

Ontwerpen van schroefverbindingen

1.0 INTRODUCTIE

Schroeven, bouten en draadeinden zijn de meest toegepaste machine onderdelen in de werktuigbouw. Schroeven worden anders dan bouten, in het hart van de kop aangedraaid. Denk aan de cilinderkopschroef met sleufkop, kruiskop en de schroef met binnenzeskant. Afhankelijk van de toepassing wordt verder onderscheid gemaakt tussen bevestigingsschroeven, bewegingsschroeven en stelschroeven. Omdat in elke machine zeer veel schroefverbindingen worden toegepast en het falen van een enkele schroefverbinding tot uitval en grote schade kan leiden worden hoge eisen gesteld aan de kwaliteit van de schroefverbinding.

Dit hoofdstuk is beperkt tot het ontwerpen van betrouwbare schroefverbindingen. Bekende faalmechanismen van schroefverbindingen zijn: loswerken tijdens bedrijf, taaie geweldbreuk, brosse breuk, vermoeiingsbreuk en afschuiving van de schroefdraad.



Trefwoordenlijst:

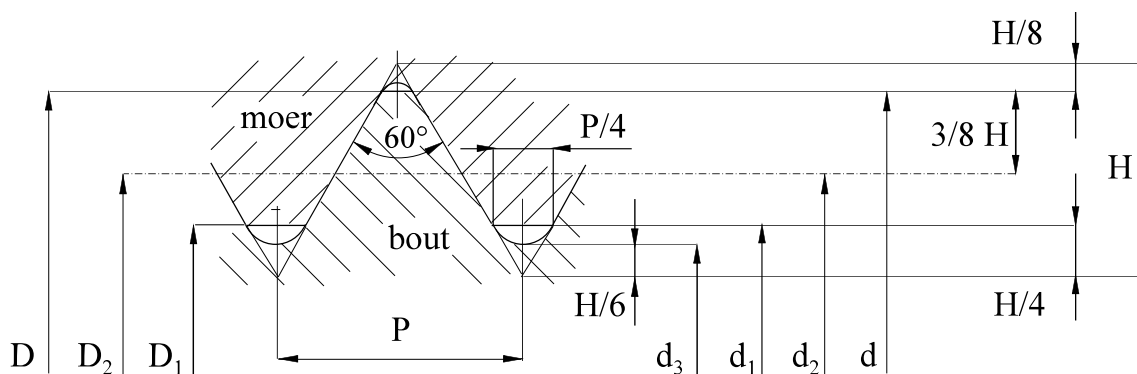
Aanduiding schroefdraad	<u>3</u>	Schroefdraadafschuifsterkte	<u>14</u>
Aanhaalmoment	<u>5</u>	schroefdraadlengte	<u>14</u>
Afschuifsterkte	<u>14</u>	Schroefmoment	<u>5</u>
anti-vreet additieven	<u>15</u>	Schroeven	<u>1</u>
basisprofiel	<u>3</u>	seizure	<u>15</u>
Bedrijfslast	<u>9</u>	Smith diagram	<u>12</u>
bevestigingsschroeven	<u>1</u>	Spanningsdoorsnede	<u>3</u>
Diameter spanningsdoorsnede	<u>3</u>	Spoodhoek	<u>3</u>
Draagvlakwrijvingsmoment	<u>5</u>	tapgaten	<u>15</u>
ductiele materialen	<u>6</u>	Toelaatbare schuifspanning	<u>14</u>
Dynamische belasting	<u>11</u>	torsiespanning	<u>6</u>
equivalente trekspanning	<u>6</u>	Vermoeiingssterkte	<u>11</u>
faalmechanismen	<u>1</u>	Vermoeiingstrektediagrammen	<u>12</u>
falen	<u>1</u>	vlaktedruk	<u>15</u>
fijn schroefdraad	<u>6</u>	vormveranderingsenergie (VEH)	<u>6, 14</u>
Flankdiameter	<u>3</u>	VSD volgens Smith	<u>12</u>
galling	<u>15</u>	weerstandsmoment	<u>6</u>
gewelddreuk	<u>11</u>	Wöhlerkromme	<u>11</u>
inzetdraad	<u>15</u>	wrijvingscoëfficiënt	<u>7</u>
Kerndiameter	<u>3</u>	wrijvingshoek	<u>5</u>
Koud vreten	<u>15</u>	zelf remmend	<u>6</u>
losdraaien	<u>6</u>		
Maximum aanhaalmoment	<u>6</u>		
maximum voorspankracht	<u>6</u>		
Mechanische eigenschappen	<u>4</u>		
metrisch fijn schroefdraad	<u>6</u>		
moerhoogte	<u>14</u>		
Optimale voorspankracht	<u>9</u>		
plastische deformatie	<u>6</u>		
roestvrijstaal	<u>15</u>		

1.1 ONTWERPEN VAN SCHROEFVERBINDINGEN

1.1.1 Metrische schroefdraad

Aanduiding schroefdraad: De notatie ISO 4014 - M12 x 80 - 8.8 geeft aan dat dit een schroef betreft met een metrische schroefdraad, met een buitendiameter $d=12\text{mm}$, een lengte onder de schroefkop van 80mm en een staalkwaliteit met een minimale treksterkte van $8 \cdot 100 = 800\text{MPa}$ en een onderste vloeigrens R_{eL} of 0.2%-rekgrens $0.8 \cdot 800 = 640\text{MPa}$. Indien de spoed niet wordt vermeld dan geldt de grove spoed, in dit geval $P=1.75\text{mm}$ (Tabel 2). Voor een metrische fijnschroefdraad is de aanduiding M12 x 1.25 x 80 waarin de spoed $P=1.25\text{mm}$ bedraagt. De andere nominale maten van de schroefdraad kunnen volgens ISO 68 van de spoed P en de diameter d , D worden afgeleid (Tabel 1).

De staalkwaliteit staat ook altijd op de kop van de bout of schroef aangegeven (Calculator 1.1). Bij moeren wordt alleen de minimale treksterkte aangegeven, M12 - 8. Een schroef in combinatie met een standaard moer (moerhoogte $0.8d$) met dezelfde minimale treksterkte is, gemeten volgens ISO 898-2, is belastbaar tot de treksterkte van de schroef.



Figuur 1.2 Profiel metrische schroefdraad (ISO 68-1)

Tabel 1: Nominale maten metrische schroefdraad.

