



ORKUSTOFNUN
JARÐHITADEILD

STYRKLEIKI FÓÐURRÖRA Í HÁHITABORRHOLUM

GUÐMUNDUR BJÖRNSSON
KARL RAGNARS
SIGURÐUR SIGFÚSSON
ÞORBJÖRN KARLSSON

ORKUSTOFNUN
Laugavegi 116, R.

VIRKIR HF.
Höfðabakka 9, R.

VST HF.
Ármúla 4, R.

OS JHD 7805

Febrúar 1978



ORKUSTOFNUN
JARÐHITAEILD

STYRKLEIKI FÓÐURRÖRA Í HÁHITABORHOLUM

GUÐMUNDUR BJÖRNSSON
KARL RAGNARS
SIGURÐUR SIGFÚSSON
ÞORBJÖRN KARLSSON

ORKUSTOFNUN
Laugavegi 116,R.

VIRKIR HF.
Höfðabakka 9,R

VST HF.
Ármúla 4,R

OS JHD 7805

Febrúar 1978

E F N I S Y F I R L I T

	Bls.
ÚTDRÁTTUR	1
1. Inngangur	2
2. Efnasamsetning og styrkleiki fóðurröra	2
2.1 API staðall	2
TAFLA I	3
TAFLA II	3
2.2 Aðrir staðlar og upplýsingar framleiðenda fóðurröra	4
TAFLA III	5
TAFLA IV	8
3. Leyfilegar spennur	11
4. ASME- staðallinn	11
4.1 Almenn lýsing - fjaðrandi efnissvörun	11
4.1.1 Grunnspennur	11
4.1.2 Aukaspennur	11
TAFLA V	12
4.1.3 Toppspennur	13
TAFLA VI	14
TAFLA VII	16
4.2 Plastisk efnissvörun	17
4.3 Skrúfaðar tengingar	19
5. Hönnun fóðurröra	19
5.1 Togálag vegna þyngdar fóðurröra	20
5.2 Þrýstingur utan frá	20
TAFLA VIII	21
5.3 Innri þrýstingur og hitaþensla	22
5.4 Fóðrunardýpi	25
5.5 Samsetning fóðurröra	29

	Bls.
6. Samantekt og lokaorð	30
7. Heimildarrit	32
1. mynd	33
2. mynd	34
3. mynd	36
4. mynd	37
5. mynd	38
6. mynd	39
7. mynd	40
8. mynd	41
9. mynd	42
10. mynd	43
11. mynd	44
12. mynd	45
13. mynd	46
14. mynd	47
15. mynd	48
Fylgirit 1	

Útdráttur

Í þessari skýrslu eru kannaðir eiginleikar og styrkleiki staðlaðra fóðurröra skv. API stöðlum. Fundin er minnsta leyfileg veggþykkt fóðurröra við mismunandi hita og þá miðað við ASME Boiler and Pressure Vessel Code, sem leyfir efnisáraun umfram flotmörk við viss skilyrði.

Efnisáraun vegna hitaþenslu er leyfð að vissu marki fyrir heil rör, en álagspól skrúfaðra tenginga er lítið eða aðeins þriðjungur til helmingur álagspóls heilla röra. Er því ljóst, að forðast skal skrúfaðar tengingar en sjóða rörin heldur saman eða styrkja tengingar á einhvern hátt.

Gerð er athugun á þrýstingsdreifingu í háhitaborholum og út frá þeim fundinn nauðsynlegur styrkleiki holutoppbúnaðar og gerðir og þykktir fóðurröra fyrir mismunandi holudýpi. Er þar miðað við, að rörin séu heil en ekki skrúfuð saman.

Fóðrun borhola á háhitasvæðum

1. Inngangur

Reynslan af borunum á háhitasvæðum hérlendis hefur sýnt, að reikna má með innstreymishita og þrýstingi, sem miðast við suðumarksferil á innstreymisdýpi. Þetta þýðir, að í 2000 m djúpum holum má reikna með ca. 340°C innstreymishita á botni og 145 kg/cm² þrýstingi. Við þessar aðstæður getur það verið erfiðleikum bundið að hanna fóðurrör fyrir borholurnar þannig, að hefðbundnum skilyrðum sé fullnægt, sem miðast við það að halda efni í fóðurrörum innan flotmarka.

Amerískir staðlar leyfa flot á efni innan ákveðinna marka. Þetta hefur t.d. verið tekið upp í staðal fyrir þrýsti-pípur (ANSI B 31.1 og B 31.3, heimildarrit 1) og einnig í ASME Bolier and Pressure Vessel Code (Section VIII, Division 2, Alternative rules, heimildarrit 2).

Hönnunaraðferðir samkvæmt ofangreindum tveim stöðlum eru mjög sambærilegar og gefa líkar niðurstöður. Við hönnun fóðurröra í borholum verður hér miðað við ASME-staðalinn.

2. Efnasamsetning og styrkleiki fóðurröra

2.1 API staðall

Við fóðranir borhola er algengast að nota fóðurrör framleidd skv. API-staðli (American Petroleum Institute Spec. 5 A) og verður miðað við þá gerð hér. Um efnasamsetningar og framleiðslu stáls í þessum fóðurrörum segir API-staðallinn (heimildarrit 3):

Framleiðsluaðferð stáls	Hámarksinnihald í %	
	Fosfór	Brennisteinn
Electric furnace, open-hearth eða basic oxygen	0.04	0.06

Fóðurrörin eru framleidd í ýmsum styrkleikaflokkum og gefur staðallinn eftirfarandi upplýsingar um styrkleika stálsins (heimildarrit 3 og 4):

T A F L A I.

Styrkleiki fóðurröra samkvæmt API-staðli.

Stál- flokkur	Flotmörk í kg/mm ²		Brotþol kg/mm ²	Lenging % 2" sýni
	Lágmark	Hámark		
H-40	28.1	-	42.2	29.5
J-55	38.7	56.2	52.7	24.0
K-55	38.7	56.2	66.8	19.5
C-75	52.7		66.8	19.5
N-80	56.2	77.3	70.3	18.5
P-110	77.3		87.9	15.5

Við framleiðslu röra samkvæmt API staðli er hvert rör prófað við statiskan þrýsting, sem fundinn er með jöfnunni

$$p = 200 s \cdot t/D$$

þar sem p = prófunarþrýstingur kg/cm²
 s = leyfileg spennan, kg/mm², sjá töflu II
 t = veggþykkt rörs, mm
 D = utanmál rörs, mm

Prófunarþrýstingur skal þó ekki fara yfir það hámarksgildi, sem gefið er í töflu II.

T A F L A II.

Leyfilegar spennur, s , við ákvörðun prófunarþrýstings:

Stál- flokkur	Leyfilegar spennur, s , kg/mm ²		Hámarksprófunarþr. kg/cm ²
	$D \leq 9 \frac{5}{8}"$	$D \geq 10 \frac{3}{4}"$	
H-40	22.5	16.9	211
J-55	30.9	23.2	211
K-55	30.9	23.2	211
C-75	42.2	42.2	703
N-80	45.0	45.0	703
P-110	61.9	61.9	703

Frekari upplýsingar um framleiðslu, efnasamsetningu og styrkleika fódurröra er ekki að fá úr API stöðlum (heimildarrit 3 og 4).

2.2 Aðrir staðlar og upplýsingar framleiðenda fódurröra

Upplýsingar um efnasamsetningar og styrkleika fódurröra, sem keypt hafa verið til landsins, eru dregnar saman í Töflu III, og eru þar til samanburðar sýndar hliðstæðar tölur fyrir ýmsar stálgerðir, sem notaðar eru í rör samkvæmt DIN og ASTM stöðlum (heimildarrit 5 og 6). Einnig er í töflunni að finna sömu upplýsingar um fódurrör fjögurra amerískra framleiðanda, sem birtar eru í grein eftir P.D. Thomas (heimildarrit 7, framleiðendur eru kallaðir A, B, C og D).

API staðallinn segir ekkert um styrkleika fódurröra við háan hita, enda hefur hiti í borholum ekki verið mikið vandamál við olíuboranir. Í heimildarriti 7 er skýrt frá athugunum á fódurrörum fjögurra framleiðenda, A, B, C og D, við mismunandi hita og eru þær upplýsingar teknar saman í töflu IV. Í sömu töflu eru einnig upplýsingar um styrkleika heildreginna stálröra við mismunandi hita samkvæmt DIN og ASTM stöðlum (heimildarrit 5 og 6).

Leitað hefur verið upplýsinga um eiginleika fódurröra frá Mannesmann Röhrenwerke AG. Samkvæmt upplýsingum frá þeim er H-40 fódurrörastál líkt og DIN St. 45.8 og hlutfallsleg lækkun flotmarka J-55 við hækkingu hita ekki meiri en sú lækkun, sem gefin er í handbókum fyrir DIN St. 45.8 (sjá töflur III, IV og V). Þessar upplýsingar er að finna í Fylgiriti I með þessari skýrslu.

Ameríski katla- og geymastaðallinn (heimildarrit 2) gefur brotþol við hækkingu hita, og kemur þar fram, að öll ASTM-stál, sem notuð eru í heildregin rör, hafa óbreytt brotþol upp í 340°C (650°F).

. TAFLA III

Yfirlit yfir efnainnihald fóðurröra og samanburður við stáltegundir í heildregnum rörum samkvæmt DIN og ASTM stöðlum.

	Stáltegund	Efnainnihald í %										Brotþol kg/mm ²	Flotmörk kg/mm ²	Lenging %
		C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr						
H-40	API-staðall	-	-	-	≤ 0.04	≤ 0.06	-	-	-	-	≈ 42.2	≈ 28.1	≈ 29.5	
	Mannesmann (76)	0.181	0.201	0.883	0.0201	0.0163	-	-	-	-	54.9	42.0	30.8	
	J.D. Thomas (C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63.3	33.0	21.5	
J-55	API-staðall	-	-	-	≤ 0.04	≤ 0.06	-	-	-	-	≈ 52.7	38.7-56.2	≈ 24.0	
	Mannesmann (70)	0.38	0.30	1.24	0.026	0.017	-	-	-	-	72.1	45.4	28.5	
	Mannesmann (76)	0.36	0.28	1.32	0.016	0.015	-	-	-	-	74.2	46.7	23.9	
	J.D. Thomas (A)	0.48	-	1.22	0.030	0.035	-	-	-	-	71.8	46.4	26.0	
	J.D. Thomas (B)	0.46	0.01	1.26	0.011	0.021	-	-	-	-	75.9	41.7	21.5	
	J.D. Thomas (C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74.9	40.8	24.0	
	Rohrwerk Roman '77	-	-	-	0.020	0.021	-	-	-	-	72.4	44.5	25.8	
C-75	API-staðall	-	-	-	≤ 0.04	≤ 0.06	-	-	-	-	≈ 66.8	≈ 52.7	≈ 19.5	
	Brit-Steel Corp(76)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.1	57.9	30.0	
	J.D. Thomas (A)	0.43	0.20	1.55	0.020	0.033	0.18	-	-	-	68.4	50.5	22.5	
	Tubexport	28-34	←.35	1.0-1.2	←0.04	←0.06	-	-	-	-	-	-	-	
	Rohrwerk Roman '77	0.44	0.27	1.53	0.024	0.020	-	-	-	-	76.2	57.8	27.0	
N-80	API-staðall	-	-	-	≤ 0.04	≤ 0.06	-	-	-	-	≈ 70.3	56.2-77.3	≈ 18.5	
	J.D. Thomas (A)	0.30	0.18	1.08	0.021	0.020	-	-	-	-	79.2	69.0	20.0	
	J.D. Thomas (B)	0.47	0.22	1.42	0.015	0.015	0.18	0.12	-	-	87.2	58.8	19.0	
	J.D. Thomas (C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.7	60.5	21.5	
	J.D. Thomas (D1)	0.38	0.20	1.65	0.011	0.016	0.14	0.045	-	-	81.6	59.3	21.0	
	J.D. Thomas (D2)	0.38	0.24	0.85	0.007	0.025	-	-	-	-	81.0	68.1	24.0	

TAFLA III

Yfirlit yfir efnainnihald fóðurröra og samanburður við stáltegundir í heildregnum rörum samkvæmt
DIN og ASTM stöðlum.

