



Titel document: Aandrijving en reacties onderbouw
Onderdeel: Industriebrug Haarlem
Documentnummer: VG-01
Projectnummer: 60170162
Fase: Vergunningsontwerp berekeningen

Revisie	Datum	Status	Wijziging
0	21-06-2017	Def.	



INHOUD

INLEIDING	3
1. AFMETINGEN EN GEWICHTEN	4
2. GEOMETRIE AANDRIJVING	6
3. AANDRIJFKRACHTEN TIJDENS BEWEGINGSCYCLUS	8
4. AANDRIJFKRACHTEN BUITEN BEWEGINGSCYCLUS	11
5. HYDRAULISCHE AANDRIJVING	13
6. REACTIES ONDERBOUW	14
BIJLAGE 1 TOETSING HYDRAULISCHE CILINDER	16



INLEIDING

Voor het afleiden van de grootte van aandrijfkrachten, hoofdafmetingen van de aandrijving en reacties naar de onderbouw van de nieuw te bouwen fiets-/voetgangersbrug "Industriebrug" te Haarlem, bevat dit document de daarvoor benodigde berekeningen. Hierbij is uitgegaan van een globaal brugontwerp.

De brug bestaat uit een beweegbaar val, één toren met een enkele priem en een hangstang. De brug wordt via de priem hydraulisch aangedreven met behulp van een cilinder, welke wordt ondergebracht in de toren.



1. AFMETINGEN EN GEWICHTEN

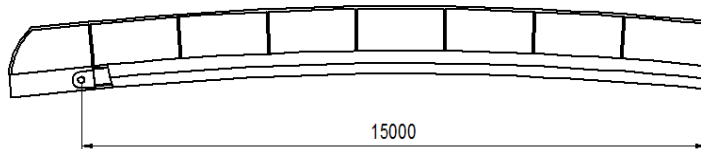
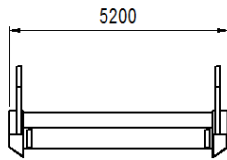
- VAL

Massa val

$$m_{\text{val}} := 22000 \text{ kg}$$

$$g := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$G_v := m_{\text{val}} \cdot g = 220 \text{ kN}$$



Lengte val

$$L_v := 15 \text{ m}$$

Zwaartepunt t.o.v. hoofddraaipunten

$$X_{z,v} := \frac{L_v}{2}$$

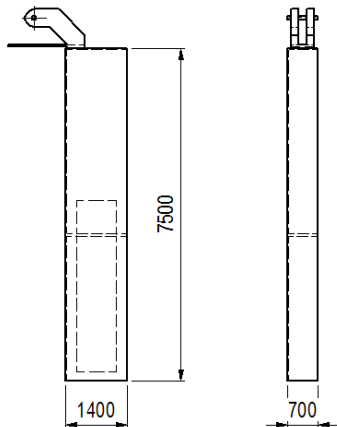
Breedte val

$$B_v := 5.2 \text{ m}$$

Bevestiging hangstang aan val t.o.v. hoofddraaipunten

$$X_{\text{hst}} := 14000 \text{ mm}$$

- TOREN



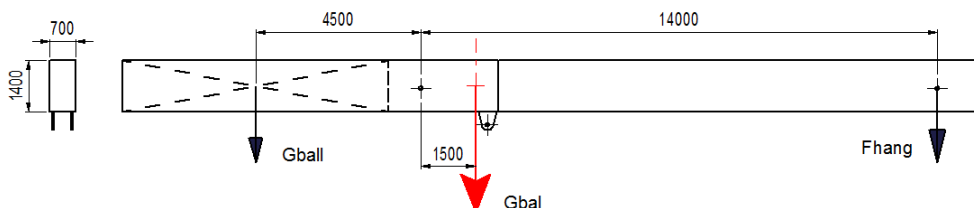
Opgebouwd in principe uit platen met dikte 20 mm.

massa:

$$m_{\text{toren}} := 7000 \text{ kg}$$

$$G_{\text{tor}} := m_{\text{toren}} \cdot g = 70 \text{ kN}$$

- PRIEM



$$X_{\text{bal}} := 1500 \text{ mm}$$

$$X_{\text{ball}} := 4500 \text{ mm}$$

Opgebouwd in principe uit platen 20 en 30 mm dik.

Massa van de balans

$$m_{\text{bal}} := 18000 \text{ kg}$$

$$G_{\text{bal}} := m_{\text{bal}} \cdot g = 180 \text{ kN}$$

Kracht in de hangstang

$$F_{\text{hang}} := \frac{G_v \cdot \frac{1}{2} \cdot L_v}{X_{\text{hst}}} = 118 \text{ kN}$$

Benodigd ballastgewicht (gelijkmatig verdeeld in ruimte achter draaipunt)

$$G_{\text{ball}} := \frac{F_{\text{hang}} \cdot X_{\text{hst}} + G_{\text{bal}} \cdot X_{\text{bal}}}{X_{\text{ball}}} = 427 \text{ kN}$$

**- CILINDER**

$D_{\text{zuigerstang}} := 150 \text{ mm}$

$D_{\text{zuiger}} := 250 \text{ mm}$

Manteldiameter: $D_{\text{mantel}} := 300 \text{ mm}$

Ringoppervlak $A_{\text{ring}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{zuiger}}^2 - D_{\text{zuigerstang}}^2)$

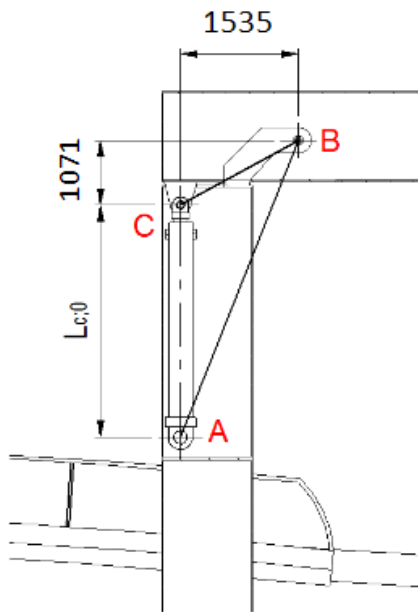
Zuigeroppervlak $A_{\text{zuiger}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{zuiger}}^2$

Zie hoofdstuk 2 voor verdere details van de cilinder.



