RAFLÍNUNEFND
SKIPUÐ AF IÐNAÐARRÁÐUNEYTINU

ÍSINGARHAF

Árni Björn Jónasson
Landsvirkjun Verkfræðideild
Unnið fyrir Raflínunefnd
Reykjavík, desember 1977

RAFLÍNUNEFND

SKIPUÐ AF IÐNAÐARRÁÐUNEYTINU

ÍSINGARHAF

Árni Björn Jónasson
Landsvirkjun Verkfræðideild
Unnið fyrir Raflínunefnd
Reykjavík, desember 1977

Innihald

1. Inngangur

Hannaðar eru tvær gerðir ísingarhafa. Ein gerð sem metur ísingu hornrétt á væntanlega línustefnu og önnur sem metur einnig ísingu samsíða línustefnu. Gefinn er möguleiki á tveim mælisviðum þ.e. 0-33 kg/m og 0-48 kg/m. Aðferð til að meta ísingarþunga er síðan á línuritum. Forsendur útreikninga eru gefnar í kafla 2. Í kafla 3 er stiklað á helstu útreikningum og aðferðum. Teikningar 1, 2 og 3 sýna ísingarhöf.

2. Forsendur útreikninga

2.1 Líkan

Teikning 1 sýnir ísingarhaf. Ísing myndast á vír milli staura I og II. Kraftmælir (nr. 6) gefur togið í vírnum og mesta útslátt milli álestra. Leyst er ástandsjafna vírsins þegar ísing sest á og fundinn mælikvarði á ísingu. Einnig er gerð styrkleikaathugun á staurum.

2.2 Vír

Líking vírs milli tveggja upphengipunkta er með góðri nákvæmni parabola ef hafið milli er minna en 300 m. Bogalengd b er þá [1]

$$b = L + \frac{L^3 \cdot g^2}{24 \cdot H^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (1)$$

þar sem

L er haflengd (m)
g er þyngd á vír (kg/m)
H er láréttur kraftur í vír (kg)

Tognun á vír er samkvæmt Hooks lögmáli

$$\Delta e = \frac{H \cdot e}{A \cdot E} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (2)$$

þar sem

Δe er tognun á vír (m)
H er kraftur í vír (kg)
e er lengd á vír (m)
A er þversniðsflatarmál vírs (mm^2)
E er teygjustuðull vírs (kg/mm^2)

Tognun vegna hitastigs er

$$\Delta f = t \cdot \varepsilon_t \cdot e \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

þar sem Δf er tognun á vír (m)

t er hitastig vírs (°C)

ε_t er hitaþanstuðull vírs ($°C^{-1}$)

Þegar lesið er af ísingarhafi og engin ísing er á vír er nefnt ástand 1. Þegar ísing var milli álestra er nefnt ástand 2. Aukning á bogalengd verður þá skv. (1).

$$b_2 - b_1 = \frac{L^3 \cdot g_2^2}{24 \cdot H_2^2} - \frac{L^3 \cdot g_1^2}{24 \cdot H_1^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Heildartognun á vír er

$$\Delta e_2 - \Delta e_1 + \Delta f_2 - \Delta f_1 = \frac{(H_2 - H_1) \cdot e}{A \cdot E} + (t_2 - t_1) \cdot \varepsilon_t \cdot e \ \ldots \quad (5)$$

þar sem Δe_2 táknar ástand 2 og Δe_1 táknar ástand 1, tilsvarandi merking gildir fyrir aðrar stærðir. Lengd á vír er $e = L + L^*$ og L^* er fjarlægð frá blökk (teikning 1, nr. 5) að kraftmæli. Heildartognunin (5) er jöfn aukningunni á bogalengdinni (4) og leyst fyrir g_2

$$g_2 = \sqrt{g_1^2 \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 + \frac{24 \cdot H_2^2}{L^2} \cdot \left(\frac{H_2 - H_1}{A \cdot E^*} + \varepsilon_t^* \cdot (t_2 - t_1)\right)} \quad (6)$$

þar sem

$$E^* = \frac{E}{\left(1 + \frac{L^*}{L}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

og

$$\varepsilon_t^* = \varepsilon_t \cdot (1+\frac{L^*}{L}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Þungi á ís g_{is} (kg/m) er því

$$g_{is} = g_2 - g_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

þar sem g_1 er þungi vírs. Þetta er miðað við að ísing hafi myndast í logni.

$$g_{is} = \gamma_{is} \cdot \frac{(d+2r)^2-d^2}{4} \cdot \Pi \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

þar sem

γ_{is} er rúmþyngd ísingar (kg/m mm^2)
d er þvermál vírs (mm)
r radial ísing (mm)

og leyst m.t.t.r

$$r = \frac{-d+\sqrt{d^2+4\frac{g_{is}}{\gamma_{is}\cdot\pi}}}{2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

hér er þó rúmþyngd ísingar γ_{is} óþekkt en liggur á bilinu 0.0002 til 0.0009 kg/m mm^2.