Stáltegund	Efnainnihald í %										Brotþol kg/mm ²	Flotmörk kg/mm ²	Lenging %
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr						
API-staðall	-	-	-	≤ 0.04	≤ 0.06	-	-	≥ 87.9	≥ 77.3	≥ 15.5			
J.D. Thomas (A)	0.31	0.21	1.46	0.016	0.020	-	-	92.8	83.2	20.0			
J.D. Thomas (B)	0.39	0.24	1.48	0.01	0.01	0.016	0.017	102.3	90.6	14.5			
J.D. Thomas (C)	-	-	-	-	-	-	-	99.8	90.7	17.5			
J.D. Thomas (D)	0.34	0.19	1.54	0.015	0.014	0.048	-	89.8	76.5	22.0			
St.35 Rohre	≤ 0.18	-	-	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	35-45	24	25			
St.45 mit	≤ 0.25	-	-	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	45-55	26	21			
St.55 Gütevor-	≈ 0.36	-	-	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	55-65	30	17			
St.52 schriften	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.50	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	52-62	36	22			
St.35.4 Rohre mit	≤ 0.17	0.1-0.35	≥ 0.40	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	35-45	24	25			
St.45.4 besonderen	≤ 0.22	0.1-0.35	≥ 0.40	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	45-55	26	21			
St.55.4 Gütevor-	≈ 0.36	0.1-0.35	≥ 0.40	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	55-65	30	17			
St.52.4 schriften	≤ 0.20	0.1-0.55	≤ 1.50	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	52-62	36	22			
St.35.8	≤ 0.17	≤ 0.35	≥ 0.40	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	35-45	24	25			
St.45.8 Warm-	≤ 0.22	0.1-0.35	≥ 0.45	≤ 0.05	≤ 0.05	-	-	45-55	26	21			
15Mo3 feste	0.12-0.20	0.15-0.35	0.50-0.80	≤ 0.04	≤ 0.04	0.25-0.35	-	45-55	29	22			
13CrMo44 Stähle	0.10-0.18	0.15-0.35	0.40-0.70	≤ 0.04	≤ 0.04	0.40-0.50	0.7-1.0	45-58	30	22			
10CrMo910	≤ 0.15	0.15-0.50	0.40-0.60	≤ 0.04	≤ 0.04	0.9-1.1	2.0-2.5	45-60	27	20			

TAFLA III

Yfirlit yfir efnainnihald fódurröra og samanburður við stáltegundir í heildregnum rörum samkvæmt DIN og ASTM stöðlum.

Stáltegund	Efnainnihald í %										Flotmörk kg/mm ²	Brotból kg/mm ²	Lenging %
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr						
ASTM A 106 A	≤ 0.25	≥ 0.10	0.27-0.95	≤ 0.048	≤ 0.058	-	-	33.7	21.1	28			
ASTM A 106 B	≤ 0.30	≥ 0.10	0.29-1.06	≤ 0.048	≤ 0.058	-	-	42.2	24.6	22			
ASTM A 106 C	≤ 0.35	≥ 0.10	0.29-1.06	≤ 0.048	≤ 0.058	-	-	49.2	28.1	20			
ASTM A 335	0.1-0.2	0.1-0.5	0.3-0.8	0.03-0.045	0.03-0.045	-	-	38.7-42.2	21.1	22			
ASTM A 376	0.04-0.1	≤ 0.75	≤ 2.0	0.03	0.03	-	-	52.7	21.1	28			
ASTM A524 I	≤ 0.21	≤ 0.10	0.9-1.35	≤ 0.048	≤ 0.058	-	-	42.2-59.8	24.6	22			
ASTM A 524 II	≤ 0.21	≤ 0.10	0.9-1.35	≤ 0.048	≤ 0.058	-	-	38.7-56.2	21.1	12			

TAFLA IV

Flot- og brotspennur fóðurröra við mismunandi hita skv. heimildarríti 7. Samanburður við ýmsar rörastálgerðir skv. DIN og ASTM stöðlum.

Stáltegund	Framleiðandi	Spennumörk kg/mm ² við hita °C										Framleiðslumeðferð	
		20	200	250	300	350	400	450	500				
API gerð													
H-40	(C)	63,3 33,0	71,8 39,7	73,8 43,1	72,6 44,2	66,7 41,7	57,0 36,0	46,3 29,9	37,1 24,8				
J-55	A,B,C	74,2 43,0	81,7 47,9	85,9 54,7	84,4 49,4	75,2 44,8	67,1 41,4	57,8 37,2	47,3 28,9				
C-75	A	68,4 50,5	66,7 48,1	71,1 49,2	71,6 49,6	69,0 48,5	64,0 45,8	57,6 43,3	49,8 41,0				
N-80	A,D	77,3 69,9	80,9 66,7	81,9 65,4	81,9 64,0	75,8 61,4	67,6 55,5	59,5 50,5	51,5 45,8				
	B,C,D	85,3 47,5	86,7 44,1	92,2 41,8	92,9 39,3	85,7 37,1	76,2 34,6	66,5 31,2	57,0 27,2				
P-110	A,B,C,D	96,2 85,3	97,3 81,9	98,8 80,6	95,6 79,4	89,3 74,5	80,2 68,8	71,8 62,9	59,1 50,9				
St 35.8		24	19	17	14	12	11	9	-				
St 45.8		26	21	19	16	14	13	11	-				
15 Mo 3		29	26	24	21	19	18	17	15				
13 Cr Mo 4 4		30	28	26	24	22	21	20	18				
10 Cr Mo 9 10		27	25	24	23	22	21	20	19				

TAFLA IV

Flot- og brotspennur fðurröra við mismunandi hita skv. heimildarriti 7. Samanburður við ýmsar rörastálgerðir skv. DIN og ASTM stöðlum.

Stáltegund		Spennumörk kg/mm ² við hita °C											Framleiðslumeðferð	
		20	200	250	300	350	400	450	500					
API gerð	Framleiðandi													
ASTM A 106 A	σ_b σ_f	33,7 21,1	33,7 18,1	33,7 17,2	33,7 16,0	33,7 15,4	33,7 15,1	33,7 14,9	33,7 14,6					
ASTM A 106 B	σ_b σ_f	42,2 24,6	42,2 21,1	42,2 20,1	42,2 19,1	42,2 18,1	42,2 17,2	42,2 16,4	42,2 15,5					
ASTM A 106 C	σ_b σ_f	49,2 28,1	49,2 24,2	49,2 23,0	49,2 21,8	49,2 20,7	49,2 19,4	49,2 18,3	49,2 17,6					
ASTM A 335	σ_b σ_f	38,7 21,1	38,7 18,8	38,7 18,2	38,7 17,7	38,7 17,3	38,7 16,7	38,7 15,7	38,7 14,6					I 9
ASTM A 524 I	σ_b σ_f	42,2 24,6	42,2 21,1	42,2 20,1	42,2 19,1	42,2 18,1	42,2 17,2	42,2 16,4	42,2 15,5					
ASTM A 524 II	σ_b σ_f	38,7 21,1	38,7 18,1	38,7 17,2	38,7 16,0	38,7 15,4	38,7 15,1	38,7 14,9	38,7 14,6					

Á 1. mynd eru dregnar saman upplýsingar úr töflu V og þar sýnd hlutfallsleg breyting flotmarka og brotpols fódurröra í hækandi hita skv. heimildarriti 7. Í ljós kemur, að brotpol allra stálgerða í fódurrörum hegðar sér mjög líkt og sýnir myndin meðaltalsbreytingu allra stálgerða frá fjórum framleiðendum. Sést þar, að reikna má með óbreyttu brotpoli upp í 350°C, en það er í samræmi við ASTM staðalinn, svo sem að framan er lýst. DIN staðallinn gefur ekki upp breytingar brotpols við hækandi hita.

Breytingar á flotmörkum hinna ýmsu fódurröraefna í hækandi hita eru allmismunandi, svo sem Tafla V ber með sér. Á 1. mynd er dreifing hlutfallslegra flotmarka sýnd sem skástrikað svæði. Sýna efri mörkin breytingu flotmarka H-55, þ.e. veikustu fódurröragerðarinnar. Er reglan síðan nokkurn veginn sú, að hlutfallsleg flotmörk fara lækandi með vaxandi styrkleika röranna, þannig að neðri mörk skástrikaða svæðisins eiga við sterkustu fódurrörin, P-110.

Hlutfallsleg flotmarkalækkun hinna ýmsu ASTM stálgerða er nokkurn veginn hin sama fyrir öll efnin og er meðaltalið sýnt á 1. mynd. Þessir punktar liggja ekki langt frá neðri mörkum skástrikaða svæðisins, sem gildir fyrir P-110 fódurrör.

Á 1. mynd er einnig sýnd breyting flotmarka DIN St. 45.8, en eins og fyrr getur telur Mannesmann þetta efni haga sér líkt og H-40 og J-55. (fylgirit I). Liggja þessi mörk langt neðan við flotmörk skv. heimildarriti 7 og skv. ASTM staðli. Mannesmann bendir reyndar á, að flotmarkalækkunin skv. DIN staðlinum sé sú mesta lækkun, sem búast megi við, og verður hér reiknað með því, að þessi lækkun sé hámarks-lækkun flotmarka fyrir allar gerðir fódurröra.

Í samræmi við ASTM staðalinn og aðrar upplýsingar, sem fyrir liggja (heimildarrit 7), verður reiknað með óbreyttu brotpoli allra gerða fódurröra upp í 350°C.

3. Leyfilegar spennur

Í ASME-staðlinum er skilgreindur hönnunarspennustyrkleiki, S_m (design stress intensity), sem er lægsta gildið af eftirfarandi spennum:

- a) 1/3 af lágmarksbrotþoli í venjulegum hita
- b) 1/3 af brotþoli í vinnuhita
- c) 2/3 af lágmarksflotmörkum í venjulegum hita
- d) 2/3 af flotmörkum í vinnuhita.

Samkvæmt þeim upplýsingum, sem fengist hafa um flotmörk og brotþol fóðurröra og ræddar voru í síðasta kafla, verða ofangreindar spennur eins og sýnt er í Töflu V.

4. ASME-staðallinn

4.1 Álmenn lýsing - fjaðrandi efnissvörun

Samkvæmt þessari aðferð er öllum spennum, sem á viðkomandi hlut verka, skipt í þrjá aðalflokka:

4.1.1 Grunnspennur (primary stresses, P).

Grunnspenna er spenna (normalspenna eða skerspenna) mynduð í efninu vegna ytra álags, sem nauðsynleg er til að viðhalda jafnvægi milli ytri og innri krafta og vægja.

Grunnspennur ákveðast af ytra álagi, og stærð þeirra breytist í hlutfalli við það. Grunnspennur, sem að verulegu marki fara yfir flotmörk, valda skemmdum eða a.m.k. meiri háttar formbreytingum. Hitaspenna er ekki flokkuð undir grunnspennu.

4.1.2 Aukaspennur (secondary stresses, Q).

Aukaspenna telst normalspenna eða skerspenna til orðnar vegna takmarkaðs svigrúms samliggjandi hluta. Eitt aðal-einkenni aukaspennu er það, að hún takmarkar sig sjálf (er "self-limiting"). Staðbundið flot og minni háttar aflögun geta orðið vegna þeirra aðstæðna, sem skapa þessa spennu, en varanlegar skemmdir eiga sér ekki stað, þó að slík spenna myndist einu sinni.

Hönnunarspennustyrkleiki API fódurröra, S_m , í mismunandi hita.