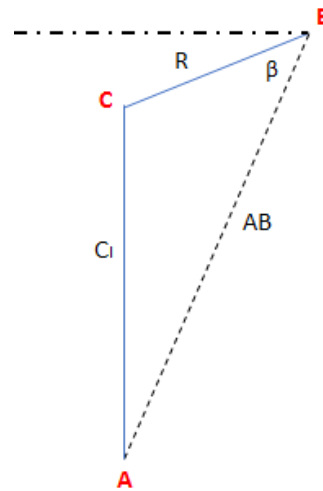
2. GEOMETRIE AANDRIJVING

Brug gesloten:



Bijbehorende geometrie:

$$L_{c;0} := 3585 \text{ mm}$$



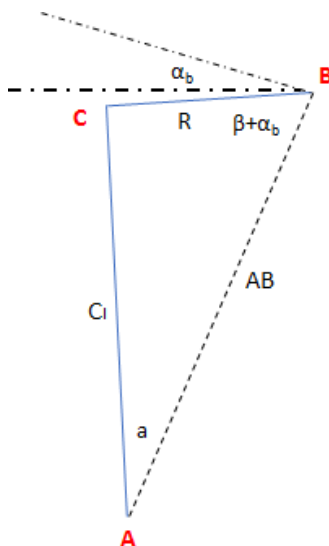
$$AB := \sqrt{\left(\frac{L_{c;0}}{\text{mm}} + 1071\right)^2 + 1535^2} \cdot \text{mm} = 4903 \text{ mm}$$

$$R := \sqrt{1071^2 + 1535^2} \text{ mm} = 1872 \text{ mm}$$

De cilinderlengte bij dichte brug: $L_{c;0} := 3585 \text{ mm}$

$$\beta := \arccos\left(\frac{AB^2 + R^2 - L_{c;0}^2}{2 \cdot AB \cdot R}\right) = 36.85^\circ$$

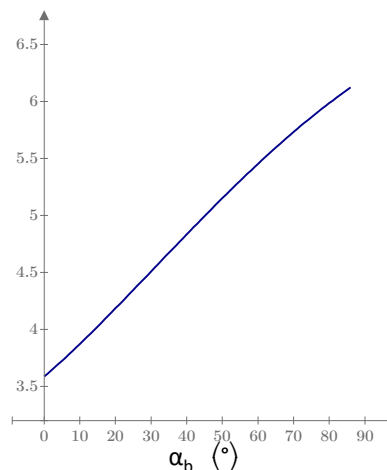
Geometrie bij openingshoek van de brug α_b :



De lengte van de cilinder als functie van de openingshoek van de brug:

$$C_l(\alpha_b) := \sqrt{AB^2 + R^2 - 2 \cdot AB \cdot R \cdot \cos(\beta + \alpha_b)}$$

$$\alpha_b := 0^\circ, 1^\circ \dots 86^\circ$$



$$C_l(\alpha_b) \text{ (m)}$$



Slag:

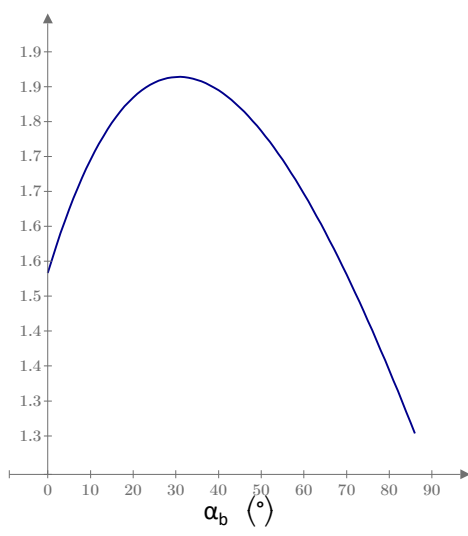
$$S_c := C_l(86^\circ) - C_l(0^\circ) = 2538 \text{ mm}$$

Voor de hoek a geldt:

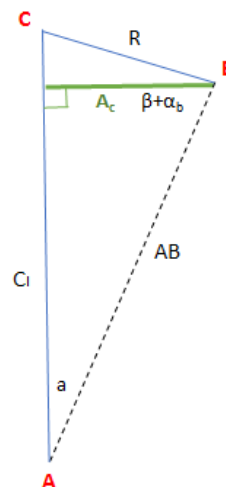
$$a(\alpha_b) := \arccos\left(\frac{AB^2 + C_l(\alpha_b)^2 - R^2}{2 \cdot AB \cdot C_l(\alpha_b)}\right)$$

De momentarm van de cilinderkracht is:

$$A_c(\alpha_b) := AB \cdot \sin(a(\alpha_b))$$



$$A_c(\alpha_b) \text{ (m)}$$





3. AANDRIJFKRACHTEN TIJDENS BEWEGINGSCYCLUS

Onderstaand zijn de op het brugbewegingsmechanisme uitgeoefende krachten afgeleid volgens NEN 6786. Tijdens het bewegen van het val dienen de volgende belastingen op de brug in rekening te worden gebracht:

1. windbelasting;
2. overgewicht;
3. variabel dekgewicht;
4. wrijving;
5. dynamische belasting.