Vanalega gerist ísing við ákveðinn vindhraða og gefur það ónákæmni í ákvörðun ísingar sérstaklega fyrir lág gildi á g_2. Þessi ónákvæmni er þó á öruggu hliðinni þ.e. g_2 er metið of hátt. Þungi vegna vindálags er

$$g_v = \frac{v^2 \cdot C \cdot (d+2r)}{16} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

þar sem

v er vindhraði (m/s)

C er formstuðull

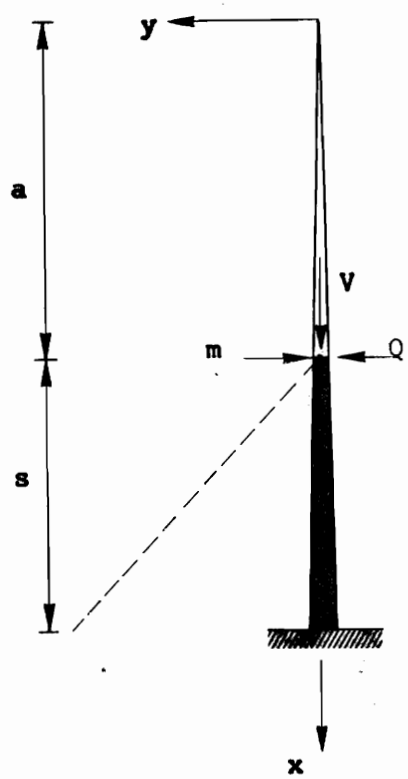
Þá fæst þungi á ís

$$g_{ís} = \sqrt{g_2^2 - g_v^2} - g_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

Til að finna þunga ísingar $g_{ís}$ þarf rúmþyngd ísss og vindhraði að vera þekkt. Setja (10) og (12) inn í jöfnu (13) og leysa m.t.t. r með nálgun og finna $g_{ís}$ af jöfnu (10).

2.3 Staur

Á mynd 1 er líkan af stöguðum tréstaur í ísingarhafi. Líta má á líkanið sem innspenntan keilulaga staur með efri enda á legu sem hreyfist í lóðréttu plani og þrýstir á það með krafti Q. Á staurinn verkar lóðréttur kraftur V sem stafar frá jafnvægi milli stags og vírs og þeim krafti sem leiddur er niður í blökk að kraftmæli.



Mynd 1

Almennt samband milli vægis M og útbeygju y er

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{E \cdot I} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

Vægislíking fæst af mynd 1

$$M = V \cdot y - Q \cdot (x-a) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

Gert er ráð fyrir að tréstaurinn sé keilulaga

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot (m\frac{x}{a})^4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

þar sem

I er tregðuvægi (m^4)

m er radius á staurtoppi (m)

a er fjarlægð frá staurtoppi að keilutoppi (m)

Jafna (15) og (16) settar inn í jöfnu (14) gefur

$$x^4 \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -\alpha^2 \cdot (y - \frac{Q}{V} \cdot (x-a)) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (17)$$

þar sem

$$\alpha^2 = \frac{4V \cdot a^4}{\pi \cdot E \cdot m^4} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (18)$$

Jafna (17) umskrifuð með $x = \frac{1}{z}$ gefur

$$\frac{d^2y}{dz^2} + \frac{2}{z}\frac{dy}{dz} + \alpha^2 \cdot y = \alpha^2 \cdot \frac{Q}{V} \cdot (\frac{1}{z} - a)$$

þar sem homogeni hlutinn er Besselafleiðujafna og óhomogena jafna hefur laustnina

$$y = x \cdot (A \cdot \cos(\frac{\alpha}{x}) + B \cdot \sin(\frac{\alpha}{x})) + \frac{Q}{V} \cdot (x-a) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19)$$

Skilyrði frá mynd 1 eru $(x=a) \Rightarrow (y=o)$ og $(x=a+s) \Rightarrow (y=o)$. Þetta sett inn í jöfnu (19) gefur

$$y = \frac{Q}{V} \cdot \frac{\sin(\frac{\alpha}{x} - \frac{\alpha}{a}) \cdot x}{\sin(\frac{\alpha \cdot s}{a \cdot (a+s)}) - \frac{\alpha}{a+s} \cdot \cos(\frac{\alpha \cdot s}{a \cdot (a+s)})} - \frac{Q}{V} \cdot (x-a) \quad (20)$$

Skilyrði $(x=a+s) \Rightarrow (y=o)$ sett inn í jöfnu (20) gefur

$$tg\left(\frac{\alpha \cdot s}{a(a+s)}\right) = \frac{\alpha s}{a(a+s)}$$

eða

$$tg\eta = \eta \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (21)$$

Minnsta tölulega lausn á jöfnu (21) er $\eta=4.493$ og þá fæst kiknunarkaftur V_k með því að tengja og leysa jöfnur (18), (21) og (22)

$$V_k = \frac{5.047 \cdot \pi \cdot (a+s)^2 \cdot m^4 \cdot E}{s^2 \cdot a^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (23)$$

2.4 Öryggi

Gert er ráð fyrir við mesta álag öryggi 1.5 gegn kiknun og sama öryggi á stagvír og undirstöðum. Hámarksmæling miðast við 60% af brotþoli vírs og reiknast teygjustuðull fasti innan þeirra marka. Gildi á teygjustuðli er valið 6200 kg/mm^2 eins og mælt er með í [3].

3. Hönnun

3.1 Ísingarhaf, gerð .

Á teikningu 1 er ísingarhaf til að mæla ísingu þvert á línustefnu.

Vír milli staura er álblönduvír með

$$g = 1.292 \text{ kg/m}$$
$$d = 28.14 \text{ mm}$$
$$A = 470 \text{ mm}^2$$
$$E = 6200 \text{ kg/mm}^2$$
$$H_{brot} = 13800 \text{ kg}$$

þar sem H_{brot} er brotþol vírsins. Mesti kraftur í vír er 8200 kg <13800 • 0,6 = 8280 kg. Með H_2 = 8200 kg, H_1 = 500 kg og $t_1 = t_2$ fæst úr jöfnum (6) og (9) ísing $g_{ís}$ = 33.1 kg/m fyrir haflengd L = 80 m og $g_{ís}$ = 48.0 kg/m fyrir haflengd L = 50 m.