D	Buitendiameter binnendraad basisprofiel	$D = d$
d	Buitendiameter buitendraad basisprofiel	$d = D$
D_2	Flankdiameter binnendraad basisprofiel	$D_2 = D - 2 \times 3/8 H = D - 0.64952 P$
d_2	Flankdiameter buitendraad basisprofiel	$d_2 = d - 2 \times 3/8 H = d - 0.64952 P$
D_1	Kerndiameter binnendraad basisprofiel	$D_1 = D - 2 \times 5/8 H = D - 1.08253 P$
d_1	Kerndiameter buitendraad basisprofiel	$d_1 = d - 2 \times 5/8 H = d - 1.08253 P$
H	Hoogte profieldriehoek	$H = 1/2\sqrt{3} P = 0.86603 P$
P	Spoed	
d_3	Kerndiameter buitendraad	$d_3 = d_1 - H/6 = d - 1.22687 P$
d_0	Diameter spanningsdoorsnede	$d_0 = (d_2 + d_3)/2$
A_s	Spanningsdoorsnede	$A_s = (\pi/4)d_0^2$
φ	Spoedhoek	$\varphi = \text{atan}(P/\pi d_2)$

Tabel 2: Spoed van metrische grof en metrisch fijn schoefdraad volgens ISO 262

Grof	P	Grof	P	Fijn	Fijn
M1	0.25	M12	1.75	M8x1	M30x2
M1.2	0.25	M16	2	M10x1	M36x3
M1.6	0.35	M20	2.5	M10x1.25	M42x3
M2	0.4	M24	3	M12x1.25	M48x3
M2.5	0.45	M30	3.5	M12x1.5	M56x4
M3	0.5	M36	4	M16x1.5	M64x4
M4	0.7	M42	4.5	M20x1.5	
M5	0.8	M48	5	M20x2	
M6	1	M56	5.5	M24x2	
M8	1.25	M64	6		
M10	1.5				

Mechanische eigenschappen: De mechanische eigenschappen van bouten, schroeven en tapeinden vervaardigd van koolstofstaal en gelegeerd staal zijn beschreven in ISO 898-1, voor moeren in ISO 898-2, voor roestvaststaal ISO 3506. In deze normen staan ook de proefbelastingen, de hardheid en de mechanische eigenschappen bij verhoogde temperatuur beschreven.

Tabel 3: Selectie van mechanische eigenschappen volgens ISO 891-1

sterkteklasse		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
R _m	nom	300	400	400	500	500	600	800	900	1000	1200
	min	330	400	420	500	520	600	800	900	1040	1220
	max	400	500	600	700	700	800	1000	1000	1200	1400
R _{eL}	min	190	240	340	300	420	480	-	-	-	-
R _{p0.2}	min	-	-	-	-	-	-	640	720	940	1100
breukrek %		25	22	-	20	-	-	12	10	9	8
HB	min	90	114	124	147	152	181	238	276	304	366
HRB	min	52	67	71	79	82	89	-	-	-	-
HRC	min	-	-	-	-	-	-	22	28	32	39

De sterkteklasse 8.8 en hoger vertonen geen duidelijke vloeigrens R_{eL} zodat de 0.2%-rekgrens is gemeten. In het vervolg wordt als algemene notatie R_{p0.2} gehanteerd.

In de werktuigbouw is de sterkteklasse 8.8 en hoger het meest toegepast. De effectieve treksterkte van een schroef met sterkteklasse 8.8 mag volgens ISO 891 liggen tussen de 800 en 1000 MPa. Hierdoor zal de 0.2%-rekgrens wanneer deze 80% van de treksterkte bedraagt liggen tussen 640 en 800 MPa.

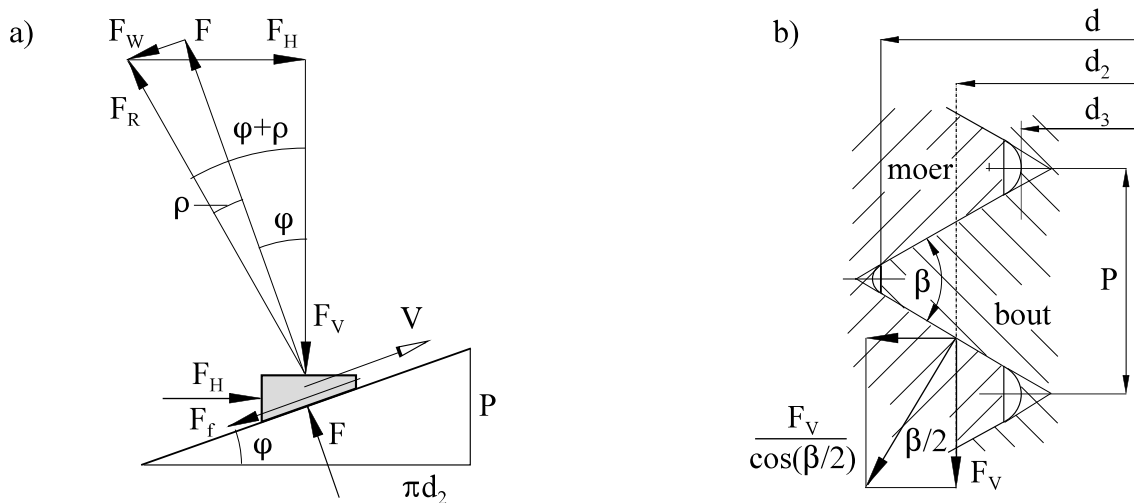
Aanhaalmoment: Het aanhaalmoment (M_A) is de som van het schroefmoment (M_G) en het wrijvingsmoment in het draagvlak van de moer (M_{WD}).

Draagvlakwrijvingsmoment (M_{WD}): De effectieve diameter d_k waarop het draagvlakwrijvingsmoment M_{WD} aangrijpt kan worden benaderd door $d_k=(d_w+d_h)/2$ waarin d_w en d_h de buitendiameter respectievelijk de binnendiameter is van het draagvlak. Voor zeskantbouten en cilinderschroeven wordt deze benaderd met $d_k=1.3d$ waarin d de buitendiameter van de schroefdraad is. Met de voorspankracht F_V volgt voor het draagvlakwrijvingsmoment:

$$M_{WD} = \mu_k F_V \frac{1.3d}{2} \quad (1.1)$$

Schroefmoment (M_G): Tijdens het aanhalen van de schroefverbinding werkt er op de schroefdraadflank naast de voorspankracht F_V een omtrekskracht F_H volgens $M_G=F_H d_2/2$ (Figuur 1.3a). De resultante van de omtrekskracht F_H en de voorspankracht F_V maken evenwicht met de normaalkracht F en de wrijvingskracht F_w .