WINDBELASTING

Afstand gemiddelde waterstand tot bovenkant brug $h_0 := 2.34 \text{ m}$

EIS0372: De niet beschikbaarheid van de 'Beweegbare brug' als gevolg van wind dient maximaal drie dagen per jaar te zijn.

Gemiddeld aantal dagen per jaar niet beschikbaar t.g.v. wind $\text{Dagen} := 3$

Windgebied I : 1
II : 2 $\text{Gebied} := 2$
III : 3

Statisch moment van het val $S := L_v \cdot B_v \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot L_v \right) = 585 \text{ m}^3$

$$p_{w;rep} = C_{dim} \cdot C_t \cdot \Phi_w \cdot p_w$$

$$C_{dim} := 0.95 \quad \Phi_w := 1.15$$

$$U_R := \left| \text{vlookup}(\text{Dagen}, U_{R;\text{tabel}}, \text{Gebied}) \right| \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 13.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Voor een niet-beschikbaarheid van 0,5 dagen per jaar:

$$U_{R;0.5} := \left| \text{vlookup}\left(\frac{1}{2}, U_{R;\text{tabel}}, \text{Gebied}\right) \right| \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 15.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

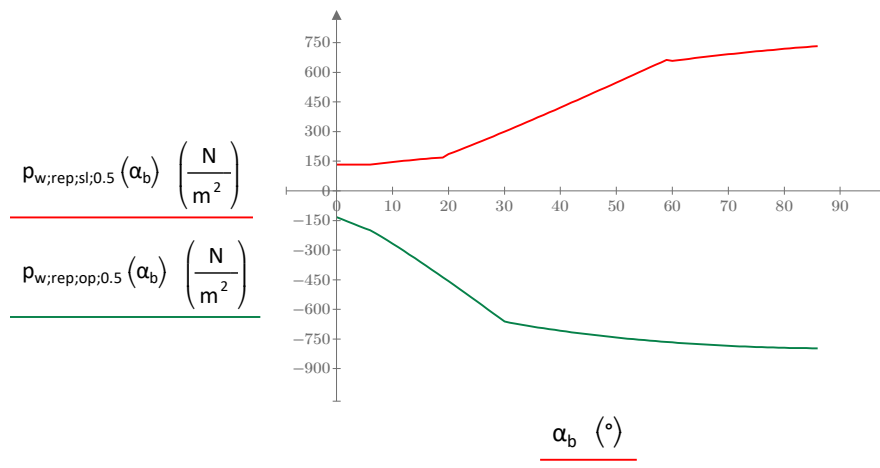
Afstand tussen hoogste punt van het val en de gemiddelde waterstand:

$$h(\alpha_b) := \begin{cases} \text{if } h_0 + L_v \cdot \sin(\alpha_b) < 4 \text{ m} \\ \quad \parallel h \leftarrow 4 \text{ m} \\ \text{else} \\ \quad \parallel h \leftarrow h_0 + L_v \cdot \sin(\alpha_b) \end{cases}$$

$$\text{Door de wind op het val uitgeoefende druk} \quad p_w(\alpha_b, U) := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(U \cdot \frac{\ln\left(\frac{h(\alpha_b)}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ur}}{z_0}\right)} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{h(\alpha_b)}{z_0}\right)} \right)$$



Wind in sluitende richting	$p_{w;rep;sl}(\alpha_b) := C_{dim} \cdot Ct_{sl}(\alpha_b) \cdot \Phi_w \cdot p_w(\alpha_b, U_R)$
Wind in openende richting	$p_{w;rep;op}(\alpha_b) := C_{dim} \cdot Ct_{op}(\alpha_b) \cdot \Phi_w \cdot p_w(\alpha_b, U_R)$
Wind in sluitende richting; 0,5 dagen niet-beschikbaar	$p_{w;rep;sl;0.5}(\alpha_b) := C_{dim} \cdot Ct_{sl}(\alpha_b) \cdot \Phi_w \cdot p_w(\alpha_b, U_{R;0.5})$
Wind in openende richting; 0,5 dagen niet-beschikbaar	$p_{w;rep;op;0.5}(\alpha_b) := C_{dim} \cdot Ct_{op}(\alpha_b) \cdot \Phi_w \cdot p_w(\alpha_b, U_{R;0.5})$
Winddruk als functie van de openingshoek van de brug (voor alleen de 0,5-dagen varianten):	



Cilinderkracht (voor wind in sluitende richting):

- 0,5 dagen niet-beschikbaar: $F_{w;rep;sl;0.5}(\alpha_b) := \frac{p_{w;rep;sl;0.5}(\alpha_b) \cdot S}{A_c(\alpha_b)}$

- overig: $F_{w;rep;sl}(\alpha_b) := \frac{p_{w;rep;sl}(\alpha_b) \cdot S}{A_c(\alpha_b)}$

Cilinderkracht (voor wind in openende richting):

- 0,5 dagen niet-beschikbaar: $F_{w;rep;op;0.5}(\alpha_b) := \frac{p_{w;rep;op;0.5}(\alpha_b) \cdot S}{A_c(\alpha_b)}$

- overig: $F_{w;rep;op}(\alpha_b) := \frac{p_{w;rep;op}(\alpha_b) \cdot S}{A_c(\alpha_b)}$

OVERGEWICHT

Neem aan dat de brug uitgebalanceerd wordt. De vereiste vooroplegkracht wordt gerealiseerd met de aandrijving.

$$F_{OG}(\alpha_b) := 0 \text{ N}$$

VARIABEL DEKGEWICHT

NEN 6786, Artikel 8.2.7 voor een hydraulisch bewogen brug met stalen dek:

$$F_{VDG}(\alpha_b) := \frac{50 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot L_v \cdot B_v \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot L_v\right) \cos(\alpha_b)}{A_c(\alpha_b)} \quad \begin{array}{l} \text{(positief en negatief)} \\ \text{Alleen de positieve waarde wordt beschouwd.} \end{array}$$



WRIJVING

Verwaarloos wrijving.

$$F_{WR}(\alpha_b) := 0 \text{ N}$$

DYNAMISCHE BELASTING

Verwaarloos dynamische belasting.

