r.w.s. directie bruggen

lijnverlichting

hoofdafdeling - EM
afd : berekeningen

Hiksweterdaar Kiezels Jurgen

LIJNVERLICHTING

1- BEPERKING VAN DE KRACHTEN EN MOMENTEN DE
MAST-EN DWARSLAMPS LIJNVERLICHTINGS-
MASTEN.

2- ATTENUATING VAN MASTEN VOOR DEBRIETE
VERMEDEN.

3- GEVOLGEN VAN DE VORMVERANDERING.
("TUSSENMASTEN").

4- GEVOLGEN VAN DE VORMVERANDERING.
("EINDEMASTEN/HOEKMASTEN")

5- BEPALING VAN DE AFMETINGEN VAN VOETPLATEN.

(Augustus 1981)

F.W.KRUISWIJK.
D.STROOSMA.

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

1- BEPALING VAN DE KRACHTEN EN MOMENTEN OP ENKEL-EN DUBBELLAMPS LIJNVERLICHTINGS-MASTEN.

2- AFLEIDING VAN ENKELE VEEL GEBRUIKTE FORMULES.

3- INVLOED VAN DE VORMVERANDERING. ("TUSSENMASTEN")

4- INVLOED VAN DE VORMVERANDERING. ("TUSSENAFSPANMASTEN")

5- BEPALING VAN DE AFMETINGEN VAN VOETPLATEN.

(Augustus 1981)

F.W.KRUIJSWIJK.
D.STROOSMA.

LIJNVERLICHTING

RIJKSWATERSTAAT,
DIRECTIE BRUGGEN.

Voorwoord:

Het deel "Lijnverlichting",dat een vervolg is op de verhandeling "Lichtmasten",geeft de werkwijze weer die gevolgd is bij het vastleggen van de belastingen op lijnverlichtingsmasten en de afmetingen van voetplaten en ankers zoals die in "Eisen lichtmasten" zijn gegeven.
De specifieke taak die Directie Bruggen met betrekking tot lijnverlichting was toebedeeld betrof een onderzoek naar de invloed van vormveranderingen op het krachtenspel en het vastleggen van vorm en afmetingen van voetplaten en ankers.
Voor het bepalen van deze afmetingen zijn door Directie Bruggen reeds in een vroeg stadium belastingen bepaald.
De berekening daarvan treft men aan in hoofdstuk1.
Nadien is door de Dienst Verkeerskunde,waarmee samengewerkt is bij het tot stand komen van "Eisen lichtmasten", een nieuwe berekening opgesteld waarvan in sommige gevallen de resultaten,als gevolg van wat andere uitgangspunten,iets afwijken van de resultaten van hoofdstuk1.
De belastingen volgens deze nieuwe berekening zijn opgenomen in "Eisen lichtmasten".
Volledigheidshalve is de berekening van de Dienst Verkeerskunde hier als appendix toegevoegd.

Voorburg,augustus 1981.

INHOUD:

VERVOLG INHOUD: blz.

LIJST VAN DE BELANGRIJKSTE SYMBOLEN:

symbool	omschrijving	dimensie
S_0	voorspankracht in de kabel	MLT^{-2}
S_1	spankracht draagkabel	MLT^{-2}
S_2	spankracht spankabel	MLT^{-2}
K_1	veerconstante mast	MT^{-2}
K_2	veerconstante kabel	MT^{-2}
E	elasticiteitsmodulus	$ML^{-1}T^{-2}$
q	stuwdruk	$ML^{-1}T^{-2}$
c	vormcoëfficiënt	
d	diameter	L
l	lengte	L
Q_g	belasting door eigen-gewicht	MLT^{-2}
Q_w	belasting door wind	MLT^{-2}
Q_{ij}	belasting door ijzel	MLT^{-2}
F	kracht	MLT^{-2}
D	dwarskracht	MLT^{-2}
M	moment	ML^2T^{-2}
I	kwadratisch oppervlaktemoment	L^4
W	weerstandsmoment	L^3
σ	spanning	$ML^{-1}T^{-2}$
G	afschuivingsmodulus	$ML^{-1}T^{-2}$
g	zwaarteveldsterkte	LT^{-2}
μ	Poissonverhouding	
f	zakking van de kabel	L
y	verplaatsing	L
A	oppervlakte	L^2

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

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

1. BEPALING VAN DE KRACHTEN EN MOMENTEN OP ENKEL-EN DUBBELLAMPS LIJNVERLICHTINGS-MASTEN.

1.1 Inleiding/toelichting:

In dit hoofdstuk worden de maatgevende krachten, die door draag-en spankabel op lijnverlichtingsmasten worden uitgeoefend,vastgelegd.
Daarnaast worden ten behoeve van het bepalen van voetplaatafmetingen,grootte van de ankers en de funderingsconstructie,voetmomenten afgeleid.
Bij een intact zijnde rechte lijnverlichtingsinstallatie valt voor de masten slechts één belastingsgeval te onderscheiden,namelijk het geval waarbij hoge windbelasting de installatie uit een zo ongunstig mogelijke richting treft.
Daar echter een lijnverlichtingsinstallatie één samenwerkend geheel vormt,moet daarnaast worden voorkomen dat door breuk van een essentieel onderdeel door welke oorzaak ook,de gehele installatie tot bezwijken wordt gebracht.
D.w.z. dat in zo'n situatie voorkomen moet worden dat meerdere masten of zelfs het gehele mastenbestand van die installatie breekt of zodanig vervormt dat tot vervanging van vele masten moet worden overgegaan.
Derhalve komen in deze berekening ook belastingsgevallen voor waarbij aangenomen is dat één of beide kabels of tuidraden gebroken zijn.
Daarbij is steeds de maximale windbelasting of maximale ijzelbelasting in rekening gebracht.
Daar kabelbreuk gecombineerd met hoge belastingen als een zeer uitzonderlijke situatie kan worden aangemerkt,is er uit economische overwegingen in de berekening vanuit gegaan dat daarbij één of hooguit twee masten op het punt van rekenkundig bezwijken staan en dus mogelijkerwijs zodanig vervormen dat in die situatie tot vervanging of herstel moet worden besloten.
Voor zover dat mogelijk was is getracht de werkelijkheid zo reëel mogelijk te benaderen door o.a. ook de invloed van de vervorming van masten en kabels in rekening te brengen.

De invloed van deze vervormingen worden in dit hoofdstuk gekenmerkt door eenvoudige verhoudingsgetallen waarvan de afleiding in hoofdstuk2 en 3 is gegeven.
Bij de afspanmasten(begin-en eindmast) is een wat conservatievere werkwijze gevolgd: daar is geen rekening gehouden met de invloed van de vervormingen.

BELASTINGEN:

-Eigen-gewicht.
Kabels en armaturen zijn in "Eisen lichtmasten" genormaliseerd.
Daarmee zijn ook de eigen-gewichten vastgelegd.

-Windbelasting.
De grote afstand tussen de masten geeft,met betrekking tot de belasting op armaturen en kabels, aanleiding rekening te houden met windvlaagafmetingen.
De stuwdrukwaarden voor deze onderdelen zijn daartoe ontleend aan NEN1060: Bovengrondse hoogspanningslijnen.
Voor niet vlak aan zee staande masten worden in NEN1060 voor een lengte van 100m de volgende stuwdrukwaarden gegeven:

$h=10m: \quad q=620N/m^2.$
$h=20m: \quad q=750N/m^2.$

Voor tussenliggende waarden kan geïnterpoleerd worden volgens:

$$q_h=620+(750-620)\left(\frac{h-10}{20-10}\right) \quad \text{of:}$$

$$q_h=490+13h \ N/m^2.$$

In verband met de wat kleinere mastafstand bij lijnverlichting(ca.90m) is hier gekozen voor:

$$\boxed{q_h=500+13h \ N/m^2}$$

waarin voor h de lichtpunthoogte dient te worden ingevuld.

Hoewel enigszins te ongunstig is voor de masten de windbelasting volgens NPR993 in rekening gebracht.
Deze belasting speelt echter een zeer geringe rol.

-IJzelbelasting.
Voor kabels en draden: $q_1 = 1{,}8\sqrt{d}$ N/m^2.
Hierin is d de kabeldiameter in mm.
Deze formule is ontleend aan NEN1060.
Bij de armaturen is over de gehele omtrek een ijzeldikte van 7mm in rekening gebracht.

1.2 Afmetingen kabels en armaturen:

Enkellampslijnverlichting: (L_{ph}=12m en L_{ph}=10m)

Kabels: 7×7 Ø8 NOM-R.V.S.

ρ_l=0,25 kg/m

c =1,35

Bovendraad(DRAAGKABEL): l≈ 91m

Onderdraad(SPANKABEL) : l= 90m

Armaturen: 5 stuks (type 1 SOX)

m=6,5 kg

A=0,21 m^2

c=0,80

Dubbellampslijnverlichting: (L_{ph}=15m)

Kabels: 7×7 Ø8 NOM-R.V.S.

ρ_l=0,25 kg/m

c =1,35

Bovendraad(DRAAGKABEL): l≈ 91m

Onderdraad(SPANKABEL) : l= 90m

Armaturen: 4 stuks (type 2 SOX)

m=25 kg

A=0,56 m^2

c=0,80

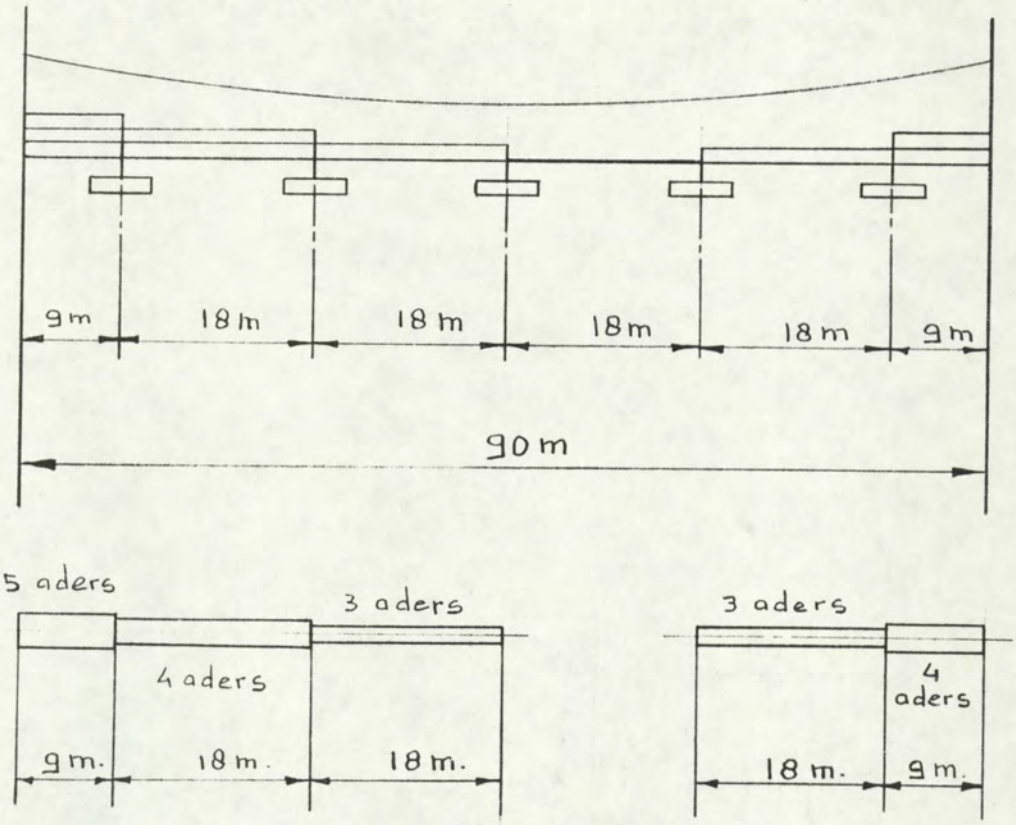
Geïsoleerde sterkstroomleidingen:

Geïsoleerde sterkstroomleidingen worden aangeduid door letters en cijfers, zoals uitvoerig is aangegeven in NEN 3207.

MvK= vinylmantelkabel (leidingtype)
V = vinyladerisolatie

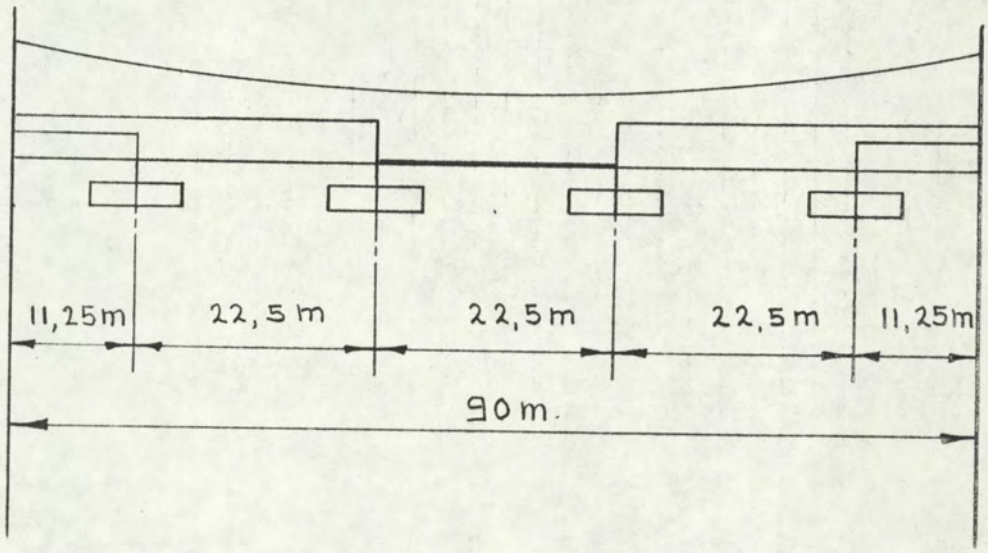
VMvK/750-5x2,5 = vinylmantelkabel met vinyladerisolatie voor 750Volt; 5 aders van 2,5 mm^2.

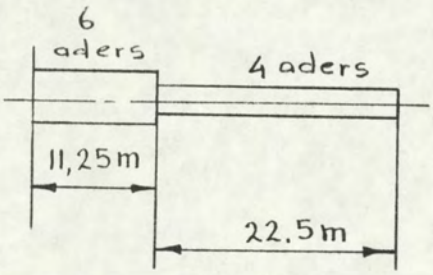
Enkellamps lijnverlichting:

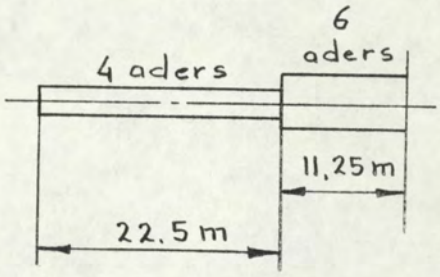


$5 \times 2{,}5 mm^2 \longrightarrow 9$ m.
$4 \times 2{,}5 mm^2 \longrightarrow 27$ m.
$3 \times 2{,}5 mm^2 \longrightarrow 36$ m.

Dubbellamps lijnverlichting:







$$\begin{cases} 6 \times 2\tfrac{1}{2}\ \text{mm}^2 \longrightarrow 25\ \text{m.} \\ 4 \times 2\tfrac{1}{2}\ \text{mm}^2 \longrightarrow 45\ \text{m.} \end{cases}$$

rijkswaterstaat directie bruggen

MASTEN L_{ph}=12m en L_{ph}=10m

1.3 **Berekening enkellamps lijnverlichting L_{ph}=12m:**

1.3.1 BELASTINGEN:

Lichtpunthoogte:	12	m	Armatuur:	135W	
Vaklengte	: 90	m	lang	:	95 cm
Masthoogte	: 15,5	m	hoog	:	22 cm
Doorhang	: 3	m	breed	:	29 cm
			massa	:	6,5kg

Eigen-gewicht per vak:

$G = l \times \rho_l \times g$ $\qquad$ ρ_l= massa per lengte (kg/m)
$g \approx 10$ m/s^2.

bovendraad Ø8	91 × 0,25 × 10	=	227,5	N
onderdraad Ø8	90 × 0,25 × 10	=	225	N
armaturen 5 stuks	5 × 6,5 × 10	=	325	N
VMvK 5 × 2½ → 9m	9 × 0,34 × 10	=	31	N
4 × 2½ → 27m	27 × 0,28 × 10	=	76	N
3 × 2½ → 36m	36 × 0,24 × 10	=	86	N
beugels en hangdraden		=	30	N
	$Q_g \approx$		1000	N

IJzelbelasting:

$Q_{ij} = q_l \times l$ $\qquad$ $q_l = 1{,}8\sqrt{d}$ (N/m)..volgens NEN1060
d = middellijn v.d. draad in mm.

bovendraad :	$91 \times 1{,}8\sqrt{8}$	≈	460	N
onderdraad :	$18 \times 1{,}8\sqrt{8}$	≈	90	N
onderdraad met kabel ≈ Ø60/π = 19mm:	$72 \times 1{,}8\sqrt{19}$	≈	565	N

armatuur { laagdikte 7 mm
omtrek ~ 820 mm
ρ_{ijs} 0,9kg/dm^3

$5 \times 9{,}5 \times 0{,}07 \times 8{,}2 \times 0{,}9 \times 10 \approx$ 245 N

$Q_{ij,totaal} \approx$ 1360 N

Totaal gewicht met ijzelbelasting: 2360 N.

Trekkracht bovendraad: $\boxed{S_1 = \frac{1/8.Q.l}{f}} = \frac{2360.90}{8.3} = 8850$ N.

Windbelasting: ($Q = Q_g + Q_{ij}$)

Windbelasting voor niet vlak aan zee staande lijnverlichting: q= 500+13h.....(Pa)

(h in meters)

q= 500+13.12=656Pa.

vormcoëfficiënt armatuur: c=0,8

staaldraad: c=1,35

(Q_w=l.d.q.c=A.q.c)

onder-en bovendraad	181 x 0,008 x 656 x 1,35 ≈	1282 N
VMvK	72 x 0,013 x 656 x 1,35 ≈	829 N
beugels	0,1 x 656 x 1,35 ≈	89 N
armaturen	5 x 0,95 x 0,22 x 656 x 0,80 ≈	548 N
totaal:	Q_w ≈	2748 N

Bovendraad neemt op: 1/4.2,75 = 0,69 kN
Onderdraad neemt op: 3/4.2,75 = 2,06 kN
} per vak (90m)

Trekkracht in de draagkabel: $\boxed{S_1 = \frac{1/8.Q_{g,w}.l}{f}}$

$$S_1 = \frac{90\sqrt{1,0^2 + 0,69}}{8 \times 3} \approx \underline{\underline{4,56 \text{ kN}}} \qquad (Q_{g,w} = \sqrt{Q_g^2 + Q_w^2})$$

Trekkracht in de spankabel bij voorspanning S_0=5kN:

$$\boxed{(S_2 - S_0).S_2^2 = 1/24.E.A.Q^2}$$

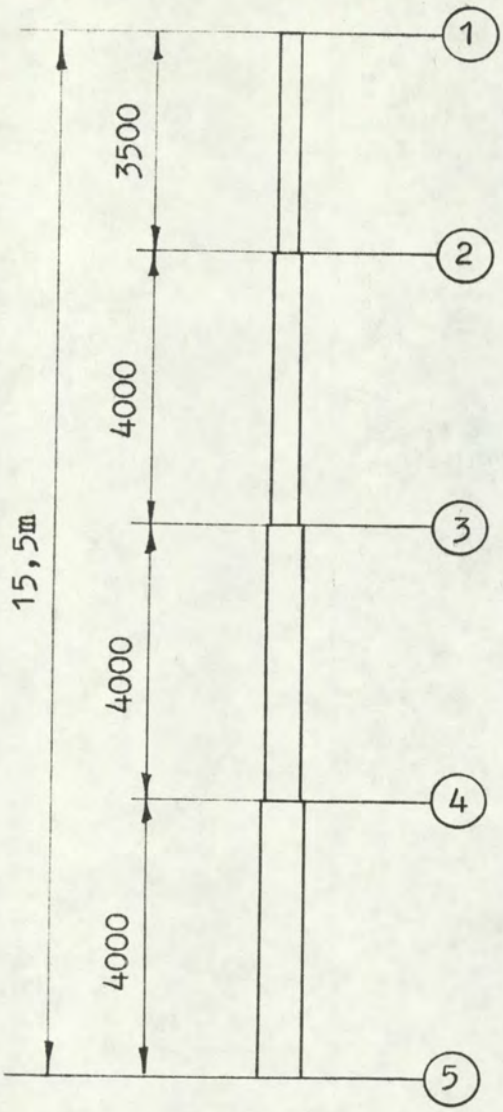
$E_{kabel} \approx 1,2 \times 10^2$ kN/mm^2.

$A_{kabel} \approx 29,3$ mm^2.

$$(S_2 - 5).S_2^2 = 1/24 \times 1,2 \times 10^2 \times 29,3 \times (2,06)^2$$

$$S_2 \approx \underline{\underline{10,6 \text{ kN}}}.$$

Geometrie masten (L_{ph}=12m):



Afspanmast	Tussenmast
Ø 244,5×6,3	Ø 139,7×4,5
Ø 323,9×8	Ø 219,1×5,9
Ø 406 × 8,8	Ø 267 × 6,3
Ø 508 × 11	Ø 355,6×8

Ten behoeve van de windbelasting aangenomen diameters.

Windbelasting op de mast:

Masthoogte 15,5m.

q=752+32.h.....(Pa)
(volgens NPR 993)
h in meters.

Vormcoëfficiënt c=0,4 voor alle diameters.

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

Afspanmast: ($q = 752 + 32 . 15,5 = 1248$ Pa.)

$Q_{1-2} = 1248 \times 0,4 \times 0,245 \times 3,5 \approx 428$ N.

$Q_{2-3} = 1248 \times 0,4 \times 0,324 \times 4,0 \approx 647$ N.

$Q_{3-4} = 1248 \times 0,4 \times 0,406 \times 4,0 \approx 811$ N.

$Q_{4-5} = 1248 \times 0,4 \times 0,508 \times 4,0 \approx 1015$ N.

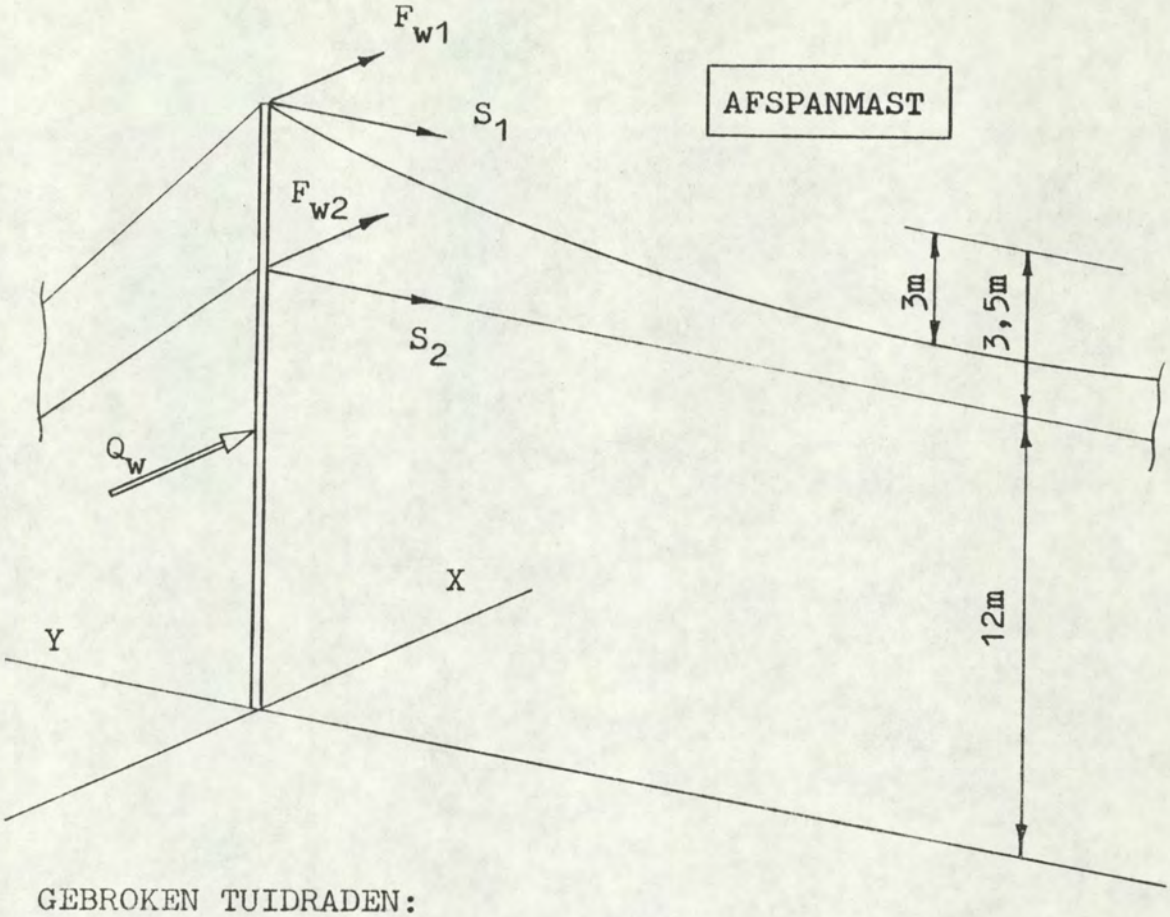
$$M_5 = \sum Q_{i-j} * y_i = 428 \times 13{,}75 + 647 \times 10 + 811 \times 6 + 1015 \times 2$$
$$\approx 19{,}3 \text{ kNm}.$$

Windbelasting tussenmast:

$$Q_{1-2} = 1248 \times 0{,}4 \times 0{,}140 \times 3.5 \approx 245 \text{ N}.$$
$$Q_{2-3} = 1248 \times 0{,}4 \times 0{,}219 \times 4{,}0 \approx 437 \text{ N}.$$
$$Q_{3-4} = 1248 \times 0{,}4 \times 0{,}267 \times 4{,}0 \approx 533 \text{ N}.$$
$$Q_{4-5} = 1248 \times 0{,}4 \times 0{,}356 \times 4{,}0 \approx 711 \text{ N}.$$

$$M_5 = \sum Q_{i-j} * y_i = 245 \times 13{,}75 + 437 \times 10 + 533 \times 6 + 711 \times 2$$
$$\approx 12{,}4 \text{ kNm}.$$

1.3.2 **BEPALING VAN DE VOETMOMENTEN:**



GEBROKEN TUIDRADEN:

Belasting eigen-gewicht+ijzel:

$S_1 = 8850$ N.

$S_2 = S_0 = 5000$ N.

$$M_x = 12 \times S_2 + 15{,}5 \times S_1$$
$$= 12 \times 5 + 15{,}5 \times 8{,}85 = 197 \text{ kNm}.$$

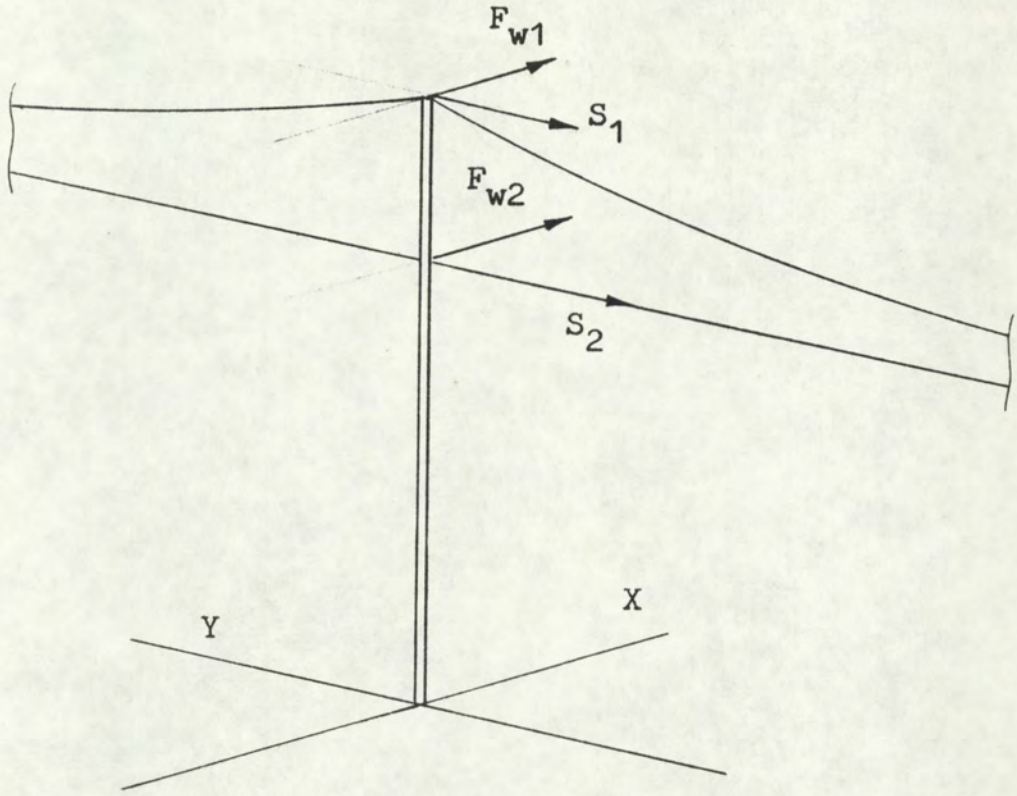
Belasting eigen-gewicht met wind:

$S_1 = 4{,}56$ kN. $F_{w1} = 1/2.690 = 345$ N.

$S_2 = 10{,}60$ kN. $F_{w2} = 1/2.2060 = 1030$ N.

$$M_x = 4{,}56 \times 15{,}5 + 10{,}6 \times 12 = 198 \text{ kNm}.$$
$$M_y = 0{,}345 \times 15{,}5 + 1{,}03 \times 12 + 19{,}3 = 37{,}0 \text{ kNm}.$$

TUSSENMAST



Belasting eigen-gewicht plus ijzel met gebroken onder-en bovendraad:

$S_1 = 0$ kN.

$Q_g + Q_{ij} = 2360$ N (per vaklengte)

$$(S_2 - 5) \times S_2^2 = \frac{1}{24} \times 1{,}2 \times 10^2 \times 29{,}3 \times (2{,}36)^2$$

$S_2 = 11{,}4$ kN. (niet maatgevend)

Windbelasting:

F_{w1}=690 N. S_1= 0

F_{w2}=2060 N. S_2= 0

$M_y = 15{,}5 \times 0{,}690 + 12 \times 2{,}060 + 12{,}4 = 47{,}8$ kNm.

Gebroken onder-en bovendraad:

F_{w1}= 0

F_{w2}= (2060+690).½= 1380 N.

S_1 = 0

$Q_{g\text{-}w} = \sqrt{1000^2 + 2748^2} = 2924$ N. $\left(Q_{g\text{-}w} = \sqrt{Q_g^2 + Q_w^2}\right)$

$(S_2 - 5).S_2^2 = \frac{1}{24} \cdot 120 . 29{,}3 (2{,}924)^2 \longrightarrow$ S_2= 12,7 kN.

Rekening houdend met de vervorming van de masten en kabels wordt dit: S_2=0,52.12,7= 6,5 kN.

$M_x = 12 \times 6{,}5 = 78$ kNm.

$M_y = 12 \times 1{,}380 + 12{,}4 = 29$ kNm.

TUSSENAFSPANMAST:

Windbelasting met gebroken onder-en bovendraad in één vak.

Rekening houdend met de vervorming van de masten en kabels worden S_1 en S_2 nu:

$S_1 \approx$ ½.0,63.12,7= 4,0 kN.

$S_2 \approx$ ½.0,63.12,7= 4,0 kN.

$F_{w1} \approx F_{w2}$=1380/2= 690 N.

$M_x = 12 \times 4 + 15{,}5 \times 4 = 110$ kNm

$M_y = 12 \times 0{,}69 + 15{,}5 \times 0{,}69 + 12{,}4 = 31{,}4$ kNm.

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} = \frac{10,63}{39} = 0,273$$

$$F_1 = F_o \left\{ \frac{2,273}{2} - \sqrt{\left(\frac{2,273}{2}\right)^2 - 1} \right\} = 0,60\, F_o$$

De resterende voorspanning in het eerste vak wordt dan:

$$F_v = F_{vo} - 0,6\, F_{vo} = 0,40 F_{vo}$$

Indien de mast 2x stijver zou zijn wordt dit:

$$F_1 = F_o \left\{ \frac{2,546}{2} - \sqrt{\left(\frac{2,546}{2}\right)^2 - 1} \right\} = 0,49\, F_o$$

$$F_v = F_{vo} \left(1 - 0,49 \right) = 0,51\, F_o$$

3.1.4 - Gezamenlijke stijfheid van mast en kabel bij een dwarsbelasting op de draad voor de situatie waarbij in het naast liggende vak kabelbreuk is opgetreden.