Stáltegund		H-40		J-55		C-75		N-80		P-110		
Spennumörk, kg/mm^2 í köldu ástandi	Flot	Brot	Flot	Brot	Flot	Brot	Flot	Brot	Flot	Brot	Flot	Brot
Hiti	Leyfilegur spennustyrkleiki, kg/mm^2											
°C	$S_m = \text{Brotspenna}/3 \text{ eða } 2 \times \text{Flotspenna}/3 \text{ (lægri talan)}$											
40	100	14.1	17.6	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
200	100	14.1	17.6	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
220	100	14.1	17.6	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
240	100	14.1	17.6	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
260	100	13.6	17.6	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
280	100	13.0	17.6	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
300	100	12.4	17.1	52.7	66.8	56.2	70.3	23.4	29.3	77.3	87.9	
320	100	11.8	16.2	52.7	66.8	56.2	70.3	23.2	29.3	77.3	87.9	
340	100	11.2	15.4	52.7	66.8	56.2	70.3	22.3	29.3	77.3	87.9	

* Gert er ráð fyrir línulegri flotmarkalækkun skv. jöfnunni
 $\text{Flotmörk (\% af kaldamörkum)} = 100 - 42(T-90)/260$, ef $T \geq 90^\circ C$

4.1.3 Toppennur (peak stresses, F).

Aðaleinkenni toppspennu er það, að hún veldur ekki umtalsverðri aflögun, og hún er einungis varhugaverð fyrir það, að hugsanlega getur hún valdið þreytusprungum eða stökkum brotum. Spenna, sem ekki er sérlega staðbundin, fellur undir þennan flokk, ef hún er þannig, að hún getur ekki valdið tiltakanlegri aflögun. Dæmi um toppspennu eru:

- a) Hitaspenna í "austenitiskri" stálklæðningu á kolstálgeymi.
- b) Hitaspenna í vegg geymis eða rörs vegna snöggra hitabreytinga í vökva í geyminum eða rörinu.
- c) Spenna sem myndast við staðbundna breytingu á lögun hlutar.

Í Töflu VI eru sýnd nokkur dæmi um það, hvernig spennur eru flokkaðar í ofangreinda þrjá flokka, P, Q og F, fyrir nokkur algeng tilfalli. Á 2. mynd er sýnt, hvernig hinir ýmsu spennuflokkar eru teknir saman og í hringjum á myndinni eru sýnd efri mörk þeirra stærða, sem gefnar eru í rétthyrningum. Á 2. mynd koma fyrir ýmsar stærðir, sem þarfnast nánari skýringa, en það eru stærðirnar k , S_m og S_a .

Stuðullinn k fer eftir tegund álags og er gildi hans sýnt í Töflu VII.

Stærðin S_m er leyfð spenna samkvæmt skilgreiningu í kafla 3, bls. 11. Svokallaður spennustyrkleiki (stress intensity) er fundinn út frá höfuðspennum σ_1 , σ_2 , σ_3 , þannig, að reiknaðar eru út stærðirnar

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2 ; S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3 ; S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

og spennustyrkleikinn S er stærsta tölugildið á S_{ij} .

Spennustyrkleikinn fyrir þær stærðir, sem sýndar eru í rétthyrningum á 2. mynd skal ekki fara yfir það gildi, sem sýnt er í viðkomandi hring.

Flokkun spennu fyrir nokkur algeng tilfelli

Geymishluti	Staðsetning	Spennuvaldur	Spennutegund	Flökkun
Sívalar eða kúlulaga skeljar	Plötur, ekki í grennd við meiri háttar formbreytingar	Innri þrýstingur	Himnuspenna (membrane) Spennustigull í gegnum plötuþykkt	P_m Q
		Hitastigull í ásstefnu	Himnuspenna Beygjuspenna	Q Q
	Samskeyti við botn eða flans	Innri þrýstingur	Himnuspenna Beygjuspenna	P_l Q^1
Skel eða botn	Snið þvert yfir geymi	Ytra álag, ytra vægi eða innri þrýstingur	Meðalhimnuspenna yfir allt sniðið. Spennukompóhent hornrétt á sniðið.	P_m
		Ytra álag eða ytra vægi	Beygja yfir allt sniðið. Spennukompóhent hornrétt á sniðið.	P_m
	Nálægt stútum eða öðrum opum	Ytra álag, ytra vægi eða innri þrýstingur.	Staðbundin himnuspenna Beygjuspenna Toppenna (kverk, horn)	P_l Q^1 F
	Hvar sem er	Hitamismunur milli skeljar og botns	Himnuspenna Beygjuspenna	Q Q
Kúptur botn eða kóniskur endi	Endi (toppur)	Innri þrýstingur	Himnuspenna Beygjuspenna	P_m P_b^m
	Samskeyti við skel	Innri þrýstingur	Himnuspenna Beygjuspenna	P_l 1) Q^1
Flaturlotn	Miðhluti	Innri þrýstingur	Himnuspenna Beygjuspenna	P_m P_b^m
	Samskeyti við skel	Innri þrýstingur	Himnuspenna Beygjuspenna	P_l Q^1
Gataður botn eða skel	Dæmigert snið í reglubundið gatakerfi	Þrýstingur	Himnuspenna (meðaltal í gegnum snið). Beygjuspenna (meðaltal í gegnum breidd, en breytilegt í gegnumþykkt) Toppenna	P_m P_b F
	Einangrað eða ódæmigert snið	Þrýstingur	Himnuspenna Beygjuspenna Toppenna	Q F F

TAFLA VI

Flokkun spennu fyrir nokkur algeng tilfelli

Geymishluti	Staðsetning	Spennuvaldur	Spennutegund	Flokkun
Útstreymis- stútur (nozzle)	Þversnið horn- rétt á stútás	Innri þrýst- ingur eða ytra álag eða ytra vægi	Himnuspenna (meðaltal yfir snið) Kompóhent hornrétt á snið	P_m
		Ytra álag eða ytra vægi	Beygjuspenna yfir snið	P_m
	Stútveggur	Innri þrýst- ingur	Himnuspenna (almennt) Himnuspenna (staðbundin) Beygjuspenna Toppenna	P_m P_l Q F
		Misþensla	Himnuspenna Beygjuspenna Toppenna	Q Q F
Klæðning	Hvar sem er	Misþensla	Himnuspenna Beygjuspenna	F F
Hver sem er	Hvar sem er	Radial hita- dreifing 2)	Jafngild línuleg spenna ³⁾ . Ólínulegur spennu- hluti.	Q F
Hver sem er	Hvar sem er	Hvað sem er	Spennumögnun (kverkáhrif)	F

- 1) Athuga þarf einnig þann möguleika, að geymar krumpist eða verði fyrir meiri háttar formbreytingum, þar sem um er að ræða stórt hlutfall á milli þvermáls og þykktar.
- 2) Athuga þarf hugsanlega skrallverkun vegna hitaálags.
- 3) Jafngild línuleg spenna er skilgreind sem sú línulega spenna, sem gæfi sama beygjuvægi og raunverulega spennan.

TAFLA VII

Spennuaukastuðull k fyrir samsett álag

Skilyrði	Álagssamsetning	k-stuðull	Reikningsgrundvöllur fyrir mesta reiknaða spennu
Hönnun	<p>A. Hönnunarbrýstingur, þyngd geymis, innihald geymis, ytra álag vegna viðtengdra tækja, annað ytra álag</p> <p>B. Sama og A, að viðbættu vindálagi</p> <p>C. Sama og A, að viðbættu jarðskjálftaálagi</p>	1.0	Reiknað með tærðri þykkt við hönnunarhita
Vinnsla	Raunverulegt vinnuálag. Áætlun líftíma vegna þreytuálags byggist á þessum skilyrðum	Sjá staðal	Tærð þykkt, vinnubrýstingur og vinnuhiti
Prófun	Prófunarbrýstingur, þyngd geymis, innihald geymis, ytra álag vegna viðtengdra tækja, annað ytra álag.	1.25 fyrir hydrostatiska prófun 1.15xS _m fyrir brýsti-loftsprófun	Hönnunargildi við prófunarhita

Stærðin S_a á 2. mynd er leyfður spennustyrkleiki fyrir sveiflukennt álag og fer eftir því bili, sem spennan breytist á og því, hve oft breytingarnar verða. Stærðin er þannig fundin, að fyrst eru fundin há- og lággildi spennumismuna S_{ij} fyrir spennusveifluna og síðan reiknað það svið, sem mismunurinn nær yfir

$$S_{rij} = (S_{ij})_h - (S_{ij})_l \quad (4.1)$$

Þá er reiknuð sveifla spennumismunarins $S_{altij} = 0,5 \cdot S_{rij}$ og loks valinn sveifluspennustyrkleikinn S_{alt} sem stærsta gildið á S_{altij} .

Þetta gildi S_{alt} er síðan margfaldað með hlutfallinu milli fjaðurstuðuls (elasticitetsstuðuls) þreytulínuritsins (3. mynd) og fjaðursstuðuls þess, sem notaður er við spennureikningana. Sú spenna, sem þannig fæst, skal vera minni en S_a , sem lesið er af þreytulínuritinu á 3. mynd.

4.2 Plastisk efnissvörun

Af 2. mynd kemur fram, að summa grunnspennu P og aukaspennu Q má ná yfir spennusviðið $3S_m$, en það samsvarar því, að spennusviðið spannar allt elastiska sviðið, ef $2/3$ af flotspennu efnisins eru ráðandi við val á spennustyrkleikanum S_m . Við vissar aðstæður leyfir ASME-staðallinn, að farið sé yfir $3S_m$, og verður það atriði nú athugað nánar.

Aðalskilyrðið er það, að samanlagt grunn- og aukaspennustyrkleikabil að frádregnum beygjuspennum vegna hita skal vera $< 3S_m$. Önnur skilyrði eru sem hér segir:

- a) Gildið á S_a , sem notað er við þreytulínuritið (3. mynd) skal margfaldað með K_c , þar sem

$$K_c = 1,0 \text{ fyrir } S_n < 3S_m$$

$$K_c = 1,0 + \left\{ \frac{(1-n)}{[n(m-1)]} \right\} \cdot (S_n/3S_m - 1) \text{ fyrir } 3S_m < S_n < 3mS_m$$

$$K_c = 1/n \text{ fyrir } S_n > 3mS_m$$

$$S_n = \text{spennustyrkleikabil fyrir grunn-plús aukaspennur.}$$

Gildi stærðanna m og n eru sem hér segir:

Stáltegund	m	n	°F	°C
Lágblöndustál	2,0	0,2	700	371
Martensite ryðfrítt	2,0	0,2	700	371
Kolstál	3,0	0,2	700	371
Austenite ryðfrítt	1,7	0,3	800	427
Nikkel-króm járn	1,7	0,3	800	427

- b) Þreytulínurit (2. mynd) skal síðan notað á þann hátt, sem fyrr var lýst.
- c) Hitaspenna skal vera innan þeirra marka, sem hafa í för með sér skrall-verkun, þ.e. stigvaxandi aflögun í hvert sinn, sem álagið fer í gegnum eina sveiflu. Þetta atriði verður nánar tekið fyrir hér á eftir.
- d) Hiti skal ekki fara yfir þau mörk, sem talin eru upp í lið (a) hér að ofan.
- e) Hlutfall milli minnsta flotmarks og minnsta brotpols efnisins skal ekki vera yfir 0.8.

Þær fóðurrörastáltegundir, sem taldar eru í Töflu IV uppfylla allar skilyrði (e) að ofan í köldu ástandi nema P-110. Við hærri hita lækka flotmörk hraðar en brotpolið og því er skilyrði (e) alltaf uppfyllt, ef hiti er um eða yfir 150°C. Skilyrði (d) er einnig alltaf uppfyllt fyrir þær borholur, sem hér hafa verið boraðar.