CILINDERKRACHT OVERBELASTEN

Voor de maximale waarden van de rekenwaarde voor de benodigde cilinderkracht wordt uitgegaan van de Belastingssituatie "Vasthouden in elke stand" volgens Tabel 12a:

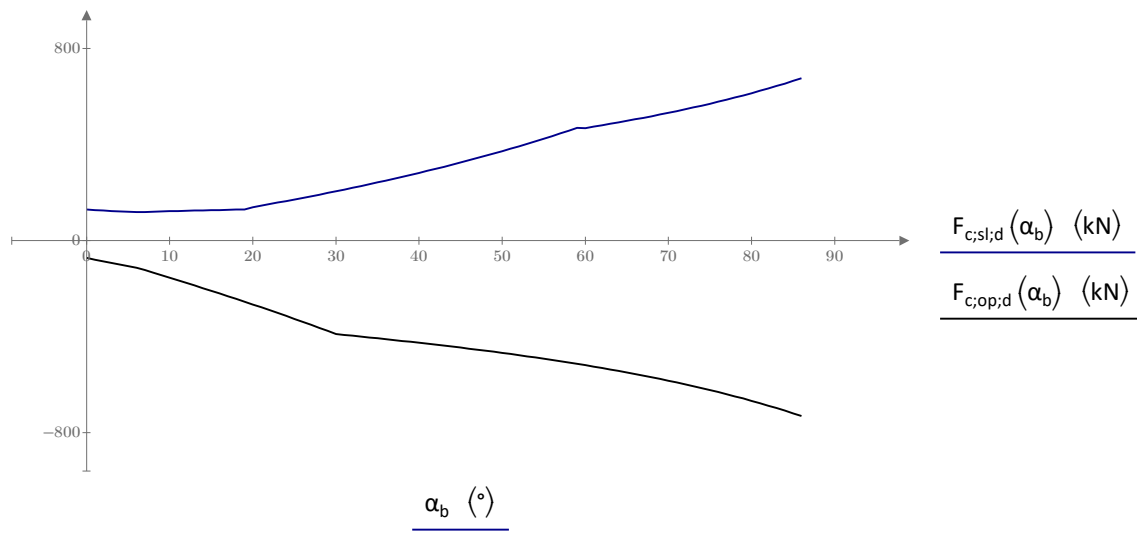
$$\psi := 1.1$$

$$\gamma_w := 1.8$$

$$\gamma_o := 1.5$$

$$\text{Wind in sluitende richting} \quad F_{c;sl;d}(\alpha_b) := \gamma_w \cdot \psi \cdot F_{w;rep;sl;0.5}(\alpha_b) + \gamma_o \cdot F_{VDG}(\alpha_b)$$

$$\text{Wind in openende richting} \quad F_{c;op;d}(\alpha_b) := \gamma_w \cdot \psi \cdot F_{w;rep;op;0.5}(\alpha_b) + \gamma_o \cdot F_{VDG}(\alpha_b)$$



N.B. de invloed van het variabel dekgewicht bij geopend val op de cilinderkracht is verwaarloosbaar.

Maximale krachten:

$$F_{c;max;op;d} := F_{c;op;d}(90^\circ) = -781 \text{ kN}$$

Trekkende cilinder

$$F_{c;max;sl;d} := F_{c;sl;d}(90^\circ) = 725 \text{ kN}$$

Drukkende cilinder



4. AANDRIJFKRACHTEN BUITEN BEWEGINGSCYCLUS

Buitende bewegingssituatie in principe twee situaties:

- Brug gesloten;
- Brug volledig geopend.

In het eerste geval wordt het bewegingsmechanisme belast door het aandrukken van het val met het bewegingsmechanisme.

In het twee geval wordt het bewegingsmechanisme voornamelijk belast door wind op het val.

BRUG GESLOTEN

Neem voor de vooroplegkracht

$$F_{VO} := 20 \text{ kN}$$

De benodigde cilinderkracht is dan

$$F_{c;VO;rep} := \frac{F_{VO} \cdot L_v}{A_c (0^\circ)} = 195 \text{ kN}$$

BRUG OPEN

Voor de windbelasting wordt uitgegaan van NEN-EN 1991-1-4/NB met de brug geheel geopend.