Aangenomen wordt dat $y_2/y_1=1/3$ (Geldt alleen voor de dwarsbelasting)

De gezamenlijke stijfheid wordt dan:

$$\Delta \ell = \frac{2}{3} \cdot \frac{F}{K_1} + \frac{F}{K_2} = \frac{F}{K} \longrightarrow$$

$$K = \frac{3 K_1 K_2}{3K_1 + 2K_2} = \frac{3 \times 10,63 \times 39}{3 \times 10,63 + 2 \times 39} \times 10^{-3} = 11,32 \times 10^{-3} \frac{kN}{mm}$$

En voor het geval waarbij de mast 2x stijver is:

$$K = \frac{3 \times 21,26 \times 39}{3 \times 21,26 + 2 \times 39} \times 10^{-3} = 17,54 \times 10^{-3} \frac{kN}{mm}.$$

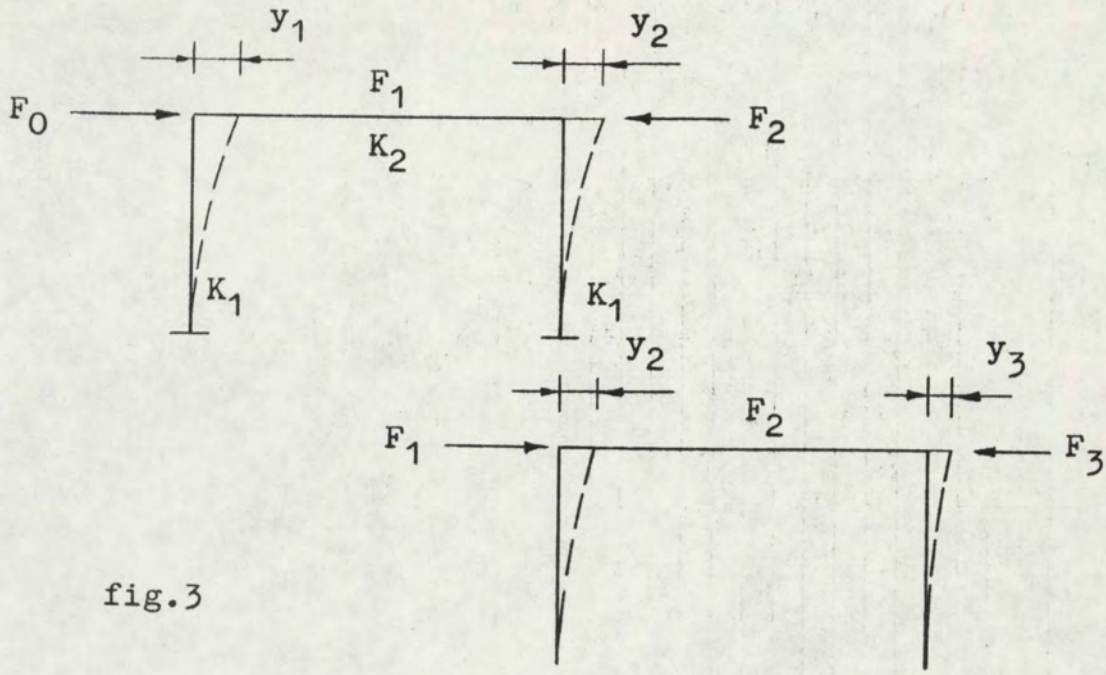


fig.3

Voor oneindig veel velden geldt: $\frac{F_0}{F_1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_0 - F_1}{F_1 - F_2}$ ...e

$$y_1 = \frac{F_0 - F_1}{K_1} \qquad y_2 = y_1 - \frac{F_1}{K_2} = \frac{F_0 - F_1}{K_1} - \frac{F_1}{K_2}$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{F_0}{F_1} = \frac{\frac{F_0 - F_1}{K_1}}{\frac{F_0 - F_1}{K_1} - \frac{F_1}{K_2}} = \frac{F_0 - F_1}{F_0 - F_1\left(1 + \frac{K_1}{K_2}\right)}$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \alpha \longrightarrow \frac{F_0}{F_1} = \frac{F_0 - F_1}{F_0 - F_1(1+\alpha)}$$

$$F_0^2 - F_0 F_1 (2+\alpha) + F_1^2 = 0$$

$$F_1^2 - F_0 F_1 (2+\alpha) + F_0^2 = 0$$

$$F_1 = F_0 \left\{ \frac{2+\alpha}{2} - \sqrt{\left(\frac{2+\alpha}{2}\right)^2 - 1} \right\}$$

1.4 Berekening enkellamps lijnverlichting L_{ph}= 10m :

Windbelasting mast:

Masthoogte h=10+f=10+3,5= 13,5m.

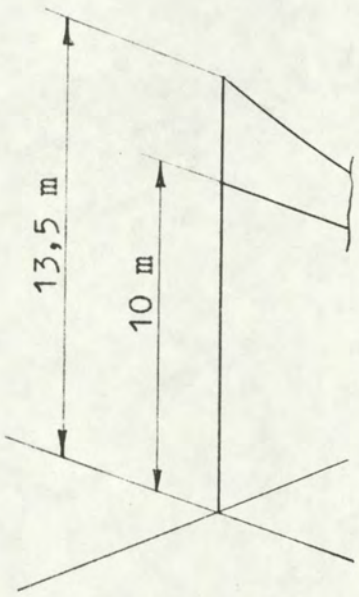
q=752+32.h=752+32.13,5=1184 Pa.

Afspanmast: $M_5' \approx \left(\frac{\ell'}{\ell}\right)^2 \times \frac{q'}{q} \times M_5$

$M_5' \approx \left(\frac{13,5}{15,5}\right)^2 \times \frac{1184}{1248} \times 19,3 = 13,89$ kNm

Tussenmast: $M_5' \approx \left(\frac{13,5}{15,5}\right)^2 \times \frac{1184}{1248} \times 12,4 = 8,92$ kNm

AFSPANMAST:



GEBROKEN TUIDRADEN:

Belasting eigen-gewicht+ijzel:

S_1= 8850 N.

S_2= 5000 N.

$M_x = 10 \times S_2 + 13,5 \times S_1$

$M_x = 10 \times 5 + 13,5 \times 8,85$

$M_x = 169,5$ kNm

Belasting eigen-gewicht+wind:

S_1= 4560 N.

S_2=10600 N.

F_{w1}= 345 N.

F_{w2}= 1030 N.

$M_x = 13{,}5 \times S_1 + 10 \times S_2$
$M_x = 13{,}5 \times 4{,}56 + 10 \times 10{,}6 = 167{,}56$ kNm.

$M_y = 13{,}5 \times F_{w1} + 10 \times F_{w2} + M_4$
$M_y = 13{,}5 \times 0{,}345 + 10 \times 1{,}03 + 13{,}89 = 28{,}85$ kNm.

TUSSENMAST:

Belasting eigen-gewicht plus ijzel met gebroken onder-en bovendraad:

$S_1 = 0$; $S_2 = 11400$ N.

Windbelasting: $F_{w1} = 690$ N ; $F_{w2} = 2060$ N.

$M_y = 13{,}5 \times F_{w1} + 10 \times F_{w2} + M_4$

$M_y = 13{,}5 \times 0{,}690 + 10 \times 2{,}060 + 8{,}92$
$M_y = 38{,}84$ kNm

Gebroken onder-en bovendraad:

$F_{w1} = 0$
$F_{w2} = 1380$ N.
$S_1 = 0$
$S_2 = 6500$ N.

$M_x = 10 \times S_2 = 10 \times 6{,}5 = 65$ kNm.

$M_y = 10 \times F_{w2} + M_4$
$M_y = 10 \times 1{,}38 + 8{,}92 = 22{,}72$ kNm.

TUSSENAFSPANMAST:

Windbelasting met gebroken onder-en bovendraad in één vak: $S_1 = S_2 = 4000$ N.

$F_{w1} = F_{w2} = 690$ N.

$$M_x = 10 \times S_2 + 13{,}5 \times S_1$$
$$M_x = 10 \times 4{,}0 + 13{,}5 \times 4{,}0 = 94{,}0 \text{ kNm.}$$

$$M_y = 10 \times F_{w2} + 13{,}5 \times F_{w1} + M_4$$
$$M_y = 10 \times 0{,}69 + 13{,}5 \times 0{,}69 + 8{,}92 = 25{,}14 \text{ kNm.}$$

rijkswaterstaat directie bruggen

MASTEN L_{ph}=15m

1.5 Berekening dubbellamps lijnverlichting L_{ph}= 15m:

1.5.1 BELASTINGEN:

Lichtpunthoogte:	15 m		Armatuur:		
Vaklengte	:	90 m	lang	:	160 cm
Masthoogte	:	19 m	hoog	:	35 cm
Doorhang	:	3,5m	breed	:	51 cm
			massa	:	25 kg

Eigen-gewicht per vak:

$G = l \times \rho_l \times g$ $g \approx 10$ m/s^2. (ρ_l= massa/lengte-eenhei

bovendraad Ø8	91 x 0,25 x 10	=	227,5	N
onderdraad Ø8	90 x 0,25 x 10	=	225	N
armaturen 4 stuks	4 x 25 x 10	=	1000	N
VMvK 6X2½ ⟶ 22,5m	22,5 x 0,33 x 10	=	74,3	N
4X2½ ⟶ 45 m	45 x 0,28 x 10	=	126	N
beugels en hangdraden		=	30	N
	$Q_g \approx$		1683	N

IJzelbelasting:

$Q_{ij} = q_l \times l$ $q_l = 1,8\sqrt{d}$ (N/m)....volgens NEN1060.

d = middellijn van de draad in mm.

bovendraad :	$91 \times 1,8\sqrt{8}$	≈	463,3	N
onderdraad :	$22,5 \times 1,8\sqrt{8}$	≈	114,6	N
onderdraad met kabel ≈ Ø60/π = 19 mm:	$67,5 \times 1,8\sqrt{19}$	≈	530	N

armatuur (7mm ijs)
4 stuks
$\rho_{ijs} \approx 0,9$ kg/dm^3
omtrek ≈ 1640 mm

$4 \times 0,07 \times 16,4 \times 16 \times 0,9 \times 10 \approx 661,3$ N

$Q_{ij} \approx 1770$ N

Totaal gewicht met ijzelbelasting $Q=Q_g+Q_{ij} \approx \underline{\underline{3500\ N.}}$

Trekkracht bovendraad:

$$S_1 = \frac{1/8\ Q\ \ell}{f} = \frac{3500 \times 90}{8 \times 3,5} = 11.250\ N$$

<u>Windbelasting:</u> q = 500 + 13h.....(Pa) $q = 500 + 13 \times 15$

(h in meters) $q = 695\ Pa.$

vormcoëffiënt armatuur: c=0,8

staaldraad: c=1,35

onder-en bovendraad	$181 \times 0,008 \times 695 \times 1,35 \approx 1358,6\ N$
VMvK	$67,5 \times 0,012 \times 695 \times 1,35 \approx 760,0\ N$
beugels	$0,1 \times 695 \times 1,35 \approx 93,8\ N$
armaturen	$4 \times 1,6 \times 0,35 \times 695 \times 0,8 \approx 1245,44\ N$
totaal:	$\approx 3458\ N$

Bovendraad neemt op: $1/4 \times 3458 \approx 865\ N$

Onderdraad neemt op: $3/4 \times 3458 \approx 2595\ N$

Trekkracht in de draagkabel: $S_1 = \frac{1/8 \times Q_{g,w} \times \ell}{f}$

$$Q_{g,w} = \sqrt{Q_g^2 + Q_w^2} = \sqrt{1,683^2 + 0,865^2} \approx 1,892\ kN.$$

$$S_1 = \frac{1/8 \times 1,892 \times 90}{3,5} = \underline{\underline{6,08\ kN.}}$$

Trekkracht in de spankabel bij voorspanning S_0=5kN:

$$(S_2 - S_0) \times S_2^2 = 1/24 \cdot E \cdot A \cdot Q^2$$

$$(S_2 - 5) \times S_2^2 = 1/24 \times 120 \times 29,3 \times (2,595)^2$$

$$\underline{\underline{S_2 \approx 12,0\ kN.}}$$

$E_{kabel} \approx 120 kN/mm^2.$

$A_{kabel} \approx 29,3 mm^2.$

Windbelasting op de afspanmast:

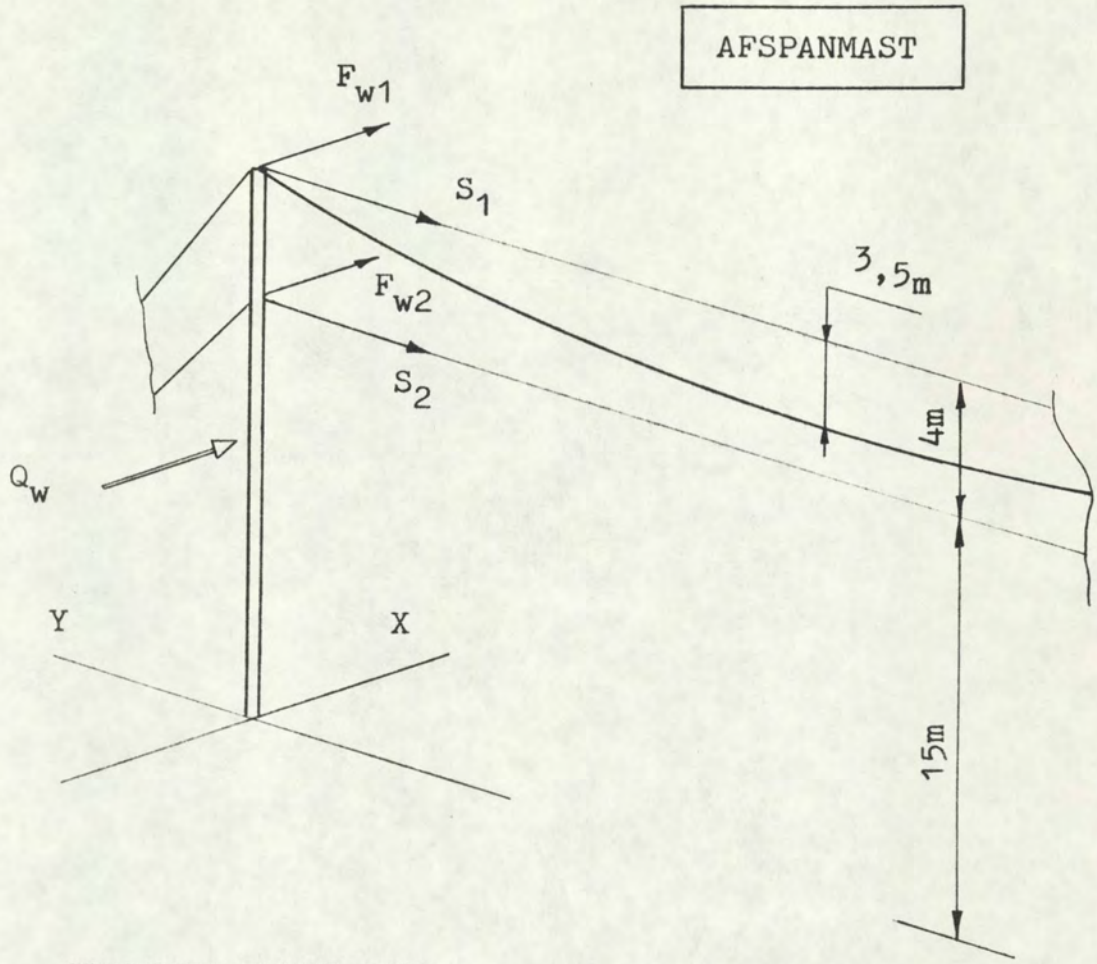
$$M_b \approx \left(\frac{l'}{l}\right)^2 \times \frac{q'}{q} \times M$$

$$M_b \approx \left(\frac{19}{15,5}\right)^2 \times \frac{1360}{1248} \times 19,3 = 31,60 \text{ kNm}.$$

Windbelasting op de tussenmast:

$$M_b \approx \left(\frac{19}{15,5}\right)^2 \times \frac{1360}{1248} \times 12,4 = 20,30 \text{ kNm}.$$

1.5.2 BEPALING VAN DE VOETMOMENTEN:



GEBROKEN TUIDRADEN:

Belasting eigen-gewicht + ijzel:

S_1= 11,25 kN.

S_2=S_0= 5,0 kN.

$M_x = 15 \times 5{,}0 + 19 \times 11{,}25 \approx 289$ kNm.

Belasting eigen-gewicht met wind:

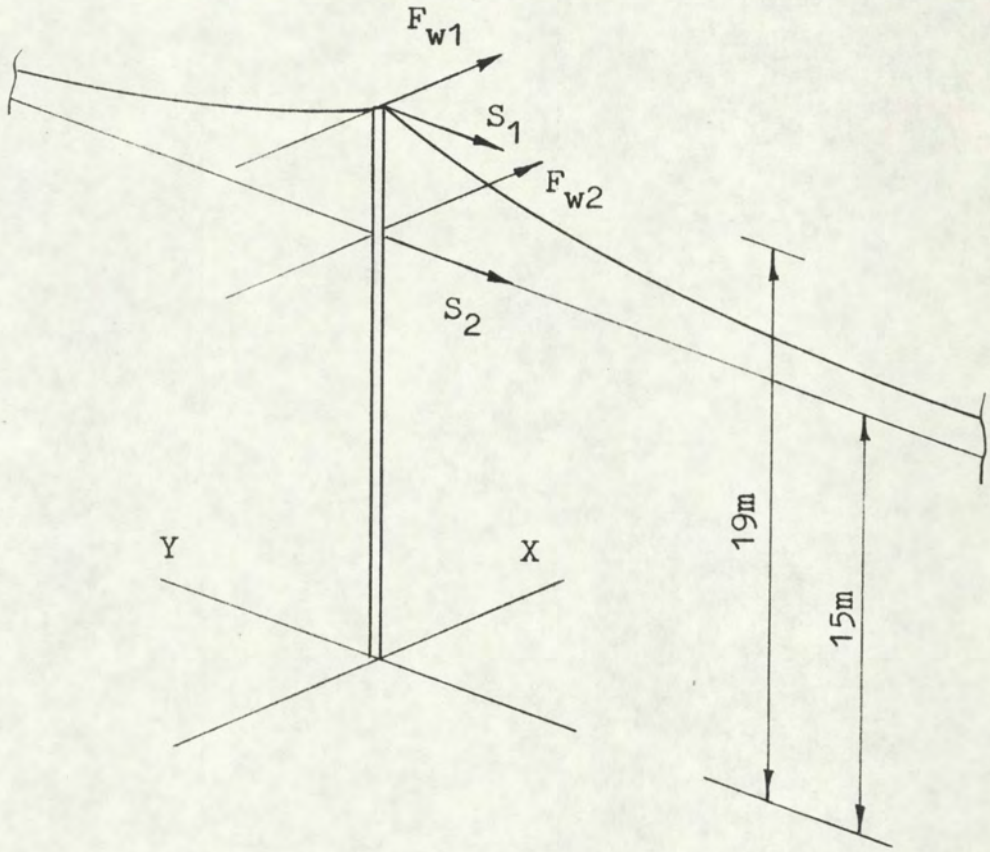
S_1= 6,08 kN. F_{w1}=1/2. 865= 433 N.

S_2=12,0 kN. F_{w2}=1/2.2595=1298 N.

$M_x = 19 \times 6{,}08 + 15 \times 12{,}0 = 295{,}5$ kNm.

$M_y = 19 \times 0{,}433 + 15 \times 1{,}298 + 31{,}6 = 59{,}3$ kNm.

TUSSENMAST



Belasting eigen-gewicht plus ijzel met gebroken onder-en bovendraad:

$S_1 = 0$ $\qquad Q_g + Q_{ij} = 3500\,N$ (per vaklengte)

$$(S_2 - 5) \times S_2^2 = \frac{1}{24} \times 120 \times 29{,}3 \times (3{,}5)^2 \longrightarrow S_2 = 14{,}1\ kN$$

(niet maatgevend)

Windbelasting:

F_{w1}= 865 kN. S_1= 0

F_{w2}=2595 kN. S_2= 0

$$M_y = 15 \times 2{,}595 + 19 \times 0{,}865 + 20{,}3 = 75{,}7 \text{ kNm}$$

Gebroken onder-en bovendraad:

F_{w1}= 0

F_{w2}= ½.(865+2595)= 1730 N.

S_1= 0

$$Q_{g\text{-}w} = \sqrt{1683^2 + 3458^2} = 3846 \text{ N} \quad \left(Q_{g\text{-}w} = \sqrt{Q_g^2 + Q_w^2}\right)$$

$$(S_2 - 5)\, S_2^2 = \frac{1}{24} \times 120 \times 29{,}3 \times (3{,}846)^2 \longrightarrow S_2 = 14{,}84 \text{ kN.}$$

Rekening houdend met de vervorming van de masten en kabels wordt dit: S_2=0,52.14,84= 7,72 kN.

$$M_x = 15 \times 7{,}72 = 115{,}75 \text{ kNm.}$$

$$M_y = 15 \times 1{,}730 + 20{,}3 = 46{,}3 \text{ kNm.}$$

TUSSENAFSPANMAST:

Windbelasting met gebroken onder-en bovendraad in één vak.

Rekening houdend met vervorming van de masten en kabels worden S_1 en S_2 nu:

$S_1 \approx$ ½.0,63.14,84= 4,67 kN.

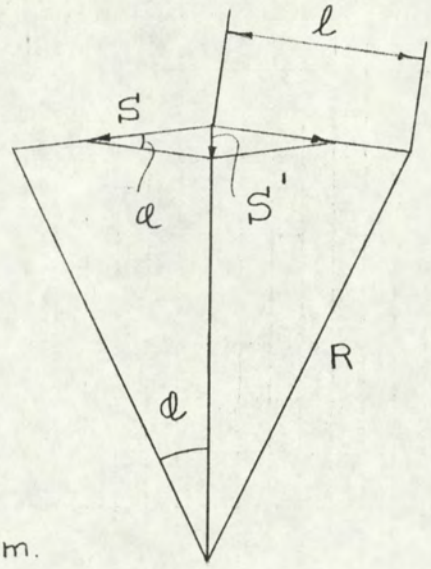
$S_2 \approx$ ½.0,63.14,84= 4,67 kN.

$F_{w1} \approx F_{w2}$ = 1730/2 =0,865 kN.

$$M_x = 15 \times 4{,}67 + 19 \times 4{,}67 = 158{,}8 \text{ kNm.}$$

$$M_y = 15 \times 0{,}865 + 19 \times 0{,}865 + 20{,}3 = 49{,}7 \text{ kNm}$$

1.6 Belastingen op de mast t.g.v. bochten in de weg:



$$\frac{S'}{S} = \frac{\ell}{R}$$

Aanname: $\ell = 90\,m.$

$R = 2000\,m.$

$$\frac{S'}{S} = \frac{90}{2000} = 0{,}045$$

L_{ph}=12m:

Eigen-gewicht+ijzel:

$S_1 = 8{,}85$ kN. $S_1' = 0{,}045 \times 8{,}85 = 0{,}40$ kN.

$S_2 = 5{,}00$ kN. $S_2' = 0{,}045 \times 5{,}00 = 0{,}23$ kN.

Eigen-gewicht+wind:

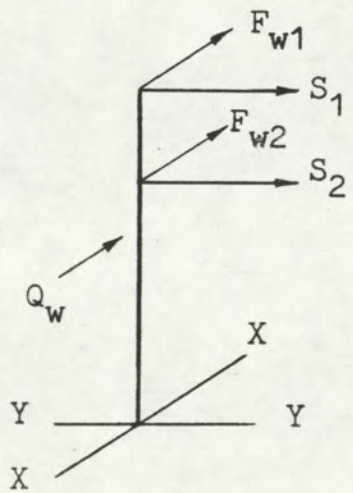
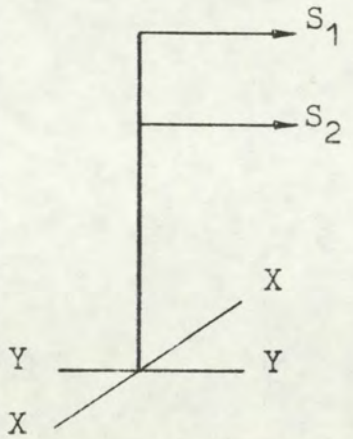
$S_1 = 4{,}56$ kN. $S_1' = 0{,}045 \times 4{,}56 = 0{,}21$ kN.

$S_2 = 10{,}60$ kN. $S_2' = 0{,}045 \times 10{,}60 = 0{,}48$ kN.

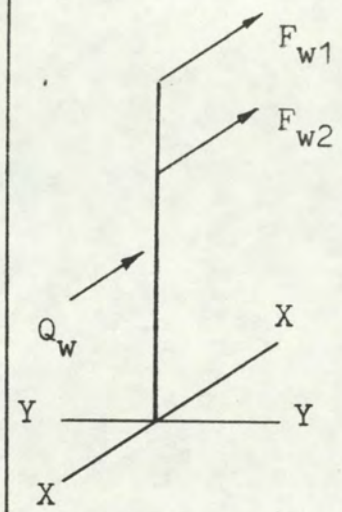
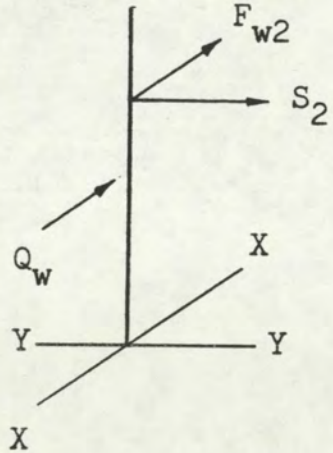
Deze belastingen zijn niet in "Eisen lichtmasten" opgenomen.

TABELLEN met belastingen en voetmomenten:

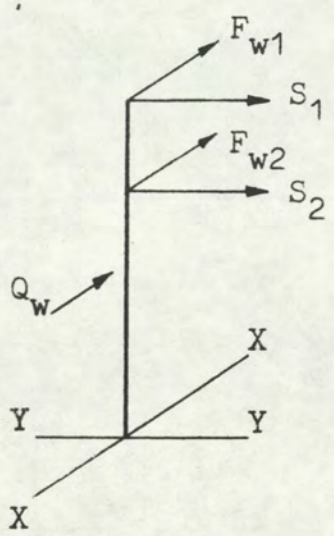
AFSPANMASTEN:

	L_{ph}=10m	L_{ph}=12m	L_{ph}=15m
	Eigen-gewicht plus wind, gebroken tuidraden.		
	S_1 = 4,56 kN S_2 = 10,60 kN F_{w1} = 0,345kN F_{w2} = 1,03 kN M_{xx} =167,56 kNm M_{yy} = 28,85 kNm	S_1 = 4,56 kN S_2 = 10,60 kN F_{w1} = 0,345kN F_{w2} = 1,03 kN M_{xx} =198,0 kNm M_{yy} = 37,0 kNm	S_1 = 6,08 kN S_2 = 12,0 kN F_{w1} = 0,433kN F_{w2} = 1,30 kN M_{xx} =295,50 kNm M_{yy} = 59,30 kNm
	Eigen-gewicht plus ijzel en gebroken tuidraden.		
	S_1 = 8,85 kN S_2 = 5,0 kN M_{xx} =169,50 kNm	S_1 = 8,85 kN S_2 = 5,0 kN M_{xx} =197,0 kNm	S_1 = 11,25 kN S_2 = 5,0 kN M_{xx} =289,0 kNm

TUSSENMASTEN:

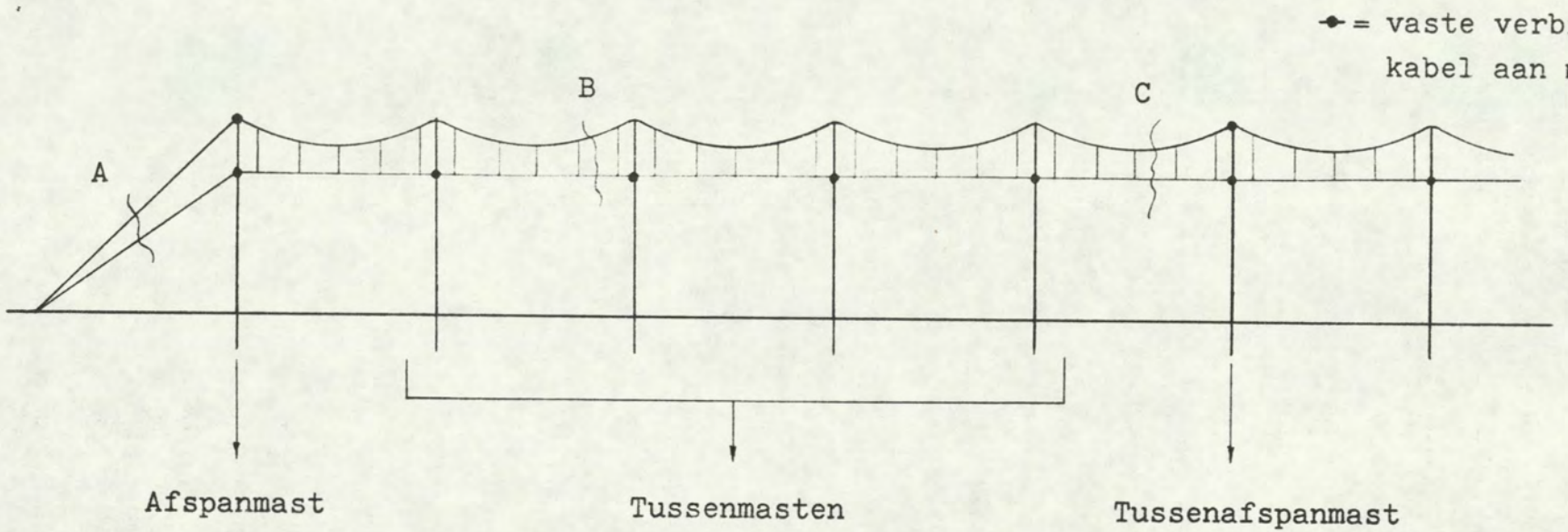
	L_{ph}=10m	L_{ph}=12m	L_{ph}=15m
	Eigen-gewicht plus wind.		
	F_{w1} = 0,69 kN F_{w2} = 2,06 kN M_{yy} = 38,84 kNm	F_{w1} = 0,69 kN F_{w2} = 2,06 kN M_{yy} = 47,80 kNm	F_{w1} = 0,865 kN F_{w2} = 2,60 kN M_{yy} = 75,70 kNm
	Eigen.gewicht plus wind; dubbele draadbreuk in één vak.		
	S_2 = 6,50 kN F_{w2} = 1,38 kN M_{xx} = 65,0 kNm M_{yy} = 22,75 kNm	S_2 = 6,50 kN F_{w2} = 1,38 kN M_{xx} = 78,0 kNm M_{yy} = 29,0 kNm	S_2 = 7,72 kN F_{w2} = 1,73 kN M_{xx} =115,75 kNm M_{yy} = 46,30 kNm

TUSSENAFSPANMASTEN:



	L_{ph}=10m	L_{ph}=12m	L_{ph}=15m
	Eigen-gewicht plus wind; dubbele draadbreuk in één vak.		
	S_1 = 4,0 kN S_2 = 4,0 kN F_{w1} = 0,69 kN F_{w2} = 0,69 kN M_{xx} = 94,0 kNm M_{yy} = 25,14 kNm	S_1 = 4,0 kN S_2 = 4,0 kN F_{w1} = 0,69 kN F_{w2} = 0,69 kN M_{xx} =110,0 kNm M_{yy} = 31,40 kNm	S_1 = 4,67 kN S_2 = 4,67 kN F_{w1} = 0,865kN F_{w2} = 0,865kN M_{xx} =158,80 kNm M_{yy} = 49,70 kNm

Recapitulatie van de beschouwde situaties:



Beschouwde situaties bij kabelbreuk:

Voor de afspanmasten : Situatie"A",breuk van beide tuidraden.
Voor de tussenmasten : Situatie"B",breuk van draag-en spankabel.
Voor de tussenafspanmasten: Situatie"C",breuk van draag-en spankabel.