Þá þarf að athuga nánar lið (c) í framangreindum skilyrðum, sem sé hvort hitaspennar séu þannig, að þær hafi í för með sér skrall-verkun eða stigvaxandi aflögun með hverri sveiflu. ASME-staðallinn fjallar um þetta atriði sérstaklega (kafli 5-130) og gefur aðferð til að ákvarða mestu leyfilegar hitaspennusveiflur í skel eða röri, sem er með stöðugt innra þrýstiálag, þannig að ekki komi til stigvaxandi þvermálsaukning. Skilgreindar eru eftirfarandi stærðir:

y = mesta leyfileg hitaspenna reiknuð fyrir (fjaðrandi) efni, deild með flotspennu, σ_f .

x = mesta himnuspenna (membrane stress) vegna innri þrýstings deild með flotspennu, σ_f .

Í ofangreindum stærðum er leyfilegt að nota $1.5 S_m$, ef sú stærð er stærri en σ_f .

Ef hitabreyting í gegnum rör-vegginn er línuleg, er sambandið milli y og x sem hér segir:

$$y = 1/x \text{ ef } 0 < x < 0.5$$
$$y = 4(1-x) \text{ ef } 0.5 < x < 1.0$$

Ef hitabreyting í gegnum rörvegginn er parabólsk er sambandið

$$y = 5,2(1-x) \text{ ef } 0.615 < x < 1.0$$

og ef $x < 0.615$:	$x = 0.3$	0.4	0.5
	$y = 4.65$	3.55	2.70

4.3 Skrúfaðar tengingar

Um skrúfaðar tengingar er sérstaklega fjallað í ASME-staðlinum (5.140), en slíkum samsetningum er sérstaklega hætt við stigvaxandi aflögun við sveiflukennt álag yfir flotmörk. Við slíkar aðstæður losna hin skrúfuðu tengi með þeim afleiðingum, að samsetningarnar gefa sig algerlega. Við þessi skilyrði mælir staðallinn með því, að grunnplús aukaspennustyrkleika ($\Sigma P + Q$ á 2. mynd) verði haldið innan sömu leyfilegra spennumarka og grunnspennustyrkleika (P_m , P_L og $P_L + P_b$ á 2. mynd), þ.e. leyfður spennustyrkleiki er aðeins 1/3 til 1/2 spennustyrkleiki heilla röra eða soðinna tenginga.

5. Hönnun fóðurröra

Álag á fóðurrör getur orðið með ýmsu móti bæði við fóðrun, við steypingu, í borun eða fóðrun og steypingu og eftir að borun er lokið. Álagið getur verið bæði í ásstefnu fóðurröra og í radíalstefnu inn eða út.

5.1 Togálag vegna byngdar fóðurröra

Við fóðrun hanga fóðurrörin niður í borholuna og myndast þá í þeim togspenna, sem er því hærri sem dýpra er fóðrað. Þessi spenna er grunnspenna samkvæmt skilgreiningu ASME-staðalsins og ekki er reiknað með aukaspennum við þetta álag. Fæst því (2. mynd)

$$r_t = H (\rho_{st} - \rho_v) \leq e \cdot S_m \quad (5.1)$$

þar sem r_t = togspenna

H - fóðrunardýpi

ρ_{st} = eðlisþyngd stáls = 7840 kg/m^3

ρ_v - eðlisþyngd vatns = 1000 kg/m^3

e = styrkleikastuðull röratengja

S_m = leyfilegur spennustyrkleiki (Tafla V)

og er þá gert ráð fyrir því að holan sé full af vatni. Ef samtengingastuðullinn e er 0.75 og spennustyrkleikinn S_m samkvæmt Töflu V (kalt ástand) fást leyfilegar fóðrunardýptir fyrir hinar ýmsu fóðurrörategundir svo sem hér segir:

Fóðurrör	H-40	J-55	C-75	N-80	P-110
Spennustyrkleiki, S_m , kg/mm^2	14,1	17,6	22,3	23,4	29,3
Mesta fóðrunardýpi, H, m	1546	1930	3445	2566	3213

Þessi fóðrunardýpi er langt umfram það, sem gerist í borholum, og er því ekki hætt á of háum togspennum, þegar fóðurrör eru hengd niður í borholuna. Ef um rauðu rör er að ræða er mesta fóðrunardýpi háð gerð raufa.

5.2 Þrýstingur utan frá

Þrýstingur á fóðurrör utanfrá getur myndast t.d. við steypingu í gegnum borstengur. Reiknað er með því, að fóðurrörin séu full af vatni, en ekki undir þrýstingi, og eðlisþyngd steypu 2000 kg/m^3 . Þrýstingur neðst á fóðurrör, þegar steypunni er þrýst upp er þá

$$p = H/10 \text{ kg/cm}^2 \quad (5.2)$$

þar sem H er fóðrunardýpi í m eins og áður.

TAFLA VIII

Mestu leyfileg fóðrunardýpi vegna ytri þrýstings við steypingu í gegnum borstengur

Gæðaflokkur fóðuröra		H-40	J-55	C-75	N-80	P-110
Utannmál D	Veggþykkt t, mm	Þyngd lbs/ft	D/t	Mesta leyfilegt fóðrunardýpi, m samkvæmt API reglum		
9-5/8"	7.92	32.3	30.87	936	-	-
eða	8.94	36.0	27.35	1200	-	-
244,5 mm	10.03	40.0	24.38	-	2238	2307
	11.05	43.5	22.13	-	2735	2845
	11.49	47.0	20.39	-	3194	3343
	13.84	53.5	17.67	-	-	4318
	8.39	48.0	40.54	521	-	-
13 3/8"	9.65	54.5	35.20	-	861	-
eða	10.92	61.0	31.11	-	1181	-
	12.19	68.0	27.87	-	1502	-
339.7 mm	13.06	72.0	26.01	-	1627	-
				-	1932	1975
						2225

Spennur, sem þetta álag veldur, eru grunnspennur samkvæmt skilgreiningu ASME staðalsins og ekki er reiknað með aukaspennum við þessi skilyrði. Þá má finna mesta leyfilegt fóðrunardýpi vegna ytri þrýstings eftir reglum API um hætinn yfirþrýsting (heimildarrit 4), en niðurstöður þeirra eru sýndar á 4. mynd. Eru þessi dýpi sýnd í töflu VIII fyrir 9 5/8" og 13 3/8" fóðurrör.

Af Töflu VIII kemur í ljós, að ytri þrýstingur við steypingu í gegnum fóðurrör kemur varla til með að verða ráðandi við val fóðurröra, þar sem leyfilegt fóðrunardýpi er langt umfram það, sem tíðkast hefur við boranir hérlendis.

Gallar í steypu utan um fóðurrör geta valdið myndun þéttra vatnspoka í steypunni. Þegar gufa streymir upp eftir holunni, hitnar vatnið í þessum pokum og getur það valdið mjög háum þrýstingi og sprengt rörið inn, ef það er veikara en það, sem umhverfis steypuna er. Vart hefur orðið við skemmdir af þessu tagi í borholum á Nýja Sjálandi (sjá heimildarrit 8 og 9). Erfitt kann að vera að hanna fóðurrör, þar sem slíkar skemmdir eru útilokaðar, en ef um er að ræða tvöfalda fóðrun er venja að hanna þau þannig, að ytra rörið sé örugglega veikara gagnvart innri þrýstingi en hið innra gagnvart ytri þrýstingi. Eina einhlíta ráðið til að koma í veg fyrir skemmdir af þessu tagi er hins vegar að gæta þess svo sem kostur er, að slíkir gallar í steypu komi ekki fyrir.

5.3 Innri þrýstingur og hitaþensla

Reiknað er með því að samband hita og þrýstings í borholu fylgi suðumarksferli. Hér er bæði um grunnspennu og aukaspennu að ræða samkvæmt skilgreiningu ASME-staðalsins. Sé gert ráð fyrir jöfnum hita út í gegnum rörvegginn og að þensla rörsins í ásstefnu sé algerlega hindruð, verður spennuástandið sem hér segir:

Spennuflokkur	$\sqrt{1} = \sqrt{t}$	$\sqrt{2} = \sqrt{r}$	$\sqrt{3} = \sqrt{z}$
P (innri yfirprýst.)	pa/t	- p/2	0
P + Q	$\frac{p(b^2/r^2 + 1)}{b^2/a^2 - 1}$	$\frac{-p(b^2/r^2 - 1)}{b^2/a^2 - 1}$	$-\Delta(\alpha ET)$

þar sem a = innri radiús pípu
 b = ytri radiús pípu
 E = fjaðurstuðull
 α = hitaþenslustuðull
 T = hiti pípu yfir spennulaust ástand
 t = þykkt pípuveggja
 p = innri þrýstingur í pípu.

Samkvæmt þessu er spennustyrkleikinn:

a) $P : S_p = p(a/t + 1/2)$ (5.3)

b) P + Q : Eins og fram kemur á 1. mynd (Ath. 1) skal við þetta ástand reikna spennubil við hæsta og lægsta hita. Gert er ráð fyrir, að innri þrýstingur sé sá sami við báðar aðstæður, og fæst þá

	$\sqrt{1} = \sqrt{t}$	$\sqrt{2} = \sqrt{r}$	$\sqrt{3} = \sqrt{z}$
Hæsti hiti:	$\frac{p(b^2/a^2 + 1)}{b^2/a^2 - 1}$	$\frac{-p(b^2/a^2 - 1)}{b^2/a^2 - 1}$	$-E\alpha \Delta T_H$
Lægsti hiti:	$\frac{p(b^2/a^2 + 1)}{b^2/a^2 - 1}$	$\frac{-p(b^2/a^2 - 1)}{b^2/a^2 - 1}$	$-E\alpha \Delta T_L$

þar sem ΔT_H = mismunur hæsta og jafnvægishita = $T_H - T_O$

ΔT_L = mismunur jafnvægishita og lægsta hita = $T_O - T_L$

og fæst því

$$S_{PQ} = |E\alpha \Delta T|$$

Fyrsta skilyrðið er að $S_p \leq k \cdot S_m$ (sbr. 2. mynd). Gildi á k er valið = 1,0 (sbr. Töflu VI) og fæst því minnsta veggþykkt röra af (5.3)

$$t_m = \frac{2a}{2S_m/p - 1} = \frac{2b}{2S_m/p + 1} \quad (5.5)$$

Heildregin fóðurrör eru framleidd með $\pm 12.5\%$ viki máli á veggþykkt og að auki verður bætt við 1.6 mm vegna gengja (eða tæringar). Veggþykkt vegna innri þrýstings þarf því að vera

$$t = t_m / 0.875 + 1.6 \quad (5.6)$$

Útreiknaðar þykkir eftir jöfnum (5.5) og (5.6) með S_m fyrir fóðurrör skv. Töflu V eru sýndar á 5. mynd fyrir 9 5/8" og 13 3/8" fóðurrör. Má þar lesa beint þau takmörk, sem stöðluðum þykktum fóðurröra af hinum ýmsu stálgerðum eru sett skv. ASME-staðlinum.

Samkvæmt staðlinum skal spennustyrkleikabilið fyrir samantlagðar grunn- og aukaspennur vera minna en $3 \cdot S_m$. Ef um er að ræða hitaspennur eins og hér, skal nota meðalgildið S_m í endapunktum hitabilsins (Ath. 1, 2. mynd). Reiknað er með því að hiti sveiflist frá 40°C upp í hámark og fæst spennustyrkleikabilið vegna hitaþenslu skv. (5.4), sem sýnt er á 6. mynd. Sést þar, að hámarkshiti fyrir fóðurrör er sem hér segir, ef uppfylla á skilyrði ASME staðalsins.

Stálgerð:	H-40	J-55	C-75	N-80	P-110
Hámarkshiti: °C	222	270	320	340	>340

Þær forsendur, sem notaðar voru við ofangreinda reikninga, að hiti sé jafn í gegnum rörveggina og öll hitaþenslan hindruð, eru e.t.v. í strangasta lagi. Sé aðeins slakað á þessari kröfu og reiknað með því, að aðstæður leyfi um 20% af spennulausri þenslu (b á 6. mynd) verður útkoman talsvert hagstæðari og hámarkshitinn:

Stálgerð:	H-40	J-55	C-75	N-80	P-110
Hámarkshiti: °C	262	312	>340	>340	>340

Þola því fóðurrörin allmiklu meira hitaálag, ef steypan umhverfis þau gefur lítið eitt eftir. Sennilega er þetta það sem skeður í raun, ef engir veikirnir punktar eru á samskeytum röra, t.d. ef rörin eru soðin saman.