Uit de krachtendriehoek volgt voor de benodigde omtrekskracht tijdens het aanhalen $F_H=F_V \cdot \tan(\varphi+\rho)$. Hierin is φ de spoedhoek van de schroefdraad en ρ is de wrijvingshoek die samenhangt met de wrijvingscoëfficiënt μ volgens $\mu=\tan\rho$.



Figuur 1.3 Krachten die op de schroefdraad werken.

Uit figuur 1.3b blijkt dat de voorspankracht F_V als gevolg van de tophoek van de schroefdraad resulteert in een normaalkracht $F_V/\cos(\beta/2)$. De wrijvingskracht F_w die volgt uit het product van de wrijvingscoëfficiënt μ en de normaalkracht $F_V/\cos(\beta/2)$ kan geschreven worden als $F_w = \mu' F_V$ waarin $\mu' = \mu/\cos(\beta/2) = \tan \rho'$. Met de standaard tophoek van metrische schroefdraad $\beta=60^\circ$ volgt $\mu'/\mu=1/\cos(\beta/2)\approx 1.15$. Hieruit blijkt dat de effectieve wrijvingskracht door de tophoek van 60° circa 15% hoger is dan met een rechthoekige schroefdraad het geval zou zijn.

Invullen van $F_H = F_V \cdot \tan(\varphi + \rho')$ en $\rho' = \arctan(\mu / \cos(\beta/2))$ in $M_G = F_H \cdot d_2/2$ levert het benodigde aanhaalmoment in de schroefdraad:

$$M_G = F_V \frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \rho') \quad (1.2)$$

Bij het losdraaien keert de wrijvingskracht van richting om zodat

$$M_G = F_V \frac{d_2}{2} \tan(\varphi - \rho') \quad (1.3)$$

De schroefdraad is zelf remmend als $\rho' > \varphi$. Het moment M_G is dan negatief wat betekent dat deze in tegengestelde richting moet worden aangebracht om de schroefverbinding los te draaien. Uit (1.3) blijkt dat metrisch fijn schroefdraad als gevolg van een kleinere spoedhoek φ meer zelf remmend is. Dit is vooral van belang in auto's, vliegtuigen en andere toepassingen waarbij het lostrillen van de schroefverbinding moet worden voorkomen. Verder wordt metrisch fijn schroefdraad toegepast wanneer de wanddikte of de dragende schroefdraadlengte kritisch is.

Maximum aanhaalmoment: Bij het aanhalen van de schroefverbinding ontstaat als gevolg van de voorspankracht F_V en het aanhaalmoment M_G een gecombineerde trek- en torsiespanning in de spanningsdoorsnede van de schroefdraad. Deze gecombineerde spanning is in een (gelijkwaardige) equivalente trekspanning om te zetten. De equivalente spanning σ_e mag de rekgrens $R_{p0.2}$ niet overschrijden. Afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt en de daarmee samenhangende torsiespanning is de maximum voorspankracht F_{VM} circa 15% beperkt ($F_{VM} < 0.85 F_{0.2}$). De torsiespanning blijkt na het aanhalen van de schroefverbinding door zetting te relaxeren waardoor deze volledig beschikbaar komt voor de externe bedrijfsbelasting.

In de hypothese voor vormveranderingsenergie (VEH) wordt gesteld dat voor ductiele (taaie) materialen zoals staal de equivalente trekspanning volgt uit de gecombineerde trek- en torsiespanning volgens $\sigma_e^2 = \sigma^2 + 3\tau^2$. Invullen van $\sigma = F_V/A_s$ en $\tau = M_G/W_w$ resulteert in:

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\frac{F_V}{A_s}\right)^2 + 3\left(\frac{M_G}{W_w}\right)^2} \quad (1.4)$$

Hierin is W_w het weerstandsmoment tegen wringing $W_w = (\pi/16)d_3^3$ en M_G is een functie van F_V volgens (1.3). Omdat F_V in beide termen onder het wortelteken in het kwadraat voorkomt kan deze eenvoudig buiten het wortelteken worden gebracht. Om plastische deformatie tijdens het aanhalen te voorkomen mag de equivalente spanning de rekgrens niet overschrijden. Voor statische belaste schroefverbindingen wordt de voorspanning F_V vaak zo gekozen dat tijdens het aanhalen de spanning σ_e maximaal 90% van de rekgrens bedraagt, ofwel $\sigma_e = 0.9 R_{p0.2}$.

CASE 1.1: Ontwerp van een statisch belaste schroefverbinding.**Berekening van het aanhaalmoment om een schroefverbinding voor te spannen.**

Probleem: Een M12-8.8 schroefverbinding moet worden aangehaald met een voorspankracht van $0.6 A_s R_{p0.2} = 32 \text{ kN}$. Bereken het benodigde aanhaalmoment en controleer of de optredende gecombineerde trek- torsiespanning tijdens aanhalen toelaatbaar is.

Gegeven: Voor een geoliede schroefverbinding wordt een wrijvingscoëfficiënt aangenomen van $\mu=0.15\pm 0.05$ (met speciaalsmeermiddelen 0.12 ± 0.02 , droog 0.35 ± 0.15).

Oplossing: De spanningsdoorsnede volgt uit: $A_s=(\pi/4)d_0^2$ waarin $d_0=(d_2+d_3)/2$, $d_2=d-0.649519P$, $d_3=d-1.226869P$ en $P=1.75\text{mm}$. Dit levert $A_s=84.26\text{mm}^2$. De rekgrens bedraagt $0.8 \cdot 800=640\text{MPa}$. De voorspankracht bedraagt $F_V=0.6 \cdot R_{p0.2} \cdot A_s = 32\text{kN}$. Invullen van $\beta=60^\circ$, $\mu=0.15$ levert voor het aanhaalmoment in de schroefdraad $M_G=40\text{Nm}$. Met $\mu=0.15$ volgt voor het draagvlakwrijvingsmoment $M_{WD}=38\text{Nm}$. Voor het aanhaalmoment volgt $M_A=M_G + M_{WD} = 78\text{Nm}$.

Het schroefmoment M_G resulteert in een torsiespanning $\tau=M_G/W_w=212\text{MPa}$. Met de trekspanning $0.6R_{p0.2}=384\text{MPa}$ volgt voor de gecombineerde trek en torsie spanning $\sigma_e=(\sigma_t+3\tau^2)^{1/2}=531\text{MPa}$. Aangezien de equivalente spanning lager is dan $R_{p0.2}$ zal er tijdens het aanhalen nog geen plastische deformatie optreden.

