	0,1033
0,38	0,4526	0,0883	0,4575	0,0932	0,4630	0,0987	0,4692	0,1173
0,39	0,4631	0,0988	0,4686	0,1043	0,4748	0,1105	0,4817	0,1312
0,40	0,4737	0,1094	0,4797	0,1154	0,4865	0,1222	0,4942	0,1452
0,41	0,4842	0,1199	0,4908	0,1266	0,4983	0,1340	0,5067	0,1592
0,42	0,4947	0,1304	0,5020	0,1377	0,5101	0,1458	0,5192	0,1732
0,43	0,5052	0,1410	0,5131	0,1488	0,5218	0,1575	0,5317	0,1871
0,44	0,5158	0,1515	0,5242	0,1599	0,5336	0,1693	0,5442	0,2011
0,45	0,5263	0,1620	0,5353	0,1710	0,5453	0,1811	0,5567	0,2151
0,46	0,5368	0,1725	0,5464	0,1821	0,5571	0,1928	0,5692	0,2291
0,47	0,5473	0,1831	0,5575	0,1932	0,5689	0,2046	0,5817	0,2430
0,48	0,5579	0,1936	0,5686	0,2043	0,5806	0,2164	0,5942	0,2570
0,49	0,5684	0,2041	0,5797	0,2154	0,5924	0,2281	0,6067	0,2710
0,50	0,5789	0,2146	0,5908	0,2266	0,6042	0,2399	0,6192	0,2850
0,51	0,5894	0,2252	0,6020	0,2377	0,6159	0,2517	0,6317	0,2989
0,52	0,6000	0,2357	0,6131	0,2488	0,6277	0,2634	0,6442	0,3129
0,53	0,6105	0,2462	0,6242	0,2599	0,6395	0,2752	0,6567	0,3269
0,54	0,6210	0,2567	0,6353	0,2710	0,6512	0,2869	0,6692	0,3409
0,55	0,6316	0,2673	0,6464	0,2821	0,6630	0,2987	0,6817	0,3548

3.1.4 ω - Tafeln, mit Druckbewehrung, für $\xi_{lim} = (x/d)_{lim} = 0,25$, für Beton bis C 50/60 ($\sigma_{sd} \leq f_{yd}$)

$\mu_{Eds,lim}$ [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ϵ_{c2} [‰]	$\epsilon_{s1,lim}$ [‰]	σ_{sd} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,1813	0,2024	0,250	0,896	-3,50	10,500	435	0,810	0,416



N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

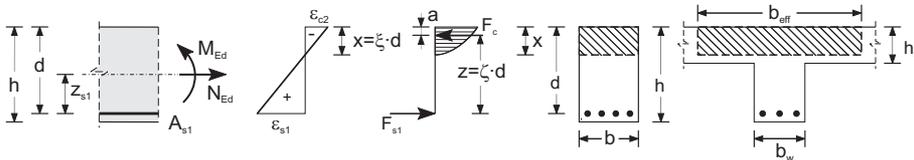
a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds} :		erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :				erf. Biegedruckbewehrung A_{s2} :			
$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$		$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$				$A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{f_{yd} / f_{cd}}$			
Beton	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
f_{cd} [N/mm ²]	6,8	9,1	11,3	14,2	17,0	19,8	22,7	25,5	28,3
f_{yd} / f_{cd}	63,9	48	38,4	30,7	25,6	21,9	19,2	17,1	15,3

μ_{Eds} [-]	$d_2/d=0,05$		$d_2/d=0,10$		$d_2/d=0,15$		$d_2/d=0,20$	
	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]
0,19	0,2115	0,0091	0,2120	0,0100	0,2126	0,0158	0,2132	0,0336
0,20	0,2220	0,0196	0,2231	0,0215	0,2243	0,0341	0,2257	0,0725
0,21	0,2326	0,0302	0,23	0,0330	0,2361	0,0524	0,2382	0,1113
0,22	0,2431	0,0407	0,2453	0,0445	0,2479	0,0706	0,2507	0,1501
0,23	0,2536	0,0512	0,2565	0,0560	0,2596	0,0889	0,2632	0,1889
0,24	0,2641	0,0618	0,2676	0,0675	0,2714	0,1072	0,2757	0,2277
0,25	0,2747	0,0723	0,2787	0,0790	0,2832	0,1254	0,2882	0,2666
0,26	0,2852	0,0828	0,2898	0,0905	0,2949	0,1437	0,3007	0,3054
0,27	0,2957	0,0933	0,3009	0,1020	0,3067	0,1620	0,3132	0,3442
0,28	0,3062	0,1039	0,3120	0,1135	0,3185	0,1802	0,3257	0,3830
0,29	0,3168	0,1144	0,3231	0,1250	0,3302	0,1985	0,3382	0,4218
0,30	0,3273	0,1249	0,3342	0,1365	0,3420	0,2168	0,3507	0,4607
0,31	0,3378	0,1354	0,3453	0,1480	0,3538	0,2350	0,3632	0,4995
0,32	0,3483	0,1460	0,3565	0,1595	0,3655	0,2533	0,3757	0,5383
0,33	0,3589	0,1565	0,3676	0,1710	0,3773	0,2716	0,3882	0,5771
0,34	0,3694	0,1670	0,3787	0,1825	0,3890	0,2899	0,4007	0,6159
0,35	0,3799	0,1775	0,3898	0,1940	0,4008	0,3081	0,4132	0,6548
0,36	0,3904	0,1881	0,4009	0,2055	0,4126	0,3264	0,4257	0,6936
0,37	0,4010	0,1986	0,4120	0,2170	0,4243	0,3447	0,4382	0,7324
0,38	0,4115	0,2091	0,4231	0,2285	0,4361	0,3629	0,4507	0,7712
0,39	0,4220	0,2196	0,4342	0,2400	0,4479	0,3812	0,4632	0,8100
0,40	0,4326	0,2302	0,4453	0,2515	0,4596	0,3995	0,4757	0,8489
0,41	0,4431	0,2407	0,4565	0,2630	0,4714	0,4177	0,4882	0,8877
0,42	0,4536	0,2512	0,4676	0,2745	0,4832	0,4360	0,5007	0,9265
0,43	0,4641	0,2618	0,4787	0,2860	0,4949	0,4543	0,5132	0,9653
0,44	0,4747	0,2723	0,4898	0,2975	0,5067	0,4725	0,5257	1,0041
0,45	0,4852	0,2828	0,5009	0,3090	0,5185	0,4908	0,5382	1,0430
0,46	0,4957	0,2933	0,5120	0,3205	0,5302	0,5091	0,5507	1,0818
0,47	0,5062	0,3039	0,5231	0,3320	0,5420	0,5273	0,5632	1,1206
0,48	0,5168	0,3144	0,5342	0,3435	0,5538	0,5456	0,5757	1,1594
0,49	0,5273	0,3249	0,5453	0,3550	0,5655	0,5639	0,5882	1,1982
0,50	0,5378	0,3354	0,5565	0,3665	0,5773	0,5821	0,6007	1,2371
0,51	0,5483	0,3460	0,5676	0,3780	0,5890	0,6004	0,6132	1,2759
0,52	0,5589	0,3565	0,5787	0,3895	0,6008	0,6187	0,6257	1,3147
0,53	0,5694	0,3670	0,5898	0,4010	0,6126	0,6369	0,6382	1,3535
0,54	0,5799	0,3775	0,6009	0,4125	0,6243	0,6552	0,6507	1,3923
0,55	0,5904	0,3881	0,6120	0,4240	0,6361	0,6735	0,6632	1,4312

3.2 Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls mit Verfestigung

3.2.1 ω -Tafeln ohne Druckbewehrung, für Beton bis C50/60 mit $\sigma_{sd} \leq f_{td,cal}$