Ef um skrúfuð rör er að ræða gegnir öðru máli og fjallar ASME-staðallinn sérstaklega um slíkar samtengingar (sjá 4.3 að framan). Gefur staðallinn spennustyrkleikabil skrúfaðra tenginga $1.0 - 1.5 \times S_m$ í stað $3 \times S_m$ fyrir heil eða samansoðin rör, og verður því að reikna með því, að skrúfuð samskeyti gefi sig við hitaálag á fóðurrör.

5.4 Fóðrunardýpi

Venjulega eru borholur á háhitasvæðum fóðraðar fjórum sinnum og eru holu- og fóðurröravíddir og fóðrunardýpi sýnd á 7. mynd. Tilgangur fóðrunar er margþættur og má þar nefna:

1. Að koma í veg fyrir að lausar jarðlagamyndanir hrynni inn í holuna og stífli hana eða valdi festu bortækja (á við allar fjórar tegundir fóðringa).
2. Að hindra innstreymi í holuna úr vatnsleiðandi lögum, sem eru þess eðlis, að vatn úr þeim telst ekki æskilegt við vinnslu holunnar (efstu þrjár fóðringar).
3. Að hindra lekatöp ofarlega í holunni eða millistreymi úr neðri æðum út í efri lög (efstu þrjár fóðringar).
4. Til öryggis gegn gufugosum þar sem gosvarabúnaður er festur á efri enda fóðringanna á meðan á borun stendur niður á næsta fóðrunardýpi (öryggisfóðring og vinnslufóðring).
5. Vinnslufóðringin er leiðari fyrir gufuna upp úr holunni og til skamms tíma hefur lokunarbúnaður á holutoppi verið festur á hana eins og 7. mynd sýnir. Sumsstaðar erlendis hefur það einnig tíðkast, að lokunarbúnaður er festur á öryggisfóðringu, og hefur þá vinnslufóðringin svigrúm til að þenjast út í lengdarstefnu án þess að það hafi veruleg áhrif á toppbúnað holunnar. Þetta fyrirkomulag hefur verið tekið upp við fóðrun í holu KJ-9.11 í Kröflu.

Við ákvörðun á lengd fóðurröra hefur verið reiknað með því, að suðuprýstingur á holubotni skili sér upp eftir holunni. Fóðrunardýpt er þá valin þannig, að prýstingur jarðlaga við neðri enda fóðringar, sé a.m.k. jafn suðuprýstingi á holubotni. Er þá reiknað með því að meðaleðlisþyngd jarðlaganna sé 2,0. Samband suðuprýstings og suðuhita og dýpis er sýnt á 8. mynd.

Nýsjálendingar reikna prýsting á holutoppi í háhitaholum út frá suðumarksferli en draga prýsting mettaðrar gufusúlu í holunni frá botni og upp úr frá suðumarksprýstingi á holubotni (heimildarrit 8). Verður prýstingurinn á holutoppi því nokkru lægri en suðuprýstingur á botni holunnar.

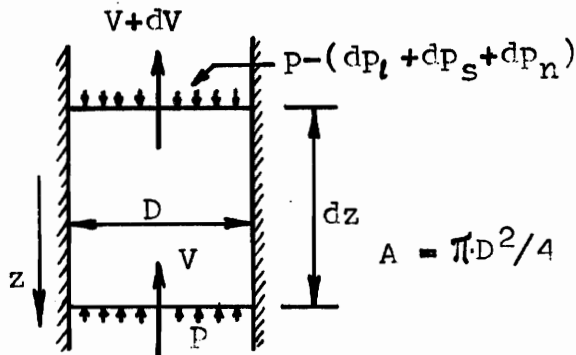
Fræðilega séð er sá prýstingur og hiti, sem Nýsjálendingar reikna með, það alhæsta, sem hugsanlega getur orðið í borholunni. Til þess að slíkt ástand verði þarf hins vegar sérstakar aðstæður, og hafa mælingar í borholum hérlandis og einnig á Nýja Sjálandi að því best er vitað aldrei bent til þess, að þessi skilyrði séu fyrir hendi. Miðað er við, að inn í borholuna streymi vatn og að prýstingur og hiti vatnsins svari til suðumarksferils (8. mynd). Þegar vatnið stígur upp í holunni, lækkar prýstingurinn og það breytist að hluta í gufu. Upp eftir holunni streymir því blanda af gufu og vatni, og er gufumagnið því meira sem ofar dregur og prýstingur og hiti lækkar.

Rennslið er því tvífasastreymi, sem er all flókið að meta reikningslega. Með vissum nálgunum má þó gera sér nokkra grein fyrir því, hvað gerist, er blandan af gufu og vatni streymir upp. Hér á eftir verður reiknað með eftirfarandi nálgunum:

1. Rennslið er "hómógent", þ.e. blandan streymir sem einfasa vökvi með jöfnum hraða vatns og gufu. Með orðalagi tveggja-fasa fræða þýðir þetta að svokallaður slippstuðull (þ.e. hlutfall milli hraða gufu og vatns) sé 1,0.

2. Varmaskipti eiga sér ekki stað í gegnum holuveggi og þannig er reiknað með óbreyttri "enthalpíu" upp eftir holunni.

Þrýstifall verður í rennslinu upp eftir holunni af þremur ástæðum (sjá riss til vinstri):



1. Þrýstifall vegna þess að vökvinn lyftist:

$$dp_l = g \varrho_b dz \quad (5.7)$$

þar sem g = þyngdarhröðun

ϱ_b = meðaleðlisþyngd blöndu.

2. Vegna þess að gufuhluti blöndunnar eykst upp eftir holunni verður mikil hraðaaukning, er blandan stígur upp. Skriðþungajafnan gefur

$$A dp_s = \dot{m} \cdot (dV/dz) \cdot dz$$

þar sem V er hraði blöndunnar = $\dot{m} / (\varrho_b A)$. Nú eru \dot{m} og A konstant stærðir og fæst þá þrýstifallið

$$dp_s = (\dot{m}/A)^2 [d(1/\varrho_b)/dz] dz \quad (5.8)$$

3. Þrýstingsfall vegna núningsviðnáms:

$$dp_n = (f/2D) \varrho_b V^2 dz = f \dot{m}^2 dz / (2 \varrho_b D A^2) \quad (5.9)$$

þar sem f = viðnámsstuðull.

Sé allt tekið saman fæst diffurjafnan fyrir þrýstifallið

$$dp/dz = g \varrho_b + (\dot{m}/A)^2 d\varrho_b^{-1}/dz + f \dot{m}^2 / (2 \varrho_b D A^2) \quad (5.10)$$

Hér eru p og z breytistærðir, ϱ_b er fall af p en aðrar stærðir eru konstant. Má því umrita jöfnuna á formið

$$(1 + (\dot{m}/\varrho_b A)^2 d\varrho_b/dp) dp/dz = g \varrho_b + f \dot{m}^2 / (2 \varrho_b D A^2) \quad (5.11)$$

Sem dæmi um sambandið milli ϱ_b og p sýnir 9. mynd, hvernig ϱ_b breytist með p fyrir botnþrýsting $p_0 = 150$ bar. Þetta samband verður nálgæð með jöfnu á forminu

$$\varrho = \alpha \exp(\beta p) \quad (5.12)$$

á bilinu $p_0/2 < p < p_0$, þar sem p_0 er innstreymisþrýstingur á holubotni. Minnst þrýstifall, þ.e. mestur holuþrýstingur, fæst, ef $m = 0$, sem jafngildir lokaðri holu. Jafna (5.11) ásamt nálguninni (5.12) gefur þá lausnina

$$\exp(\beta p) - \exp(\beta p_0) = g\alpha\beta(H - z) \quad (5.13)$$

þar sem $H =$ holudýpi. Stuðlarnir α og β eru þannig valdir að jafna (5.12) gefur rétt gildi fyrir $p = p_0$ og $p = p_0/2$.

Gildi á α og β fyrir mismunandi innstreymisþrýsting eru sýnd á 10. mynd. Þrýstingur á holutoppi í lokaðri holu er sýndur á 11. mynd fyrir mismunandi holudýpi. Sést þar, að toppþrýstingur fenginn með þessum reikningum er um og yfir 60% af innstreymisþrýstingi á holubotni.

Nú má finna fóðrunardýpi fyrir þær fóðringar, sem reikna verður með lokunarþrýstingi á, þ.e. öryggisfóðringu og vinnslufóðringu. Fóðrunin þarf að vera það djúp, að jarðlagaprýstingur neðan hennar sé meiri en þrýstingur í holunni. Þrýstidreifing í lokuðum holum, mismunandi djúpum, er sýnd á 12. mynd og þar er einnig dregin jarðlagaprýstilínan. Þar sem sú lína sker þrýstilínur holanna, er minnsta fóðrunardýpið fyrir vinnslufóðringu. Þetta dýpi er sýnt á 11. mynd fyrir mismunandi holudýpi, þar sem einnig er sýnt tilsvarendi dýpi fyrir öryggisfóðringu.

Ofangreind aðferð gildir ekki fyrir dýpi yfirborðsfóðringar, þar sem lokunarbúnaður er ekki á henni. Vandkvæði hafa yfirleitt ekki verið á því að hafa hemil á háhitaholum í gegnum yfirborðsfóðringu, en þó er sá möguleiki fyrir hendi, að holan gjósi í þessari borun og verður því að reikna með því.

Þrýstifall í gegnum þessa fóðringu verður meira en í lokaðri holu vegna rennslisviðnáms og skriðþungaaukningar. Þetta má áætla með lausn á jöfnu (5.11), en þeir reikningar hafa ekki verið gerðir. Á 11. mynd er sýnt fóðrunardýpi yfirborðsfóðringar miðað við lokaða holu, en í opinni holu er minnsta fóðrunardýpi eitthvað minna.

Út frá framangreindum niðurstöðum má finna mestan hita á fóðurrörum og hita á holutoppi og er þetta sýnt á 13. mynd. Þessar upplýsingar ásamt niðurstöðum styrkleikareikninga fyrir fóðurrör (5. mynd) má síðan nota til að ákvarða stálgæði og veggþykkt fóðurröra fyrir mismunandi dýpi. Eru þær niðurstöður sýndar á 14. mynd bæði fyrir 9 5/8" vinnslufóðringu og 13 3/8" öryggisfóðringu.

Loks er á 15. mynd sýnt samband þrýstings, hita og þrýstipols flansa og ventla samkvæmt amerískum staðli (ASA series). Inn á þá mynd er einnig dreginn suðumarksferill fyrir vatn og má þannig finna nauðsynlegan styrkleika holutoppbúnaðar miðað við holudýpi. Þessar niðurstöður eru einnig sýndar á 14. mynd.

5.5 Samsetningar fóðurröra

Sérstök ástæða virðist til að taka til sérstakrar athugunar samsetningar fóðurröra í borholum á háhitasvæðum. Þau fóðurrör, sem þróast hafa í olíuiðnaðinum, eru skrúfuð saman, og hefur sú hefð yfirleitt verið tekin upp við boranir háhita-hola. Út af þessari venju var þó brugðið í borunum Gufubors hér á landi á Reykjanesi, Svartsengi og í Kröflu 1975, en síðan hafa skrúfuð fóðurrör eingöngu verið notuð hér á landi.

Eins og fram kemur að framan (kaflí 4.3), eru leyfileg spennustyrkleikamörk skrúfaðra tenginga aðeins 1/3 til 1/2 spennustyrkleikamörk heilla röra samkvæmt ASME-staðlinum. Er því ljóst, að skrúfuð fóðurrör uppfylla alls ekki kröfur staðalsins að því er hitaþenslu varðar, og sést það greinilega á 6. mynd, ef leyfilegur spennustyrkleiki hinna ýmsu fóðurröragerða (slitróttar línur) er lækkaður um helming eða um tvo þriðju. Bilanir fóðurröra vegna þess að skrúfaðar tengingar hafa gefið sig, hafa orðið á háhitasvæðum bæði í Mexikó og Nýja Sjálandi.