Invullen van $\sigma_e=R_{p0.2}$ in (1.4) resulteert in de maximum voorspankracht van $F_{VM}=39\text{kN}$ en een maximum aanhaalmoment van $M_A=94\text{Nm}$. Dit is het aanhaalmoment waarbij nog net geen plastische deformatie optreedt. De maximum voorspankracht die met de schroefverbinding kan worden ingesteld blijkt als gevolg van de torsiespanning circa 17% lager uit te komen.

Zonder wrijving ($\mu=0$) blijkt het schroefmoment $M_G=9\text{Nm}$, berekend met $M_G=F_H \cdot d_2/2$ waarin $F_H=F_V \cdot \tan(\varphi)$. Dit betekent dat 88% van het aanhaalmoment een gevolg is van wrijving. Een variatie in de wrijvingscoëfficiënt van 0.15 ± 0.05 kan hierdoor in een 30% hogere of lagere voorspanning resulteren dan bedoeld! Met de lagere wrijvingscoëfficiënt, lager dan in de berekening aangenomen, zal tijdens het aanhalen overwacht plastische deformatie of breuk kunnen ontstaan. Andersom, met de hogere wrijvingscoëfficiënt, zal de gerealiseerde voorspankracht lager zijn dan verwacht waardoor de schroefverbinding tijdens bedrijf los kan raken, vaak veroorzaakt door trillingen. Een constante gecontroleerde wrijvingscoëfficiënt gedurende het aanhalen blijkt zeer essentieel om een betrouwbare schroefverbinding te realiseren.

CALCULATOR 1.1

← **AANHAALMOMENT VOORSPANBOUT**

voorgeschreven trekspanning ¹⁾

Metrische draad : M12 8.8
voorgeschreven trekspanning : $\sigma_t = 0.6 \times R_{p0.2}$
draad-wrijvingscoëfficiënt : $\mu_{thread} =$ 0.15
draagvlak-wrijvingscoëfficiënt : $\mu_{head} =$ 0.15

spoed P	i	1.75	mm
flankdiameter d_2	i	10.863	mm
kern diameter d_3	i	9.853	mm
spanningsdoorsnede $A_t = \pi/4 d_0^2$; $d_0 = (d_2 + d_3)/2$	i	84.26	mm ²
treksterkte R_m		800	MPa
rekgrens $R_{p0.2}$		640	MPa
trekspanning $\sigma_t = \sigma'_t \times R_{p0.2}$		384	MPa
torsie spanning $\tau = M_G/W_p$; $W_p = \pi/16 d_3^3$		211.9	MPa
equivalente spanning $\sigma_e = (\sigma_t^2 + 3\tau^2)^{1/2}$		531.2	MPa
draadwrijvingsmoment aanhalen M_G		39.806364	Nm
draadwrijvingsmoment lossen M_G		-21.23975	Nm
draagvlakwrijvingsmoment M_{wD}		37.858097	Nm
aanhaalmoment $M_A = M_G + M_{wD}$		77.664462	Nm
voorspankracht F_i		32.357347	kN

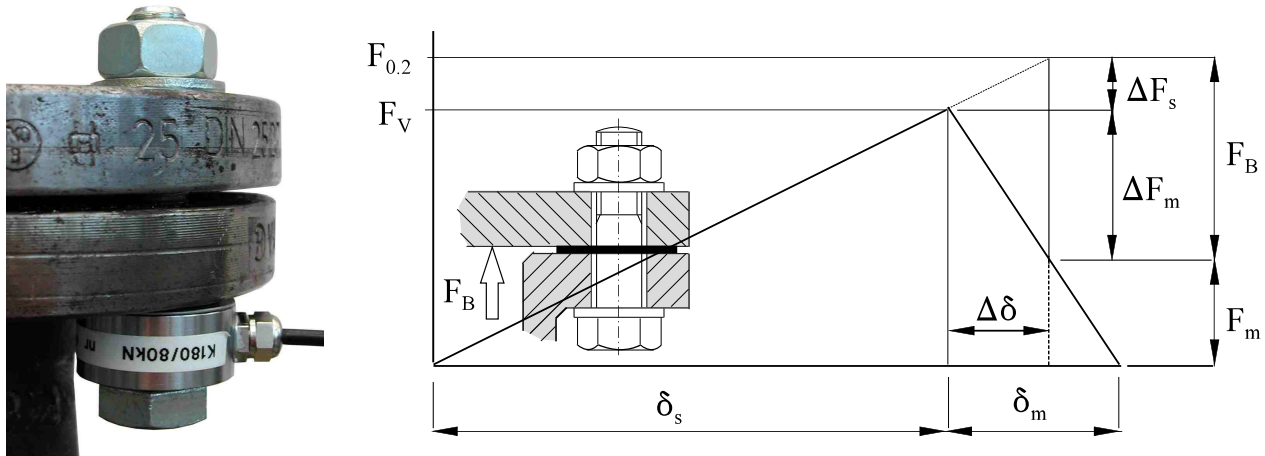
← **VOORSPANBOUT**

voorgeschreven trekspanning ¹⁾

Metrische draad : M12 8.8
voorgeschreven trekspanning : $\sigma_e = 1.0 \times R_{p0.2}$
draad-wrijvingscoëfficiënt : $\mu_{thread} =$ 0.15
draagvlak-wrijvingscoëfficiënt : $\mu_{head} =$ 0.15

spoed P	i	1.75	mm
flankdiameter d_2	i	10.863	mm
kern diameter d_3	i	9.853	mm
spanningsdoorsnede $A_t = \pi/4 d_0^2$; $d_0 = (d_2 + d_3)/2$	i	84.26	mm ²
treksterkte R_m		800	MPa
rekgrens $R_{p0.2}$		640	MPa
trekspanning $\sigma_t = \sigma'_t \times R_{p0.2}$		640	MPa
torsie spanning $\tau = M_G/W_p$; $W_p = \pi/16 d_3^3$		255.3	MPa
equivalente spanning $\sigma_e = (\sigma_t^2 + 3\tau^2)^{1/2}$		462.6	MPa
draadwrijvingsmoment aanhalen M_G		47.956001	Nm
draadwrijvingsmoment lossen M_G		-25.58821	Nm
draagvlakwrijvingsmoment M_{wD}		45.608860	Nm
aanhaalmoment $M_A = M_G + M_{wD}$		93.564862	Nm
voorspanning F_i		38.981932	kN

Bedrijfslast: In de schroefverbinding weergegeven in Figuur 1.4 links ontstaat tijdens bedrijf een hogere belasting op de bouten als gevolg van een bedrijfslast F_B . De bouten en de ingeklemde delen zijn op te vatten als elastische veren. Als gevolg van de bedrijfsbelasting F_B zal de rek in de bouten toenemen waarbij de kracht op de ingeklemde delen afneemt.