Stagvír er tvöfaldur stálvír.

$$A = 2x50 \text{ mm}^2$$
$$H_{brot} = 2x7000 \text{ kg}$$

Mesti kraftur í stagvír er $8200 \cdot \sqrt{2,5^2+1^2}/2,5 = 8832$ kg < 2x7000/1.5 = 9333 kg. Vindstög eru úr einföldum fyrrnefndum stálvír.

Staur 1 með mæli á er M-12.5 m (sænskur klassi G). Kiknunarkraftur er skv. (23)

$$V_k = \frac{5.047 \cdot \pi \cdot (17+10)^2 \cdot (0.085)^4 \cdot 10^9}{17^2 \cdot 10^2} = 20878 \text{ kg}$$

Mesti þrýstingur í staur er $8200 + \frac{8200}{2.5} + 35.1 \cdot 40$
$= 12884$ kg $< 20878/1.5 = 13919$ kg.

Staur 2 án mælis er L-12.5 m (sænskur klassi N). Kiknunarkraftur er skv. (23)

$$V_k = \frac{5.047 \cdot \pi \cdot (15+10)^2 \cdot (0.075)^4 \cdot 10^9}{15^2 \cdot 10^2} = 13936 \text{ kg}$$

Mesti þrýstingur í staur er $\frac{8200}{2.5} + 35.1 \cdot 40 = 4684$ kg $<$
$13936/1.5 = 9291$ kg.

3.2 Ísingarhaf, gerð L.

Á teikningu 2 eru tvö ísingarhöf til að mæla ísingu í tvær stefnur hornréttar hvor á aðra. Sömu reglur gilda um burðarþol og áður nema staur 2 fær nú tvöfalt álag þ.e. mesti þrýstingur í staur er $2 \cdot 4684 = 9368$ kg $\sim 13936/1.5 = 9291$ kg.

3.3 Línurit

Komið er að ísingarlausu hafi og lesið gildið H_1 við t_1 °C. Á mælinum er mesti útsláttur H_2 sem reiknað er með að gerst hafi við $t = 0$ °C. Fundinn er sá ísingarþungi g_{is} sem gefur útsláttinn H_2. Gildi á g_{is} eru á öruggu hliðinni (of há) með því að miða við að ísing verði við 0 °C en hún verður á bili 0-30 °C $\cdot H_1$ er nú umreiknað yfir í þann álestur H_1^* sem er við 0 °C skv. jöfnu (6) umritaðri.

$$\frac{24 \cdot H_1^*}{L^2 \cdot E^*} - \frac{g_1}{(H_1^*)^2} = \frac{24 \cdot H_1}{L^2 \cdot E^*} - \frac{g_1}{H_1^2} + \varepsilon_t^* \cdot t_1$$

Þetta er fært inn í línurit I fyrir haflengd L = 80 m og línurit III fyrir haflengd L = 50 m. Miðað við þekkt gildi á H_1^* og H_2 er ísingarþungi g_{is} fundinn úr jöfnum (6) og (9). Þetta er fært inn á línurit II fyrir haflengd L = 80 m og línurit IV fyrir haflengd L = 50 m.

Bókstafamerking

a : fjarlægð (mynd 1)

A : flatarmál

b : bogalengd

C : formstuðull

d : vírþvermál

E : teygjustuðull

E^*: $E/(1+L^*/L)$

g : þungi á legndareiningu

H : kraftur

H_{brot}: brotkraftur

I : tregðuvægi

L : haflengd

L^*: lengd frá blökk að kraftmæli

M : vægi

m : radius staurtopps

Q : kraftur

r : radius

s : lengd

t : hitastig

V : kraftur

v : vindhraði

x : hnit

y : "

z : "

α : $(4Va^4/\ Em^4)^{1/2}$

γ : rúmþyngd

ε_t: hitaþanstuðull

ε_t^*: $\varepsilon_t \cdot (1+L^*)$

η : $\alpha \cdot s/a \cdot (a+s)$

Δf: tognun vegna hitastigs

Δe: " " krafts

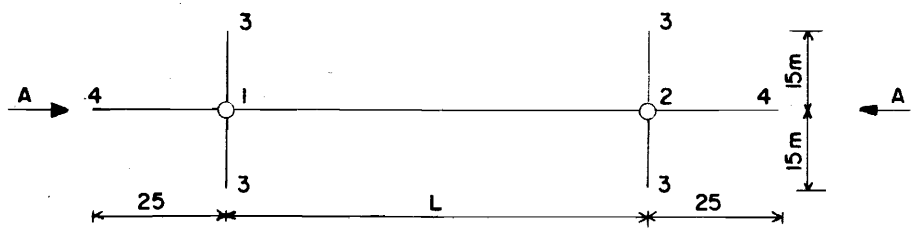
Heimildir

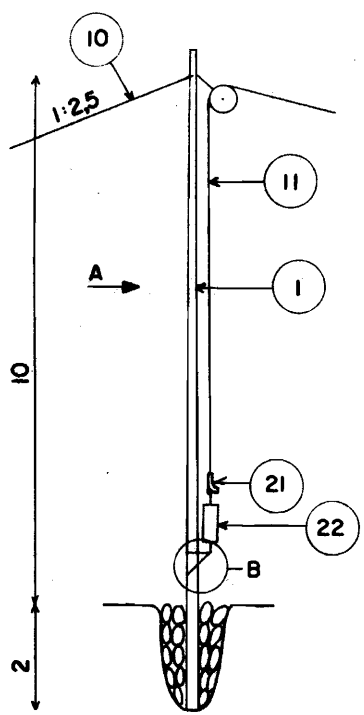
[1] Der Freileitungsbau, Rieger. Fischer, 1975.