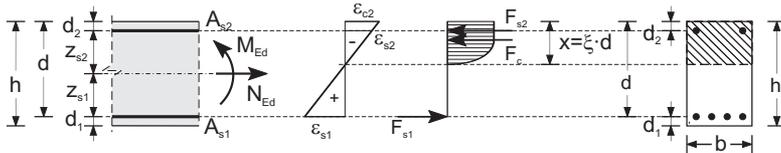
N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds} :			erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :			mech. Bewehrungsgrad ω_1 :		
$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$			$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{sd} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_{sd}}$			$\omega_1 = \frac{A_s^*}{b \cdot d} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{cd}}; A_s^* = A_s - \frac{N_{Ed}}{\sigma_{sd}}$		
μ_{Eds} [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	σ_{sd} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,01	0,0101	0,030	0,990	-0,77	25,00	456,5	0,337	0,346
0,02	0,0203	0,044	0,985	-1,15	25,00	456,5	0,464	0,353
0,03	0,0306	0,055	0,980	-1,46	25,00	456,5	0,553	0,360
0,04	0,0410	0,066	0,976	-1,76	25,00	456,5	0,622	0,368
0,05	0,0515	0,076	0,971	-2,06	25,00	456,5	0,676	0,377
0,06	0,0621	0,086	0,967	-2,37	25,00	456,5	0,718	0,387
0,07	0,0728	0,097	0,962	-2,68	25,00	456,5	0,751	0,396
0,08	0,0836	0,107	0,957	-3,01	25,00	456,5	0,778	0,405
0,09	0,0946	0,118	0,951	-3,35	25,00	456,5	0,801	0,413
0,10	0,1058	0,131	0,946	-3,50	23,29	454,9	0,810	0,416
0,11	0,1170	0,145	0,940	-3,50	20,71	452,4	0,810	0,416
0,12	0,1285	0,159	0,934	-3,50	18,55	450,4	0,810	0,416
0,13	0,1401	0,173	0,928	-3,50	16,73	448,6	0,810	0,416
0,14	0,1519	0,188	0,922	-3,50	15,16	447,1	0,810	0,416
0,15	0,1638	0,202	0,916	-3,50	13,80	445,9	0,810	0,416
0,16	0,1759	0,217	0,910	-3,50	12,61	444,7	0,810	0,416
0,17	0,1882	0,233	0,903	-3,50	11,56	443,7	0,810	0,416
0,18	0,2007	0,248	0,897	-3,50	10,62	442,8	0,810	0,416
0,181	0,2024	0,250	0,896	-3,50	10,50	442,7	0,810	0,416
0,19	0,2134	0,264	0,890	-3,50	9,78	442,0	0,810	0,416
0,20	0,2263	0,280	0,884	-3,50	9,02	441,3	0,810	0,416
0,21	0,2395	0,296	0,877	-3,50	8,33	440,6	0,810	0,416
0,22	0,2529	0,312	0,870	-3,50	7,71	440,1	0,810	0,416
0,23	0,2665	0,329	0,863	-3,50	7,13	439,5	0,810	0,416
0,24	0,2804	0,346	0,856	-3,50	6,61	439,0	0,810	0,416
0,25	0,2946	0,364	0,849	-3,50	6,12	438,5	0,810	0,416
0,26	0,3091	0,382	0,841	-3,50	5,67	438,1	0,810	0,416
0,27	0,3239	0,400	0,834	-3,50	5,25	437,7	0,810	0,416
0,28	0,3391	0,419	0,826	-3,50	4,86	437,3	0,810	0,416
0,29	0,3546	0,438	0,818	-3,50	4,49	437,0	0,810	0,416
0,296	0,3643	0,450	0,813	-3,50	4,28	436,8	0,810	0,416
0,30	0,3706	0,458	0,810	-3,50	4,15	436,7	0,810	0,416
0,31	0,3869	0,478	0,801	-3,50	3,82	436,4	0,810	0,416
0,32	0,4038	0,499	0,793	-3,50	3,52	436,1	0,810	0,416
0,33	0,4211	0,520	0,784	-3,50	3,23	435,8	0,810	0,416
0,34	0,4391	0,542	0,774	-3,50	2,95	435,5	0,810	0,416
0,35	0,4576	0,565	0,765	-3,50	2,69	435,3	0,810	0,416
0,36	0,4768	0,589	0,755	-3,50	2,44	435,0	0,810	0,416
0,37	0,4968	0,614	0,745	-3,50	2,20	434,8	0,810	0,416
0,371	0,4994	0,617	0,743	-3,50	2,17	434,8	0,810	0,416

3.2.2 ω -Tafel mit Druckbewehrung für $\chi_{lim} = (\chi/d)_{lim} = 0,617$, für Beton bis C50/60 mit $\sigma_{sd} \leq f_{td,cal}$
(Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls mit Verfestigung)

μ_{Eds} [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ε_{c2} [‰]	ε_{s1} [‰]	σ_{s1d} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,371	0,4994	0,617	0,743	-3,50	2,174	434,8	0,810	0,416



N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

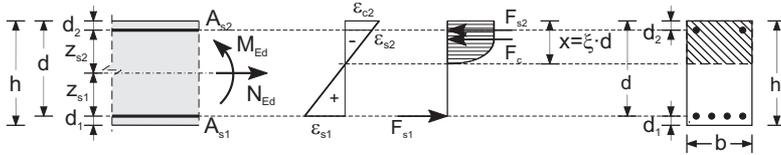
a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

<p>bezogenes Moment μ_{Eds}:</p> $\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$	<p>erf. Biegezugbewehrung A_{s1}:</p> $A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{s1d} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s1d}}$	<p>mech. Bewehrungsgrad ω_1:</p> $A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{s2d} / f_{cd}}$
--	--	--

μ_{Eds} [-]	$d_2/d = 0,05$ $\sigma_{s2d} = -435,8 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,10$ $\sigma_{s2d} = -435,5 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,15$ $\sigma_{s2d} = -435,2 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,20$ $\sigma_{s2d} = -435,0 \text{ MN/m}^2$	
	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]
0,38	0,5087	0,0092	0,5092	0,0097	0,5097	0,0103	0,5104	0,0109
0,39	0,5192	0,0197	0,5203	0,0208	0,5215	0,0220	0,5229	0,0234
0,40	0,5297	0,0302	0,5314	0,0319	0,5333	0,0338	0,5354	0,0359
0,41	0,5402	0,0408	0,5425	0,0430	0,5450	0,0456	0,5479	0,0484
0,42	0,5508	0,0513	0,5536	0,0541	0,5568	0,0573	0,5604	0,0609
0,43	0,5613	0,0618	0,5647	0,0652	0,5686	0,0691	0,5729	0,0734
0,44	0,5718	0,0723	0,5758	0,0764	0,5803	0,0808	0,5854	0,0859
0,45	0,5823	0,0829	0,5869	0,0875	0,5921	0,0926	0,5979	0,0984
0,46	0,5929	0,0934	0,5981	0,0986	0,6039	0,1044	0,6104	0,1109
0,47	0,6034	0,1039	0,6092	0,1097	0,6156	0,1161	0,6229	0,1234
0,48	0,6139	0,1144	0,6203	0,1208	0,6274	0,1279	0,6354	0,1359
0,49	0,6244	0,1250	0,6314	0,1319	0,6391	0,1397	0,6479	0,1484
0,50	0,6350	0,1355	0,6425	0,1430	0,6509	0,1514	0,6604	0,1609
0,51	0,6455	0,1460	0,6536	0,1541	0,6627	0,1632	0,6729	0,1734
0,52	0,6560	0,1565	0,6647	0,1652	0,6744	0,1750	0,6854	0,1859
0,53	0,6665	0,1671	0,6758	0,1764	0,6862	0,1867	0,6979	0,1984
0,54	0,6771	0,1776	0,6869	0,1875	0,6980	0,1985	0,7104	0,2109
0,55	0,6876	0,1881	0,6981	0,1986	0,7097	0,2103	0,7229	0,2234

3.2.3 ω -Tafel mit Druckbewehrung für $\chi_{lim} = (\chi/d)_{lim} = 0,45$, für Beton bis C50/60 mit $\sigma_{sd} \leq f_{td,cal}$
 (Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls mit Verfestigung)

μ_{Eds} [-]	ω_1 [-]	$\xi = \chi/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	σ_{s1d} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/\chi$ [-]
0,296	0,3643	0,450	0,813	-3,50	4,28	436,8	0,810	0,416



N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds} :

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

erf. Biegezugbewehrung A_{s1} :

$$A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{s1d} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s1d}}$$