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

2. AFLEIDING VAN ENKELE VEEL GEBRUIKTE FORMULES.

2.1 Bepaling van de lengte van de parabool L :

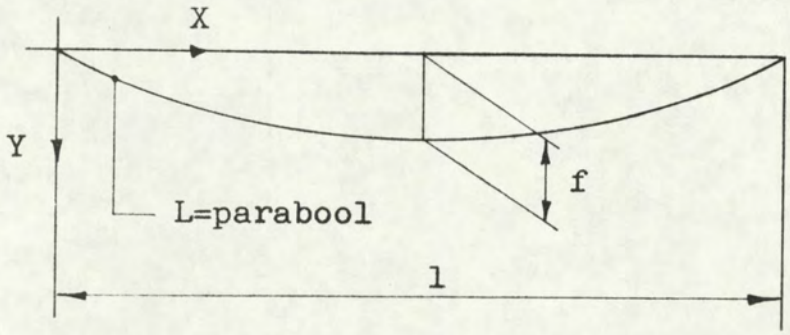
Exacte oplossing:

$$L = \frac{\ell}{2}\left(1+16n^2\right)^{1/2} + \frac{\ell}{8n}\ln\left\{4n + \left(1+16n^2\right)^{1/2}\right\}$$

Benadering:

$$L = \ell\left\{1 + \frac{8}{3}n^2 - \frac{32}{5}n^4\right\} \qquad n = \frac{f}{\ell}$$

Afleiding benadering:



Doorhang $f = y_0$

Parabool: $$y = 4y_0\left[\frac{x}{\ell} - \frac{x^2}{\ell^2}\right]$$

$$\frac{dy}{dx} = 4y_0\left[\frac{1}{\ell} - \frac{2x}{\ell^2}\right] = \frac{4y_0}{\ell}\left[1 - \frac{2x}{\ell}\right]$$

$$dL^2 = dx^2 + dy^2 = dx^2\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]$$

$$L = \int\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\cdot dx$$

$$\frac{dy}{dx} = 4n\left[1 - \frac{2x}{\ell}\right]$$

$$L = \int \sqrt{1 + 16 n^2 \left(1 - \frac{2x}{\ell}\right)^2}\, dx$$

Stel: $16 n^2 \left(1 - \frac{2x}{\ell}\right)^2 = z$

$$\sqrt{1 + 16 n^2 \left(1 - \frac{2x}{\ell}\right)^2} = (1 + z)^m \approx 1 + mz + \frac{m(m-1).z^2}{2!}$$

$$\begin{cases} m = \frac{1}{2} \\ mz = 8 n^2 \left(1 - \frac{2x}{\ell}\right)^2 \\ \frac{m(m-1)}{2} = -\frac{1}{8} \\ z^2 = 16^2 . n^4 \left(1 - \frac{2x}{\ell}\right)^4 \end{cases} \longrightarrow -\frac{1}{8} z^2 = -32 . n^4 \left(1 - 2\frac{x}{\ell}\right)^4$$

Stel: $\frac{x}{\ell} = \alpha \longrightarrow dx = \ell . d\alpha$

$$1 + 8 n^2 (1 - 2\alpha)^2 - 32 n^4 (1 - 2\alpha)^4$$

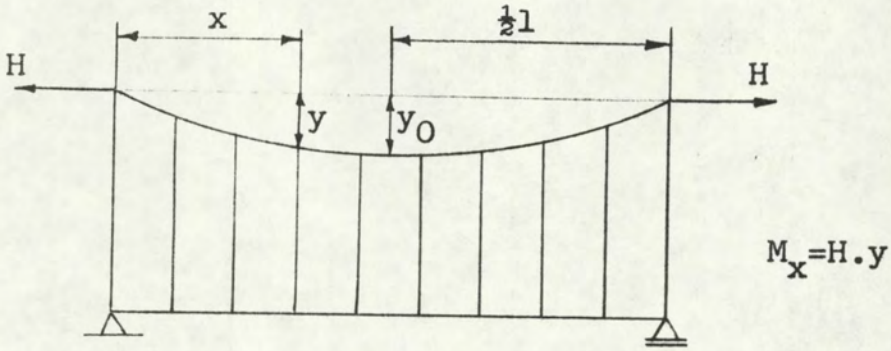
$$1 + 8 n^2 (1 - 4\alpha + 4\alpha^2) - 32 n^4 (1 - 8\alpha + 24\alpha^2 - 32\alpha^3 + 16\alpha^4)$$

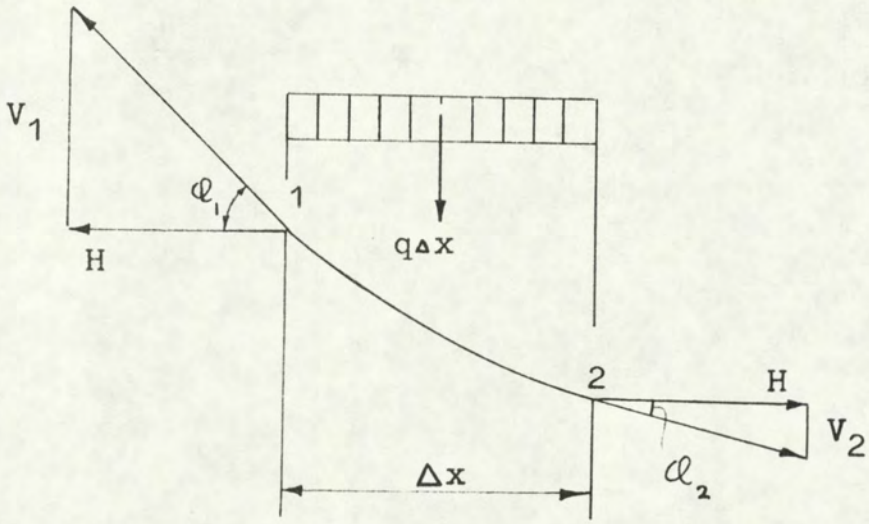
Grenzen: $x = 0 \longrightarrow \alpha = 0$
$x = \ell \longrightarrow \alpha = 1$

$$L = \ell \int f(\alpha)\, d\alpha = \ell \Big[\alpha + 8 n^2 \left(\alpha - 2\alpha^2 + \frac{4}{3}\alpha^3\right) - 32 n^4 \left(\alpha - 4\alpha^2 + 8\alpha^3 - 8\alpha^4 + \frac{16}{5}\alpha^5\right) \Big]_0^1$$

$$\boxed{L = \ell \left\{ 1 + \frac{8}{3} n^2 - \frac{32}{5} n^4 \right\}}$$

2.2 Bepaling van de horizontale kracht bij een bepaalde doorhang van de kabel:





$$V_1 = H \, tg \, \alpha_1 \qquad tg \, \alpha = y'$$

$$V_2 = H \, tg \, \alpha_2$$

$$V_2 - V_1 = (y_2' - y_1') \cdot H$$

$$\frac{V_2 - V_1}{\Delta x} = \frac{(y_2' - y_1')}{\Delta x} \cdot H \qquad \text{Lim } \Delta x \longrightarrow 0 \text{ geeft:}$$

$$\frac{dV}{dx} = \frac{d(y')}{dx} \cdot H = \frac{d^2 y}{dx^2} \cdot H = -q$$

Parabool: $y = 4y_0 \left\{ \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right\}$

$$y' = 4y_0 \left\{ \frac{1}{l} - \frac{2x}{l^2} \right\} = \frac{4y_0}{l} \left\{ 1 - 2\frac{x}{l} \right\}$$

$$y'' = -\frac{8y_0}{l^2}$$

$$q = -H \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -H \cdot \frac{8y_0}{l^2} \longrightarrow M_0 = 1/8\, q \cdot l^2$$

$$(M_0 = H \cdot y_0)$$

$$\downarrow$$

Voor de belasting in de draagkabel geldt:

$$\left.\begin{array}{l} Q = q \cdot l \\ y_0 = f \\ H = S \end{array}\right\} \longrightarrow \boxed{S = \frac{1/8 \cdot Q \cdot l}{f}}$$

De belasting in de spankabel is te bepalen uit de betrekking:

$$\boxed{(S_2 - S_0) \cdot S_2^2 = 1/24 \cdot Q^2 \cdot E \cdot A}$$

(Deze formule wordt in hoofdstuk 3 afgeleid)

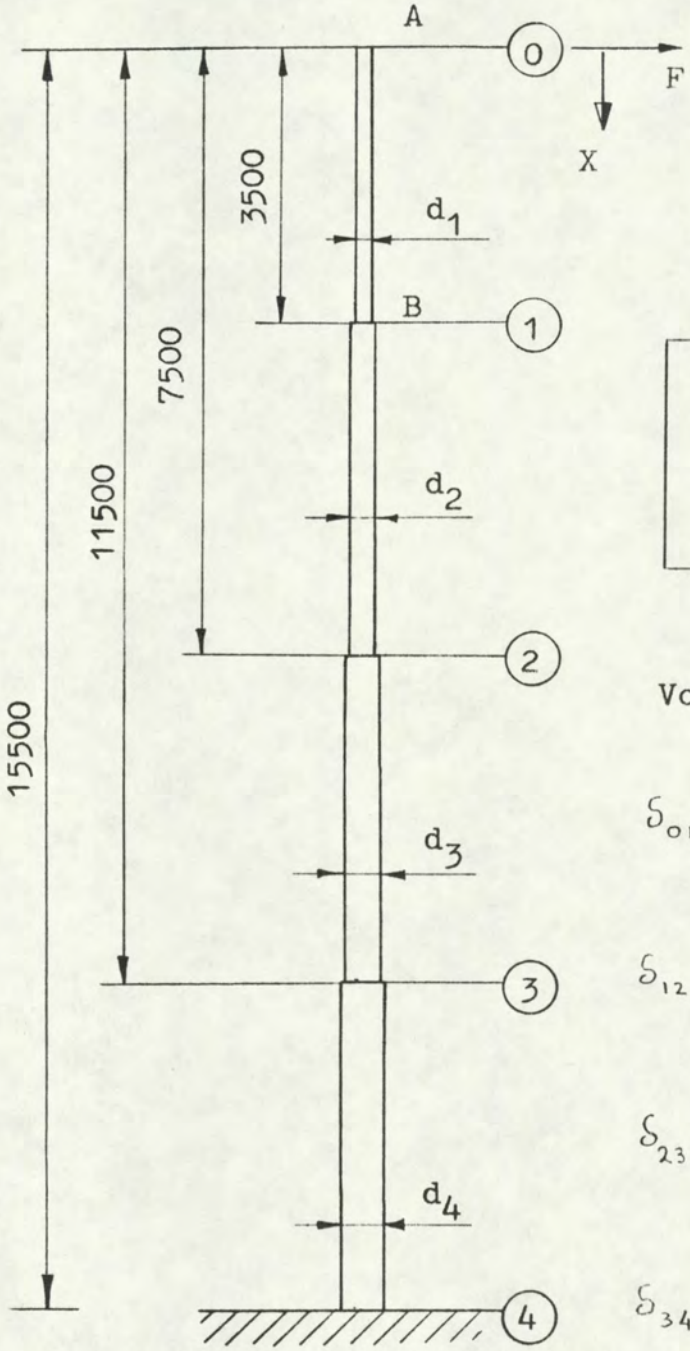
2.3 **Bepaling van de uitwijking van de mast t.g.v. een kracht:**

Zakking (hoekverdraaiing) t.p.v. punt O:

(E= 2,1.10^5 N/mm^2)

$$\delta = \int \frac{M.\bar{M}.ds}{EI} \qquad M = F.x \qquad \bar{M} = x \qquad ds = dx$$

$$\Delta\delta = \int_i^j \frac{F x^2 dx}{EI_{i-j}}$$



$$\Delta\delta = \frac{\frac{1}{3}F.(x_j^3 - x_i^3)}{E.I_{i-j}}$$

$$\boxed{\delta_{tot} = \frac{\sum \frac{1}{3}F.(x_j^3 - x_i^3)}{E.I_{i-j}}}$$

Voor F=1kN bij A geldt:

$$\delta_{01} = \frac{\frac{1}{3}.1000.3500^3}{EI_1}$$

$$\delta_{12} = \frac{\frac{1}{3}.1000(7500^3 - 3500^3)}{EI_2}$$

$$\delta_{23} = \frac{\frac{1}{3}.1000(11500^3 - 7500^3)}{EI_3}$$

$$\delta_{34} = \frac{\frac{1}{3}.1000(15500^3 - 11500^3)}{EI_4}$$

+

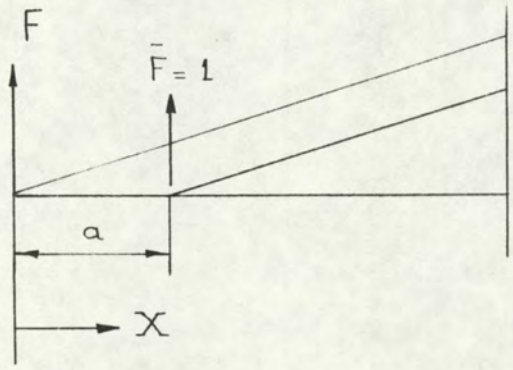
$$\delta_{tot} = \sum \delta_{ij}$$

$$\varphi = \int \frac{M\bar{M}\,ds}{EI} \qquad M = F.x \qquad \bar{M} = 1 \qquad ds = dx$$

$$\Delta\varphi = \int_i^j \frac{Fx.dx}{EI} = \frac{\frac{1}{2}F(x_j^2 - x_i^2)}{EI_{i\cdot j}}$$

$$\boxed{\varphi_{tot} = \frac{\sum \frac{1}{2}F(x_j^2 - x_i^2)}{EI_{i\cdot j}}}$$

Zakking elders:



$M = F.x$
$\bar{M} = \bar{F}(x-a) = (x-a)$
$ds = dx$

$$\int \frac{M\bar{M}\,ds}{EI} = \frac{F}{EI}\int (x^2 - ax)\,dx$$

$$= \frac{F}{EI}\left[\tfrac{1}{3}x^3 - \tfrac{1}{2}ax^2\right]_i^j$$

$$= \frac{F}{EI}\left[\tfrac{1}{3}(x_j^3 - x_i^3) - \tfrac{1}{2}a(x_j^2 - x_i^2)\right]$$

voor $x > a$

$$\boxed{\delta_{tot} = \frac{\sum \tfrac{1}{3}F}{EI}\left[(x_j^3 - x_i^3) - \tfrac{3}{2}a(x_j^2 - x_i^2)\right]}$$

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

3. INVLOED VAN DE VORMVERANDERING. ("TUSSENMASTEN")

3.1 **Bepaling van de belasting op tussenmasten voor lijnverlichting:**

Beschouwd wordt een enkellamps verlichtingsinstallatie met een lichtpunthoogte van 12m bij dubbele kabelbreuk in één vak.

3.1.1 - **Stijfheid van de mast.**

Uitgangspunten:
De mast bestaat uit vier geledingen zoals aangegeven is in fig.1.
De afmetingen van de mast worden bepaald door een belasting van 6,7 kN bij B.

$$\left(6{,}7\ kN \approx \sqrt{6{,}5^2 + 1{,}38^2} \right)$$

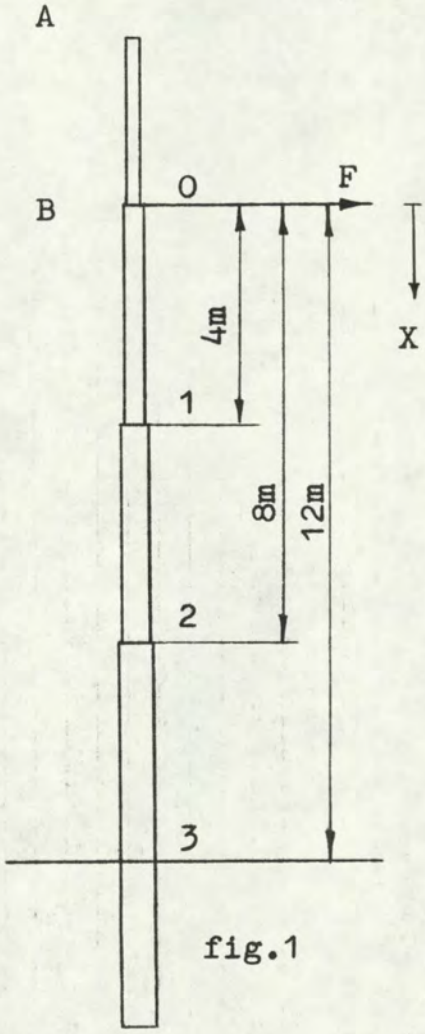


fig.1

$M_1 = 6{,}7 \times 4 = 26{,}8\ kNm.$
$\sigma = 240\ N/mm^2.$

$$W_{ben} = \frac{26{,}8 \times 10^6}{240} = 112 \times 10^3\ mm^3.$$

Buis: $177{,}8 \times 5$: $W = 114\ cm^3$
$I = 1014\ cm^4$

$M_2 = 6{,}7 \times 8 = 53{,}6\ kNm.$

$$W_{ben} = \frac{53{,}6 \times 10^6}{240} = 223 \times 10^3\ mm^3$$

Buis: $244{,}5 \times 6{,}3$: $W = 274\ cm^3$
$I = 3346\ cm^4$

$M_3 = 6{,}7 \times 12 = 80{,}40\ kNm$

$$W_{ben} = \frac{80{,}40 \times 10^6}{0{,}8 \times 240} = 419 \times 10^3\ mm^3$$

i.v.m. deuropening.

Buis: $298{,}5 \times 7{,}1$
$W = 463\ cm^3$
$I = 6903\ cm^4$

Zakking ter plaatse van B door een belasting F van 1kN bij B:

$$\delta = \int \frac{M\bar{M}\,ds}{EI} \qquad M = F.x \quad \bar{M} = x \quad ds = dx$$

$$\Delta\delta = \int \frac{F.x^2 dx}{EI} = \frac{1}{3}\,\frac{F(x_j^3 - x_i^3)}{EI_{ij}}$$

$$F = 1\,kN \qquad E = 210\,kN/mm^2$$

$$\Delta\delta_{01} = \frac{1/3 \times 1 \times (4^3 - 0) \times 10^9}{210 \times 1014 \times 10^4} = 10{,}02\ mm.$$

$$\Delta\delta_{02} = \frac{1/3 \times 1 \times (8^3 - 4^3) \times 10^9}{210 \times 3346 \times 10^4} = 21{,}25\ mm.$$

$$\Delta\delta_{03} = \frac{1/3 \times 1 \times (12^3 - 8^3) \times 10^9}{210 \times 6903 \times 10^4} = 41{,}10\ mm.$$

$$\text{Totaal } \delta_0 = 72{,}37\ mm.$$

Door invloed van vervorming grondstuk of voetplaat ca.30% meer:

$$\delta_0 = 1{,}3 \times 72{,}37 \approx 94\ mm/kN$$

De veerconstante K van de mast wordt dan:

$$K_1 = \frac{F}{\delta_0} = \frac{1}{94} = 10{,}63.10^{-3}\ kN/mm.$$

3.1.2 - Stijfheid van de spankabel:

Uitgangspunten:
Mastafstand 90m.
Draad 8mm ; A= 29,3mm^2 ; E=120 kN/mm^2.

$$\delta = \frac{F.\ell}{E.A} \qquad K = \frac{F}{\delta} = \frac{EA}{\ell}$$

$$K_2 = \frac{120 \times 29{,}3 \times 10^{-3}}{90} = 39 \times 10^{-3}\ \text{kN/mm}.$$

3.1.3 - Afname van de voorspankracht bij kabelbreuk in één vak:

Uitgangspunten:
Het aantal masten rechts van het vak waar kabelbreuk is opgetreden (fig.2) wordt oneindig groot beschouwd.
De spankabel wordt alleen belast door de voorspanning.

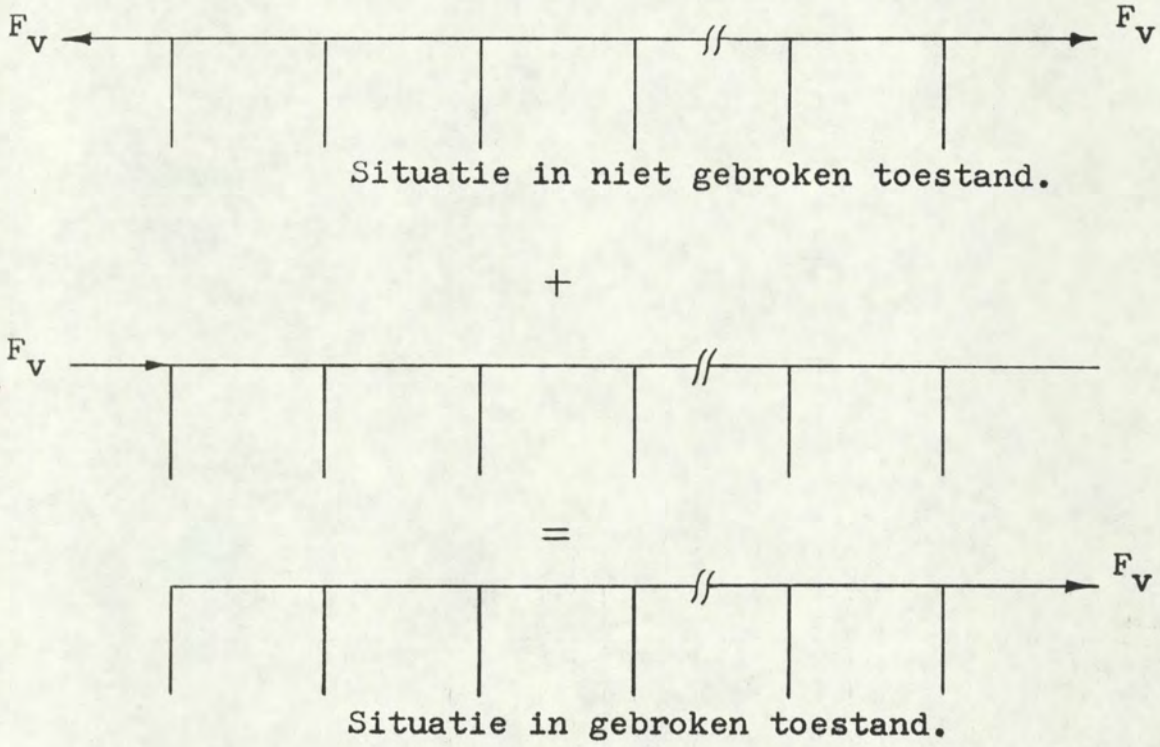


fig.2

3.1.5 - Tweede-orde gedrag spankabel:

$$L = \ell\left(1 + {}^{8}/_{3}\, n^2 - {}^{32}/_{5}\, n^4 + \ldots\right) \qquad n = \frac{f}{\ell}$$

Voor kleine waarden van n geldt:

$$L = \ell\left(1 + {}^{8}/_{3}\, n^2\right) \quad \text{en} \quad L - \ell \approx \Delta\ell = {}^{8}/_{3}\, n^2 \ell$$

$$\Delta\ell = {}^{8}/_{3}\, \frac{f^2}{\ell}$$

Als Q de dwarsbelasting op de kabel is (gelijkmatig verdeeld) geldt tevens:

$$F = \frac{{}^{1}/_{8}\, Q\ell}{f} \quad \text{of} \quad f = \frac{{}^{1}/_{8}\, Q\ell}{F} \quad \text{en} \quad f^2 = \frac{Q^2\ell^2}{64\, F^2}$$

Substitutie levert:

$$\Delta\ell = \frac{{}^{8}/_{3} \cdot Q^2\ell}{64\, F^2} = \frac{Q^2 \cdot \ell}{24\, F^2}$$

Rek van de kabel en vervorming masten:

$$\delta = \frac{\Delta F}{K} = \frac{F - F_v}{K} = \Delta\ell \qquad \text{dus:}$$

$$\frac{F - F_v}{K} = \frac{Q^2 \cdot \ell}{24\, F^2} \qquad \text{of:}$$

$$\boxed{F^2\left(F - F_v\right) = \frac{Q^2 \cdot K \cdot \ell}{24}}$$

Voor oneindig stijve masten geldt:

$$K \times \ell = E \times A$$

$$\boxed{\left(F - F_v\right) F^2 = {}^{1}/_{24}\, Q^2 \cdot E \cdot A}$$

3.1.6 - Krachten op de mast:

Belasting door hoge windbelasting:

$Q_w = 2{,}748$ kN

Belasting door eigen-gewicht (dubbele kabelbreuk):

$Q_g = 1{,}00$ kN

$$Q = \sqrt{1{,}00^2 + 2{,}748} = 2{,}92 \text{ kN.}$$

Voorspankracht $F_{vo} = 5$ kN

$$F_v = 5 \times 0{,}40 = 2 \text{ kN}$$

$$K = 11{,}32 \times 10^{-3} \text{ kN/mm} \qquad \ell = 90 \text{ m.}$$

$$\frac{Q^2 . K . \ell}{24} = \frac{2{,}92^2 \times 11{,}32 \times 10^{-3} \times 90 \times 10^{+3}}{24} \approx 362 \text{ (kN)}^3$$

$$F^2 (F - 2) = 362 \longrightarrow \underline{\underline{F \approx 7{,}9 \text{ kN}}}$$

Indien de mast 2x stijver is wordt de belasting:

$$F_v = 5 \times 0{,}51 = 2{,}55 \text{ kN}$$

$$K = 17{,}54 \times 10^{-3} \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

$$\frac{Q^2 . K . \ell}{24} = \frac{2{,}92^2 \times 17{,}54 \times 10^{-3} \times 90 \times 10^{+3}}{24} = 560{,}8 \text{ (kN)}^3$$

$$F^2 (F - 2{,}55) = 560{,}8 \longrightarrow \underline{\underline{F \approx 9{,}2 \text{ kN}}}$$

De belasting bij oneindig stijve masten zou zijn:

$$F_v = 5\,kN \qquad K = 39 \times 10^{-3}\ \frac{kN}{mm}$$

$$\frac{Q^2 . K . \ell}{24} = \frac{2{,}92^2 \times 39 \times 10^{-3} \times 90 \times 10^3}{24} = 1246\ (kN)^3$$

$$F^2 (F - 5) = 1246 \longrightarrow \underline{\underline{F = 12{,}7\ kN}}$$

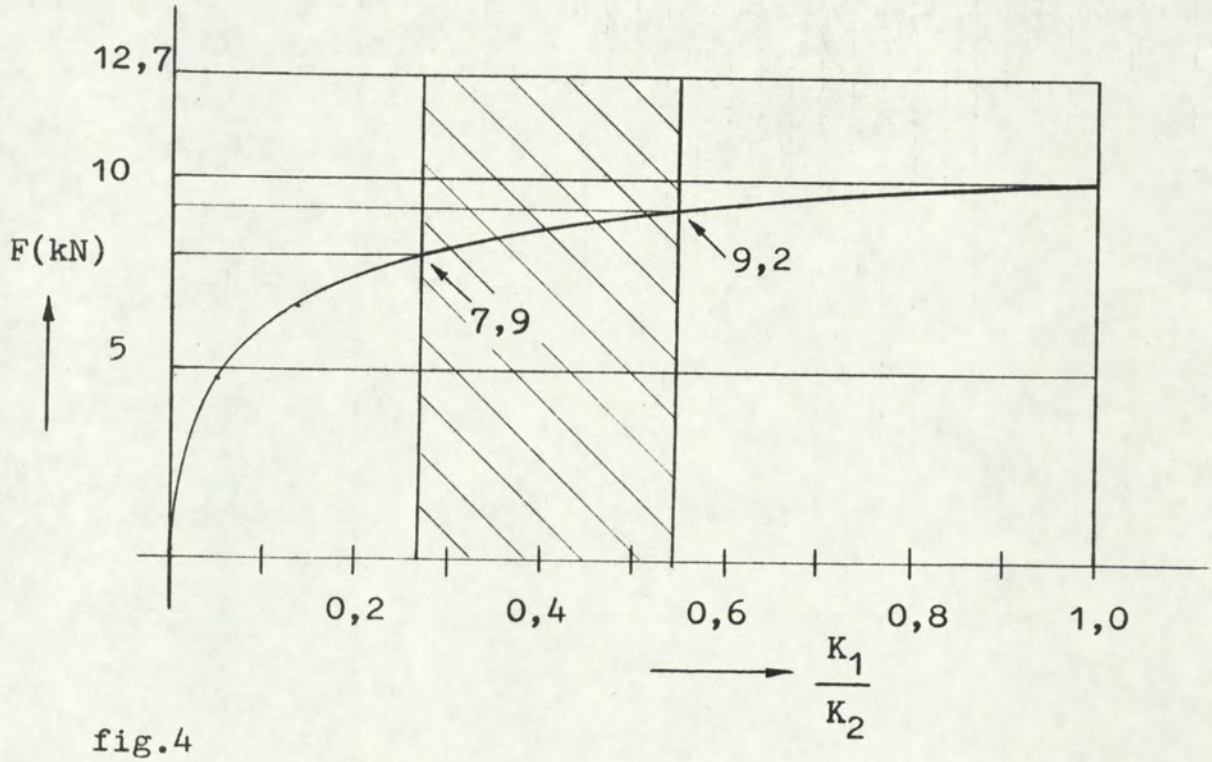


fig.4

Uitwijkingen:

Uitwijking kabel:

$$f = \frac{\frac{1}{8} Q \ell}{F} = \frac{\frac{1}{8} \times 2{,}92 \times 90}{7{,}9} = 4{,}16\ m.$$

Uitwijking mast 1 :

$$y_1 = \frac{F}{K_1} = \frac{7,9}{10,63 \times 10^{-3}} = 743 \text{ mm} = 0,743 \text{ m}$$

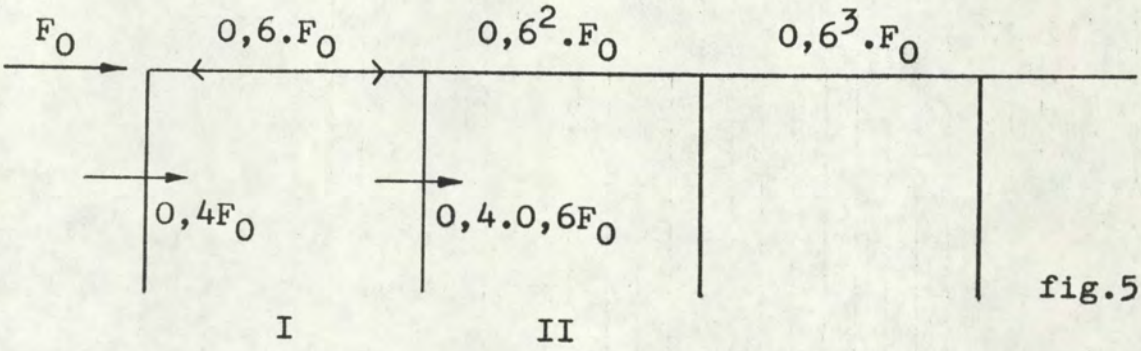


fig.5

Uitwijking mast 2:

Voorspanning in de kabel van vak 1: F_v=(1-0,6).5=2 kN.

Verandering van de belasting door wind: (7,9-2) kN.

Vormverandering door wind: $\frac{(7,9-2).1/3}{10,63}$

$$y_2 = \underbrace{\frac{5,0 \times 0,6 \times 0,4}{10,63}}_{\text{door: kabelbreuk zonder wind.}} + \underbrace{\frac{(7,9-2) \times \frac{1}{3}}{10,63}}_{\text{door: wind-belasting.}} = 0,11 + 0,19 = 0,3 \text{ m}$$

Rek van de kabel: $\delta = \frac{7,9 - 5,0}{39} = 0,07$ m.

$$y_1 - y_2 + \delta = 0,743 - 0,3 + 0,07 = 0,513 \text{ m.}$$

Controle voor uitwijking kabel: $\Delta l = \frac{8/3 \cdot f^2}{l}$

$$f = \sqrt{0,513 \times 3/8 \times 90} = 4,16 \text{ m.}$$

Figuur 4 geeft een beeld van het verloop van de krachten op de mast als functie van K_1/K_2.
Het is aannemelijk dat de stijfheidsverhoudingen in het gearceerde gebied liggen.
De belasting varieert daarin van 7,9÷9,2 kN.

In het geval waarbij Q_w=2/3.2,748=1,83 kN;worden de belastingen:

$$Q = \sqrt{Q_g + Q_w} = \sqrt{1{,}0^2 + 1{,}83^2} = 2{,}09 \text{ kN}$$

$$F_v = 5{,}0 \times 0{,}4 = 2{,}0 \text{ kN}$$

$$\frac{Q^2 . K . \ell}{24} = \frac{2{,}09^2 \times 11{,}32 \times 10^{-3} \times 90 \times 10^{+3}}{24} = 185{,}4 \, (\text{kN})^3$$

$$F^2 (F - 2) = 185{,}4 \longrightarrow \underline{\underline{F \approx 6{,}45 \text{ kN}}}$$

Indien de mast 2x stijver is wordt de belasting:

$$F_v = 5 \times 0{,}51 = 2{,}55 \text{ kN}$$
$$K = 17{,}54 \times 10^{-3} \frac{\text{kN}}{\text{mm}}.$$

$$\frac{Q^2 K . \ell}{24} = \frac{2{,}09^2 \times 17{,}54 \times 10^{-3} \times 90 \times 10^{+3}}{24} = 287{,}3 \, (\text{kN})^3$$

$$F^2 (F - 2{,}55) = 287{,}3 \longrightarrow \underline{\underline{F \approx 7{,}57 \text{ kN}}}$$

De belasting bij oneindig stijve masten zou zijn:

$$F_v = 5 \text{ kN} \quad ; \quad K = 39 \times 10^{-3} \frac{\text{kN}}{\text{mm}}.$$

$$\frac{Q^2 . K . \ell}{24} = \frac{2{,}09^2 \times 39 \times 10^{-3} \times 90 \times 10^{+3}}{24} = 638{,}8 \, (\text{kN})^3$$

$$F^2 (F - 5) = 638{,}8 \longrightarrow \underline{\underline{F \approx 10{,}64 \text{ kN}}}.$$

3.1.7 - Dynamisch gedrag bij kabelbreuk:

Getracht zal worden dit probleem op te lossen d.m.v. de arbeidsvoorwaarde: $W_i = W_u$.

Daartoe wordt één vak uit het systeem geïsoleerd en verder in beschouwing genomen (fig.6).