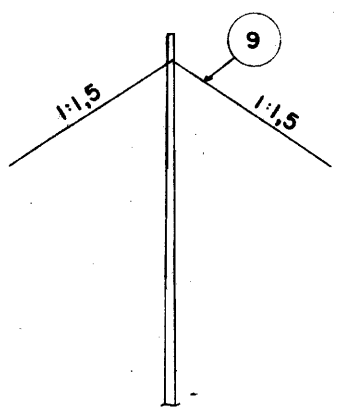
[2] Theory of Elastic Stability, Timoshenko,Gere,1961.

[3] SEN 360101, 1973.

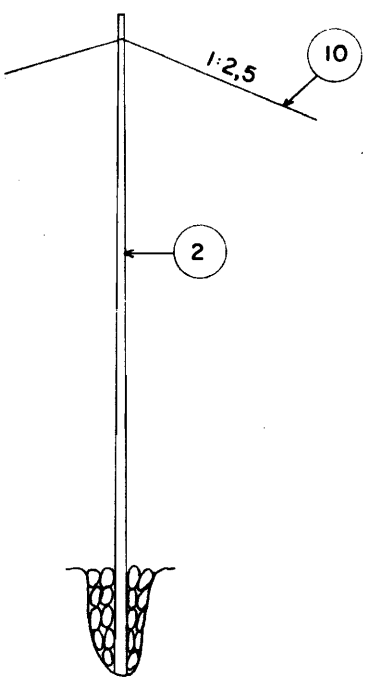
Afstödumynd







Horft í stefnu A



Ísingarhaf, gerð 1

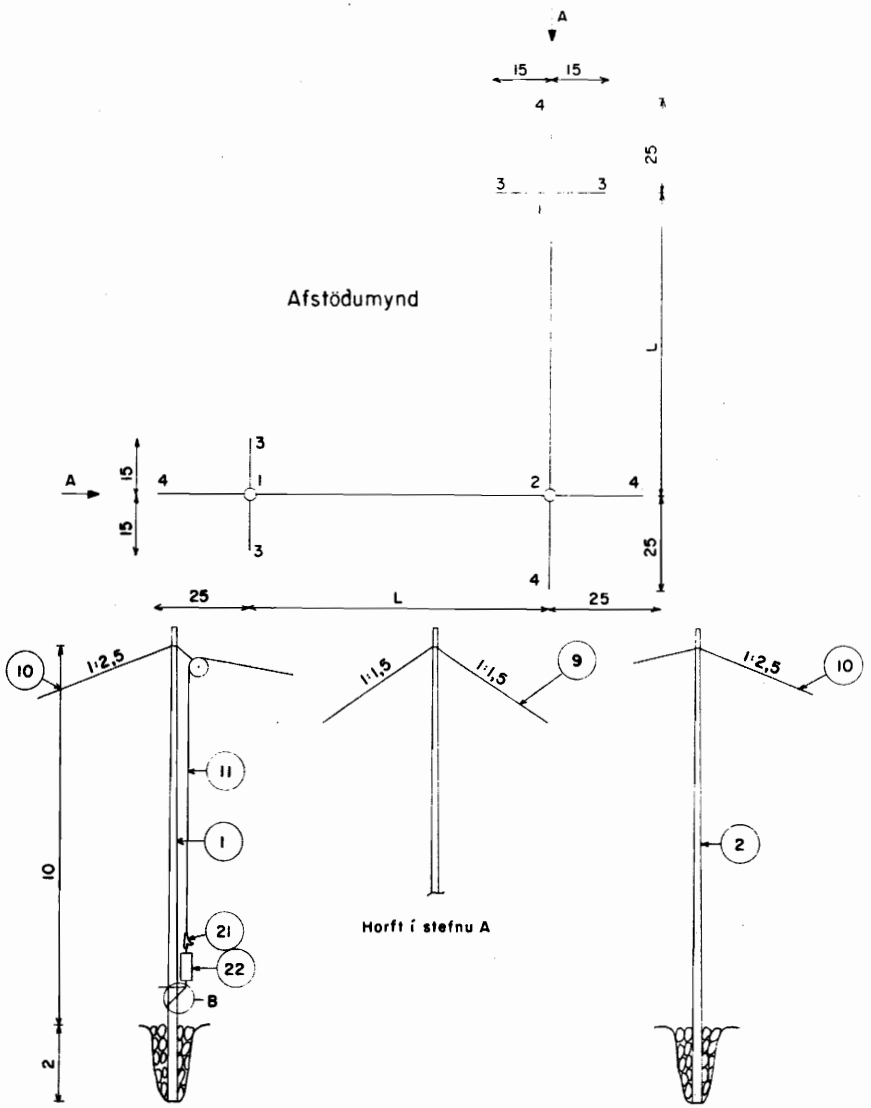
Nr	Magn	Heiti	Tegund
22	1	Kraftmælir	0-9 tonn
21	1	Endaklemma	28,5 mm
20	2	Lás	7/8 × 28
19	2	Bolti m/sk.og sp.sk.	M 20 × 380
18	10	Bolti m/sk.og sp.sk.	M16 × 25
17	2	L-járn	L60×7, lg 450
16	2	L-járn	L100×8, lg 450
15	2	L-járn	L60×7, lg 565
14	6	Staglás	$1\frac{1}{4}$"
13	60	Staglás	5/16"
12	1	Blökk	1,5 × 12 tonn
11	1	Alblönduvír	470mm², (L+10) m
10	2	Stagvír	50mm², 60 m
9	4	Stagvír	50mm², 24mm
8	2	Strekkjari m/oki	1,5 × 8,8 tonn
7	4	Strekkjari	1,5 tonn
6	2	Stagteinn	1,5 × 8,8 tonn
5	4	Stagteinn	1,5 tonn
4	2	Stagfesta	1,5 × 8,8 tonn
3	4	Stagfesta	1,5 tonn
2	1	Staur	L-12,5 m
1	1	Staur	M-12,5 m