Figuur 1.4 Kracht-rek relatie van een bout en een ingeklemd deel voorgespannen met kracht F_V

De lijn met helling $dF/d\delta_s$ representeert de stijfheid van de bout die rekt als gevolg van de voorspankracht F_V . De helling $-dF/d\delta_m$ representeert de stijfheid van de ingeklemde delen die worden samengedrukt door de voorspankracht F_V . Een door de bedrijfslast additionele trekkracht in de bouten ΔF_s en de daarbij optredende boutrek $\Delta\delta$ wordt direct gevolgd door een even grote relaxatie van de ingeklemde delen waarbij de voorspankracht op de ingeklemde delen afneemt met ΔF_m . De bedrijfslast F_B is de som van ΔF_m en ΔF_s , F_m is de resterende voorspankracht op de ingeklemde delen. Merk op dat slechts een klein deel van de bedrijfslast F_B wordt opgenomen door de bout. Met een veel voorkomende axiale stijfheid van de ingeklemde delen drie maal zo groot als de stijfheid van de bout volgt dat slechts een vierde deel van de bedrijfslast door de bout wordt opgenomen. Deze relatie blijft gehandhaafd zolang er een voorspankracht F_m op de ingeklemde delen overblijft. Vandaar dat in het algemeen hoge voorspankrachten worden toegepast die vrijkomen wanneer tijdens bedrijf de kracht op de bout toeneemt.

Optimale voorspankracht: De optimale voorspankracht waarbij de boutspanning de 0.2%-rekgrens bereikt op het moment dat de klemkracht verloren gaat wordt bereikt wanneer $F_B = \Delta F_m + \Delta F_s = F_{0.2}$. Uit gelijkvormigheidbeschouwingen van de driehoeken in Figuur 1.4 volgt dat aan deze voorwaarde wordt voldaan wanneer:

$$\frac{F_V}{F_{0.2}} = \frac{c'}{1 + c'} \quad (1.5)$$

Hierin is c' de stijfheidsverhouding tussen die van het ingeklemde materiaal en de schroef. Met een veel voorkomende stijfheidsverhouding van $c'=3$ resulteert dit in een optimale voorspankracht van $F_V/F_{0.2}=0.75$. Bij een hogere voorspankracht zal de bout eerder plastisch deformeren dan dat de klemkracht verloren gaat terwijl bij een lagere voorspankracht de klemkracht eerder verloren zal gaan dan dat de boutspanning hoger wordt dan de 0.2%-rekgrens.

CASE 1.2: Ontwerp van een statisch belaste schroefverbinding. Berekening van de maximale bedrijfslast.

Probleem: Een M12-8.8 schroefverbinding is aangehaald met een voorspankracht van $0.6 A_s R_{p0.2} = 32 \text{ kN}$. Bereken de stijfheid van de bout, het ingeklemde staal en tenslotte de maximale bedrijfsbelasting die na montage kan worden opgenomen.

Gegeven: De hoogte van het ingeklemde staal bedraagt $2d$. Ga uit van een veel voorkomende stijfheid van het ingeklemde materiaal van een doorsteekschroefverbinding die drie maal zo groot is als de stijfheid van de bout.

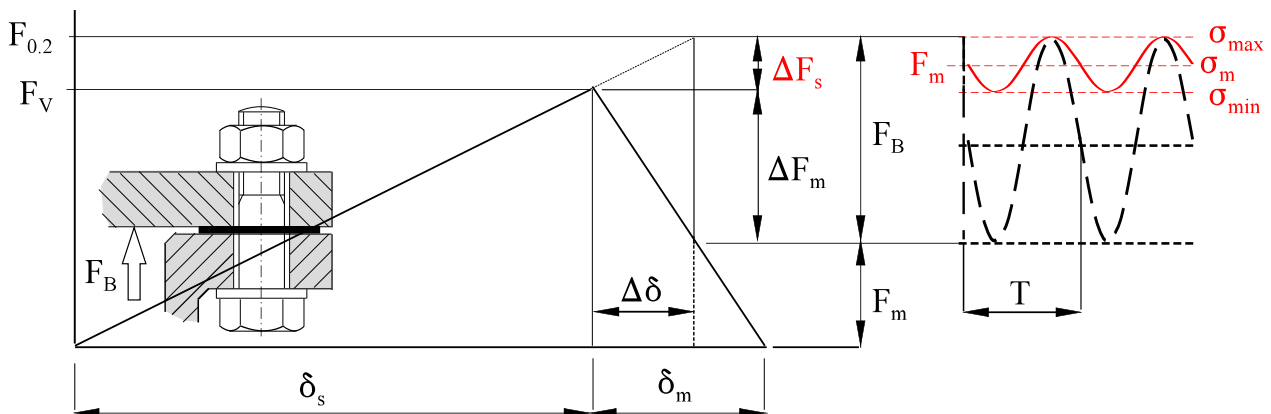
Oplossing: De rek van de bout volgt uit de wet van Hooke, die voor een lineair elastisch materiaal de relatie beschrijft tussen de trekspanning σ , de rek $\epsilon = \Delta L/L$ en de elasticiteitsmodulus E volgens $\sigma = E\epsilon$. Invullen van $\sigma = F/A$ levert $\Delta L = FL/(AE)$. De stijfheid wordt beschreven met $c = F/\Delta L$. Hieruit volgt voor de stijfheid van de bout $c = AE/L$. Invullen van $A = A_s = 84.26 \text{ mm}^2$, $E = 210 \text{ GPa}$ en $L = 2d$ resulteert in een stijfheid van de bout van $c = 0.74 \cdot 10^9 \text{ N/m}$. Bij de nominale voorspanning F_V is de verlenging van de bout $\Delta L = F_V/c = 0.04 \text{ mm}$, de relatieve rek $\Delta L/L = 0.17\%$.