Aangenomen wordt dat $y_2 = 0{,}3/0{,}743 \cdot y_1$

of: $y_2 \approx 0{,}4\ y_1$

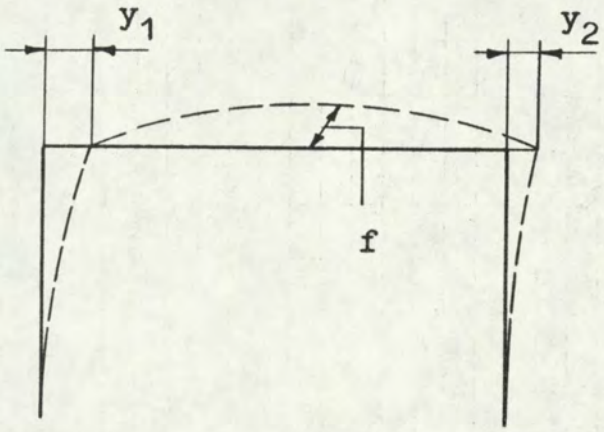


fig.6

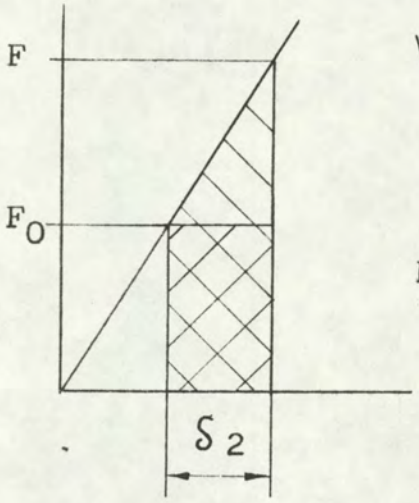
De relatieve verplaatsing van de masten:

$$\delta_1 = y_1 - y_2 = \frac{F}{K_1} - \frac{0{,}4\,F}{K_1} = \frac{0{,}6\,F}{K_1}$$

Arbeid in de masten voor dit vakgedeelte:

$$W_{i1} = \tfrac{1}{2} F \delta_1 = \frac{0{,}3\,F^2}{K_1}$$

Arbeidsvermeerdering in de kabel:



$$W_{i2} = \tfrac{1}{2}(F - F_0)\,\delta_2 + F_0\,\delta_2 = \tfrac{1}{2}(F + F_0)\,\delta_2$$

$$\delta_2 = \frac{F - F_0}{K_2}$$

F_0 is de belasting waarbij de kabels niet gebroken zijn

$$W_{i2} = \frac{\tfrac{1}{2}(F^2 - F_0^2)}{K_2}$$

$$W_i = \frac{0{,}3\,F^2}{K_1} + \frac{\frac{1}{2}\left(F^2 - F_0^2\right)}{K_2}$$

$$W_i = \frac{1}{2}\left\{ \frac{F^2}{K_2}\left(\frac{6K_2 + 10K_1}{10\,K_1}\right) - \frac{F_0^{\,2}}{K_2} \right\}$$

Arbeid verricht door de belasting:

$$W_u = \iint q \cdot dy \cdot dx = q \iint dy \cdot dx$$ **q is constant!**

$$W_u = q \int y\, dx$$

$$y = 4\,y_0 \left\{ \frac{x}{\ell} - \frac{x^2}{\ell^2} \right\} \longrightarrow W_u = q \int 4\,y_0 \left\{ \frac{x}{\ell} - \frac{x^2}{\ell^2} \right\} dx$$

$$\int y\, dx = 4\,y_0 \left[\frac{\frac{1}{2}\,x^2}{\ell} - \frac{\frac{1}{3}\,x^3}{\ell^2} \right]_0^{\ell} = \frac{2}{3}\,y_0 \cdot \ell$$

$$W_u = \frac{2}{3}\,Q\,(f - f_0)$$

Hierin is f_0 de aanvangszakking. ($K_1 = \infty$)

$$\delta = \frac{F}{K} = \frac{\frac{8}{3}\,f^2}{\ell} \longrightarrow f = \sqrt{3/8\,\frac{\ell\,F}{K}}$$

$$\delta_0 = \frac{F_0 - F_{v0}}{K_2} \longrightarrow f_0 = \sqrt{3/8\,\frac{\ell\,(F_0 - F_{v0})}{K_2}}$$

$$\delta_{tot} = \frac{F - F_v}{K} \longrightarrow f = \sqrt{3/8\,\frac{\ell\,(F - F_v)}{K}}$$

$$W_u = \tfrac{2}{3} Q \ell \left\{ \sqrt{\frac{\tfrac{3}{8}(F - F_v)}{K \ell}} - \sqrt{\frac{\tfrac{3}{8}(F_o - F_{vo})}{K_2 \ell}} \right\}$$

$W_u = W_i$ levert:

$$F^2 \frac{(6K_2 + 10K_1)}{10K_1} - F_o^2 = \frac{4}{3} Q K_2 \ell \left\{ \sqrt{\frac{\tfrac{3}{8}(F - F_v)}{K \ell}} - \sqrt{\frac{\tfrac{3}{8}(F_o - F_{vo})}{K_2 \ell}} \right\}$$

$$\left.\begin{array}{l} Q = 2{,}92 \text{ kN } (2{,}09 \text{ kN}) \\ F_o = 12{,}7 \text{ kN } (10{,}64 \text{ kN}) \\ F_v = 5{,}0 \times 0{,}4 \text{ kN} = 2 \text{ kN} \\ F_{vo} = 5{,}0 \text{ kN} \\ \\ K_1 = 10{,}63 \times 10^{-3} \text{ kN/mm.} \\ K_2 = 39{,}0 \times 10^{-3} \text{ kN/mm.} \\ K = 11{,}32 \times 10^{-3} \text{ kN/mm.} \\ \ell = 90 \times 10^{3} \text{ mm.} \end{array}\right\} F \approx 15{,}06 \text{ kN } (11{,}7 \text{ kN})$$

Mast 2X stijver: $F \approx 16{,}65$ kN (13,13 kN)

De waarden tussen haakjes gelden voor het geval waarbij: $Q_w = 2/3 . Q_{w,max}$

3.2 Conclusies en aanbevelingen:

De kans dat het tijdstip van tweevoudige kabelbreuk samenvalt met de gemiddeld eens in de vijf jaar* optredende hoogste windvlaag is dermate klein dat dit buiten beschouwing kan worden gelaten.
Een meer realistischer aanname lijkt voor dat moment een windbelasting in rekening te brengen ter grootte van 2/3 van de maximale waarde.
($Q \approx 2/3 \times 2{,}748$ kN)
De belasting op de mast varieert dan van 11,7 tot 13,1 kN. (gemiddeld 12,4 kN)
Voorwaarde is dat de mast in deze situatie niet breekt.
Grote blijvende vervormingen, door het plaatselijk overschrijden van de rekgrens of plaatselijk plooien, zijn echter geoorloofd.
De belasting door de "statische" windbelasting varieert in dit geval van 6,45 tot 7,57 kN.
(gemiddeld dus 7,0 kN)
Als de volplastische momenten ter plaatse van de kritische doorsneden van de mast boven de door deze belasting optredende momenten ligt, kan de mast bij het vormen van één of meerdere plastische scharnieren aanzienlijk meer arbeid opnemen dan bij een lineair elastisch gedrag, waarvan in de berekening is uitgegaan.
Dit betekent dat de werkelijke belasting op de mast lager zal zijn dan hierboven is aangegeven.
Wanneer er vanuit wordt gegaan, dat de momenten die optreden door de berekende belasting (12,4 kN) gelijk of kleiner zijn dan de breukmomenten van de mast, kan gesteld worden dat het optreden van breuk beperkt wordt tot een aanvaardbaar risico.

(*)..zie:NEN1060 en NEN3850.

Het breukmoment van de mast bedraagt:

$$M_{br} = \sigma_{br} \cdot W_{pl} \approx 1{,}27 \cdot 1{,}50 \cdot \sigma_e \cdot W$$

Hierin zijn:

M_{br} = breukmoment

σ_{br} = treksterkte

σ_e = vloeispanning of rekgrens

W_{pl} = plastisch weerstandsmoment

W = weerstandsmoment

$1{,}27 \approx \frac{W_{pl}}{W}$

Het lijkt zinvol in een richtlijn (Eisen lichtmasten) uit te gaan van de voorwaarde dat de vloeigrens of rekgrens voor dit geval niet mag worden overschreden. De dan in rekening te brengen belasting bedraagt:

$$F = \frac{12{,}4}{1{,}27 \cdot 1{,}50} = 6{,}5 \text{ kN.}$$

Groter is de kans dat de hoogste windbelasting optreedt in de situatie waarbij de staaldraden reeds gebroken zijn omdat verwacht mag worden dat kabelbreuk op kan treden bij zware storm.
De krachten die daarbij optreden variëren van 7,9 tot 9,2 kN. (gemiddeld 8,6 kN)
Voorgesteld wordt aan dit belastingsgeval de voorwaarde te koppelen dat nergens in de mast het volplastisch moment mag worden overschreden.
De in rekening te brengen belasting in de richtlijn wordt dan:

$$F = \frac{8{,}6}{1{,}27} = 6{,}7 \text{ kN.}$$

In "Eisen lichtmasten" is voor beide situaties gekozen voor:

$$\boxed{F = 6{,}5 \text{ kN}}$$

De verhouding van deze belasting tot de belasting die optreedt bij oneindig stijve masten bedraagt:

$$\frac{F}{F_{oneindig}} = \frac{6,5}{12,7} \approx \underline{\underline{0,52}}$$

Ter bepaling van de belasting op tussenmasten voor lichtpunthoogten van 10 en 15m is eveneens gebruik gemaakt van deze factor.

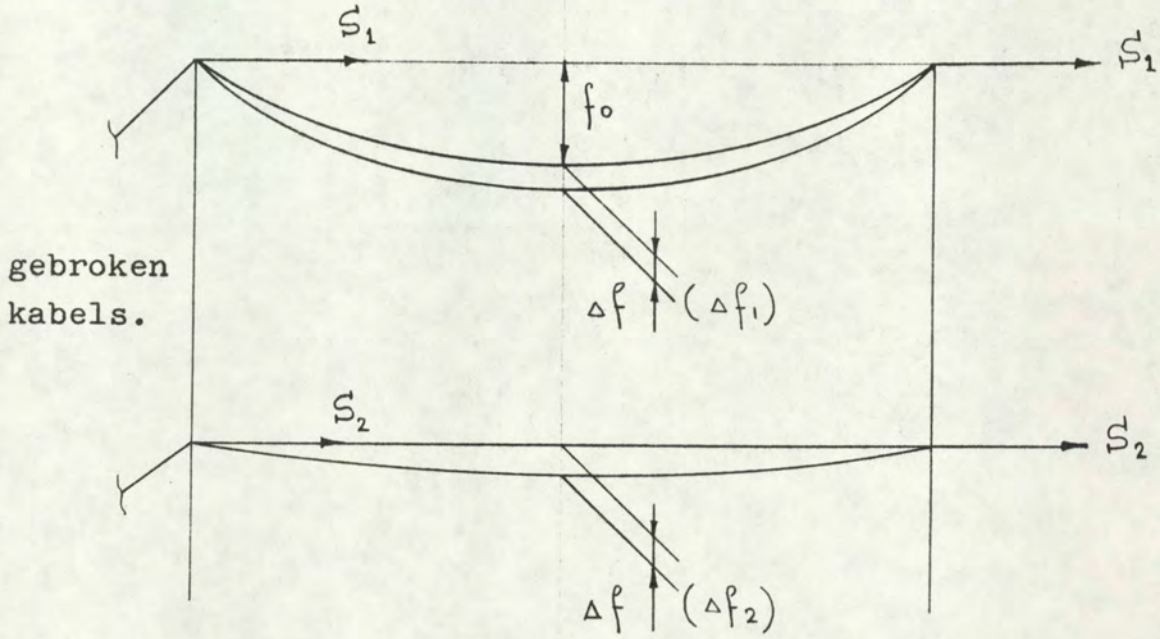
rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

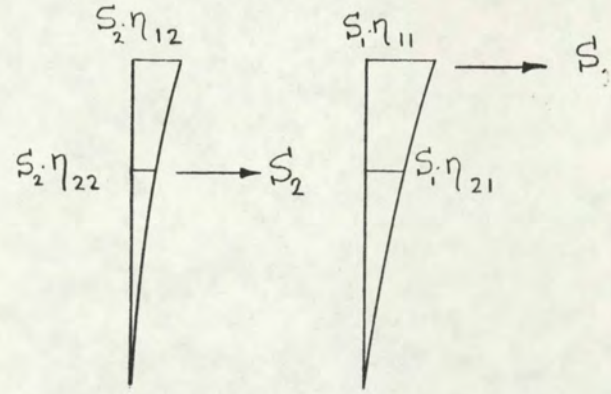
4. INVLOED VAN DE VORMVERANDERING. ("TUSSENAFSPANMASTEN")

4.1 **Bepaling van de doorhang van de draagkabel en de spankabel t.g.v. de vervormingen:**

Geïsoleerd systeem:



$$\tfrac{1}{8} Q l = (f_0 + \Delta f) S_1 + \Delta f \cdot S_2 \quad \text{.....(I)}$$



Draagkabel bij aanvang S_{10}

Spankabel bij aanvang S_{20}

"Verlenging" draagkabel per vak:

$$\Delta l_1 = \underbrace{\frac{y_{01} - \tfrac{1}{4} y_{01}}{5}}_{\text{verkleining v.d. vaklengte}} - \underbrace{\frac{(S_{10} - S_1)}{K_2}}_{\text{verlenging v.d. kabel}} = \tfrac{3}{20} y_{01} - \frac{(S_{10} - S_1)}{K_2}$$

(5 voor 5 vakken:laatste mast verplaatst dan naar schatting $\frac{1}{4}$ van de eerste)

"Verlenging" van de spankabel per vak:

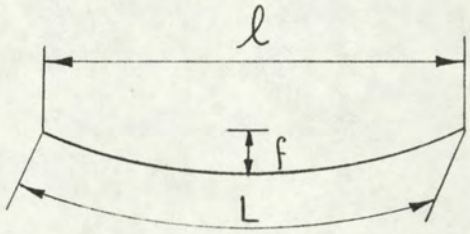
$$\Delta l_2 = y_{02} - \underset{\substack{\downarrow \\ \text{(aangenomen waarde)}}}{1/2\, y_{02}} - \frac{(S_{20} - S_2)}{K_2} = 1/2\, y_{02} - \frac{(S_{20} - S_2)}{K_2}$$

$$\left.\begin{aligned} y_{01} &= S_1 \cdot \eta_{11} + S_2 \cdot \eta_{12} \\ y_{02} &= S_2 \cdot \eta_{22} + S_1\, \eta_{21} \end{aligned}\right\} \longrightarrow \eta_{21} = \eta_{12}$$

$$\Delta l_1 = 3/20 \left\{ S_1 \cdot \eta_{11} + S_2 \cdot \eta_{12} \right\} - \left\{ \frac{S_{10}}{K_2} - \frac{S_1}{K_2} \right\}$$

$$\Delta l_2 = 1/2 \left\{ S_2 \cdot \eta_{22} + S_1 \cdot \eta_{21} \right\} - \left\{ \frac{S_{20}}{K_2} - \frac{S_2}{K_2} \right\}$$

Draagkabel:



$$L = l\left(1 + 8/3\, n^2\right)$$

$$\left(n = \frac{f}{l} \right)$$

$$\frac{dL}{dn} = 16/3 \cdot n \cdot l \longrightarrow \Delta L = 16/3\, n\, l\, \Delta n \approx \Delta l_1$$

$$\Delta l_1 = 16/3\, l : \frac{f_0}{l} \cdot \frac{\Delta f}{l}$$

$$\Delta l_1 = 16/3 \cdot \frac{f_0}{l} \cdot \Delta f = 16/3 \cdot n_0 \cdot \Delta f$$

Spankabel:

$$\Delta l_2 = 8/3\, n^2 \cdot l = 8/3 \cdot \frac{\Delta f^2}{l^2} \cdot l = 8/3 \cdot \frac{\Delta f^2}{l}$$

$$16/3 \cdot n_0 \cdot \Delta f = 3/20\left[S_1 \cdot \eta_{11} + S_2 \cdot \eta_{12}\right] - \left[\frac{S_{10}}{K_2} - \frac{S_1}{K_2}\right]$$

$$\boxed{\Delta f_1 = \frac{3}{16 n_0}\left[3/20\left\{S_1 \cdot \eta_{11} + S_2 \cdot \eta_{12}\right\} - \left\{\frac{S_{10}}{K_2} - \frac{S_1}{K_2}\right\}\right]} \quad \ldots\ldots(II)$$

$$8/3 \cdot \frac{\Delta f^2}{\ell} = 1/2\left[S_2 \cdot \eta_{22} + S_1 \cdot \eta_{21}\right] - \left[\frac{S_{20}}{K_2} - \frac{S_2}{K_2}\right]$$

$$\boxed{\Delta f_2 = \sqrt{3/8\,\ell\left[1/2\left\{S_2 \cdot \eta_{22} + S_1 \cdot \eta_{21}\right\} - \left\{\frac{S_{20}}{K_2} - \frac{S_2}{K_2}\right\}\right]}} \quad ..(III)$$

4.2 Geval 1: (S_2=0)

In dit geval wordt verondersteld dat de spankabel t.g.v. de vervormingen spanningsloos is geworden.

$$S_2 = 0 \longrightarrow S_1 \cdot \left(f_0 + \Delta f_1\right) = 1/8\, Q\,\ell$$

$$\Delta f_1 = \frac{3 \cdot \ell}{16 \cdot f_0}\left[3/20\left(S_1 \cdot \eta_{11}\right) - \left(\frac{S_{10} - S_1}{K_2}\right)\right]$$

$$S_1 \cdot f_0 + \frac{3\ell}{16 f_0}\left[3/20 \cdot \eta_{11} \cdot S_1^2 - \frac{S_1 \cdot S_{10}}{K_2} + \frac{S_1^2}{K_2}\right] = 1/8\, Q\,\ell$$

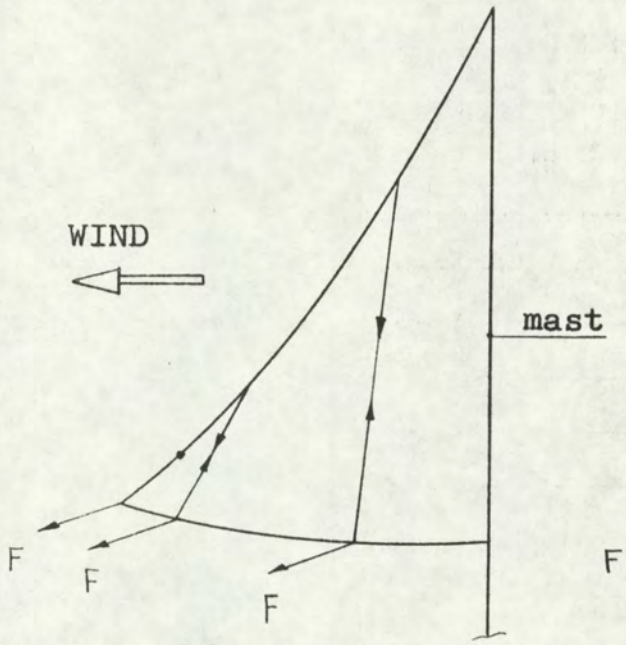
$$\downarrow$$

Herleiding levert:

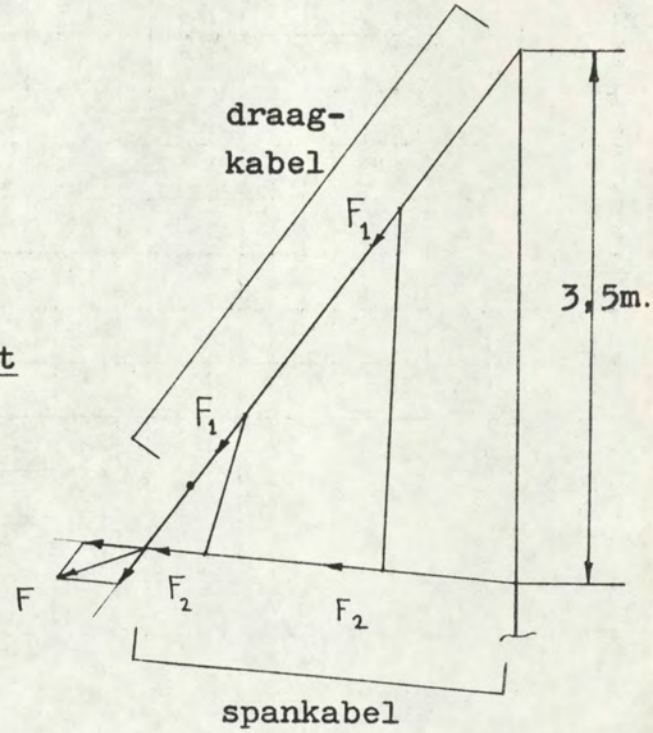
$$\boxed{S_1^2 \cdot \left(3/20 \cdot \eta_{11} \cdot K_2 + 1\right) - S_1\left(S_{10} - \frac{f_0^2 \cdot K_2 \cdot 16}{3\ell}\right) - 2/3\, Q \cdot f_0 \cdot K_2 = 0}$$

4.3 Geval 2:

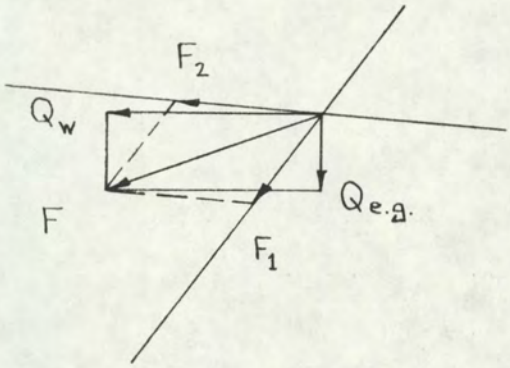
Windbelasting en eigen-gewicht:



"Werkelijke situatie"



"Rekenmodel"



"Krachtensom"

Bovenstaande figuren geven de uitwijking van de kabels weer voor de situatie gezien in de richting van de "lijn".

Oplossing geval 2 door middel van de evenwichts-voorwaarden en de formules II en III via de "trial and error"-methode.

4.4 Geval 3:

IJzelbelasting en eigen-gewicht:

Voor de situatie waarbij alleen de draagkabel in het naastliggende vak gebroken is.
De masten worden hier oneindig stijf beschouwd.
Oplossing d.m.v. de evenwichtsvoorwaarden:

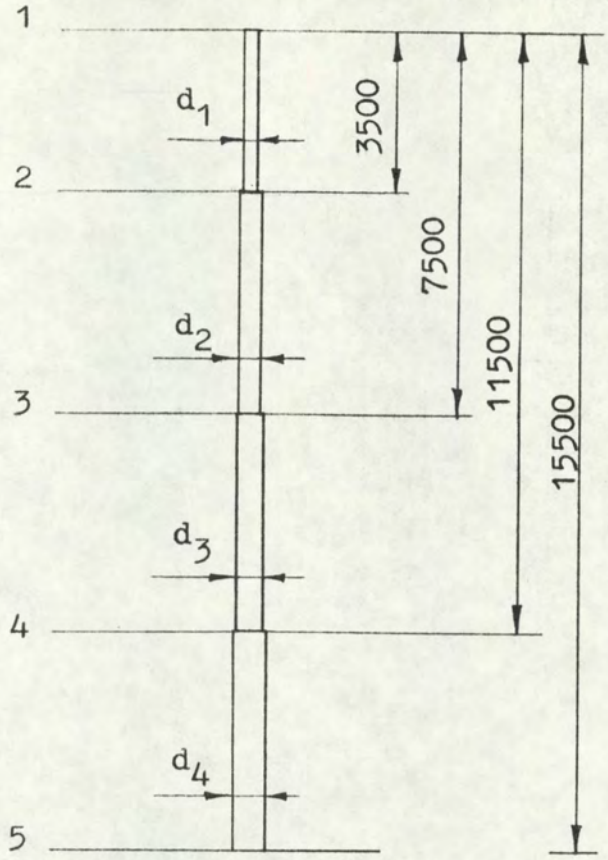
$$S_1(f_0+\Delta f)+S_2.\Delta f=1/8.Q.l$$

en de formules II en III waarbij $\eta_{11}=\eta_{22}=\eta_{12}=\eta_{21}=0$ via de "trial and error"-methode.

Toelichting: De masten worden hier oneindig stijf beschouwd omdat ten gevolge van de krachten in de spankabels de vervorming van de masten in hoge mate wordt tegengegaan.

4.5 Vervorming van de mast:

AFMETINGEN TUSSENAFSPANMASTEN L_{ph}=12m:

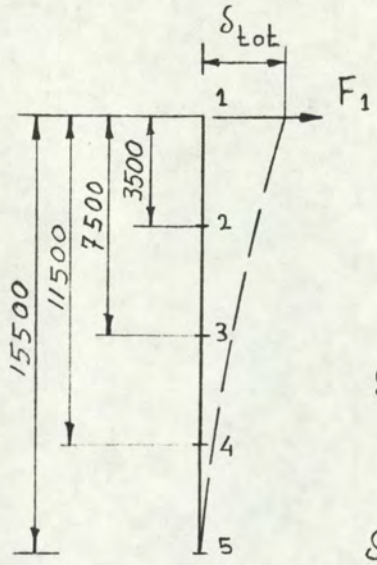


d_1:	Buis Ø139,7x4,5	I= 437 cm^4	W= 62,6cm^3
d_2:	Buis Ø219,1x5,9	I= 2247 cm^4	W= 205 cm^3
d_3:	Buis Ø267,0x6,3	I= 4386 cm^4	W= 329 cm^3
d_4:	Buis Ø368,0x8,0	I=14665 cm^4	W= 797 cm^3

↓

In deze berekening aangenomen afmetingen.

Bepaling van de invloedsgrootheden t.p.v. de bevestigingspunten van de kabels:



F=1000N ; E=2,1x10^5 N/mm^2.

$$\delta_{tot} = \frac{\sum \frac{1}{3} F_o \left(x_j^3 - x_i^3 \right)}{E\, I_{i-j}}$$

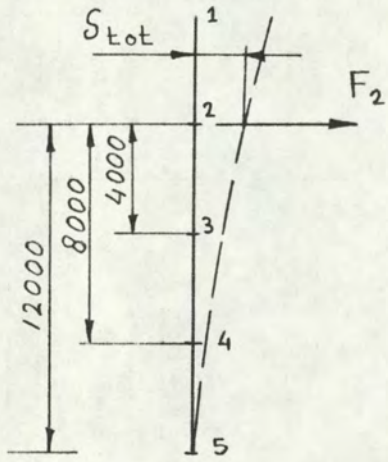
$$\delta_{1-2} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(3500^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 437 \times 10^4} = 15{,}57 \text{ mm.}$$

$$\delta_{2-3} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(7500^3 - 3500^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 2247 \times 10^4} = 26{,}77 \text{ mm}$$

$$\delta_{3-4} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(11500^3 - 7500^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 4386 \times 10^4} = 39.77 \text{ mm}$$

$$\delta_{4-5} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(15500^3 - 11500^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 14665 \times 10^4} = 23{,}84 \text{ mm}$$

$$\boxed{\eta_{11} = 106 \text{ mm/kN}} \longleftarrow \delta_{tot} \approx 106 \text{ mm}$$

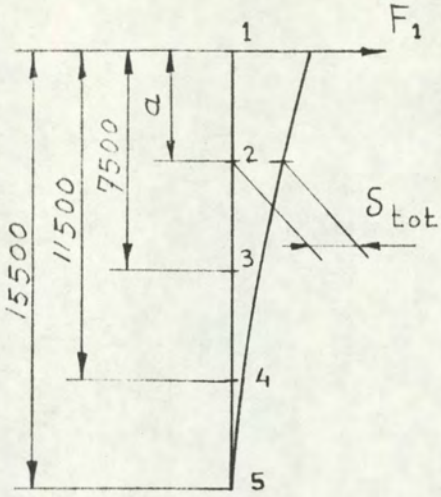


$$\delta_{2-3} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(4000^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 2247 \times 10^4} = 4{,}52 \text{ mm}$$

$$\delta_{3-4} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(8000^3 - 4000^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 4386 \times 10^4} = 16{,}21 \text{ mm}$$

$$\delta_{4-5} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left(12000^3 - 8000^3 \right)}{2{,}1 \times 10^5 \times 14665 \times 10^4} = 13{,}16 \text{ mm}$$

$$\boxed{\eta_{22} = 34 \text{ mm/kN}} \longleftarrow \delta_{tot} \approx 34 \text{ mm}$$



$$\delta_{tot} = \frac{\sum \frac{1}{3} F}{E I_{i-j}} \left[\left(x_j^3 - x_i^3 \right) - \frac{3}{2} a \left(x_j^2 - x_i^2 \right) \right]$$

$x > a$

$a = 3500$ mm.

$$\delta_{2-3} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000}{2{,}1 \times 10^5 \times 2247 \times 10^4} \left[\left(7500^3 - 3500^3 \right) - \frac{3}{2} \times 3500 \left(7500^2 - 3500^2 \right) \right]$$

$$\longrightarrow \delta_{2-3} = 10{,}45 \text{ mm}$$

$$\delta_{3-4} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left[\left(11500^3 - 7500^3 \right) - \frac{3}{2} \times 3500 \left(11500^2 - 7500^2 \right) \right]}{2{,}1 \times 10^5 \times 4386 \times 10^4}$$

$$\longrightarrow \delta_{3-4} = 25{,}33 \text{ mm}$$

$$\delta_{4-5} = \frac{\frac{1}{3} \times 1000 \left[\left(15500^3 - 11500^3 \right) - \frac{3}{2} \times 3500 \left(15500^2 - 11500^2 \right) \right]}{2{,}1 \times 10^5 \times 14665 \times 10^4}$$

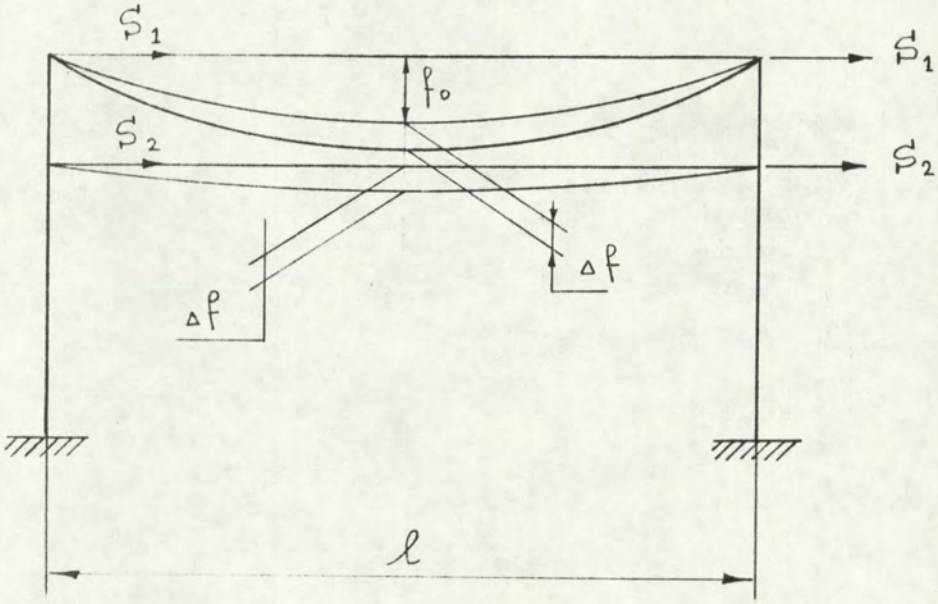
$$\longrightarrow \delta_{4-5} = 17{,}71 \text{ mm}$$

$$\delta_{tot} = 10{,}45 + 25{,}33 + 17{,}71 = 53{,}49 \text{ mm}.$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{\eta_{12} = \eta_{21} \approx 53{,}5 \text{ mm/kN}}$$

4.6 Uitwerking van de belastingsgevallen:



Uitwerking geval 1:

$$S_1^2\left(\tfrac{3}{20}\cdot\eta_{11}\cdot K_2+1\right)-S_1\left(S_{10}-\frac{f_0^2\cdot K_2\cdot 16}{3l}\right)-\tfrac{2}{3}\,Q\cdot f_0\cdot K_2=0$$

$$S_1=\frac{\tfrac{1}{8}\,Q\,l}{f_0+\Delta f}\qquad (S_2=0)$$

Gegevens:

$\eta_{22} = 34$ mm/kN.

$\eta_{11} = 106$ mm/kN.

$\eta_{21} = \eta_{12} = 53{,}5$ mm/kN.

$K_2 = 39 \times 10^{-3}$ kN/mm. **(zie: blz.45)**

$Q = 1$ kN **(Eigen-gewicht)**

$$S_{10} = \frac{\tfrac{1}{8}\times 1\times 90}{3} = 3{,}75 \text{ kN.}$$

$S_{20} = 5$ kN.

Alleen eigen-gewicht:

$$S_1^2\left(\tfrac{3}{20}\cdot 106\cdot 0{,}039+1\right)-S_1\left(3{,}75-\frac{3000^2\cdot 0{,}039\cdot 16}{3\times 90000}\right)$$
$$-\tfrac{2}{3}\cdot 1\cdot 3000\cdot 0{,}039 = 0$$

$$1{,}62\,S_1^2 + 17{,}05\,S_1 - 78 = 0 \longrightarrow S_1 = 3{,}45\ \text{kN}.$$

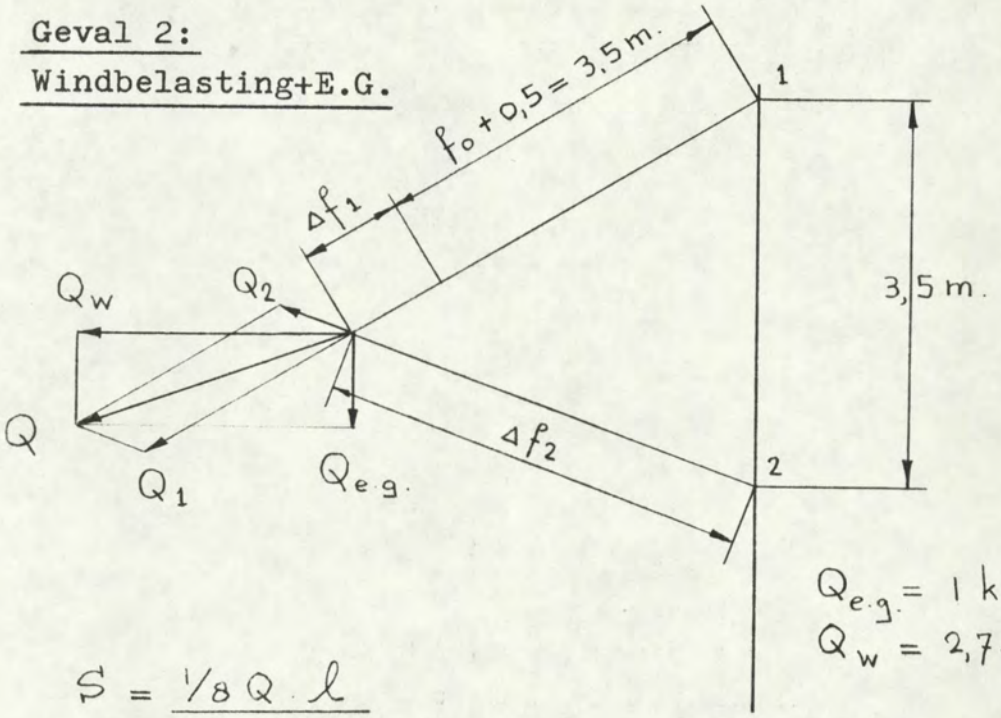
Voor een oneindig stijve kabel geldt:

$$K_2 \rightarrow \infty$$

$$S_1^2\left(\tfrac{3}{20}\cdot\eta_{11}\right)+S_1\left(\frac{f_0^2\cdot 16}{3\ell}\right)-\tfrac{2}{3}\cdot Q\cdot f_0 = 0$$

$$15{,}90\,S_1^2 + 533{,}3\,S_1 - 2000 = 0 \longrightarrow S_1 = 3{,}40\ \text{kN}$$

Geval 2:
Windbelasting+E.G.