Skrúfuð fóðurrör verða því að teljast varhugaverð og virðast soðin rör eða styrktar tengingar af einhverju tagi vera það, sem nota skal.

6. Samantekt og lokaorð

Í þeim athugunum, sem hér er lýst, er gerð grein fyrir eiginleikum og styrkleika staðlaðra fóðurröra skv. API-stöðlum. Fundin er minnsta leyfileg veggþykkt fóðurröra við mismunandi hita og er þá reiknað með því, að samband þrýstings og hita fylgi suðumarksferli vatns. Er þar miðað við ASME Boiler and Pressure Vessel Code, sem leyfir efnisáraun umfram flotmörk við viss skilyrði.

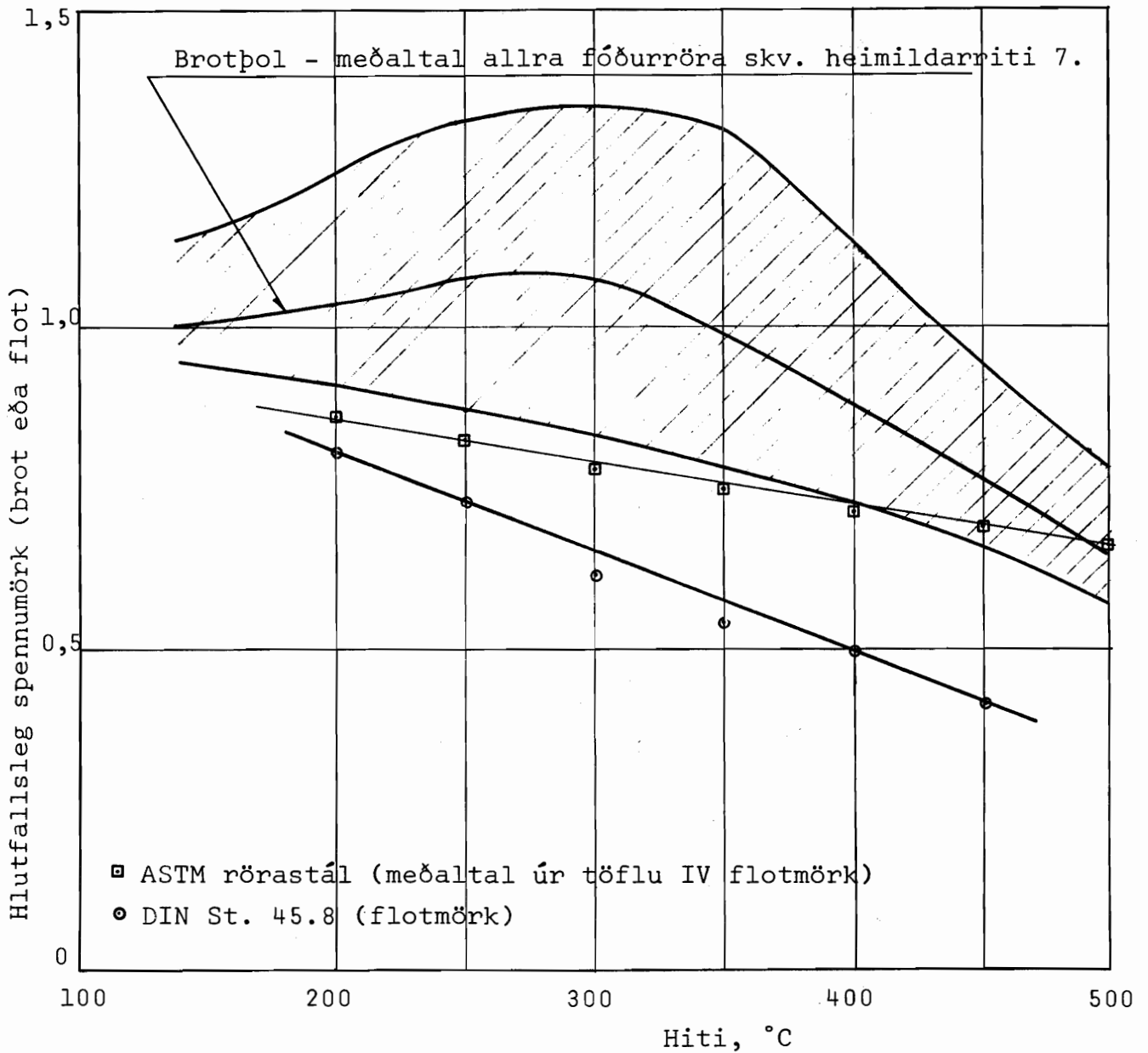
Efnisáraun vegna hitaþenslu er leyfð að vissu marki fyrir heil og soðin rör, en álagspól skrúfaðra tenginga er lítið, ef hætt er við því, að rörin hitni og kólni á víxl. Er því ráðlegt að forðast skrúfaðar tengingar en sjóða rörin heldur saman.

Það hefur tíðkast að miða gerð og þykkt fóðurröra við þrýsting og hita á holubotni, sem gert er ráð fyrir, að fylgi suðumarksferli. Á Nýja Sjálandi er reiknað með mettaðri gufu í allri holunni og gefur það nokkuð lægri þrýsting og hita á holutoppi en í botni. Enda þótt fræðilegur möguleiki sé á því, að slíkar aðstæður myndist við sérstök skilyrði, hefur hiti og þrýstingur á borholutoppi sem svarar til þeirra, ekki mælst í borholum hér eða á Nýja Sjálandi, að því vitað er. Athuganir benda fremur til þess, að í holubotni sé vatn við suðu miðað við suðumarksferil, en í holunni sé síðan blanda af gufu og vatni, sem svarar til þrýstingslækkunar upp eftir holunni. Þar sem þessar aðstæður eru í samræmi við hérlanda reynslu, er í skýrslunni miðað við þær, og reiknað út, hver þrýsti- og hitadreifing er í lokaðri holu, en þær aðstæður gefa hámarkshita og þrýsting.

Út frá þeim niðurstöðum eru fundnar gerðir og þykktir fóðurröra fyrir mismunandi holudýpi og styrkleika holu-
toppbúnaðar. Þessar niðurstöður eru dregnar saman á
14. mynd.

7. Heimildarrit

1. American National Standards, 1973: ANSI B-31.1. Power Piping. ANSI B-31.3. Petroleum Refinery Piping.
2. The American Society of Mechanical Engineers, 1974: ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII. Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 1 og Division 2. Alternative Rules.
3. The American Petroleum Institute, 1973: API Specification for Casing, Tubing and Drill Pipe. API Spec. 5 A, 32nd Edition, March 1973.
4. Mannesmann AG, 1967: Rohre für Öl- und Gasfelder. Abmessungen, Gewichte, Berechnungsunterlagen.
5. DIN Taschenbuch 4, 1970: Stahl und Eisen Gütenormen. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin.
6. American Society for Testing and Materials, 1968: Book of ASTM Standards. Part 1. Steel Piping, Tubing and Fittings.
7. Thomas, Paul D., 1967: High temperature tensile properties of casing and tubing. Presented at the API Division of Production 1967 Midyear Standardization Conference, San Francisco California, June 11-16, 1967.
8. Dench, N.D, 1970: Casing String Design for Geothermal Wells. Geothermics - Special Issue 2. U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970, Vol. 2, Part 2, bls. 1485-1496.
9. Fooks, A.C.L., 1961: The Development of Casings for Geothermal Boreholes at Wairakei, New, Zealand. New Sources of Energy, Proceedings of the Conference, Rome, 21-23 August 1961, United Nations, New York 1964. Vol. 3. Geothermal Energy II, bls. 170-183.



1. mynd. Hlutfallsleg breyting spennumarka (brot og flot) fyrir API fóðurrör. Skástrikaða svæðið sýnir breytingu á flotmörkum fóðurröra - efri mörkin eiga við H-40 en neðri mörkin við P-110 (Heimildarrit 7).

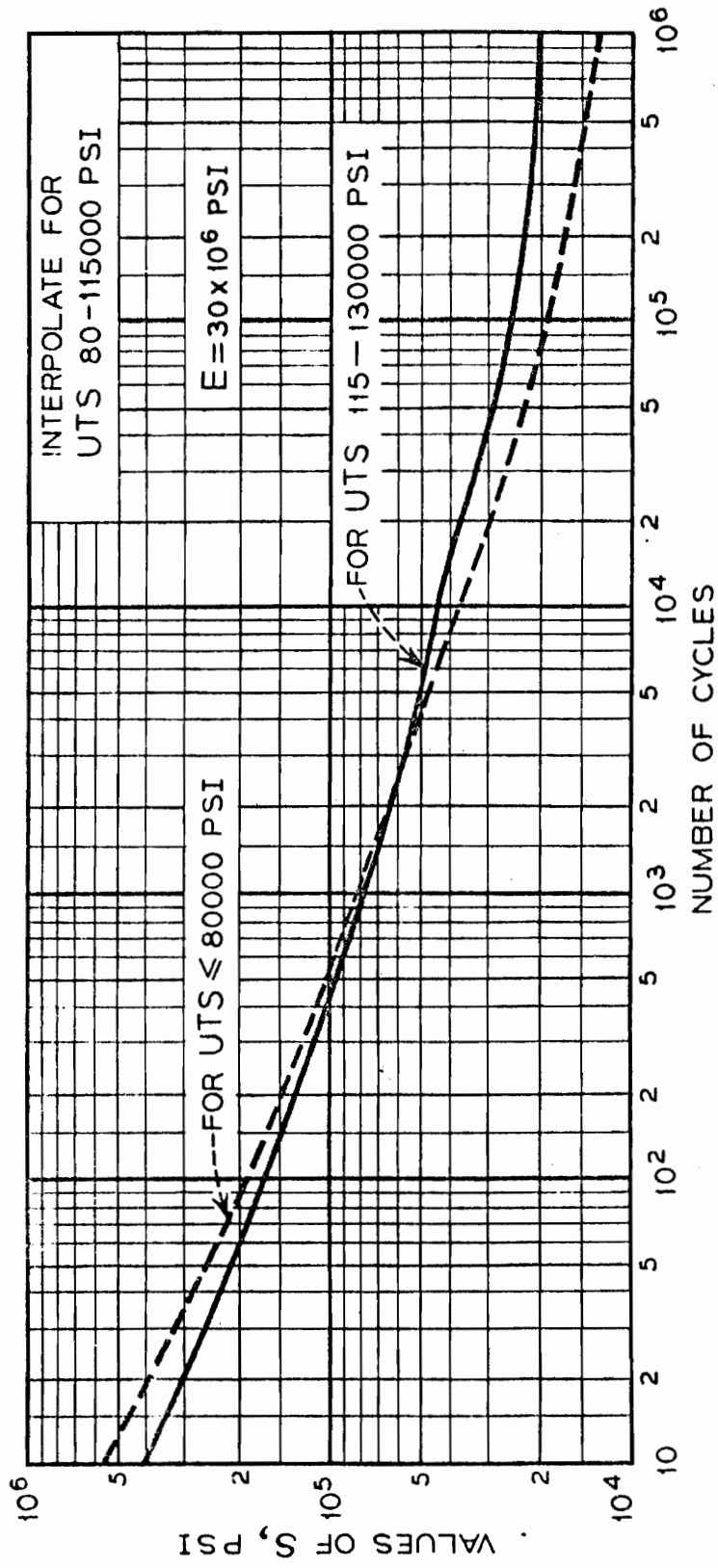
2. mynd. Spennuflokkar og takmörk spennustyrkleika