Öll ónefnd mál eru m

ORKUSTOFNUN

Ísingarhaf, teikning 1

77-11-16 ABJ/e	
T-478	
B-Ým	
F-16294	



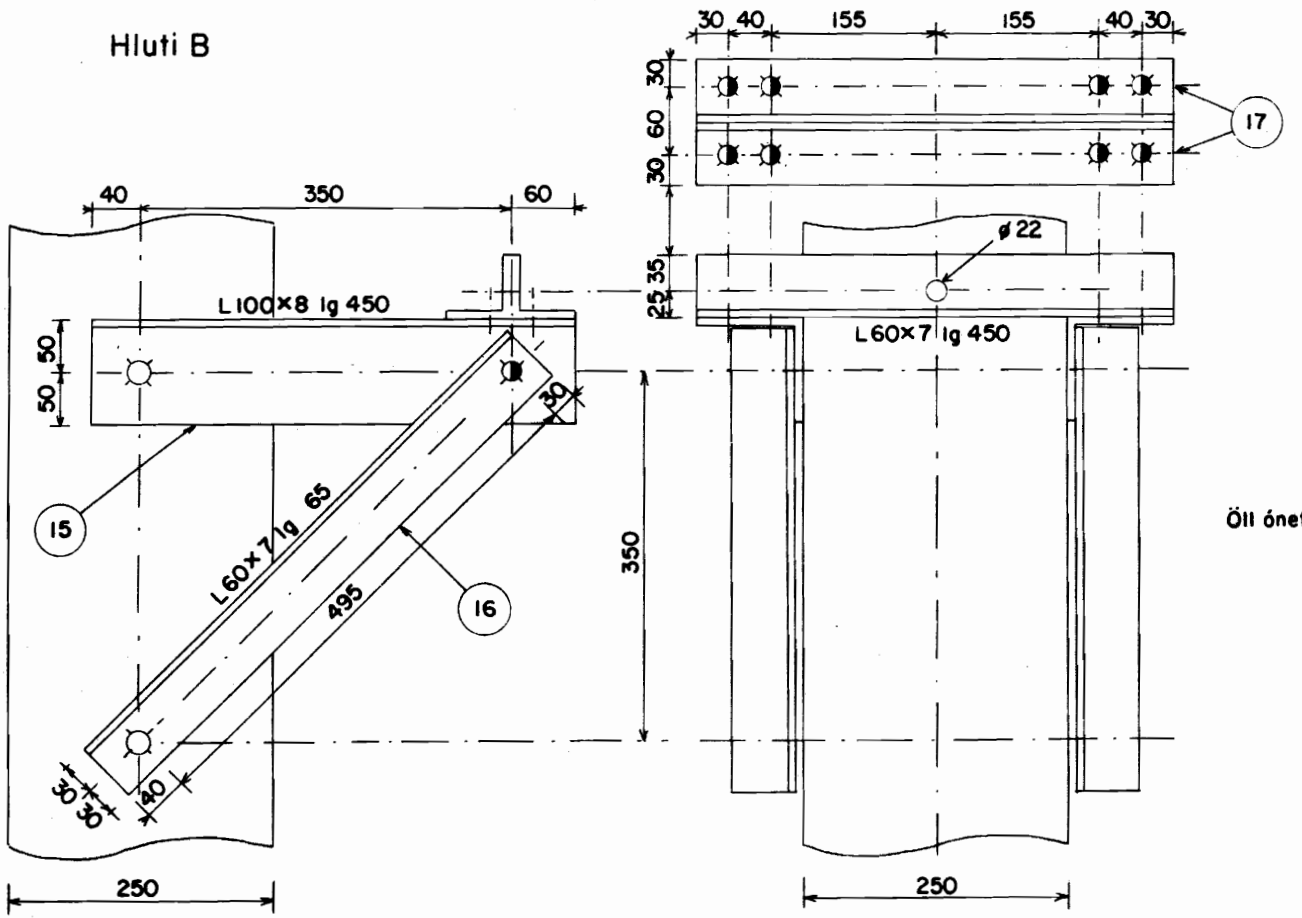
Ísingarhaf, gerð L

Nr.	Magn	Heiti	Tegund
22	2	Kraftmælir	0-9 tonn
21	2	Endaklemma	28,5 mm
20	4	Lás	7/8×28
19	4	Bolti m/sk.og sp.sk.	M20×380
18	20	Bolti m/sk.og sp.sk.	M16×25
17	4	L-járn	L60×7, lg 450
16	4	L-járn	L100×8, lg 450
15	4	L-járn	L60×7, lg 565
14	12	Staglás	1 1/4"
13	72	Staglás	5/16"
12	2	Blökk	1,5×12 tonn
11	2	Álblönduvír	470mm², (L+10) m
10	4	Stagvír	50mm², 60m
9	4	Stagvír	50mm², 24m
8	4	Strekkjari m/oki	1,5×8,8 tonn
7	4	Strekkjari	1,5 tonn
6	4	Stagteinn	1,5×8,8 tonn
5	4	Stagteinn	1,5 tonn
4	4	Stagfesta	1,5×8,8 tonn
3	4	Stagfesta	1,5 tonn
2	1	Staur	N-12,5m
1	1	Staur	M-12,5m

Öll ónefnd mál eru m

ORKUSTOFNUN		
Ísingarhaf, teikning 2		
77-11-16 ABJ/e	T-479	F-16295
	B-Ým.	