$Q_{e.g.} = 1$ kN.
$Q_w = 2{,}748$ kN.

$$S = \frac{\tfrac{1}{8}Q\cdot\ell}{f}$$

$$\Delta f_2 = \left[\tfrac{3}{8}\,\ell\left\{\tfrac{1}{2}\left(S_2\cdot\eta_{22}+S_1\cdot\eta_{12}\right)-\frac{(S_{20}-S_2)}{K_2}\right\}\right]^{1/2}$$

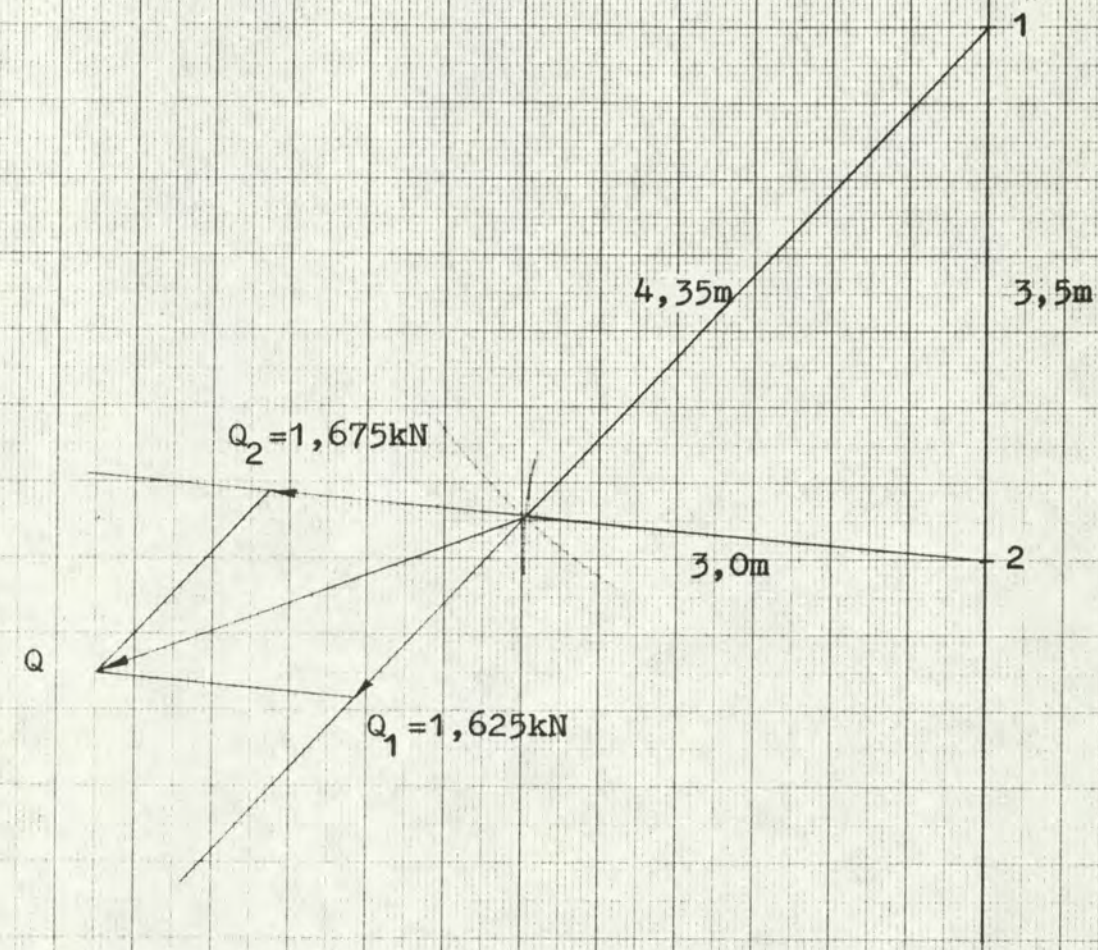
$$\Delta f_1 = \frac{3\,\ell}{16\,f_0}\left\{\tfrac{3}{20}\left(S_1\cdot\eta_{11}+S_2\cdot\eta_{21}\right)-\frac{(S_{10}-S_1)}{K_1}\right\}$$

$$Q = \sqrt{2{,}748^2+1^2} \approx 2{,}924\ \text{kN}.$$

Met windbelasting:

$f_0 = 3m$ Aanname: $\Delta f_2 = 3m$

$\Delta f_1 = 0,85m$



Krachtenschaal: 1cm ≙ 0,5kN

Lengteschaal: 1cm ≙ 0,5m

$Q_2 = 1,675\ kN$
$Q_1 = 1,625\ kN$
$\eta_{22} = 34\ mm/kN.$
$\eta_{11} = 106\ mm/kN.$
$\eta_{12} = \eta_{21} = 53,5\ mm/kN.$

$$S_2 = \frac{1/8 \times 1,675 \times 90}{3,0} = 6,28\ kN.$$

$$S_1 = \frac{1/8 \times 1,625 \times 90}{3,85} = 4,75\ kN.$$

$$\Delta f_2 = \left[3/8 . 90000 \left\{ 1/2 (6,28 \times 34 + 4,75 \times 53,5) - \frac{(5 - 6,28)}{0,039} \right\} \right]^{1/2}$$

$\Delta f_2 \approx 3000\ mm.$

$$\Delta f_1 = \frac{3 \times 90}{16 \times 3} \left\{ 0,15 (4,75 \cdot 106 + 6,28 \times 53,5) - \frac{(3,75 - 4,69)}{0,039} \right\}$$

$\Delta f_1 \approx 847\ mm.$

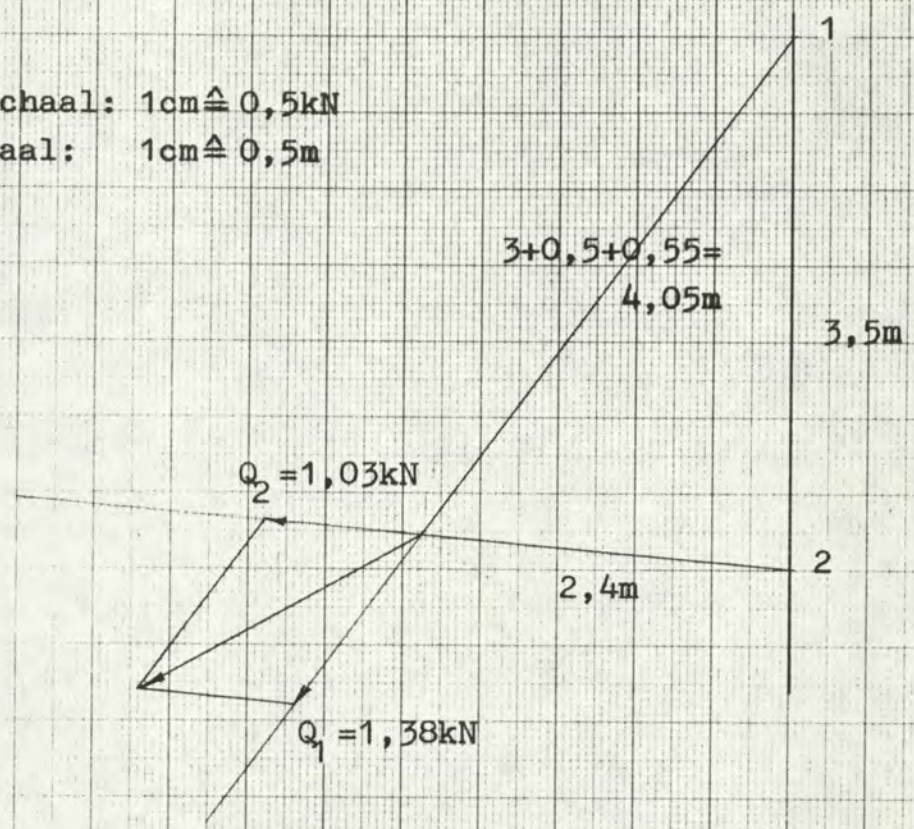
Met 2/3 x de windbelasting:

Aanname: $\Delta f_2 = 2,4m$

$\Delta f_1 = 0,55m \ldots (f_0 = 3m)$

Krachtenschaal: 1cm ≙ 0,5kN

Lengteschaal: 1cm ≙ 0,5m



$$S_2 = \frac{1/8 . 1,03 . 90}{2,4} = 4,83kN \qquad S_1 = \frac{1/8 . 1,38 . 90}{4,05} = 3,83kN$$

$$\Delta f_2 = \left[3/8 \times 90\,000 \left\{ 1/2 \left(4,83 \times 34 + 3,83 \times 53,5 \right) - \frac{(5 - 4,83)}{0,039} \right\} \right]^{1/2}$$

$\Delta f_2 \approx 2466$ mm

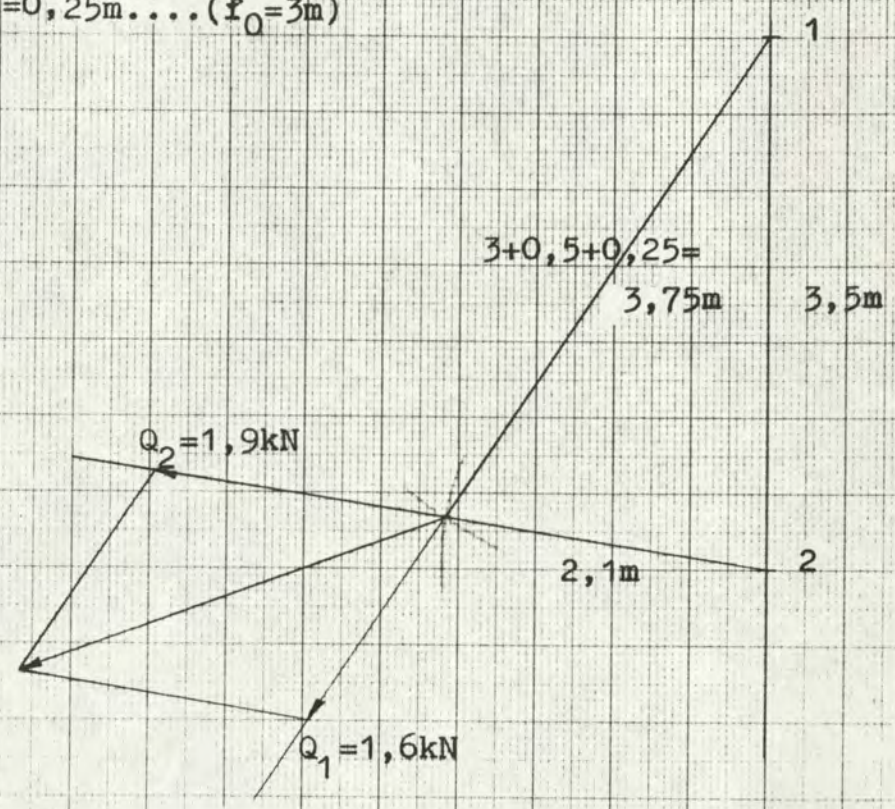
$$\Delta f_1 = \frac{90}{16} \left\{ 0,15 \left(3,83 \times 106 + 4,83 \times 53,5 \right) - \frac{(3,75 - 3,83)}{0,039} \right\}$$

$\Delta f_1 \approx 572$ mm

Met windbelasting en oneindig stijve masten:

Aanname: $\Delta f_2 = 2,1m$

$\Delta f_1 = 0,25m \ldots (f_0 = 3m)$



Krachtenschaal: 1cm ≙ 0,5kN

Lengteschaal: 1cm ≙ 0,5m

$$S_2 = \frac{1/8 . 1,9 . 90}{2,1} = 10,18kN$$

$$S_1 = \frac{1/8 . 1,6 . 90}{(3+0,25)} = 5,54kN$$

$$\frac{Q_2}{Q_w} = \frac{1,90}{2,748} = 0,691$$

In de berekening is uitgegaan van $Q_2/Q_w = 0,75$

(Zie: punt 1.3.1 en punt 1.5.1)

Oneindig stijve masten: $\longrightarrow \begin{cases} \eta_{11} = 0 \\ \eta_{22} = 0 \\ \eta_{21} = \eta_{12} = 0 \end{cases}$

$$\Delta f_2 = \left[{}^3/8\, l \left\{ \frac{-(S_{20} - S_2)}{K_2} \right\} \right]^{1/2}$$

$$\Delta f_1 = \frac{3\, l}{16\, f_0} \left\{ \frac{-(S_{10} - S_1)}{K_2} \right\}$$

$$\Delta f_2 = \left[{}^3/8 \times 90000 \left\{ \frac{-(5 - 10{,}18)}{0{,}039} \right\} \right] \approx 2117 \text{ mm.}$$

$$\Delta f_1 = \frac{3 \times 90}{16 \times 3} \left\{ \frac{-(3{,}75 - 5{,}54)}{0{,}039} \right\} \approx 258 \text{ mm.}$$

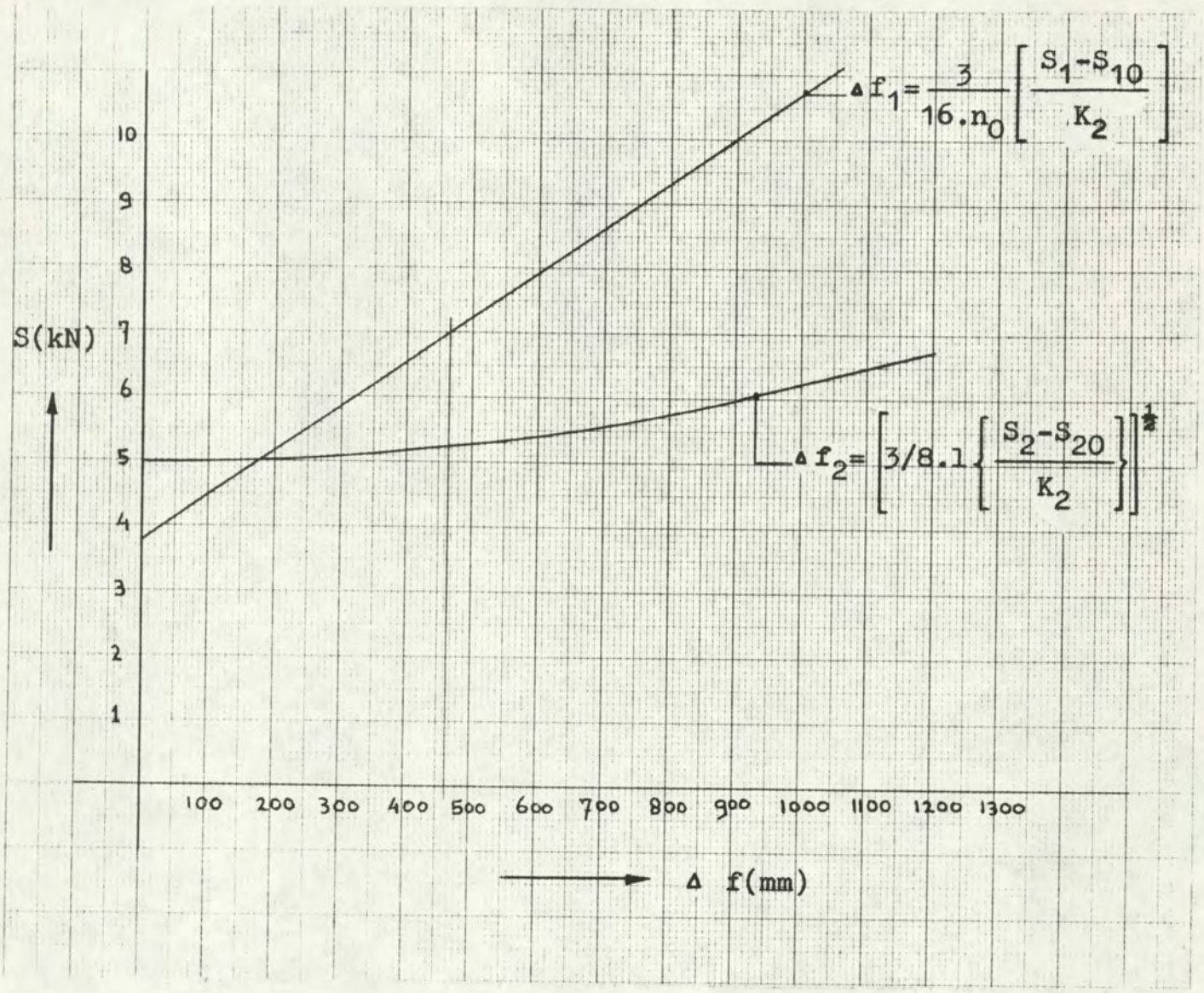
<u>Geval 3:</u> Oneindig stijve masten.
Belasting: Eigen-gewicht+IJzel.

$\Delta f_1 = \Delta f_2$

$Q_{e.g} = 1{,}00$kN.
$Q_{ij} = 1{,}36$kN.

$Q = 2{,}36$kN.

Evenwicht: $S_1(f_0 + \Delta f) + S_2 . \Delta f = 1/8 . Q . l$



Uit de evenwichtsvoorwaarden en bovenstaande figuur volgt:

$$\begin{cases} S_1 \approx 7{,}0\text{kN.} \\ S_2 \approx 5{,}25\text{kN.} \\ \Delta f \approx 0{,}4635\text{m.} \end{cases}$$

4.7 Conclusies:

Uit de voorgaande beschouwingen zijn met betrekking tot de belasting op tussenafspanmasten,twee maatgevende situaties te onderscheiden,namelijk:
-breuk van de draagkabel
-breuk van draagkabel en spankabel.
Bij breuk van de draagkabel zal de belasting aan de top van de mast,door het toch wel enigszins meegeven van de mast,iets lager zijn dan de waarde die volgt uit de situatie: wind bij oneindig stijve masten.
Stel dat de invloed daarvan de belasting reduceert tot 90% van de berekende waarde.(5,54kN)
Volgen we ook hier de procedure die bij de tussenmasten is toegepast dan wordt de rekenwaarde van de belasting aan de top van de mast:
$F_1=5,54.0,90/1,27 \approx 4kN$.
Voor het geval waarbij beide kabels gebroken zijn wordt voor de belasting aan de top van de mast een waarde berekend ter grootte van 4,75kN.
De daarbij behorende belasting in de spankabel bedraagt 6,28kN.
Omgewerkt naar rekenbelastingen:
4,75/1,27=3,7 kN resp. 6,28/1,27=4,9 kN.
De belasting aan de top van de mast is hier kleiner dan in het voorgaande geval.
Teneinde het aantal belastingsgevallen te beperken is het aan te bevelen beide situaties te combineren tot één belastingsgeval.
Voorwaarde is dat de belastingen zodanig worden gekozen dat de momenten in de mast ongeveer gelijk zijn aan de maatgevende momenten uit beide belastingsgevallen.
Gekozen wordt hier voor twee even grote krachten op de mast ter grootte van 4kN. Totaal dus 8kN.

Ook hier wordt ter bepaling van de krachten op masten met een lichtpunthoogte van 10m en 15m, gestreefd naar het vastleggen van een eenvoudige rekenregel.
Bij de tussenmasten was de belasting die op zal treden bij breuk van draag-en spankabel en oneindig stijve masten,op eenvoudige wijze te bepalen. Derhalve wordt de daar berekende belasting (12,7kN) ook hier als referentiekracht gekozen.
De verhouding van de som van de krachten op de mast en bovenstaande belasting wordt hier:
8/12,7=0,63.
Met betrekking tot het dynamisch gedrag direct na kabelbreuk is aangenomen dat de verhouding van de krachten die in deze situatie optreden en de krachten t.g.v. de "statische" windbelasting,waarvan in de berekening is uitgegaan,hier dezelfde orde van grootte hebben als bij de tussenmasten. D.w.z. dat in beide gevallen ongeveer dezelfde gereduceerde belastingen optreden.
De kracht aan de masttop door ijzelbelasting bij breuk van de draagkabel,welke groter is dan bij windbelasting,is uit economische overwegingen niet in "Eisen lichtmasten" opgenomen.
Mocht draadbreuk tijdens ijzelbelasting optreden dan betekent dit dat mogelijkerwijs breuk van de masttop optreedt.
Dit beperkt zich dan echter tot één mast.

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

5. BEPALING VAN DE AFMETINGEN VAN DE VOETPLATEN EN ANKERS.

5.1 Voetplaten,ankers en kabels:

- Vormgeving.
  Bij het vormgeven van de voetplaten is,zowel met betrekking tot de sterkte en de stijfheid van de voetplaten als de grootte van de ankers,gestreefd naar optimale afmetingen.
  Voor de afspanmasten en tussenafspanmasten resulteerde dit in voetplaten met zes ankers en een vormgeving zoals is aangegeven op blz.115.
  Dit geldt tevens voor de tussenmasten van dubbellampslijnverlichting.(L_{ph}=15m)
  Bij de tussenmasten voor enkellampslijnverlichting(L_{ph}=10 en 12m) kan worden volstaan met vierkante voetplaten volgens blz.117.
  In verband met de grote afmetingen van de achthoekige voetplaten zijn,ter verkrijging van een grotere stijfheid,verstijvingsruggen aangebracht.
  Dit heeft tevens het voordeel dat de spanningen in de rondgaande lasnaad worden verminderd hetgeen het risico voor "lamellar tearing" verkleind.
  Bij het bepalen van de benodigde voetplaatdikte is de invloed van deze ruggen op het krachtenspel in de voetplaat evenwel verwaarloosd.

- De momenten in de kritieke doorsneden van de voetplaten zijn bepaald met behulp van de plasticiteitstheorie.
  Voor de daarbij gevolgde werkwijze en gehanteerde uitgangspunten wordt verwezen naar de handleiding "Lichtmasten".

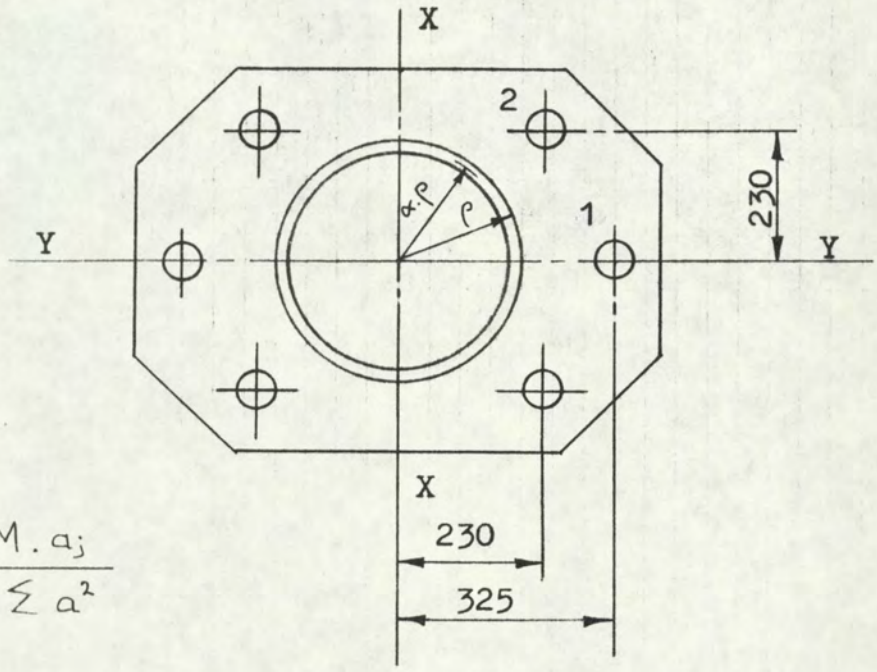
- Toe te laten spanningen.
  De toelaatbare spanning voor masten,voetplaten en ankers(materiaal Fe360) is voor de gebruikstoestand vastgelegd op 160 N/mm^2.
  In het geval waarbij kabelbreuk optreedt gecombineerd met hoge windbelasting of ijzelbelasting is voor de toelaatbare spanning de vloeispanning genomen: 240 N/mm^2.

Voor de voetplaten is,in verband met de grote dikte,de toelaatbare spanning 10% lager genomen (NEN3851);terwijl voor de ankers 20% in mindering is gebracht.
Bij het bepalen van de benodigde ankerlengte is uitgegaan van een hechtspanning van 0,6 N/mm^2 in de gebruikstoestand en 1,5.0,6=0,9 N/mm^2 bij gebroken kabels.

- Kabels.
  De grootste optredende belasting bedraagt voor
  de draagkabel: 11,25 kN
  de spankabel : 12,0 kN.
  De breukbelasting van de kabels(7×7Ø8 NOM.-RVS) bedraagt minimaal: 40,2 kN.
  Veiligheid= 40,2/12,0 ≈ 3,4.

5.2 **Berekening van de voetplaten voor afspanmasten:**

5.2.1 **Afspanmast L_{ph}=15m:**



$$F_j = \frac{M \cdot a_j}{\Sigma a^2}$$

$$\Sigma a^2_{x-x} = 2\left(2 \times 230^2 + 325^2\right) = 422.850 \text{ mm}^2.$$

$$\frac{\Sigma a^2_{x-x}}{325} = 1301 \text{ mm} = 1,301 \text{ m}.$$

$$\frac{\Sigma a^2_{x-x}}{230} = 1838 \text{ mm} = 1,838 \text{ m}.$$

$$\frac{\Sigma a^2_{y-y}}{230} = \frac{4 \times 230^2}{230} = 920 \text{ mm} = 0,92 \text{ m}.$$

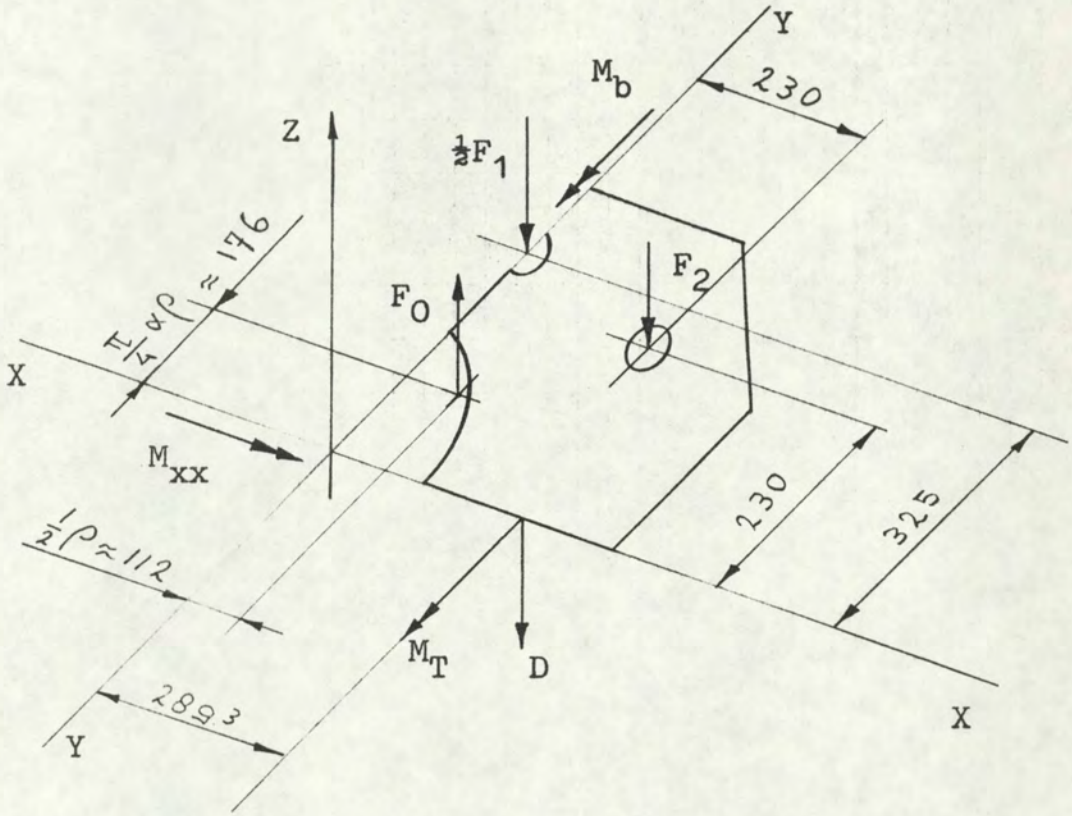
$M_{xx} = 295,5$ kNm. $M_{yy} = 59,3$ kNm.

Ankerkrachten: $F_{1\,M_{xx}} = \frac{295,5}{1,301} = 227,1$ kN

$$F_{2\,M_{xx}} = \frac{295,5}{1,838} = 160,8 \text{ kN}$$

$$F_{2\,M_{YY}} = \frac{59,3}{0,92} = 64,5 \text{ kN.}$$

$$F_2 = 160,8 + 64,5 = 225,3 \text{ kN}$$



Pijp: Ø457,2 x 10 $\alpha\rho$ =223,6 mm.

$$F_0 = \frac{\frac{1}{4} M_{xx}}{0,176} = \frac{\frac{1}{4} \times 295,5}{0,176} \approx 420 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} F_1 = \frac{1}{2} \times 227,1 = 113,6 \text{ kN}$$

$$F_2 = 160,8 \text{ kN.}$$

Contrôle evenwicht om X-X as:

$$F_0 \times 176 - \frac{1}{2} F_1 \times 325 - F_2 \times 230 = 420 \times 176 - 113,6 \times 325 - 160,8 \times 230$$
$$\approx 0$$

Krachtenevenwicht (Z-richting):

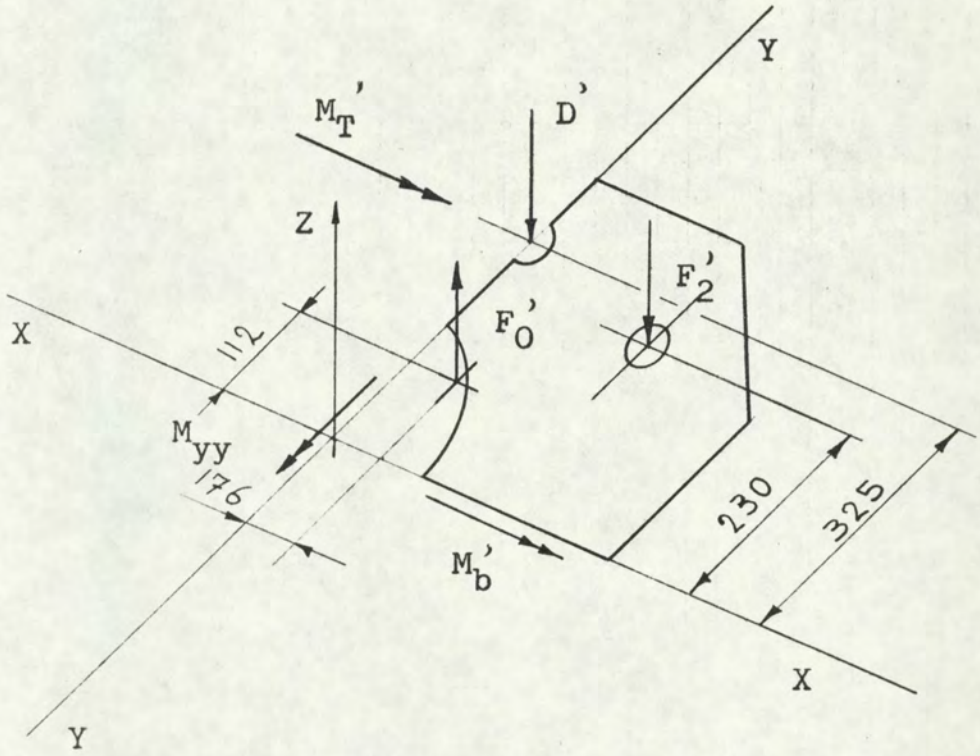
$$F_0 - \frac{1}{2} F_1 - F_2 - D = 0$$

$$D = 420 - 113,6 - 160,8 \approx 145,6 \text{ kN}$$

Evenwicht om Y-Y as:

$$\Sigma M = M_T + M_B = D \times 289{,}3 + F_2 \times 230 - F_0 \times 112$$
$$= 145{,}6 \times 289{,}3 + 160{,}8 \times 230 - 420 \times 112$$

$$M_T + M_B = 32067 \text{ Nm } (\text{kNmm})$$



$$F_0' = \frac{\frac{1}{4} M_{yy}}{0{,}176} = \frac{\frac{1}{4} \times 59{,}3}{0{,}176} = 84{,}23 \text{ kN}$$

$$F_2' = 64{,}5 \text{ kN}$$

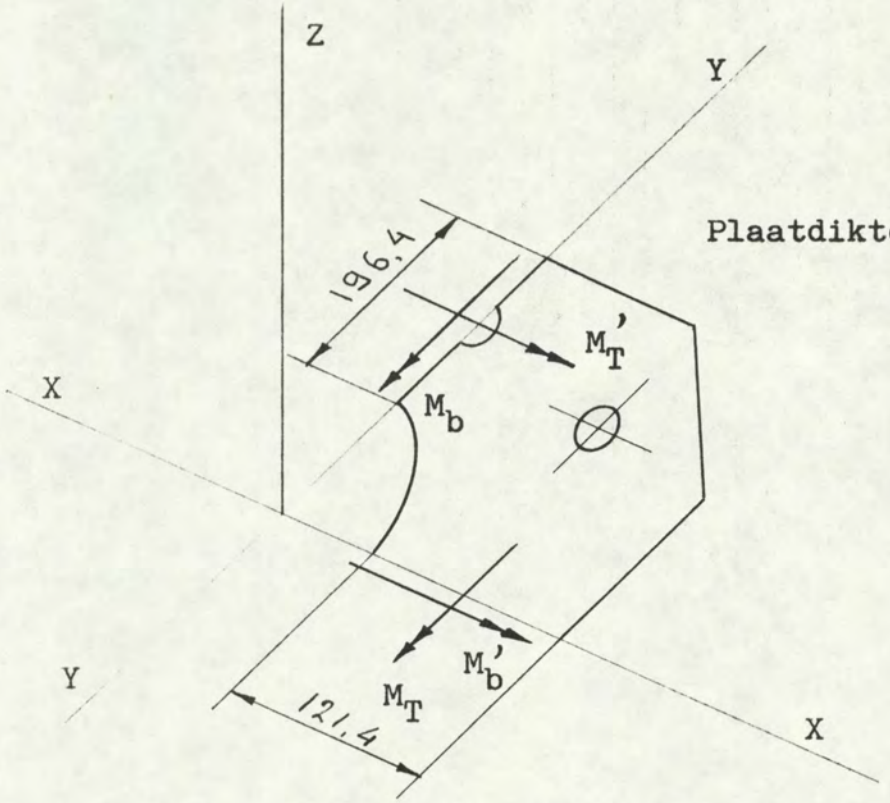
Krachtenevenwicht in Z-richting:

$$F_0' - D' - F_2' = 0$$
$$D' = F_0' - F_2' = 84{,}23 - 64{,}5 = 19{,}73 \text{ kN}$$

Evenwicht om de X-X as:

$$M_b' + M_T' = - F_0' \times 112 + F_2' \times 230 + D' \times 325$$

$$M_b' + M_T' = -84{,}23 \times 112 + 64{,}5 \times 230 + 19{,}73 \times 325$$
$$= 11.814 \text{ kNmm} = 11{,}814 \text{ kNm}$$



$$b_{YY} = (850 - 457{,}2)\tfrac{1}{2} - 48 = 148{,}4 \text{ mm}$$
$$b_{XX} = (700 - 457{,}2)\tfrac{1}{2} = 121{,}4 \text{ mm}$$

Doorsnede YY: $W_\sigma = 1/6\, t^2 \times 148{,}4 \text{ mm}^3$; $W_\tau = 1/4\, t^2 \times 148{,}4 \text{ mm}^3$

Doorsnede XX: $W_\sigma = 1/6\, t^2 \times 121{,}4 \text{ mm}^3$;

We bepalen de spanningen met het principe van de uiterste draagkracht.(spanningen in beide doorsneden gelijk)

$$\tau_{xx} = M_T / 1/4\, t^2 \times 121{,}4$$

$$\sigma_{b_{YY}} = M_b / 1/6\, t^2 \times 148{,}4$$

$$\sigma_{v_{xx}} = \sqrt{3} \cdot M_T / 1/4\, t^2 \times 121{,}4$$

$$\sigma_{v_{xx}} = \left\{ M_T / 1/6\, t^2 \times 148{,}4 \right\} \left\{ \frac{148{,}4}{121{,}4} \times \frac{1/6}{1/4} \times \sqrt{3} \right\}$$

$$\sigma_{v_{xx}} = 1{,}4115\, M_T / 1/6\, t^2 \times 148{,}4$$

$$\sigma_{b_{yy}} = \sigma_{v_{xx}} \qquad M_b = M_T \times 1{,}4115$$
$$M_T = \frac{M_b}{1{,}4115}$$

$$M_b + M_T = \left[1 + \frac{1}{1{,}4115}\right] M_b = 1{,}7085\, M_b$$

$$M_b = \frac{M_b + M_T}{1{,}7085} = \frac{32067}{1{,}7085} = 18.769 \text{ Nm.}$$

$$M_T = 32067 - 18769 = 13.298 \text{ Nm.}$$

$$\sigma = M_b / 1/6\, t^2 \times 148{,}4 = 18.769 \times 10^3 / 1/6\, t^2 \times 148{,}4$$
$$\sigma \approx 7{,}6 \times 10^5 \times t^{-2} \text{ N/mm}^2.$$

$$\sigma_{b_{xx}} = M_b' / 1/6\, t^2 \times 121{,}4 \qquad \tau_{yy} = M_T' / 1/4\, t^2 \times 148{,}4$$

$$\sigma_{v_{yy}} = \sqrt{3} \cdot M_T' / 1/4\, t^2 \times 148{,}4$$

$$\sigma_{v_{yy}} = \left\{ M_T' / 1/6\, t^2 \times 121{,}4 \right\} \left\{ \frac{121{,}4}{148{,}4} \times \frac{1/6}{1/4} \times \sqrt{3} \right\}$$
$$\sigma_{v_{yy}} = 0{,}9446\; M_T' / 1/6\, t^2 \times 121{,}4$$

$$\sigma_{b_{xx}} = \sigma_{v_{yy}} \qquad M_b' = 0{,}9446\, M_T'$$
$$M_T' = \frac{M_b'}{0{,}9446}$$

$$M_T' + M_b' = \left[1 + \frac{1}{0{,}9446}\right] \cdot M_b' = 2{,}0586\, M_b'$$

$$M_b' = \frac{M_T' + M_b'}{2{,}0586} = \frac{11.814}{2{,}0586} = 5739 \text{ Nm.}$$

$$M_T' = 11.814 - 5739 = 6075 \text{ Nm.}$$

$$\sigma' = M_b' / 1/6\, t^2 \times 121{,}4 = 6 \times 5739 / t^2 \times 121{,}4 \times 10^{-3}$$
$$\sigma' \approx 2{,}84 \times 10^5 \times t^{-2} \ N/mm^2$$

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma^2 + (\sigma')^2} = t^{-2} \times 10^5 \sqrt{7{,}6^2 + 2{,}84^2}$$
$$\sigma_{tot} = 8{,}11 \times t^{-2} \times 10^5 \ N/mm^2$$

Toelaatbare spanning σ =0,9.240=216 N/mm^2.

