

afdeling 11241

afdeling 11241

DI 11241

lichtkrachten

januari 1961

afdeling berekeningen 11241

C 4612

lichtmasten

januari 1981

afdeling: berekeningen-em

rijkswaterstaat directie bruggen

LICHTMASTEN

- 1- HANDLEIDING VOOR DE BEREKENING VAN LICHTMASTEN.
- 2- AFLEIDING VAN DE GEBRUIKTE FORMULES.
- 3- BEPALING VAN () Om, 12m,
en 15m.
- 4- WINDBELASTING OP LICHTMASTEN.

(Januari 1981)

Afdeling:
Berekeningen-EM

D. STROOSMA.
S. V. KRUISWIJK.

LICHTMAATEN
C. N. 12 BDN

RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE BUREAU

Voortzetting

Aanvankelijk was het de bedoeling dat Rijkswaterstaats
een compleet voorloopt zou maken met betrekking tot
de berekening en constructie van zwaar stalen en alu-
minium lichtmasten als van massen voor lichtverlichting.
Voorafgaande op dat uitgangspunt voorloopt met toe-
lichtingen over de eerdere onderzochte betrekkingen en
van de berekeningen, constructie aanpakken en reken-
methoden, is in gezamenlijk overleg besloten voort-
loopt te volstaan met een aangepaste richtlijn "Eisen
lichtmasten".
Deze aangepaste richtlijn geeft voor normale lichtmasten
volgende informatie aan de regionale directies voor
het opstellen van bestekken.
In de afgelopen jaren zijn echter door de normalisatie-
commissie "lichtmasten" normen en richtlijnen uitge-
geven die o.a. ook betrekking hebben op de sterkte-
berekening.
Daarvoor werd de behoefte aan een uitgebreid voorloopt
sterk vermindert.
In deze verhandeling zal men dan ook niet een uitgebreid
voorloopt tegenkomen doch een handleiding die voor-
ziet in rekenregels voor details van lichtmasten en an-
dere onderwerpen die betrekking hebben op de berekening,
die niet of niet in voldoende mate in de reeds in omloop
zijnde normen en richtlijnen zijn aangegeven, doch voor
de sterkte essentieel zijn.
Deze handleiding (hoofdstuk 1) is, geschied van de an-
dere hoofdstukken van dit werk, te gebruiken naast de
noemde normen en richtlijnen en "Eisen lichtmasten".

LICHTMASTEN

RIJKSWATERSTAAT,
DIRECTIE BRUGGEN.

Voorwoord:

Aanvankelijk was het de bedoeling dat Rijkswaterstaat een compleet voorschrift zou maken met betrekking tot de berekening en constructie van zowel stalen en aluminium lichtmasten als van masten voor lijnverlichting. Vooruitlopende op dit uitgebreide voorschrift met toelichtingen over de achtergronden betreffende de grootte van de belastingen, toelaatbare spanningen en rekenmethodieken, is in gezamenlijk overleg besloten voorlopig te volstaan met een aangepaste richtlijn "Eisen lichtmasten".

Deze aangepaste richtlijn geeft voor normale lichtmasten voldoende informatie aan de Regionale directies voor het opstellen van bestekken.

In de afgelopen jaren zijn echter door de normalisatiecommissie "lichtmasten" normen en richtlijnen uitgegeven die o.a. ook betrekking hebben op de sterkteberekening.

Daardoor werd de behoefte aan een uitgebreid voorschrift sterk verminderd.

In deze verhandeling zal men dan ook niet een uitgebreid voorschrift tegenkomen doch een handleiding die voorziet in rekenregels voor details van lichtmasten en andere onderwerpen die betrekking hebben op de berekening, die niet of niet in voldoende mate in de reeds in omloop zijnde normen en richtlijnen zijn aangegeven, doch voor de sterkte essentieel zijn.

Deze handleiding (hoofdstuk 1) is, gescheiden van de andere hoofdstukken van dit werk, te gebruiken naast genoemde normen en richtlijnen en "Eisen lichtmasten".

In hoofdstuk 2 vindt men de afleiding van de in de handleiding gebruikte formules.

Hoofdstuk 3 is een verantwoording van de getalwaarden die in "Eisen lichtmasten 1980" zijn verwerkt, terwijl in hoofdstuk 4 het standpunt van Rijkswaterstaat inzake de windbelasting is vastgelegd.

Tot slot wordt opgemerkt dat in de toekomst een soortgelijke verhandeling voor lijnverlichtingsmasten zal verschijnen.

Voorburg, januari 1981.

LICHTMASTEN

INHOUD:

blz.

	LIJST VAN DE BELANGRIJKSTE SYMBOLEN.	5
1	<u>HANDLEIDING VOOR DE BEREKENING VAN LICHT- MASTEN.</u>	6
1.1	Algemeen.	7
1.2	Geometrie van lichtmasten.	8
1.3	Bepaling van de belastingen en momenten op de mast.	9
1.4	Ankers.	12
1.5	Voetplaten.	14
1.6	In de grond ingeklemde mast.	15
1.7	Bepaling G_{Ω} .	17
1.8	Weerstandsmomenten van cirkelvormige doorsneden.	18
1.9	Andere details.	21
1.10	Doorbuiging van de mast.	22
1.11	Bepaling eigen trillingsgetal.	22
2	<u>AFLEIDING VAN DE GEBRUIKTE FORMULES.</u>	23
2.1	Afleiding maximum ankerbelasting.	24
2.2	Voetplaten.	25
2.2.1	Sterkte in de omgeving van de ankers.	26
2.2.2	Sterkte over de kleinste doorsnede.	27
2.2.3	Ronde voetplaat met veel bouten.	31
	- Plastische beschouwing.	
	- Elastische beschouwing.	
2.3	In de grond ingeklemde mast.	38
2.4	Berekening van het "dammetje" op buiging en torsie.	41
2.4.1	Bepaling G_{b1} , G_{b2} , $\tau \rightarrow G_1$ in het dammetje.	50
2.5	Bepaling weerstandsmoment van de pijp t.p.v. de deur.	53
2.6	Overgang naar grotere diameter d.m.v. conus. (verjongingen)	55
2.7	Gekromde dunwandige pijpen.(Formules:"von Kármán")	60
2.8	De formule van: "Kollbrunner".	63

VERVOLG INHOUD:

blz.

3	<u>BEPALING VAN GETALWAARDEN VAN MASTEN MET</u> <u>$L_{ph}=5m, 10m, 12m$, en $15m$.</u>	64
3.1	Afmetingen.	65
3.1.1	Geometrie van lichtmasten.	66
3.1.2	Gebruikte afmetingen bij de berekening.	67
3.2	Momenten ter plaatse van de voet van de mast.	68
3.3	Tabel buigende-momenten.	78
3.4	Ankers voor voetplaten.	79
3.5	Voetplaatberekening.	84
3.6	Berekening van het "dammetje" op buiging en torsie.	89
3.7	In de grond ingeklemde mast.	93
3.8	Berekening van de las in de voetplaat.	95
3.9	Benodigde afrondingsstraal bij verjongingen.	102
3.10	Bepaling van de spanning in de kromming van de uithouder.	104
4	<u>WINDBELASTING OP LICHTMASTEN.</u>	105
4.1	Windbelasting op lichtmasten.	106
4.2	Windbelasting op lichtmasten (Vergelijking NPR 993 met NEN 3850)	110

LIJST VAN DE BELANGRIJKSTE SYMBOLEN:

symbool	omschrijving	dimensie
A	oppervlakte	L^2
c	vormcoëfficiënt	
D	dwarskracht	MLT^{-2}
d	diameter	L
E	elasticiteitsmodulus	$ML^{-1}T^{-2}$
F	kracht	MLT^{-2}
G	afschuivingsmodulus	$ML^{-1}T^{-2}$
σ	spanning	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_R	rekgrens c.q. vloeispanning	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_v	vergelijkingsspanning	$ML^{-1}T^{-2}$
g	zwaarteveldsterkte	LT^{-2}
ϕ	hoekverdraaiing	
ρ	straal(gemiddeld)	L
I	kwadratisch oppervlaktemoment	L^4
l	lengte	L
M	moment	ML^2T^{-2}
p	druk(wind)	$ML^{-1}T^{-2}$
q	stuwdruk	$ML^{-1}T^{-2}$
μ	Poissonverhouding	
W	weerstandsmoment	L^3
y	verplaatsing	L

De betekenis van de overige symbolen komt in voldoende mate in de tekst tot uitdrukking.

rijkswaterstaat directie bruggen

LICHTMASTEN

1. HANDLEIDING VOOR DE BEREKENING VAN LICHTMASTEN.

1.1

Algemeen:

Deze handleiding te gebruiken naast:

- Eisen lichtmasten 1980.
- NPR 993; Richtlijnen voor de berekening.
- NPR 988; Stalen lichtmasten, aanbevelingen voor de constructie.
- NEN-EN 40-2; Afmetingen en toleranties.

De opzet van deze handleiding is het geven van rekenregels voor details van lichtmasten en andere onderwerpen die betrekking hebben op de berekening die niet of niet in voldoende mate in NPR 993 zijn aangegeven, doch voor de sterkte en standvastigheid essentieel zijn.

Deze handleiding vormt dan ook geen volledige richtlijn voor de berekening, doch is slechts een aanvulling op de normen en richtlijnen die hierboven zijn aangegeven.

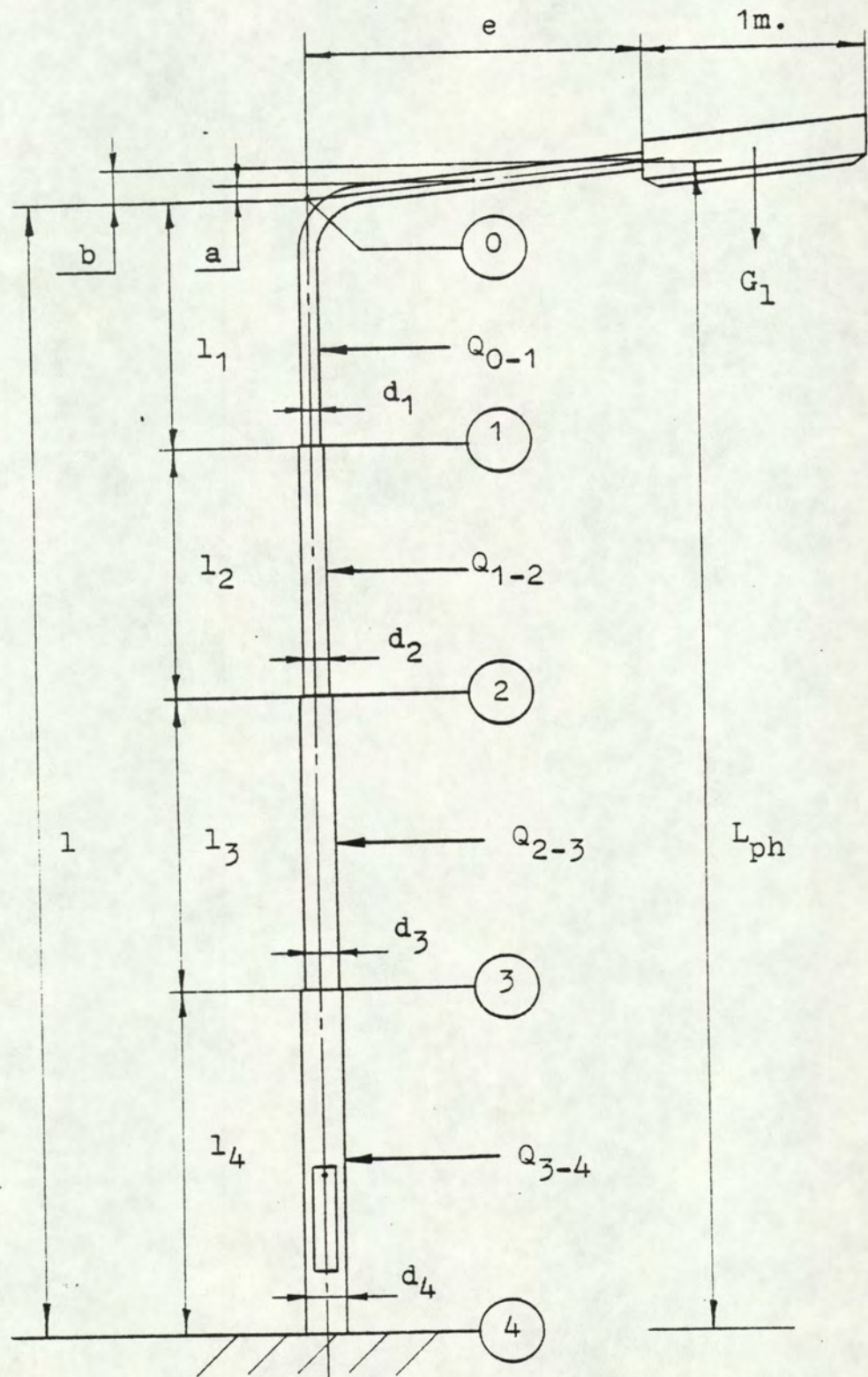
Bij normale lichtmastafmetingen kunnen de afmetingen van voetplaten en ankers en de benodigde lengte van het grondstuk direct worden ontleend aan de desbetreffende tabellen uit: "Eisen lichtmasten".

Een berekening van deze onderdelen kan dan achterwege worden gelaten.

LICHTMASTEN

1.2

Geometrie van lichtmasten:



1.3

Bepaling van de belastingen en momenten op de mast:

Windbelasting: $Q_{i-j} = q \cdot c \cdot d_i \cdot l_i$

h \longrightarrow q = stuwdruk in Pa (TABEL1, NPR993)
 c = vormcoëfficiënt (TABEL2, NPR993)
 d_i = diameter betreffend mastdeel in m.
 l_i = lengte betreffend mastdeel in m.

(Winddruk $p = c \cdot q$)

Q_{0-1}

Q_{1-2}

Q_{2-3}

Q_{3-4}

Buigend-moment kale mast ten gevolge van wind :

$$M_{11} = \frac{1}{2} Q_{0-1} \cdot l_1$$

$$M_{21} = (\frac{1}{2} Q_{1-2} + D_1) \cdot l_2 + M_{11}$$

$$M_{31} = (\frac{1}{2} Q_{2-3} + D_2) \cdot l_3 + M_{21}$$

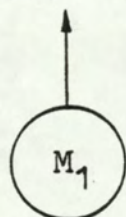
$$M_{41} = (\frac{1}{2} Q_{3-4} + D_3) \cdot l_4 + M_{31}$$

$$D_1 = Q_{0-1}$$

$$D_2 = Q_{0-1} + Q_{1-2}$$

$$D_3 = Q_{0-1} + Q_{1-2} + Q_{2-3}$$

$$D_4 = Q_{0-1} + Q_{1-2} + Q_{2-3} + Q_{3-4}$$



Buigend-moment t.g.v. uithouder+lamp (armatuur) :

Uithouder: $Q_e = c_e \cdot q \cdot e \cdot d_e$

Armatuur : $Q_1 = c_1 \cdot q \cdot A_1$

c_e = vormcoëfficiënt uithouder (tabel 2, NPR993)

q = stuwdruk in Pa.

e = uithouderlengte in m.

d_e = diameter uithouder in m.

c_1 = vormcoëfficiënt armatuur.

A_1 = oppervlak armatuur in m^2 .

$$M_{j2} = M_{j1} + (2) \cdot \left\{ (l'+a)Q_e + (l'+b)Q_1 \right\} \quad (l' = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_i)$$

↓ voor een dubbele uithouder

$$M_{12} = M_{11} + (l_1 + a) \cdot Q_e + (l_1 + b) \cdot Q_1$$

$$M_{22} = M_{21} + (l_1 + l_2 + a) \cdot Q_e + (l_1 + l_2 + b) \cdot Q_1$$

$$M_{32} = M_{31} + (l_1 + l_2 + l_3 + a) \cdot Q_e + (l_1 + l_2 + l_3 + b) \cdot Q_1$$

$$M_{42} = M_{41} + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + a) \cdot Q_e + (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + b) \cdot Q_1$$

M_2

Indien $a=b=0$ (horizontale uithouder) of a en $b \ll$:

$$Q_e + Q_1 = Q_{e-1} \quad \text{of: } Q_{e-1} = c_e \cdot q \cdot e \cdot d_e + c_1 \cdot q \cdot A_1$$

$$\text{en: } M_{j2} = M_{j1} + (2) \cdot l' \cdot Q_{e-1}$$

$$D_{j2} = D_{j1} + l' \cdot Q_{e-1}$$

$$M_{12} = M_{11} + l_1 \cdot Q_{e-1}$$

$$M_{22} = M_{21} + (l_1 + l_2) \cdot Q_{e-1}$$

$$M_{32} = M_{31} + (l_1 + l_2 + l_3) \cdot Q_{e-1}$$

$$M_{42} = M_{41} + l \cdot Q_{e-1}$$

M_2

Buigend-moment ten gevolge van eigen gewicht:

($e=0$ en dubbele uithouder \longrightarrow geen moment)

G_p =gewicht van de pijp in N/m.

G_l =gewicht van het armatuur in N.

$$M_g = \frac{1}{2}e^2 \cdot G_p + (e + \frac{1}{2}) \cdot G_l$$

Torsie-moment ten gevolge van windbelasting:

$$M_w = \frac{1}{2}e^2 \cdot d \cdot c \cdot q + (e + \frac{1}{2}) \cdot A_l \cdot c_l \cdot q$$

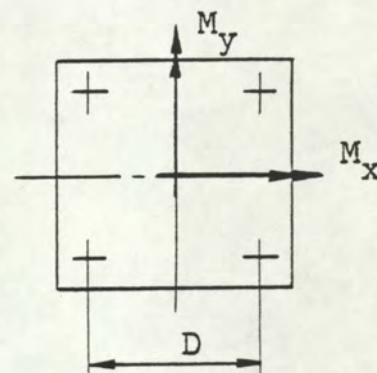
1.4

Ankers :

Bepaling van de maximale ankerbelasting ($F_{A,max}$):

- met enkele uithouder:

$$F_{A,max} = \frac{M_g}{2D} + \frac{M_{xw}}{2D} \sqrt{1 + \left(\frac{M_{yw}}{M_{xw}} \right)^2}$$



- * $M_{xw} = M_2$
 $M_{yw} \approx (M_2 - M_1) \cdot 0,2 + M_1$
 M_g = buigend-moment t.g.v. het eigen gewicht.
 M_1 = buigend-moment van de kale mast t.g.v. wind.
 M_2 = buigend-moment met enkele c.q. dubbele uithouder t.g.v. wind.

- met dubbele uithouder:

$$F_{A,max} = \frac{M_{xw}}{2D} \sqrt{1 + \left(\frac{M_{yw}}{M_{xw}} \right)^2}$$

$$\zeta = \frac{F_{A,max}}{A_{sp}} \leq 0,8 \zeta$$

$$\zeta = \frac{\zeta_R}{1,5}$$

ζ_R = minimum vloeigrens

(NEN3851, tabel2, blz.23)

(TGB 1972-Staal)

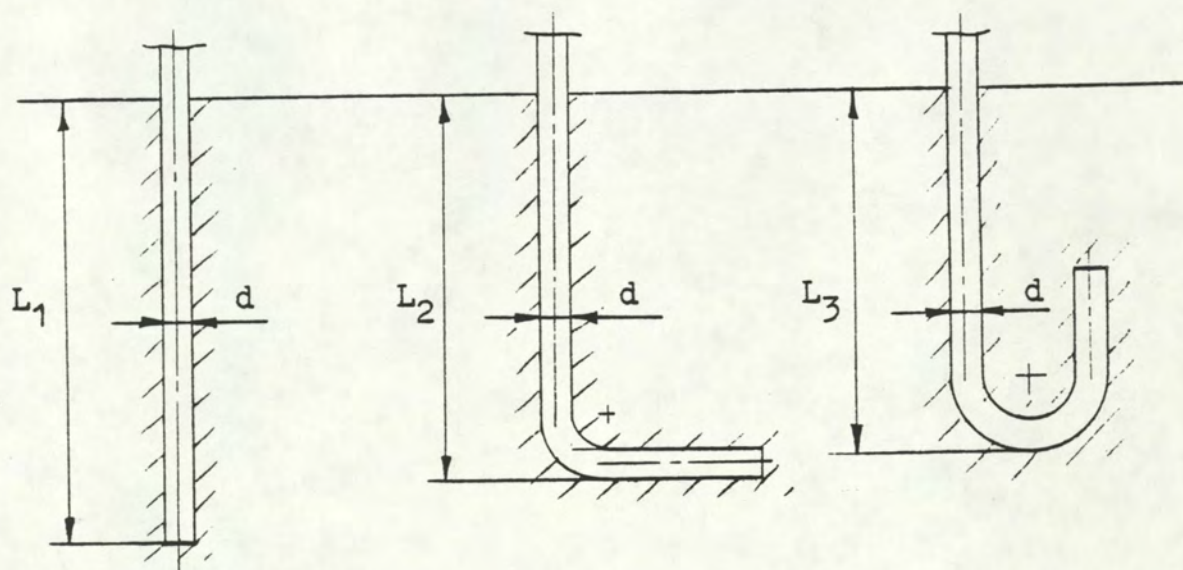
- * Er is van uitgegaan dat de windbelasting bij de masttop in de richting van de uithouder 20% is, van de windbelasting in de richting loodrecht daarop.
 Mocht in het geval van afwijkende afmetingen van het armatuur deze belasting groter zijn, dan moet deze grotere belasting in rekening worden gebracht.

Bepaling van de ankerlengte : (gladde staven)

TYPE I

TYPE II

TYPE III



$$L_2 = L_1 - 5d$$

$$L_3 = L_1 - 10d$$

Voor type I geldt: Hecht-oppervlak $A_k = \pi \cdot d \cdot L_1$

$$F_{\max} = A_k \cdot k = 0,6 \cdot \pi \cdot d \cdot L_1$$

$$L_1 = \frac{F_{\max}}{k \cdot \pi \cdot d} \longrightarrow L_2, L_3$$

("Hechtspanning" $k = 0,6 \text{ N/mm}^2$)

Zie verder: "Voorschriften Beton"

VB 1974

Deel A, Gemeenschappelijk Gedeelte

NEN 3861.

Artikel: A702 en A703.

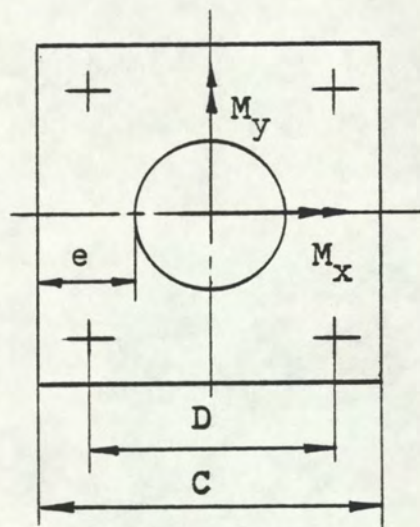
1.5 Voetplaten:

De voetplaatdikte van vierkante voetplaten met vier ankers en cirkelvormige mastdoorsnede.

De voetplaatdikte t mag niet kleiner zijn dan de grootste met de volgende betrekking te bepalen waarde:

$$t \geq \sqrt{\frac{2,5 \cdot F_{A \max}}{\sigma}}$$

$$t \geq \sqrt{\frac{1/8 \cdot M_{\max} \cdot \psi}{1/6 \cdot e \cdot \sigma}}$$



Hierin zijn:

$F_{A \max}$: de grootste waarde van de ankerbelasting.

M_{\max} : het grootste van beide momenten M_x en M_y .

σ : de toelaatbare spanning $\sigma = \frac{\sigma_R}{1,5}$

$$\psi = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 \cdot D}{\pi \cdot d_m} - 1 \right) \cdot \left(\frac{C - e}{D} \right)$$

Waarin:

d_m : de uitwendige diameter van de mast verminderd met de wanddikte.

D, c, e : volgens bovenstaand schema.

1.6 In grond ingeklemde mast.

De gronddruk kan bepaald worden met de volgende formule:

$$p = \frac{M + D \cdot l}{W} \cdot \alpha$$

Hierin zijn:

p : grootste waarde van de gronddruk in N/m^2

M : moment in Nm.

D : dwarskracht in N.

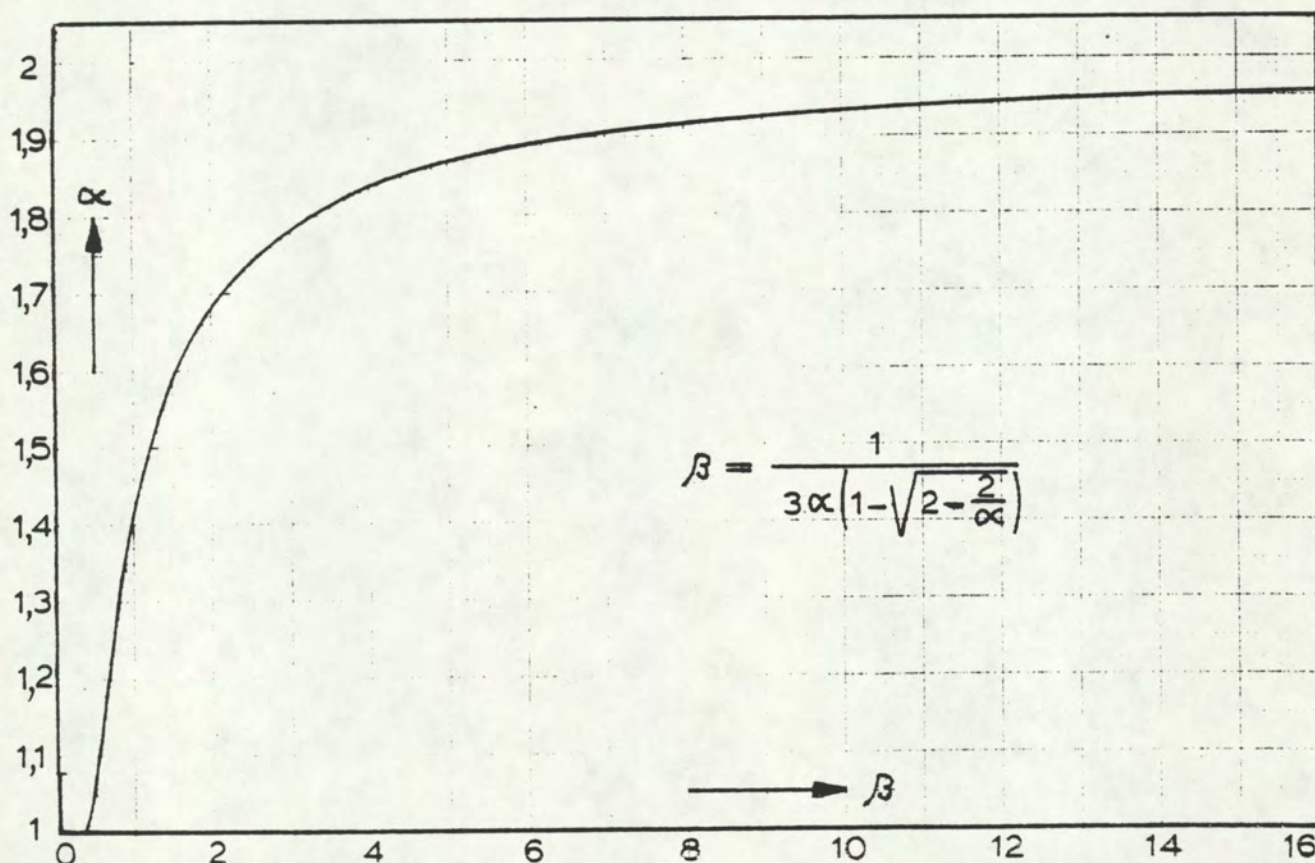
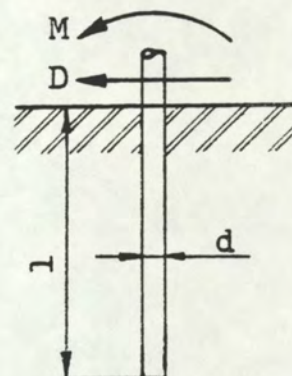
l : lengte van het in de grond ingeklemde mastdeel in m.

$W : \frac{1}{6} d \cdot l^2$

d : diameter van de mast in m.

α : af te lezen uit grafiek als functie van β

$$\beta = \frac{M + D \cdot l}{D \cdot l}$$



De grenswaarde voor de gronddruk mag worden bepaald met :

$$p_e = \rho \cdot g \cdot (\lambda_p - \lambda_a) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot l}{3 \cdot d}\right) \cdot 1$$

Hierin zijn:

p_e : rekenwaarde voor de gronddruk in de grenstoestand in N/m^2

ρ : massa per volume eenheid van de grond in kg/m^3

g : $9,81 \text{ m/s}^2$

λ_p : $tg^2 \left(45^\circ + \frac{1}{2}\varphi \right)$

λ_a : $tg^2 \left(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi \right)$

φ : hoek van inwendige wrijving.

voor zand : $\rho \cdot g \cdot (\lambda_p - \lambda_a) \approx 45 \cdot 10^3$

voor aarde: $\rho \cdot g \cdot (\lambda_p - \lambda_a) \approx 45 \cdot 10^3$

Voldaan moet worden aan: $p \leq p_e / v$ ($v=1,5$)

Het grootste moment in de mast kan met de volgende betrekking worden bepaald:

$$M_{\max} = M + \frac{2}{3} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{l^2}{3 \cdot \alpha \cdot \beta}}$$

Bepaling σ_n :

De langsspanningen (σ_n) in de randen van de deuropening t.g.v. het wringend-moment kan worden berekend met de methode van Kollbrunner.