Grootste hoogte van het val boven maaiveld

$$z_m := h_0 + L_v \cdot \sin(85^\circ) = 17.3 \text{ m}$$

Tabel NB.1

$$v_{b;0} := 27.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Windrichtingsfactor

$$c_{dir} := 1$$

Seizoensfactor

$$c_{season} := 1$$

Basiswindsnelheid

$$v_b := c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b;0} = 27 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ruwheidsfactor

$$k_r := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{0.05} \right)^{0.07}$$

$$c_r(z) := k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Orografiefactor

$$c_0(z) := 1.0$$

Turbulentiefactor

$$k_l := 1.0$$

Turbulentie-intensiteit

$$I_v(z) := \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Gemiddelde windsnelheid

$$v_m(z) := c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

Extreme stuwdruk

$$q_p(z) := (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2$$

Neem voor de drukcoëfficiënt de waarde voor een vrijstaande wand. dan volgens Tabel 7.9/NB en figuur 7.19 met volheidsfactor $\varphi = 1$:

$$c_{p;net} := 1.4$$

Referentie-hoogte

$$z_e := z_m$$

Stuwdruk

$$p_{stuw} := q_p(z_e) = 1020 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$



Moment op het val

$$M_{w;rep} := p_{stuw} \cdot L_v \cdot B_v \cdot \left(\frac{L_v}{2} \right) = 597 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Representatieve waarde cilinderkracht

$$F_{c;Open;rep} := \frac{M_{w;rep}}{A_c (85^\circ)} = 467 \text{ kN}$$

De hoogste waarde voor de geopende stand:

$$F_{c;BB;rep} := \max(F_{c;VO;rep}, F_{c;Open;rep}) = 467 \text{ kN}$$

Rekenwaarde overbelasten volgt uit NEN 6786, Tabel 14.

Met:

$$\psi := 1 + \left(\frac{1}{9} \right) \cdot \ln \left(\frac{15}{50} \right) = 0.87$$

(voor t = 15 jaar)

$$\gamma_w := 1.8$$

De cilinderkracht is dan:

$$F_{c;BB;d} := \gamma_w \cdot \psi \cdot F_{c;BB;rep} = 729 \text{ kN}$$

Deze kracht kan - afhankelijk van de windrichting - zowel een drukkende als een trekkende kracht zijn.



5. HYDRAULISCHE AANDRIJVING

Onderstaand is de maximale cilinderkracht afgeleid. Op basis daarvan is een globale toetsing van de cilinder uitgevoerd.

Ook is het netto benodigd vermogen tijdens het bewegen afgeleid.

De rekenwaarde voor de grootste cilinderdrukkraft is

$$F_{c;druk;d} := \max(F_{c;max;sl;d}, F_{c;BB;d}) = 729 \text{ kN}$$

De rekenwaarde voor de grootste cilinder-trekkraft is

$$F_{c;trek;d} := \max(|F_{c;max;op;d}|, F_{c;BB;d}) = 781 \text{ kN}$$

Deze krachten treden op in open brugstand.

De hoogste oliedruk in de cilinder treedt op bij trekkende situatie:

$$\text{Maximale oliedruk; overbelasten} \quad p_{olie;d} := \frac{F_{c;trek;d}}{A_{ring}} = 249 \text{ bar} \quad (\text{stangzijde})$$

In Bijlage 1 is een globale toetsing van de cilinder opgenomen.

Benodigd vermogen, gebaseerd op de Bruikbaarheidsgrenstoestand volgens NEN 6786, Tabel 12b, Overschrijden maximale druk, Eenparig bewegen:

$$\psi := 0.8 \quad \gamma_w := 1.8 \quad \gamma_0 := 1.1$$

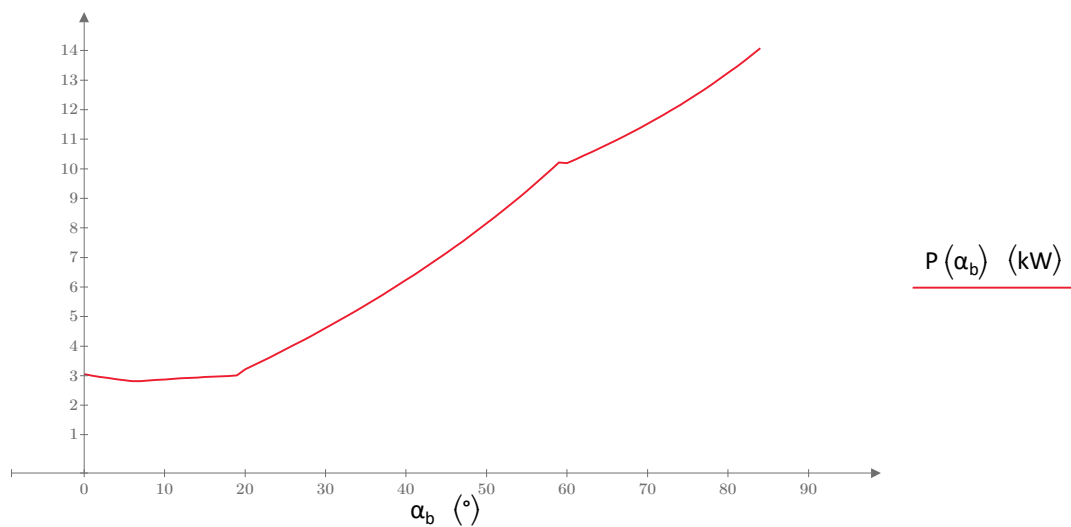
$$F_{c;b}(\alpha_b) := \psi \cdot \gamma_w \cdot F_{w;rep;sl}(\alpha_b) + \gamma_0 \cdot F_{VDG}(\alpha_b)$$

$$\text{Neem voor de cilindersnelheid} \quad v_c := \frac{S_c}{60 \text{ s}} = 0.042 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Het benodigd vermogen is dan:

$$P(\alpha_b) := F_{c;b}(\alpha_b) \cdot v_c$$

Het verloop van het benodigde vermogen tijdens de brugbeweging is dan:





6. REACTIES ONDERBOUW

Interactie tussen boven- en onderbouw op de volgende posities:

- A. Vooroplegging
- B. Hoofddraaipunten
- C. Torengoet

Beschouwd worden de volgende situaties, waarbij maximale onderbouwbelasting optreedt:

- I. Brug gesloten, buiten de bewegingscyclus;
- II. Brug geopend, buiten de bewegingscyclus;

Onderstaand zijn de representatieve, door de onderbouw uitgeoefende reactiekrachten en -momenten afgeleid.