Spennuflokkur	Grunnspennur			Aukaspennur himnu+beygju spennur	Toppennur
	Almenn himnusp.	Staðb.himnusp.	Beygjuspenna		
Útskýring Sjá einnig Töflu (VI)	Meðalgrunnsp. yfir massíft snið. Ekki við meiri háttar formbreytingar eða spennumögnun. Skapast aðeins af mekanisku álagi.	Meðalspenna yfir massíft snið. Tekur með meiri háttar formbreytingar en ekki spennumögnun. Skapast aðeins af mekanisku álagi.	Sá komponent grunnspennu, sem er í beinu hlutfalli við fjarlægð frá byngdarpunkti massífts þver-sniðs. Meiri háttar formbreytingar eða spennumögnun ekki taldar með. Skapast aðeins af mekanisku álagi	Sjálftakmarkandi spennur nauðsynlegar til að viðhalda samhengi hluta. Myndast við meiri háttar formbreytingar. Skapast af mekanisku álagi eða af hitamisþenslu Spennumögnun ekki með.	1) Viðbótar-spenna, sem bætist við aukaspennu vegna spennumögnunar (í kverkum) 2) Vissar hitaspennur sem geta valdið þreytu en ekki aflögun.
Tákna(sjá Aths.4)	P_m	P_l	P_b	Q	F
Samsetn. spennu komponenta og leyfileg mörk spennustyrkleika	<p>— Nota skal hönnunarálag - - - Nota skal vinnuálag</p>				

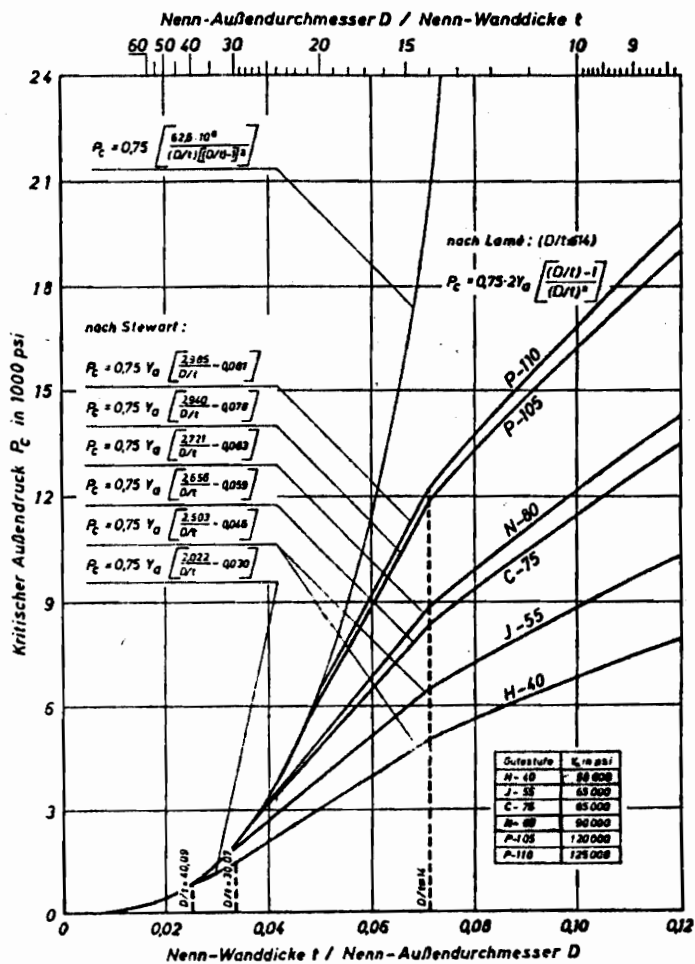
Aths. 1. Þessi mörk eiga við spennustyrkleikasviðið. Ef aukaspenna stafar af hitabreytingum í þeim punkti, sem til athugunar er, skal gildið á kS_m vera meðalgildi við hæsta og lægsta hita. Ef aukaspenna stafar að hluta eða að öllu leyti af mekanisku álagi, skal gildið á kS_m miðað við hæsta hita í málminum.

Aths. 2. Spennur í flokki Q eru þeir hlutar heildarspennu, sem myndast af völdum ójafnrar hitadreifingar, vegna meiri háttar breytingar í lögun o.s.frv. en innifelur ekki grunnspennu sem einnig ríkir í sama punkti. Á það ber þó að líta, að nákvæmir spennureikningar gefa oft sameinaðar grunn- og aukaspennur beint, þannig að reiknuð gildi gefa P_m (eða P_l)+ P_b + Q , en ekki Q eitt sér. Á sama hátt fast þar sem spenna í flokki F er mynduð af spennumögnun, að gildið á F er viðbótarspennan mynduð af rauf eða kverk umfram meðalspennuna. Ef t.d. í plötu með meðalspennu S er rauf, sem gefur spennumögnunarstuðulinn K, þá er $P_m = S$, $P_l = 0$, $Q = 0$, $F = P_m (K-1)$ og toppspennustyrkleikinn er $P_m + P_m (K-1) = KP_m$.

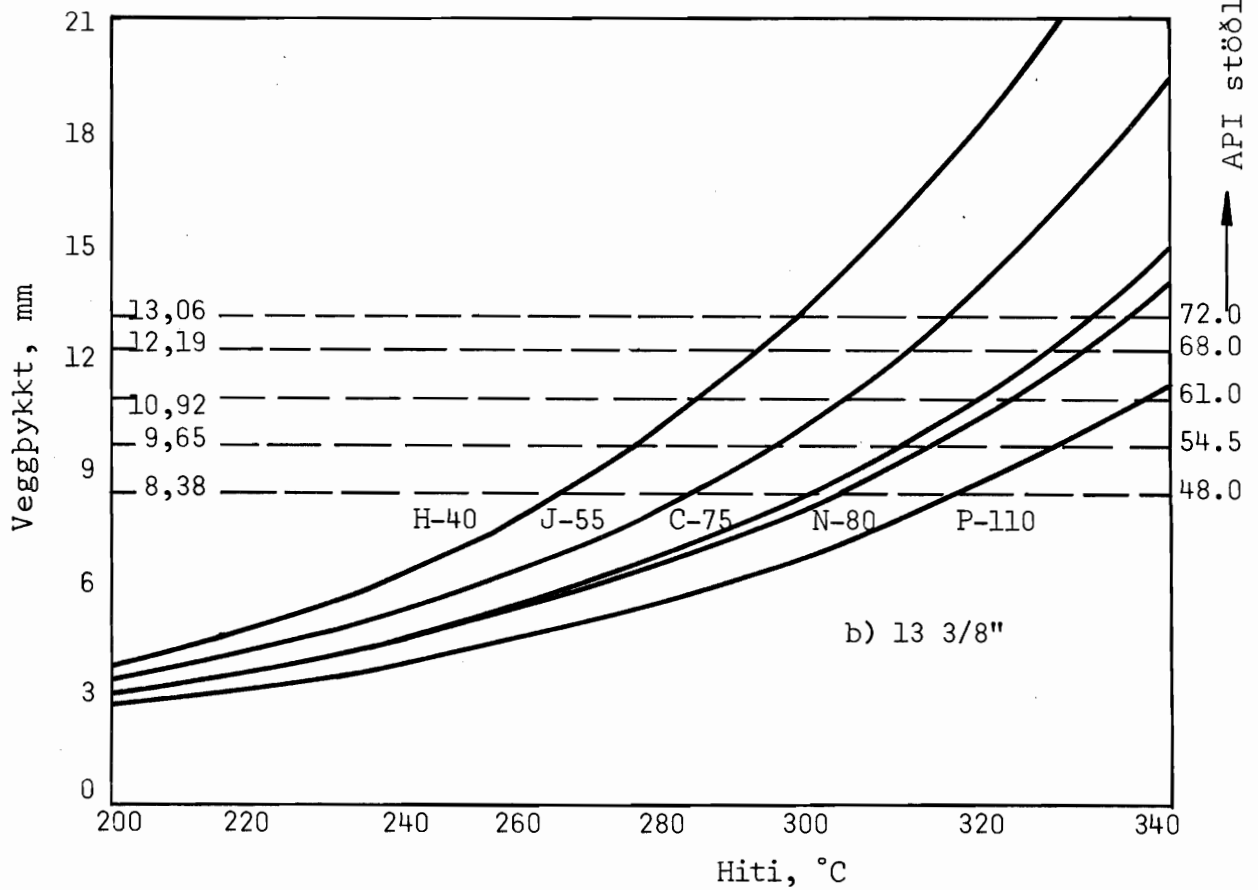
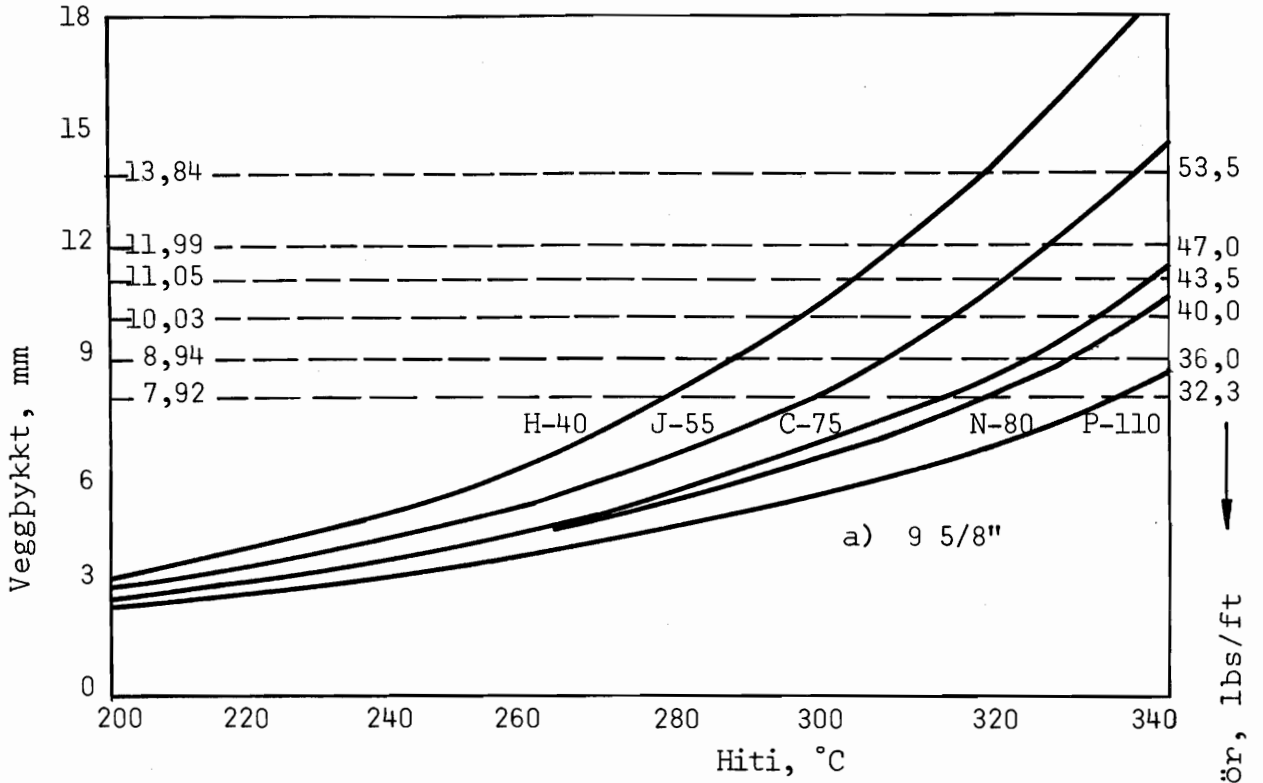
- Aths. 3 S_a fæst af þreytulínuritinu á 3. mynd. Leyfilegt spennustyrk-
læikabil fyrir spennusveiflur er $2S_a$.
- Aths. 4 Táknin P_m , P_l , P_b , Q og F eiga ekki við einstakar tölur, heldur
sett af sex stærðum sem tákna spennukompóponentana sex σ_t , σ_l , σ_r ,
 σ_{tl} , σ_{lr} , σ_{rt} .
- Aths. 5 Spennuaukastuðlarnir k eru gefnir í Töflu VII.
-