In geval van lichtmasten met ronde doorsnede moet deze methode worden toegepast met de formule:

$$\sigma_n = \frac{M_t \cdot a}{d_m \cdot W} \times f$$

waarin:

σ_n is de langsspanning in de randen van de deuropening,

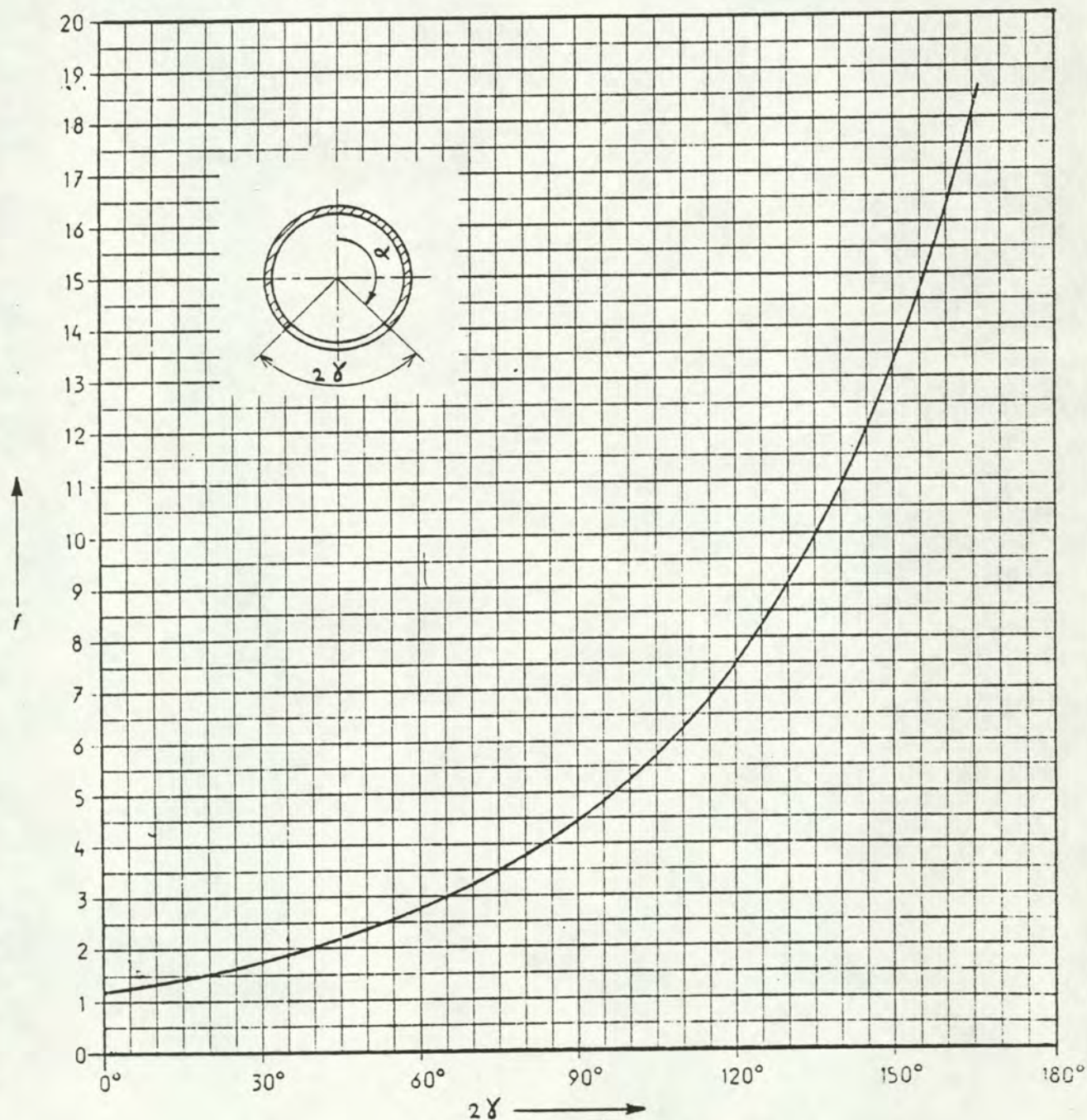
M_t is het totale wringmoment op de mast,

a is de deurhoogte,

d_m is de gemiddelde mastdiameter aan deur onderzijde,

W is het weerstandsmoment volle mast doorsnede ter plaatse, \rightarrow (BUIGING)

f is de factor waarvan de waarde op de grafiek in figuur 2 wordt afgelezen.



Grafiek voor de bepaling van f

1.8

Weerstandsmomenten van cirkelvormige doorsneden:
(BUIGING)

Dunwandige pijp: $W = \pi \cdot \rho^2 \cdot t$

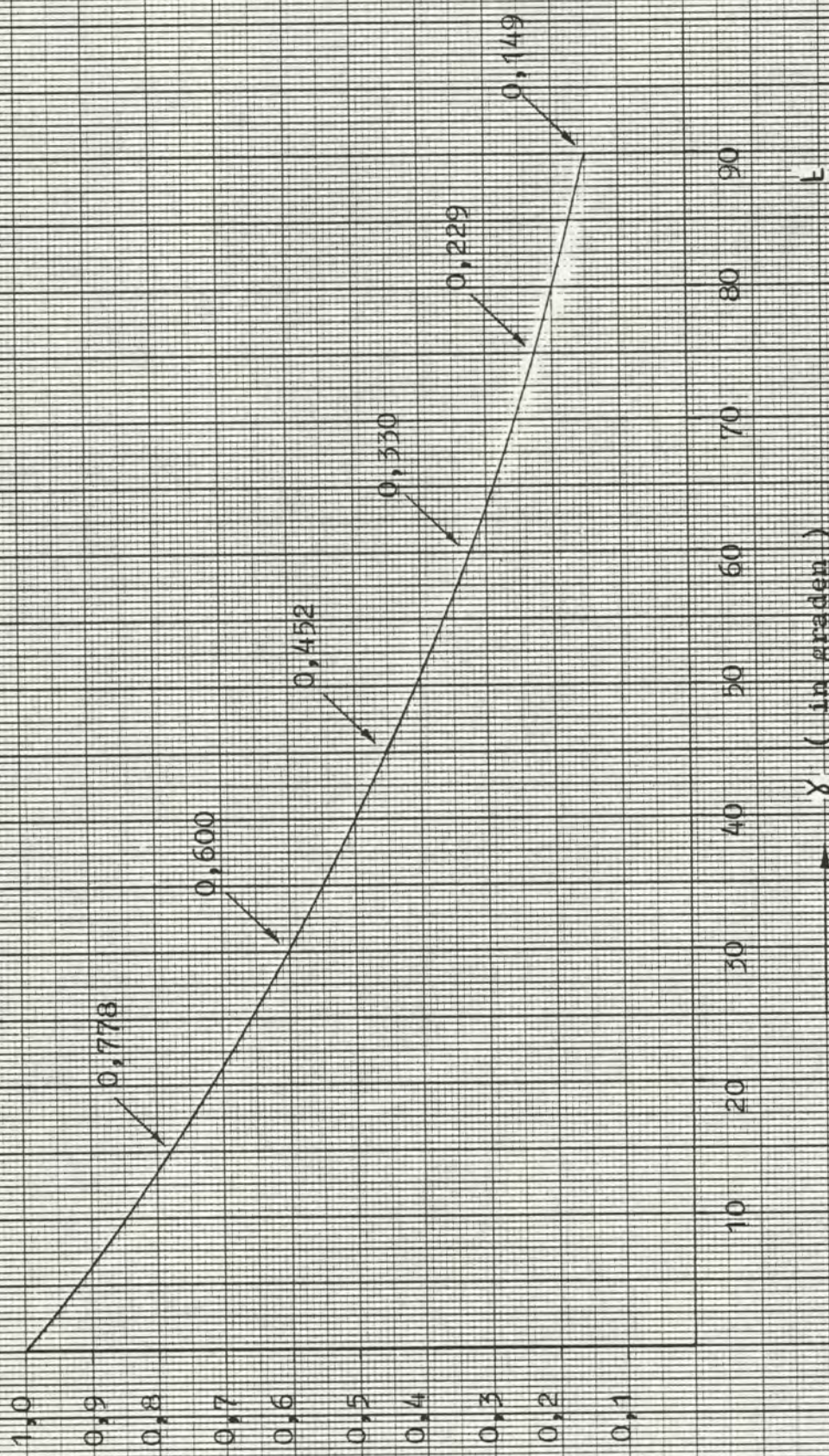
Dikwandige pijp: $W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$

Ter plaatse van de deuropeningen kan voor dunwandige pijpen gebruik worden gemaakt van de volgende betrekking:

$$W = \pi \cdot \beta \cdot \rho^2 \cdot t$$

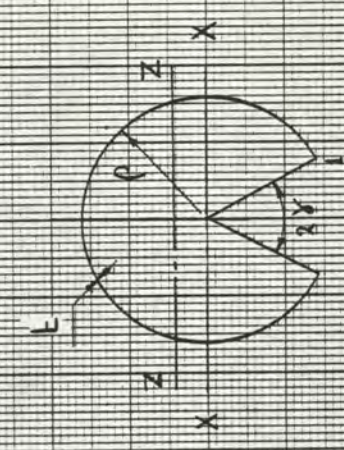
(β volgens hierna volgende bladen)

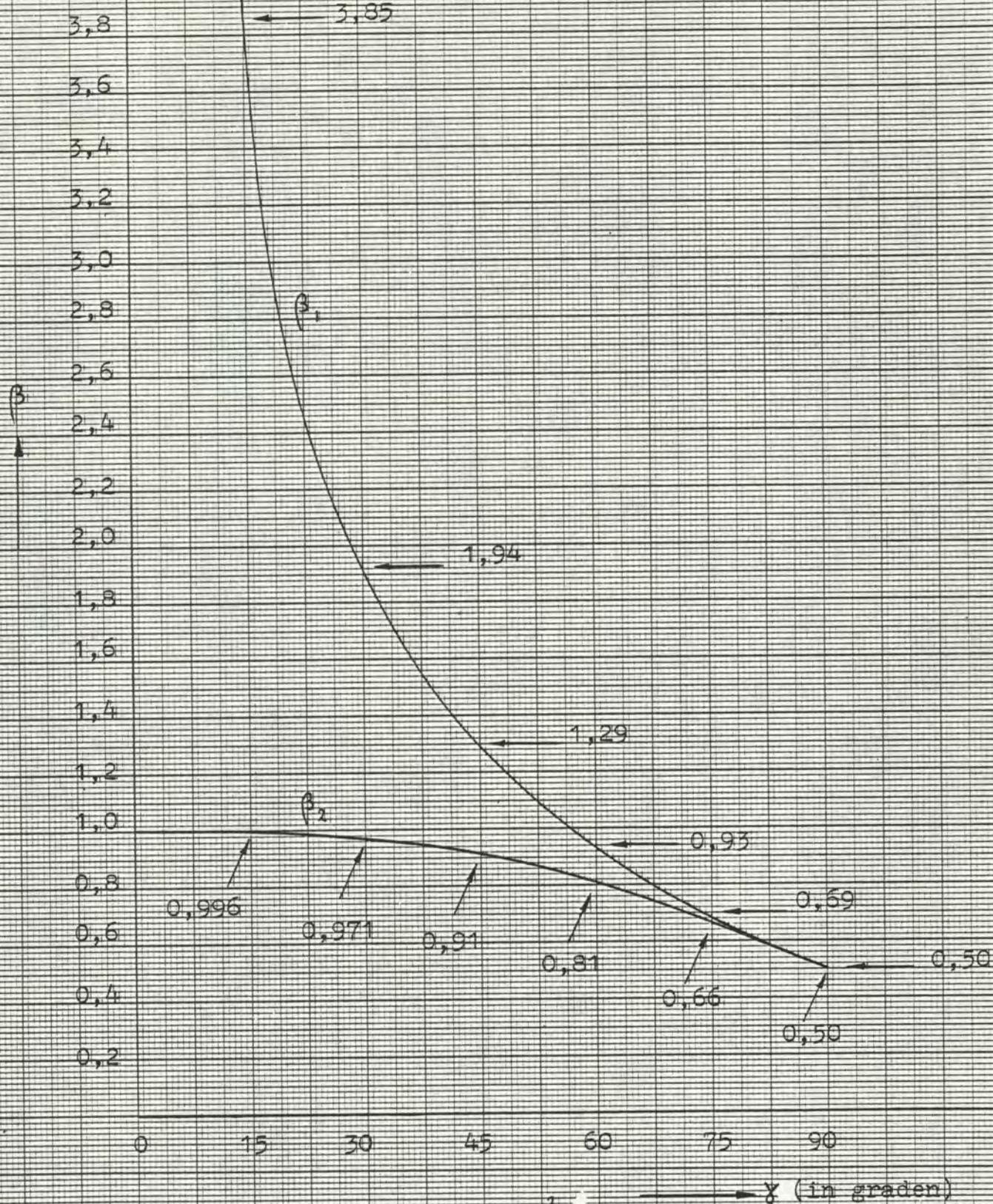
$$\left\{ \begin{array}{l} t = \text{wanddikte} \\ \rho = \frac{D-t}{2} \\ D = \text{buitendiameter pijp} \\ d = \text{binnendiameter pijp} \end{array} \right.$$



W_z t.p.v. deurepening = $\rho \cdot \rho^2 \cdot L$

$$W_{z1} = \rho^2 \cdot L \cdot \left[\frac{(\pi - \gamma)^2 + (\pi - \gamma) \sin(\pi - \gamma) \cos(\pi - \gamma) - 2 \sin^2(\pi - \gamma)}{\sin(\pi - \gamma) - (\pi - \gamma) \cos(\pi - \gamma)} \right]$$

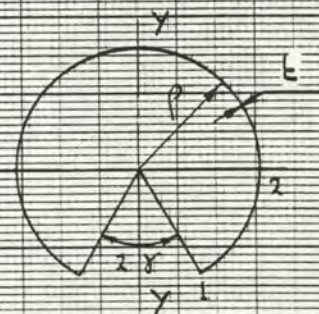




$$W_y \text{ t.p.v. deuropening} = \pi \beta \rho^2 \cdot t$$

$$W_{y1} = \rho^2 \cdot t \cdot \left[\frac{(\pi - \gamma) - \sin(\pi - \gamma) \cdot \cos(\pi - \gamma)}{\sin(\pi - \gamma)} \right]$$

$$W_{y2} = \rho^2 \cdot t \cdot \left[(\pi - \gamma) - \sin(\pi - \gamma) \cdot \cos(\pi - \gamma) \right]$$



1.9

Andere details:

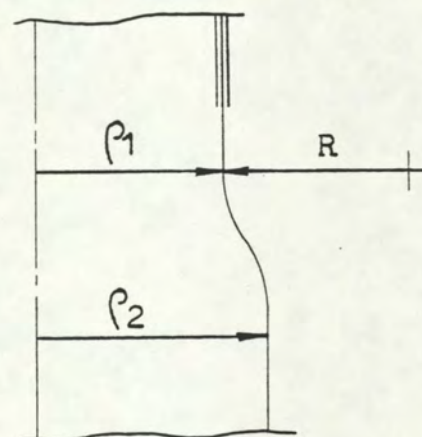
-Het gebogen gedeelte van de uithouder uitgevoerd volgens NPR 988 ($R \geq 5d$) geeft spanningen die ongeveer twee maal zo groot zijn als de spanning bepaald met:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{*)}$$

Overigens zijn de spanningen in dit deel van de mast in het algemeen gering.

-De afrondingsstraal bij verjongingen uitgevoerd zoals hiernaast is aangegeven moet bij voorkeur voldoen aan:

$$R \geq 1,25 \rho_1$$



Gelaste uitvoeringen waarbij de bovenpijp niet in de onderpijp steunt zijn in het algemeen niet aanvaardbaar.

Mocht in een bijzonder geval toch tot deze constructie besloten worden, dan moet voldaan worden aan:

$$\sigma \approx 2 \frac{M}{W} \ll \bar{\sigma}$$

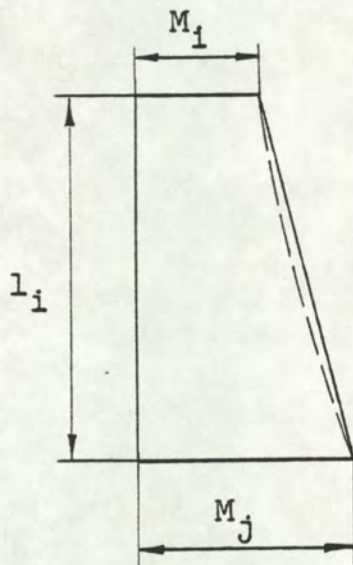
*) Deze opmerking geldt alleen voor de spanning ten gevolge van het eigen-gewicht.

1.10

Doorbuiging van de mast:

Bij het bepalen van de doorbuiging van de mast over de lengte l_i ($l_i \ll l$) kan worden uitgegaan van een lineair verloop van de momenten zoals hieronder is aangegeven:

Voor deze situatie geldt:



$$\Delta \varphi_i = \frac{M_i \cdot l_i}{E \cdot I_i} + \frac{M_j - M_i}{2EI_i} \cdot l_i$$

$$\Delta y_i = \frac{M_i \cdot l_i^2}{2EI_i} + \frac{(M_j - M_i) \cdot l_i^2}{3EI_i}$$

1.11

Bepaling eigen trillingsgetal:

De laagste eigen-frequenties van de lichtmast zijn te bepalen met de "Rayleigh-methode":

$$\omega^2 = \frac{g \cdot \sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i \cdot y_i^2} \quad f_e = \frac{\omega}{2\pi} \text{ (Hz)}$$

Hierin is m_i de massa van een mastgedeelte en y_i de zakking t.p.v. het zwaartepunt van m_i als de mast belast wordt gedacht door het eigen-gewicht, welke horizontaal werkt in de richting van de uitwijking bij vrij trillen.

$$(g = 9,81 \text{ m/s}^2)$$

rijkswaterstaat directie bruggen

LICHTMASTEN

2. AFLEIDING VAN DE GEBRUIKTE FORMULES.

2.1

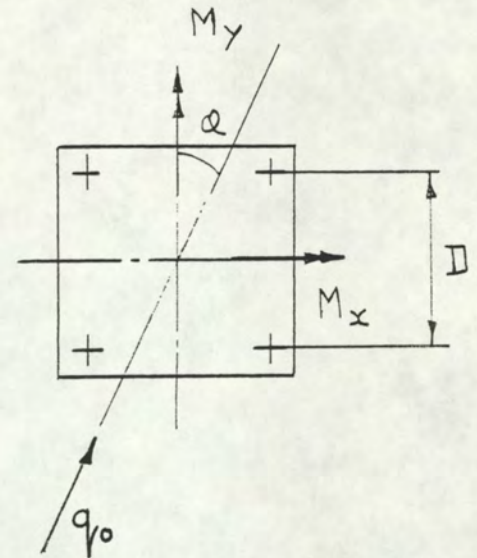
Afleiding maximum ankerbelasting :

Wind onder een hoek ϱ met de y-as:

$$q_x = q_0 \sin \varrho \longrightarrow M_y = M_{y0} \sin \varrho$$

$$q_y = q_0 \cos \varrho \longrightarrow M_x = M_{x0} \cos \varrho$$

$$F = \frac{M_{x0} \cos \varrho + M_{y0} \sin \varrho}{2 \Pi}$$



Een maximum wordt bereikt als:

$$\frac{dF}{d\varrho} = -M_{x0} \sin \varrho + M_{y0} \cos \varrho = 0$$

$$\downarrow$$

$$\text{tg } \varrho = \frac{M_{y0}}{M_{x0}}$$

$$\cos \varrho = \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \varrho} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}}\right)^2}}$$

$$\sin \varrho = \frac{\text{tg } \varrho}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varrho}} = \frac{\frac{M_{y0}}{M_{x0}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}}\right)^2}}$$

$$F_{\max} = \frac{M_{x0} + M_{y0} \frac{M_{y0}}{M_{x0}}}{2 \Pi \sqrt{1 + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}}\right)^2}}$$



$$F_{\max} = \frac{M_{x0}}{2 \Pi} \sqrt{1 + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}}\right)^2}$$

Voetplaten:

Bij de afleiding van de momenten die werken op de zwakste doorsneden van de voetplaat is van het volgende uitgegaan:

- 1- De mast wordt beschouwd tot het uiterste belast te zijn.

In deze situatie is geen verstijvende en versterkende invloed op de voetplaat te verwachten.

De voetplaat is derhalve "geïsoleerd" van de mast beschouwd.

De belasting op de voetplaat vanuit de mast per eenheid van lengte is dan gelijk aan de spanning maal de wanddikte van de mast.

- 2- Aangenomen is dat de voetplaat op de ankers gemonteerd is, d.w.z. dat de ankers behalve de trekkrachten ook de drukkrachten opnemen.

De invloed van de ondersabeling wordt in deze beschouwing dus verwaarloosd.

Voor de situatie waarbij de drukkrachten via de ondersabeling worden afgevoerd is te verwachten dat de resultaten in de grenstoestand niet veel zullen afwijken van de hier beschouwde situatie.

- 3- Bij het bepalen van statisch onbepaalde grootheden is de hulp ingeroepen van de plasticiteitsleer.

Dat een dergelijke beschouwing redelijk overeenkomt met een elastische beschouwing wordt gedemonstreerd aan de hand van een voorbeeld van een ring met veel (voor de berekening oneindig veel) ankers.

Verder is aangenomen dat de spanningen over een doorsnede in radiale richting konstant zijn. (losse-flensmethode)

2.2.1

Sterkte in de omgeving van de ankers:

$$M_{pl.} \approx \frac{1}{2} F_{max} \div \frac{1}{3} F_{max} = \frac{1}{6} t^2 \cdot \bar{\sigma}$$



$$\frac{5}{12} F_{max} = \frac{1}{6} t^2 \cdot \bar{\sigma}$$

$$t^2 = \frac{2,5 F_{max}}{\bar{\sigma}}$$



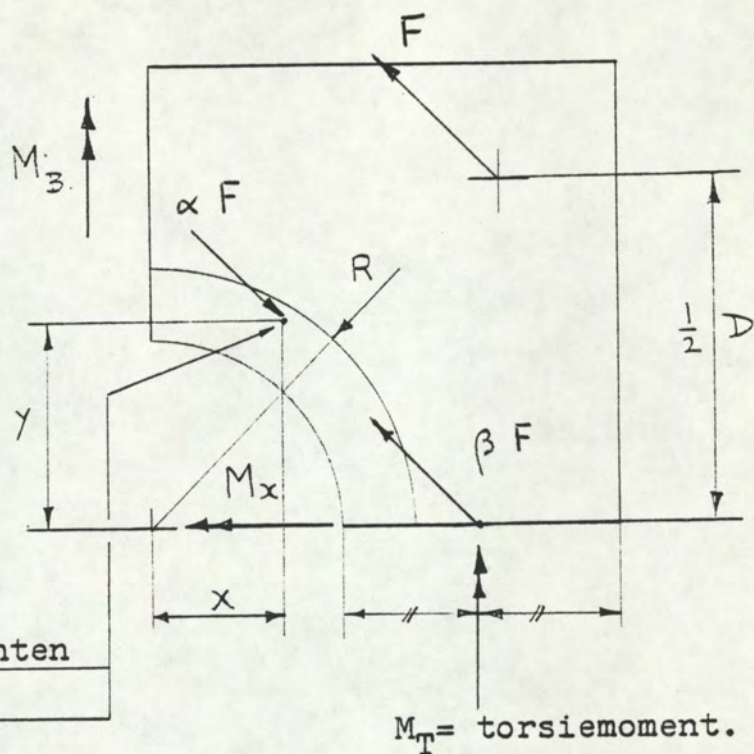
$$t = \sqrt{2,5 F_{max} / \bar{\sigma}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \text{voetplaatdikte} \\ \frac{5}{12} F = \text{moment per eenheid van breedte.} \\ \bar{\sigma} = \frac{\sigma_R}{1,5} \end{array} \right.$$

2.2.2

Sterkte over de
kleinste doorsnede:

zwaartepunt van krachten
vanuit de mast.

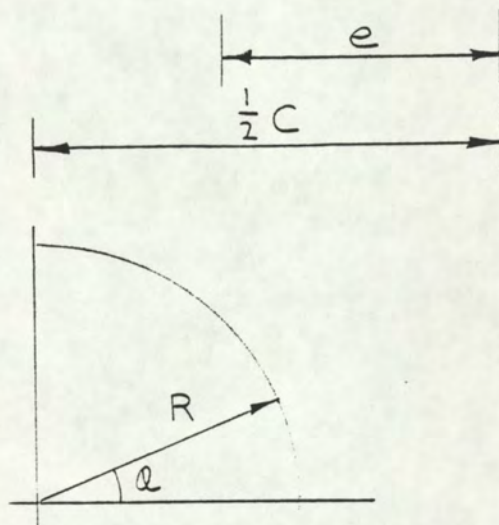


$$F + \beta F = \alpha F$$

$$\beta = \alpha - 1 \quad \dots\dots 1$$

$$\alpha F \cdot y = F \cdot \frac{1}{2} D$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2} D}{y} \quad \dots\dots 2$$



Verder: $M_B = F \cdot \frac{1}{2} D + \beta F \left(\frac{1}{2} C - \frac{1}{2} e \right) - \alpha F \cdot x - M_T \quad \dots\dots 3$

Belasting van de mast op de voetplaat:

$$dF_q = q_0 \sin \varphi \cdot R d\varphi = q_0 R \sin \varphi d\varphi$$

$$F_q = R q_0 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sin \varphi d\varphi = q_0 \cdot R$$

$$dM_{qx} = dF_q R \sin \varphi = q_0 R^2 \sin^2 \varphi d\varphi$$

$$M_{qx} = q_0 R^2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sin^2 \varphi d\varphi$$

$$M_{qx} = q_0 R^2 \left(\frac{1}{2} \varphi - \frac{1}{4} \sin 2\varphi \right) \Big|_0^{\frac{1}{2}\pi} = \frac{1}{4} \pi q_0 R^2$$

$$\rightarrow y = \frac{\frac{1}{4} \pi q_0 R^2}{q_0 R} = \underline{\underline{\frac{1}{4} \pi R}}$$

$$dM_{qy} = dF_q \cdot R \cos \varphi = q_0 R^2 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi$$

$$M_{qy} = q_0 R^2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sin \varphi d(\sin \varphi) = q_0 R^2 \frac{1}{2} \sin^2 \varphi \Big|_0^{\frac{1}{2}\pi}$$

$$M_{qy} = \frac{1}{2} q_0 R^2$$

$$\rightarrow x = \frac{\frac{1}{2} q_0 R^2}{q_0 R} = \underline{\underline{\frac{1}{2} R}}$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2} D}{y} = \frac{\frac{1}{2} D}{\frac{1}{4} \pi R} = \frac{2}{\pi} \frac{D}{R} \quad \left. \vphantom{\alpha = \frac{\frac{1}{2} D}{y}} \right\} \text{Substitueren in 3:}$$

$$\beta = \alpha - 1 = \frac{2}{\pi} \frac{D}{R} - 1$$

$$M_B = \frac{1}{2} F D \left\{ 1 + \left(\frac{2}{\pi} \frac{D}{R} - 1 \right) \left(\frac{c-e}{D} \right) - \frac{2}{\pi} \right\} - M_T$$

* Bij een plastische beschouwing geldt: $M_B = M_T$

$R = \frac{1}{2} d_m$; d_m = uitwendige diameter van de mast verminderd met de wanddikte.

$$M_B = \frac{1}{4} F \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 D}{\pi d_m} - 1 \right) \left(\frac{c-e}{D} \right) \right\}$$

$$\underline{\underline{M_B = \frac{1}{4} F \cdot D \cdot \psi}}$$

$$2 F \cdot D = M_x \quad (\text{moment op de gehele voetplaat})$$

$$\downarrow$$

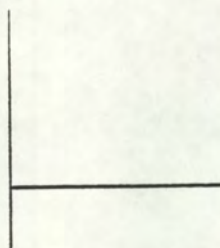
$$\underline{\underline{M_B = \frac{1}{8} M_x \cdot \psi}}$$

* $\bar{M}_B = \frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2 \cdot \ddot{\theta}$

$\bar{M}_T = \gamma \cdot e \cdot t^2 \cdot \left(\frac{\ddot{\theta}}{\sqrt{3}} \right)$

factor voor W_w \downarrow $\frac{\ddot{\theta}}{\sqrt{3}}$

$\frac{\gamma}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{6}$



$$\bar{M}_B = \bar{M}_T = \frac{1}{6} e t^2 \ddot{\theta}$$

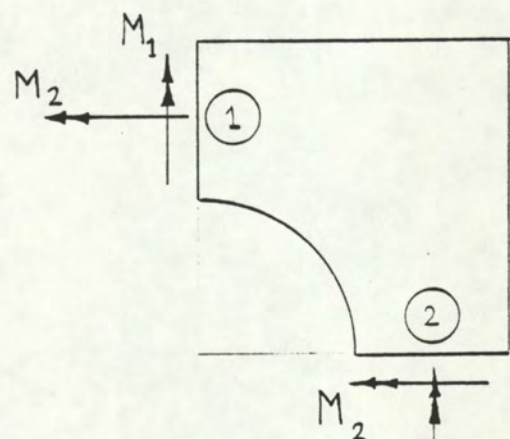
$$\bar{M}_B = \frac{1}{4} \bar{F} D \psi = \frac{1}{6} e t^2 \ddot{\theta}$$

$$\bar{F} = \frac{1}{6} t^2 \ddot{\theta} \cdot \frac{4}{\psi} \cdot \frac{e}{D}$$

Windrichting maakt een hoek α met de y-as:

$$M_1 = \frac{1}{4} F_1 D \cdot \psi$$

$$M_2 = \frac{1}{4} F_2 D \cdot \psi$$



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\frac{1}{4} F_1 D \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2} \\ T_2 &= \frac{\frac{1}{4} F_2 D \cdot \psi}{\frac{1}{6} e t^2 \cdot \sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \textcircled{1}$$

$$\left. \begin{aligned} G_2 &= \frac{\frac{1}{4} F_2 D \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2} \\ T_1 &= \frac{\frac{1}{4} F_1 D \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2 \sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \textcircled{2}$$

$$G_v = \frac{M_x}{W_x} \sqrt{1 + \left(\frac{F_y}{F_x}\right)^2}$$

$$G_{v1} = \frac{\frac{1}{4} F_1 D \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2} \sqrt{1 + \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2} = G_{v2}$$

$$F_1 = \frac{M_{x0}}{2D} \cdot \cos \alpha$$

$$F_2 = \frac{M_{y0}}{2D} \cdot \sin \alpha$$

$$G_v = \frac{\frac{1}{8} M_{x0} \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2} \cos \alpha \sqrt{1 + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}}\right)^2 \cdot \tan^2 \alpha}$$

$$\cos^2 \alpha \left\{ 1 + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}} \right)^2 \cdot \tan^2 \alpha \right\} = \cos^2 \alpha + \left(\frac{M_{y0}}{M_{x0}} \right)^2 \cdot \sin^2 \alpha$$

$$M_{y0} / M_{x0} < 1$$

De grootste waarde van G_v treedt dan op bij $\alpha = 0$, dus:

$$G_{\max} = \frac{\frac{1}{8} \cdot M_{x0} \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot t^2}$$

$$t = \sqrt{\frac{\frac{1}{8} \cdot M_{\max} \cdot \psi}{\frac{1}{6} \cdot e \cdot \sigma}}$$

M_{\max} is het grootste van beide momenten M_x en M_y waarbij voor een mast met enkele uithouder geldt:

$$M_y = (M_2 - M_1) \cdot 0,2 + M_1 + M_g$$

N.B: Bij normale uitvoering van de lichtmast zal M_2 maatgevend zijn. De invloed van het eigen-gewicht is voor dit geval zeer gering en mag derhalve verwaarloosd worden.