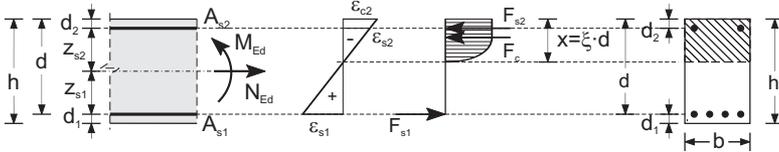
mech. Bewehrungsgrad ω_1 :

$$A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{s2d} / f_{cd}}$$

μ_{Eds} [-]	$d_2/d = 0,05$ $\sigma_{s2d} = -435,7 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,10$ $\sigma_{s2d} = -435,3 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,15$ $\sigma_{s2d} = -434,9 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,20$ $\sigma_{s2d} = -388,9 \text{ MN/m}^2$	
	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]
0,30	0,3684	0,0041	0,3686	0,0043	0,3689	0,0046	0,3692	0,0049
0,31	0,3789	0,0146	0,3797	0,0155	0,3806	0,0164	0,3817	0,0174
0,32	0,3895	0,0252	0,3908	0,0266	0,3924	0,0281	0,3942	0,0299
0,33	0,4000	0,0357	0,4020	0,0377	0,4042	0,0399	0,4067	0,0424
0,34	0,4105	0,0462	0,4131	0,0488	0,4159	0,0517	0,4192	0,0549
0,35	0,4210	0,0567	0,4242	0,0599	0,4277	0,0634	0,4317	0,0674
0,36	0,4316	0,0673	0,4353	0,0710	0,4395	0,0752	0,4442	0,0799
0,37	0,4421	0,0778	0,4464	0,0821	0,4512	0,0869	0,4567	0,0924
0,38	0,4526	0,0883	0,4575	0,0932	0,4630	0,0987	0,4692	0,1049
0,39	0,4631	0,0989	0,4686	0,1043	0,4748	0,1105	0,4817	0,1174
0,40	0,4737	0,1094	0,4797	0,1155	0,4865	0,1222	0,4942	0,1299
0,41	0,4842	0,1199	0,4908	0,1266	0,4983	0,1340	0,5067	0,1424
0,42	0,4947	0,1304	0,5020	0,1377	0,5101	0,1458	0,5192	0,1549
0,43	0,5052	0,1410	0,5131	0,1488	0,5218	0,1575	0,5317	0,1674
0,44	0,5158	0,1515	0,5242	0,1599	0,5336	0,1693	0,5442	0,1799
0,45	0,5263	0,1620	0,5353	0,1710	0,5454	0,1811	0,5567	0,1924
0,46	0,5368	0,1725	0,5464	0,1821	0,5571	0,1928	0,5692	0,2049
0,47	0,5473	0,1831	0,5575	0,1932	0,5689	0,2046	0,5817	0,2174
0,48	0,5579	0,1936	0,5686	0,2043	0,5806	0,2164	0,5942	0,2299
0,49	0,5684	0,2041	0,5797	0,2155	0,5924	0,2281	0,6067	0,2424
0,50	0,5789	0,2146	0,5908	0,2266	0,6042	0,2399	0,6192	0,2549
0,51	0,5895	0,2252	0,6020	0,2377	0,6159	0,2517	0,6317	0,2674
0,52	0,6000	0,2357	0,6131	0,2488	0,6277	0,2634	0,6442	0,2799
0,53	0,6105	0,2462	0,6242	0,2599	0,6395	0,2752	0,6567	0,2924
0,54	0,6210	0,2567	0,6353	0,2710	0,6512	0,2869	0,6692	0,3049
0,55	0,6316	0,2673	0,6464	0,2821	0,6630	0,2987	0,6817	0,3174

3.2.4 ω -Tafel mit Druckbewehrung für $\chi_{lim} = (\chi/d)_{lim} = 0,25$, für Beton bis C50/60 mit $\sigma_{sd} \leq f_{td,cal}$
 (Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls mit Verfestigung)

μ_{Eds} [-]	ω_1 [-]	$\xi = x/d$ [-]	$\zeta = z/d$ [-]	ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	σ_{s1d} [N/mm ²]	α_R [-]	$k_a = a^*/x$ [-]
0,181	0,2024	0,250	0,896	-3,50	10,50	442,7	0,810	0,416



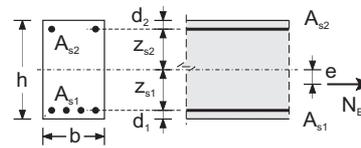
N_{Ed} ist als Druckkraft negativ!

a^* : Abstand des Schwerpunktes der Betondruckspannungen vom oberen Rand des Querschnittes

bezogenes Moment μ_{Eds}: $\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$	erf. Biegezugbewehrung A_{s1}: $A_{s1} = \omega_1 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{s1d} / f_{cd}} + \frac{N_{Ed}}{\sigma_{s1d}}$	mech. Bewehrungsgrad ω_1: $A_{s2} = \omega_2 \cdot \frac{b \cdot d}{\sigma_{s2d} / f_{cd}}$
---	---	---

μ_{Eds} [-]	$d_2/d = 0,05$ $\sigma_{s2d} = -435,4 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,10$ $\sigma_{s2d} = -420,0 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,15$ $\sigma_{s2d} = -280,0 \text{ MN/m}^2$		$d_2/d = 0,20$ $\sigma_{s2d} = -140,0 \text{ MN/m}^2$	
	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]	ω_1 [-]	ω_2 [-]
0,19	0,2115	0,0091	0,2120	0,0096	0,2126	0,0102	0,2132	0,0108
0,20	0,2220	0,0197	0,2231	0,0207	0,2243	0,0220	0,2257	0,0233
0,21	0,2326	0,0302	0,2342	0,0319	0,2361	0,0337	0,2382	0,0358
0,22	0,2431	0,0407	0,2453	0,0430	0,2479	0,0455	0,2507	0,0483
0,23	0,2536	0,0512	0,2565	0,0541	0,2596	0,0573	0,2632	0,0608
0,24	0,2641	0,0618	0,2676	0,0652	0,2714	0,0690	0,2757	0,0733
0,25	0,2747	0,0723	0,2787	0,0763	0,2832	0,0808	0,2882	0,0858
0,26	0,2852	0,0828	0,2898	0,0874	0,2949	0,0926	0,3007	0,0983
0,27	0,2957	0,0933	0,3009	0,0985	0,3067	0,1043	0,3132	0,1108
0,28	0,3062	0,1039	0,3120	0,1096	0,3185	0,1161	0,3257	0,1233
0,29	0,3168	0,1144	0,3231	0,1207	0,3302	0,1278	0,3382	0,1358
0,30	0,3273	0,1249	0,3342	0,1319	0,3420	0,1396	0,3507	0,1483
0,31	0,3378	0,1354	0,3453	0,1430	0,3538	0,1514	0,3632	0,1608
0,32	0,3483	0,1460	0,3565	0,1541	0,3655	0,1631	0,3757	0,1733
0,33	0,3589	0,1565	0,3676	0,1652	0,3773	0,1749	0,3882	0,1858
0,34	0,3694	0,1670	0,3787	0,1763	0,3891	0,1867	0,4007	0,1983
0,35	0,3799	0,1775	0,3898	0,1874	0,4008	0,1984	0,4132	0,2108
0,36	0,3905	0,1881	0,4009	0,1985	0,4126	0,2102	0,4257	0,2233
0,37	0,4010	0,1986	0,4120	0,2096	0,4243	0,2220	0,4382	0,2358
0,38	0,4115	0,2091	0,4231	0,2207	0,4361	0,2337	0,4507	0,2483
0,39	0,4220	0,2197	0,4342	0,2319	0,4479	0,2455	0,4632	0,2608
0,40	0,4326	0,2302	0,4453	0,2430	0,4596	0,2573	0,4757	0,2733
0,41	0,4431	0,2407	0,4565	0,2541	0,4714	0,2690	0,4882	0,2858
0,42	0,4536	0,2512	0,4676	0,2652	0,4832	0,2808	0,5007	0,2983
0,43	0,4641	0,2618	0,4787	0,2763	0,4949	0,2926	0,5132	0,3108
0,44	0,4747	0,2723	0,4898	0,2874	0,5067	0,3043	0,5257	0,3233
0,45	0,4852	0,2828	0,5009	0,2985	0,5185	0,3161	0,5382	0,3358
0,46	0,4957	0,2933	0,5120	0,3096	0,5302	0,3278	0,5507	0,3483
0,47	0,5062	0,3039	0,5231	0,3207	0,5420	0,3396	0,5632	0,3608
0,48	0,5168	0,3144	0,5342	0,3319	0,5538	0,3514	0,5757	0,3733
0,49	0,5273	0,3249	0,5453	0,3430	0,5655	0,3631	0,5882	0,3858
0,50	0,5378	0,3354	0,5565	0,3541	0,5773	0,3749	0,6007	0,3983
0,51	0,5483	0,3460	0,5676	0,3652	0,5891	0,3867	0,6132	0,4108
0,52	0,5589	0,3565	0,5787	0,3763	0,6008	0,3984	0,6257	0,4233
0,53	0,5694	0,3670	0,5898	0,3874	0,6126	0,4102	0,6382	0,4358
0,54	0,5799	0,3775	0,6009	0,3985	0,6243	0,4220	0,6507	0,4483
0,55	0,5905	0,3881	0,6120	0,4096	0,6361	0,4337	0,6632	0,4608

4 Bemessung für Zug mit geringer Ausmitte und zentrischen Zug

Zug mit geringer Ausmitte	Zentrischer Zug
	<p>Für $z_{s1}=z_{s2}$ gilt:</p> $A_{s1} = A_{s2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$
$A_{s2} = \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \cdot \frac{z_{s1} - e}{z_{s1} + z_{s2}}$ $A_{s1} = \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \cdot \frac{z_{s2} + e}{z_{s1} + z_{s2}}$	

5 Bemessung für Querkraft (DIN 1045-1, 10.3)

5.1 Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} (DIN 1045-1, 10.3.2)

Die **maßgebende Querkraft V_{Ed}** ist bei gleichmäßig verteilter Last und direkter Auflagerung im **Abstand d** vom Auflagerrand zu ermitteln.