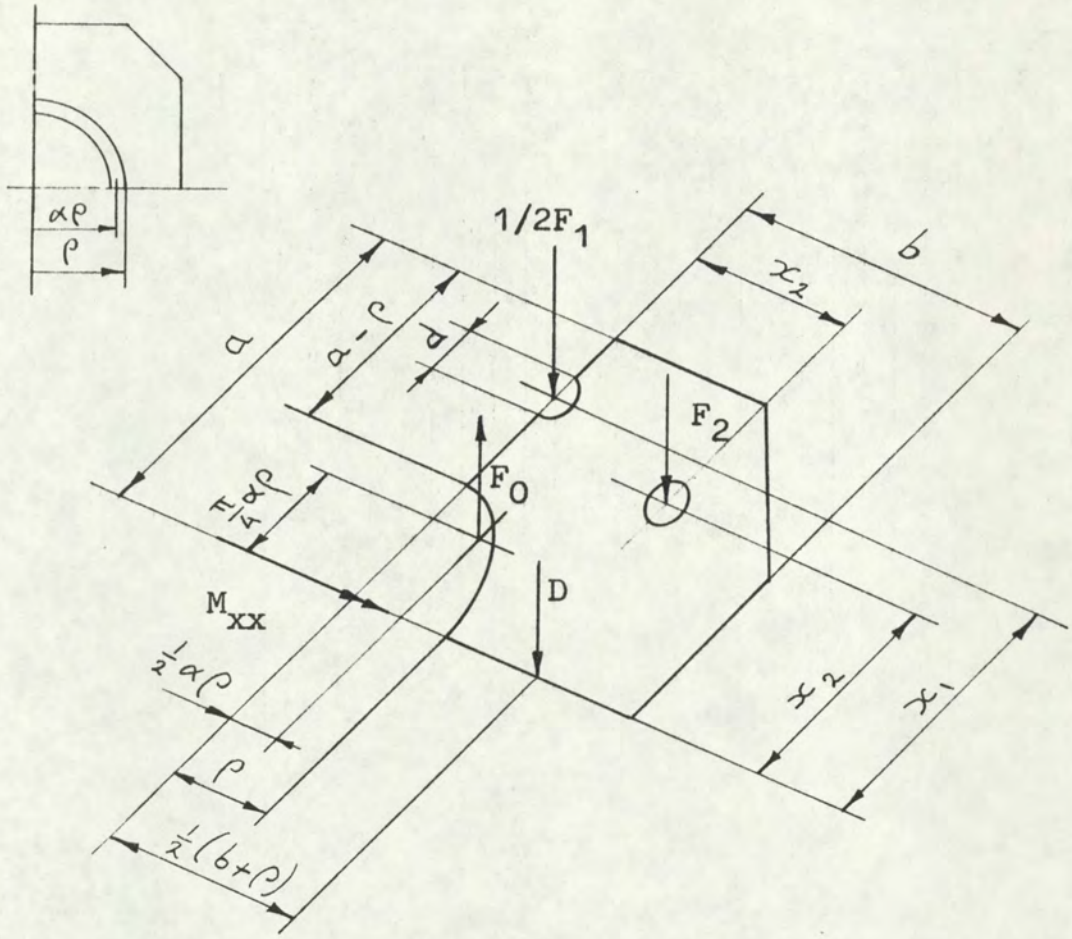
De optredende spanning bij t=55 mm :

$\sigma = 8{,}11.10^5.(55)^{-2} = 268$ N/mm^2.

De spanningsverdeling in de dikterichting van de plaat is elastisch aangenomen.
Er is dus voldoende reserve aanwezig:

$$v = \frac{216}{268} \times \frac{1/4}{1/6} \approx 1{,}21$$

5.2.1.1 **Bepaling van maximale spanningen bij andere pijpdiameters:**



$$\tfrac{1}{4}\, M_{xx} = \tfrac{1}{2} F_1 x_1 + F_1 \frac{x_2}{x_1} \cdot x_2 = F_1 \left[\frac{\tfrac{1}{2} x_1^2 + x_2}{x_1} \right]$$

$$\tfrac{1}{4}\, M_{xx} = \frac{\pi}{4} \cdot \alpha \cdot \rho \cdot F_0$$

$$F_0 = \frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho} \qquad F_1 = \frac{M_{xx} \cdot x_1}{2x_1^2 + 4x_2^2}$$

$$F_2 = \frac{x_2}{x_1} F_1 = \frac{M_{xx} \cdot x_2}{2x_1^2 + 4x_2^2}$$

$$\tfrac{1}{2} F_1 + F_2 = M_{xx} \frac{\left(\tfrac{1}{2} x_1 + x_2\right)}{2x_1^2 + 4x_2^2} = M_{xx} \frac{x_1 + 2x_2}{4\left(x_1^2 + 2x_2^2\right)}$$

$$D = F_0 - \left(\tfrac{1}{2} F_1 + F_2\right)$$

$$D = \frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho} - \frac{x_1 + 2x_2}{4(x_1^2 + 2x_2^2)} \cdot M_{xx}$$

$$D = \frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho}\left[1 - \frac{\pi \alpha \rho (x_1 + 2x_2)}{4(x_1^2 + 2x_2^2)}\right]$$

$$D = \frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho}\left[1 - \beta\right]$$

$$M_{yy} = D \cdot \tfrac{1}{2}(b+\rho) + F_2 \cdot x_2 - F_0 \cdot \tfrac{1}{2}\alpha\rho$$

$$M_{yy} = \left[\frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho} - M_{xx} \cdot \frac{x_1 + 2x_2}{4(x_1^2 + 2x_2^2)}\right] \cdot \tfrac{1}{2}(b+\rho)$$

$$+ M_{xx} \frac{x_2^2}{2x_1^2 + 4x_2^2} - \frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho} \cdot \tfrac{1}{2}\alpha\rho$$

$$M_{yy} = \frac{M_{xx}}{\pi \alpha \rho}\left[\tfrac{1}{2}(b+\rho) - \tfrac{1}{2}\alpha\rho\right] +$$

$$M_{xx}\left[\frac{2x_2^2 - \tfrac{1}{2}(b+\rho)(x_1 + 2x_2)}{4(x_1^2 + 2x_2^2)}\right]$$

$$M_{yy} = \frac{M_{xx}}{2\pi \alpha \rho}\left[(b+\rho) - \alpha\rho + \pi\alpha\rho\left\{\frac{4x_2^2 - (b+\rho)(x_1 + 2x_2)}{4(x_1^2 + 2x_2^2)}\right\}\right]$$

$$\boxed{M_{yy} = \frac{M_{xx}}{2\pi\alpha}\left[\frac{b}{\rho} + (1-\alpha) + \pi\alpha\left\{\frac{4x_2^2 - (b+\rho)(x_1 + 2x_2)}{4(x_1^2 + 2x_2^2)}\right\}\right]}$$

($\rho = \frac{1}{2}$.buitendiameter v.d. pijp)

Bepaling maximale spanningen bij andere pijpdiameters:

$$k = \frac{b}{\rho} + (1-\alpha) + \pi\alpha \left\{ \frac{4x_2^2 - (b+\rho)(x_1 + 2x_2)}{4(x_1^2 + 2x_2^2)} \right\}$$

Netto breedte : $b' = a - \rho - d + b - \rho$

$b' = a + b - 2\rho - d$

Er geldt nu: $\sigma = \frac{k}{k_0} \times \frac{b_0'}{b'} \times \sigma_0 = \frac{k}{b'} \left\{ \frac{b_0'}{k_0} \cdot \sigma_0 \right\}$

$a = 1/2 \cdot 850 = 425$ mm. $\rho = 1/2 \cdot 457{,}2 = 228{,}6$ mm

$b = 1/2 \cdot 700 = 350$ mm. $x_1 = 325$ mm.

$x_2 = 230$ mm.

$$b_0' = 0{,}425 + 0{,}350 - 2 \times \frac{0{,}4572}{2} - 0{,}048 = 0{,}2698 \text{ m.}$$

$\alpha\rho = \rho - 1/2 \cdot S$

$$\alpha = \frac{\rho - 1/2 \cdot S}{\rho} = \frac{228{,}6 - 1/2 \times 10}{228{,}6} = 0{,}97813$$

$1 - \alpha \approx 0{,}0219$

$$k_0 = \frac{0{,}350}{0{,}2286} + 0{,}0219 + \pi \cdot 0{,}97813 \left[\frac{4 \times 0{,}23^2 - (0{,}35 + 0{,}2286)(0{,}325 + 2 \times 0{,}23)}{4(0{,}325^2 + 2 \times 0{,}23^2)} \right]$$

$$\left.\begin{array}{l} k_0 = 0{,}67146 \\ \sigma_0 = 268 \text{ N/mm}^2 \\ b_0' = 0{,}2698 \end{array}\right\} \frac{b_0'}{k_0} \cdot \sigma_0 = 107{,}685$$

De spanning bij pijpdiameter Ø508 :

$$k = \frac{0{,}350}{0{,}254} + 0{,}0219 + \pi \cdot 0{,}97813 \left[\frac{4 \times 0{,}23^2 - (0{,}35 + 0{,}254)(0{,}325 + 2 \times 0{,}23)}{4(0{,}325^2 + 2 \times 0{,}23^2)} \right]$$

$k = 0{,}4459$

$b' = 0{,}425 + 0{,}350 - 2 \times 0{,}254 - 0{,}048 = 0{,}219$ m.

$\sigma \approx 219{,}3$ N/mm²

De spanning bij pijpdiameter Ø419 :

$$k = \frac{0,350}{0,2095} + 0,0219 + \pi \cdot 0,97813 \left[\frac{4 \cdot 0,23^2 - (0,35 + 0,2095)(0,325 + 2 \cdot 0,23)}{4(0,325^2 + 2 \cdot 0,23^2)} \right]$$

$$k = 0,8655$$

$$b' = 0,425 + 0,350 - 0,419 - 0,048 = 0,308 \text{ m.}$$

$$\sigma \approx \frac{0,8655}{0,3080} \times 107,685 \approx 303 \text{ N/mm}^2.$$

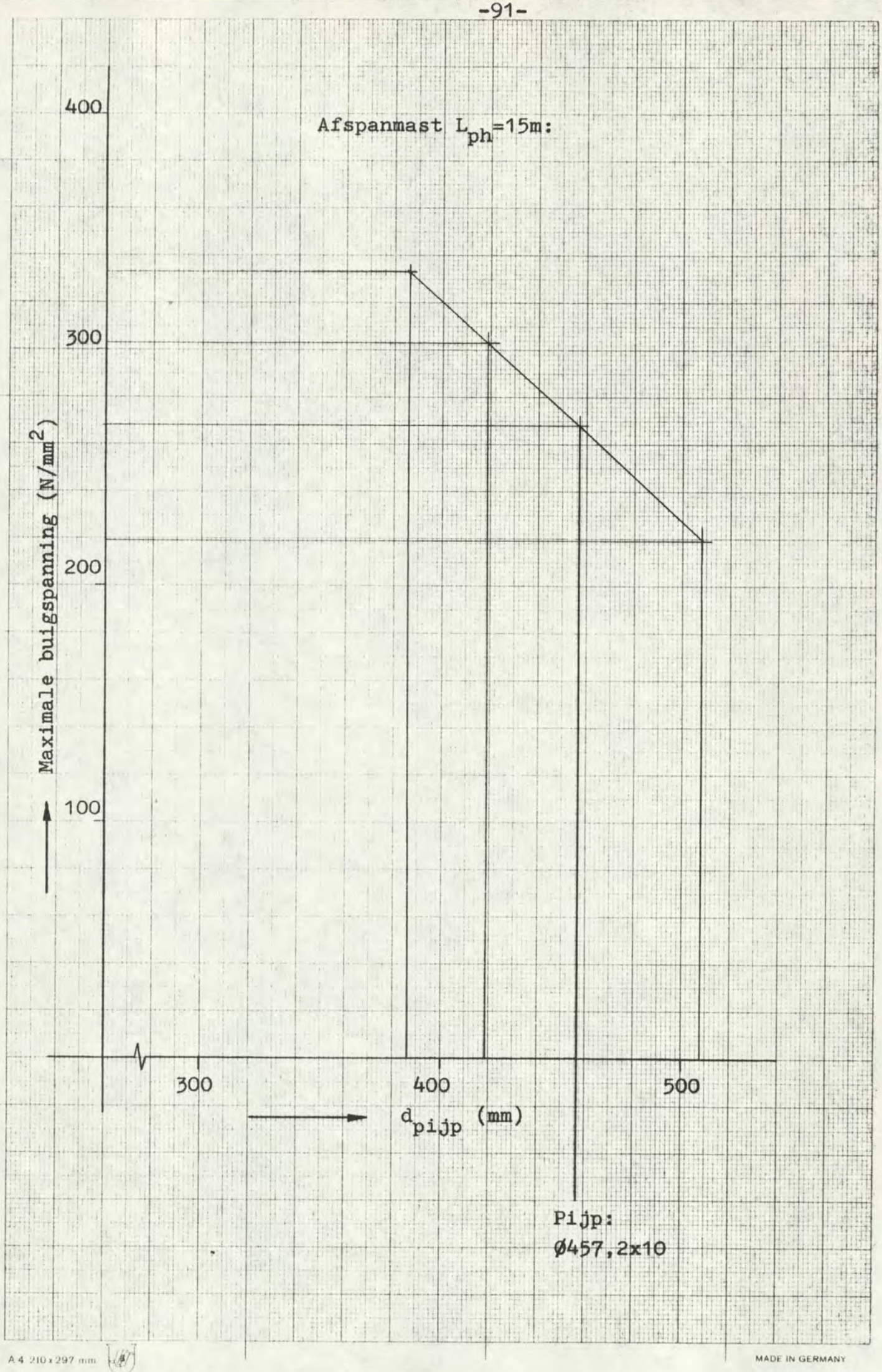
De spanning bij pijpdiameter Ø386 :

$$k = \frac{0,350}{0,193} + 0,0219 + \pi \cdot 0,97813 \left[\frac{4 \cdot 0,23^2 - (0,35 + 0,193)(0,325 + 2 \cdot 0,23)}{4(0,325^2 + 2 \cdot 0,23^2)} \right]$$

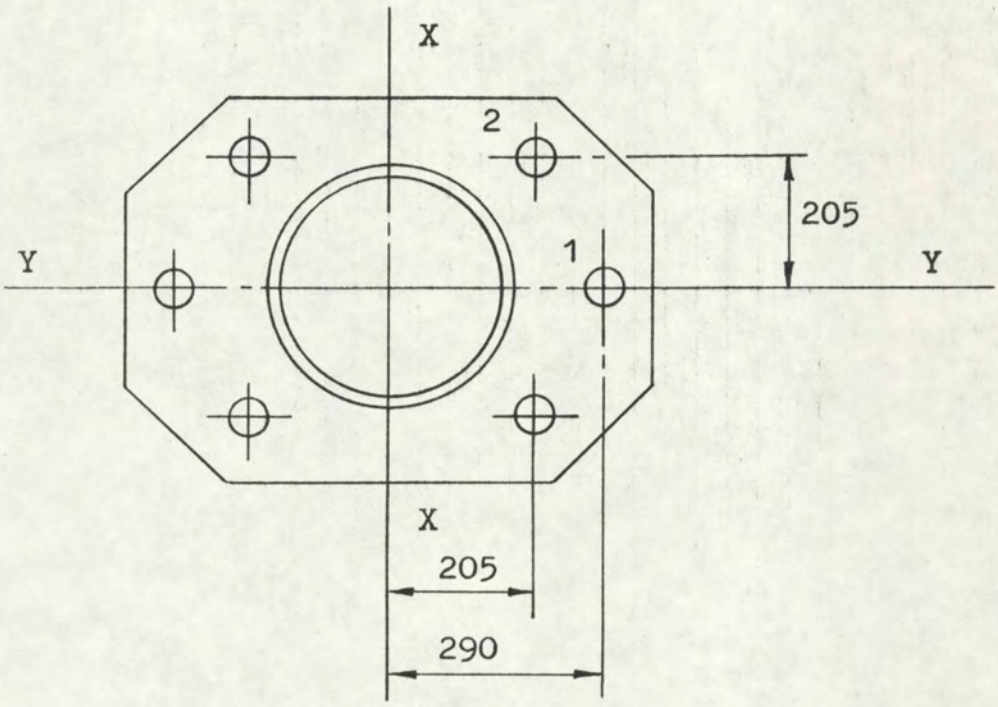
$$k = 1,0554$$

$$b' = 0,425 + 0,350 - 0,386 - 0,048 = 0,341 \text{ m.}$$

$$\sigma \approx \frac{1,0554}{0,341} \times 107,685 \approx 333,3 \text{ N/mm}^2.$$



5.2.2 Afspanmast L_{ph}= 12m:



$$\frac{\sum a^2_{x-x}}{290} = \frac{(2 \times 205^2 + 290^2).2}{290} = 1160 \text{ mm} = 1,16 \text{ m}.$$

$$\frac{\sum a^2_{x-x}}{205} = \frac{(2 \times 205^2 + 290^2).2}{205} = 1640 \text{ mm} = 1,64 \text{ m}.$$

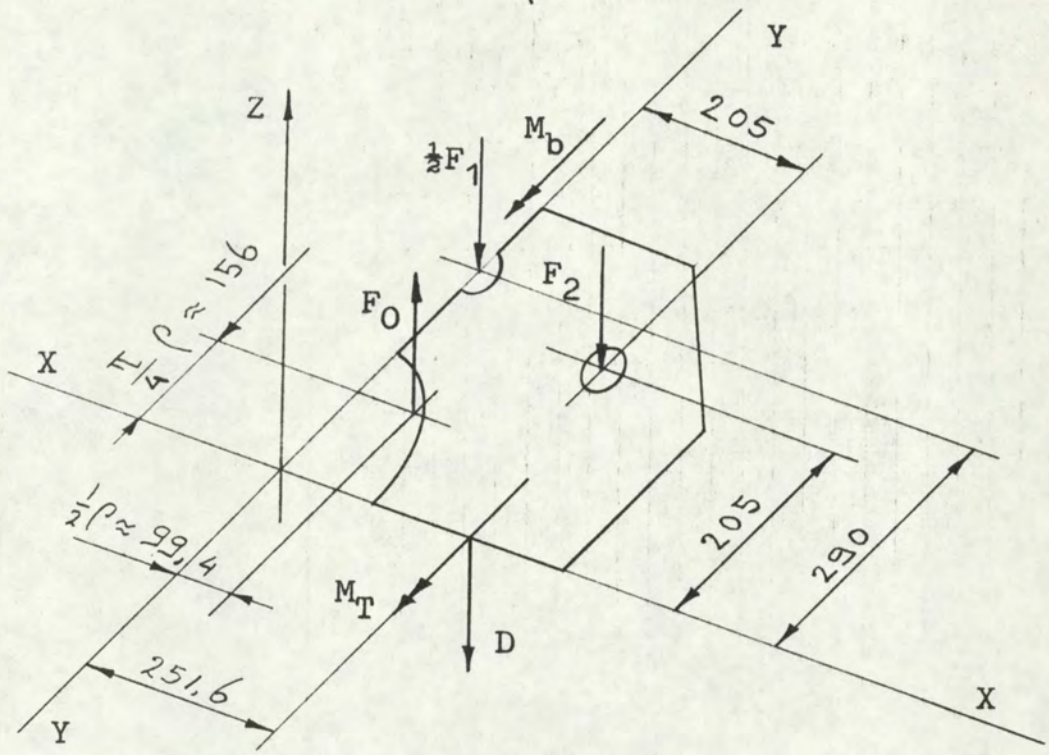
$$\frac{\sum a^2_{y-y}}{205} = \frac{4 \times 205^2}{205} = 820 \text{ mm} = 0,82 \text{ m}.$$

$M_{xx} = 198$ kNm $\quad M_{yy} = 37$ kNm.

Ankerkrachten: $F_{1\,M_{xx}} = \frac{198}{1,16} = 170,7$ kN

$$\left.\begin{aligned} F_{2\,M_{xx}} &= \frac{198}{1,64} = 120,7 \text{ kN} \\ F_{2\,M_{yy}} &= \frac{37}{0,82} = 45,1 \text{ kN} \end{aligned}\right\} F_{2\,tot} \approx 165,8 \text{ kN}.$$

Pijp: ϕ406,4 x 8,8 $\alpha\rho$=198,8 mm.



$$F_0 = \frac{\frac{1}{4} M_{xx}}{0,156} = \frac{\frac{1}{4} \times 198}{0,156} = 317,3 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} F_1 = \frac{1}{2} \times 170,7 \approx 85,4 \text{ kN}.$$
$$F_2 = 120,7 \text{ kN}.$$

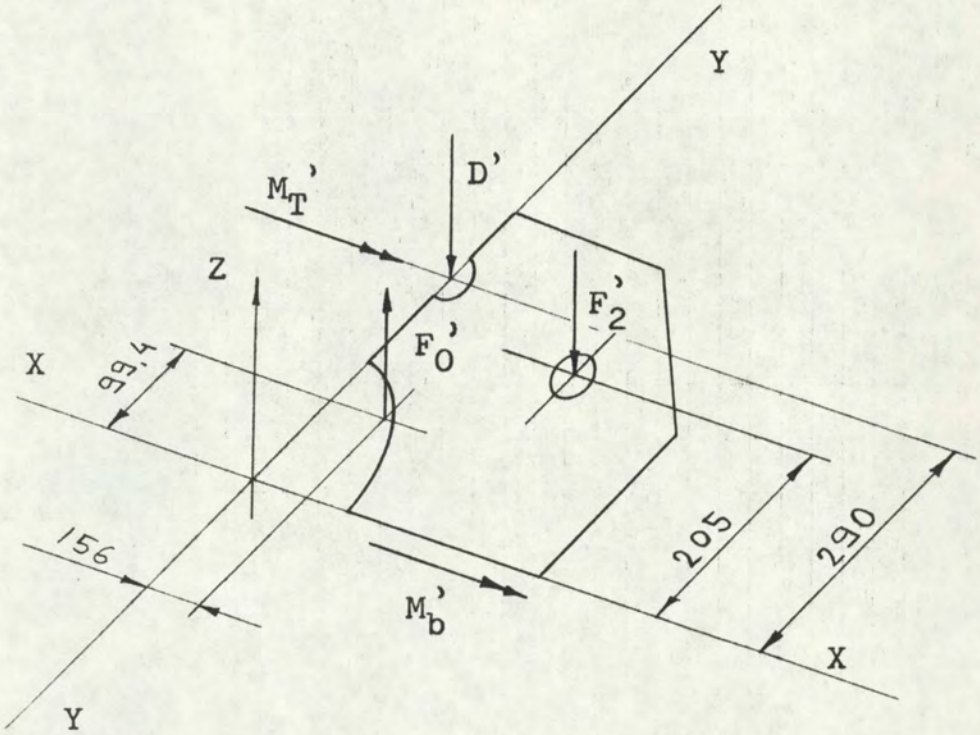
Krachtenevenwicht Z-richting:

$$F_0 - \frac{1}{2} F_1 - F_2 - D = 0 \qquad D = 317,3 - 85,4 - 120,7 = 111,2 \text{ kN}.$$

Evenwicht om de Y-Y as:

$$\Sigma M = M_T + M_b = D \times 251,6 + F_2 \times 205 - F_0 \times 99,4$$
$$= 111,2 \times 251,6 + 120,7 \times 205 - 317,3 \times 99,4 = 21.182 \text{ kNmm}$$

$$M_T + M_b = 21.182 \text{ Nm}.$$



$$F_0' = \frac{\frac{1}{4} M_{yy}}{0{,}156} = \frac{\frac{1}{4} \times 37}{0{,}156} = 59{,}3 \text{ kN}$$

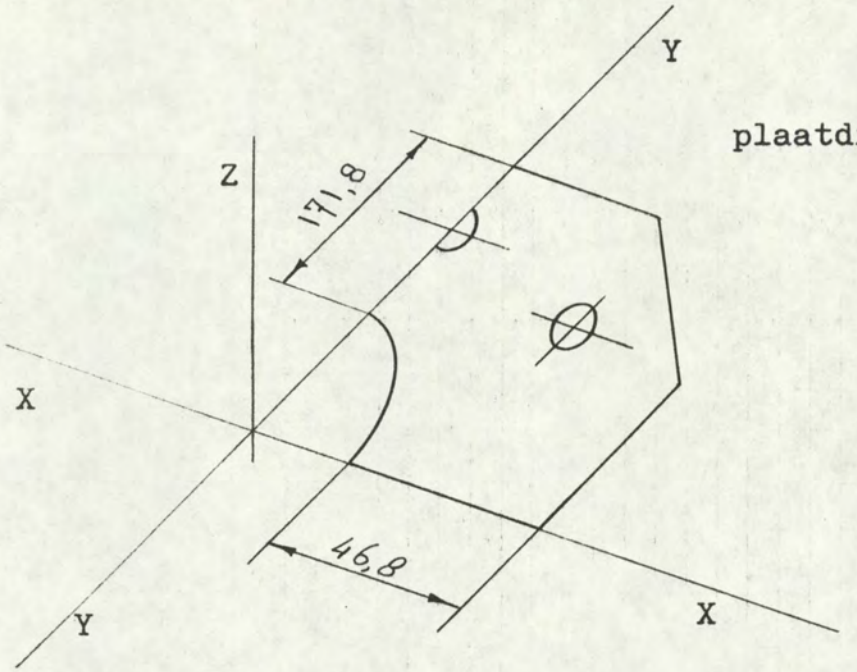
$$F_2' = 45{,}1 \text{ kN}$$

Krachtenevenwicht in Z-richting:

$$F_0' - D' - F_2' = 0$$
$$D' = 59{,}3 - 45{,}1 = 14{,}2 \text{ kN}$$

Evenwicht om de X-X as:

$$M_b' + M_T' = -F_0' \times 99{,}4 + F_2' \times 205 + D' \times 290$$
$$= -59{,}3 \times 99{,}4 + 45{,}1 \times 205 + 14{,}2 \times 290$$
$$= 7469 \text{ kNm}$$



plaatdikte: t(mm)

$$b_{yy} = (750 - 406{,}4)\cdot\tfrac{1}{2} - 48 = 123{,}8 \text{ mm.}$$
$$b_{xx} = (600 - 406{,}4)\cdot\tfrac{1}{2} = 96{,}8 \text{ mm.}$$

We bepalen de spanningen met het principe van uiterste draagkracht (plastisch).

$$\sigma_{b_{yy}} = M_b / \tfrac{1}{6} t^2 \times 123{,}8 \qquad \tau_{xx} = M_T / \tfrac{1}{4} t^2 \times 96{,}8$$

$$\sigma_{v_{xx}} = \sqrt{3} \cdot M_T / \tfrac{1}{4} t^2 \times 96{,}8$$

$$\sigma_{v_{xx}} = \left\{ M_T / \tfrac{1}{6} t^2 \times 123{,}8 \right\} \left\{ \frac{123{,}8}{96{,}8} \times \frac{1/6}{1/4} \times \sqrt{3} \right\}$$

$$\sigma_{v_{xx}} = 1{,}477 \cdot M_T / \tfrac{1}{6} t^2 \times 123{,}8$$

$$\sigma_{b_{yy}} = \sigma_{v_{xx}} \qquad M_b = M_T \times 1{,}477$$
$$M_T = \frac{M_b}{1{,}477}$$

$$M_b + M_T = \left[1 + \frac{1}{1{,}477} \right] M_b = 1{,}677\, M_b$$

$$M_b = \frac{21.182}{1{,}677} \approx 12.631 \text{ Nm.}$$

$$M_T = 21182 - 12.631 = 8551 \text{ Nm.}$$

$$\sigma = M_b / \tfrac{1}{6} t^2 \times 123{,}8 = 12.631 \times 10^3 / \tfrac{1}{6} t^2 \times 123{,}8$$
$$= 6{,}12 \times 10^5 \times t^{-2} \text{ N/mm}^2.$$

$$\sigma_{b_{xx}} = M_b' / \tfrac{1}{6} t^2 \times 96{,}8 \qquad \tau_{yy} = M_T' / \tfrac{1}{4} t^2 \times 123{,}8$$

$$\sigma_{v_{yy}} = \sqrt{3} . M_T' / \tfrac{1}{4} t^2 \times 123{,}8$$

$$\sigma_{v_{yy}} = \left\{ M_T' / \tfrac{1}{6} t^2 \times 96{,}8 \right\} \left\{ \frac{\sqrt{3} . \tfrac{1}{6} . 96{,}8}{\tfrac{1}{4} . 123{,}8} \right\}$$

$$\sigma_{v_{yy}} = 0{,}903 \, M_T' / \tfrac{1}{6} t^2 . 96{,}8$$

$$\sigma_{b_{xx}} = \sigma_{v_{yy}} \qquad M_b' = 0{,}903 \, M_T'$$
$$M_T' = \frac{M_b'}{0{,}903}$$

$$M_T' + M_b' = \left[1 + \frac{1}{0{,}903} \right] . M_b' = 2{,}108 \, M_b'$$

$$M_b' = \frac{M_T' + M_b'}{2{,}108} = \frac{7469}{2{,}108} = 3543 \text{ Nm.}$$

$$M_T' = 7469 - 3543 = 3926 \text{ Nm.}$$

$$\sigma' = M_b' / \tfrac{1}{6} t^2 \times 96{,}8 = 3543 \times 10^3 / \tfrac{1}{6} t^2 \times 96{,}8$$
$$\sigma' = 2{,}20 \times 10^5 \times t^{-2} \text{ N/mm}^2.$$

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma^2 + (\sigma')^2} = t^{-2} \times 10^5 \sqrt{6{,}12^2 + 2{,}20^2}$$
$$\sigma_{tot} = 6{,}5 \times 10^5 \times t^{-2} \text{ N/mm}^2.$$

Toelaatbare spanning $\bar{\sigma}$ =0,9.240=216 N/mm^2.

De optredende spanning bij t=50 mm :
σ =6,50.10^5.(50)$^{-2}$= 260 N/mm^2.