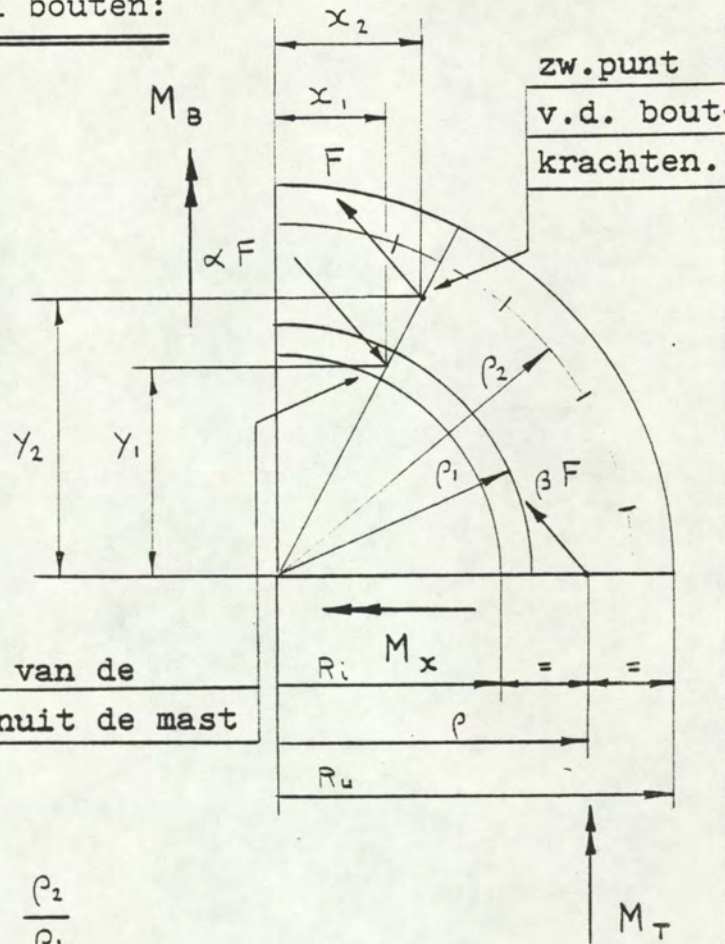
2.2.3

Ronde voetplaat met veel bouten:

Plastische beschouwing:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{2} \rho_1 & y_1 = \frac{1}{4} \pi \rho_1 \\ x_2 = \frac{1}{2} \rho_2 & y_2 = \frac{1}{4} \pi \rho_2 \end{cases}$$

zwaartepunt van de krachten vanuit de mast



$$\begin{cases} F y_2 = \alpha F y_1 \longrightarrow \alpha = \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ \frac{F y_2}{\alpha F y_1} = \frac{F x_2}{\alpha F x_1} \end{cases}$$

$$\longrightarrow \frac{F x_2}{\alpha F x_1} = 1 \longrightarrow F x_2 - \alpha F x_1 = 0$$

$$M_B = \beta F \cdot \left(\frac{R_u + R_i}{2} \right) - M_T \quad \beta = \alpha - 1$$

$$\text{Stel: } M_T \approx M_B \longrightarrow M_B = \frac{1}{2} F \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \left(\frac{R_u + R_i}{2} \right)$$

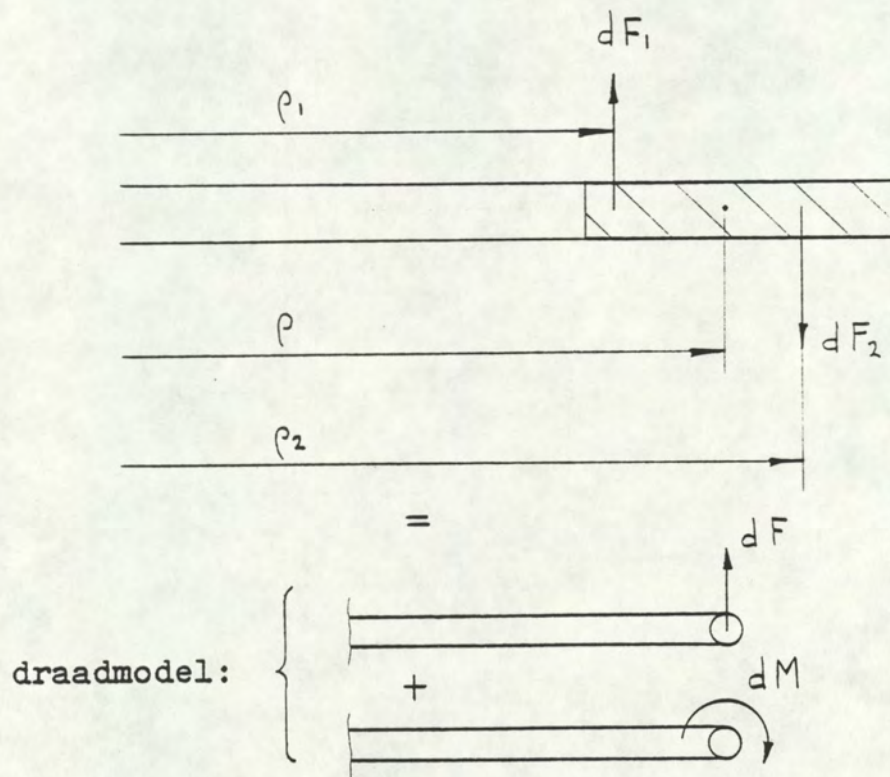
$$F = \frac{\frac{1}{4} M_x}{y_2} = \frac{M_x}{\pi \rho_2}$$

→ (4 kwadranten)

$$M_B = \frac{M_x}{2\pi \rho_2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \left(\frac{R_u + R_i}{2} \right)$$

Ronde voetplaat met veel bouten:
(nauwkeuriger berekening)

Elastische beschouwing:



$$dF_1 = q_1 \rho_1 d\varrho \quad dF_2 = q_2 \rho_2 d\varrho$$

Voorwaarde is dat:

$$dF_1 \cdot \rho_1 = dF_2 \cdot \rho_2$$

$$\downarrow$$

$$q_1 \rho_1^2 = q_2 \rho_2^2 \rightarrow q_1 \rho_1 = q_2 \frac{\rho_2^2}{\rho_1}$$

$$dF = dF_1 - dF_2 = \left(q_2 \frac{\rho_2^2}{\rho_1} - q_2 \rho_2 \right) d\varrho = q \rho d\varrho$$

$$q \rho = q_2 \rho_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right)$$

$$dM = dF_1 (\rho - \rho_1) + dF_2 (\rho_2 - \rho)$$

$$dM = dF_1 \rho - dF_1 \rho_1 + dF_2 \rho_2 - dF_2 \rho = dF_1 \rho - dF_2 \rho$$

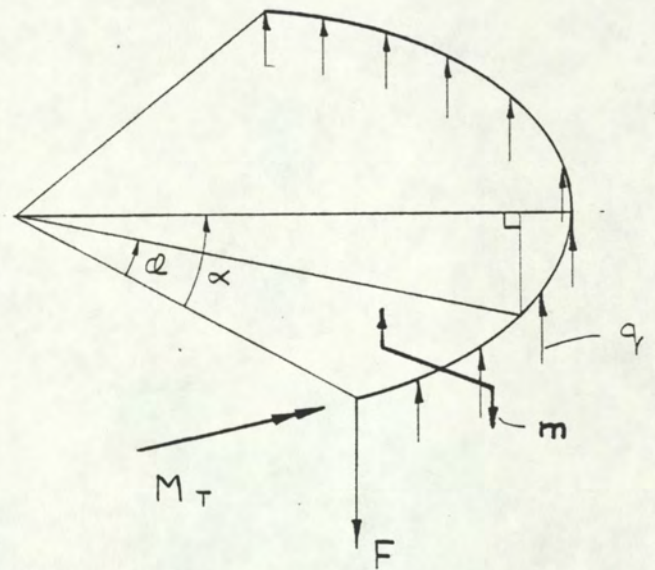
$$dM = (dF_1 - dF_2) \rho$$

$$\frac{dM}{\rho} = dF_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) = q_2 \rho_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) d\varphi$$

$$\downarrow \quad \quad \quad m = \frac{dM}{\rho d\varphi}$$

$$m = q_2 \rho_2 \left(\rho_2 / \rho_1 - 1 \right)$$

$$\text{dus: } m = q_1 \rho.$$



$$q = q_0 \sin \alpha$$

$$dF = q_0 \cdot \rho \sin \alpha \cdot d\alpha$$

$$F = q_0 \cdot \rho \cdot \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sin \alpha d\alpha = q_0 \cdot \rho$$

$$\begin{cases} M_{bF} = F \cdot \rho \cdot \sin \alpha \\ M_{bM_T} = M_T \cdot \sin \alpha \\ M_{TF} = -F \cdot \rho \cdot (1 - \cos \alpha) \\ M_{TM_T} = M_T \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad m = m_0 \cdot \sin \varrho = q_0 \cdot \rho \cdot \sin \varrho$$

$$dM_{bq} = -q \cdot \rho \, d\varrho \cdot \rho \sin(\alpha - \varrho) = -q_0 \rho^2 \sin(\alpha - \varrho) \sin \varrho \, d\varrho$$

$$dM_{bm} = m \cdot \rho \, d\varrho \cdot \sin(\alpha - \varrho) = q_0 \rho^2 \sin(\alpha - \varrho) \sin \varrho \, d\varrho$$

$$\underline{dM_{bq} + dM_{bm} = 0}$$

$$dM_{Tq} = q \cdot \rho \, d\varrho \cdot \rho \{1 - \cos(\alpha - \varrho)\} = q_0 \rho^2 \{1 - \cos(\alpha - \varrho)\} \sin \varrho \, d\varrho$$

$$dM_{Tm} = m \cdot \rho \, d\varrho \cos(\alpha - \varrho) = q_0 \rho^2 \cos(\alpha - \varrho) \sin \varrho \, d\varrho$$

$$dM_{Tq} + dM_{Tm} = q_0 \rho^2 \sin \varrho \, d\varrho$$

$$M_{Tq} + M_{Tm} = q_0 \rho^2 \int_0^\alpha \sin \varrho \, d\varrho = \underline{q_0 \rho^2 (1 - \cos \alpha)}$$

$$\Sigma M_b = F \rho \sin \alpha + M_T \sin \alpha = \underline{\underline{(F \rho + M_T) \sin \alpha}}$$

$$\Sigma M_T = -F \rho (1 - \cos \alpha) + M_T \cos \alpha + q_0 \rho^2 (1 - \cos \alpha) = \underline{\underline{M_T \cos \alpha}}$$

Bepaling statisch onbepaalde M_T :

$$\int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{M_b \bar{M}_b \rho d\alpha}{EI} + \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{M_T \bar{M}_T \rho d\alpha}{GI_p} = 0$$

$$M_b = (F\rho + M_T) \sin \alpha \quad \bar{M}_b = \sin \alpha$$

$$M_T = M_T \cos \alpha \quad \bar{M}_T = \cos \alpha$$

$$\frac{(F\rho + M_T)\rho}{EI} \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{\frac{1}{4} \pi \rho (F\rho + M_T)}{EI}$$

$$\frac{M_T \rho}{GI_p} \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \cos^2 \alpha d\alpha = \frac{\frac{1}{4} \pi \rho M_T}{GI_p}$$

$$\frac{F\rho + M_T}{EI} + \frac{M_T}{GI_p} = 0$$

$$M_T = - \frac{F\rho}{\left(\frac{EI}{GI_p} + 1 \right)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$$I = \frac{b t^3}{12(1-\mu^2)} \quad \text{en} \quad I_p = \frac{b t^3}{C}$$

$$\frac{EI}{GI_p} = \frac{2(1+\mu)C}{12(1-\mu^2)} = \frac{C}{6(1-\mu)}$$

Afhankelijk van b/t varieert C van $5 \rightarrow 3$

$$\text{Stel: } C = 6(1-\mu) = 6 \times 0,7 = 4,2 \rightarrow b/t \approx 3 \rightarrow \frac{EI}{GI_p} = 1.$$

$$M_T = -\frac{1}{2} F\rho$$

De momenten in de ring worden nu:

$$M_b = \frac{1}{2} F \rho \cdot \sin \alpha$$

$$M_T = -\frac{1}{2} F \rho \cdot \cos \alpha$$

$$M_{b, \max} = -M_{T, \max} = \frac{1}{2} F \rho$$

$$M_x = \pi q_1 \rho_1^2 = \pi q_2 \rho_2^2 \quad (M_x \text{ is het moment op voetplaat})$$

$$F = q \rho = q_1 \rho_1 - q_2 \rho_2 = q_2 \rho_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right)$$

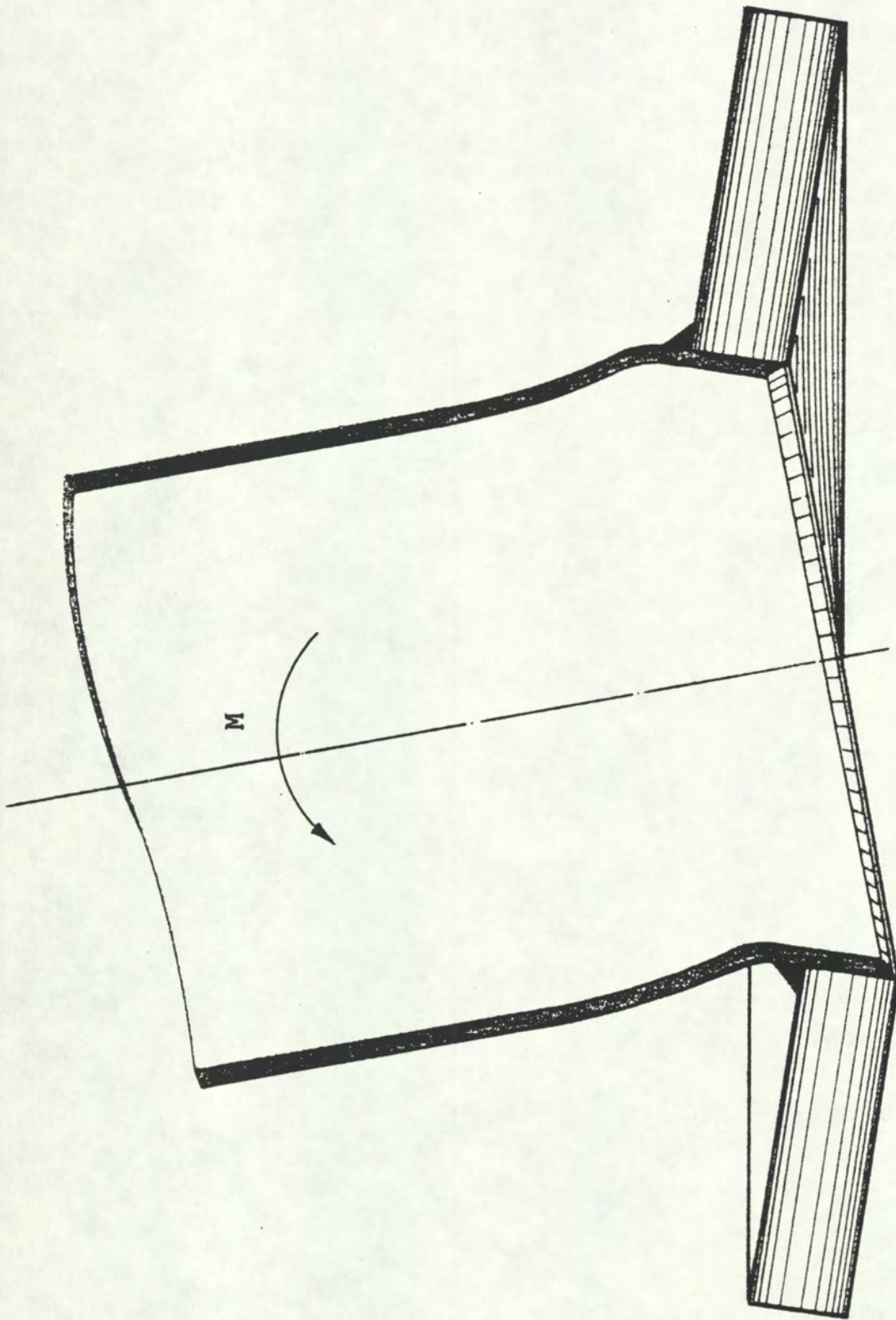
$$\rightarrow q_2 \rho_2 = \frac{M_x}{\pi \rho_2} \quad \downarrow$$

$$F = \frac{M_x}{\pi \rho_2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right)$$

$$\text{en: } M_{\max} = \frac{1}{2} F \rho$$



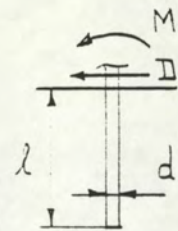
$$M_{\max} = \frac{M_x}{2\pi \rho_2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \left(\frac{R_u + R_i}{2} \right)$$



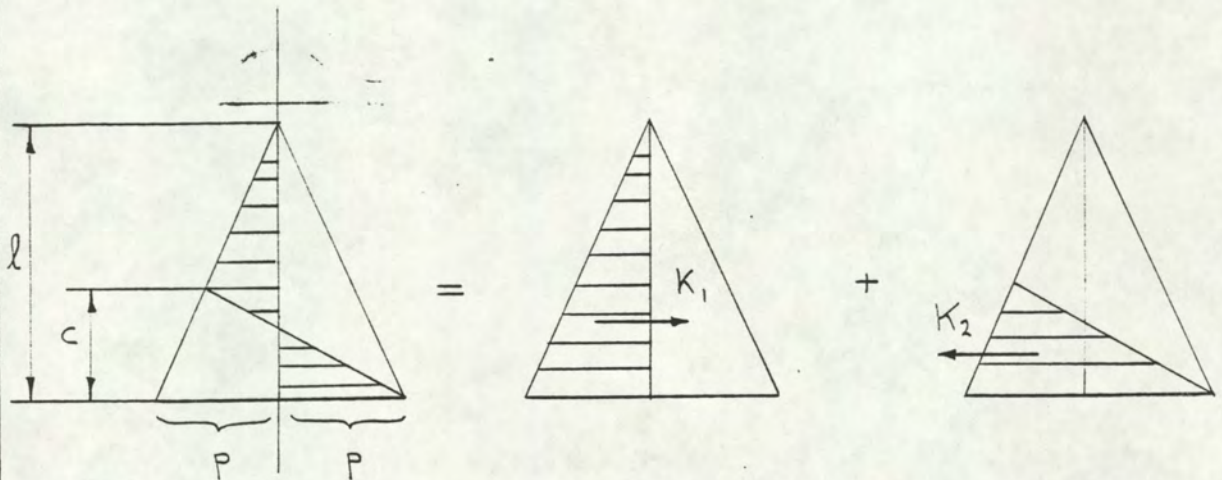
Vervorming van de voetplaat en de mast t.g.v. het moment.

2.3

In de grond ingeklemde mast:



Spanningsverdeling volgens onderstaande figuur:



Zie: -Weg -en Waterbouwkunde I door: P.J.Colijn en J.Potma.
-Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes, door: H.Krey.

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot l \cdot d \cdot p \quad \text{en} \quad K_2 = \frac{1}{2} \cdot c \cdot d \cdot 2p = c \cdot d \cdot p$$

$$D = K_1 - K_2 = \left(\frac{1}{2} l \cdot d - c \cdot d \right) p = \frac{1}{2} l \cdot d \cdot p \left\{ 1 - \frac{2c}{l} \right\}$$

$$M + D \cdot l = K_1 \cdot \frac{1}{3} l - K_2 \cdot \frac{1}{3} c = \frac{1}{6} d \cdot l^2 p - \frac{1}{6} d \cdot c^2 \cdot 2p$$

$$M + D \cdot l = \frac{1}{6} d \cdot l^2 p \left\{ 1 - 2 \frac{c^2}{l^2} \right\}$$

$$\frac{c}{l} = \rho \rightarrow M + D \cdot l = \frac{1}{6} d l^2 p (1 - 2\rho^2)$$



$$p = \frac{M + D \cdot l}{\frac{1}{6} d l^2} \cdot \frac{1}{1 - 2\rho^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \frac{1}{6} d l^2 \\ \alpha = \frac{1}{1 - 2\rho^2} \end{array} \right.$$

$$p = \frac{M + D \cdot l}{W} \cdot \alpha$$

$$\frac{M + \Pi \cdot l}{\Pi \cdot l} = \frac{\frac{1}{6} d \cdot l^2 \cdot \rho \left(1 - 2 \frac{c^2}{l^2}\right)}{\frac{1}{2} d \cdot l^2 \cdot \rho \left(1 - 2 \frac{c}{l}\right)} = \frac{\left(1 - 2 \cdot \frac{c^2}{l^2}\right)}{3 \left(1 - 2 \cdot \frac{c}{l}\right)}$$

$$\frac{M + \Pi \cdot l}{\Pi \cdot l} = \frac{1 - 2 \rho^2}{3(1 - 2\rho)} = \beta$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - 2\rho^2} \longrightarrow 1 - 2\rho^2 = \frac{1}{\alpha} \quad \text{of:} \quad \rho = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2\alpha}}$$

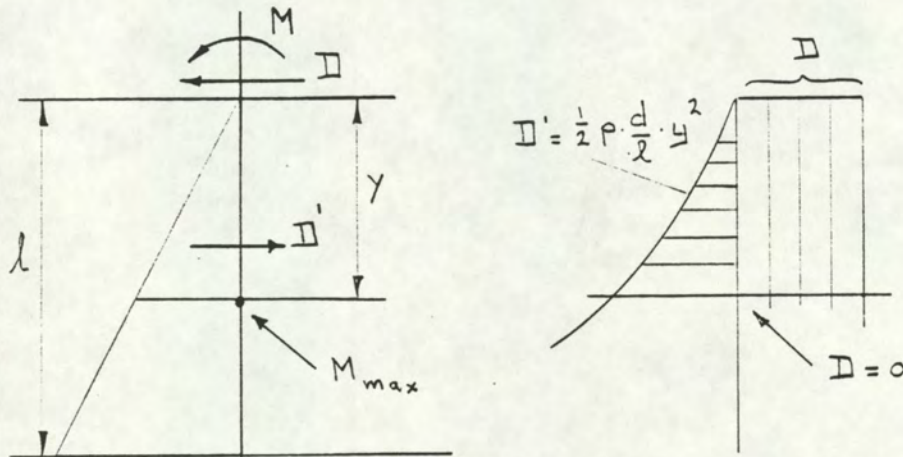
$$\beta = \frac{\frac{1}{\alpha}}{3 \left\{1 - \sqrt{2 - \frac{2}{\alpha}}\right\}} \longrightarrow \beta = \frac{1}{3\alpha \left\{1 - \sqrt{2 - \frac{2}{\alpha}}\right\}}$$

$$P_e = \rho \cdot g \cdot (\lambda_p - \lambda_a) \cdot \left\{1 + \frac{2 \cdot l}{3 \cdot d}\right\} \cdot l$$

→ Zie: Weg -en Water-
bouwkunde I.

Bepaling van het maximale moment:

Ligt M_{\max} op een afstand y onder de oppervlakte, dan moet hier de dwarskracht nul zijn:



$$p_y = p \cdot \frac{y}{l} \rightarrow q = p \cdot \frac{y}{l} \cdot d$$

$$dD' = p \cdot \frac{y}{l} \cdot d \cdot dy \rightarrow D' = D = \int p \cdot \frac{y}{l} \cdot d \cdot dy = \frac{1}{2} p \cdot \frac{d}{l} \cdot y^2$$

$$y = \sqrt{\frac{2D \cdot l}{p \cdot d}}$$

$$M_{\max} = M + D \cdot y - D \cdot \frac{1}{3} y$$

$$M_{\max} = M + \frac{2}{3} D \cdot y$$

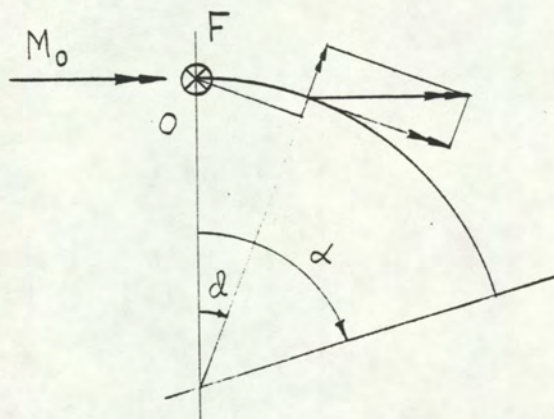
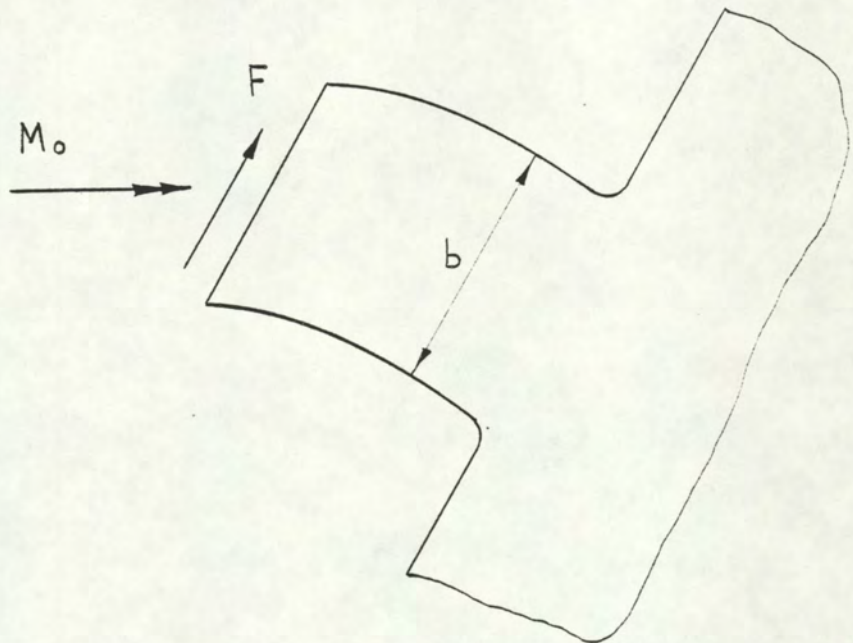
$$p = \frac{M + D \cdot l}{W} \cdot \alpha = \frac{M + D \cdot l}{D \cdot l} \cdot \frac{D \cdot l}{W} \cdot \alpha = \beta \cdot \frac{D \cdot l}{W} \cdot \alpha$$

$$p = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{D \cdot l}{\frac{1}{6} d l^2} \rightarrow \text{substitueren in: } y = \sqrt{\frac{2D \cdot l}{p \cdot d}}$$

$$M_{\max} = M + \frac{2}{3} D \cdot \sqrt{\frac{l^2}{3 \cdot \alpha \cdot \beta}}$$

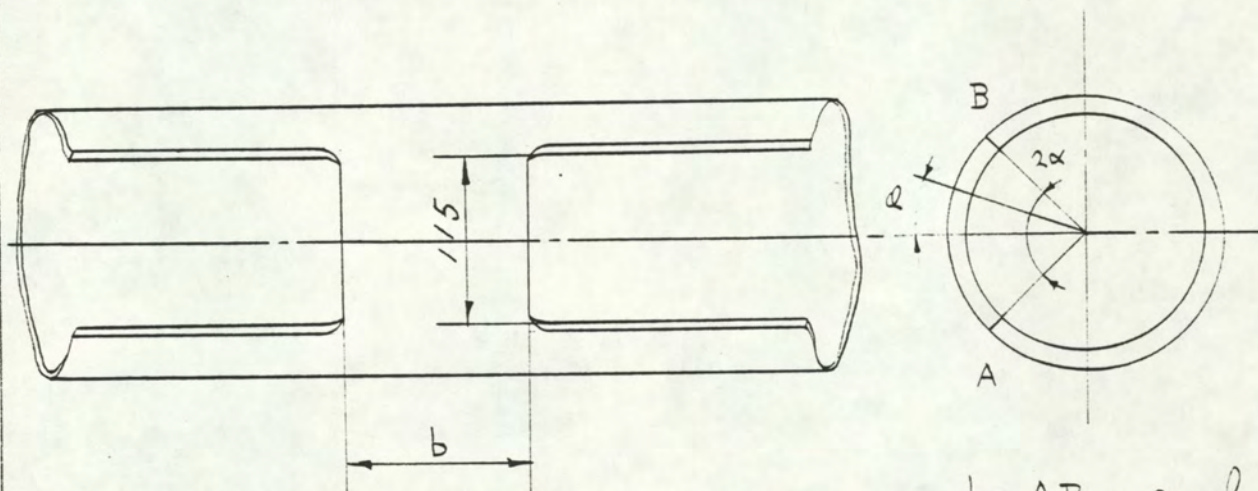
2.4

Berekening van het "dammetje" op buiging en torsie:



$$M_T = F\rho(1 - \cos\alpha) + M_0 \cos\phi$$

$$M_B = -F\rho \sin\alpha + M_0 \sin\phi$$



$$l_{g AB} = 2 \times l$$

"Wringing" ten gevolge van het torsie-moment:

Bepaling statisch onbepaald moment t.p.v. O:

$$\bar{M} = 1 \cdot \cos \varphi ; \quad \bar{M} ds = \rho \cos \varphi d\varphi$$

$$G \cdot I_T \cdot \theta = \int M_T \cdot \bar{M} \rho d\varphi = \int \{ F\rho(1 - \cos \varphi) + M_0 \cos \varphi \} \rho \cos \varphi d\varphi$$

$$G \cdot I_T \cdot \theta = F\rho^2 \int \cos \varphi d\varphi - F\rho^2 \int \cos^2 \varphi d\varphi + M_0 \rho \int \cos^2 \varphi d\varphi$$

$$= F\rho^2 \left[\sin \varphi - \frac{1}{2} \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \cos \varphi \right]_0^\alpha + M_0 \rho \left[\frac{1}{2} \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \cos \varphi \right]_0^\alpha$$

$$= F\rho^2 \left[\sin \varphi - \frac{1}{2} (\varphi + \sin \varphi \cos \varphi) \right]_0^\alpha + M_0 \rho \frac{1}{2} \left[\varphi + \sin \varphi \cos \varphi \right]_0^\alpha$$

$$G \cdot I_T \cdot \theta = F\rho^2 \left[\sin \alpha - \frac{1}{2} (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha) \right] + M_0 \rho \cdot \frac{1}{2} \left[\alpha + \sin \alpha \cos \alpha \right]$$

$$\theta = 0 \longrightarrow M_0 = - F\rho \left\{ \frac{2 \sin \alpha}{\alpha + \sin \alpha \cos \alpha} - 1 \right\}$$

$$\underline{\underline{M_0 = - F\rho \cdot \beta}} \quad \underline{\underline{\beta = \left\{ \frac{2 \sin \alpha}{\alpha + \sin \alpha \cos \alpha} - 1 \right\}}}$$

$$M_T = F\rho \{ 1 - (1 + \beta) \cos \varphi \}$$

$$\underline{\underline{M_T = F\rho \lambda}} \quad \underline{\underline{\lambda = \{ 1 - (1 + \beta) \cos \alpha \}}}$$

$$\alpha = 45^\circ \longrightarrow \beta = 0,1002$$

$$\varrho = 0^\circ$$

$$\lambda = -0,1002 \quad (M_T = F \cdot \rho \cdot \lambda)$$

$$\varrho = 15^\circ$$

$$-0,0627$$

$$\varrho = 22,5^\circ$$

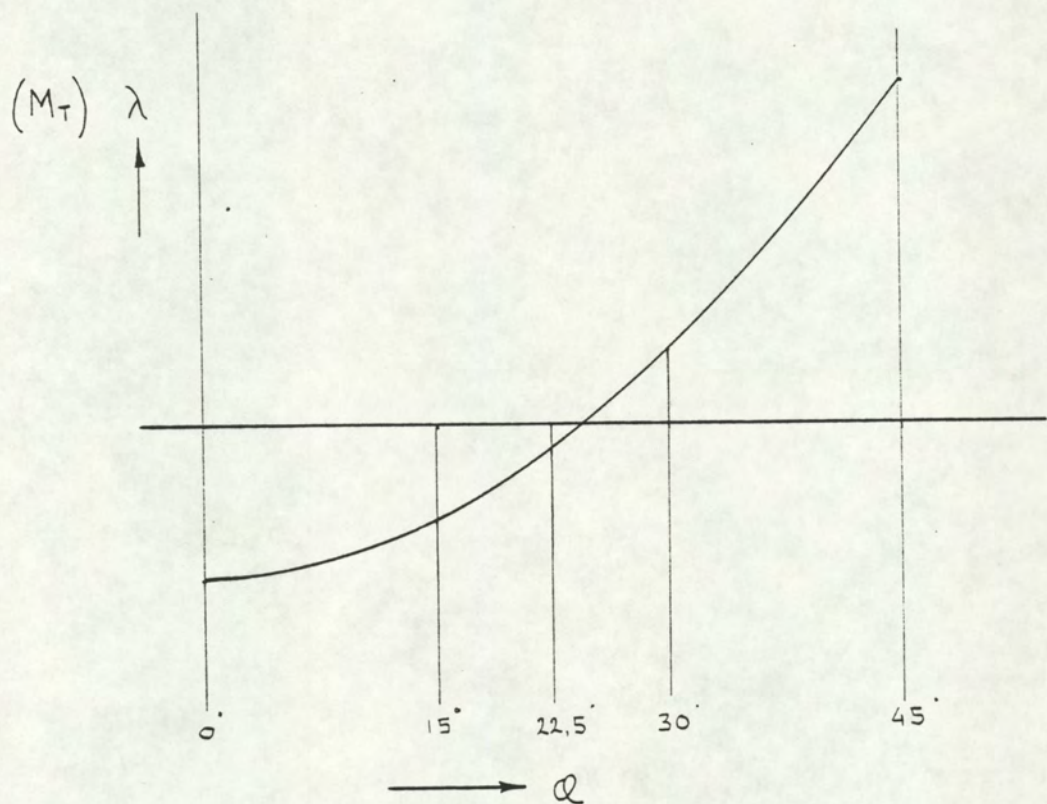
$$-0,0165$$

$$\varrho = 30^\circ$$

$$+0,0472$$

$$\varrho = 45^\circ$$

$$+0,2220$$

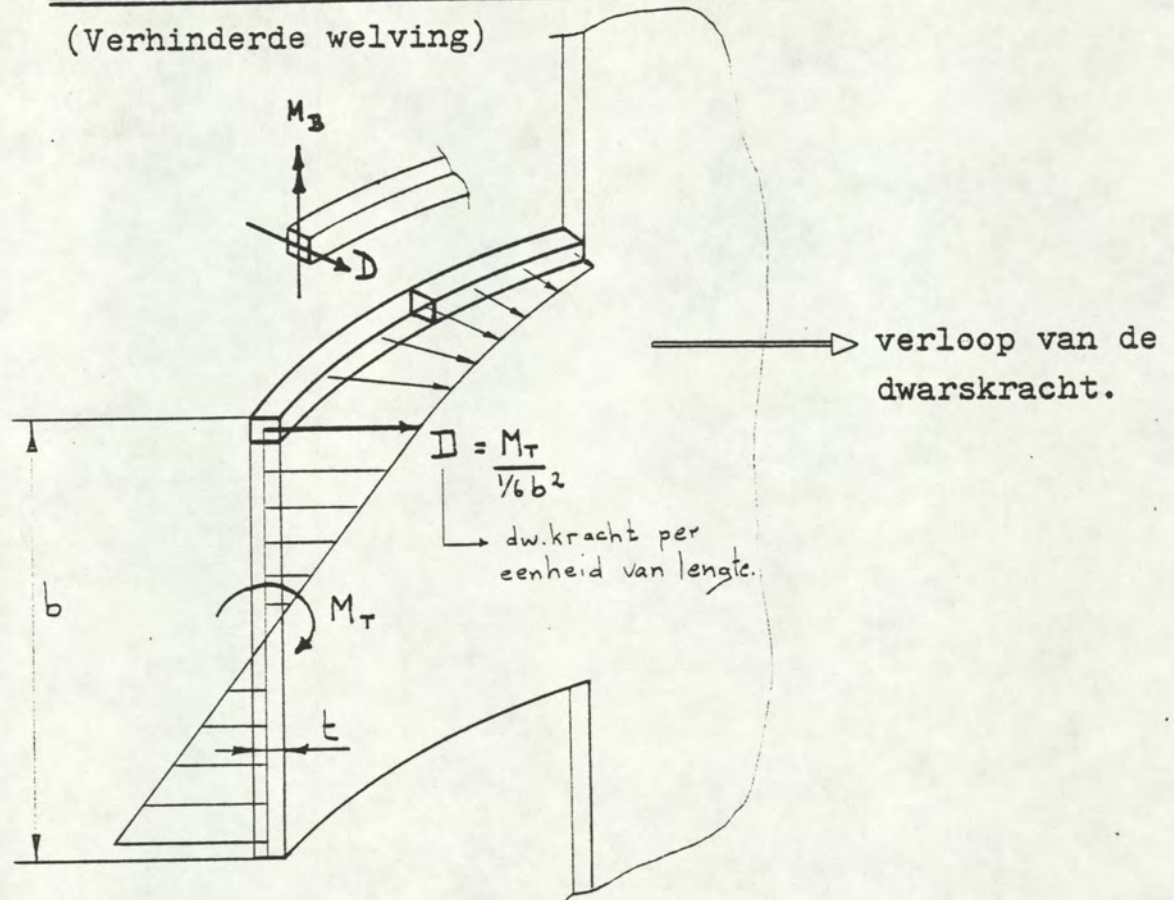


$$\lambda : 1 \text{ cm} \hat{=} 0,05$$

$$\varrho : 1 \text{ cm} \hat{=} 5^\circ$$

"Buiging" ten gevolge van het torsie-moment:

(Verhinderde welving)



$$D = \frac{M_T}{\frac{1}{6} b^2}$$

$$M_B = \int D ds = \int D \cdot \rho d\alpha + C$$

$$M_T = F\rho(1 - \cos\alpha) + M_0 \cos\alpha$$

$$D = \frac{F\rho(1 - \cos\alpha) + M_0 \cos\alpha}{\frac{1}{6} b^2} \dots \text{verloop van de dwarskracht.}$$

$$\frac{1}{6} b^2 \cdot D = F\rho(1 - \cos\alpha) + M_0 \cos\alpha$$

$$\frac{1}{6} b^2 \cdot M_b = \int F\rho^2(1 - \cos\alpha) d\alpha + \int M_0 \rho \cos\alpha d\alpha + C$$

$$\frac{1}{6} b^2 \cdot M_b = F\rho^2(\alpha - \sin\alpha) + M_0 \rho \sin\alpha + C$$

$$\alpha = 0 \rightarrow M_b = 0 \rightarrow C = 0$$

$$M_b = \frac{F\rho^2(\alpha - \sin\alpha) + M_0 \rho \sin\alpha}{\frac{1}{6} b^2}$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{M} \cos \varphi}{1/6 b^2} = \frac{\cos \varphi}{1/6 b^2}$$

$$\bar{M}_b = \int \frac{\cos \varphi}{1/6 b^2} \cdot \rho d\varphi = \frac{\rho \sin \varphi}{1/6 b^2}$$

$$\int M_b \bar{M}_b \rho d\varphi = \rho^2 \int \frac{\{F\rho^2(\varphi \sin \varphi - \sin^2 \varphi) + M_0 \rho \sin^2 \varphi\} d\varphi}{(1/6 b^2)^2}$$

$$\int_0^\alpha \varphi \sin \varphi d\varphi = \left[\sin \varphi - \varphi \cos \varphi \right]_0^\alpha = \sin \alpha - \alpha \cos \alpha$$

$$\begin{aligned} \int_0^\alpha \sin^2 \varphi d\varphi &= \left[\frac{1}{2} \varphi - \frac{1}{4} \sin 2\varphi \right]_0^\alpha = \frac{1}{2} \alpha - \frac{1}{4} \sin 2\alpha \\ &= \frac{1}{2} \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^\alpha \varphi \sin \varphi d\varphi - \int_0^\alpha \sin^2 \varphi d\varphi &= \sin \alpha - \alpha \cos \alpha - \frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ &= \sin \alpha - \alpha \cos \alpha + \frac{1}{2} (\sin \alpha \cos \alpha - \alpha) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\rho^2} EI \cdot \delta = \frac{F\rho^2 \left\{ \sin \alpha - \alpha \cos \alpha + \frac{1}{2} (\sin \alpha \cos \alpha - \alpha) \right\} + M_0 \rho \frac{1}{2} (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)}{(1/6 b^2)^2}$$

$$EI \cdot \delta = 0 \longrightarrow$$

$$F\rho \left\{ \sin \alpha - \alpha \cos \alpha + \frac{1}{2} (\sin \alpha \cos \alpha - \alpha) \right\} = -\frac{1}{2} M_0 \rho (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)$$

$$M_0 = -F\rho \left\{ \frac{(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)^2}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} - 1 \right\}$$

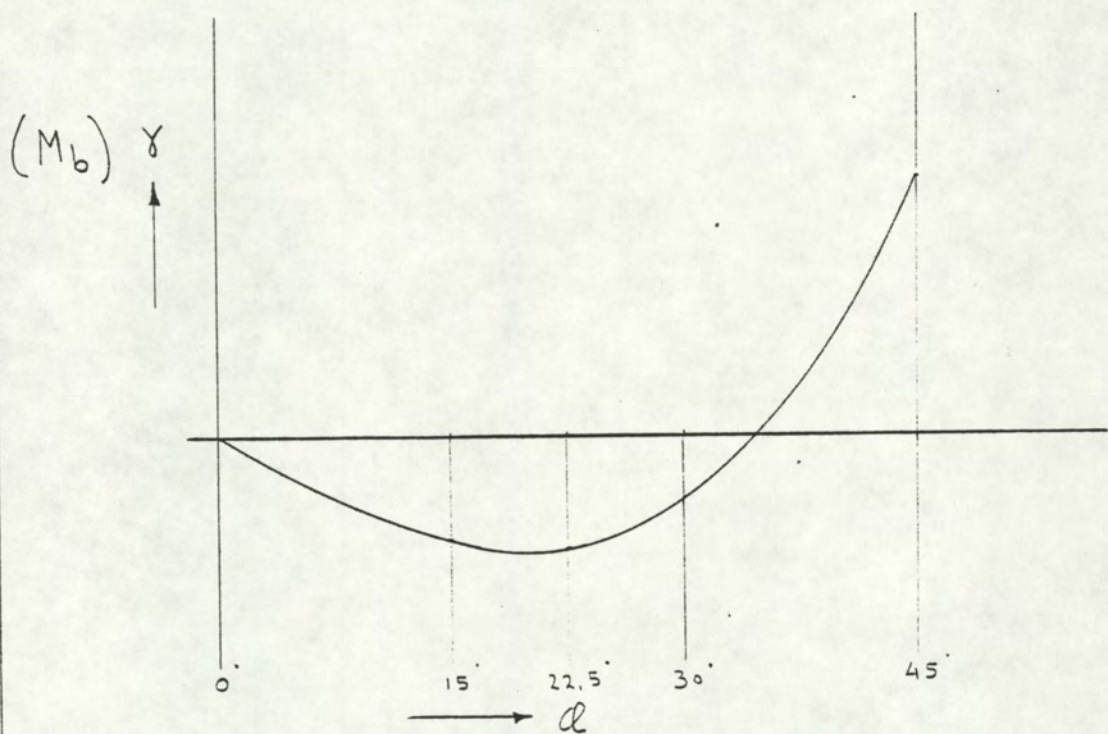
$$\underline{\underline{M_0 = -F\rho \psi}} \quad \underline{\underline{\psi = \left\{ \frac{(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)^2}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} - 1 \right\}}}$$

$$M_b = \frac{F\rho^2 \{ \varphi - (1 + \psi) \sin \varphi \}}{1/6 b^2} = \underline{\underline{\frac{F\rho^2 \gamma}{1/6 b^2}}}$$

$$\underline{\underline{\gamma = \{ \varphi - (1 + \psi) \sin \varphi \}}}$$

$$\alpha = 45^\circ \longrightarrow \psi = 0,0634$$

$\varrho = 0^\circ$	$\gamma = 0$	$\left(M_b = \frac{F \cdot \rho^2 \cdot \gamma}{1/6 b^2} \right)$
$\varrho = 15^\circ$	- 0,01343	
$\varrho = 22,5^\circ$	- 0,01425	
$\varrho = 30^\circ$	- 0,00810	
$\varrho = 45^\circ$	+ 0,03346	



$$\gamma : 1 \text{ cm} \hat{=} 0,01$$

$$\varrho : 1 \text{ cm} \hat{=} 5^\circ$$

De vervormingen door het buigend-moment M_B loodrecht op de wand, zijn in de voorgaande beschouwingen niet in rekening gebracht, omdat de invloed daarvan, t.g.v. de verhoudingsgewijs zeer grote stijfheid die bij dit moment behoort, te verwaarlozen is.

De formules die in het voorgaande zijn afgeleid hebben betrekking op een situatie waarbij het door het "ombuigen" van de belasting optredende wringend-moment M_T , of alleen door torsie of alleen door verhinderde welving wordt overgedragen.

In werkelijkheid wordt een deel van M_T overgedragen door torsie en een deel door verhinderde welving.

De relatieve waarde van het aandeel van de verhinderde welving wordt hier aangeduid met het symbool χ ; het aandeel van de torsie is dan: $1 - \chi$.

De grootte van χ is te bepalen uit de vervormingsfunctie.

Deze vervormingsfunctie vormt de oplossing van een differentiaal-vergelijking.

Het oplossen van deze differentiaal-vergelijking is geen eenvoudige opgave; derhalve wordt hier volstaan met een benaderingsmethode.

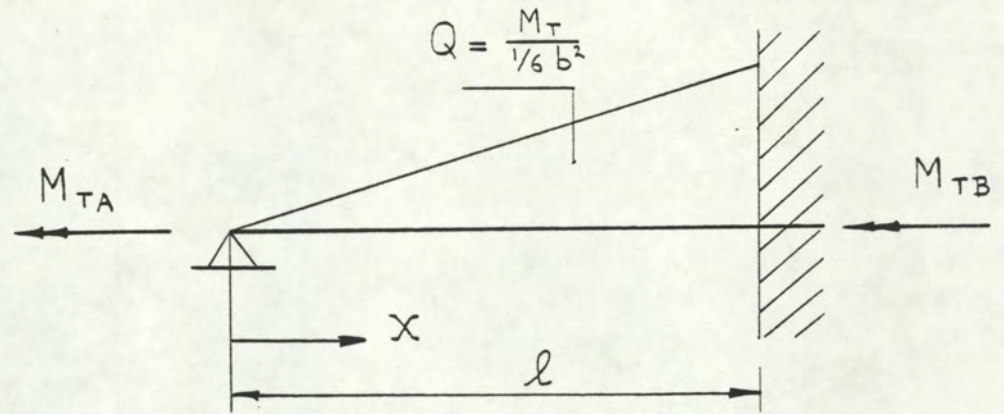
Daartoe wordt een plaat, die aan één zijde is opgelegd en aan de tegenoverliggende zijde is ingeklemd, als rekenmodel genomen.

Op deze plaat staat een koppel(per eenheid van lengte) dat vanaf de opgelegde zijde lineair aangroeit; zoals op de volgende bladzijde is aangegeven.

Het resultaat geeft een voor de gehele lengte constante waarde van χ .

Strikt genomen is dit alleen het geval bij een aan twee zijden opgelegde plaat met een koppel in de vorm van een halve sinusgolf.

Het rekenen met een constante waarde is in dit geval echter acceptabel.

Bepaling van χ :

$$Q = \frac{M_{TA} + M_{TB}}{\frac{1}{6} b^2}$$

$$Q \cdot x = \frac{M_{T1}}{\frac{1}{6} b^2}$$

$$Q(1-x) = \frac{M_{T2}}{\frac{1}{6} b^2}$$

Verhinderde welving:

$$y_{\max} = \frac{Qx \cdot l^3}{210 EI} = \frac{6 M_{T1} \cdot l^3}{210 b^2 EI}$$

$$y_{\max} = \varrho_{\max} \times \frac{1}{2} b$$

$$\varrho_{\max} = \frac{M_{T1} \cdot 12 l^3}{210 \cdot b^3 EI}$$

$$EI = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\mu^2)}$$

$$M_{T1} = \varrho_{\max} \cdot \frac{210}{12} \cdot \frac{b^3}{l^3} \cdot \frac{E t^3}{12(1-\mu^2)}$$

Torsie:

$$M_T = \frac{1}{3} M_{T2} \left(1 - 3 \frac{x^2}{l^2} \right) = G \cdot I_T \frac{d\varrho}{dx}$$

$$\varrho = \frac{\frac{1}{3} M_{T2}}{G \cdot I_T} \left(\frac{x}{l} - \frac{x^3}{l^3} \right)$$

$$\varrho_{\max} = \frac{2}{27} \sqrt{3} \cdot \frac{M_{T2} \cdot l}{G \cdot I_T}$$

$$M_{T2} = \varrho_{\max} \cdot \frac{G \cdot I_T}{l} \cdot \frac{g\sqrt{3}}{2}$$

$$G \cdot I_T = \frac{E}{2(1-\mu)} \cdot \frac{1}{3} t^3 b = \frac{E t^3 b}{12(1-\mu^2)} \cdot 2(1-\mu)$$

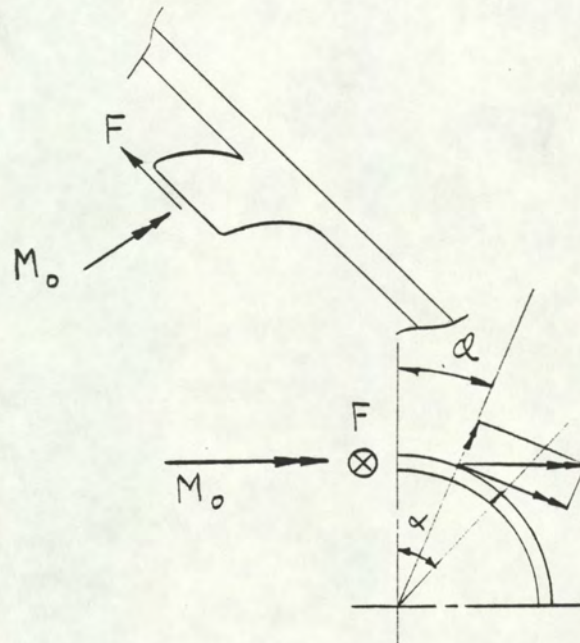
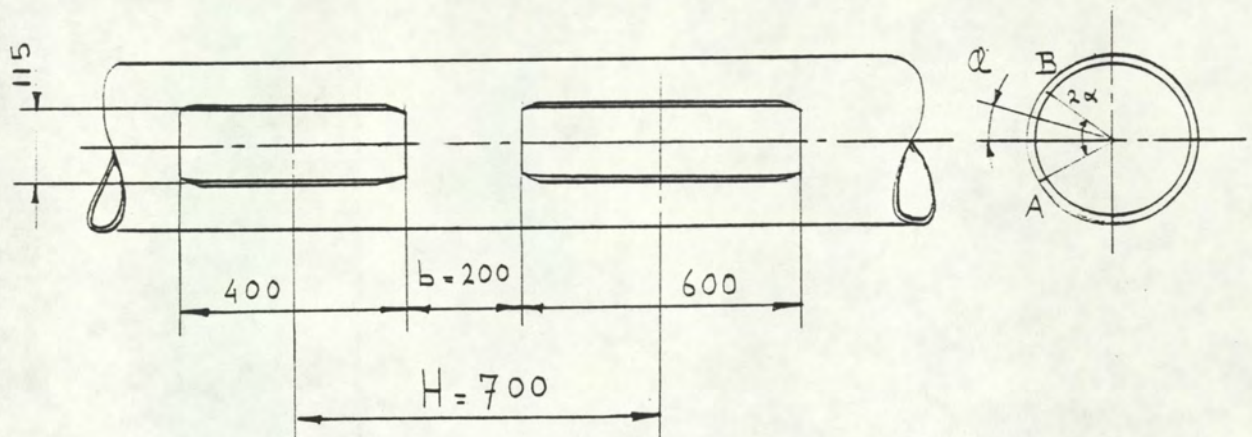
$$M_{T2} = \varrho_{\max} \cdot g\sqrt{3} \cdot (1-\mu) \cdot \frac{b}{l} \cdot \frac{E t^3}{12(1-\mu^2)}$$

$$\chi = \frac{M_{T1}}{M_{T1} + M_{T2}} = \frac{\frac{210}{12} \cdot \frac{b^2}{l^2}}{\frac{210}{12} \frac{b^2}{l^2} + g\sqrt{3} \cdot (1-\mu)}$$

$$\chi = \frac{1}{1 + 0,624 \frac{l^2}{b^2}}$$

2.4.1

Bepaling $\sigma_{b1}, \sigma_{b2}, \tau \rightarrow \sigma_i$ in het "dammetje" :



- ρ = gemiddelde straal. $\rho = \frac{1}{2}(d-t)$
- d = buitendiameter mast.
- t = wanddikte van de pijp.

"Wringing" t.g.v. torsie-moment:

$$\tau = M_T / 2\pi \rho^2 t \longrightarrow \tau t = M_T / 2\pi \rho^2$$

$$F = \tau t H = M_T H / 2\pi \rho^2$$

$$M_T = F \cdot \rho \cdot \lambda_{\max} (1 - \chi)$$

$$m_T = \frac{M_T \cdot H \cdot \lambda_{\max} (1 - \chi)}{2\pi \rho b}$$

$$\tau = \frac{m_T}{\frac{1}{3} t^2}$$

$$\tau = \frac{3 \cdot M_T \cdot H \cdot \lambda_{\max} (1 - \chi)}{2\pi \rho b \cdot t^2}$$

$$\alpha = (\varrho) = \text{bg} \sin \frac{115}{d - 2t}$$

$$\lambda = 1 - (1 + \beta) \cos \varrho$$

$$\beta = \frac{2 \sin \alpha}{\alpha + \sin \alpha \cos \alpha} - 1$$

$$\chi = \frac{1}{1 + 0,624 \frac{l^2}{b^2}}$$

$$(l = \frac{1}{2} \text{bg AB})$$

$$(2l = \alpha \cdot d)$$

"Buiging" t.g.v. torsie-moment:

$$m_b = \frac{F \cdot \rho^2 \cdot \gamma \cdot \chi}{\frac{1}{6} b^2}$$

$$F = M_T \cdot H / 2\pi \rho^2$$

$$m_b = \frac{6 M_T \cdot H \cdot \gamma \cdot \chi}{2\pi b^2}$$

$$\gamma = \varrho - (1 + \psi) \sin \varrho$$

$$\psi = \frac{2(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} - 1$$

$$m_b = \frac{6 \cdot M_T \cdot H \cdot \gamma \cdot x}{2 \pi b^2}$$

$$\sigma_{b1} = \frac{m_b}{1/6 t^2} \longrightarrow \sigma_{b1} = \frac{\gamma \cdot M_T \cdot H \cdot 6x}{2 \pi b^2 \cdot \frac{1}{6} t^2}$$

of:
$$\sigma_{b1} = \frac{18 \cdot \gamma \cdot M_T \cdot H \cdot x}{\pi \cdot b^2 \cdot t^2}$$

BUIGING:

$$M_b = F \rho \sin \alpha - M_o \sin \alpha \longrightarrow M_b = F \rho \left(1 - \frac{M_o}{F \rho} \right) \sin \alpha$$

$$\begin{pmatrix} M_o' = -F \rho \beta \\ M_o'' = -F \rho \psi \end{pmatrix} \longrightarrow M_o = -F \rho \{ \psi x + \beta (1-x) \}$$

$$M_b = F \rho \{ 1 + \psi x + \beta (1-x) \} \sin \alpha$$

$$\sigma_{b2} = M_b / \frac{1}{6} t b^2$$

$$(F = M_T H / 2 \pi \rho^2)$$

$$\sigma_{b2} = \frac{M_T \cdot H \sin \alpha \{ 1 + \psi x + \beta (1-x) \}}{2 \pi \rho \cdot \frac{1}{6} t b^2}$$

$$\sigma_{b2} = \frac{6 \cdot M_T \cdot H \sin \alpha \{ 1 + \psi x + \beta (1-x) \}}{2 \pi \rho \cdot t b^2}$$

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{b1} + \sigma_{b2})^2 + 3 \tau^2} \leq 0,6 \bar{\sigma} \longrightarrow (\text{i.v.m. hogere spanning \perp hierop met tegengesteld teken})$$

2.5

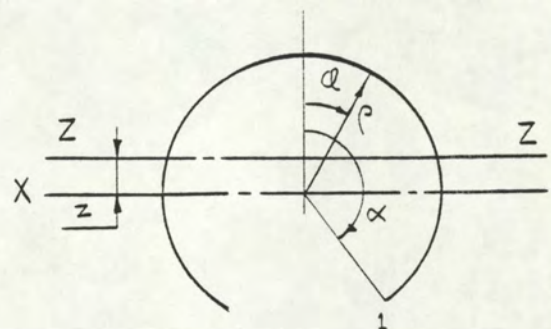
Bepaling weerstandsmoment van de pijp t.p.v. de
deur:

Ten opzichte van de X-X as:

$$dA = t \cdot \rho d\varphi$$

$$\downarrow$$

$$\frac{1}{2} A = \rho \cdot t \cdot \alpha$$



Statisch moment:

$$dS = t \cdot \rho d\varphi \cdot \rho \cos \varphi = \rho^2 t \cdot \cos \varphi d\varphi$$

$$\frac{1}{2} S = \rho^2 t \int_0^\alpha \cos \varphi d\varphi = \rho^2 t \left[\sin \varphi \right]_0^\alpha = \rho^2 t \sin \alpha$$

$$z = \frac{\rho^2 t \sin \alpha}{\rho t \alpha} = \rho \frac{\sin \alpha}{\alpha} = \varepsilon \cdot \rho$$

$$dI = t \cdot \rho d\varphi (\rho \cos \varphi - z)^2 = \rho^3 t (\cos \varphi - \varepsilon)^2 d\varphi$$

$$\int (\cos \varphi - \varepsilon)^2 d\varphi = \int (\cos^2 \varphi - 2\varepsilon \cos \varphi + \varepsilon^2) d\varphi$$

$$= \frac{1}{4} \sin 2\varphi + \frac{1}{2} \varphi - 2\varepsilon \sin \varphi + \varepsilon^2 \varphi + C$$

$$\left[\frac{1}{4} \sin 2\varphi + \frac{1}{2} \varphi - 2\varepsilon \sin \varphi + \varepsilon^2 \varphi \right]_0^\alpha = \frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{1}{2} \alpha - 2\varepsilon \sin \alpha + \varepsilon^2 \alpha$$

$$I = \rho^3 t \left[\frac{1}{2} \sin 2\alpha + \alpha - 4\varepsilon \sin \alpha + 2\varepsilon^2 \alpha \right]$$

$$e = \rho \cos \alpha - z \quad |e_{\max}| = z - \rho \cos \alpha = \rho (\varepsilon - \cos \alpha)$$

$$W_{\min} = \rho^2 t \left[\frac{\frac{1}{2} \sin 2\alpha + \alpha - \frac{4 \sin^2 \alpha}{\alpha} + \frac{2 \sin^2 \alpha}{\alpha}}{\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha} \right]$$

$$W_{\min} = \rho^2 t \left[\frac{\alpha^2 + \alpha \sin \alpha \cos \alpha - 2 \sin^2 \alpha}{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha} \right] = W_{z1}$$

$$\alpha = \pi \longrightarrow \sin \alpha = 0 \longrightarrow \cos \alpha = -1$$

$$W = \pi \rho^2 t$$

Ten opzichte van de Y-Y as:

$$dI = t \cdot \rho d\varphi \cdot \rho^2 \sin^2 \varphi$$

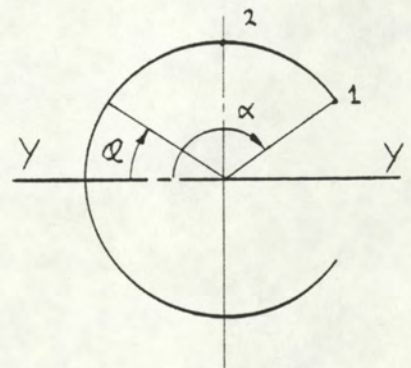
$$dI = \rho^3 \cdot t \cdot \sin^2 \varphi d\varphi$$

$$\frac{1}{2} I = \rho^3 \cdot t \left\{ \frac{1}{2} \alpha - \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right\}$$

$$I = \rho^3 \cdot t \left\{ \alpha - \sin \alpha \cos \alpha \right\}$$

$$W_y = \frac{I}{\rho} = \rho^2 \cdot t \left\{ \alpha - \sin \alpha \cos \alpha \right\} = W_2$$

$$W_1 = \frac{I}{\rho \sin \alpha} = \rho^2 t \left\{ \frac{\alpha}{\sin \alpha} - \cos \alpha \right\}$$



$$\alpha = \pi \longrightarrow \sin \alpha = 0 \longrightarrow \cos \alpha = -1$$

$$W = \pi \rho^2 t$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \pi \longrightarrow W = \frac{1}{2} \pi \rho^2 t$$