Bei **auflagernahen Einzellasten Q** mit einem Abstand $x \leq 2,5 \cdot d$ und direkter Auflagerung darf der Querkraftanteil für die Ermittlung der Querkraftbewehrung um den Faktor $\beta = x / (2,5 \cdot d)$ abgemindert werden.

$$\Delta V_Q = V_Q(1 - \beta)$$

Bei **Bauteilen mit veränderlicher Nutzhöhe** ergibt sich der **Bemessungswert der Querkraft V_{Ed}** wie folgt (siehe DIN 1045-1, Bild 31):

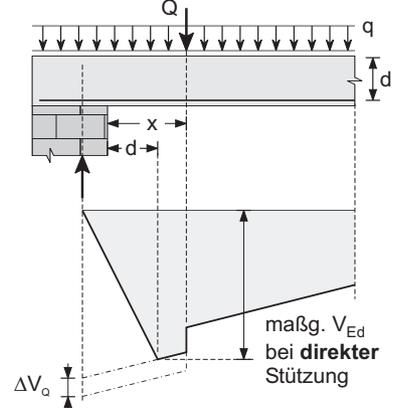
$$V_{Ed} = V_{Ed,0} - V_{ccd} - V_{td} - V_{pd}$$

$V_{Ed,0}$ Grundbemessungswert der auf den Querschnitt einwirkenden Querkraft

V_{ccd} Bemessungswert der Querkraftkomponente in der Druckzone

V_{td} Bemessungswert der Querkraftkomponente der Stahllastkraft

V_{pd} Querkraftkomponente der Spannstahllastkraft im Grenzzustand der Tragfähigkeit ($P_m \leq A_p \cdot f_{p0,1k} / \gamma_s$)



bei **indirekter** Stützung ist die Querkraft am Auflagerrand maßgebend

5.2 Bemessungswerte der aufnehmbaren Querkraft $V_{Rd,i}$

Bemessungswerte bei unterschiedlichen Versagensmechanismen:

$V_{Rd,ct}$ aufnehmbare Querkraft eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung

$V_{Rd,sy}$ aufnehmbare Querkraft bei Fließen der Querkraftbewehrung

$V_{Rd,max}$ aufnehmbare Querkraft bei Erreichen der Druckstrebenfestigkeit

5.3 Nachweisbedingungen

$V_{Rd,ct} \geq V_{Ed}$ rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich

$V_{Rd,ct} < V_{Ed}$ Querkraftbewehrung erforderlich mit $V_{Rd,sy} \geq V_{Ed}$

$V_{Rd,max} \geq V_{Ed}$ der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft darf in keinem Querschnitt des Bauteils den Wert $V_{Rd,max}$ überschreiten

5.4 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung: $V_{Ed} \leq V_{Rd,ct}$ (DIN 1045-1, 10.3.3)

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ des Betonquerschnitts:

$$V_{Rd,ct} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d > V_{Rd,ct,min}$$

mit: $V_{Rd,ct,min} = [\eta_1 \cdot v_{min} - 0,12 \cdot \sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$

$$v_{min} = \kappa_1 / \gamma_c \cdot (k^3 \cdot f_{ck})^{1/2}$$

b_w kleinste Querschnittsbreite zwischen den Schwerpunkten des Zug- und Druckgurtes

d statische Nutzhöhe der Biegebewehrung

γ_c Material Sicherheitsbeiwert Beton, bis C50/60: $\gamma_c = 1,5$

η_1 Tragfähigkeitsbeiwert = 1,0 für Normalbeton; für Leichtbeton siehe DIN 1045-1, Tabelle 10

$\kappa = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ Beiwert für den Einfluss der Bauteilhöhe; d ist in mm einzusetzen

κ_1 für $d \leq 600$ mm: $\kappa_1 = 0,0525$; für $d \geq 800$ mm: $\kappa_1 = 0,0375$; für $d = 600-800$ mm; Zwischenwerte interpolieren

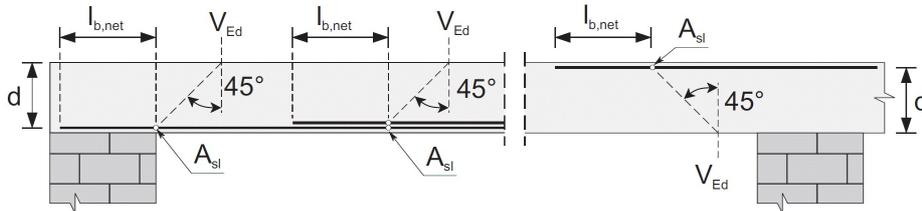
$\rho_1 = A_{s1} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$ Längsbewehrungsgrad

A_{s1} Querschnittsfläche der Zugbewehrung, die mindestens um das Maß d über den betrachteten Querschnitt hinaus geführt und dort wirksam verankert wird. Bei Vorspannung mit sofortigem Verbund darf die Spannstahlfläche voll auf A_{s1} angerechnet werden.

f_{ck} charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit; in N/mm²

σ_{cd} Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunktes des Querschnitts $\sigma_{cd} = N_{Ed} / A_c$ in N/mm²

N_{Ed} Längskraft infolge äußerer Einwirkung oder Vorspannung ($N_{Ed} < 0$ für Druck)



In Sonderfällen, z. B. bei vorgespannten Fertigteilen mit sofortigem Verbund, wenn

- vorwiegend ruhende Belastung vorherrscht und

- $f_{ctk;0,05} / \gamma_c > \sigma_c$ mit $\gamma_c = 1,8$

kann der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ alternativ ermittelt werden:

$$V_{Rd,ct} = \frac{I \cdot b_w}{S} \cdot \sqrt{\left(\frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \right)^2 - \alpha_l \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c}}$$

mit I Flächenmoment 2. Grades des Querschnitts (Trägheitsmoment)

S Flächenmoment 1. Grades des Querschnitts (Statisches Moment)

$\alpha_l = l_x / l_{pd} \leq 1,0$ bei Vorspannung mit sofortigem Verbund
 $= 1$ in den übrigen Fällen

l_x Abstand des betrachteten Querschnitts vom Beginn der Verankerungslänge

l_{pd} oberer Bemessungswert der Übertragungslänge des Spannglieds nach DIN 1045-1, 8.7.6

$f_{ctk;0,05}$ 5%-Quantilwert der Betonzugfestigkeit nach DIN 1045-1, Tab. 9 oder 10, jedoch $f_{ctk;0,05} \leq 2,7$ N/mm²

γ_c Teilsicherheitsbeiwert für unbewehrten Beton nach DIN 1045-1, 5.3.3 (8)

5.5 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung: $V_{Ed} > V_{Rd,ct}$ (DIN 1045-1, 10.3.4)

Nachweis: $V_{Ed} \leq V_{Rd,sy}$

Bügel rechtwinklig zur Bauteilachse:

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \theta$$

Querkraftbewehrung um Winkel α geneigt:

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

mit A_{sw} Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung (Bügel)

s_w Abstand der Bügel in Richtung der Biegezugbewehrung

f_{yd} Bemessungswert der Betonstahlstreckgrenze

z innerer Hebelarm: $z = 0,9 \cdot d$ mit $z \leq d - 2 \cdot c_{v,1}$ und $z \leq d - c_{v,1} - 30$ mm

mit $c_{v,1}$ = Verlegemaß der Längsbewehrung in der Betondruckzone in mm

bei Zugstäben: z = Abstand der Zugbewehrungen

θ Neigung der Druckstreben $\leq 60^\circ$

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}}$$

für Normalbeton

$\cot \theta \leq 3,0$

bzw. $\theta \geq 18,5^\circ$

für Leichtbeton

$\cot \theta \leq 2,0$

bzw. $\theta \geq 26,5^\circ$

mit $V_{Rd,c} = \left[c_j \cdot 0,48 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot \left(1 + 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \right] \cdot b_w \cdot z$

$c_j = 0,5$

$\eta_1 = 1,0$ für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10

σ_{cd} Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunktes des Querschnitts = N_{Ed} / A_c (in N/mm²)

N_{Ed} Längskraft infolge äußerer Einwirkung oder Vorspannung ($N_{Ed} < 0$ für Druck)

f_{ck} charakteristische Betondruckfestigkeit; in N/mm²

Näherungsweise kann angenommen werden:

$\cot \theta = 1,2$ für reine Biegung

$= 1,2$ für Biegung mit Längsdruckkraft

$= 1,0$ für Biegung mit Längszugkraft

5.6 Maximale Querkrafttragfähigkeit bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung: $V_{Ed} \geq V_{Rd,ct}$
(DIN 1045-1, 10.3.4 (6 - 8))

Nachweis: $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$

Bügel rechtwinklig zur Bauteilachse:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

Querkraftbewehrung um Winkel α geneigt:

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}$$

mit $\alpha_c = 0,75 \cdot \eta_1$
 $\eta_1 = 1,0$ für Normalbeton; für Leichtbeton η_1 nach DIN 1045-1, Tabelle 10

Bei Spanngliedern im Steg und wenn $\Sigma d_h > b_w/8$ (d_h = Hüllrohrdurchmesser) ist der Nachweis mit der Breite $b_{w,nom}$ zu führen, dabei gilt:

- für verpresste Spannglieder:
 $b_{w,nom} = b_w - 0,5 \cdot \Sigma d_h$ für Beton bis C 50/60 bzw. LC 50/55
 $b_{w,nom} = b_w - 1,0 \cdot \Sigma d_h$ für Beton ab C 55/67 bzw. LC 55/60
- für nicht verpresste Spannglieder und Spannglieder ohne Verbund:
 $b_{w,nom} = b_w - 1,3 \cdot \Sigma d_h$

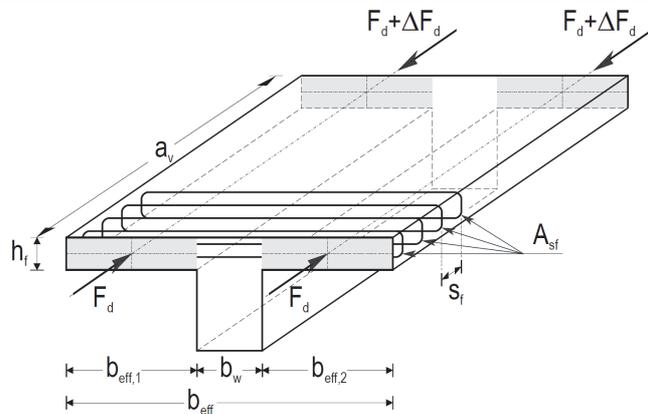
6 Bemessung für Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurt (DIN 1045-1, 10.3.5)

Mittlerer aufzunehmender Längsschub v_{Ed}
je Längeneinheit:

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{a_v}$$

mit: ΔF_d Längskraftdifferenz über die Länge a_v
des betrachteten Gurtabschnitts

- a_v Abstand, in dem ΔF_d als konstant angenommen werden kann, dabei gilt:
- höchstens der halbe Abstand zwischen Momentennullpunkt und Momentenmaximum
 - bei nennenswerten Einzellasten sollten die Abschnitte a_v nicht über die Querkraftsprünge hinausgehen



Erforderliche Querbewehrung im Gurt:

$$a_{sf} = \frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{\Delta F_d}{f_{yd} \cdot a_v \cdot \cot \theta}$$

$$\frac{\Delta F_d}{a_v} \leq \frac{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot h_f}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{h_f}{2} \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}$$

beim Zuggurt

$$= \frac{h_f}{2,03} \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}$$

beim Druckgurt

mit $\cot \theta = 1,0$ bei Zuggurten
 $= 1,2$ bei Druckgurten
 $\alpha_c = 0,75 \cdot \eta_1$
 $\eta_1 = 1,0$ für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10
 h_f Höhe des Gurtes

- Die Begrenzung von a_{sf} erfolgt zur Vermeidung des Druckstrebenversagens.
- Die Querbewehrung a_{sf} ist über die Höhe des Gurtes h_f verteilt anzuordnen (oben und unten).
- Bei kombinierter Beanspruchung aus Schub zwischen Gurt und Steg und aus Querbiegung ist der jeweils größere Stahlquerschnitt anzuordnen. Dabei sind Plattenoberseite und -unterseite (bzw. Zug- und Druckzone) getrennt unter Ansatz jeweils der halben Querkraftbewehrung zu betrachten.
- Wenn in der Gurtplatte eine Querkraftbewehrung erforderlich wird, sollte der Nachweis der Druckstreben in beiden Beanspruchungsrichtungen des Gurtes der Scheibe und Platte in linearer Interaktion geführt werden:

$$(V_{Ed,Platte} / V_{Rd,max,Platte}) + (V_{Ed,Scheibe} / V_{Rd,max,Scheibe}) \leq 1,0$$

7 Schubkraftübertragung in Verbundfugen (DIN 1045-1, 10.3.6)

7.1 Allgemeines, Nachweis

In der Verbundfuge erfolgt die Schubkraftübertragung aufgrund der Rauigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit der Fuge zwischen:

- nebeneinanderliegenden Fertigteilen
- Ortbeton und einem Fertigteil
- nacheinander betonierten Ortbetonabschnitten

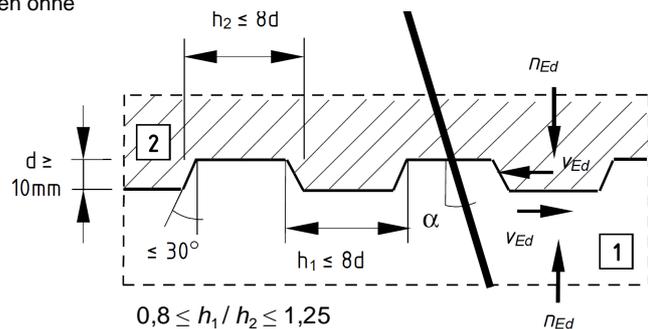
Die **Fugenausbildung** ist:

- sehr glatt**
- die Oberfläche wird gegen Stahl, Kunststoff oder glatte Holzschalung betoniert
 - die Oberfläche von unbehandelten Fugenoberflächen bei Verwendung von Beton mit fließfähiger bis sehr fließfähiger Konsistenz

- glatt**
- die Oberfläche wird abgezogen oder
 - die Oberfläche wird im Gleit- bzw. Extruderverfahren hergestellt oder
 - die Oberfläche bleibt nach dem Verdichten ohne weitere Behandlung

- rau**
- die Oberfläche weist eine definierte Rauigkeit auf (siehe DafStb - Heft 525)

- verzahnt**
- die Geometrie der Oberfläche entspricht nebenstehendem Bild oder
 - das Korngerüst ist freigelegt



Nachweis: $v_{Edj} \leq v_{Rdj}$

mit v_{Edj} in der Verbundfuge zu übertragende Längsschubkraft (je Längeneinheit)
 v_{Rdj} Längsschubtragfähigkeit in Verbundfugen bzw. Fugen zwischen Fertigteilen (je Längeneinheit)

7.2 Zu übertragende Schubkraft v_{Edj} je Längeneinheit (DIN 1045-1, 10.3.6 (2))

$$v_{Edj} = \frac{F_{cdj}}{F_{cd}} \cdot \frac{v_{Ed}}{z}$$

mit $F_{cd} = M_{Ed}/z$ Gurtlängskraft aus Biegung im betrachteten Querschnitt
 F_{cdj} Längskraftanteil im nachträglich ergänzten Querschnittsteil
 z innerer Hebelarm
 V_{Ed} Bemessungswert der im betrachteten Querschnitt wirkenden Querkraft

7.3 Bemessungswerte der aufnehmbaren Schubkraft v_{Rdj} je Längeneinheit (DIN 1045-1, 10.3.6 (3)(4))

$$v_{Rdj} = v_{Rdj,ct} + v_{Rdj,sy} \leq v_{Rdj,max}$$

mit v_{Rdj} Bemessungswert der Längsschubtragfähigkeit in Fugen
 $v_{Rdj,ct}$ Traganteil der aufnehmbaren Schubkraft aus Adhäsion und Reibung
 $v_{Rdj,sy}$ Traganteil der aufnehmbaren Schubkraft aus Verbundbewehrung
 $v_{Rdj,max}$ maximal aufnehmbare Schubkraft nach DIN 1045-1, 10.3.6 (4)