Ad. I. Brug gesloten, buiten de bewegingscyclus

De brug wordt belast door de eigengewichten en verkeer.

Voor het verkeer geldt:

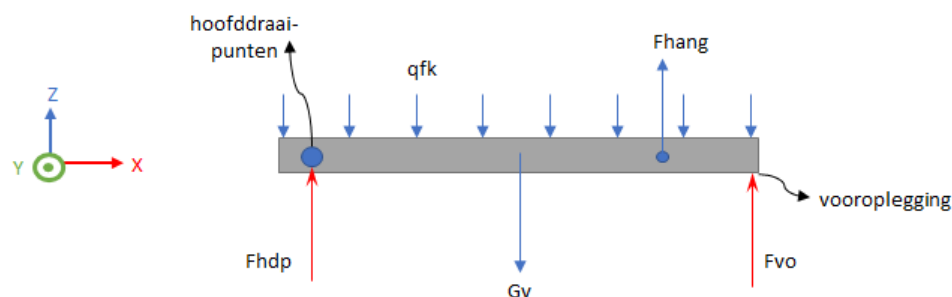
NEN-EN 1991-2/NB, Artikel 5.3.2.1 ($L > 10\text{m}$):

$$q_{fk} := \left(2.0 + \frac{120}{\frac{L_v}{m} + 30} \right) \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 4.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

De totale verticale verkeersbelasting is dan

$$F_{fk} := q_{fk} \cdot L_v \cdot B_v = 364 \text{ kN}$$

E.e.a. schematisch aangegeven in onderstaande figuur met zijaanzicht van het val:



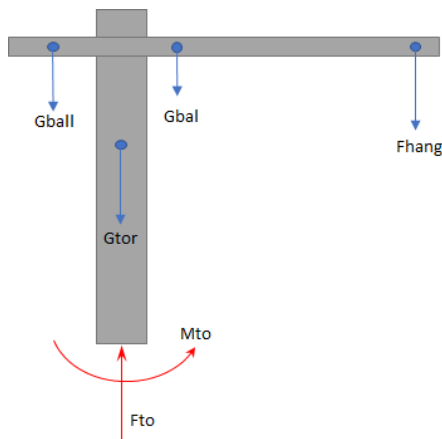
De uit te oefenen reactiekrachten op het val door eigengewicht, hangstang en verkeer zijn dan:

$$F_{vo} := \frac{G_v \cdot \frac{L_v}{2} - F_{hang} \cdot X_{hst}}{L_v} + \frac{1}{2} \cdot F_{fk} = 182 \text{ kN}$$

$$F_{hdp} := G_v + F_{fk} - F_{hang} - F_{vo} = 284 \text{ kN}$$



Reactiekrachten en -momenten op de toren:



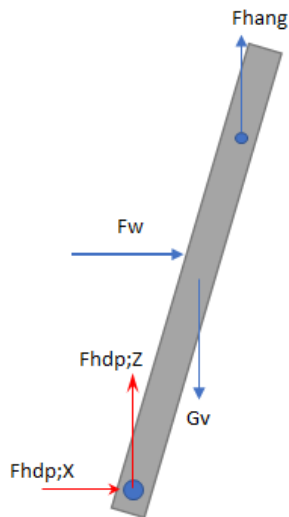
$$F_{to} := F_{hang} + G_{bal} + G_{ball} + G_{tor} = 795 \text{ kN}$$

$$M_{to} := F_{hang} \cdot X_{hst} + G_{bal} \cdot X_{bal} - G_{ball} \cdot X_{ball} = 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Ad. II. Brug geopend, buiten de bewegingscyclus

De brug wordt hoofdzakelijk belast door eigengewichten en wind.

Onderstaand wordt de situatie beschouwd, waarbij wind de brug in sluitende richting belast.



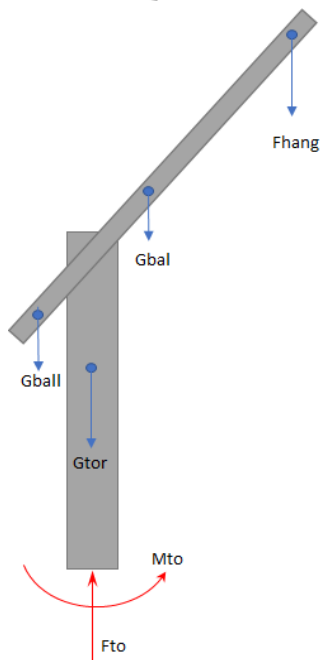
De door de wind uitgeoefende kracht is $F_{w;rep} := p_{stuw} \cdot L_v \cdot B_v = 80 \text{ kN}$

$$F_{hang} := \frac{F_{w;rep} \cdot \frac{1}{2} \cdot L_v + G_v \cdot X_{z,v} \cdot \cos(85^\circ)}{X_{hst} \cdot \cos(85^\circ)} = 607 \text{ kN}$$

$$F_{hdp;z} := G_v - F_{hang} = -387 \text{ kN}$$

$$F_{hdp;x} := -F_{w;rep} = -80 \text{ kN}$$

Reactiekrachten en -momenten op de toren:



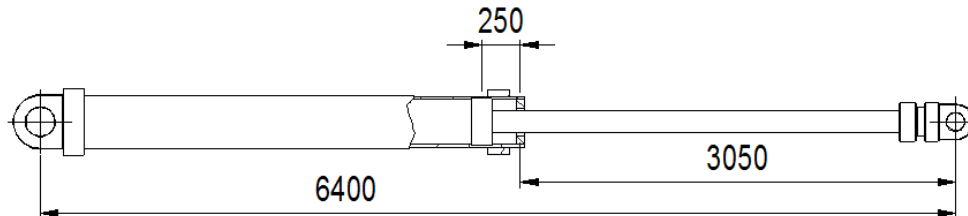
$$F_{to} := F_{hang} + G_{bal} + G_{ball} + G_{tor} = 1284 \text{ kN}$$

$$M_{to} := (F_{hang} \cdot X_{hst} + G_{bal} \cdot X_{bal} - G_{ball} \cdot X_{ball}) \cdot \cos(85^\circ) = 597 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



BIJLAGE 1. Toetsing hydraulische cilinder

Globale hoofdafmetingen: (afgeronde maten):



De zuigerstang wordt maximaal op knik belast bij maximaal uitgeschoven cilinder.
De gebruikte berekening is volgens NEN6786.

$$a := 3050 \text{ mm}$$

$$b := 250 \text{ mm}$$

$$c := 6400 \text{ mm} - (a + b) = 3100 \text{ mm}$$

De afstand van het stangoog tot het
midden van de geleiding van de zuigerstang
en de geleiding van de zuiger
(lengte uitgeschoven stang)

$$l_1 := a + \frac{1}{2} \cdot b = 3175 \text{ mm}$$

Hoek van de cilinder met de horizontaal

$$\gamma := 90^\circ \quad (\text{benadering})$$

Cilinderlengte in uitgeschoven stand

$$l := a + b + c = 6400 \text{ mm}$$

Oppervlakte van de zuiger

$$A_{\text{zuiger}} = (4.9 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

Weerstandsmoment van de zuigerstang

$$W_{b;\text{stang}} := \frac{\pi}{32} \cdot D_{\text{zuigerstang}}^3$$

Oppervlakte van de stang

$$A_{\text{stang}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{zuigerstang}}^2$$

Traagheidsmoment van de zuigerstang

$$I_1 := \frac{\pi}{64} \cdot D_{\text{zuigerstang}}^4$$

Traagheidsmoment van de cilindermantel

$$I_2 := \frac{\pi}{64} \cdot (D_{\text{mantel}}^4 - D_{\text{zuiger}}^4)$$

Tabel 39:

$$\alpha := \frac{l_1}{l} = 0.496 \quad \beta := \frac{l_1}{l_2} = 0.121$$



Voor X geldt:

$$\begin{array}{l} \text{Const} \\ \text{Values} \\ \left[\begin{array}{l} x := 0.6 \\ \sqrt{\beta} \cdot \tan\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{x}\right) = -\tan\left(\frac{\pi \cdot (1-\alpha) \cdot \sqrt{\beta}}{x}\right) \\ \text{Solver} \\ X := \text{find}(x) = 0.793 \end{array} \right. \end{array}$$

Kniklengte van de zuigerstang volgens tabel 39

$$l_{\text{buc}} := X \cdot l = 5073 \text{ mm}$$

De lengte van de zuigerstang = a + b

$$L_{\text{zst}} := a + b = 3300 \text{ mm}$$

$$UC := \frac{L_{\text{zst}}}{l_{\text{buc}}} = 0.65$$

Elasticiteitsmodulus

$$E := 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Euler-knikkracht

$$F_{\text{euler}} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{l_{\text{buc}}^2} = 2002 \text{ kN}$$

Uitgaand van stangmateriaal 42CrMo4

$$f_{y;d} := 550 \text{ MPa}$$

Normaalkracht plastische capaciteit zuigerstang

$$N_{\text{pl.st}} := f_{y;d} \cdot A_{\text{stang}} = 9719 \text{ kN}$$

Relatieve slankheid zuigerstang

$$\lambda_{\text{rel}} := \sqrt{\frac{N_{\text{pl.st}}}{F_{\text{euler}}}} = 2.2$$

Volgens NEN 6786, Artikel 9.4.4 Instabiliteitskromme d moet worden aangehouden. Dan volgens NEN 6770:

$$\alpha_k := 0.76$$

$$\lambda_0 := 0.2$$

De relatieve slankheid is groter dan 1,4; dan geldt volgens NEN 6786, artikel 9.4.4:

$$\omega_{\text{buc}} := \frac{0.60}{(\lambda_{\text{rel}})^2} = 0.12$$

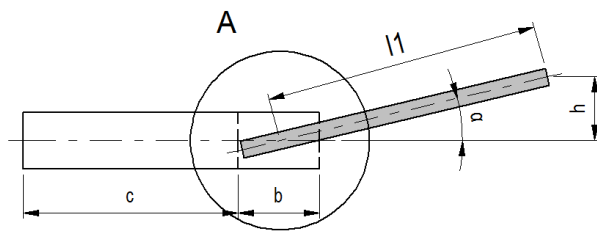
Rekenwaarde buigend moment voor de capaciteit in uiterste grenstoestand:

$$M_{r.u.d} := W_{b;stang} \cdot f_{y;d} = 182.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