2.6

Overgang naar grotere diameter d.m.v. conus:

(Verjongingen)

Weerstandsmoment dunwandige buis:

$$dI = t \cdot \rho \cdot d\varphi \cdot \rho^2 \sin^2 \varphi = t \cdot \rho^3 \sin^2 \varphi d\varphi$$

$$I = t \cdot \rho^3 \int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi = \pi \cdot t \cdot \rho^3$$

$$W = \pi \rho^2 t$$

$$\sigma_1 = \frac{M}{\pi \cdot \rho^2 \cdot t}$$

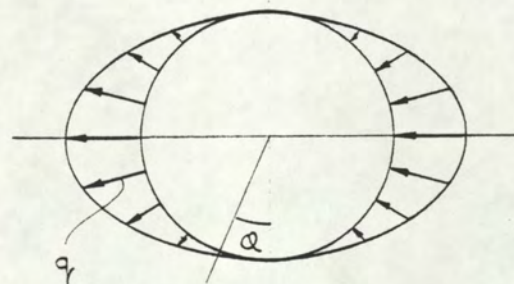
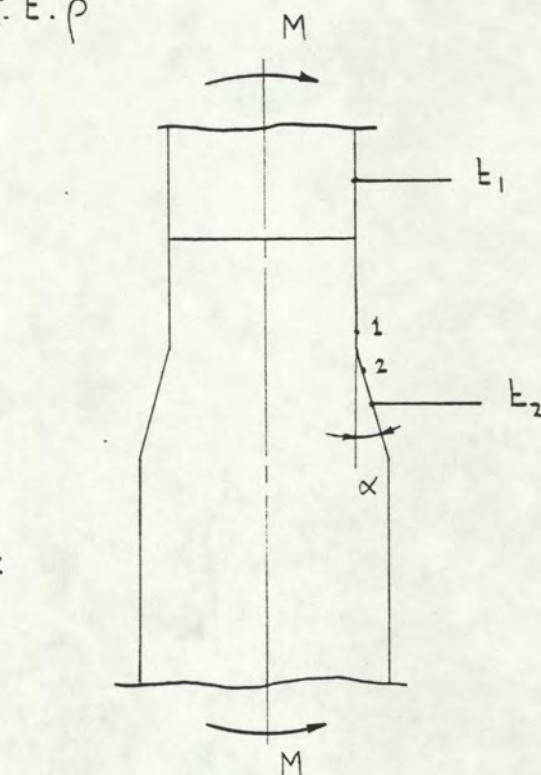
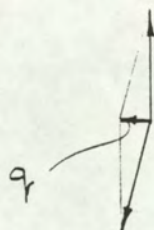
$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{t_1}{t_2 \cos \alpha}$$

De spanning langs de omtrek van de pijp is:

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \sin \varphi$$

Door hoek α ontstaat een kracht q per lengte-eenheid loodrecht op de pijpwand:

$$q = \sigma \cdot t \cdot \tan \alpha$$



Als gevolg hiervan ontstaan tangentialkrachten N in de pijpwand: volgens de membraantheorie:

$$q \cdot \rho d\varphi = N d\varphi$$

$$N = q \cdot \rho = G_1 \cdot t \cdot \tan \alpha \cdot \rho$$

$$N = G_1 \cdot t \cdot \rho \cdot \tan \alpha \cdot \sin \varphi$$

De verandering van N bedraagt:

$$\frac{dN}{d\varphi} = G_1 \cdot t \cdot \rho \cdot \tan \alpha \cdot \cos \varphi$$

Om de krachten op het elementje in evenwicht te brengen moet een schuifkracht $\tau \cdot t \cdot \rho d\varphi$ aangebracht worden.

$$\text{Dus: } \frac{dN}{d\varphi} = \tau \cdot t \cdot \rho \rightarrow \tau = G_1 \cdot \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \frac{t_1}{t_2}$$

De dwarskracht die hierdoor in de conus ontstaat bedraagt:

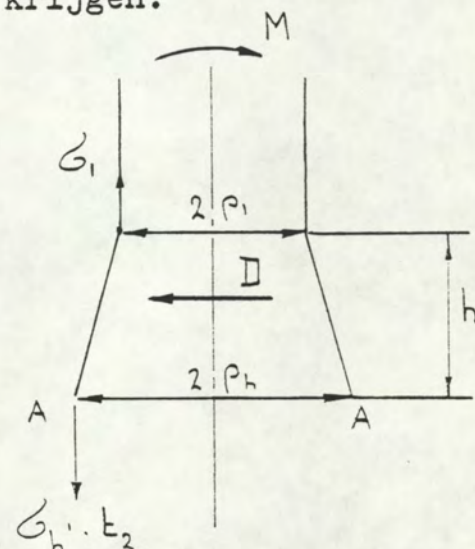
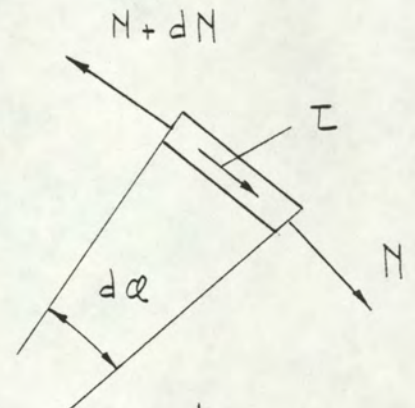
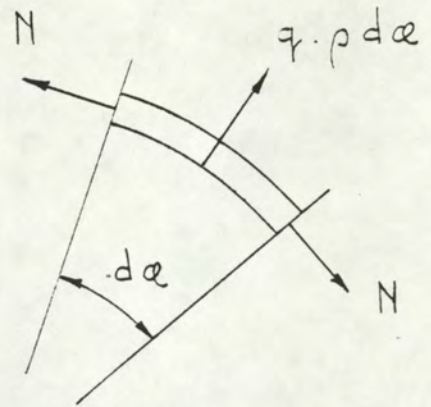
$$d\Pi = \tau \cdot t \cdot \rho d\varphi \cdot \cos \varphi = G_1 \cdot \tan \alpha \cdot t_1 \cdot \rho \cos^2 \varphi d\varphi$$

$$\Pi = G_1 \cdot t \cdot \rho \cdot \tan \alpha \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi = \pi \cdot G_1 \cdot t \cdot \rho \cdot \tan \alpha$$

Deze dwarskracht is nodig om in elke doorsnede van de conus hetzelfde moment te krijgen.

Zonder dwarskracht zou in doorsnede A-A het moment zijn:

$$G_h' \cdot t_2 = G_1 \cdot t_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_h}$$



$$M_1 = G_1 \cdot t_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_h} \cdot \pi \rho_h^2 = G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1 \rho_h$$

Het moment is slechts: $M = G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1^2$

Moment door de dwarskracht:

$$M_D = D \cdot h = G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1 h \tan \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{\rho_h - \rho_1}{h} \rightarrow M_D = G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1 \rho_h - G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1^2$$

$$\Sigma M = M_1 - M_D = G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1 \rho_h - \{ G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1 \rho_h - G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1^2 \}$$

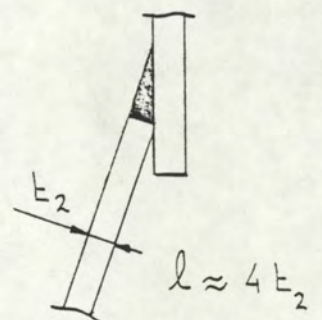
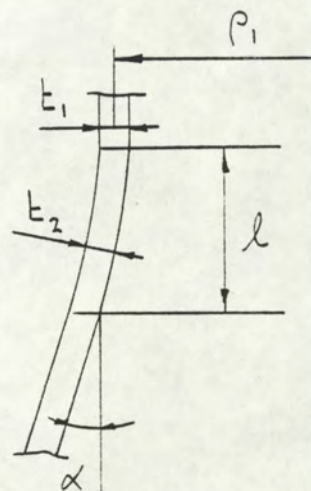
$$\Sigma M = G_1 \cdot t_1 \cdot \pi \rho_1^2 \quad \text{q.e.d.}$$

Door de tangentialaalkracht N ontstaan tangentialaalspanningen.

De breedte die daarvoor berekend mag worden is ongeveer gelijk aan de lengte van de kromming of indien dit groter is $4 t_2$.

Resumé :

$$\left[\begin{aligned} G_1 &= \frac{M}{\pi t_1 \rho_1^2} \\ G_2 &= G_1 \cdot \frac{t_1}{t_2 \cdot \cos \alpha} \\ T_2 &= G_1 \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot \tan \alpha \\ N &= G_1 \cdot t_1 \cdot \rho_1 \cdot \tan \alpha \\ G_T &\approx G_1 \cdot \frac{t_1 \cdot \rho_1 \cdot \tan \alpha}{t_2 \cdot l} \end{aligned} \right.$$



Membraan-spanningen bij gebogen overgangen :

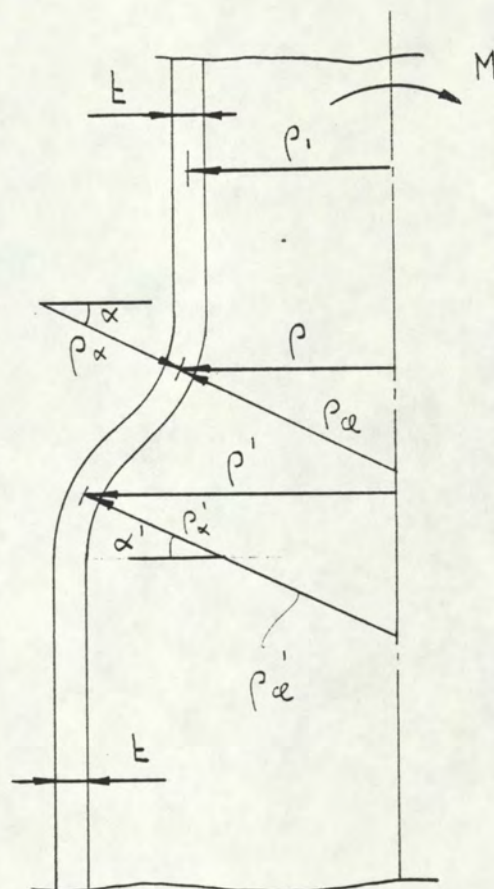
Bovendeel:

$$\frac{N_{\alpha}}{\rho_{\alpha}} - \frac{N_{\alpha'}}{\rho_{\alpha'}} = 0$$

$$N_{\alpha} = \frac{M}{\pi \rho^2 \cos \alpha}$$

$$\rho_{\alpha'} = \frac{\rho}{\cos \alpha}$$

$$N_{\alpha'} = \rho_{\alpha'} \cdot \frac{N_{\alpha}}{\rho_{\alpha}} = \frac{M}{\pi \cdot \rho \cdot \rho_{\alpha} \cdot \cos^2 \alpha}$$



Als de doorsnede boven de verwijding als maatgevend wordt beschouwd (d.w.z. tot G_R belast) geldt als voorwaarde :

$$N_{\alpha} \leq \frac{M}{\pi \rho_1^2} \quad \text{of:} \quad \rho^2 \cos \alpha \geq \rho_1^2$$

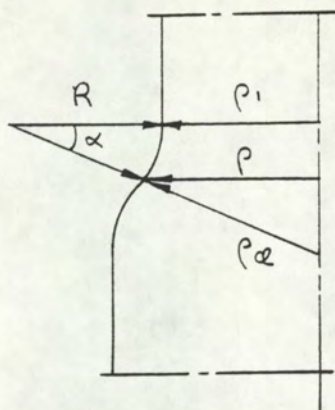
$$\text{Verder: } N_{\alpha'} \leq \frac{M}{\pi \rho_1^2} \quad \text{of:} \quad \rho \cdot \rho_{\alpha} \cos^2 \alpha \geq \rho_1^2$$

Onderdeel : $\frac{N_{\alpha'}}{\rho_{\alpha'}} + \frac{N_{\alpha'}}{\rho_{\alpha'}} = 0$

$$N_{\alpha'} = -\rho_{\alpha'} \cdot \frac{N_{\alpha'}}{\rho_{\alpha'}} = \frac{-M}{\pi \rho' \cdot \rho_{\alpha'} \cdot \cos^2 \alpha'} \quad N_{\alpha'} = \frac{M}{\pi \rho'^2 \cdot \cos \alpha'}$$

Hierin geldt als voorwaarde:

$$\sqrt{N_{\alpha'}^2 + N_{\alpha'}^2 - N_{\alpha'} N_{\alpha'}} \leq \frac{M}{\pi \cdot \rho_1^2}$$



$$\rho = \rho_1 + R(1 - \cos \alpha) = (\rho_1 + R) - R \cos \alpha$$

$$N_\alpha = \frac{M}{\pi \rho^2 \cos \alpha} \leq \frac{M}{\pi \rho_1^2}$$

$$\downarrow$$

$$\rho^2 \cos \alpha \geq \rho_1^2$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^2 \cos \alpha \geq 1$$

$$\text{Setel: } \frac{R}{\rho_1} = \beta \rightarrow$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left(1 + \frac{R}{\rho_1}\right) - \frac{R}{\rho_1} \cos \alpha$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = (1 + \beta) - \beta \cos \alpha$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right)^2 \cos \alpha = \left\{ (1 + \beta)^2 - 2(1 + \beta)\beta \cos \alpha + \beta^2 \cos^2 \alpha \right\} \cos \alpha \geq 1$$

$$N_\alpha = \frac{M}{\pi \rho \rho_\alpha \cos^2 \alpha} \quad N_\alpha \leq \frac{M}{\pi \rho_1^2} \rightarrow$$

$$\rho \cdot \rho_\alpha \cdot \cos^2 \alpha \geq \rho_1^2 \quad \frac{\rho \cdot \rho_\alpha}{\rho_1^2} \cos^2 \alpha \geq 1$$

$$\rho_\alpha = R \rightarrow \rho_\alpha = \rho_1 \cdot \beta$$

$$\text{en: } \rho = \rho_1 \{1 + \beta - \beta \cos \alpha\}$$

$$\frac{\rho \cdot \rho_\alpha}{\rho_1^2} \cos^2 \alpha = \beta (1 + \beta - \beta \cos \alpha) \cos^2 \alpha \geq 1$$

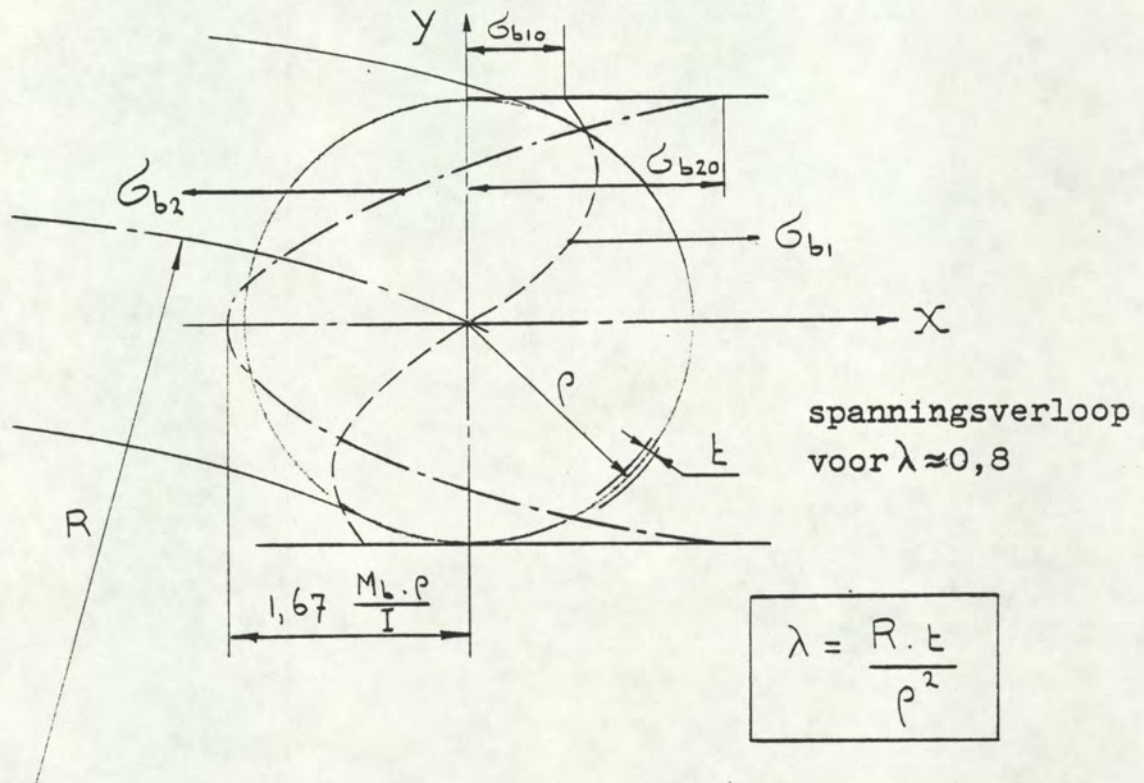
2.7

Gekromde dunwandige pijpen :

(Formules van: "von Kármán")

Zie: Berechnung der Maschinenelemente

van: M. ten Bosch, 3^e-Auflage, Berlin 1951, Springer.



Axiale buigspanning:

$$G_{b1} = f_1(y) \cdot G_{bn}$$

Tangentiale buigspanning:

$$G_{b2} = f_2(y) \cdot G_{bn}$$

$$G_{bn} = \frac{M}{W} = \frac{M_b \cdot \rho}{I}$$

$$G_{by} = \frac{M_b \cdot y}{I} \cdot \frac{1}{k} \cdot \left\{ 1 - \frac{6}{5 + 6\lambda^2} \cdot \frac{y^2}{\rho^2} \right\} \text{-----} \textcircled{1}$$

$$G_{\max} \rightarrow \frac{dG_{b1}}{dy} = 0 \rightarrow 1 - \frac{6}{5 + 6\lambda^2} \cdot \frac{3y^2}{\rho^2} = 0$$

$$\left(\frac{y}{\rho} \right)^2 = \frac{5 + 6\lambda^2}{18}$$

$$y = \rho \sqrt{\frac{5 + 6\lambda^2}{18}}$$

Substitutie in 1 geeft: $G_{b1, \max} = \frac{M_b \cdot \rho}{I} \cdot \frac{2}{3k} \sqrt{\frac{5 + 6\lambda^2}{18}}$

$$k = \frac{1 + 12\lambda^2}{10 + 12\lambda^2}$$

$$\begin{cases} \sigma_{b1, \max} = \sigma_{bn} \cdot \alpha_{1, \max} \\ \alpha_{1, \max} = \frac{2}{3k} \sqrt{\frac{5 + 6\lambda^2}{18}} \end{cases}$$

De betrekking geldt alleen voor: $\sqrt{\frac{5 + 6\lambda^2}{18}} \leq 1$

dus voor: $\lambda \leq \sqrt{\frac{13}{6}} = 1,472$

Voor $\lambda > 1,472$ is de spanning aan de top (σ_{b10}) maatgevend:

$$\begin{cases} \sigma_{b10} = \frac{M_b \cdot \rho}{I} \cdot \frac{1}{k} \left[1 - \frac{6}{5 + 6\lambda^2} \right] = \sigma_{bn} \cdot \alpha_{k10} \\ \alpha_{k10} = \frac{12\lambda^2 - 2}{12\lambda^2 + 1} \end{cases}$$

$$\sigma_{b2} = \frac{M_b \cdot \rho}{I} \left[\frac{18\lambda}{1 + 12\lambda^2} \left(1 - \frac{2y^2}{\rho^2} \right) \right] \text{-----} \textcircled{2}$$

De grootste waarde van σ_{b2} , treedt op bij $y=0$ en $y=\rho$ dus:

$$\begin{cases} \sigma_{b20} = \frac{M_b \cdot \rho}{I} \left(\frac{18\lambda}{1 + 12\lambda^2} \right) = \sigma_{bn} \cdot \alpha_{k20} \\ \alpha_{k20} = \frac{18\lambda}{1 + 12\lambda^2} \end{cases}$$

Voldaan moet worden aan:

$$\sigma_{bl, max} = \sigma_{bn} \cdot \alpha_{l, max} \leq \bar{\sigma} \quad \text{en:}$$

$$\sigma_v = \sigma_{bn} \cdot \sqrt{(\alpha_{k10})^2 + (\alpha_{k20})^2 + \alpha_{k10} * \alpha_{k20}} \leq \bar{\sigma}$$

Indien de pijp bovendien op wringing wordt belast, geldt:

$$\tau_{max} = \frac{M_T}{\frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot t} \quad (D = \text{de buitendiameter v.d. pijp})$$

De gecombineerde spanning wordt dan:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_v^2 + 3\tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

en:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{bl, max}^2 + 3\tau^2} \leq \bar{\sigma}$$

2.8

De formule van "Kollbrunner" :

$$\zeta = \frac{M_T \cdot l}{\rho \cdot W} \cdot f$$

Waarin: l = de halve deurhoogte.

W = dunwandige buis $= \pi \cdot \rho^2 \cdot t$

W = dikwandige buis $= \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D}$

} (buiging)

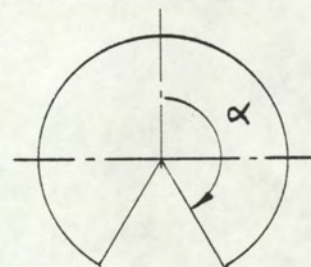
M_T = torsiemoment

ρ = gemiddelde diameter v.d. buis.

t = wanddikte van de buis.

$$f = \frac{\pi}{\alpha} \cdot 3 \left\{ 1 - \frac{2 \cdot (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \sin \alpha}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} \right\} \frac{1}{2\alpha - \frac{12 \cdot (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)^2}{\alpha^2 (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho = \frac{1}{2} \cdot d_m \\ l = \frac{1}{2} \cdot a \end{array} \right\} \rightarrow \zeta = \frac{M_T \cdot a}{W \cdot d_m} \cdot f$$



rijkswaterstaat directie bruggen

LICHTMASTEN

3. BEPALING VAN GETALWAARDEN VAN MASTEN MET $L_{ph} = 5m$,
10m, 12m, en 15m.

LICHTMASTEN

3.1

Afmetingen:

Het vastleggen van voetplaat-afmetingen, ankers en andere details, impliceert dat krachten en momenten bekend moeten zijn.

Deze krachten zijn behalve van de lichtmasthoogte, ook afhankelijk van de diameter(s) van de mast.

In het algemeen wordt de keuze van de diameters aan de fabrikant overgelaten.

Derhalve was het noodzakelijk diameters aan te nemen.

Het zelfde geldt ten aanzien van de plaats van verbijngingen.

De aangenomen diameters en de plaats van de verbijngingen zijn aangegeven bij 3.1.1 en 3.1.2

Teneinde de zekerheid te hebben dat de fabrikant eerder kleinere dan grotere diameters kiest, zijn de daar gegeven diameters ruim gekozen.

Bovendien is als extra, zij het kleine reserve, de stuwdruk over de gehele masthoogte als constant aangenomen.

Verder is aangenomen dat de windbelasting in de richting van de uithouder 20% is van de windbelasting in de richting loodrecht daarop.

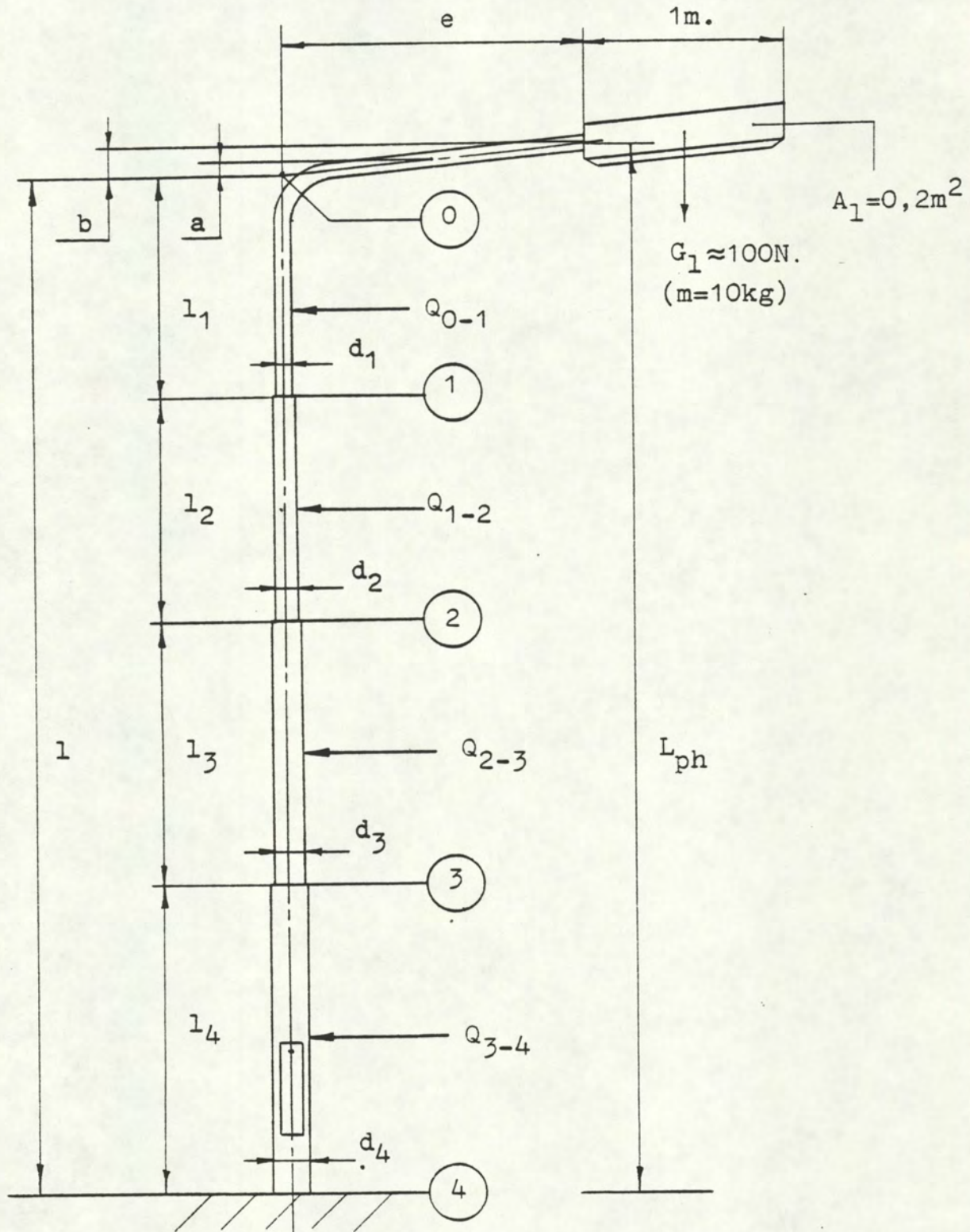
De waarden van de 5m-mast zijn verkregen door extrapolatie.

Bij de bepaling van de voetplaatdikte(t) is uitgegaan van een mast met dubbele uithouders ($e=3m$), waarbij $M_x=M_2$ maatgevend blijkt te zijn voor het maximale moment (M_{max}).

LICHTMASTEN

3.1.1

Geometrie van lichtmasten:



3.1.2

Gebruikte afmetingen bij de berekening:

Courante pijpen:

$d_1 = 89 \text{ mm.}$ $\emptyset 88,9 / 82,5$
($t = 3,2 \text{ mm}$)

$d_2 = 133 \text{ mm.}$ $\emptyset 133 / 125$
($t = 4 \text{ mm}$)

$d_3 = 168 \text{ mm.}$ $\emptyset 168,3 / 159,3$
($t = 4,5 \text{ mm}$)

$d_4 = 219 \text{ mm.}$ $\emptyset 219,1 / 207,3$ (gerekend met: $\emptyset 216 \text{ mm}$)
($t = 5,9 \text{ mm}$)

Uithouderlengte:

$e = 1,25 \text{ m.}$
 $e = 2,00 \text{ m.}$
 $e = 3,00 \text{ m.}$

→ (gerekend met:
 $e = 1,00 \text{ m.}$)

$l \text{ (m)}$	l_4	l_3	l_2	l_1
10	3	3	2,5	1,5
12	4	3,5	3	1,5
15	4	4	4	3

In de hierna volgende beschouwing is: $l = L_{ph}$;
derhalve: $a = b = 0$.

3.2

Momenten ter plaatse van de voet van de mast:

Lichtmast $L_{ph}=10m$.

$l_4=3m$; $l_3=3m$; $l_2=2,5m$; $l_1=1,5m$.