7.3 Bemessungswerte der aufnehmbaren Schubkraft v_{Rdj} je Längeneinheit (DIN 1045-1, 10.3.6 (3)(4))

$$v_{Rd,ct} = (\eta_1 \cdot c_j \cdot f_{ctd} - \mu \cdot \sigma_{Nd}) \cdot b$$

- mit η_1 Tragfähigkeitsbeiwert
 = 1,0 für Normalbeton
 für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10
- c_j Rauigkeitsbeiwert nach nebenstehender Tabelle
- f_{ctd} Bemessungswert der Betonzugfestigkeit des Ortbetons
 oder des Fertigteils, der kleinere Wert ist maßgebend (in N/mm²)
 mit $f_{ctd} = f_{ctk,0,05} / \gamma_c$ und $\gamma_c = 1,8$ für unbewehrtem Beton
- μ Reibungsbeiwert nach nebenstehender Tabelle
- σ_{Nd} Normalspannung infolge der äußeren Last senkrecht zur Fugenfläche
 = $n_{Ed} / b \geq -0,6 \cdot f_{ctd}$ ($\sigma_{Nd} < 0$ für Druckspannung)
- n_{Ed} Bemessungswert der Normalkraft senkrecht zur Fuge je Längeneinheit
- b Breite der Kontaktfläche

Oberflächenbeschaffenheit	c_j	μ
verzahnt	0,50	0,9
rau	0,40 ^{*)}	0,7
glatt	0,20 ^{*)}	0,6
sehr glatt	0	0,5

^{*)} steht die Fuge senkrecht zur Fugenfläche unter Zug, dann ist $c_j = 0$ (Ausnahme: verzahnte Fuge)

$$v_{Rdj,sy} = a_s \cdot f_{yd} \cdot (1,2\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)$$

- mit a_s Querschnitt der die Fuge kreuzenden Bewehrung je Längeneinheit
- f_{yd} Bemessungswert der Betonstahlstreckgrenze der die Fuge kreuzenden Bewehrung
- α Neigungswinkel der die Fuge kreuzenden Bewehrung $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$v_{Rdj,max} = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot v \cdot f_{ctd} \cdot b$$

- mit v Abminderungswert für die Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit
- für verzahnte Fugen $v = 0,70$
- raue Fugen $v = 0,50$
- glatte Fugen $v = 0,20$
- sehr glatte Fugen $v = 0,0$ (mit $v_{Rdj} \leq v_{Rd,max}$ für glatte Fugen)

7.4 Berechnung des Bewehrungsquerschnitts a_{sj}

Berechnung des Bewehrungsquerschnitts a_{sj} :

$$a_{sj} = \left(\frac{F_{cdj} \cdot V_{Ed}}{F_{cd} \cdot z} - (\eta_1 \cdot c_j \cdot f_{ctd} - \mu \cdot \sigma_{Nd}) \cdot b \right) / \left(f_{yd} (1,2\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \right)$$

Vereinfachte Berechnung von a_{sj} :

$$a_{sj} = \frac{V_{Ed} / z - 0,24 \cdot b}{0,72 f_{yd}} \cdot 10^4 \text{ (glatt)} \quad a_{sj} = \frac{V_{Ed} / z - 0,48 \cdot b}{0,84 f_{yd}} \cdot 10^4 \text{ (rau)}$$

Querkraft V in MN
 Abmessungen b, z in m
 Streckgrenze f_{yd} in N/mm²
 BSt 500 S $f_{yd} = 435$ N/mm²

- mit
- Betongüte C 25/30 oder höher
 - Vernachlässigung von σ_{Nd} infolge äußerer Lasten
 - Anschluss der gesamten Druckgurkraft: $F_{cdj} = F_{cd}$
 - Neigung der die Fuge kreuzenden Bewehrung: $\alpha = 90^\circ$

7.5 Konstruktionsregeln

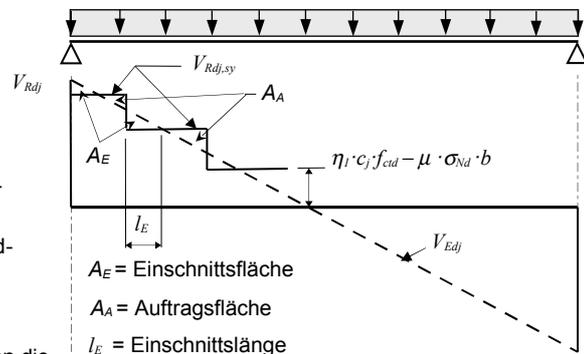
- Bei biegebeanspruchten Bauteilen darf die Fugenverbundbewehrung abgestuft werden, dabei gilt:

$$l_E \leq d \text{ und } A_A \geq A_E$$

- Die Verbundbewehrung darf als Querkraftbewehrung angerechnet werden wenn diese als Schubbewehrung ausgeführt wird.
- Die Schubbewehrung der Fuge muss auf beiden Seiten der Kontaktfläche verankert sein.
- Wenn an Platten Lasten angehängt werden, ist die Verbund-sicherung im Lasteinleitungsbereich nachzuweisen.
- Bei dynamischer oder Ermüdungsbeanspruchung ist der Adhäsionsanteil nicht ansetzbar, d.h. $c_j = 0$
- Für die Verbundbewehrung bei Ortbetonergänzungen sollten die Konstruktionsregeln nach DIN 1045-1; 13.2.3 eingehalten werden.
- Für die Verbundbewehrung bei Ortbetonergänzungen in Platten ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung dürfen nachfolgende Konstruktionsregeln angewendet werden:

Maximale Abstände der Verbundbewehrung: $2,5 h \leq 300$ mm in Spannrichtung
 $5,0 h \leq 750$ mm quer zur Spannrichtung (≤ 375 mm zum Rand)

- Quer zur Spannrichtung beträgt in Bauteilen mit erforderlicher Querkraftbewehrung der maximale Abstand 400 mm für Deckendicken bis 400 mm. Für größere Deckendicken gilt DIN 1045-1; 13.3.3 (4)
- Bei überwiegend auf Biegung beanspruchten Bauteilen mit Fugen rechtwinklig zur Systemachse wirkt die Fuge wie ein Biegeriss. In diesem Fall sind die Fugen rau oder verzahnt auszuführen und der Nachweis entsprechend 10.3.3 und 10.3.4 und 10.3.6 (13) geführt werden.



8 Bemessung für Torsion (DIN 1045-1, 10.4)

8.1 Allgemeines, Nachweise

Eine Bemessung für Torsion ist durchzuführen, wenn sie zur Einhaltung des Gleichgewichts erforderlich ist (Gleichgewichtstorsion).

Verträglichkeitstorsion muss rechnerisch nicht erfasst werden, gleichwohl sollte hierfür eine konstruktive Bewehrung angeordnet werden, um eine übermäßige Rissbildung zu vermeiden.

Keine Querkraft- und Torsionsbewehrung erforderlich, wenn:

$$T_{Ed} \leq \frac{V_{Ed} \cdot b_w}{4,5} \quad \text{und} \quad V_{Ed} \cdot \left(1 + \frac{4,5 \cdot T_{Ed}}{V_{Ed} \cdot b_w}\right) \leq V_{Rd,ct}$$

Schubkraft $V_{Ed,T}$ infolge eines Torsionsmoments T_{Ed} :

$$V_{Ed,T} = \frac{T_{Ed} \cdot z}{2A_k}$$

Schubkraft $V_{Ed,T+V}$ infolge Querkraft und Torsion:

$$V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + \frac{V_{Ed} \cdot t_{eff}}{b_w}$$

mit T_{Ed} Bemessungswert des einwirkenden Torsionsmoments

V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

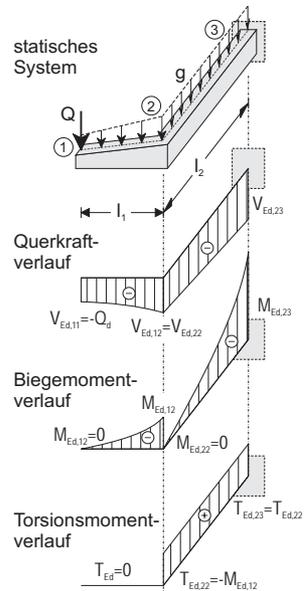
$V_{Rd,ct}$ Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung (siehe 7.3.1)

b_w Stegbreite

A_k durch die Bewehrungsschwerelinie eingeschlossene Fläche; die Bewehrungsschwerelinien sind durch die Achsen der Längsstäbe in den Ecken definiert

z Höhe einer Wand

t_{eff} effektive Dicke einer Wand; gleich dem doppelten Abstand der Bewehrungsschwerelinie zur Außenfläche, aber nicht größer als die vorhandene Wanddicke



8.2 Erforderliche Torsionsbewehrung (DIN 1045-1, 10.4.2)

Bügelbewehrung: $a_{sw} = \frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \cdot \tan \theta \cdot \frac{1}{f_{yd}}$

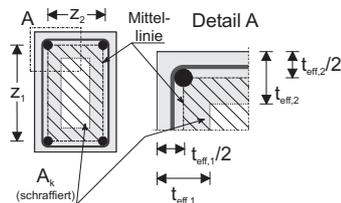
Längsbewehrung: $a_{sl} = \frac{A_{sl}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \cdot \cot \theta \cdot \frac{1}{f_{yd}}$

mit u_k Umfang der Fläche A_k
 T_{Ed} einwirkendes Torsionsmoment
 s_w Abstand der Bügel

f_{yd} Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls

θ Ermittlung der Mindestdruckstrebenneigung min. θ nach 5.5.