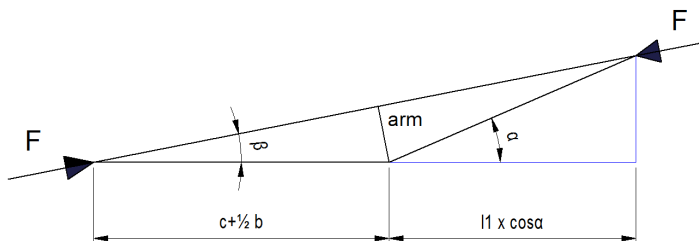
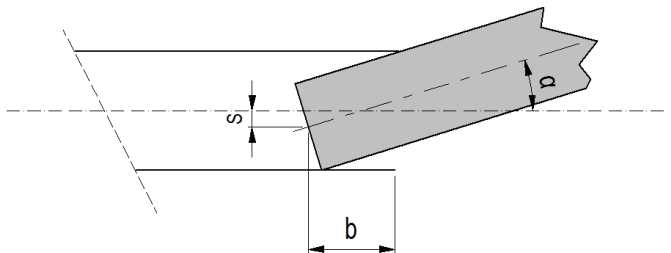
De speling tussen de stang en de geleiding is gelijk aan 1/150 van de zuigerstangdiameter en minimaal 1:

$$S := \frac{1}{150} \cdot D_{\text{zuigerstang}} = 1 \text{ mm}$$

Moment door de scheefstand:



Detail A:



Moment t.g.v. speling

$$\alpha := \text{atan}\left(\frac{2 \cdot s}{b}\right) = 0.46^\circ$$

$$h := l_1 \cdot \sin(\alpha) = 25.4 \text{ mm}$$

$$\beta := \text{atan}\left(\frac{h}{c + \frac{1}{2} \cdot b + l_1 \cdot \cos(\alpha)}\right)$$

$$\text{arm} := \left(c + \frac{1}{2} \cdot b\right) \cdot \sin(\beta) = 12.8 \text{ mm}$$

$$M_{dw} := F_{c;druk;d} \cdot \text{arm} = 9.33 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Volgens NEN 6786, tabel 4 is de wrijvingscoefficient voor:
Kogelgewrichtslagers metaal/kunststof:

$$\mu_r := 0.15$$

Neem boldiameter lager:

$$d_{bol} := 200 \text{ mm}$$

Het moment tgv de wrijving:

$$M_{wr} := \mu_r \cdot F_{c;druk;d} \cdot \frac{d_{bol}}{2} = 10.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Het moment tgv het gewicht: cilinder vrijwel verticaal

$$M_{gew} := 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Totaal maximaal moment

$$M_{tot} := M_{dw} + M_{wr} + M_{gew} = 20.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Maximaal moment

$$M_{\text{equ.s.d1}} := |0.1 \cdot M_{dw} + M_{tot}| = 21.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{equ.s.d2}} := |0.6 \cdot M_{tot}| = 12.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{equ.s.d}} := \max(M_{\text{equ.s.d1}}, M_{\text{equ.s.d2}}) = 21.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$UC := 1.1 \cdot \frac{F_{c;druk;d}}{\omega_{buc} \cdot N_{pl.st}} + 1.1 \cdot \frac{M_{\text{equ.s.d}}}{M_{r.u.d}} = 0.8$$



Toetsing van de zuigerstang volgens NEN 6786, artikel 9.8.11.3.1.

Factor n :

$$n := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_1}{F_{c;druk;d} \cdot I_{buc}^2} = 2.75$$

Voor α_k moet de waarde worden genomen die hoort bij instabiliteitskromme C: $\alpha_k := 0.49$

Buigend moment m.b.t. uiterste grenstoestand: $M_{y;u;d} := f_{y;d} \cdot W_{b;stang} = 182.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Imperfectieparameter volgens NEN 6771: $e := \alpha_k \cdot (\lambda_{rel} - \lambda_0) \cdot \frac{M_{y;u;d}}{N_{pl.st}} = 18.4 \text{ mm}$

$$M_{g.s.d} := \frac{n}{n-1} \cdot (M_{equ.s.d} + F_{c;druk;d} \cdot e) = 54.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dit geeft ter plaatse van de geleidingen een kracht van: $F_{gel} := \frac{M_{g.s.d}}{b} = 217.6 \text{ kN}$

Spanningen in de zuigerstang:

Buigspanning: $\sigma_b := \frac{M_{g.s.d}}{W_{b;stang}} = 164.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Normaalspanning: $\sigma_n := \frac{F_{c;druk;d}}{A_{stang}} = 41.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Schuifspanning: $\tau_d := \frac{F_{gel}}{A_{stang}} = 12.3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Gedrongen onderdeel: $UC := \frac{\sqrt{(1.25 \cdot (\sigma_b + \sigma_n))^2 + 3 \cdot \tau_d^2}}{f_{y;d}} = 0.47$

Wanddikte cilindermantel

Wanddikteberekening bij hoogst optredende druk.

De gebruikte berekening is volgens Roloff/Matec, paragraaf 6.3.4.

$$t = \frac{D_a \cdot p_e}{2 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + p_e} + c_1 + c_2$$

K-waarde volgens tabel 6-15 b)
S355J2 bij 20 °C

$$K_{cilinder} := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Buitendiameter van de cilindermantel

$$D_{mantel} = 300 \text{ mm}$$



Lasfactor: (=1 voor naadloze buis)	$v_{las} := 1$
Veiligheidsfactor volgens tabel 6-17	$S_{cilinder} := 1.5$ (wals- en smeedstaalsoorten)
Corrosietoetslag	$c := 0.5 \text{ mm}$
Druk in cilinder	$p_{cil} := p_{olie;d} = 249 \text{ bar}$
De benodigde dikte van de cilinderwand	$t_{cil,min} := \frac{D_{mantel} \cdot p_{cil}}{2 \cdot \frac{K_{cilinder}}{S_{cilinder}} \cdot v_{las} + p_{cil}} + c = 15.5 \text{ mm}$
Wanddikte	$t_{cil} := \frac{(D_{mantel} - D_{zuiger})}{2} = 25 \text{ mm}$

$$UC := \frac{t_{cil,min}}{t_{cil}} = 0.62$$