$h=10m \longrightarrow q=1072Pa$.

diameter d(mm):	89	133	168	216
vormcoëfficiënt				
c :	0,6	0,4	0,4	0,4

Buigend-moment kale mast ten gevolge van wind:

$$Q_{i-j} = q \times c \times d_i \times l_i$$

$$Q_{0-1} = 1072 \times 0,6 \times 0,089 \times 1,5 = 85,9 \text{ N}$$

$$Q_{1-2} = 1072 \times 0,4 \times 0,133 \times 2,5 = 142,6 \text{ N}$$

$$Q_{2-3} = 1072 \times 0,4 \times 0,168 \times 3 = 239,3 \text{ N}$$

$$Q_{3-4} = 1072 \times 0,4 \times 0,216 \times 3 = 307,6 \text{ N}$$

$$M_{11} = 85,9 \times 0,75 = 64 \text{ Nm}$$

$$D_{11} = 85,9 \text{ N}$$

$$M_{21} = \left(\frac{1}{2} \times 142,6 + 85,9\right) 2,5 + 64 = 457 \text{ Nm}$$

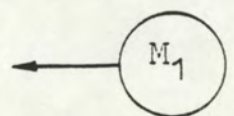
$$D_{21} = 85,9 + 142,6 = 228,5 \text{ N}$$

$$M_{31} = \left(\frac{1}{2} \times 239,3 + 228,5\right) 3 + 457 = 1501 \text{ Nm}$$

$$D_{31} = 228,5 + 239,3 = 467,8 \text{ N}$$

$$M_{41} = \left(\frac{1}{2} \times 307,6 + 467,8\right) 3 + 1501 = 3366 \text{ Nm}$$

$$D_{41} = 467,8 + 307,6 = 775,4 \text{ N}$$



Met uithouder $e=1m$:

$$Q_{e-l} = c_e \times q \times e \times d_e + c_l \times q \times A_l$$

$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1072 \times 1 \times 0,089 + 1 \times 1072 \times 0,2 = 271,6 \text{ N}$$

$$M_{j2} = M_{j1} + (2) \times l' \times Q_{e-l}$$

	Enkele	Dubbele uithouder
$M_{12} = M_{11} + 1,5 \times 271,6 = 471 \text{ Nm.}$		(878 Nm)
$M_{22} = M_{21} + 4 \times 271,6 = 1543 \text{ Nm.}$		(2629 Nm)
$M_{32} = M_{31} + 7 \times 271,6 = 3402 \text{ Nm.}$		(5303 Nm)
$M_{42} = M_{41} + 10 \times 271,6 = 6082 \text{ Nm.}$		(8728 Nm)
$D_{42} = D_{41} + 271,6 = 1047 \text{ N}$		(1319 N)

Met uithouder e=2m:

$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1072 \times 2 \times 0,089 + 1 \times 1072 \times 0,2 = 329 \text{ N.}$$

$M_{12} = 64 + 1,5 \times 329 = 557,5 \text{ Nm.}$	(1051 Nm)
$M_{22} = 457 + 4 \times 329 = 1773 \text{ Nm.}$	(3089 Nm)
$M_{32} = 1501 + 7 \times 329 = 3804 \text{ Nm.}$	(6107 Nm)
$M_{42} = 3366 + 10 \times 329 = 6656 \text{ Nm.}$	(9946 Nm)

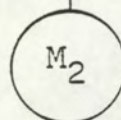
$$D_{42} = D_{41} + 329 = 1104,4 \text{ N} \quad (1433 \text{ N})$$

Met uithouder e=3m:

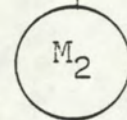
$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1072 \times 3 \times 0,089 + 1 \times 1072 \times 0,2 = 386 \text{ N.}$$

$M_{12} = 64 + 1,5 \times 386 = 643 \text{ Nm.}$	(1222 Nm)
$M_{22} = 457 + 4 \times 386 = 2001 \text{ Nm.}$	(3545 Nm)
$M_{32} = 1501 + 7 \times 386 = 4203 \text{ Nm.}$	(6905 Nm)
$M_{42} = 3366 + 10 \times 386 = 7226 \text{ Nm.}$	(11086 Nm)

$$D_{42} = D_{41} + 386 = 1161,4 \text{ N} \quad (1547 \text{ N})$$



Enkele uithouder



Dubbele uithouder

Belasting op torsie: (t.g.v. windbelasting)

$e=0 \rightarrow$ geen torsie-moment.

$$M_w = \frac{1}{2} e^2 d \cdot c \cdot q + (e + \frac{1}{2}) A_L \cdot c_L \cdot q$$

$$e=1 \quad M_w = \frac{1}{2} \cdot 0,089 \cdot 0,6 \cdot 1072 + 1,5 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 1072 = 350 \text{ Nm.}$$

$$e=2 \quad M_w = \frac{1}{2} \cdot 0,089 \cdot 0,6 \cdot 1072 \cdot 2^2 + 2,5 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 1072 = 650 \text{ Nm.}$$

$$e=3 \quad M_w = \frac{1}{2} \cdot 0,089 \cdot 0,6 \cdot 1072 \cdot 3^2 + 3,5 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 1072 = 1008 \text{ Nm.}$$

Buigend-moment t.g.v. eigen gewicht:

$e=0$ en dubbele uithouders: geen buigend-moment.

$$M_g = \frac{1}{2} \cdot e^2 \cdot G_p + (e + \frac{1}{2}) G_L$$

$$G_p = 68 \text{ N/m.}$$

$$G_L = 100 \text{ N}$$

$$e=1 \quad M_g = \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot 68 + 1,5 \cdot 100 = 184 \text{ Nm.}$$

$$e=2 \quad M_g = \frac{1}{2} \cdot 2^2 \cdot 68 + 2,5 \cdot 100 = 386 \text{ Nm.}$$

$$e=3 \quad M_g = \frac{1}{2} \cdot 3^2 \cdot 68 + 3,5 \cdot 100 = 656 \text{ Nm.}$$

Lichtmast $L_{ph}=12m$.

$$l_4=4m ; l_3=3,5m ; l_2=3m ; l_1=1,5m.$$

$$h=12m \longrightarrow q=1136Pa.$$

Buigend-moment kale mast t.g.v. wind:

$$Q_{i-j} = q \times c \times d_i \times l_i$$

$$Q_{0-1} = 1136 \times 0,6 \times 0,089 \times 1,5 = 91 \text{ N.}$$

$$Q_{1-2} = 1136 \times 0,4 \times 0,133 \times 3 = 181 \text{ N.}$$

$$Q_{2-3} = 1136 \times 0,4 \times 0,168 \times 3,5 = 267 \text{ N.}$$

$$Q_{3-4} = 1136 \times 0,4 \times 0,216 \times 4 = 393 \text{ N.}$$

$$M_{11} = 91 \times \frac{1}{2} \times 1,5 = 68 \text{ Nm.}$$

$$D_{11} = 91 \text{ N.}$$

$$M_{21} = \left(\frac{1}{2} \times 181 + 91 \right) 3 + 68 = 613 \text{ Nm.}$$

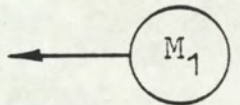
$$D_{21} = 91 + 181 = 272 \text{ N.}$$

$$M_{31} = \left(\frac{1}{2} \times 267 + 272 \right) 3,5 + 613 = 2032 \text{ Nm.}$$

$$D_{31} = 272 + 267 = 539 \text{ N.}$$

$$M_{41} = \left(\frac{1}{2} \times 393 + 539 \right) 4 + 2032 = 4974 \text{ Nm.}$$

$$D_{41} = 539 + 393 = 932 \text{ N.}$$



Met uithouder $e=1m$:

$$Q_{e-l} = c_e \times q \times e \times d_e + c_l \times q \times A_l$$

$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1136 \times 1 \times 0,089 + 1 \times 1136 \times 0,2 = 258 \text{ N.}$$

$$M_{j2} = M_{j1} + (2) \times l' \times Q_{e-l}$$

	Enkele	Dubbele uithouder
$M_{12} = 68 + 1,5 \times 288$	$= 500 \text{ Nm.}$	(932 Nm)
$M_{22} = 613 + 4,5 \times 288$	$= 1908 \text{ Nm.}$	(3204 Nm)
$M_{32} = 2032 + 8 \times 288$	$= 4336 \text{ Nm.}$	(6632 Nm)
$M_{42} = 4974 + 12 \times 288$	$= 8428 \text{ Nm.}$	(11.884 Nm)
$D_{42} = 932 + 288$	$= 1220 \text{ N}$	(1508 N)

Met uithouder e=2m:

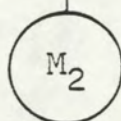
$$Q_{e-2} = 0,6 \times 1136 \times 2 \times 0,089 + 1136 \times 0,2 = 349 \text{ N.}$$

$M_{12} = 68 + 1,5 \times 349$	$= 592 \text{ Nm.}$	(1116 Nm)
$M_{22} = 613 + 4,5 \times 349$	$= 2184 \text{ Nm.}$	(3755 Nm)
$M_{32} = 2032 + 8 \times 349$	$= 4824 \text{ Nm.}$	(7616 Nm)
$M_{42} = 4974 + 12 \times 349$	$= 9162 \text{ Nm.}$	(13.350 Nm)
$D_{42} = 932 + 349$	$= 1281 \text{ N}$	(1630 N)

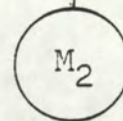
Met uithouder e=3m:

$$Q_{e-2} = 0,6 \times 1136 \times 3 \times 0,089 + 1136 \times 0,2 = 409 \text{ N.}$$

$M_{12} = 68 + 1,5 \times 409$	$= 682 \text{ Nm.}$	(1296 Nm.)
$M_{22} = 613 + 4,5 \times 409$	$= 2454 \text{ Nm.}$	(4295 Nm.)
$M_{32} = 2032 + 8 \times 409$	$= 5304 \text{ Nm.}$	(8576 Nm.)
$M_{42} = 4974 + 12 \times 409$	$= 9882 \text{ Nm.}$	(14.790 Nm.)
$D_{42} = 932 + 409$	$= 1341 \text{ N.}$	(1750 N.)



Enkele uithouder



Dubbele uithouder

Belasting op torsie: (t.g.v. windbelasting)

$e=0 \longrightarrow$ geen torsie-moment.

$$M_w = \frac{1}{2} e^2 \cdot d \cdot c \cdot q + \left(e + \frac{1}{2}\right) A_L \cdot c_L \cdot q$$

$$e=1 \quad M_w = \frac{1}{2} \times 1136 \times 0,089 \times 0,6 \times 1^2 + 1,5 \times 0,2 \times 1136 = 371 \text{ Nm}$$

$$e=2 \quad M_w = \frac{1}{2} \times 1136 \times 0,089 \times 0,6 \times 2^2 + 2,5 \times 0,2 \times 1136 = 689 \text{ Nm}$$

$$e=3 \quad M_w = \frac{1}{2} \times 1136 \times 0,089 \times 0,6 \times 3^2 + 3,5 \times 0,2 \times 1136 = 1068 \text{ Nm}$$

Buigend-moment t.g.v. eigen gewicht:

$e=0$ en dubbele uithouders: geen buigend-moment.

$$M_g = \frac{1}{2} \cdot e^2 \cdot G_p + \left(e + \frac{1}{2}\right) G_L$$

$$e=1 \quad M_g = \frac{1}{2} \times 1^2 \times 68 + 1,5 \times 100 = 184 \text{ Nm}$$

$$e=2 \quad M_g = \frac{1}{2} \times 2^2 \times 68 + 2,5 \times 100 = 386 \text{ Nm}$$

$$e=3 \quad M_g = \frac{1}{2} \times 3^2 \times 68 + 3,5 \times 100 = 656 \text{ Nm}$$

Lichtmast $L_{ph}=15m$.

$l_4=4m$; $l_3=4m$; $l_2=4m$; $l_1=3m$.

$h=15m \longrightarrow q=1232Pa$.

Buigend-moment kale mast t.g.v. wind:

$$Q_{i-j} = q \times c \times d_i \times l_i$$

$$Q_{0-1} = 1232 \times 0,6 \times 0,089 \times 3 = 197 N.$$

$$Q_{1-2} = 1232 \times 0,4 \times 0,133 \times 4 = 262 N.$$

$$Q_{2-3} = 1232 \times 0,4 \times 0,168 \times 4 = 311 N.$$

$$Q_{3-4} = 1232 \times 0,4 \times 0,216 \times 4 = 426 N.$$

$$M_{11} = 197 \times 1,5 = 296 Nm.$$

$$D_{11} = 197 N.$$

$$M_{21} = \left(\frac{1}{2} \times 262 + 197\right) 4 + 296 = 1608 Nm.$$

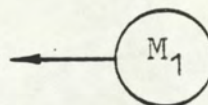
$$D_{21} = 197 + 262 = 459 N.$$

$$M_{31} = \left(\frac{1}{2} \times 311 + 459\right) 4 + 1608 = 4068 Nm.$$

$$D_{31} = 459 + 311 = 770 N.$$

$$M_{41} = \left(\frac{1}{2} \times 426 + 770\right) 4 + 4068 = 8000 Nm.$$

$$D_{41} = 770 + 426 = 1196 N.$$



Met uithouder $e=1m$:

$$Q_{e-l} = c_e \times q \times e \times d_e + c_l \times q \times A_l$$

$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1232 \times 1 \times 0,089 + 1 \times 1232 \times 0,2 = 312 N.$$

$$M_{j2} = M_{j1} + (2) \times l' \times Q_{e-l}$$

		Enkele	Dubbele uithouder
M_{12}	$= 296 + 3 \times 312$	$= 1232 \text{ Nm.}$	(2168 Nm.)
M_{22}	$= 1608 + 7 \times 312$	$= 3792 \text{ Nm.}$	(5976 Nm.)
M_{32}	$= 4068 + 11 \times 312$	$= 7500 \text{ Nm.}$	(10932 Nm.)
M_{42}	$= 8000 + 15 \times 312$	$= 12.680 \text{ Nm.}$	(17.360 Nm.)
Π_{42}	$= 1196 + 312$	$= 1508 \text{ N.}$	(1820 N.)

Met uithouder e=2m:

$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1232 \times 2 \times 0,089 + 1232 \times 0,2 = 378 \text{ N.}$$

M_{12}	$= 296 + 3 \times 378$	$= 1430 \text{ Nm.}$	(2564 Nm.)
M_{22}	$= 1608 + 7 \times 378$	$= 4254 \text{ Nm.}$	(6900 Nm.)
M_{32}	$= 4068 + 11 \times 378$	$= 8226 \text{ Nm.}$	(12.384 Nm.)
M_{42}	$= 8000 + 15 \times 378$	$= 13.670 \text{ Nm.}$	(19.340 Nm.)

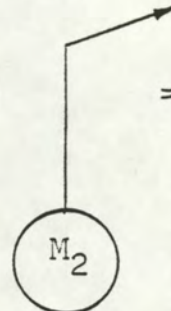
$$\Pi_{42} = 1196 + 378 = 1574 \text{ N.} \quad (1952 \text{ N.})$$

Met uithouder e=3m:

$$Q_{e-l} = 0,6 \times 1232 \times 3 \times 0,089 + 1232 \times 0,2 = 444 \text{ N.}$$

M_{12}	$= 296 + 3 \times 444$	$= 1628 \text{ Nm.}$	(2960 Nm.)
M_{22}	$= 1608 + 7 \times 444$	$= 4716 \text{ Nm.}$	(7824 Nm.)
M_{32}	$= 4068 + 11 \times 444$	$= 8952 \text{ Nm.}$	(13.836 Nm.)
M_{42}	$= 8000 + 15 \times 444$	$= 14.660 \text{ Nm.}$	(21.320 Nm.)

$$\Pi_{42} = 1196 + 444 = 1640 \text{ N.} \quad (2084 \text{ N.})$$



Enkele uithouder



Dubbele uithouder

Belasting op torsie: (t.g.v. windbelasting)

$e=0 \longrightarrow$ geen torsie-moment.

$$M_w = \frac{1}{2} \cdot e^2 \cdot d \cdot c \cdot q + (e + \frac{1}{2}) A_L \cdot c_L \cdot q$$

$$e=1 \quad M_w = \frac{1}{2} \cdot 1232 \cdot 0,089 \cdot 0,6 \cdot 1^2 + 1,5 \cdot 0,2 \cdot 1232 = 402 \text{ Nm.}$$

$$e=2 \quad M_w = \frac{1}{2} \cdot 1232 \cdot 0,089 \cdot 0,6 \cdot 2^2 + 2,5 \cdot 0,2 \cdot 1232 = 747 \text{ Nm.}$$

$$e=3 \quad M_w = \frac{1}{2} \cdot 1232 \cdot 0,089 \cdot 0,6 \cdot 3^2 + 3,5 \cdot 0,2 \cdot 1232 = 1158 \text{ Nm.}$$

-Buigend-moment t.g.v. eigen gewicht:

$e=0$ en dubbele uithouders: geen buigend-moment.

$$M_g = \frac{1}{2} \cdot e^2 \cdot G_p + (e + \frac{1}{2}) G_L$$

$$e=1 \quad M_g = \frac{1}{2} \times 1^2 \times 68 + 1,5 \times 100 = 184 \text{ Nm.}$$

$$e=2 \quad M_g = \frac{1}{2} \times 2^2 \times 68 + 2,5 \times 100 = 386 \text{ Nm.}$$

$$e=3 \quad M_g = \frac{1}{2} \times 3^2 \times 68 + 3,5 \times 100 = 656 \text{ Nm.}$$

Lichtmast $L_{ph}=5m$. (geëxtrapoleerd)

$q = 912 \text{ Pa}$.

$$M_1(\text{kale mast}): M_1 = 3366 \cdot \left(\frac{5}{10}\right)^2 \cdot \frac{912}{1072} = 716 \text{ Nm}.$$

$$M_2 \text{ met uithouder } 1m: M_2 = 716 + 271,6 \cdot \frac{912}{1072} \cdot 5 = 1882,7 \text{ Nm}$$

$$\text{met uithouder } 2m: M_2 = 716 + 329 \cdot \frac{912}{1072} \cdot 5 = 2129,3 \text{ Nm}$$

$$\text{met uithouder } 3m: M_2 = 716 + 386 \cdot \frac{912}{1072} \cdot 5 = 2358 \text{ Nm}$$

M_2 met dubbele uithouder 1m:

$$M_2 = 716 + 2 \cdot 271,6 \cdot \frac{912}{1072} \cdot 5 = 3049,4 \text{ Nm}.$$

M_2 met dubbele uithouder 2m:

$$M_2 = 716 + 2 \cdot 329 \cdot \frac{912}{1072} \cdot 5 = 3542,6 \text{ Nm}.$$

M_2 met dubbele uithouder 3m:

$$M_2 = 716 + 2 \cdot 386 \cdot \frac{912}{1072} \cdot 5 = 4000 \text{ Nm}.$$

3.3 Buigende momenten in kNm. (De waarden tussen haakjes gelden voor masten met dubbele uithouders)

LICHTPUNTHOOGTE (L_{ph})	e=3m.			e=2m.			e=1m.		
	M_1	M_2	M_g	M_1	M_2	M_g	M_1	M_2	M_g
5m. (geëxtrapoleerd)	0,716	2,358 (4,00)	0,656	0,716	2,13 (3,543)	0,386	0,716	1,883 (3,050)	0,184
10m.	3,366	7,226 (11,086)	0,656	3,366	6,656 (9,946)	0,386	3,366	6,082 (8,798)	0,184
12m.	4,974	9,882 (14,790)	0,656	4,974	9,162 (13,350)	0,386	4,974	8,428 (11,884)	0,184
15m.	8,00	14,660 (21,320)	0,656	8,00	13,670 (19,340)	0,386	8,00	12,680 (17,360)	0,184

M_1 = Buigend moment van de kale mast ten gevolge van wind.

M_2 = Buigend moment met enkele (c.q. dubbele) uithouder t.g.v. wind.

M_{eg} = Buigend moment t.g.v. eigen gewicht uithouder+lamp.
(Bij dubbele uithouder en $e=0$: $M_g=0$)

3.4

Ankers voor voetplaten:

Masthoogte(m)	D(mm)	d(mm)	A _{sp} (mm ²)
5	200	18	192
12	300	24	353
15	400	27	459

Lichtmast L_{ph}=12m (e=3m)

-Met enkele uithouder:

$$M_{yw} = (9882 - 4974) 0,2 + 4974 = 5956 \text{ Nm}$$

$$M_{xw} = 9882 \text{ Nm}$$

$$M_g = 656 \text{ Nm}$$

$$F_{\max} = \frac{9882}{2 \times 0,3} \sqrt{\left(\frac{5956}{9882}\right)^2 + 1} + \frac{656}{2 \times 0,3} = 20.323 \text{ N}$$

-Met dubbele uithouder:

$$M_{yw} = (14.790 - 4974) 0,2 + 4974 = 6937 \text{ Nm}$$

$$M_{xw} = 14.790 \text{ Nm}$$

$$F_{\max} = \frac{14.790}{2 \times 0,3} \sqrt{\left(\frac{6937}{14.790}\right)^2 + 1} = 27.227 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A_{sp}} \quad A_{sp} = \text{spanningsdoorsnede v.d. bout.}$$

$$\sigma = 27.227 / 353 = 77 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma \leq 0,8 \sigma_b = 0,8 \times 160 = 128 \text{ N/mm}^2$$

Lichtmast $L_{ph}=15m$ ($e=3m$)

-Met enkele uithouder:

$$M_{yw} = (14.660 - 8000) 0,2 + 8000 = 9332 \text{ Nm.}$$

$$M_{xw} = 14.660 \text{ Nm.}$$

$$M_g = 656 \text{ Nm.}$$

$$F_{max} = \frac{14.660}{2 \times 0,4} \sqrt{\left(\frac{9332}{14.660}\right)^2 + 1} + \frac{656}{2 \times 0,4} = 22543 \text{ N}$$

-Met dubbele uithouder:

$$M_{yw} = (21320 - 8000) 0,2 + 8000 = 10664 \text{ Nm.}$$

$$M_{xw} = 21320 \text{ Nm.}$$

$$F_{max} = \frac{21.320}{2 \times 0,4} \sqrt{\left(\frac{10664}{21320}\right)^2 + 1} = 29798 \text{ N.}$$

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_{sp.}} = \frac{29798}{459} = 65 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma \leq 0,8 \bar{\sigma} = 0,8 \times 160 = 128 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Lichtmast $L_{ph}=5m$. ($e=3m$)

-Met enkele uithouder:

$$M_{yw} = (2358 - 716) \cdot 0,2 + 716 = 1044,4 \text{ Nm.}$$

$$M_{xw} = 2358 \text{ Nm.}$$

$$M_g = 656 \text{ Nm.}$$

$$F_{A, \max} = \frac{2358}{2 \times 0,2} \sqrt{\left(\frac{1044,4}{2358}\right)^2 + 1} + \frac{656}{2 \times 0,2} = 8087 \text{ N.}$$

-Met dubbele uithouder:

$$M_{yw} = (4000 - 716) \cdot 0,2 + 716 = 1372,8 \text{ Nm.}$$

$$M_{xw} = 4000 \text{ Nm.}$$

$$F_{A, \max} = \frac{4000}{2 \times 0,2} \sqrt{\left(\frac{137,8}{4000}\right)^2 + 1} = 10.573 \text{ N.}$$

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A_{sp}} = \frac{10.573}{192} = 55,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

$$\sigma \leq 0,8 \sigma_c = 0,8 \times 160 = 128 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Bepaling ankerlengte:

$L_{ph}=5m:$

$$\left. \begin{array}{l} F_{max} = 10573 \text{ N.} \\ k = 0,6 \text{ N/mm}^2 \\ d = 18 \text{ mm.} \end{array} \right\} \rightarrow L_1 = \frac{10573}{0,6 \cdot \pi \cdot 18} = 312 \text{ mm.}$$

$$L_2 = 312 - 5 \times 18 = 222 \text{ mm.}$$

$$L_3 = 312 - 10 \times 18 = 132 \text{ mm.}$$

$L_{ph}=12m:$

$$\left. \begin{array}{l} F_{max} = 27227 \text{ N.} \\ k = 0,6 \text{ N/mm}^2 \\ d = 24 \text{ mm.} \end{array} \right\} \rightarrow L_1 = \frac{27227}{0,6 \cdot \pi \cdot 24} = 602 \text{ mm.}$$

$$L_2 = 602 - 5 \times 24 = 482 \text{ mm.}$$

$$L_3 = 602 - 10 \times 24 = 362 \text{ mm.}$$

$L_{ph}=15m:$

$$\left. \begin{array}{l} F_{max} = 29798 \text{ N.} \\ k = 0,6 \text{ N/mm}^2 \\ d = 27 \text{ mm.} \end{array} \right\} \rightarrow L_1 = \frac{29798}{0,6 \cdot \pi \cdot 27} = 586 \text{ mm.}$$

$$L_2 = 586 - 5 \times 27 = 451 \text{ mm.}$$

$$L_3 = 586 - 10 \times 27 = 316 \text{ mm.}$$

Hoogte	L ₁	L ₂	L ₃
5m.	312	222	132
12m.	602	482	362
15m.	586	451	316

Berekende waarden.

Hoogte	L ₁
5m.	400
12m.	500
15m.	700

Waarden volgens:

NEN-EN 40-2.

Hoogte	L ₁	L ₂	L ₃
5m.	400	300	250
12m.	600	500	400
15m.	700	550	450

Voorstel voor :

"Eisen lichtmasten"

Ankerlengte als functie van lichtmasthoogte en ankervorm.

3.5

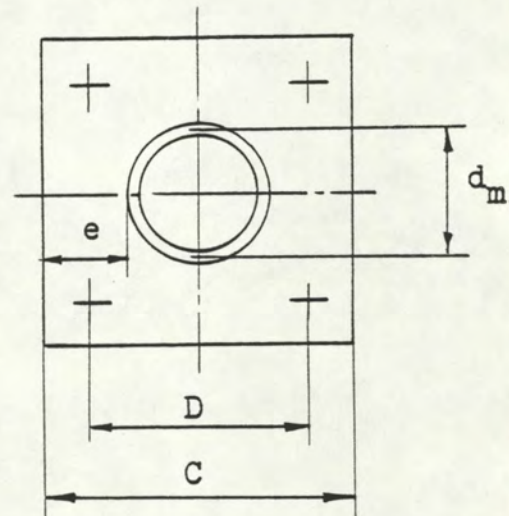
Voetplaat-berekening:

Mastlengte	D(mm)	C(mm)	d _m (mm)	F _{A,max} (kN)	M _{max} (Nm)
(1) 5m.	200	260	160	10,6	4000
(2) 12m.	300	400	220	27,2	14790
(3) 15m.	400	500	220	29,8	21320

De voetplaatdikte t :

$$t \geq \sqrt{\frac{2,5 \cdot F_{\max}}{\bar{\sigma}}}$$

$$t \geq \sqrt{\frac{1/8 \cdot M_{\max} \cdot \psi}{1/6 \cdot e \cdot \bar{\sigma}}}$$



$$\psi = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 \cdot D}{\pi \cdot d_m} - 1 \right) \cdot \left(\frac{C - e}{D} \right)$$

$$e_1 = \frac{1}{2} (C - d_m) = \frac{1}{2} (260 - 160) = 50 \text{ mm.}$$

$$e_2 = \frac{1}{2} (400 - 220) = 90 \text{ mm.}$$

$$e_3 = \frac{1}{2} (500 - 220) = 140 \text{ mm.}$$

$$\psi_1 = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 \cdot 200}{\pi \cdot 160} - 1 \right) \left(\frac{260 - 50}{200} \right) = 0,9845$$

$$\psi_2 = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 \cdot 300}{\pi \cdot 220} - 1 \right) \left(\frac{400 - 90}{300} \right) = 1,1242$$

$$\psi_3 = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 \cdot 400}{\pi \cdot 220} - 1 \right) \left(\frac{500 - 140}{400} \right) = 1,5469$$

Plaatdikte volgens maximale ankerkracht:

$$\begin{aligned} t_{11} &= \left(2,5 \times 10600 / 160 \right)^{\frac{1}{2}} = 12,9 \text{ mm.} \\ t_{21} &= \left(2,5 \times 27200 / 160 \right)^{\frac{1}{2}} = 20,6 \text{ mm.} \\ t_{31} &= \left(2,5 \times 29800 / 160 \right)^{\frac{1}{2}} = 21,6 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Plaatdikte volgens maximaal moment:

$$\begin{aligned} t_{12} &= \left(6 \times 0,9845 \times 4 \times 10^6 / 8 \times 50 \times 160 \right)^{\frac{1}{2}} = 19,2 \text{ mm.} \\ t_{22} &= \left(6 \times 1,1242 \times 14,79 \times 10^6 / 8 \times 90 \times 160 \right)^{\frac{1}{2}} = 29,4 \text{ mm.} \\ t_{23} &= \left(6 \times 1,5469 \times 21,32 \times 10^6 / 8 \times 140 \times 160 \right)^{\frac{1}{2}} = 33,2 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$t_1 \gg 19,2 \text{ mm.}$$

$$t_2 \gg 29,4 \text{ mm.}$$

$$t_3 \gg 33,2 \text{ mm.}$$

Voorstel t-waarden voor "eisen lichtmasten" :

L_{ph}	t (mm)
5m	20
12m	30
15m	35

N.B: Bij de bepaling van de voetplaatdikte(t) is uitgegaan van een mast met dubbele uithouders($e=3m$), waarbij $M_x=M_2$ maatgevend blijkt te zijn voor het maximale moment(M_{max}).

Bepaling van de minimale "e" :

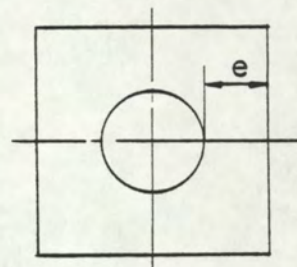
$$G = \frac{1/8 M_{x0} \psi}{1/6 S^2 \cdot e} \quad e = \frac{C - d_m \cdot \alpha}{2} \rightarrow \left(e = \frac{C - d_b}{2} \right)$$

$$\alpha = \frac{d_b}{d_m} = \frac{d_b}{d_b - S} \approx \frac{219,1}{219,1 - 5,9} \approx 1,03$$

$$G = \frac{1/8 M_{x0} \psi}{1/6 S^2 \cdot C} \left(\frac{C}{e} \psi \right)$$

$$\psi = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4D}{\pi d_m} - 1 \right) \left(\frac{C - e}{D} \right)$$

$$\frac{C}{e} \psi = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4D}{\pi d_m} - 1 \right) \frac{1}{2} \left(\frac{C}{D} + \frac{\alpha d_m}{D} \right) \frac{2}{1 - d_m \cdot \frac{\alpha}{C}}$$



Voor masten $\leq 12m$:

$$D = 300 \text{ mm.}$$

$$C = 400 \text{ mm.}$$

$$\alpha = 1,03$$

$$\psi \frac{C}{e} = \left\{ 0,3634 + \frac{1}{2} \left(\frac{382}{d_m} - 1 \right) \left(1,333 + 0,003433 d_m \right) \right\} \frac{2}{1 - 0,002575 d_m}$$

d_m	$\psi \frac{C}{e}$
75	8,97
100	7,35
125	6,42
150	5,84
175	5,49
200	5,29
225	5,22
250	5,23
275	5,53
300	6,03

→ pijpdiameter kan 250 mm worden of $e \geq 75 \text{ mm.}$

Voor masten $\leq 12m$:

$\left\{ \begin{array}{l} C=400mm \\ D=300mm \\ \alpha=1,03 \end{array} \right.$

$\frac{C}{D}$

$d_m (mm)$

100 125 150 175 200 225 250 275 300

$\frac{1}{5}$

Voor een 15m-mast : $d_m = 220 \text{ mm}$, $\Pi = 400 \text{ mm}$
 $C = 500 \text{ mm}$, $\alpha = 1,03$

$$\psi \frac{C}{e} = \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \left(\frac{4 \times 4}{\pi \times 2,2} - 1 \right) \left(\frac{5}{4} + \frac{1,03 \times 2,2}{4} \right) \right\} \frac{2}{1 - \frac{1,03 \times 2,2}{5}} = 5,70$$

Voor een 15m-mast : $d_m = 300 \text{ mm}$, $\Pi = 400 \text{ mm}$, $C = 500 \text{ mm}$, $\alpha = 1,03$

$$\psi \frac{C}{e} = \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \left(\frac{4 \times 4}{\pi \times 3} - 1 \right) \left(\frac{5}{4} + \frac{1,03 \times 3}{4} \right) \right\} \frac{2}{1 - \frac{1,03 \times 3}{5}} = 5,60$$

$$\psi \frac{C}{e} \text{ voor } d_m = 300 < \psi \frac{C}{e} \text{ voor } d_m = 220$$

→ pijpdiameter kan 300 mm. worden of $e \geq 100 \text{ mm}$.