De maximale waarde van $\Delta F_s = 0.4 A_s R_{p0.2} = 21 \text{ kN}$ terwijl de maximale waarde van $\Delta F_m = F_V = 32 \text{ kN}$. Uit de stijfheidsverhouding volgt dat de afname van de klemspanning ΔF_m drie maal zo groot is als de toename van de kracht in de bout. Aangezien $\Delta F_m < 3F_s$ zal de klemkracht eerder verloren gaan dan dat de trekspanning in de bout de 0.2%-rekgrens bereikt. Indien de schroefverbinding niet los mag komen ($F_m > 0$) dan volgt de maximum bedrijfslast uit $F_B = \Delta F_s + \Delta F_m$ waarin ΔF_s beperkt blijft tot $\Delta F_m/3$ zodat $F_B = 4/3 F_m = 43 \text{ kN}$.

CALCULATOR 1.2

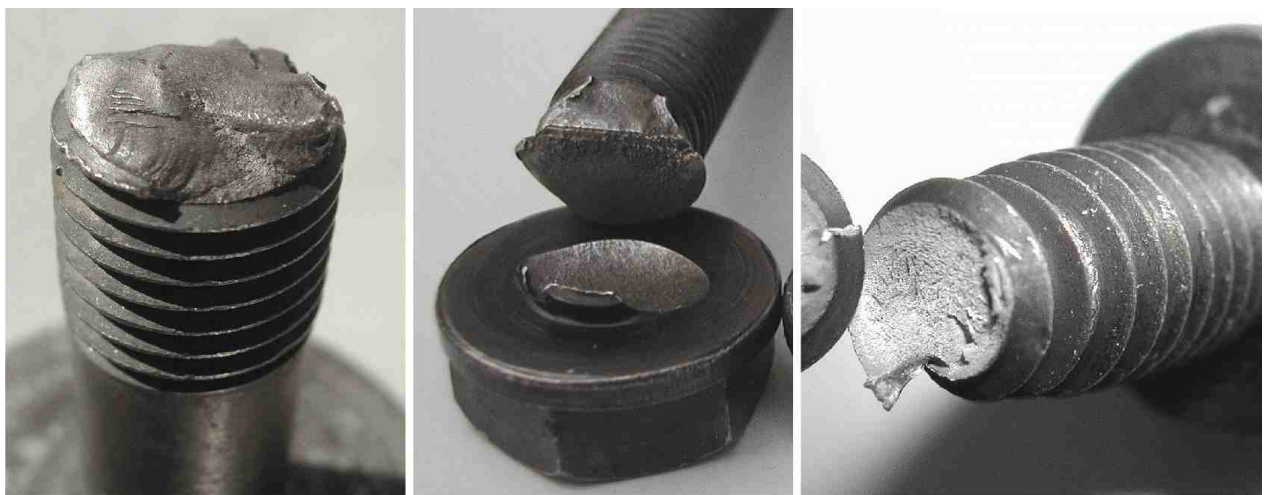
Metrische schroefdraad :	M12	8.8
voorspanning : $\sigma_t =$	0.6	$\times R_{p0.2}$
Stijfheidsverhouding : $\delta_b / \delta_m =$	3	
<input type="button" value="Solve"/> <input type="button" value="Reset"/>		
spanningsdoorsnede $A_t = \pi/4 d_0^2$; $d_0 = (d_2 + d_3)/2$	84.26	mm ²
treksterkte R_m	800	MPa
rekgrens $R_{p0.2}$	640	MPa
voorspanning $\sigma_t = \sigma'_t \times R_{p0.2}$	384	MPa
maximum voorspankracht $F_{0.2} = R_{p0.2} \times A_t$	53.9	kN
voorspankracht $F_V = \sigma_t \times A_t$	32.4	kN
belastingpartitie ΔF_V	10.8	kN
belastingpartitie ΔF_m	32.4	kN
Maximum bedrijfslast $F_B = \Delta F_V + \Delta F_m$	43.1	kN

Dynamische belasting: Een zuivere zwelbelasting tijdens bedrijf op de schroefverbinding uitgeoefend variërende tussen 0 en F_B resulteert in een zwelbelasting op de bouten die varieert tussen F_V en $F_V + \Delta F_s$. De gemiddelde belasting op de bouten F_m en de amplitude van de belasting op de bouten F_A bedraagt dan $F_m = F_V + \Delta F_s / 2$ respectievelijk $F_A = \Delta F_s / 2$. De statische sterkte moet voldoende zijn om de piekwaarde van de maximale belasting op te nemen zodanig dat de maximale spanning beneden de 0.2%-rekgrens blijft. Daarnaast moet de vermoeiingsterkte voldoende moet zijn om de belastingamplitude duurzaam op te nemen.



Figuur 1.5 Een zwelbelasting $f(t)$ op de schroefverbinding resulteert in een sterk lagere zwelbelasting op de voorgespannen bouten.

Vermoeiingssterkte: Een bout dynamisch belast op trek kan na een aantal belastingwisselingen plotseling breken ondanks dat de optredende spanningen lager zijn dan de 0.2%-rekgrens van het materiaal.



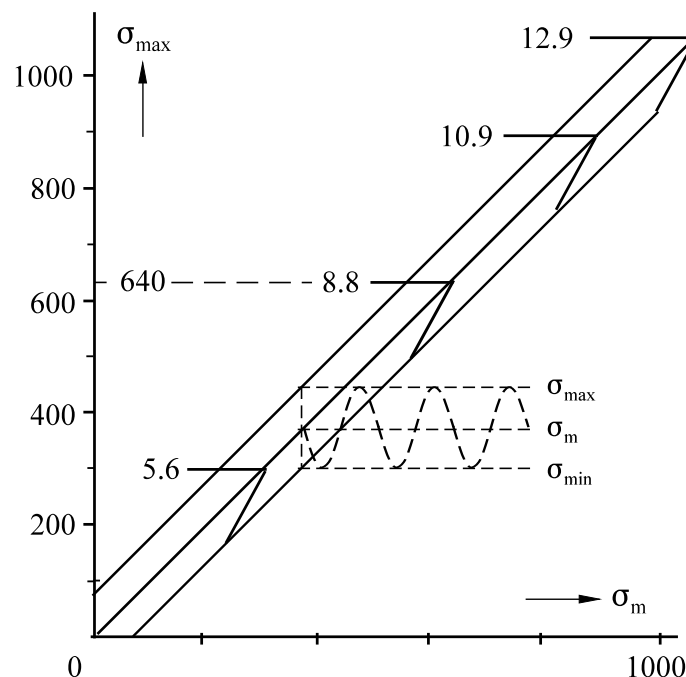
Figuur 1.6 Vermoeiingsbreuk versus geweldbreuk.