Hluti B



Öll ónefnd mál eru í mm

Stál St 37

M20×380

M16×25

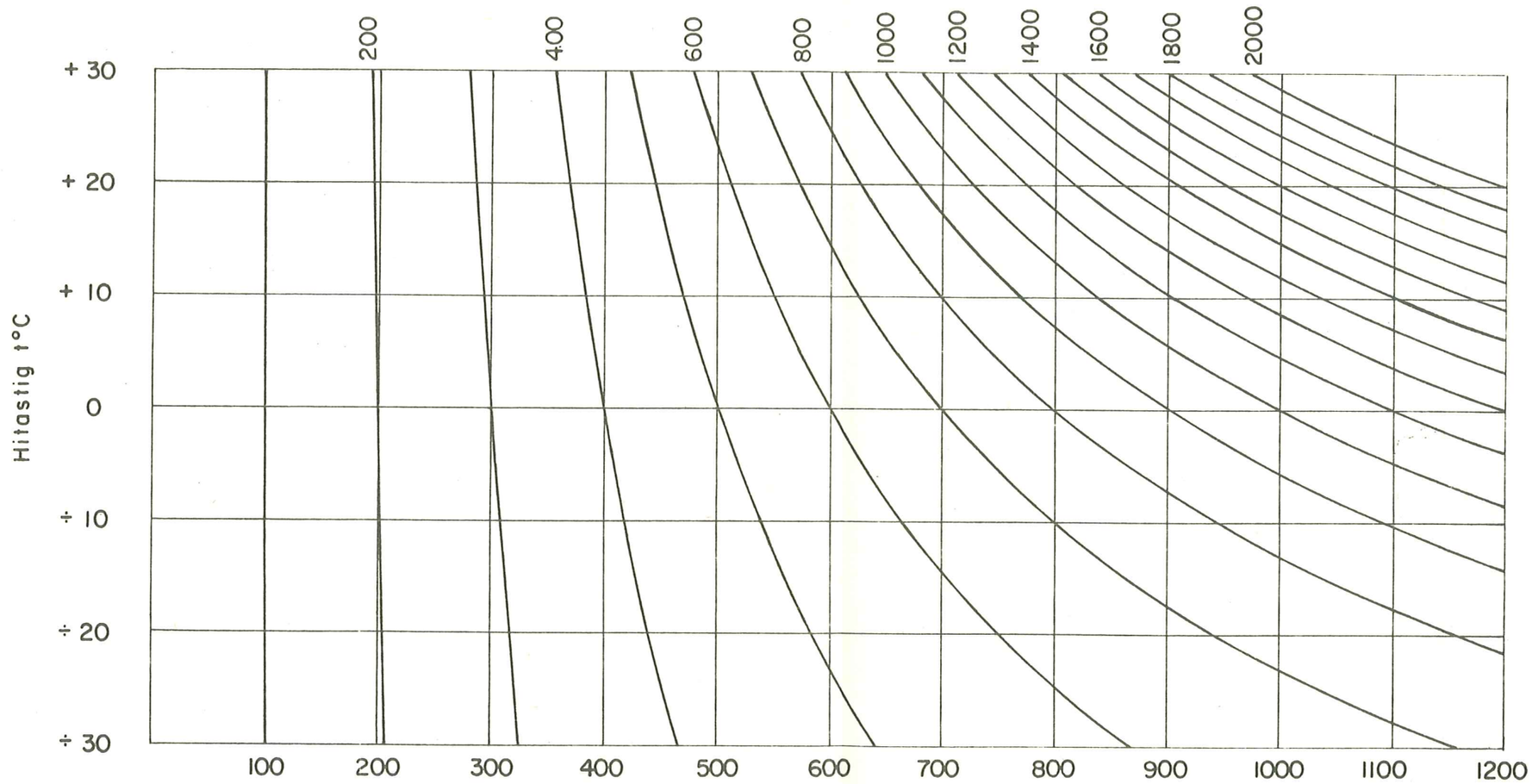
Allir boltar eru með

skinnu og spenniskífu

ORKUSTOFNUN	77-11-16 ABJ/e
Ísingarhaf, teikning 3	T-480
	B-Ým.
	F-16296

LÍNURIT I

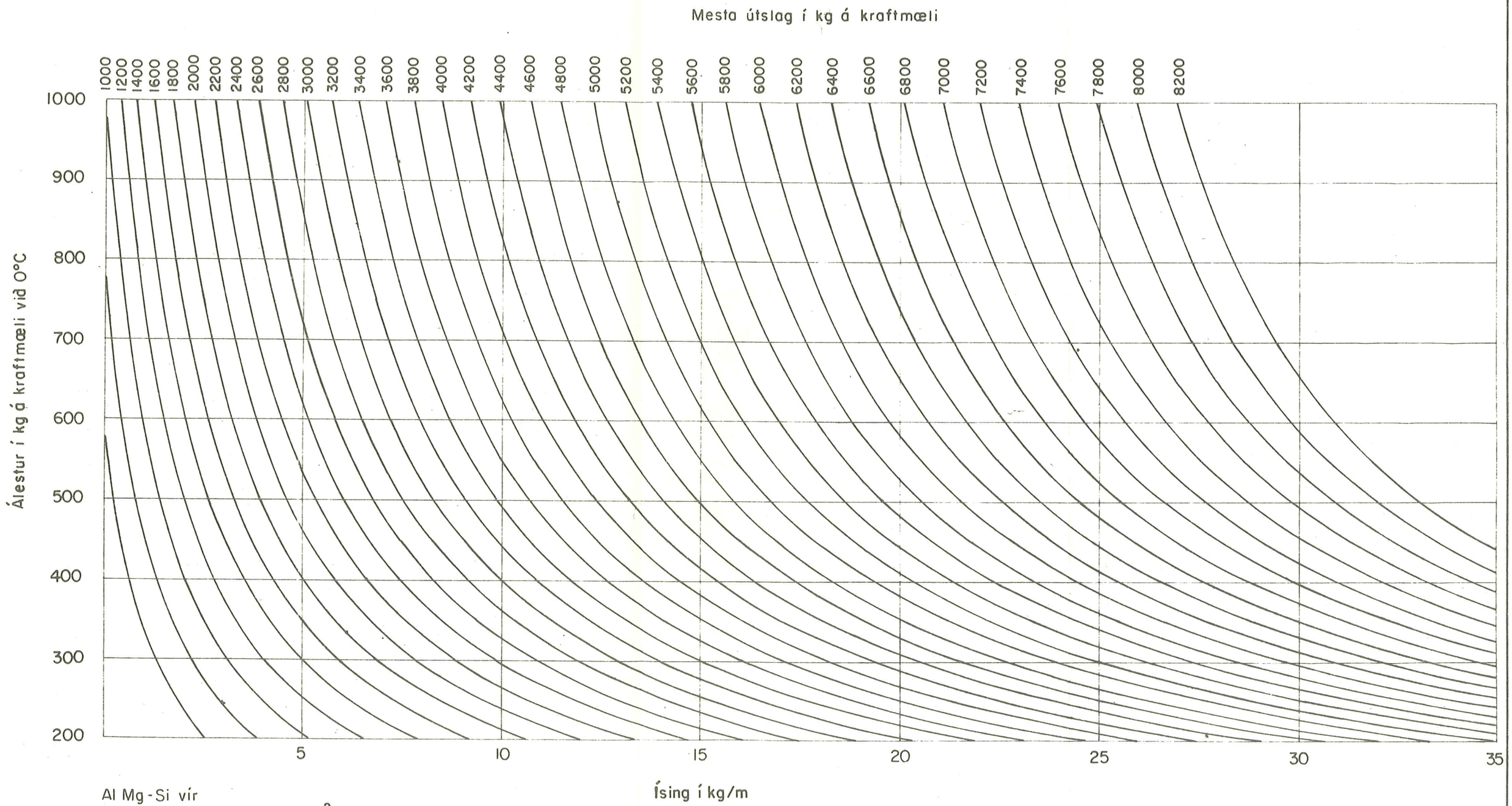
Al Mg-Si vír
rúmþyngd 0,00275 kg/mm²
teygjustuðull 6200 kg/mm²
hitaþanstuðull $23 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}
þversniðsflatarmál 470 mm²
haflengd 80 m
vírlengd 88 m



Dæmi : Komið er að ísingarhafi og lesið 600 kg við −10°C og mesta útslag á kraftmæli 3100 kg. 600 kg við −10°C gefur 554 kg við 0°C skv. línuriti I. 555 kg við 0°C ásamt mesta útslagi á kraftmæli 3100 kg gefur 8,0 kg/m ísingu skv. línuriti II.