Voor een 5m-mast : $d_m = 180 \text{ mm}$, $\Pi = 200 \text{ mm}$, $C = 260 \text{ mm}$, $\alpha = 1,03$

$$\psi \frac{C}{e} = \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \left(\frac{4 \times 2}{\pi \times 1,8} - 1 \right) \left(\frac{2,6}{2} + \frac{1,03 \times 1,8}{2} \right) \right\} \frac{2}{1 - \frac{1,03 \times 1,8}{2,6}} = 5,75$$

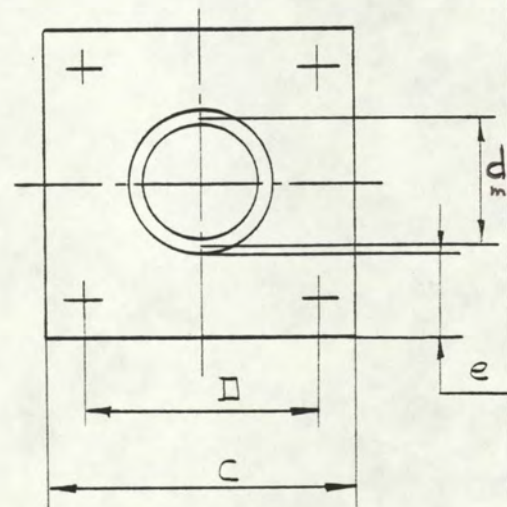
Voor een 5m-mast : $d_m = 160 \text{ mm}$, $\Pi = 200 \text{ mm}$, $C = 260 \text{ mm}$, $\alpha = 1,03$

$$\psi \frac{C}{e} = \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \left(\frac{4 \times 2}{\pi \times 1,6} - 1 \right) \left(\frac{2,6}{2} + \frac{1,03 \times 1,6}{2} \right) \right\} \frac{2}{1 - \frac{1,03 \times 1,6}{2,6}} = 5,42$$

→ pijpdiameter kan 180 mm worden of $e \geq 40 \text{ mm}$.

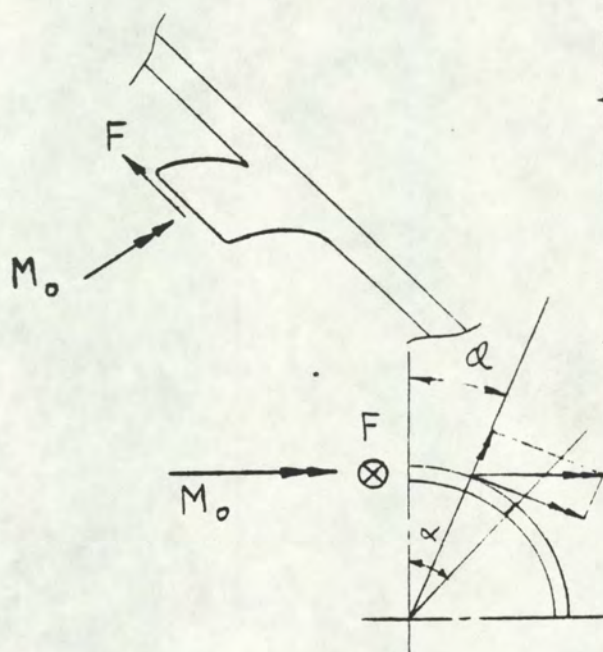
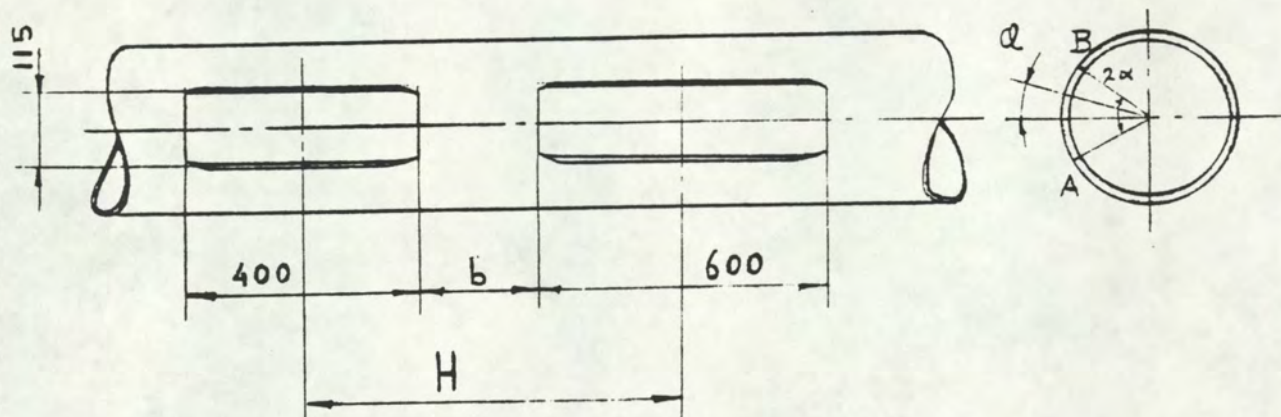
Voorstel e-waarden voor 15-, 12-, en 5m-masten :

Masthoogte	$e_{\min}(\text{mm})$
15m	100
12m	75
5m	40



3.6

Berekening van het "dammetje" op buiging en torsie:



$$\begin{cases} b = 120 \text{ mm} \\ H = \frac{1}{2}(400 + 600) + 120 \\ H = 620 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{1}{2}(216 - 6) = 106,5 \text{ mm} \\ \rho_2 = \frac{1}{2}(168 - 4,5) = 81,75 \text{ mm} \\ \text{bg AB} = 2 \ell \end{cases}$$

ρ = gemiddelde straal $\rho = \frac{1}{2}(d - t)$
 d = buitendiameter mast
 t = wanddikte.

$L_{ph} = 5\text{m} \dots e = 1\text{m} \quad M_w = 298 \text{ Nm}$

$e = 2\text{m} \quad M_w = 553 \text{ ,,}$

$e = 3\text{m} \quad M_w = 857 \text{ ,,}$

$L_{ph} = 12\text{m} \dots e = 1\text{m} \quad M_w = 371 \text{ Nm}$

$e = 2\text{m} \quad M_w = 689 \text{ ,,}$

$e = 3\text{m} \quad M_w = 1068 \text{ ,,}$

$L_{ph} = 15\text{m} \dots e = 1\text{m} \quad M_w = 402 \text{ Nm}$

$e = 2\text{m} \quad M_w = 747 \text{ ,,}$

$e = 3\text{m} \quad M_w = 1158 \text{ ,,}$

$$M_T = F_p \{ 1 - (1 + \beta) \cos \varrho \} = F_p \lambda$$

Voor masten van 10, 12, 15 m :

$$\alpha_1 = \text{bg} \sin \frac{115}{207} = 34^\circ$$

$$\text{Voor masten van 5 m : } \alpha_2 = \text{bg} \sin \frac{115}{159} = 46,3^\circ$$

$$\beta = \frac{2 \sin \alpha}{\alpha + \sin \alpha \cos \alpha} - 1$$

$$\beta_1 = \left\{ 2 \sin 34^\circ / (0,5934 + \sin 34^\circ \cos 34^\circ) - 1 \right\} = 0,0581$$

$$\beta_2 = \left\{ 2 \sin 46,3^\circ / (0,8081 + \sin 46,3^\circ \cos 46,3^\circ) - 1 \right\} = 0,1058$$

$$\lambda_1 = \left\{ 1 - 1,0581 \cos \varrho \right\} \quad 0 \leq \varrho \leq 34^\circ$$

$$\lambda_2 = \left\{ 1 - 1,1058 \cos \varrho \right\} \quad 0 \leq \varrho \leq 46,3^\circ$$

$$M_b = \frac{F_p^2}{1/6 \cdot b^2} \left[\varrho - (1 + \psi) \sin \varrho \right] = 6 \frac{F_p^2}{b^2} \gamma$$

$$\psi = \frac{2 (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} - 1$$

$$\psi_1 = \frac{2 (\sin 34^\circ - 0,5934 \cos 34^\circ)}{0,5934 - \sin 34^\circ \cos 34^\circ} - 1 = 0,0358$$

$$\psi_2 = \frac{2 (\sin 46,3^\circ - 0,8081 \cos 46,3^\circ)}{0,8081 - \sin 46,3^\circ \cos 46,3^\circ} - 1 = 0,0672$$

$$\gamma_1 = \varrho - 1,0358 \sin \varrho \quad 0 \leq \varrho \leq 34^\circ$$

$$\gamma_2 = \varrho - 1,0672 \sin \varrho \quad 0 \leq \varrho \leq 46,3^\circ$$

$$x = \frac{1}{1 + 0,624 \frac{l^2}{b^2}}$$

$$l = \frac{1}{2} b g AB$$

$$2l_1 = \alpha_1 d_1 = 0,5934 \cdot 213 = 126,4 \text{ mm.}$$

$$2l_2 = \alpha_2 d_2 = 0,8081 \cdot 163,5 = 132,1 \text{ mm.}$$

$$x_1 = \frac{1}{1 + 0,624 \left(\frac{126,4}{2 \times 120} \right)^2} = 0,8525$$

$$x_2 = \frac{1}{1 + 0,624 \left(\frac{132,1}{2 \times 120} \right)^2} = 0,8410$$

$$G_{b1} = \frac{18 \cdot \gamma \cdot M_T \cdot H \cdot x}{\pi (bt)^2}$$

$$G_{b2} = \frac{6 M_T \cdot H \sin \alpha}{t b^2 \cdot 2 \pi \rho} \left\{ 1 + \psi x + (1-x) \beta \right\}$$

$$T = \frac{3 M_T \cdot H \cdot \lambda_{\max} (1-x)}{2 \pi \rho \cdot b t^2}$$

5m-lichtmast met uithouder e=1m:

$$G_{b1} = \frac{18 \times 0,0365 \times 298 \times 620 \times 0,841 \times 10^3}{\pi (120 \times 4,5)^2} = 111,44 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{b2} = \frac{6 \times 298 \times 620 \times \sin 46,3^\circ \times 10^3}{\pi \times 4,5 \times 120^2 \times 2 \times 81,75} \left\{ 1 + 0,0672 \times 0,841 + 0,159 \times 0,1058 \right\}$$

$$G_{b2} = 26 \text{ N/mm}^2$$

$$T = \frac{3 \times 298 \times 620 \times 0,236 \times 0,159 \times 10^3}{2 \times 81,75 \times \pi \times 120 \times 4,5^2} = 16,7 \text{ N/mm}^2$$

$$G_i = \left\{ (111,44 + 26)^2 + 3 \times 16,7 \right\} = 137,6 \text{ N/mm}^2$$

$$e=2m: G_i = \frac{553}{298} \times 137,6 = 255,4 \text{ N/mm}^2$$

$$e=3m: G_i = \frac{857}{298} \times 137,6 = 395,7 \text{ N/mm}^2$$

12m-lichtmast met uithouder e=1m:

$$G_{b1} = \frac{371 \times 0,142 \times 620 \times 6 \times 0,8525 \times 10^3}{\frac{1}{6} \times (6)^2 \times 2 \times \pi \times (120)^2} = 31,2 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{b2} = \frac{371 \times 620 \times \sin 34^\circ (1 + 0,0358 \times 0,8525 + 0,1475 \times 0,0581) \times 10^3}{2\pi \times 106,5 \times \frac{1}{6} \times 6 \times (120)^2}$$

$$G_{b2} = 14 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{371 \times 620 \times 0,1228 \times 0,1475 \times 10^3}{2 \times \frac{213}{2} \times \pi \times 120 \times \frac{1}{3} \times 6^2} = 4,34 \text{ N/mm}^2$$

$$G_i = \left\{ (31,2 + 14)^2 + 3 \times 4,34^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = 45,8 \text{ N/mm}^2$$

$$e=2m: G_i = 85,5 \text{ N/mm}^2$$

$$e=3m: G_i = 132,4 \text{ N/mm}^2$$

15m-lichtmast met uithouder e=1m: $G_i = 50 \text{ N/mm}^2$

„ „ e=2m: $G_i = 92,7 \text{ N/mm}^2$

„ „ e=3m: $G_i = 142,6 \text{ N/mm}^2$

Aanpassen van hoogte b: $G = 100 \text{ N/mm}^2$ i.v.m hogere spanningen loodrecht hierop met tegengesteld teken; en de invloed van de stijfheid: $b' \approx b \sqrt{1,2 \frac{G}{G}} \dots 1,2 \approx \frac{1}{x}$

5m-lichtmast met uithouder e=1m: $b' = 120 \sqrt{1,2 \cdot \frac{137,6}{100}} = 154 \text{ mm}$

„ „ e=2m: $b' = 120 \sqrt{1,2 \cdot \frac{255,4}{100}} = 210 \text{ mm}$

„ „ e=3m: $b' = 120 \sqrt{1,2 \cdot \frac{395,7}{100}} = 262 \text{ mm}$

„ „ e=1,25m: $b' = 120 \sqrt{1,2 \cdot \frac{140}{100}} = 174 \text{ mm}$

12m-lichtmast met uithouder e=3m: $b' = 120 \sqrt{1,2 \cdot \frac{132,4}{100}} = 151 \text{ mm}$

15m-lichtmast met uithouder e=3m: $b' = 120 \sqrt{1,2 \cdot \frac{142,6}{100}} = 157 \text{ mm}$

Voorstel voor "eisen lichtmasten" :

$b = 200 \text{ mm.}$

3.7

In de grond ingeklemde mast:

Grenswaarde voor de gronddruk:

$$p_e = \rho \cdot g \cdot (\lambda_p - \lambda_a) \cdot \left(1 + \frac{2l}{3d}\right) \cdot l$$

$$\rho g (\lambda_p - \lambda_a) = 45 \cdot 10^3 \text{ N/m}^3$$

$$\text{mast } 10 \text{ m : } l = 1,70 \text{ m} \quad d = 0,219 \text{ m}$$

$$\text{mast } 12 \text{ m : } l = 2,00 \text{ m} \quad d = 0,219 \text{ m}$$

$$\text{mast } 15 \text{ m : } l = 2,50 \text{ m} \quad d = 0,219 \text{ m}$$

$$p_{e,10} = 45 \times 10^3 \left(1 + \frac{2 \times 1,7}{3 \times 0,219}\right) \times 1,7 = 4,724 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{e,12} = 45 \times 10^3 \left(1 + \frac{2 \times 2,0}{3 \times 0,219}\right) \times 2,0 = 6,379 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{e,15} = 45 \times 10^3 \left(1 + \frac{2 \times 2,5}{3 \times 0,219}\right) \times 2,5 = 9,687 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\beta = \frac{M + \Pi \cdot l}{\Pi \cdot l}$$

$$10 \text{ m - mast } \quad \beta = \frac{11086 + 1,7 \times 1547}{1,7 \times 1547} = 5,2 \longrightarrow \alpha = 1,87$$

$$12 \text{ m - mast } \quad \beta = \frac{14790 + 2 \times 1750}{2 \times 1750} = 5,2 \longrightarrow \alpha = 1,87$$

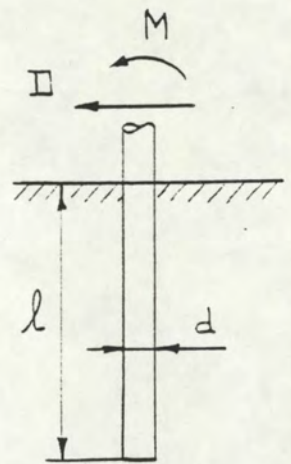
$$15 \text{ m - mast } \quad \beta = \frac{21320 + 2,5 \times 2084}{2,5 \times 2084} = 5,1 \longrightarrow \alpha = 1,87$$

$$p = \alpha \frac{M + D l}{D l} \quad W = \frac{1}{6} \Pi l^2$$

$$10 \text{ m - mast } \quad W = \frac{1}{6} \times 0,219 \times 1,7^2 = 0,1033 \text{ m}^3$$

$$12 \text{ m - mast } \quad W = \frac{1}{6} \times 0,219 \times 2,0^2 = 0,1460 \text{ m}^3$$

$$15 \text{ m - mast } \quad W = \frac{1}{6} \times 0,219 \times 2,5^2 = 0,2280 \text{ m}^3$$



$$10 \text{ m-mast : } p = \frac{1,87 (11086 + 1,7 \cdot 1547)}{0,1055} = 2,43 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

→ Karakteristiek (gebruikstoestand)

$$1,5 \cdot p = 3,65 \times 10^5 \text{ Pa} < p_e = 4,724 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

$$12 \text{ m-mast : } p = \frac{1,87 (14790 + 2 \times 1750)}{0,146} = 2,34 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

$$1,5 p = 3,51 \times 10^5 \text{ Pa} < p_e = 6,379 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

$$15 \text{ m-mast : } p = \frac{1,87 (21320 + 2,5 \times 2084)}{0,228} = 2,18 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

$$1,5 p = 3,26 \times 10^5 \text{ Pa} < p_e = 9,687 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

Voor een 15m-mast met $l = 2,00 \text{ m}$:

$$p_e = 45 \times 10^3 \left\{ 1 + \frac{2 \times 2}{3 \times 0,219} \right\}^2 = 6,379 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

$$\beta = \frac{21320 + 2 \times 2084}{2 \times 2084} = 6,1 \longrightarrow \alpha = 1,89$$

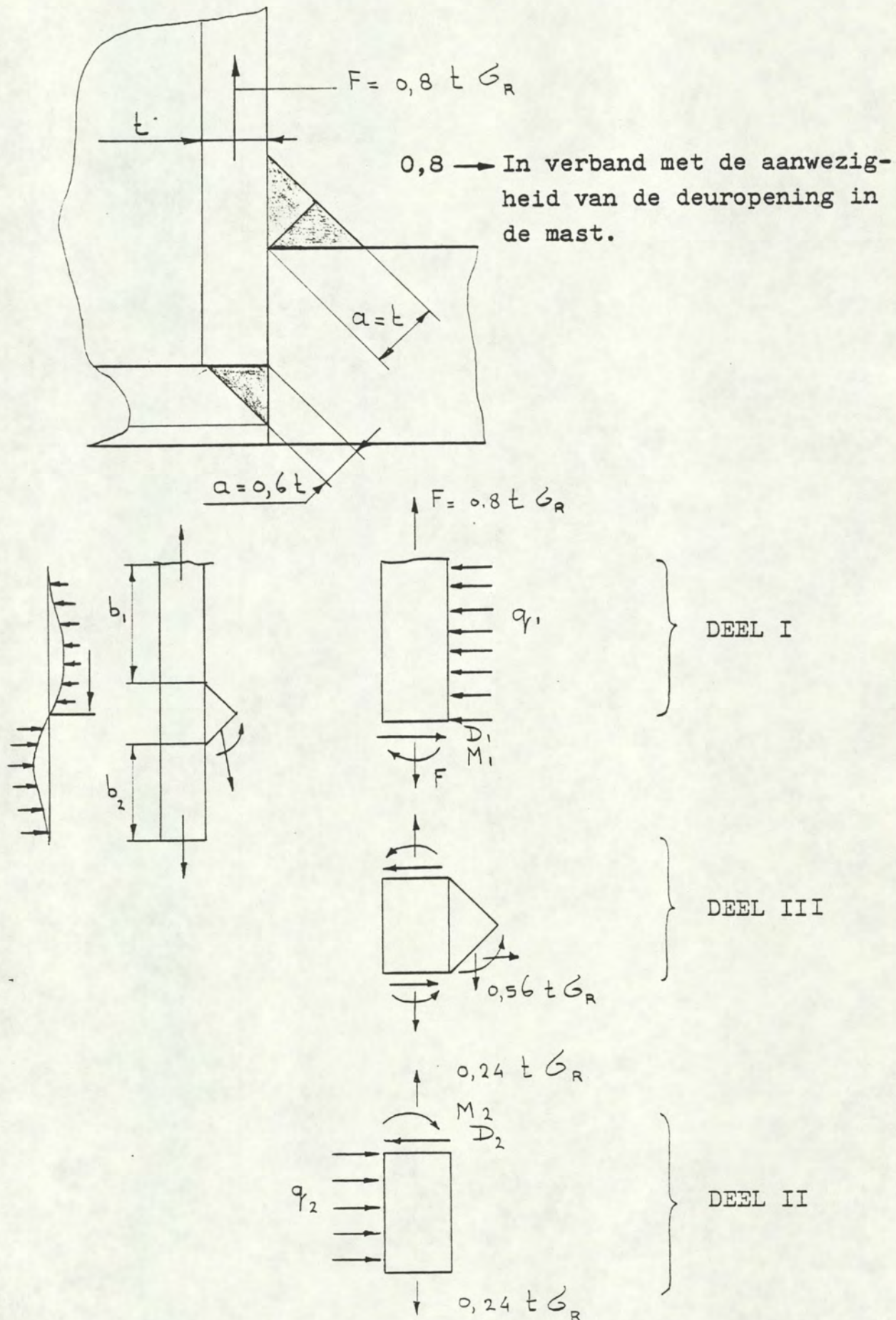
$$p = \frac{1,89 (21320 + 2 \times 2084)}{1/6 \times 0,219 \times 2^2} = 3,3 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

$$1,5 p = 4,95 \times 10^5 \text{ Pa} \leq p_e = 6,38 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

Voorstel voor "eisen lichtmasten" :

$$\left. \begin{array}{l} \text{l: bij } L_{ph} \text{ 10m} = 1,70\text{m.} \\ \text{bij } L_{ph} \text{ 12m} = 2,00\text{m.} \\ \text{bij } L_{ph} \text{ 15m} = 2,50\text{m.} \end{array} \right\} \dots\dots\text{volgens NEN-EN 40-2}$$

Bij de beschouwing van dit detail wordt uitgegaan van de plasticiteitstheorie:



Beschouwing DEEL I:

Plastisch weerstandsmoment $W = \frac{1}{4}(t^2 - c^2) = \frac{1}{4}t^2 \left[1 - \left(\frac{c}{t}\right)^2\right]$

$$W_1 = \frac{1}{4}t^2 (1 - 0,8^2) = 0,09t^2$$

$$M_1 = 0,09t^2 \cdot \sigma_R = \frac{1}{2} q_1 b_1^2 \dots\dots\dots \textcircled{\text{I}}$$

De membraan-spanning door q_1 bedraagt:

$$Nq = q_1 \rho = t \sigma_R \quad q_1 = \frac{t \sigma_R}{\rho}$$

Substitutie in I levert:

$$0,09t^2 \sigma_R = \frac{\frac{1}{2} t \sigma_R \cdot b_1^2}{\rho}$$

$$0,18t \cdot \rho = b_1^2 \rightarrow b_1 = \sqrt{0,18t \cdot \rho}$$

Stel: $\rho/t = 18$ (zie catalogi van pijpen)

$$b_1 = t \sqrt{0,18 \times 18} = 1,8t$$

$$D_1 = q_1 b_1 = \frac{t \sigma_R}{\rho} \cdot 1,8t = t \sigma_R \cdot \frac{1,8}{18} = \underline{\underline{0,1 t \sigma_R}}$$

$$\underline{\underline{M_1 = 0,09t^2 \sigma_R}}$$

Beschouwing DEEL II:

$$W_2 = \frac{1}{4} t^2 (1 - 0,24^2) = 0,236 t^2$$

$$M_2 = 0,236 t^2 G_R = \frac{1}{2} q_2 b_2^2 \text{ ----- } \textcircled{\text{II}}$$

De membraan-spanning door q_2 bedraagt:

$$q_2 = \frac{t G_R}{\rho}$$

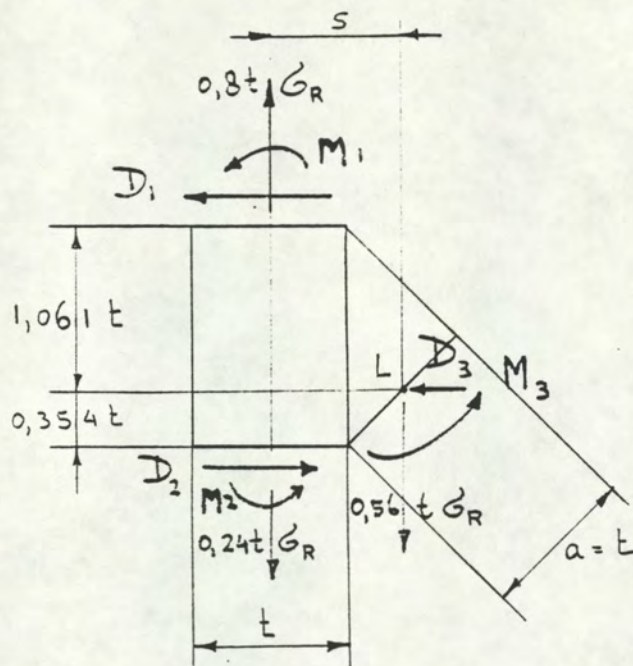
Substitutie levert: $0,2356 t^2 G_R = \frac{\frac{1}{2} t G_R \cdot b_2^2}{\rho}$

$$0,47 t \cdot \rho = b_2^2 \longrightarrow b_2 = \sqrt{0,47 t \cdot \rho}$$

$$\rho/t \approx 18 \quad b_2 = t \sqrt{0,47 \times 18} = 2,9 t$$

$$D_2 = q_2 \cdot b_2 = \frac{t \cdot G_R}{\rho} \cdot 2,9 t = t G_R \cdot \frac{2,9}{18} \approx \underline{\underline{0,162 t G_R}}$$

$$\underline{\underline{M_2 = 0,236 t^2 G_R}}$$

Beschouwing DEEL III:

$$s = \frac{1}{2}t + \frac{1}{4}t\sqrt{2} \approx 0,854t$$

$$\sum V = 0$$

$$\sum H = 0 \rightarrow D_1 - D_2 + D_3 = 0$$

$$I = 0,162t GR - 0,1t GR$$

$$D = \underline{\underline{0,062t GR}}$$

$$\sum M_{t.o.v. L} = 0$$



$$-1,061t \times D_1 - M_1 + 0,56t GR \times s - 0,354t D_2 - M_2 - M_3 = 0$$

$$-1,061t \times 0,1t GR - 0,09t^2 GR + 0,56t GR \times 0,854t$$

$$- 0,354t \times 0,162t GR - 0,236t^2 GR - M_3 = 0$$

$$M_3 = -0,0112t^2 GR \text{ (rechtsom)}$$



$$0,0112t^2 GR = \frac{1}{4}a^2(1-\beta^2)GR \quad (a=t)$$

$$0,0112 = 0,25 - 0,25\beta^2$$



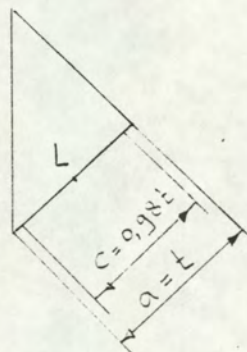
$$\beta \approx 0,98 = \frac{c}{t} \rightarrow \underline{\underline{c = 0,98t}}$$



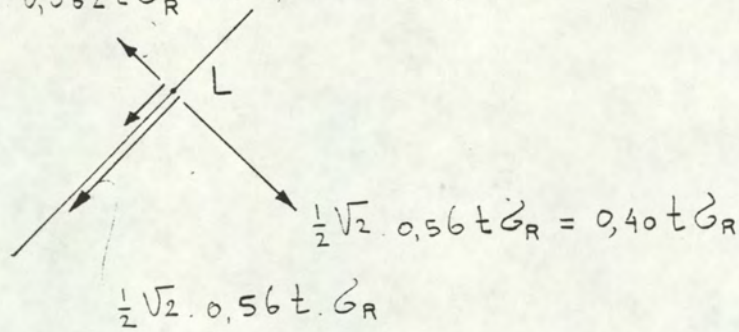
$$F = 0,98t GR$$



$$\underline{\underline{G = 0,98 GR}}$$



$$\frac{1}{2}\sqrt{2} \cdot 0,062 t G_R = 0,044 t G_R$$



$$F_{//} = (0,4 + 0,044) t G_R \longrightarrow T = 0,444 G_R$$

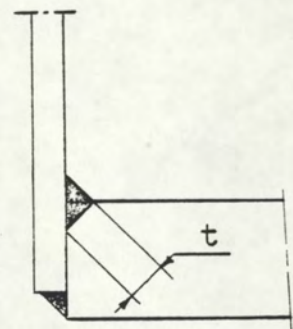
$$F_{\perp} = (0,4 - 0,044) t G_R \longrightarrow G = 0,356 G_R$$

$$G_{e, las} = \sqrt{G^2 + 1,8 T^2}$$

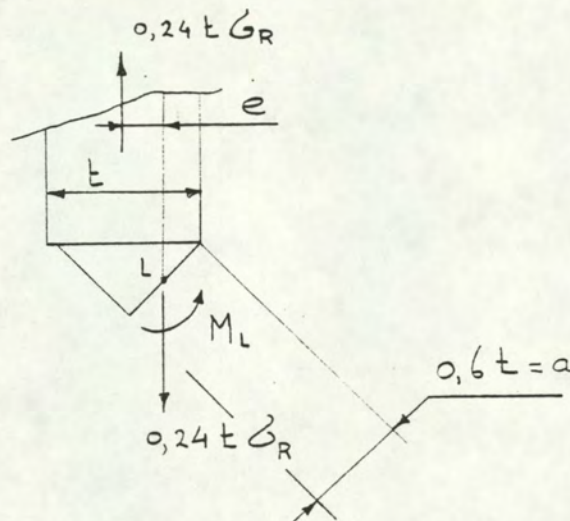
$$G_{e, las} = \sqrt{(0,356 G_R)^2 + 1,8 (0,444 G_R)^2} \approx \underline{\underline{0,7 G_R}}$$

$$0,7 G_R < 0,98 G_R$$

In verband met het risico van "lamellar tearing" is het gunstiger de las uit te voeren zoals hiernaast is aangegeven:



Beschouwing onderlas:



$$e = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{2} \cdot 0,3 \right) t$$

$$e = 0,288 t$$

$$M_L = 0,24 t G_R \cdot 0,288 t$$

$$M_L = 0,069 t^2 G_R$$

$$0,069 t^2 G_R = \frac{1}{4} [(0,6 t)^2 - c^2] G_R$$

$$0,069 t^2 = 0,09 t^2 - 0,25 c^2 \longrightarrow \underline{\underline{c = 0,29 t}}$$

$$F_{//} = F_L = 0,24 t \cdot G_R : \frac{1}{2} \sqrt{2} \approx 0,17 t G_R$$

$$\tau = G = 0,17 G_R t / 0,29 t = 0,59 G_R$$

$$G_{e, las} = \sqrt{(0,59 G_R)^2 + 1,8 (0,59 G_R)^2}$$

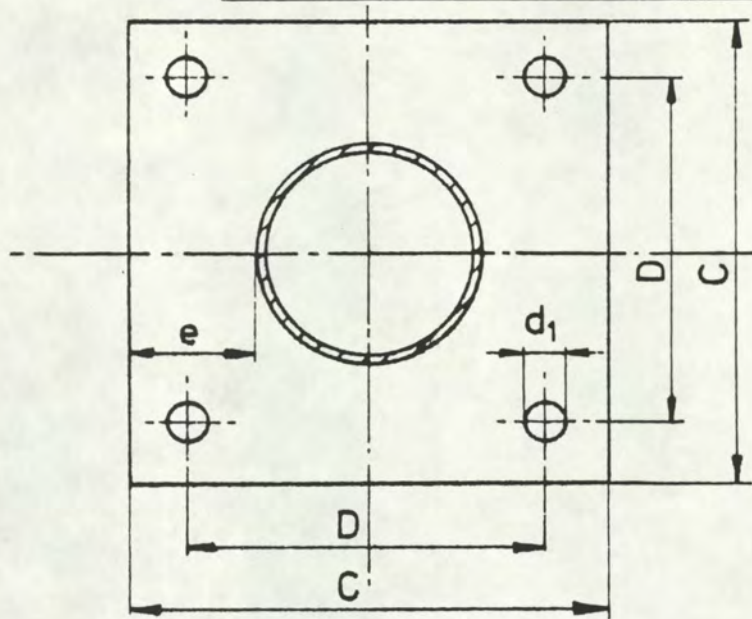
$$G_{e, las} = \underline{\underline{0,99 G_R < G_R}}$$

Voorstel voor "Eisen lichtmasten":

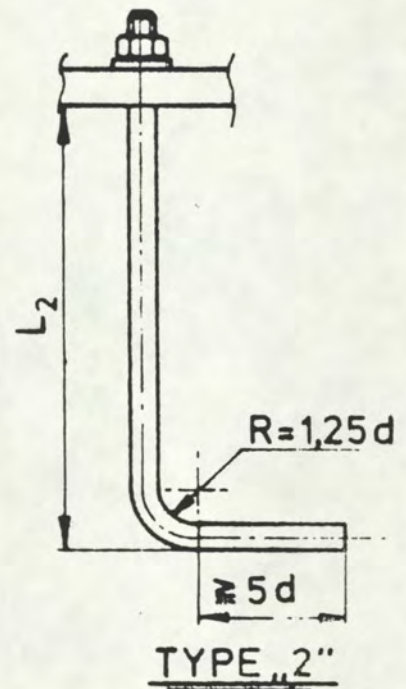
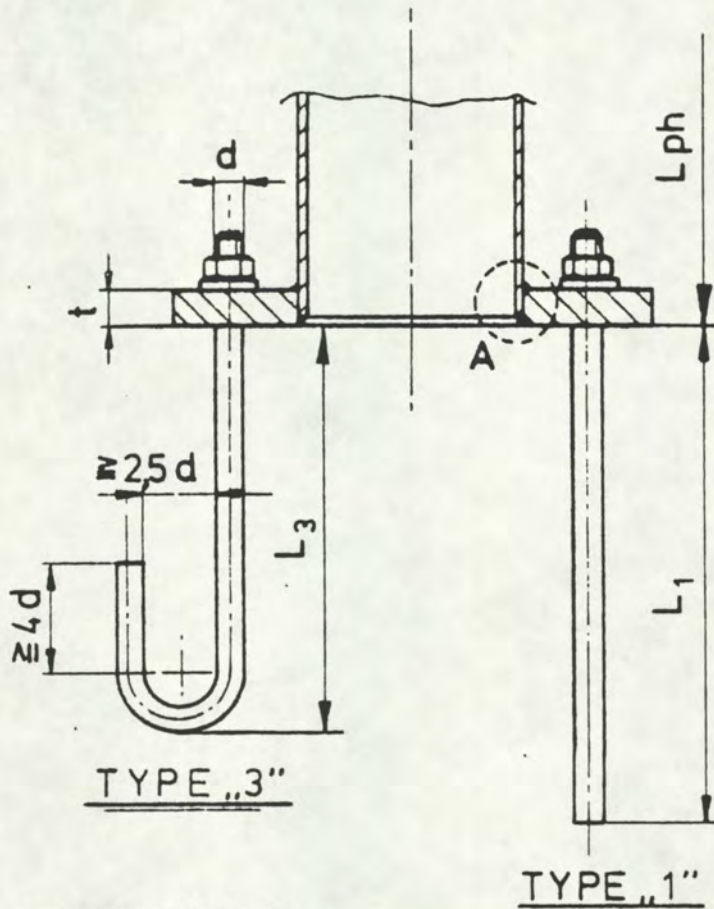
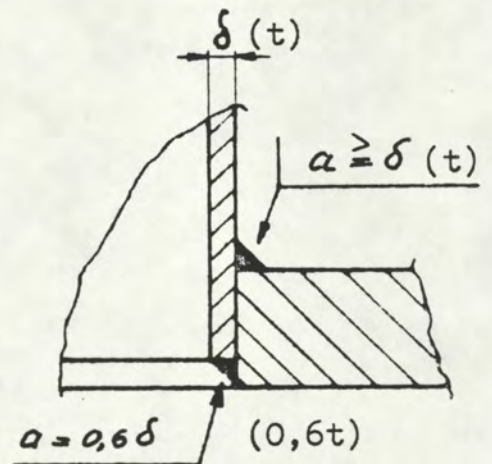
Bovenlas: $a = t$

Onderlas: $a = 0,6 t$

VOORSTEL VOOR: "EISEN LICHTMASTEN":



DETAIL „A“



MAATEENHEID: mm

L _{ph} [m]	C	D	d	d ₁	L ₁	L ₂	L ₃	e	t
≤ 5	260	200	18	22	400	300	250	40	20
≤ 12	400	300	24	28	600	500	400	75	30
≤ 15	500	400	27	31	600	500	400	100	35

d, L, e en t; zijn minimum waarden voor, niet vlak aan zee staande, lichtmasten met cirkelvormige doorsnede.

3.9

Benodigde afrondingsstraal bij verjongingen:

$$- \text{Stel } \beta = 1 \quad \alpha = 42^\circ : \quad \beta(1 + \beta - \beta \cos \alpha) \cos^2 \alpha \geq 1$$

$$1(1 + 1 - 1 \cos 42^\circ) \cos^2 42^\circ = 0,6941$$

$$- \text{Stel } \beta = 1,2 \quad \alpha = 42^\circ :$$

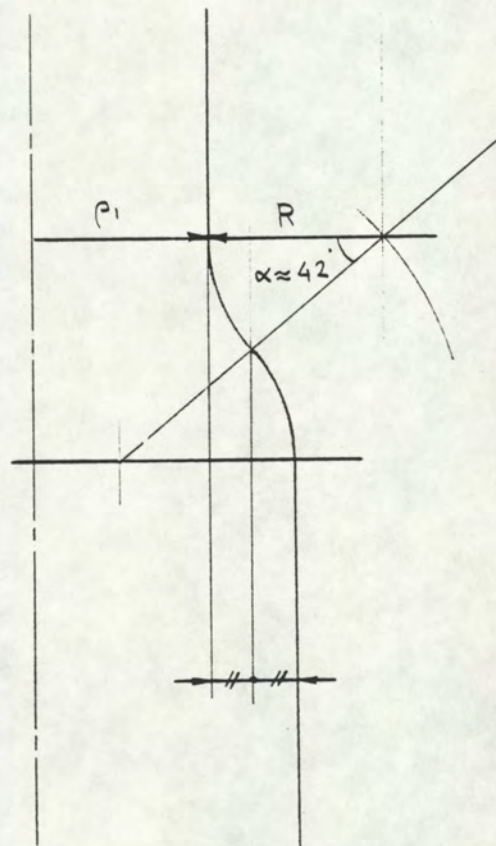
$$1,2(1 + 1,2 - 1,2 \cos 42^\circ) \cos^2 42^\circ = 0,867$$

$$- \text{Stel } \underline{\beta = 1,25} \quad \alpha = 42^\circ :$$

$$1,25(1 + 1,25 - 1,25 \cos 42^\circ) \cos^2 42^\circ = 0,912 \rightarrow \sim 10\%$$



$$R \geq 1,25 \rho_1$$



$$\{(1 + 1,25)^2 - 2(1 + 1,25)1,25 \cos 42^\circ + 1,25^2 \cos^2 42^\circ\} \cos 42^\circ = 1,297$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \{(1 + 1,25)^2 - 2(1 + 1,25)1,25 + 1,25^2\} 1 = 1$$

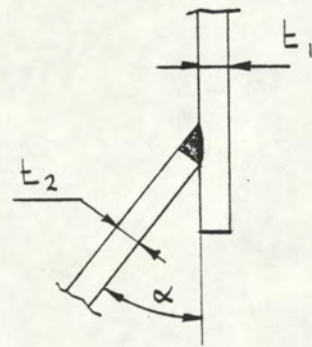
Voor verjongingen uitgevoerd zoals op de vorige bladzijde is aangegeven geldt:

$$R \geq 1,25 p_1$$

Gelaste uitvoering:

$$l \approx 4 t_2$$

$$\sigma_T \approx \sigma_1 \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{p_1}{l} \cdot t_2 \alpha$$



Bv: -pijp 2: 219,1/207,3 (t=5,9mm) \longrightarrow $p_2 = 106,6 \text{ mm}$.
 -pijp 1: 168,3/159,3 (t=4,5mm) \longrightarrow $p_1 = 81,9 \text{ mm}$.

$$\alpha \approx 40^\circ \longrightarrow t_2 \alpha \approx 0,84$$

$$\sigma_T \approx \sigma_1 \cdot \frac{4,5}{5,9} \cdot \frac{81,90}{4 \times 5,9} \cdot 0,84 \approx 2,22 \sigma_1$$



Gelaste uitvoeringen, waarbij de bovenpijp niet in de onderpijp steunt, zijn NIET aanvaardbaar.

3.10

Bepaling van de spanning in de kromming van de uithouder:

Bv: ϕ 88,9/t=3,2 mm

Volgens NPR 988:

$R \geq 5d$

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{88,9 - 3,2}{2} = 42,85 \text{ mm} \\ R &= 5 \times 88,9 = 444,5 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \lambda &= \frac{R \cdot t}{\rho^2} = \frac{444,5 \times 3,2}{42,85^2} \\ &\downarrow \\ \lambda &= 0,775 \end{aligned}$$

$$k = \frac{1 + 12\lambda^2}{10 + 12\lambda^2} = \frac{1 + 12 \times 0,775^2}{10 + 12 \times 0,775^2} = 0,477$$

$$\alpha_{1, \max} = \frac{2}{3k} \sqrt{\frac{5 + 6\lambda^2}{18}} = \frac{2}{3 \times 0,477} \sqrt{\frac{5 + 6 \times 0,775^2}{18}}$$

$$\alpha_{1, \max} = 0,967$$

$$\alpha_{k10} = \frac{12\lambda^2 - 2}{12\lambda^2 + 1} = \frac{12 \times 0,775^2 - 2}{12 \times 0,775^2 + 1} = 0,635$$

$$\alpha_{k20} = \frac{18\lambda}{1 + 12\lambda^2} = \frac{18 \times 0,775}{1 + 12 \times 0,775^2} = 1,70$$

$$\sqrt{0,635^2 + 1,70^2 + 0,635 \times 1,70} = 2,10$$



Geeft spanningen die $\sim 2 \times$ zo groot zijn als: $\zeta = \frac{M}{W}$

rijkswaterstaat directie bruggen

LICHTMASTEN

4. WINDBELASTING OP LICHTMASTEN.

LICHTMASTEN

RIJKSWATERSTAAT DIRECTIE BRUGGEN.

4.1 Windbelasting op lichtmasten:

De windbelasting die bij lichtmasten in rekening moet worden gebracht gekoppeld aan de daarbij te hanteren toe te laten spanningen, is in vele besprekingen die in '79 en '80 zowel met T.N.O. als met de normalisatiecommissie "lichtmasten" zijn gehouden, een punt van discussie geweest.

Deze besprekingen hebben met betrekking tot dit onderwerp helaas niet kunnen leiden tot een eensluidend standpunt.

Het gevolg hiervan is dat Rijkswaterstaat in "Eisen lichtmasten 1980" voor stalen lichtmasten andere toe te laten spanningen voorschrijft dan in NPR 993 is aangegeven.

De opvattingen van Rijkswaterstaat kunnen als volgt worden samengevat:

- 1) De windbelastingen zoals die zijn aangegeven in NPR 993 komen redelijk overeen met de waarden die destijds door ons aan de hand van NEN 3850 (TGB 1972) zijn bepaald. (De resultaten daarvan vindt men onder 4.2)

Daarbij is rekening gehouden met de invloed van het trillen. De daarvoor benodigde eigen-frequenties werden ontleend aan NPR 993 paragr.6.

Hoewel wij van mening zijn dat de windbelastingen van vlak aan zee staande masten in verhouding tot de "land"-masten aan de hoge kant zijn, kunnen wij ons wat de grootte van de windbelasting betreft wel verenigen met de waarden die in NPR 993 zijn aangegeven.

- 2) Onze bezwaren richten zich op de interpretatie van deze belastingen en de daaraan gekoppelde toelaatbare spanningen.

Aanvankelijk waren enige leden van commissie 34264 "Lichtmasten" van mening dat het trillen van de mast geen invloed kon hebben op de sterkte (levensduur), omdat bij het overschrijden van de vloei-grens de demping zodanig zou toenemen dat de invloed van het trillen te verwaarlozen proporties zou aannemen. (TNO rapport BI-75-5/08.1.100)

De belastingen volgens NPR 993 werden dan ook beschouwd als "direct" door de wind optredende belastingen en dus zonder invloed van de dynamische responsie.

De afwijkingen die de NPR waarden vertoonden met de voor dit geval in de TGB gegeven waarden kon men beschouwen te zijn ontstaan door vermenigvuldiging van de TGB waarden met een belastingsfactor, of, wat op het zelfde neerkomt: door verschuiving van de gemiddelde overschrijdingstijd van 5 naar ca. 50 jaar. Deze zienswijze was voor ons onaanvaardbaar. Enerzijds omdat het aspect van het trillen ook in de internationale voorschriften (CEN/WG50) was opgenomen en anderzijds omdat wij van mening waren dat de dynamische responsie bepalend zou zijn voor de levensduur van de mast.

Naar aanleiding daarvan is toen door Rijkswaterstaat besloten (vermoeiings)proeven op enkele lichtmasten te doen uitvoeren. De resultaten van deze proeven toonden aan dat de masten niet bestand waren tegen het trillen en bezweken ter plaatse van de verjongingen.

- 3) Nu het getuige de hierboven vermelde resultaten, vastligt dat het trillen in rekening moet worden gebracht en dus de belastingen van NPR 993 belastingen zijn die gemiddeld eens in de vijf jaar worden over-

schreden, richt zich het probleem thans op de daarbij aan te houden toe te laten spanningen.

Teneinde hier een uitspraak over te doen, dient men zich te realiseren dat zich bij lichtmasten de merkwaardige situatie voordoet dat per element de grootste momenten juist op die plaatsen optreden waar zich de zwakste details bevinden.

Deze details zijn:

- het gekromde gedeelte van de uithouder.
- de verbinding uithouder-mast, in het bijzonder bij dubbele uithouders zowel met betrekking tot het eigen-gewicht als de windbelasting.
- overgangen naar grotere diameters(verjongingen).
- de deuropening.
- het "dammetje" tussen de deuropeningen bij masten met dubbele uithouders.
- de verbinding mast-voetplaat.
- de verankering.

Behalve voor de deuropening, voorziet NPR 993 niet in het aangeven van berekeningsmethoden voor deze details. De bedoeling is zelfs deze details te laten voor wat ze zijn (behalve enige aanbevelingen in NPR 988) en de berekening van de spanningen te baseren op de onverzwakte buisdoorsneden.

Al deze details zijn bij uitstek vermoelingsgevoelig. Naar ons bekend is heeft er nimmer een gericht onderzoek naar de statische noch naar de dynamische "Gestaltfestigheid" van deze details plaatsgevonden.

Uit het onder 2) genoemde onderzoek bleek, dat de reserve van de betreffende masten met betrekking tot de hoge belastingspulsen relatief groot was.

Dit betekent echter nog niet dat andere details of masten met andere afmetingen en anders geconstrueerde details een zelfde reserve te zien zullen geven.

Daarnaast speelt het aspect van de spreiding een belangrijke rol (slechts twee identieke masten werden beproefd).

Bovendien is bij de beproeving, in verband met de duur van het onderzoek, het deel van de lage belastingen van het windspectrum niet meegenomen, zodat over de invloed daarvan slechts een gissing kan worden gedaan.

- 4) Al deze aspecten in overweging genomen, kunnen wij niet anders concluderen dan dat de marge tussen de rekenwaarde van de optredende spanningen en de rekenwaarde van de vloeigrens in NPR 993 op dit moment te gering is en voor Rijkswaterstaat derhalve niet is aan te bevelen.

4.2

Windbelasting op lichtmasten:

(Vergelijking NPR993 met NEN3850)

Volgens NPR 993: eigen frequentie $f_e = \frac{10}{h + w}$

$w = 1,25 \text{ m.}$

$h = 5 \text{ m}$	\longrightarrow	$f_e = 1,60 \text{ Hz.}$
$h = 10 \text{ m}$		$f_e = 0,89 \text{ Hz.}$
$h = 15 \text{ m}$		$f_e = 0,62 \text{ Hz.}$
$h = 20 \text{ m}$		$f_e = 0,47 \text{ Hz.}$
$h = 30 \text{ m}$		$f_e = 0,32 \text{ Hz.}$
$h = 40 \text{ m}$		$f_e = 0,24 \text{ Hz.}$

$$q = \frac{v_u^2}{1,6} \times G$$

Masten "land" : $v_u = 20,5 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,19}$

$h = 5 \text{ m}$	\longrightarrow	$v_u = 18,0 \text{ m/s.}$	$r = 0,39$	$T_b = 2,0$
$h = 10 \text{ m}$		$v_u = 20,5 \text{ m/s.}$	$r = 0,35$	$T_b = 1,875$
$h = 15 \text{ m}$		$v_u = 22,14 \text{ m/s.}$	$r = 0,33$	$T_b = 1,79$
$h = 20 \text{ m}$		$v_u = 23,4 \text{ m/s.}$	$r = 0,31$	$T_b = 1,70$
$h = 30 \text{ m}$		$v_u = 25,3 \text{ m/s.}$	$r = 0,29$	$T_b = 1,63$
$h = 40 \text{ m}$		$v_u = 26,7 \text{ m/s.}$	$r = 0,275$	$T_b = 1,56$

$$G = 1 + g \cdot r \cdot \sqrt{T_b + T_r}$$

$g = 4$ $T_r = \frac{F \cdot S}{D}$ en $D = 0,01$ (dempingsmaat voor staal)

$h = 5 \text{ m.}$	$f_e/v_u : 8,9 \times 10^{-2}$	\longrightarrow	$f_e H/v_u : 0,45$	$F = 0,045$	$S = 0,4$
$h = 10 \text{ m.}$	$f_e/v_u : 4,3 \times 10^{-2}$		" : 0,43	$F = 0,075$	$S = 0,4$
$h = 15 \text{ m.}$	$f_e/v_u : 2,8 \times 10^{-2}$		" : 0,42	$F = 0,095$	$S = 0,4$
$h = 20 \text{ m.}$	$f_e/v_u : 2,0 \times 10^{-2}$		" : 0,40	$F = 0,133$	$S = 0,4$
$h = 30 \text{ m.}$	$f_e/v_u : 1,3 \times 10^{-2}$		" : 0,39	$F = 0,170$	$S = 0,4$
$h = 40 \text{ m}$	$f_e/v_u : 9 \times 10^{-3}$		" : 0,36	$F = 0,20$	$S = 0,4$

$h = 5 \text{ m.}$	$T_r = 2,07$	$\longrightarrow G = 4,15$	$\longrightarrow q = 840 \text{ N/m}^2$
$h = 10 \text{ m.}$	$T_r = 3,45$	$G = 4,23$	$q = 1111 \quad "$
$h = 15 \text{ m.}$	$T_r = 4,37$	$G = 4,28$	$q = 1311 \quad "$
$h = 20 \text{ m.}$	$T_r = 6,12$	$G = 4,47$	$q = 1530 \quad "$
$h = 30 \text{ m.}$	$T_r = 7,82$	$G = 4,57$	$q = 1828 \quad "$
$h = 40 \text{ m.}$	$T_r = 9,20$	$G = 4,61$	$q = 2054 \quad "$

Berekend volgens NPR 993:

$$q = 750 + 32h \dots \text{N/m}^2$$

$q_{50} = 910 \text{ N/m}^2$
$q_{100} = 1070 \quad "$
$q_{150} = 1230 \quad "$
$q_{200} = 1390 \quad "$
$q_{300} = 1710 \quad "$
$q_{400} = 2030 \quad "$

Masten aan zee:

$$v_u = 26,0 \times \left(\frac{h}{10} \right)^{0,13}$$

$h = 5 \text{ m.}$	$\longrightarrow v_u = 23,76 \text{ m/s.}$	$r = 0,27$	$T_b = 2,0$
$h = 10 \text{ m.}$	$v_u = 26,0 \text{ m/s.}$	$r = 0,26$	$T_b = 1,875$
$h = 15 \text{ m.}$	$v_u = 27,41 \text{ m/s.}$	$r = 0,25$	$T_b = 1,79$
$h = 20 \text{ m.}$	$v_u = 28,45 \text{ m/s.}$	$r = 0,24$	$T_b = 1,70$
$h = 30 \text{ m.}$	$v_u = 30,0 \text{ m/s.}$	$r = 0,225$	$T_b = 1,63$
$h = 40 \text{ m.}$	$v_u = 31,13 \text{ m/s.}$	$r = 0,216$	$T_b = 1,56$

$h = 5\text{m}$	$f_e/v_u = 6,7 \times 10^{-2}$	$\rightarrow f_e \cdot H/v_u = 0,34$	$F = 0,058$	$S = 0,5$
$h = 10\text{m}$	$f_e/v_u = 3,4 \times 10^{-2}$	$f_e \cdot H/v_u = 0,34$	$F = 0,080$	$S = 0,5$
$h = 15\text{m}$	$\text{"} = 2,3 \times 10^{-2}$	$= 0,34$	$F = 0,109$	$S = 0,5$
$h = 20\text{m}$	$\text{"} = 1,7 \times 10^{-2}$	$= 0,34$	$F = 0,140$	$S = 0,5$
$h = 30\text{m}$	$\text{"} = 1,1 \times 10^{-2}$	$= 0,34$	$F = 0,185$	$S = 0,5$
$h = 40\text{m}$	$\text{"} = 7,7 \times 10^{-3}$	$= 0,34$	$F = 0,240$	$S = 0,5$

$h = 5\text{m}$	$T_r = 2,90$	$\rightarrow G = 3,39$	$\rightarrow q = 1196$	N/m^2
$h = 10\text{m}$	$T_r = 4,0$	$G = 3,52$	$q = 1487$	"
$h = 15\text{m}$	$T_r = 5,75$	$G = 3,69$	$q = 1733$	"
$h = 20\text{m}$	$T_r = 7,0$	$G = 3,83$	$q = 1938$	"
$h = 30\text{m}$	$T_r = 9,25$	$G = 3,97$	$q = 2233$	"
$h = 40\text{m}$	$T_r = 12,0$	$G = 4,18$	$q = 2532$	"

Berekend volgens NPR 993:

$$q = 1080 + 46h \dots \text{N/m}^2$$

$q_5 =$	1310	N/m^2
$q_{10} =$	1540	"
$q_{15} =$	1770	"
$q_{20} =$	2000	"
$q_{30} =$	2460	"
$q_{40} =$	2920	"

Windbelasting op lichtmasten "land" :

Volgens: NEN3850 en NEN1060.

$$v_u = 20,5 \cdot \left(\frac{h}{10} \right)^{0,19}$$

$$G = 1 + g \cdot r \cdot \sqrt{T_b + T_r}$$

$$g = 4 \quad T_r = \frac{F \cdot S}{D} \quad D = 0,01 (\text{dempingsmaat voor staal})$$

$$q = \frac{v_u^2}{10} \times G \quad \text{Volgens praktijkrichtlijnen: } q = 750 + 32h$$

(NPR 993)

h (m)	$q = \frac{v_u^2}{1,6} \times G \dots \text{N/m}^2$	$q = 750 + 32h \dots \text{N/m}^2$
5	840	910
10	1111	1070
15	1311	1230
20	1530	1390
30	1828	1710
40	2054	2030

Windbelasting op lichtmasten aan zee:

Volgens NEN3850 en NEN1060.

$$v_u = 26,0 \cdot \left(\frac{h}{10} \right)^{0,13}$$

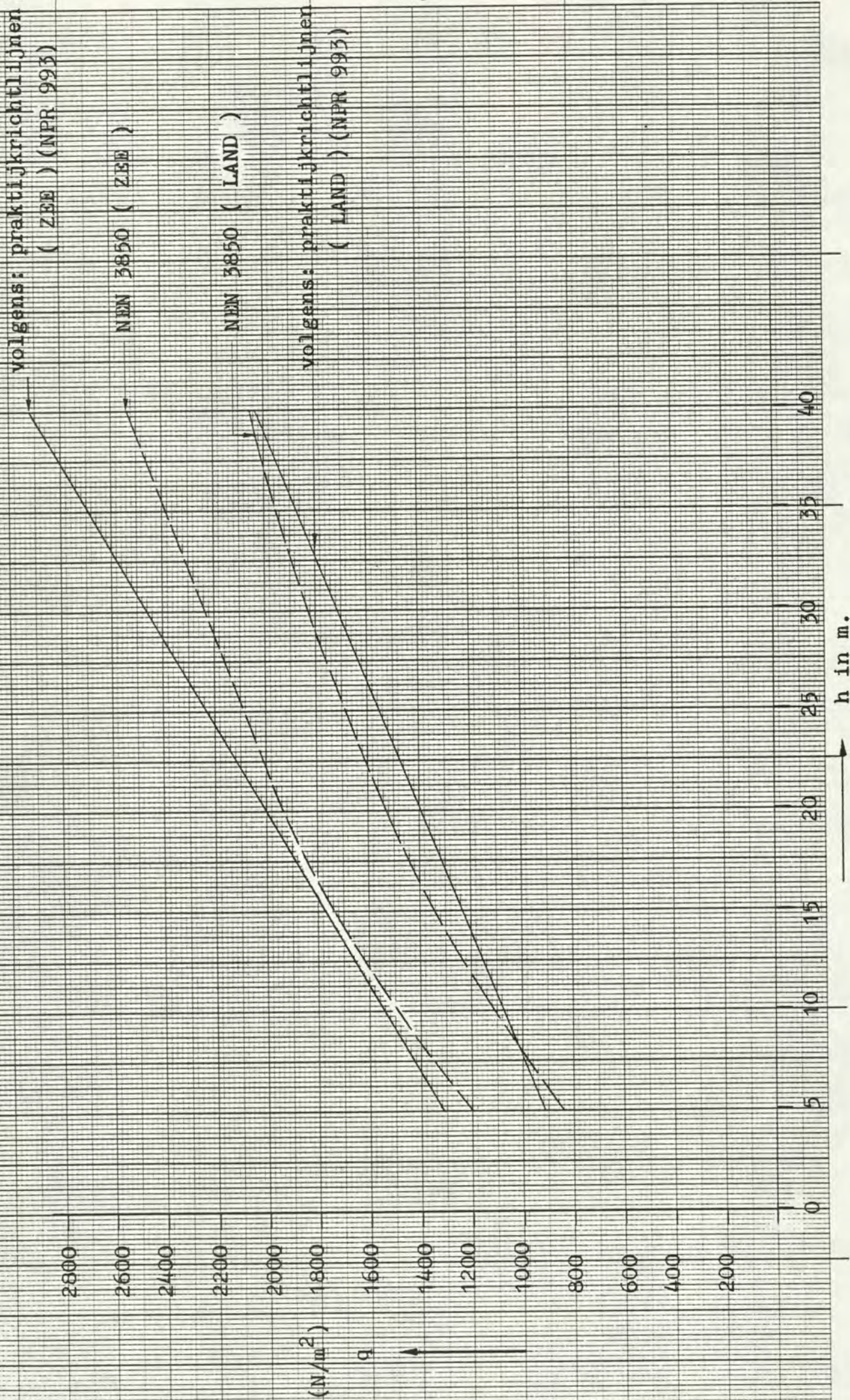
$$G = 1 + g \cdot r \cdot \sqrt{T_b + T_r}$$

$$g = 4 \quad T_r = \frac{F \cdot S}{D} \quad D = 0,01 (\text{dempingsmaat voor staal})$$

$$q = \frac{v_u^2}{1,6} \times G \quad \text{Volgens praktijkrichtlijnen: } q = 1080 + 46h$$

(NPR 993)

h (m)	$q = \frac{v_u^2}{1,6} \cdot G \dots N/m^2$	$q = 1080 + 46h \dots N/m^2$
5	1196	1310
10	1487	1540
15	1733	1770
20	1938	2000
30	2233	2460
40	2532	2920



rijkswaterstaat directie bruggen

+++++L+I+C+H+T+M+A+S+T+E+N+++++

(Januari 1981)

Afdeling :
Berekeningen-EM

D.STROOSMA.
F.W.KRUIJSWIJK.