De relatie tussen het aantal belastingwisselingen dat kan worden weerstaan afhankelijk van het spanningsniveau volgt uit experimenteel onderzoek uitgevoerd onder genormaliseerde omstandigheden en wordt beschreven door een zogenaamde Wöhlerkromme. Bij voldoende lage spanning bereikt de Wöhlerkromme een asymptotische waarde voor de spanning waarbij geen

vermoeiingsbreuk meer te verwachten is. Deze asymptotische waarde van de spanning waarbij geen vermoeiingsbreuk meer optreedt wordt aangeduid met de vermoeiingssterkte van een materiaal. Voor staal ligt deze bij circa 10^7 belastingwisselingen.

Vermoeiingstrerktediagrammen (VSD): Een Wöhlerkromme kan worden gebruikt indien de belasting condities waaronder deze is bepaald overeen komt met de bedrijfscondities. Denk hierbij aan de gemiddelde belasting en de amplitude. Uit grote verzamelingen Wöhlerkrommen zijn meer algemeen bruikbare VSD's ontwikkeld waaruit de vermoeiingssterkte kan worden afgeleid, met andere woorden de gemiddelde spanning en de daarbij toelaatbare spanningsamplitude die duurzaam kan worden opgenomen.

VSD volgens Smith: In figuur 2.40 is het zogenaamde Smith diagram gegeven van op trek belaste bouten. In het Smith diagram is langs de horizontale as de gemiddelde spanning uitgezet, langs de verticale as is de maximum en minimum waarde van de spanning uitgezet. De horizontale lijn waarmee de maximum spanning wordt begrensd is de 0.2 rekgrens van het materiaal. Ter plaatse van het snijpunt van de σ_{\min} lijn met de x-as kan de maximum toelaatbare zuivere zwelspanning van circa 150MPa worden afgelezen. De spanningsamplitude blijkt begrensd tot circa 75MPa, onafhankelijk van de sterkte klasse van de bout.



Figuur 1.7 Smith-diagram van dynamisch belaste bouten volgens Bauwer en Schaurte, 1983.

CASE 1.3: Ontwerp van een dynamisch belaste schroefverbinding. Berekening van de vermoeiingssterkte.

Probleem: Een M12-8.8 schroefverbinding is aangehaald met een voorspankracht van $0.6 A_s R_{p0.2} = 32.4$ kN. Controleer de toelaatbare dynamische bedrijfsbelasting.

Gegeven: Ga uit van een veel voorkomende stijfheid van het ingeklemde materiaal van een doorsteekschroefverbinding die drie maal zo groot is als de stijfheid van de bout.

Oplossing: Uit het Smith-diagram voor schroefverbindingen volgt dat de spanningsamplitude die duurzaam kan worden opgenomen $\sigma_a = 75$ MPa bedraagt. Dit komt overeen met een zwelbelasting die door de bouten kunnen worden opgenomen van $\Delta F_s = 2\sigma_a A_s = 12.6$ kN. Bij voldoende klemkracht zou als gevolg van ΔF_s de klemkracht afnemen met $\Delta F_m = 3\Delta F_s = 37.8$ kN. Aangezien de klemkracht slechts 32.4 kN bedraagt levert deze een beperking aan de toelaatbare bedrijfslast. Dit betekent dat de vermoeiingssterkte geen beperking oplevert voor de belastbaarheid. De bedrijfslast die duurzaam kan worden opgenomen is in dit geval gelijk aan die bij een statisch belaste schroefverbinding $F_B = \Delta F_s + \Delta F_m = 4/3 F_V = 43$ kN.

CALCULATOR 1.3

Bereken de vermoeiingssterkte F_B

Metrische schroefdraad : M12 - 8.8

voorspanning : $\sigma_t =$ 0.6 $\times R_{p0.2}$

Stijfheidsverhouding : $\delta_b / \delta_m =$ 3

max. spanningsamplitude: $\sigma_a =$ 75 MPa

spanningsdoorsnede $A_t = \pi/4 d_0^2$; $d_0 = (d_2 + d_3)/2$	84.26	mm ²
treksterkte R_m	800	MPa
rekgrens $R_{p0.2}$	640	MPa
voorspanning $\sigma_t = \sigma'_t \times R_{p0.2}$	384	MPa
maximum voorspankracht $F_{0.2} = R_{p0.2} \times A_t$	53.9	kN
voorspankracht $F_V = \sigma_t \times A_t$	32.4	kN
reststerkte bout $\Delta F_s = F_{0.2} - F_V$	21.6	kN
vermoeiingssterkte bout $\Delta F_s = 2 \times \sigma_a \times A_t$	12.6	kN
belastingpartitie ΔF_s	10.8	kN
belastingpartitie ΔF_m	32.4	kN
Maximum dynamische belasting $F_B = \Delta F_V + \Delta F_m$	43.1	kN

Schroefdraadafschuifsterkte: Een betrouwbare schroefverbinding wordt in het algemeen zodanig ontworpen dat de schroef eerder breekt dan dat de schroefdraad zal afschuiven. In een ontwerpberekening wordt daarom in eerste instantie de grootte van de schroef berekend en vervolgens de afschuifsterkte gecontroleerd. Wanneer de schroefverbinding bestaat uit een schroef en een moer van dezelfde sterkteklasse dan is controle van de afschuifsterkte overbodig omdat de moerhoogte ($L_e=0.8d$) zodanig gestandaardiseerd is dat de schroef zal bezwijken voordat de schroefdraad afgeschoven wordt. Bij een schroef in combinatie met een lage moer ($0.5d$) zal de uitwendige draad eerder afschuiven dan de schroef zal breken.



Figuur 1.8 Schroefdraadafschuiving opgetreden bij een belasting boven de proefbelasting waaraan de schroefverbinding moet voldoen.

Toelaatbare schuifspanning: In de hypothese voor vormveranderingsenergie (VEH) wordt gesteld dat voor ductiele (taaie) materialen zoals staal de afschuifsterkte kan worden herleid uit de treksterkte volgens $\tau/R_m=0.58$. Dit betekent dat het schroefdraadoppervlak dat afgeschoven wordt moet voldoen aan $A_{th}/A_s > 1/0.58$. Hierin is A_{th} het afschuifoppervlak van de schroefdraad. In de normaalspanningshypothese wordt gesteld dat voor brose materialen de toelaatbare schuifspanning gelijk is aan de treksterkte R_m van het materiaal.