ORKUSTOFNUN	77-11-16 ABJ/e
	T-474
Ísingarhaf, línurit I	B-Ým.
	F-16290

LÍNURIT II

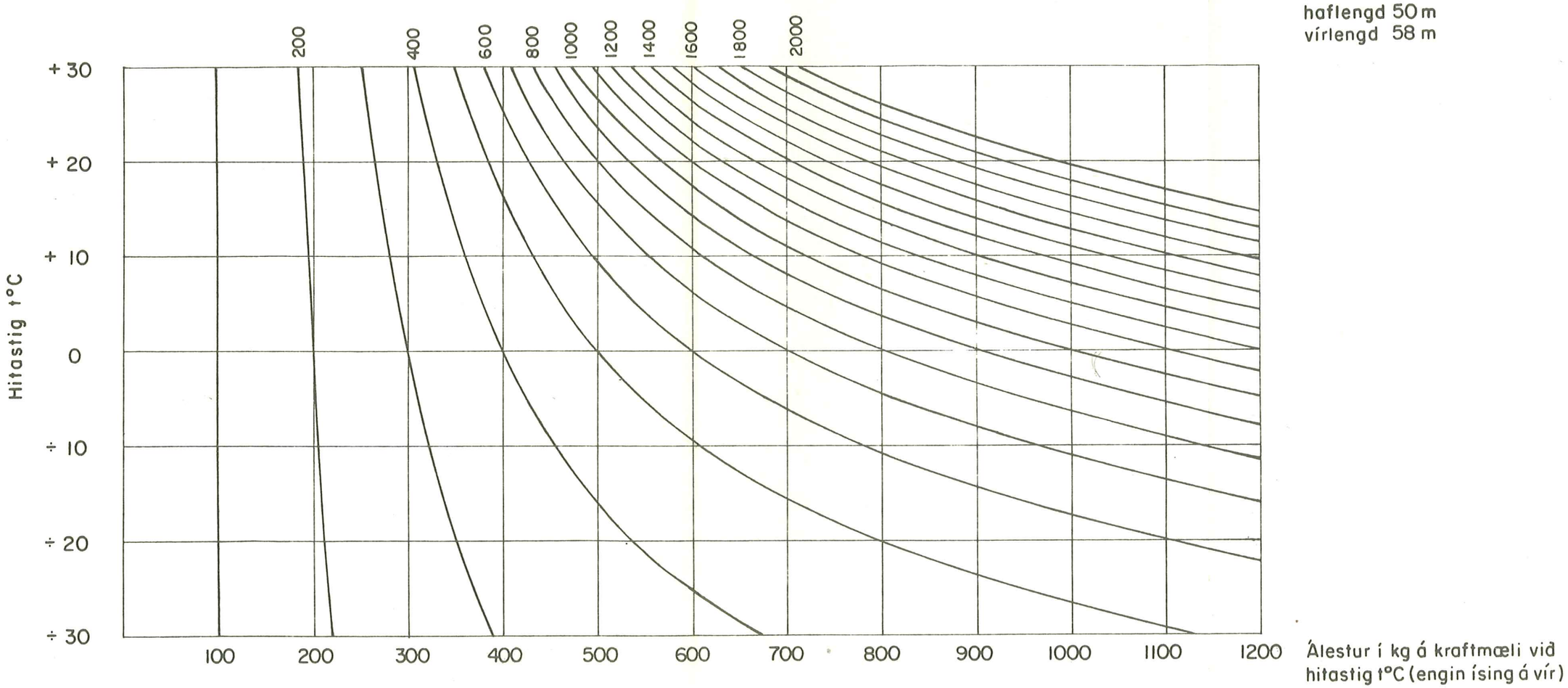


Al Mg-Si vír
rúmþyngd 0,00275 kg/mm²
teygjustuðull 6200 kg/mm²
þversniðsflatarmál 470 mm²
haflengd 80 m
vírlengd 88 m

ORKUSTOFNUN	77-11-16 ÁBJ/e
	T-475
Ísingarhaf, línurit II	B-Ým.
	F-16291

LÍNURIT III

Álestur í kg á kraftmæli við 0°C



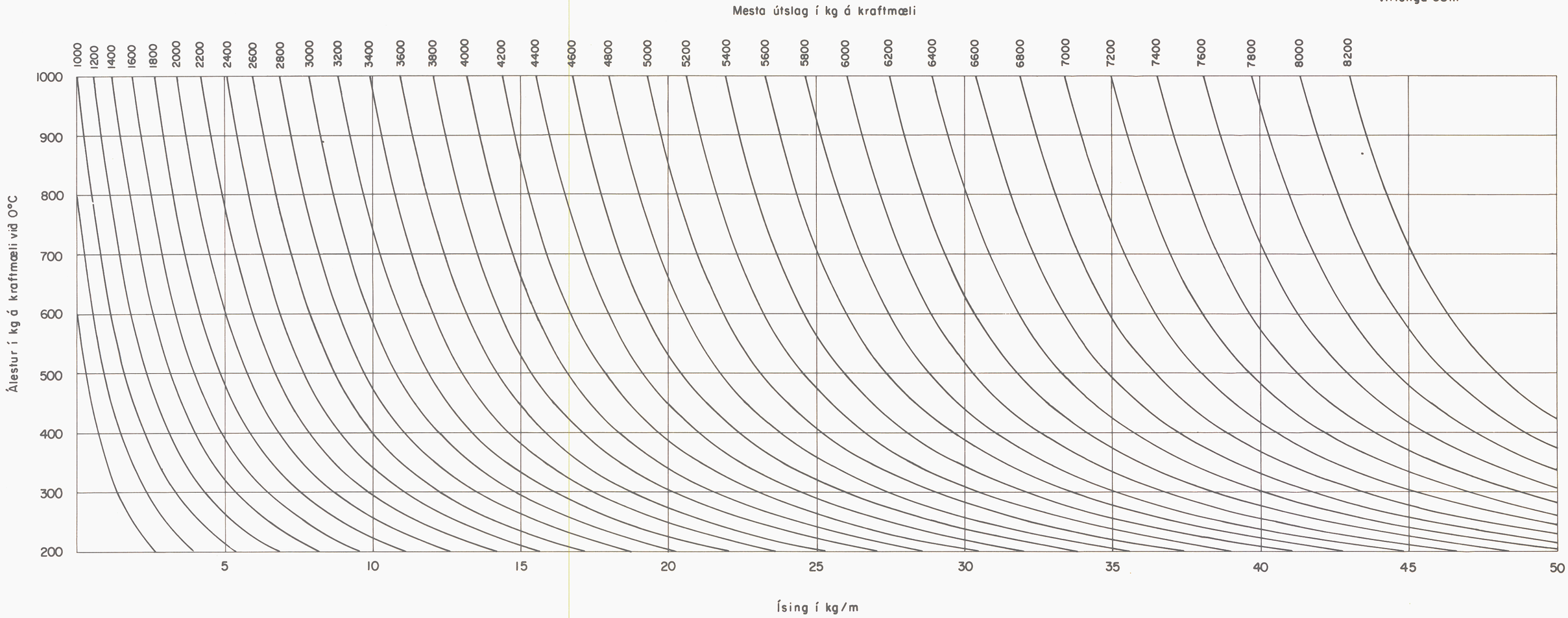
Al Mg-Si vír
rúmþyngd 0,00275 kg/mmm²
teygjustuðull 6200 kg/mm²
hitaþanstuðull $23 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}
þversniðsflatarmál 470 mm²
haflengd 50 m
vírlengd 58 m

Dæmi : Komið er að ísingarhafi og lesið 600 kg við - 10°C og mesta útslag á kraftmæli 3100 kg. 600 kg við -10°C gefur 495 kg við 0°C skv. línuriti I. 495 kg við 0°C ásamt mesta útslagi á kraftmæli 3100 kg gefur 11,3 kg/m ísingu skv. línuriti IV

ORKUSTOFNUN	77-11-16 ABJ/e
	T-476
Ísingarhaf, línurit III	B-Ým.
	F-16292

LÍNURIT IV

Al Mg-Si vír
rúmþyngd 0,00275 kg/mm²
teygjustuðull 6200 kg/mm²
þversniðsflatarmál 470 mm²
haflengd 50 m
vírlengd 58 m



ORKUSTOFNUN	77-11-16 ABJ/e
	T-477
Ísingarhaf, línurit IV	B-Ým.
	F-16293