Für Torsions- und Querkrafteinwirkung ist dabei für V_{Ed} $V_{Ed,T+V} = V_{Ed,T} + V_{Ed} \cdot (t_{eff} / b_w)$ und für $b_w = t_{eff}$ einzusetzen; vereinfachend darf die Bewehrung für Torsion allein für $\theta = 45^\circ$ ermittelt und zu der nach 5.5 ermittelten Querkraftbewehrung addiert werden.



8.3 Maximal aufnehmbare Torsionsmomente (DIN 1045-1, 10.4)

Bemessungswert des maximal aufnehmbaren Torsionsmoments $T_{Rd,max}$:

$$T_{Rd,max} = 2 \cdot \alpha_{c,red} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{eff} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

mit $\alpha_{c,red} = 0,7 \cdot \alpha_c$, allgemein

$= \alpha_c = 0,75 \cdot \eta_1$ bei Kastenquerschnitten mit Bewehrung an den Innen- und Außenseiten

$\eta_1 = 1,0$ für Normalbeton; für Leichtbeton nach DIN 1045-1, Tabelle 10

Bei gleichzeitig auftretender Torsions- und Querkrafteinwirkung sind, um die maximale Tragfähigkeit nicht zu überschreiten, folgende Bedingungen einzuhalten:

Für Kompaktquerschnitte:

$$\left(\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}}\right)^2 \leq 1$$

Für Hohlkastenquerschnitte

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1$$

mit $V_{Rd,max}$ Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft

9 Bemessung für Durchstanzen (DIN 1045-1, 10.5)

9.1 Bezeichnungen und Nachweisschnitte

Die Durchstanznachweise gelten für:

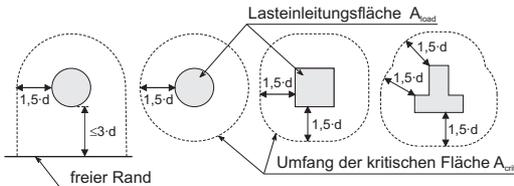
- Platten
- Fundamente
- Rippendecken mit Vollquerschnitt im Bereich der Lasteinleitungsfläche und $r_{\text{Vollquerschnitt}} = r_{\text{crit}} + 1,5 \cdot d$

Die Regelungen gelten für folgende **Lasteinleitungsflächen A_{load}** :

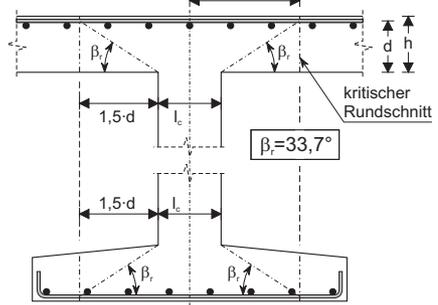
- kreisförmiger Querschnitt: $l_c = 2 \cdot r_c \leq 3,5 \cdot d$
- rechteckiger Querschnitt: $U_c \leq 11 \cdot d$; $0,5 \leq l_x/l_y \leq 2,0$

mit d mittlere Nutzhöhe
 l_c Durchmesser der Lasteinleitungsfläche
 l_x, l_y Seitenlängen
 r_c Radius der Lasteinleitungsfläche
 U_c Umfang der Lasteinleitungsfläche

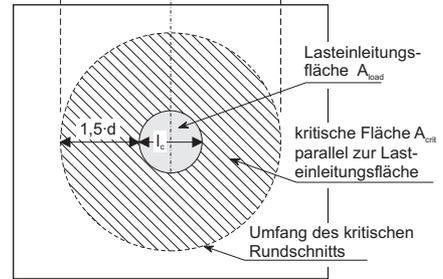
Die **kritische Fläche A_{crit}** ist die Fläche innerhalb des kritischen Rundschnittes und umgibt die Lasteinleitungsfläche A_{load} in einem Abstand von $1,5 \cdot d$.



Querschnitt



Aufsicht



9.2 Stützen mit abgestuften oder schrägen Stützenkopferstärkungen

$l_H \leq 1,5 \cdot h_H$: Nachweis nur im kritischen Rundschnitt außerhalb der Verstärkung

Lasteinleitungsfläche ist die Fläche der Stützenkopferstärkung

Rundstützen: $r_{\text{crit}} = 1,5 \cdot d + l_H + 0,5 \cdot l_c$

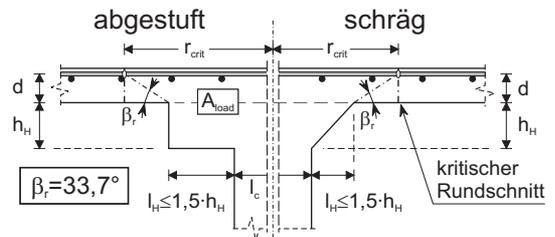
Rechteckstützen: $r_{\text{crit}} = 1,5 \cdot d + 0,56 \cdot \sqrt{b_c \cdot h_c}$

$r_{\text{crit}} = 1,5 \cdot d + 0,64 \cdot b_c$
 kleineres r_{crit} maßgebend

mit l_H Abstand zwischen Stützenrand und Rand der Stützenkopferstärkung

l_c Durchmesser einer runden Stütze

b_c, h_c Seiten einer rechteckigen Stütze ($b_c \leq h_c$)



$l_H > 1,5 \cdot h_H$: Nachweis in kritischen Rundschnitten außer- und innerhalb der Verstärkung

innerhalb:

$r_{\text{crit,in}} = 1,5 \cdot (d + h_H) + 0,5 \cdot l_c$

Die Lasteinleitungsfläche A_{load} ist die Fläche der Stütze

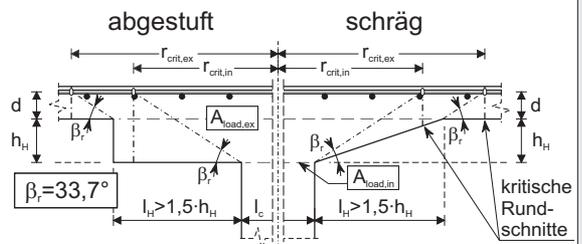
außerhalb:

$r_{\text{crit,ex}} = 1,5 \cdot d + l_H + 0,5 \cdot l_c$

Die Lasteinleitungsfläche A_{load} ist die Fläche der Stützenkopferstärkung

mit l_H Abstand Stützenrand vom Rand der Stützenkopferstärkung

l_c Durchmesser einer runden Stütze

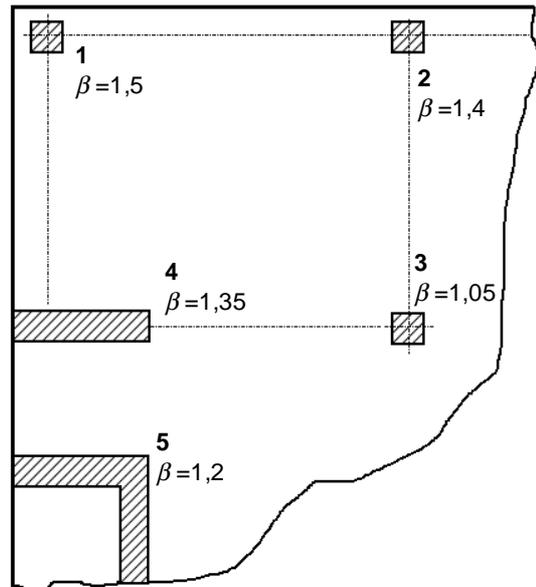


9.3 Bemessungswert der einwirkenden Querkraft v_{Ed} je Längeneinheit im maßgebenden Rundschnitt (DIN 1045-1, 10.5.3 (2))

Die **maßgebende Querkraft** v_{Ed} je Längeneinheit im maßgebenden Rundschnitt beträgt:

$$v_{Ed} = \frac{\beta \cdot v_{Ed}}{u}$$

V_{Ed}	Bemessungswert der gesamten aufzunehmenden Querkraft (Stützenkraft)
u	Umfang des maßgebenden Rundschnitts im Abstand $r = 1,5 d$ (bei Bodenpl./Fundamenten auch $r = 1,0 d$)
β	Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkung von Momenten in der Lasteinleitungsfläche
	= 1,0 wenn keine Lastausmitte vorhanden ist und kein Moment angreift
	= 1,5 bei Eckstützen (1)
	= 1,4 bei Randstützen (2)
	= 1,05 bei Innenstützen (3)
	= 1,35 bei Wandenden (4)
	= 1,05 bei einspringenden Ecken (5)



Keine Reduktion von v_{Ed} infolge auflagnaher Einzellasten!