Benodigde schroefdraadlengte: Een goede benadering van het afschuifoppervlak van de buitendraad zou zijn $A_{th}=\pi d_1^{3/4} L_e$. Hierin is L_e de dragende schroefdraadlengte. Zonder rekening te houden met buiging, zetting (radiale verplaatsing binnen de schroefdraadspeling) en de altijd aanwezig toleranties op de schroefdraadafmetingen wordt hiermee echter een te optimistische afschuifsterkte berekend. Een veel gebruikte praktische berekeningsmethode voor de schroefdraadafschuifsterkte wordt beschreven door:

$$F = \tau A_{th}, \quad A_{th} = 0.5 \pi d_0 L_e, \quad d_0 = \frac{d_2 + d_3}{2} \quad (1.6)$$

Berekening van de benodigde moerhoogte levert hiermee $L_e/d=0.74$, iets kleiner dan de standaard $L_e/d=0.8$. Wanneer rekening wordt gehouden met een zeer kleine afschuiving van de draad dan blijkt deze benaderingsformule zeer goed overeen te komen met de proefondervindelijk vastgestelde en gestandaardiseerde moerhoogte. Een nauwkeurig gefabriceerd tapgat zal door de

betere maatvoering van de schroefdraad en de grotere afschuifdiameter (interne draad) in een hogere afschuifsterkte resulteren waardoor een hogere veiligheidsfactor wordt verkregen.

Wanneer de afschuifsterkte van een afwijkend materiaal bekend is kan een voldoende nauwkeurige waarde van de benodigde schroefdraadlengte worden afgeleid van de gestandaardiseerde moerhoogte. Een materiaal met een tweemaal lagere afschuifsterkte vereist dan een effectieve schroefdraadlengte van $2x(0.8d)$. De afschuifsterkte is dan gelijk aan het product van de treksterke R_m en de spanningsdoorsnede A_s van de schroef.

Maximale schroefdraadlengte: In tapgaten aangebracht in een materiaal met een relatief lage sterkte, waarbij de benodigde schroefdraadlengte groter is dan $2d$, bestaat de kans dat de eerste gang van de schroefdraad het eerst zal afschuiven en na elkaar de volgende gangen zullen afschuiven. Dit kan soms uren duren voordat de volledige draad afschuift waardoor de schroefverbinding in orde lijkt na het aanhalen maar tijdens bedrijf alsnog faalt. Dit probleem kan worden ondervangen door het toepassen van een inzetdraad (helicoil).

Koud vreten: Bij gebruik van een relatief zacht materiaal in combinatie met een hoge vlaktedruk bestaat de kans op koud vreten. In het Engels aangeduid met seizure of galling. De oppervlakken lassen onder de heersende hoge vlaktedruk als het ware aan elkaar. Door het toepassen van een helicoil kan een hogere vlaktedruk worden opgenomen voordat vreten ontstaat.

Schroeven van roestvrijstaal hebben een zeer dunne gesloten oxidehuid die tijdens het aandraaien makkelijk beschadigd. De oxidehuid voorkomt zuiver metaal-metaal contact. Bij het beschadigen van de oxidehuid ontstaat metaal - metaal contact met eveneens koud vreten tot gevolg. Speciale smeermiddelen met anti-vreet additieven kunnen galling voorkomen.

CASE 1.4: Ontwerp van een schroefverbinding. Berekening van de schroefdraadafschuifsterkte

Probleem: Bereken de benodigde schroefdraadlengte van een draadgat in een gietstuk van een nodulair gietijzer. De schroefdraadsterkte moet in staat zijn de volledig belasting door te leiden waarbij een M12-10.9 bout bezwijkt.

Gegeven: De tolerantie klasse van de schroefdraadafmetingen van een standaard moer worden verondersteld representatief te zijn voor die van het tapgat. De verhouding tussen de schuifsterkte en de treksterkte van het gietijzer wordt gesteld op $t/s=0.9$, waarin de treksterkte gegeven wordt door $s=500$ MPa.

Oplossing: De verhouding tussen de afschuifsterkte van de bout en het tapgat is $0.58 \cdot 1000 / 0.9 \cdot 500 = 1.3$. Voor de benodigde effectieve schroefdraadlengte volgt $1.3 \cdot 0.8d = 12.4$ mm. Toepassing van de vuistformule resulteert in een effectieve schroefdraadlengte van $L_0=11.5$ mm.

CALCULATOR 1.4

SCHROEFDRAADAFSCHUIFSTERKTE		
Uitwendige draad schroef:		
Schroefdraad - staalkwaliteit	M12	10.9
Verhouding afschuifsterkte/ treksterkte	0.580	
Inwendige draad tapgat:		
Treksterkte	500	MPa
Verhouding afschuifsterkte / treksterkte	0.9	
<input type="button" value="Solve"/> <input type="button" value="Reset"/>		
spanningsdoorsnede $A_t = \pi/4 d_o^2$; $d_o = (d_2 + d_3)/2$	84.26	mm ²
treksterkte R_m	1000	MPa
0.2% rekgrens $R_{p0.2}$	900	MPa
maximale trekkracht $F_{0.2} = R_{p0.2} \times A_t$	75.8	kN
breeksterkte $F = R_m \times A_t$	84.3	kN
afschuifspanning T	450	MPa
benodigd afschuifoppervlak uitwendige draad $A_{th} = F/T$	187.3	mm ²
Effectieve schroefdraadlengte L_e	12.373333	mm

Woordenlijst Nederlands - Engels

Nederlands	Engels	Nederlands	Engels
aanhaalmoment	tightening torque	overlaplengte draad	engagement length
afschuifsterkte	shear strength	pasbout	reamed bolt
afschuiving draad	stripping	schroefdraad	screw thread
afstandsbus	distance tube	schroevendraaier	screw driver
basis profiel	basic profile	sleutel	wrench
bedrijfslast	external load	spanningsdoorsnede	stress area
bevestigingsdraad	fixing thread	spoed	pitch
bewegingsdraad	power thread	steel	shank of the bolt
bout	bolt	stelschroef	set screw
buitendiameter	major diameter	tapeind	stud bolt
contraoer	lock nut	trapezium draad	Acme thread
dopsleutel	socket wrench	treksterkte	tensile strength
elasticiteitsgrens	elastic limit	vermoeiing	fatigue
flankdiameter	pitch diameter	vleugelmoer	fly nut
hellingshoek	helix angle	vloeigrens	yield strength
kerndiameter d1	minor diameter	voorspankracht	preload
kerndiameter d3	root diameter	zeskante kop	hexagon head
klemkracht	clamping force		
kop	head		
metrische draad	metric thread		
moer	nut		
moerhoogte	nut height		
momentsleutel	automatic tension wrench		