De spanningsverdeling in de dikterichting van de plaat is elastisch aangenomen.
Er is dus voldoende reserve aanwezig:

$$v = \frac{216}{260} \cdot \frac{1/4}{1/6} = 1{,}246$$

5.2.2.1 **Bepaling maximale spanningen bij andere pijpdiameters:**

$$k = \frac{b}{\rho} + (1-\alpha) + \pi\alpha \left\{ \frac{4x_2^2 - (b+\rho)(x_1 + 2x_2)}{4(x_1^2 + 2x_2^2)} \right\}$$

$$b' = a + b - 2\rho - d$$

$$\sigma = \frac{k}{b'} \left\{ \frac{b_0'}{k_0} \cdot \sigma_0 \right\}$$

$a = 1/2 . 750 = 375$ mm.
$b = 1/2 . 600 = 300$ mm.
$\rho = 1/2 . 406,4 = 203,2$ mm.
$x_1 = 290$ mm.
$x_2 = 205$ mm.

$$\alpha\rho = \rho - 1/2 . \delta$$

$$\alpha = \frac{\rho - 1/2 . \delta}{\rho} = \frac{203,2 - 4,4}{203,2} = 0,9784$$

$$1 - \alpha = 0,02165$$

$$k_0 = \frac{0,300}{0,2032} + 0,02165 + \pi . 0,9784 \left[\frac{4 . 0,205^2 - (0,3 + 0,2032)(0,29 + 2 . 0,205)}{4(0,29^2 + 2 \times 0,205^2)} \right]$$

$$k_0 = 0,6565$$

$$b_0' = 0,375 + 0,300 - 0,4064 - 0,048 = 0,2206 \text{ m}.$$

$$\sigma_0 = 260 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{b_0'}{k_0} . \sigma_0 = \frac{0,2206}{0,6565} \times 260 = 87,36$$

De maximaal optredende spanning bij pijpdiameter Ø368:

$$k = \frac{0,300}{0,184} + 0,02165 + \pi . 0,9784 \left[\frac{4 . 0,205^2 - (0,3 + 0,184)(0,29 + 2 . 0,205)}{4(0,29^2 + 2 \times 0,205^2)} \right]$$

$$k = 0,872$$

$$b' = 0,375 + 0,300 - 0,368 - 0,048 = 0,259 \text{ m}.$$

$$\sigma \approx \frac{0,872}{0,259} \times 87,36 \approx 294,14 \text{ N/mm}^2.$$

De maximaal optredende spanning bij pijpdiameter Ø419:

$$k = \frac{0,300}{0,2095} + 0,02165 + \pi \cdot 0,9784 \left[\frac{4 \cdot 0,205^2 - (0,3 + 0,2095)(0,29 + 2 \cdot 0,205)}{4(0,29^2 + 2 \cdot 0,205^2)} \right]$$

$k = 0,592$

$b' = 0,375 + 0,300 - 0,419 - 0,048 = 0,208$ m.

$$\sigma \approx \frac{0,592}{0,2080} \times 87,36 \approx 248,6 \text{ N/mm}^2.$$

De maximaal optredende spanning bij pijpdiameter Ø457,2:

$$k = \frac{0,300}{0,2286} + 0,02165 + \pi \cdot 0,9784 \left[\frac{4 \cdot 0,205^2 - (0,3 + 0,2286)(0,29 + 2 \cdot 0,205)}{4(0,29^2 + 2 \times 0,205^2)} \right]$$

$k = 0,4112$

$b' = 0,375 + 0,300 - 0,4572 - 0,048 = 0,1698$ m.

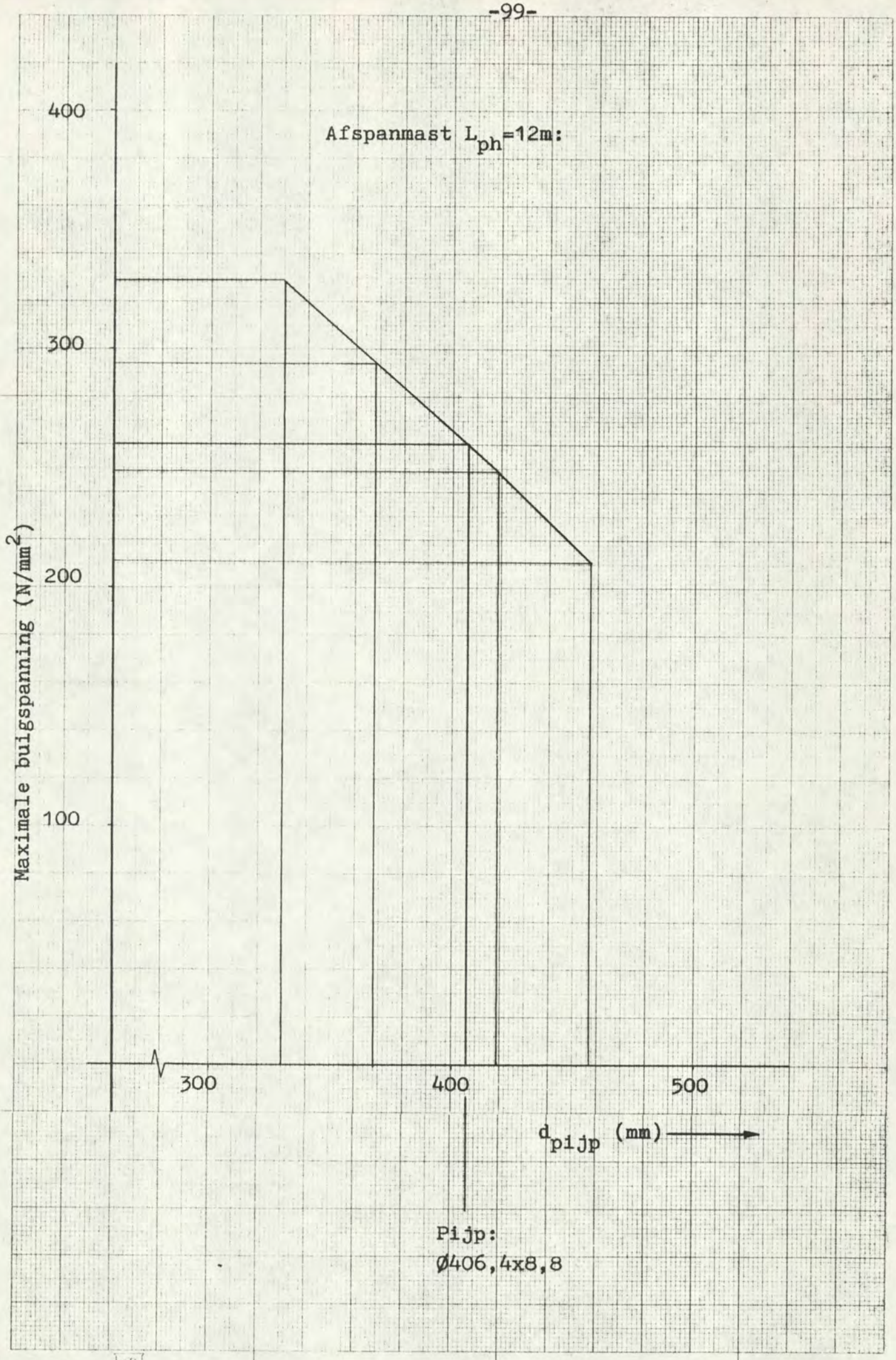
$$\sigma \approx \frac{0,4112}{0,1698} \times 87,36 \approx 211,56 \text{ N/mm}^2.$$

De maximaal optredende spanning bij pijpdiameter Ø330:

$k = 1,1205$

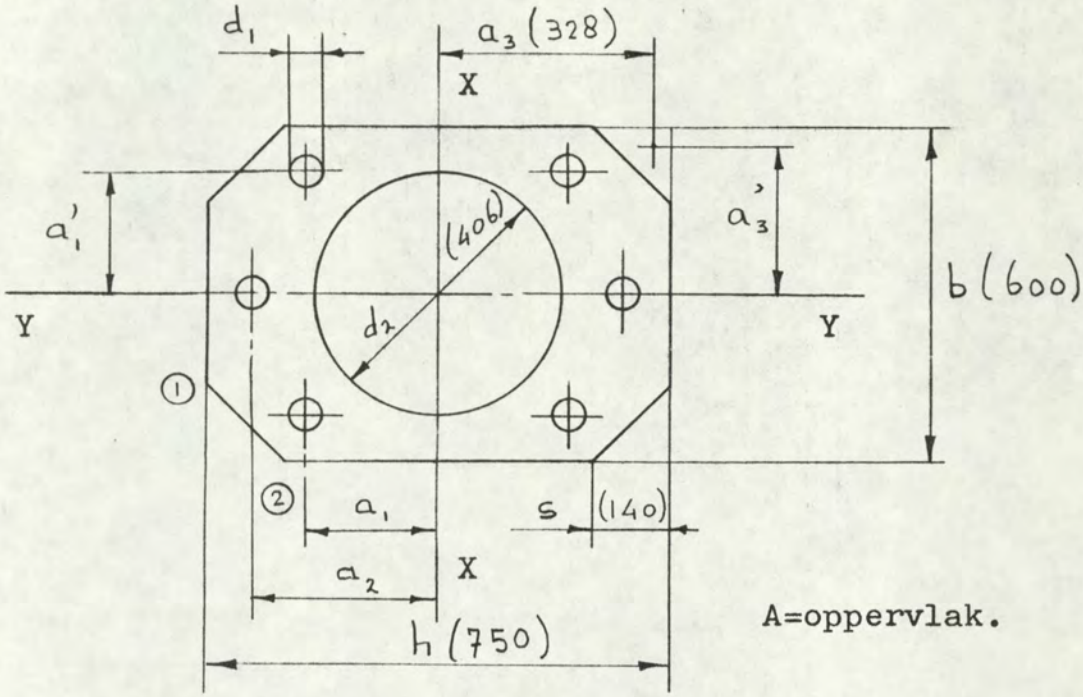
$b' = 0,375 + 0,300 - 0,330 - 0,048 = 0,297$ m.

$$\sigma \approx \frac{1,1205}{0,297} \times 87,36 \approx 329,6 \text{ N/mm}^2.$$



5.2.2.2 Schatting van de betondrukspanning van een 12m-mast:

Het buigweerstandmoment van de voetplaat:



A=oppervlak.

$$I_{xx} = \tfrac{1}{12} b h^3 - 4\left[I_o + A.(a_3)^2\right] - 6.\frac{\pi}{64} d_1^3 - \frac{\pi}{4} d_1^2\left(2a_2^2 + 4a_1^2\right) - \frac{\pi}{64} d_2^4$$

$$I_o = \tfrac{1}{36} s^4 = \tfrac{1}{36}.140^4 = 1{,}067 \times 10^7 \text{ mm}^4.$$

$$I_{xx} = \tfrac{1}{12}.600(750)^3 - 4\left[1{,}067\times10^7 + \tfrac{1}{2}.140^2.(328)^2\right] - 6.\frac{\pi}{64}.48^3 - \frac{\pi}{4}\,48^2\left(2.290^2 + 4.205^2\right) - \frac{\pi}{64}.406^4$$

$$I_{xx} = 1{,}489 \times 10^{10} \text{ mm}^4.$$

$$W_{xx} = \frac{I_{xx}}{\tfrac{1}{2}h} \approx \underline{\underline{39{,}71 \times 10^6 \text{ mm}^3}}.$$

$$I_{yy} = \tfrac{1}{12} b^3 h - 4\left[I_o + A(a_3')^2\right] - 6.\frac{\pi}{64} d_1^3 - \frac{\pi}{4} d_1^2\left\{4(a_1')^2\right\} - \frac{\pi}{64} d_2^4$$

$$I_{yy} = \tfrac{1}{12}.750.(600)^3 - 4\left\{1{,}067.10^7 + \tfrac{1}{2}.140^2.253^2\right\} - 6.\frac{\pi}{64}48^3 - \frac{\pi}{4}.48^2\left\{4.(205)^2\right\} - \frac{\pi}{64}.406^4$$

$$I_{yy} \approx 0{,}9277 \times 10^{10} \text{ mm}^4 \qquad W_{yy} = \frac{I_{yy}}{\tfrac{1}{2}b} \approx \underline{\underline{30{,}92 \times 10^6 \text{ mm}^3}}.$$

Bepaling van de betondrukspanning:

$M_{xx} = 198$ kNm.
$M_{yy} = 37$ kNm.

Voor punt 1:

$$\sigma_{d1} = \frac{M_{xx}}{W_{xx}} + \frac{M_{yy} \cdot e_y}{I_{yy}} \qquad e_y = \frac{600-280}{2} = 160\,mm$$

$$= \frac{198.000}{39,71 \times 10^6} + \frac{37000 \times 160}{0,9277 \times 10^{10}}$$

$$= 0,005624\ kN/mm^2 = 5,624\ N/mm^2.$$

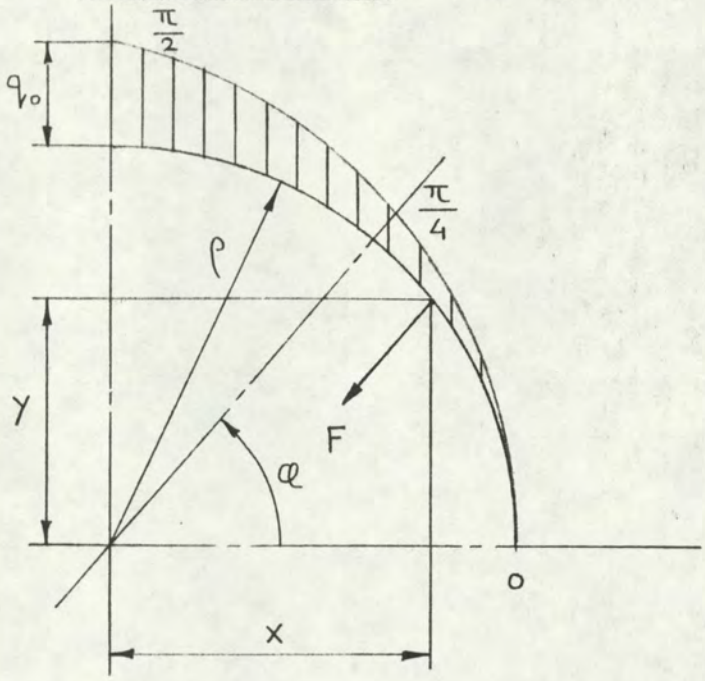
Voor punt 2:

$$\sigma_{d2} = \frac{M_{xx} \cdot e_x}{I_{xx}} + \frac{M_{yy}}{W_{yy}} \qquad e_x = \frac{750-280}{2} = 235\ mm$$

$$= \frac{198000 \times 235}{1,489 \times 10^{10}} + \frac{37000}{30,92 \times 10^6}$$

$$= 0,004322\ kN/mm^2 = 4.322\ N/mm^2.$$

5.2.2.3 **Bepaling van de grootte en ligging van F, voor een ring met een sinusvormige belasting, van het deel tussen 0 en $\frac{\pi}{4}$:**



$$q = q_0 \sin\varphi$$

$$dF = q \cdot \rho \, d\varphi$$

$$dF = q_0 \rho \cdot \sin\varphi \, d\varphi$$

$$F = q_0 \rho \int \sin\varphi \, d\varphi$$

$$F = q_0 \cdot \rho \left[-\cos\varphi \right]_0^{\frac{\pi}{4}}$$

$$F = q_0 \cdot \rho \left(\cos 0 - \cos\frac{\pi}{4} \right)$$

$$F = q_0 \cdot \rho \left(1 - \tfrac{1}{2}\sqrt{2} \right)$$

(q en F ⊥ op het vlak van tekening)

$$dM_x = dF \cdot \rho \sin\varphi = q_0 \cdot \rho^2 \cdot \sin^2\varphi \, d\varphi$$

$$M_x = q_0 \cdot \rho^2 \int \sin^2\varphi \, d\varphi = q_0 \cdot \rho^2 \left(\tfrac{1}{2}\varphi - \tfrac{1}{4}\sin 2\varphi \right)_0^{\frac{\pi}{4}}$$

$$M_x = q_0 \cdot \rho^2 \left(\frac{\pi}{8} - \tfrac{1}{4}\sin\frac{\pi}{2} - 0 + \sin 0 \right)$$

$$M_x = q_0 \cdot \rho^2 \left(\frac{\pi}{8} - \tfrac{1}{4} \right)$$

$$M_x = F \times y \qquad y = \frac{M_x}{F} = \frac{q_0 \cdot \rho^2 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{4} \right)}{q_0 \cdot \rho \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} \right)} = \boxed{\rho \cdot \frac{\pi - 2}{4(2 - \sqrt{2})}}$$

$$dM_y = dF \cdot \rho \cos\varphi = q_0 \cdot \rho^2 \sin\varphi \cos\varphi \, d\varphi$$

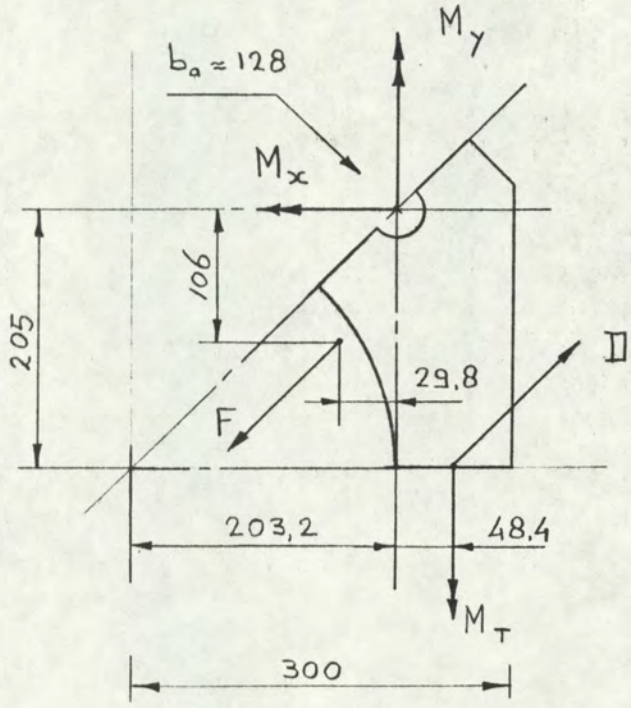
$$M_y = q_0 \cdot \rho^2 \int \sin\varphi \cos\varphi \, d\varphi = q_0 \cdot \rho^2 \cdot \tfrac{1}{2} \sin^2\varphi \Big]_0^{\frac{\pi}{4}}$$

$$M_y = q_0 \cdot \rho^2 \cdot \tfrac{1}{2} \left(\sin^2\frac{\pi}{4} - \sin^2 0 \right)$$

$$M_y = q_0 \cdot \rho^2 \cdot \tfrac{1}{4}$$

$$M_y = F \times x \qquad x = \frac{M_y}{F} = \frac{q_0 \cdot \rho^2 \cdot \frac{1}{4}}{q_0 \cdot \rho \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} \right)} = \boxed{\rho \cdot \frac{1}{2(2 - \sqrt{2})}}$$

Bepaling momenten in doorsnede A-A: (L_{ph}=12m)

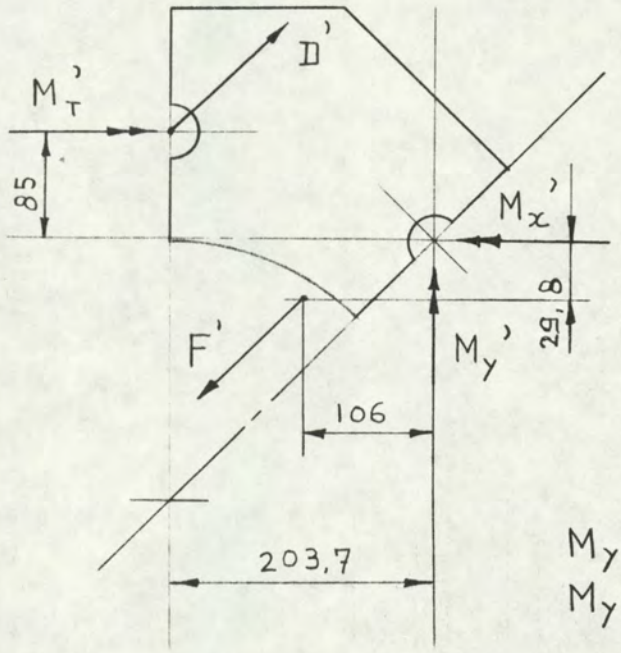


$F = q_0 \cdot \rho \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}\right)$
$= F_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}\right)$
$= 317{,}3 \times 0{,}293$
≈ 93 kN

$D = 111{,}2$ kN
$M_T = 8551$ kNmm.

$M_y - M_T + 29{,}8 \cdot F + 48{,}4 \cdot D =$
$M_y = 8551 - 29{,}8 \times 93$
$- 48{,}4 \times 111{,}2$
$M_y = 397{,}52$ kNmm.

$M_x - 205 \cdot D + 106 \cdot F = 0$
$M_x = -106 \times 93 + 205 \times 111{,}2 = 12938$ kNmm.

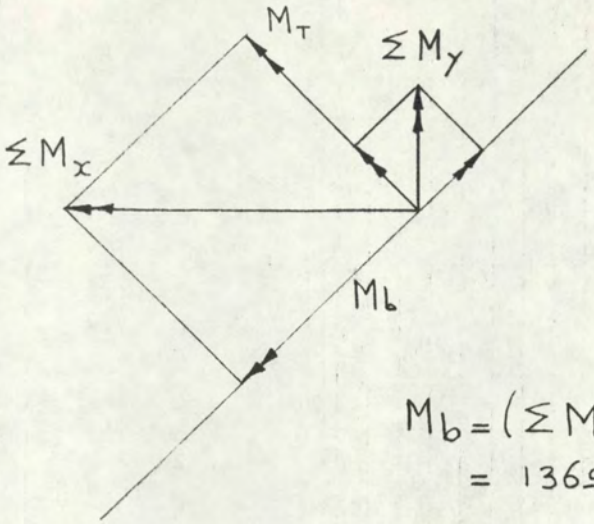


$F' = q_0' \cdot \rho \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}\right)$
$= F_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}\right)$
$= 59{,}3 \times 0{,}293$
$\approx 17{,}4$ kN.

$D' = 14{,}2$ kN
$M_T' = 3926$ kNmm.

$M_y' + F' \cdot 106 - D' \cdot 203{,}7 = 0$
$M_y' = 1048$ kN.

$M_x' - M_T' + D' \cdot 85 + F' \cdot 29{,}8 = 0$
$M_x' = 3926 - 14{,}2 \times 85 - 17{,}4 \times 29{,}8 = 2200{,}5$ kNmm.



$$\Sigma M_x = 12938 + 2200{,}5$$
$$\Sigma M_x = 15138{,}5 \text{ kNmm}.$$

$$\Sigma M_y = 397{,}52 + 1048$$
$$\Sigma M_y = 1445{,}52 \text{ kNmm}.$$

$$M_b = (\Sigma M_x - \Sigma M_y)\,\tfrac{1}{2}\sqrt{2}$$
$$= 13693 \times \tfrac{1}{2}\sqrt{2} \approx 9682{,}4 \text{ kNmm}.$$

$$M_T = (\Sigma M_x + \Sigma M_y)\,\tfrac{1}{2}\sqrt{2}$$
$$= 16584 \times \tfrac{1}{2}\sqrt{2} \approx 11726{,}7 \text{ kNmm}.$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau^2} = \frac{6}{b_a \cdot t^2}\sqrt{M_b^2 + 3\left(M_T \cdot \tfrac{2}{3}\right)^2}$$
$$= \frac{6}{128 \cdot 50^2}\sqrt{9682{,}4^2 + 3\left(11726{,}7 \cdot \tfrac{2}{3}\right)^2}$$
$$\approx 0{,}312 \text{ kN/mm}^2 \approx \underline{\underline{312 \text{ N/mm}^2}}.$$

5.3 **Berekening van de ankers voor afspanmasten:**

Afspanmast L_{ph}=15m:

$F_{max} = 227,1$ kN (F_{1Mxx})
$A_{sp} = 1126$ mm^2 (M42)

$$\sigma = \frac{227,1 \times 10^3}{1126} \approx 201,7 \text{ N/mm}^2$$

Materiaal Fe360: $\sigma = 0,8 \times 240 = 192$ N/mm^2.

Afspanmast L_{ph}=12m:

$F_{max} = 171$ kN (F_{1Mxx})

$$\sigma = \frac{171 \times 10^3}{1126} \approx 151,7 \text{ N/mm}^2.$$

Bepaling van de ankerlengte:

Hechtspanning k= 0,6.1,5=0,9 N/mm^2.

F_a= ankerkracht

d = ankerdiameter= 42 mm.

l = ankerlengte

L_{ph}=15m:
(Afspanmast)

$$\ell_1 = \frac{227\,100}{\pi \times 42 \times 0,9} = 1912 \text{ mm}$$

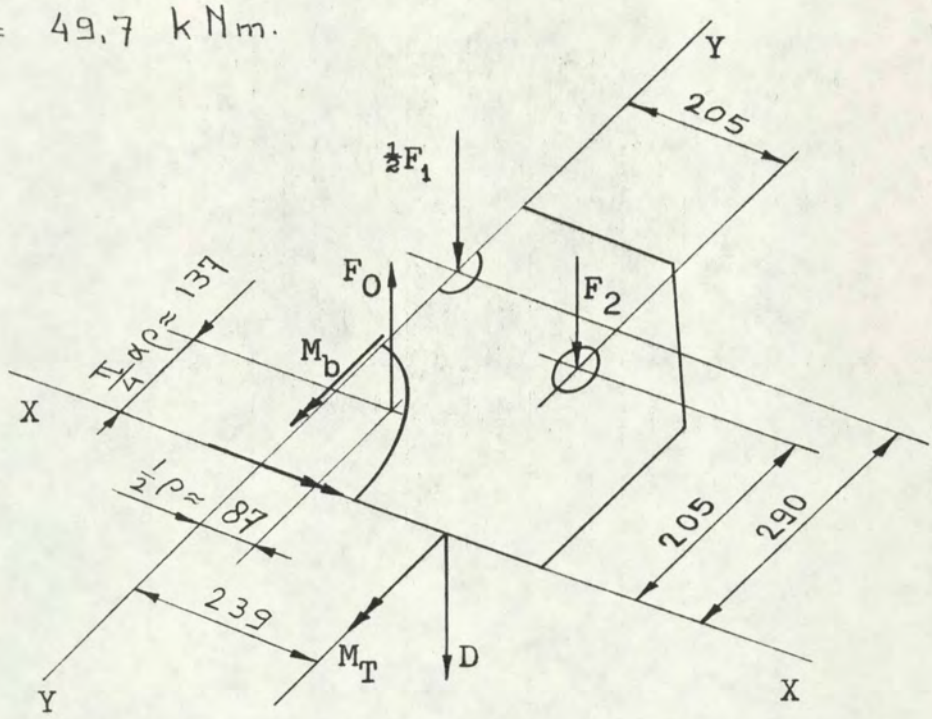
$$\ell_2 = 1912 - 5 \times 42 = 1702 \text{ mm}.$$
$$\ell_3 = 1912 - 10 \times 42 = 1492 \text{ mm}.$$

(zie: figuur blz.116)

5.4 **Berekening van de voetplaten voor tussenafspanmasten:**

5.4.1 **Tussenafspanmast L_{ph}=15m:**

$M_{xx} = 158.8$ kNm
$M_{yy} = 49.7$ kNm.



Pijp Ø355,6x8 $\alpha\rho$=173,8mm

Zie blz.86:

$$F_{1\,M_{xx}} = \frac{158.8}{1,16} = 136,9 \text{ kN.}$$

$$\left.\begin{aligned} F_{2\,M_{xx}} &= \frac{158.8}{1,64} = 96,83 \text{ kN.} \\ F_{2\,M_{yy}} &= \frac{49.7}{0,82} = 60,61 \text{ kN.} \end{aligned}\right\} F_{2\,tot} = 157,44 \text{ kN.}$$

Zie blz.93:

$$F_o = \frac{1/4\ M_{xx}}{0,137} = \frac{1/4 \times 158.8}{0,137} = 289,78 \text{ kN.}$$

$$1/2\ F_1 = 1/2 \times 136,9 = 68,45 \text{ kN.}$$

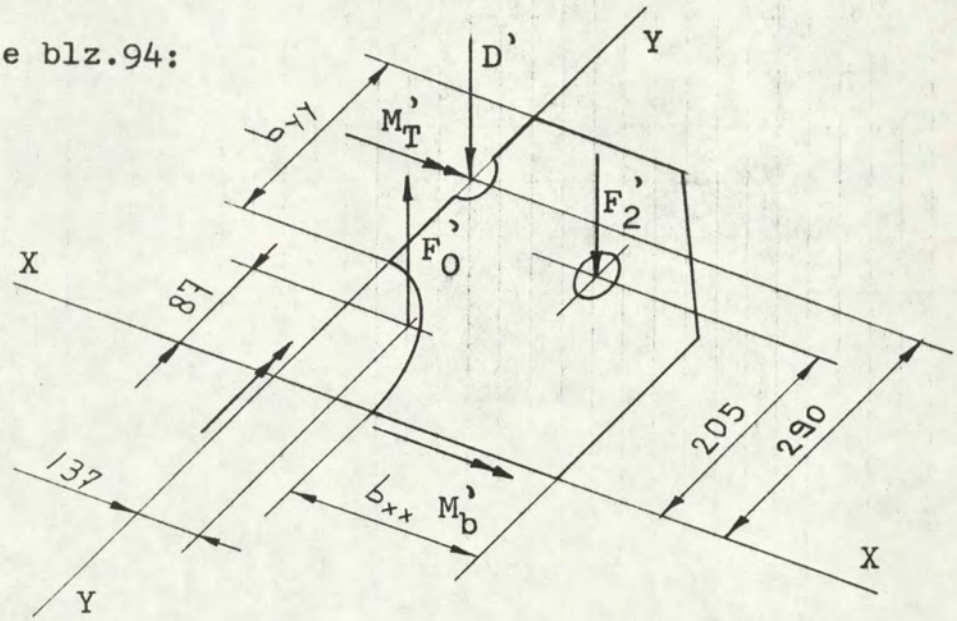
$$F_2 = 96,83 \text{ kN.}$$

$$D = F_o - 1/2\ F_1 - F_2 = 289,78 - 68,45 - 96,83 = 124,5 \text{ kN.}$$

Evenwicht om de Y-Y as:

$$\Sigma M = M_T + M_b = 0{,}239 \times D + 0{,}205 \times F_2 - 0{,}087 \times F_o$$
$$= 0{,}239 \times 124{,}5 + 0{,}205 \times 96{,}83 - 0{,}087 \times 289{,}78$$
$$= 24{,}39 \text{ kNm.}$$

Zie blz.94:



$$F_o' = \frac{1/4\, M_{YY}}{0{,}137} = \frac{1/4 \times 49{,}7}{0{,}137} = 90{,}69 \text{ kN.}$$

$$F_2' = 60{,}61 \text{ kN.}$$

$$D' = F_o' - F_2' = 90{,}69 - 60{,}61 = 30{,}1 \text{ kN}$$

Evenwicht om de X-X as:

$$\Sigma M' = M_T' + M_b' = -87 \times F_o' + 205 \times F_2' + 290 \times D'$$
$$= -87 \times 90{,}69 + 205 \times 60{,}61 + 290 \times 30{,}1$$
$$= 13264 \text{ Nm.}$$

Zie blz.95:

$$b_{YY} = 1/2\,(750 - 355{,}6) - 48 = 149 \text{ mm.}$$
$$b_{xx} = 1/2\,(600 - 355{,}6) = 122 \text{ mm.}$$

$$M_b = M_T \left\{ \sqrt{3} \cdot \frac{1/6}{1/4} \cdot \frac{149}{122} \right\} = 1{,}41\, M_T$$

$$\Sigma M = \left\{ 1 + \frac{1}{1{,}41} \right\} M_b = 1{,}709\, M_b$$

$$\sigma = \frac{M_b}{1/6\, t^2 \cdot 0{,}149}$$

$$M_b' = M_T' \left\{ \sqrt{3} \cdot \frac{1/6}{1/4} \cdot \frac{122}{149} \right\} = 0{,}9455\, M_T'$$

$$\Sigma M' = \left\{ 1 + \frac{1}{0{,}9455} \right\} M_b' = 2{,}0577\, M_b'$$

$$\sigma' = \frac{M_b'}{1/6\, t^2 \cdot 0{,}122}$$

Voor t=55 mm:

$$\sigma = \frac{24390}{1{,}709} \cdot \frac{1}{1/6 \times 55^2 \times 0{,}149} \approx 190\ N/mm^2.$$

$$\sigma' = \frac{13264}{2{,}0577} \cdot \frac{1}{1/6 \times 55^2 \times 0{,}122} \approx 104{,}8\ N/mm^2.$$

$$\sigma_v = \left\{ 190^2 + 104{,}8^2 \right\}^{1/2} = 190{,}5\ N/mm^2.$$

$$\bar{\sigma} = 0{,}9 \times 240 = 216\ N/mm^2$$

(zie: TGB1972-Staal,NEN3851)

Geen draadbreuk,volle windbelasting:

$$\sigma_v = 104{,}8 \times \frac{75{,}7}{49{,}7} = 159{,}6\ N/mm^2.$$

$$\bar{\sigma} = 0{,}9 \times 160 = 144\ N/mm^2.$$

5.4.2 **Tussenafspanmast L_{ph}=12m:**

$M_{xx} = 110\ kNm.$
$M_{yy} = 31{,}4\ kNm.$

Pijp Ø298,5x10:

$\alpha\rho = 144\ mm.$
$\frac{\pi}{4}\alpha\rho = 113\ mm.$
$\frac{1}{2}\alpha\rho = 72\ mm.$

$$F_{1M_{xx}} = \frac{110}{1{,}16} = 95\ kN$$

$$\left.\begin{aligned} F_{2M_{xx}} &= \frac{110}{1{,}64} = 67\ kN \\ F_{2M_{yy}} &= \frac{31{,}4}{0{,}82} = 38\ kN \end{aligned}\right\} F_{2tot} = 105\ kN.$$

$$F_0 = \frac{\frac{1}{4} M_{xx}}{0{,}113} = \frac{\frac{1}{4} \times 110}{0{,}113} = 243\ kN.$$

$$\tfrac{1}{2}F_1 = \tfrac{1}{2} \times 95 = 47{,}5\ kN.$$
$$D = 243 - 47{,}5 - 67 = 128{,}5\ kN.$$

$$\begin{aligned} \Sigma M = M_T + M_b &= 0{,}224 \times D + 0{,}205 \times F_2 - 0{,}072 \times F_0 \\ &= 0{,}224 \times 128{,}5 + 0{,}205 \times 67 - 0{,}072 \times 243 \\ &= 25{,}023\ kNm. \end{aligned}$$

$$F_0' = \frac{\frac{1}{4} M_{yy}}{0{,}113} = \frac{\frac{1}{4} \times 31{,}4}{0{,}113} = 69{,}5\ kN$$
$$F_2' = 38\ kN.$$
$$D' = F_0' - F_2' = 69{,}5 - 38 = 31{,}5\ kN.$$

$$\begin{aligned} \Sigma M' = M_b' + M_T' &= -F_0' \times 0{,}072 + F_2' \times 0{,}205 + D' \times 0{,}29 \\ &= -69{,}5 \times 0{,}072 + 38 \times 0{,}205 + 31{,}5 \times 0{,}29 \\ &= 11{,}921\ kNm. \end{aligned}$$

$$b_{yy} = \tfrac{1}{2}(750 - 298{,}5) - 48 = 178\ mm.$$
$$b_{xx} = \tfrac{1}{2}(600 - 298{,}5) = 151\ mm.$$

$$M_b = M_T \left\{ \sqrt{3} \cdot \frac{1/6}{1/4} \cdot \frac{178}{151} \right\} = 1{,}361\ M_T$$

$$\Sigma M = \left\{ 1 + \frac{1}{1{,}361} \right\} M_b = 1{,}7347\ M_b$$

$$M_b' = M_T' \left\{ \sqrt{3} \cdot \frac{1/6}{1/4} \cdot \frac{151}{178} \right\} = 0{,}9795\ M_T'$$

$$\Sigma M' = \left\{ 1 + \frac{1}{0{,}9795} \right\} M_b' = 2{,}0209\ M_b'$$

$$\sigma = M_b / 1/6 \cdot t^2 \cdot 0{,}178$$
$$\sigma' = M_b' / 1/6 \cdot t^2 \cdot 0{,}151$$

Bij plaatdikte 50mm:

$$\sigma = \frac{25023}{1{,}7347} \cdot \frac{1}{1/6 \cdot 50^2 \cdot 0{,}178} = 194{,}5\ N/mm^2.$$

$$\sigma' = \frac{11921}{2{,}0209} \cdot \frac{1}{1/6 \cdot 50^2 \cdot 0{,}151} = 93{,}8\ N/mm^2.$$

$$\sigma_v = \left\{ 194{,}5^2 + 93{,}8^2 \right\}^{1/2} = 216\ N/mm^2$$

$$(\tau = 0{,}9 \times 240 = 216\ N/mm^2)$$

Geen kabelbreuk, volle windbelasting:

$$M_{yy} = 47{,}8\ kNm.$$

$$\sigma_v = 93{,}8 \times \frac{47{,}8}{31{,}4} = 143\ N/mm^2.$$

$$(\tau = 0{,}9 \times 160 = 144\ N/mm^2)$$

5.4.3 Tussenafspanmast L_{ph}=10m:

Afmetingen voetplaat komt overeen met die van de afspanmast.