Bei Fundamentplatten ist die Reduktion von v_{Ed} infolge günstig wirkender Bodenpressung unter Ansatz von $0,5 \cdot A_{x,ri}$ nach 10.5.2(4) bzw. 100% der Fläche unter dem reduziertem Nachweisschnitt bei $1,0 d$ nach 10.5.2(14) möglich.

Die Querkraftkomponente geneigter Spannglieder v_{pd} darf nach 10.3.2 berücksichtigt werden. $l_{eff,1} / l_{eff,2}$

Beiwerte β für unverschiebbare Systeme mit einem Stützweitenverhältnis von $0,8 < l_{eff,1} / l_{eff,2} < 1,25$

Andere Werte für β siehe DAfStb - Heft 525

9.4 Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft $v_{Rd,i}$ je Längeneinheit (DIN 1045-1, 10.5.3 (1))

Bemessungswerte einer Platte bei unterschiedlichen Versagensmechanismen:

$v_{Rd,ct}$	Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung längs des kritischen Rundschnitts
$v_{Rd,ct,a}$	Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung längs des äußeren Rundschnitts außerhalb des Durchstanzbewehrten Bereichs
$v_{Rd,sy}$	Querkrafttragfähigkeit längs innerer Rundschnitte bei Fließen der Querkraftbewehrung (Durchstanzbewehrung)
$v_{Rd,max}$	Querkrafttragfähigkeit längs des kritischen Rundschnitts bei Erreichen der Druckstrebenfestigkeit

9.5 Nachweisbedingungen

$v_{Ed} \leq v_{Rd,ct}$	keine Durchstanzbewehrung erforderlich
$v_{Ed} > v_{Rd,ct}$	Durchstanzbewehrung erforderlich mit $v_{Ed} \leq v_{Rd,sy}$
$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$	Querkrafttragfähigkeit längs des kritischen Rundschnitts bei Erreichen der Druckstrebenfestigkeit darf nicht überschritten werden, wenn $v_{Ed} > v_{Rd,ct}$

9.6 Platten oder Fundamente ohne Durchstanzbewehrung: $v_{Ed} \leq v_{Rd,ct}$ (DIN 1045-1, 10.5.4)

Nachweis: $v_{Ed} \leq v_{Rd,ct}$

$$v_{Rd,ct} = \left[0,21 / \gamma \cdot \eta_1 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot d$$

mit	d	mittlere Nutzhöhe = $(d_x + d_y) / 2$
	d_x, d_y	Nutzhöhen der Platte in x- bzw. y-Richtung im kritischen Rundschnitt
	η_1	Tragfähigkeitsbeiwert = 1,0 für Normalbeton; für Leichtbeton siehe \Rightarrow DIN 1045-1, Tabelle 10
	κ	= $1 + \sqrt{200 / d} \leq 2,0$; d ist in mm einzusetzen; Beiwert für den Einfluss der Bauteilhöhe
	ρ_1	= $\sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}}$; Längsbewehrungsgrad innerhalb des kritischen Rundschnitts $\leq 0,50 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$ und $\leq 0,02$
	ρ_{lx}, ρ_{ly}	Bewehrungsgrade der Biegezugbewehrung in x- und y-Richtung, die innerhalb des betrachteten Rundschnitts liegt und außerhalb verankert ist.
	σ_{cd}	= $\frac{\sigma_{cd,x} + \sigma_{cd,y}}{2}$ [N/mm ²]; Betonnormalspannung innerhalb des kritischen Rundschnitts
	$\sigma_{cd,x}$	= $N_{Ed,x} / A_{c,x}$ [N/mm ²]; Betonnormalspannungen in x-Richtung
	$\sigma_{cd,y}$	= $N_{Ed,y} / A_{c,y}$ [N/mm ²]; Betonnormalspannungen in y-Richtung
	$N_{Ed,x}, N_{Ed,y}$	mittlere Längskraft infolge äußerer Einwirkung oder Vorspannung

Bei Anwendung des Nachweisschnittes $r = 1,0 d$ für Fundamente und Bodenplatten ist DIN 1045-1; 10.5.4 (2) zu beachten

9.7 Platten und Fundamente mit Durchstanzbewehrung: $V_{Rd,ct} < V_{Ed}$ (DIN 1045-1, 10.5.5)

9.7.1 Nachweis: $V_{Rd,sy} \geq V_{Ed}$

Die **erste Bewehrungsreihe** ist im Abstand von **0,5·d** vom Stützenrand anzuordnen (**innerer Rundschnitt**). Es gilt:

$$V_{Rd,sy} = V_{Rd,c} + \frac{\kappa_s \cdot A_{sw} \cdot f_{yd}}{u}$$

Für weitere Bewehrungsreihen im Abstand $s_w \leq 0,75 \cdot d$ gilt:

$$V_{Rd,sy} = V_{Rd,c} + \frac{\kappa_s \cdot A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot d}{u \cdot s_w}$$

mit $V_{Rd,c}$ Betontraganteil; es darf $V_{Rd,c} = V_{Rd,ct}$ angenommen werden

$\kappa_s \cdot A_{sw} \cdot f_{yd}$ Bemessungswert der Zugkraft in der Durchstanzbewehrung in Richtung der aufzunehmenden Querkraft für jede Reihe der Bewehrung

A_{sw} Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung einer Reihe

f_{yd} Bemessungswert der Betonstahlstreckgrenze

κ_s Beiwert zur Berücksichtigung der Plattenhöhe

$$= 0,7 + 0,3 \cdot \frac{d - 400}{400} \geq 0,7 \text{ und } \leq 1,0, \text{ mit } d \text{ in [mm]}$$

d mittlere Nutzhöhe

u Umfang der betrachteten Reihe

s_w wirksame Breite einer Reihe der Durchstanzbewehrung $\leq 0,75 \cdot d$

Für Schrägstäbe als Durchstanzbewehrung gilt im Rundschnitt im Abstand 0,5·d vom Stützenrand:

$$V_{Rd,sy} = V_{Rd,c} + \frac{1,3 \cdot A_s \cdot \sin \alpha \cdot f_{yd}}{u}$$

mit $1,3 \cdot A_s \cdot \sin \alpha \cdot f_{yd}$ Bemessungskraft der Zugkraft in der Durchstanzbewehrung in Richtung der aufzunehmenden Querkraft

(der wirksame Bewehrungsquerschnitt ergibt sich zu: $\kappa_s \cdot A_{sw} = 1,3 \cdot A_s \cdot \sin \alpha$)

α Winkel der geneigten Durchstanzbewehrung gegen die Plattenebene $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

Besteht die Durchstanzbewehrung nur aus Schrägstäben, so dürfen diese nur im Bereich des kritischen Rundschnitts angeordnet werden (DIN 1045-1, Bild 72)

Mindestwert der Durchstanzbewehrung der inneren Rundschnitte: $\rho_w = \frac{A_{sw}}{s_w \cdot u} \geq \min \rho_w$

Mindestwert der Durchstanzbewehrung bei Schrägstäben: $\rho_w = \frac{A_s \cdot \sin \alpha}{s_w \cdot u} \geq \min \rho_w$

$\min \rho_w$: Mindestquerbewehrungsgrad nach DIN 1045-1, 13.2.3 (5)

9.7.2 Nachweis der Quertragfähigkeit am äußeren Rundschnitt: $V_{Rd,ct,a} \geq V_{Ed}$ (DIN 1045-1, 10.5.5 (4))

Der äußere Rundschnitt liegt im Abstand von 1,5·d von der letzten Bewehrungsreihe.

Die Quertragfähigkeit am äußeren Rundschnitt errechnet sich zu:

$$V_{Rd,ct,a} = \kappa_a \cdot V_{Rd,ct}$$

$$\text{mit } \kappa_a = 1 - \frac{0,29 \cdot l_w}{3,5 \cdot d} \geq 0,71$$

l_w Breite des Bereichs mit Durchstanzbewehrung außerhalb der Lasteinleitungsfläche (DIN 1045-1, Bild 45)

9.7.3 Nachweis am kritischen Rundschnitt: $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$ (DIN 1045-1, 10.5.5 (1))

Maximale Querkrafttragfähigkeit bei Erreichen der Druckstrebenfestigkeit

$$V_{Rd,max} = 1,5 \cdot V_{Rd,ct}$$

mit $V_{Rd,ct}$ Querkrafttragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung im kritischen Rundschnitt

9.7.4 Mindestmomente

Siehe DIN 1045-1, 10.5.6