$M_{xx} = 94$ kNm.
$M_{yy} = 25,14$ kNm.

$$F_{1M_{xx}} = \frac{94}{1,16} = 81 \text{ kN.}$$

$$\left.\begin{aligned} F_{2M_{xx}} &= \frac{94}{1,64} = 57,32 \text{ kN.} \\ F_{2M_{yy}} &= \frac{25,14}{0,82} = 30,66 \text{ kN.} \end{aligned}\right\} F_{2tot} = 88 \text{ kN } (= F_{ANKER})$$

5.5 Bepaling van de ankerlengten voor de tussenafspanmasten:

$$\ell_1 = \frac{F_A}{\pi . d . k}$$

Hechtspanning: k=0,6.1,5=0,9 N/mm^2.

L_{ph}=10m:

$$\ell_1 = \frac{88000}{\pi . 42 . 0,9} = 741 \text{ mm.}$$

$$\ell_2 = 741 - 5 \times 42 = 531 \text{ mm.}$$
$$\ell_3 = 741 - 10 \times 42 = 321 \text{ mm.}$$

L_{ph}=12m:

$$\ell_1 = \frac{105000}{\pi . 42 . 0,9} = 884 \text{ mm.}$$

$$\ell_2 = 884 - 5 \times 42 = 674 \text{ mm.}$$
$$\ell_3 = 884 - 10 \times 42 = 464 \text{ mm.}$$

L_{ph}=15m:

$$\ell_1 = \frac{157440}{\pi . 42 . 0,9} = 1326 \text{ mm.}$$

$$\ell_2 = 1326 - 5 \times 42 = 1116 \text{ mm.}$$
$$\ell_3 = 1326 - 10 \times 42 = 906 \text{ mm.}$$

5.6 Berekening van de voetplaten en ankers voor tussenmasten:

5.6.1 Tussenmast L_{ph}=15m:

Afmetingen voetplaat komt overeen met die van de tussen-afspanmast.

Ankerkrachten:

$M_{xx} = 115,75$ kNm.
$M_{yy} = 46,3$ kNm.

$$F_{1M_{xx}} = 115,75 / 1,16 = 99,78 \text{ kN.}$$
$$\left.\begin{array}{l} F_{2M_{xx}} = 115,75 / 1,64 = 70,58 \text{ kN.} \\ F_{2M_{yy}} = 46,3 / 0,82 = 56,46 \text{ kN.} \end{array}\right\} F_{2tot} = 127 \text{ kN.}$$

Alleen wind,geen draadbreuk:

$$M_{yy} = 75,7 \text{ kNm.}$$
$$F_A = \frac{75,7}{2 \times 0,410} = 92,32 \text{ kN.}$$

Bepaling van de ankerlengte:

Hechtspanning k=0,6.1,5=0,9 N/mm^2.

$$\ell_1 = \frac{F_A}{\pi . d . k}$$

$$\ell_1 = \frac{127000}{\pi . 42 . 0,9} = 1070 \text{ mm}$$

$\ell_2 = 1070 - 5 \times 42 = 860$ mm.
$\ell_3 = 1070 - 10 \times 42 = 650$ mm.

Hechtspanning k=0,6 N/mm^2.

$$\ell_1 = \frac{92320}{\pi . 42 . 0,6} = 1166 \text{ mm}$$

$\ell_2 = 1166 - 5 \times 42 = 956$ mm
$\ell_3 = 1166 - 10 \times 42 = 746$ mm

5.6.2 Tussenmasten L_{ph}=12m en L_{ph}=10m:

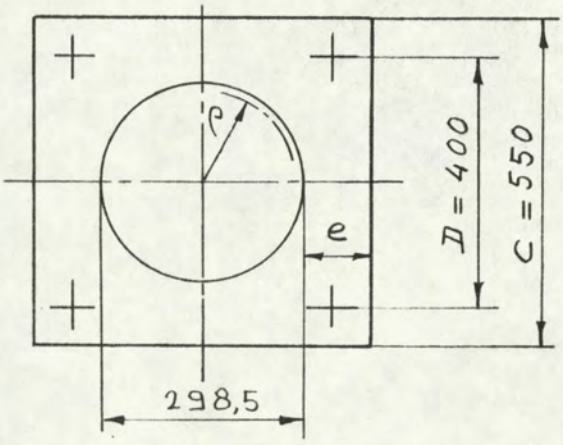
L_{ph}=12m:

$M_{xx} = 78$ kNm.
$M_{yy} = 29$ kNm.

$$W_{ben} = \frac{78000 \times 10^3}{240 \times 0{,}8} = 406{,}25 \times 10^3 \text{ mm}^3.$$

Pijp Ø298,5x7,1: $\rho = \frac{298{,}5 - 7{,}1}{2} = 145{,}7$ mm. $\downarrow$ $d_m = 291{,}4$ mm

$e = (550 - 298{,}5) \cdot 1/2 \approx 125{,}75$ mm



$$\Psi = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4D}{\pi \cdot d_m} - 1\right)\left(\frac{C - e}{D}\right) \ldots\ldots$$ (zie: Handleiding "Lichtmasten".)

$$\Psi = 1 - \frac{2}{\pi} + \left(\frac{4 \times 400}{\pi \times 291{,}4} - 1\right)\left(\frac{550 - 125{,}75}{400}\right) \approx 1{,}16$$

$$M_{max} = \sqrt{78^2 + 29^2} = 83{,}22 \text{ kNm}$$

$$t \geqslant \sqrt{\frac{1/8 \cdot M_{max} \cdot \Psi}{1/6 \cdot e \cdot \sigma}} \qquad \sigma = 0{,}9 \times 240 = 216 \text{ N/mm}^2.$$

$$t \geqslant \sqrt{\frac{1/8 \times 83{,}22 \times 10^6 \times 1{,}16}{1/6 \times 125{,}75 \times 216}} \approx 51{,}55 \text{ mm}.$$

$$F_{ANKER} = \frac{78}{2 \times 0,4} + \frac{29}{2 \times 0,4} = 133,75 \text{ kN}.$$

$$M\,36 \longrightarrow A_{sp} = 817 \text{ mm}^2.$$

$$\sigma = \frac{133750}{817} = 163,7 \text{ N/mm}^2. \quad (\sigma = 0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2)$$

Alleen wind: $M = 47,8$ kNm.

$$F_A = \frac{47,8}{0,4 \times 2} = 59,75 \text{ kN}$$

$$\sigma = \frac{59750}{817} = 73 \text{ N/mm}^2. \quad (\sigma = 0,8 \times 160 \text{ N/mm}^2)$$

$$L_1 = \frac{133750}{\pi \times 0,9 \times 36} = 1314 \text{ mm}.$$

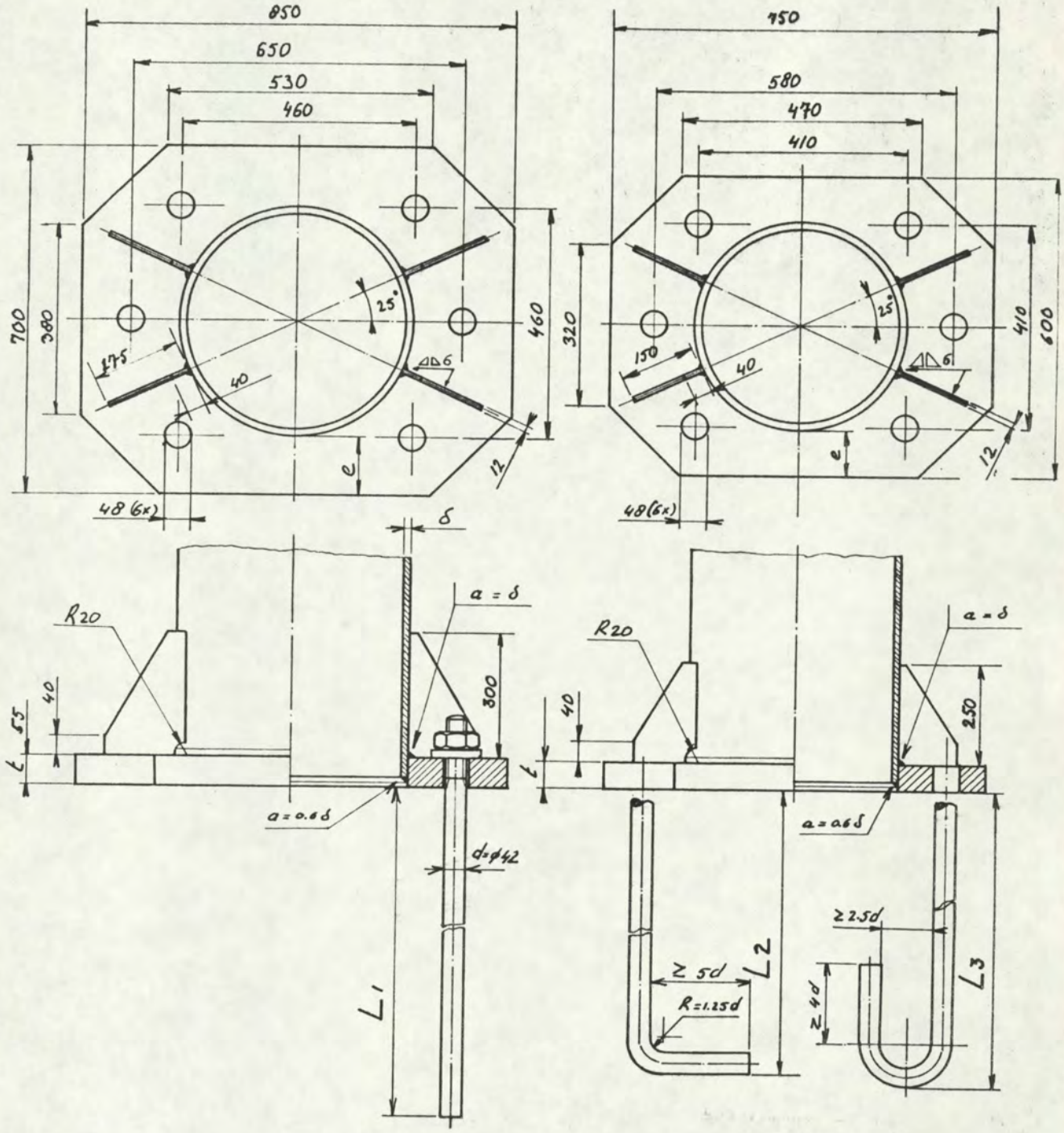
$L_2 = 1314 - 5 \times 36 = 1134$ mm.
$L_3 = 1314 - 10 \times 36 = 954$ mm.

L_{ph}=10m: **16% minder:**

$L_1 = 1314 \times 0,84 = 1104$ mm.
$L_2 = 1105 - 5 \times 36 = 924$ mm.
$L_3 = 1105 - 10 \times 36 = 744$ mm.

rijkswaterstaat directie bruggen

5.7 Voorstel afmetingen voetplaten en ankers voor "Eisen lichtmasten":



Voor:

Afspanmast: L_{ph}=15m.

Voor:

Afspanmast: L_{ph}=10 of 12m.

Tussenafspanmast:

L_{ph}=10,12 of 15m.

Tussenmast: L_{ph}=15m.

rijkswaterstaat directie bruggen

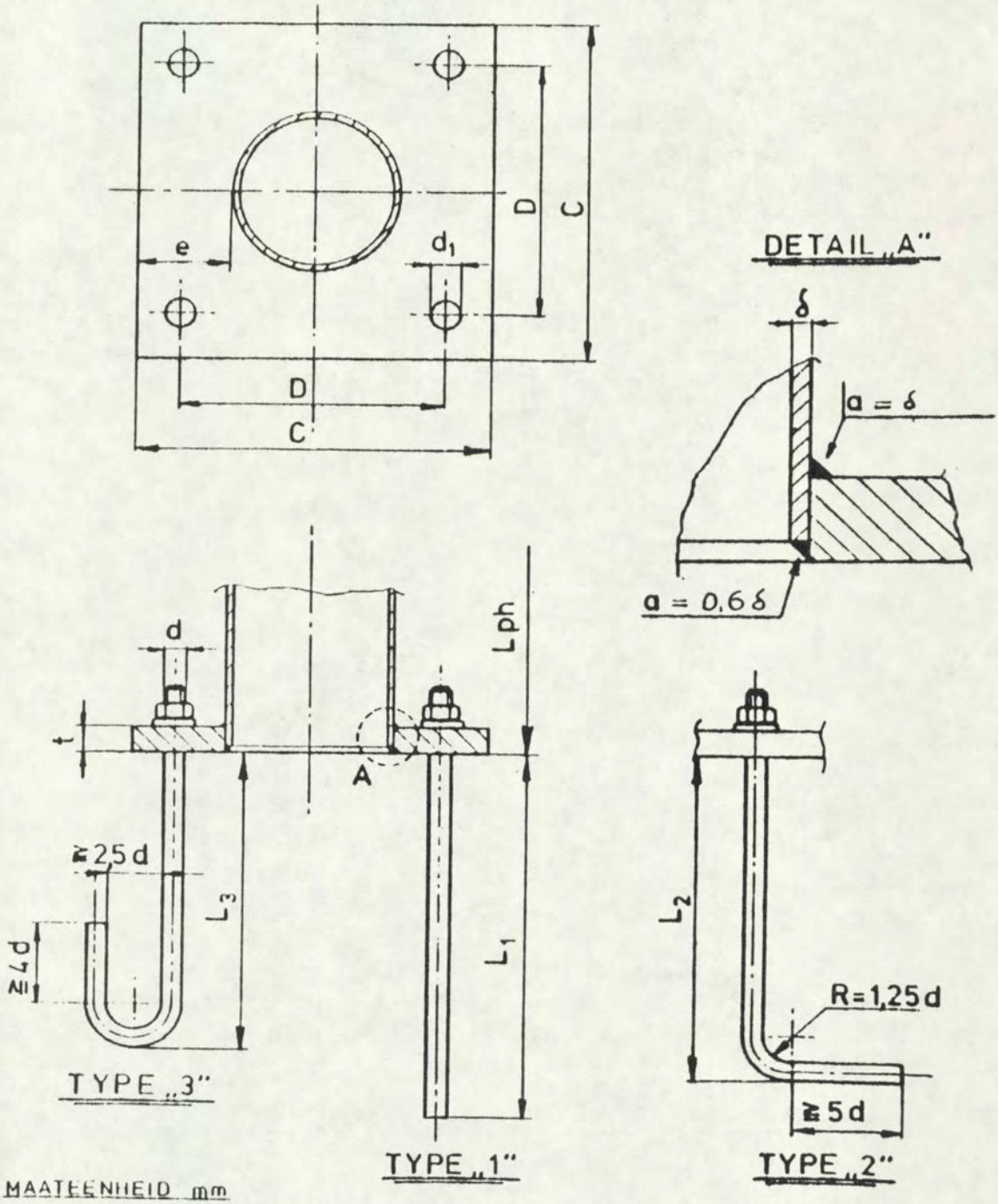
Maateenheid: mm.

	Lichtpunt-hoogte. L_{ph}	t	e	Anker diam.	L_1	L_2	L_3
AFSPANMAST	10m	50	70		1200	1000	800
	12m	50	70	M42	1450	1250	1050
	15m	55	95		1900	1700	1500
TUSSEN-AFSPANMAST	10m	50	70		750	550	500
	12m	50	70	M42	900	700	500
	15m	55	70		1350	1150	900
TUSSEN-MAST	15m	55	70	M42	1150	950	750

t,e,L_1,L_2 en L_3 zijn minimum waarden voor niet vlak aan zee staande lijnverlichtingsmasten.

rijkswaterstaat directie bruggen

Voetplaten voor tussenmasten L_{ph}=10m of 12m:



MAATEENHEID mm

L ph [m]	C	D	d	d_1	L_1	L_2	L_3	e	t
10	550	400	M36	40	1100	950	750	90	50
12	550	400	M36	40	1300	1150	950	90	50

d,L,e en t zijn minimum waarden voor niet vlak aan zee staande lijnverlichtingmasten.

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

6. APPENDIX.

Lph. 15 m

Berekening lijnverlichting (dubbellamps, 4 armaturen SOX 180 W per vak)

Vaklengte	: 90	m	Armatuur :	lengte	:	160	cm
Lichtpunthoogte	: 15	m		hoogte	:	35	"
Masthoogte	: 19	m		breedte	:	51	"
Doorhang	: 3,5	m		gewicht	:	25	kg

Normaal gewicht per vak

Bovendraad	: 8 mm Ø	: 91	x 0,25	= 22,75	kg	
Onderdraad	: 8 mm Ø	: 90	x 0,25	= 22,5	"	
Armaturen	:	4	x 25	= 100	"	
VMvK 6 x 2½ mm^2	:	22,5	x 0,33	= 7,4	"	
" 4 x 2½ "	:	45	x 0,28	= 12,6	"	
Beugels + hangdraden	:			= 3	"	168 kg

IJzelbelasting

Bovendraad :		91 x 0,18 $\sqrt{8}$	= 46 kg
Onderdraad :		22,5 x 0,18 $\sqrt{8}$	= 11 "
Onderdraad + kabel :	omtrek kabel = 60 mm schijnbare Ø = $\frac{60}{\pi}$ = 19 mm.	67,5 x 0,18 $\sqrt{19}$	= 53 "
Armaturen :	ijslaag rondom ca. 7 mm(6,6 mm) omtrek armatuur 164 cm. :	4 x 0,066 x 0,9 x 16,4 x 1,6	= 62 "
			172 kg

Windbelasting

Bovendraad	:	91 x 0,008 x 1,35 x 695	= 683 N
Onderdraad	:	22,5 x 0,008 x 1,35 x 695	= 169 N
Onderdraad met kabel	:	67,5 x 0,019 x 1,15 x 695	= 1025 N
Beugels + hangdraden	:	0,1 x 1,35 x 695	= 94 N
Armaturen	:	5 x 0,95 x 0,22 x 0,8 x 830	= 1487 N
			3458 N — 3460 N.

Verdeling windbelasting : bovendraad ¼ x 3460 = 860 N
onderdraad ¾ x 3460 = 2600 N

Afspanmast.

A. IJzelbelasting

Gewichts + ijzelbelasting : 168 + 172 = 340 kg.

Trekkracht bovendraad : $\frac{3400 \times 90}{8 \times 3,5}$ = 10900 N = 10,9 k

Trekkracht onderdraad : = voorspanning = 5 kN

B. Normale belasting + wind.

Gewichtsbelasting bovendraad : $\frac{1680 \times 90}{8 \times 3,5}$ = 5400 N = 5,4 kN

Windbelasting op onderdraad : 2600 N

Trekkracht op onderdraad : $S_t = (S_t - S_o)\ S_t^2 = \frac{1}{24} \times E \times A \times P^2$

S_t = = 11,95 kN

Zijdelingse uitzwaai : $\frac{2,6 \times 90}{11,95 \times 8}$ = 2,45 m

Aangezien A altijd ongunstiger is dan B, wordt alleen A in de berekening opgenomen.

Tussenmast.

C. Normale windbelasting.

Windbelasting op 19 m : 860 N

Windbelasting op 15 m : 2600 N

D. Draadbreuk bovendraad bij ijslast.

Gewichts- + ijzelbelasting : 340 kg = 3400 N

Trekkracht op onderdraad wordt hierbij : S_t = 13,85 kN

Deze kracht wordt overgedragen op de naastgelegen vakken.

E. Draadbreuk bovendraad bij maximale wind.

Gewichtsbelasting : 168 kg = 1680 N

Windbelasting hierop : 346 kg = 3460 N

Vectorieel samengesteld : 384,6 kg = 3846 N

Trekkracht op onderdraad wordt hierbij : S_t = 14,8 kN

Deze kracht wordt overgedragen op de naastgelegen vakken.

F. Draadbreuk boven- en onderdraad bij maximale wind.

Hierbij moet de trekkracht in de onderdraad, berekend bij E door de mast worden opgenomen. Tengevolge hiervan buigt de mast door, waardoor deze trekkracht lager wordt. Bij ca. 67 % van de max. windbelasting zal de optredende trekkracht worden : 52 % van de oorspronkelijke, = 52 % van 14,8 kN = 7,7 kN

Voor de belasting van een tussenmast zijn C en F maatgevend !

Tussenafspanmast.

G. Draadbreuk boven- en onderdraad bij maximale wind.

Doordat de bovendraad bij deze masten vast is bevestigd, zal de belasting zoals bij E berekend, nu door boven- en onderdraad moeten worden opgenomen. Tengevolge van de doorbuiging van de mast zal, bij 67 % van de max. windbelasting de optredende trekkracht 63 % van de oorspronkelijke zijn. Deze trekkracht verdeelt zich gelijkelijk over boven- en onderdraad.

De trekkracht wordt : 63 % van 14,8 kN = ca. 9,4 kN.

Trekkracht bovendraad : 4,7 kN
" " : 4,7 kN

Berekening lijnverlichting (enkellamps, 5 armaturen SOX 135 W per vak)

Vaklengte	:	90 m	Armaturen :	lengte	:	95 cm
Lichtpunthoogte	:	12 m		hoogte	:	22 "
Masthoogte	:	15,5 m		breedte	:	29 "
Doorhang	:	3 m		gewicht	:	6,5 kg

Normaal gewicht per vak

Bovendraad	: 8 mm Ø	: 91 x 0,25 =	22,75 kg	
Onderdraad	: 8 mm Ø	: 90 x 0,25 =	22,5 "	
Armaturen	:	5 x 6,5 =	32,5 "	
VMvK 5 x 2½ mm²	:	9 x 0,34 =	3,1 "	
" 4 x 2½ "	:	27 x 0,28 =	7,6 "	
" 3 x 2½ "	:	36 x 0,24 =	8,6 "	
beugels + hangdraden	:		3 "	100 kg

IJzelbelasting

Bovendraad		: 91 x 0,18 $\sqrt{8}$ =	46 kg
Onderdraad		: 18 x 0,18 $\sqrt{8}$ =	9 "
Onderdraad + kabel	: omtrek kabel = 60 mm schijnbare Ø = $\frac{60}{\pi}$ = 19 mm.	: 72 x 0,18 $\sqrt{19}$ =	56,5 "
Armaturen	: ijslaag rondom ca. 7 mm, omtrek armatuur 82 cm.	: 5 x 0,07 x 0,9 x 8,2 x 0,95 =	24,5 "
			136 kg.

Windbelasting

Bovendraad	: 91 x 0,008 x 1,35 x 656 =	645 N
Onderdraad	: 18 x 0,008 x 1,35 x 656 =	128 N
Onderdraad met kabel	: 72 x 0,019 x 1,15 x 656 =	1033 N
Beugels + hangdraden	: 0,1 x 1,35 x 656 =	89 N
Armaturen	: 5 x 0,95 x 0,22 x 0,8 x 794 =	665 N
	Totaal :	2560 N

Verdeling : bovendraad : ¼ x 2560 = 640 N

onderdraad : ¾ x 2560 = 1920 N

Afspanmast.

A. IJzelbelasting

Gewichts + ijzelbelasting : 100 + 136 = 236 kg.

Trekkracht bovendraad : $\frac{2360 \times 90}{8 \times 3} = 8850$ N = 8,8 kN.

Trekkracht onderdraad : = voorspanning = 5 kN.

B. Normale belasting + wind.

Gewichtsbelasting bovendraad : $\frac{1000 \times 90}{8 \times 3} = 3750$ N = 3,75 kN.

Windbelasting op onderdraad : 1920 N

Trekkracht op onderdraad $S_t = (S_t - S_o)\ S_t^2 = \frac{1}{24} \times E \times A \times P^2$

$S_t =$ = 10 kN.

Zijdelingse uitzwaai : $\frac{1,92 \times 90}{10 \times 8} = 2,12$ m.

Aangezien A altijd ongunstiger is dan B, wordt alleen A in de berekening opgenomen.

Tussenmast.

C. Normale windbelasting.

Windbelasting op 15,5 m : 0,64 kN.

Windbelasting op 12, m : 1,92 kN.

D. Draadbreik bovendraad bij ijslast.

Gewichts- + ijzelbelasting : 236 kg = 2360 N.

Trekkracht op onderdraad wordt hierbij : $S_t =$ 11,3 kN

Deze kracht wordt overgedragen op de naastgelegen vakken.

E. Draadbreuk bovendraad bij maximale wind.

Gewichtsbelasting : 100 kg = 1000 N

Windbelasting hierop : 256 kg = 2560 N

Vectorieel samengesteld : 2750 N

Trekkracht op onderdraad wordt hierbij : $S_t =$ 12,3 kN

F. Draadbreuk boven- en onderdraad bij maximale wind.

Hierbij moet de trekkracht in de onderdraad, berekend bij E door de mast worden opgenomen. Tengevolge hiervan buigt de mast door, waardoor deze trekkracht lager wordt. Bij ca. 67 % van de max. windbelasting zal de optredende trekkracht worden : 52 % van de oorspronkelijke , = 52 % van 12,3 kN = 6,4 kN

Voor de belasting van een tussenmast zijn C en F maatgevend.

Tussenafspanmast.

G. Draadbreuk boven- en onderdraad bij maximale wind.

Doordat de bovendraad bij deze masten vast is bevestig, zal de belasting, zoals bij E berekend, nu door boven- en onderdraad worden opgenomen. Tengevolge van de doorbuiging van de mast zal, bij 67 % van de maximale windbelasting, de optredende trekkracht 63 % van de oorspronkelijke zijn. Deze trekkracht verdeelt zich gelijkelijk over boven- en onderdraad.

De trekkracht wordt : 63 % van 12,3 kN = ca 7,8 kN.

Trekkracht bovendraad : 3,9 kN

" " : 3,9 kN

Berekening lijnverlichting (enkellamps , 5 lampen SOX 90 W per vak)

Vaklengte	: 90 m	Armaturen	: lengte	:	95	cm
Lichtpunthoogte	: 10 m		hoogte	:	22	"
Masthoogte	: 13,5 m		breedte	:	29	"
Doorhang	: 3 m		gewicht	:	6,5	kg

Normaal gewicht per vak

Bovendraad	: 8 mm Ø	: 91 x 0,25	=	22,75 kg	
Onderdraad	: 8 mm Ø	: 90 x 0,25	=	22,5 "	
Armaturen	:	5 x 6,5	=	32,5 "	
VMvK 5 x 2½ mm^2	:	9 x 0,34	=	3,1 "	
" 4 x 2½ mm^2	:	27 x 0,28	=	7,6 "	
" 3 x 2½ mm^2	:	36 x 0,24	=	8,6 "	
beugels + hangdraden	:			3 "	100 kg

IJzelbelasting

Bovendraad		91 x 0,18 $\sqrt{8}$	=	46 kg
Onderdraad		18 x 0,18 $\sqrt{8}$	=	9 "
Onderdraad + kabel	: omtrek kabel = 60 mm schijnbare Ø = 60:π = 19 mm:	72 x 0,18 $\sqrt{19}$	=	56,5 "
Armaturen	: ijslaag rondom ca. 7 mm, omtrek armatuur 82 cm	: 5 x 0,07 x 0,9 x 8,2 x 0,95	=	24,5 "
				136 kg

Windbelasting

Bovendraad	: 91 x 0,008 x 1,35 x 630	=	619 N
Onderdraad	: 18 x 0,008 x 1,35 x 630	=	122 N
Onderdraad met kabel	: 72 x 0,019 x 1,15 x 630	=	991 N
beugels	: 0,1 x 1,35 x 630	=	85 N
armaturen	: 5 x 0,95 x 0,22 x 0,8 x 770	=	643 N
	Totaal	:	2460 N

Verdeling : bovendraad : ¼ x 2460 = 615 N = 0,61 kN
onderdraad : ¾ x 2460 = 1845 N = 1,85 kN

Afspanmast.

A. IJzelbelasting

Gewichts + ijzelbelasting : 236 kg = 2360 N

Trekkracht bovendraad : $\frac{2360 \times 90}{8 \times 3} = 885$ N = 8,8 kN

Trekkracht onderdraad : = voorspanning = 5 kN

B. Normale belasting + wind.

Gewichtsbelasting bovendraad : $\frac{1000 \times 90}{8 \times 3} = 3750$ N = 3,75 kN

Windbelasting op onderdraad : 1845 N

Trekkracht op onderdraad $S_t = (S_t - S_o)\ S_t^2 = \frac{1}{24} \times E \times A \times P^2$

$S_t =$ 10 kN.

Zijdelingse uitzwaai : $\frac{1,85 \times 90}{10 \times 8} = 2,08$ m

Aangezien A altijd ongunstiger is dan B, wordt alleen A in de berekening opgenomen.

Tussenmast.

C. Normale windbelasting.

Windbelasting op 13,5 m : 0,61 kN.

Windbelasting op 10 m : 1,85 kN.

D. Draadbreuk bovendraad bij ijslast

Gewichts + ijzelbelasting : 236 kg = 2360 N

Trekkracht op onderdraad wordt hierbij : $S_t =$ 11,35 kN

Deze kracht wordt overgedragen op de naastgelegen vakken.

E. Draadbreuk bovendraad bij maximale wind.

Gewichtsbelasting : 100 kg = 1000 N

Windbelasting ⊥ hierop : 246 kg = 2460 N

Vectorieel samengesteld : 2655 N

Trekkracht op onderdraad wordt hierbij : $S_t =$ 12,1 kN.

Deze kracht wordt overgedragen op de naastgelegen vakken.

F. Draadbreuk boven- en onderdraad bij maximale wind.

Hierbij moet de trekkracht in de onderdraad, berekend bij E door de mast worden opgenomen. Tengevolge hiervan buigt de mast door, waardoor deze trekkracht lager wordt. Bij ca. 67 % van de max. windbelasting zal de optredende trekkracht worden : 52 % van de oorspronkelijke, = 52 % van 12,1 = 6,3 kN

Voor de belasting op een tussenmast zijn C en F maatgevend.

Tussenafspanmast.

G. Draadbreuk boven- en onderdraad bij maximale wind.

Doordat de bovendraad bij deze masten vast is bevestigd, zal de belasting, zoals bij E berekend, nu door boven- en onderdraad worden opgenomen. Tengevolge van de doorbuiging van de mast zal, bij 67 % van de maximale windbelasting, de optredende trekkracht 63 % van de oorspronkelijke zijn. Deze trekkracht verdeelt zich gelijkelijk oven boven- en onderdraad.

De trekkracht wordt : 63 % van 12,1 kN = ca. 7,6 kN.

Trekkracht bovendraad : 3,8 kN
" " : 3,8 kN

rijkswaterstaat directie bruggen

LIJNVERLICHTING

(Augustus 1981)

Hoofdafdeling-EM
Afdeling:
BEREKENINGEN

F.W.KRUIJSWIJK.
D.STROOSMA.