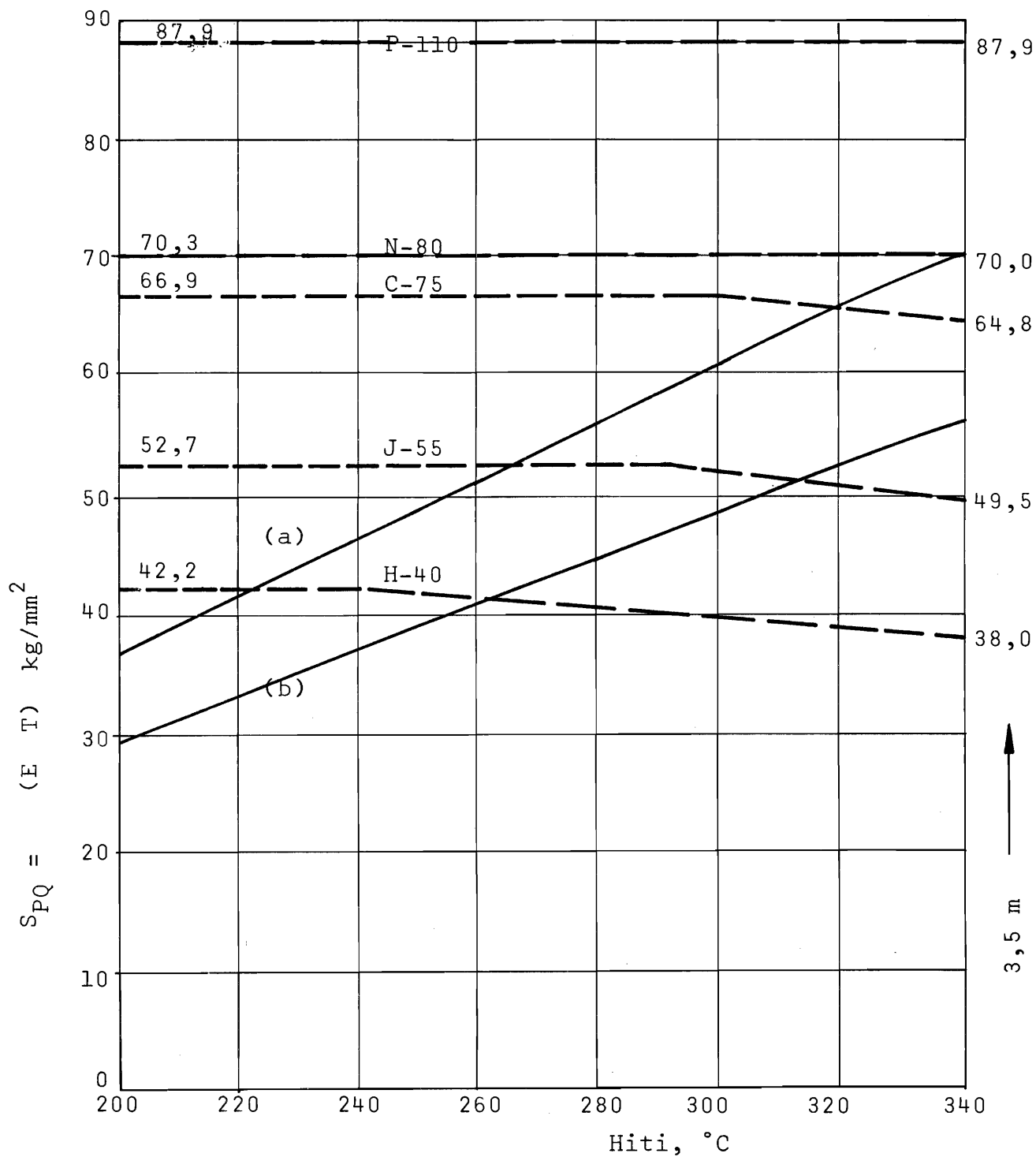
3. mynd. Þreytuhönnunarrít fyrir kolstál og blandað stál (series 4xx) fyrir hitastig ekki yfir 700°F (371°C).



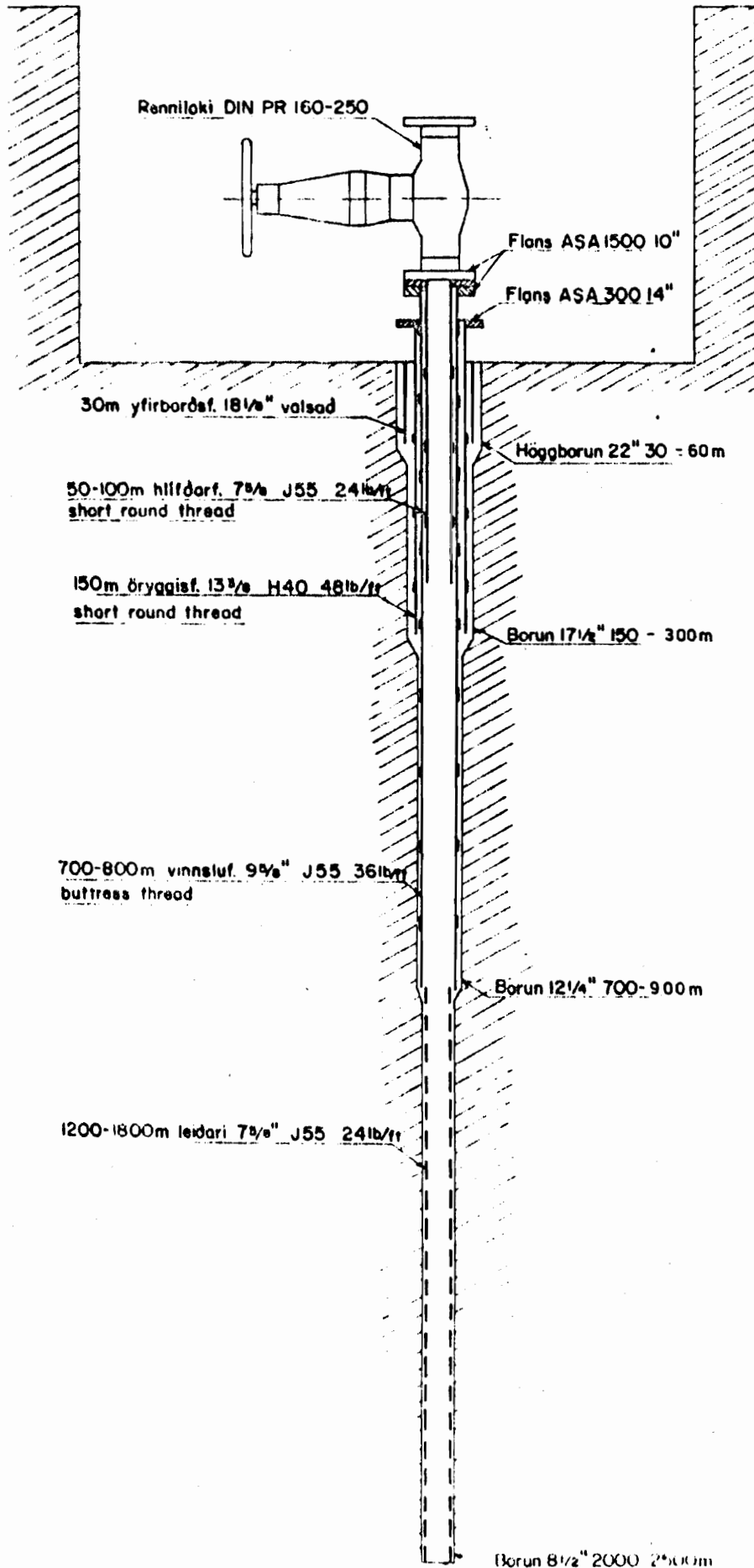
4. mynd. Viðnámsþol fóðurröra gegn ytri þrýstingi (tekið úr heimildariti 4).



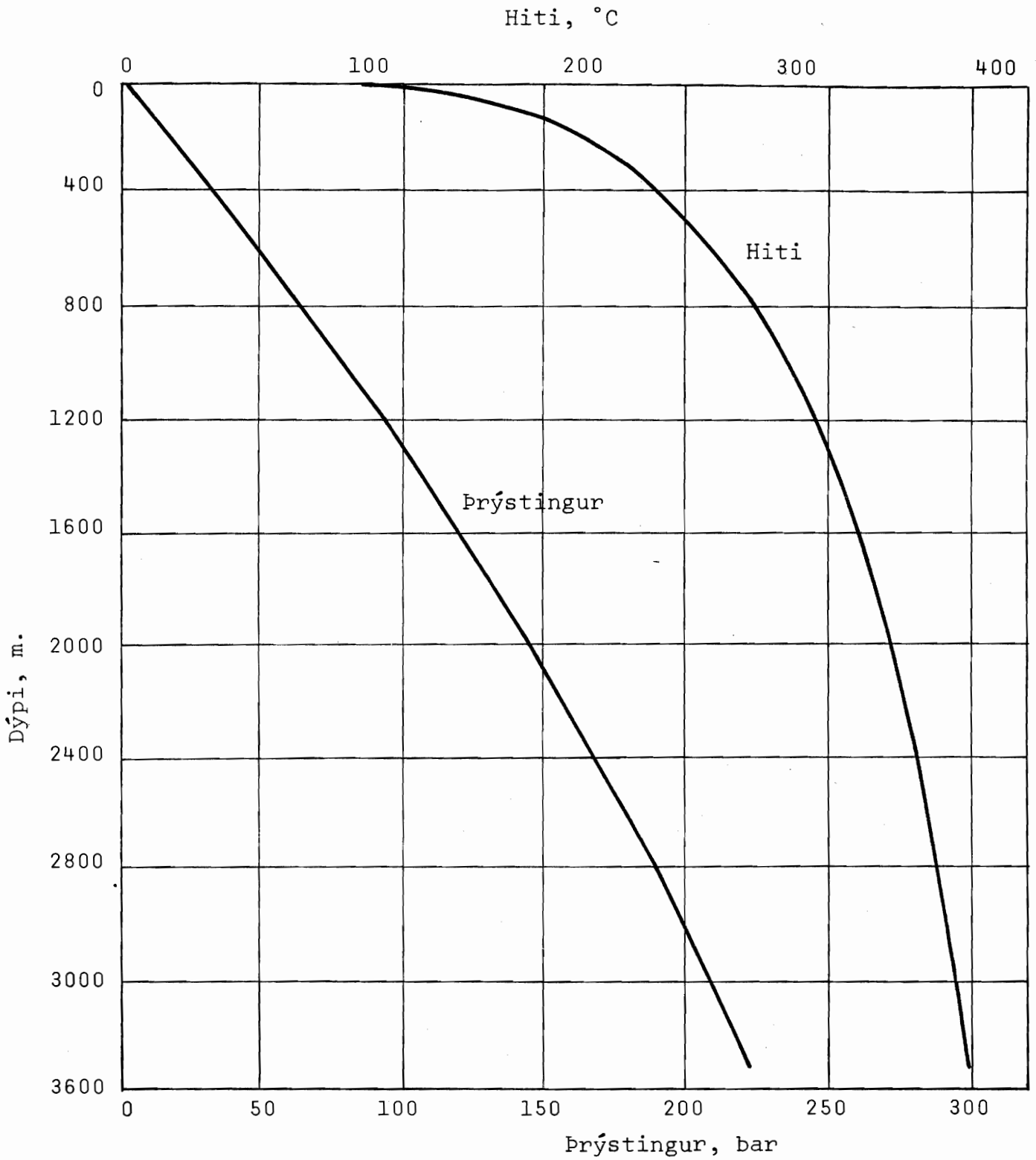
5. mynd. Minnsta veggþykkt 9 5/8" og 13 3/8" fôðurröra. Álag vegna innri þrýstings (suðuþrýstings við viðkomandi hita).



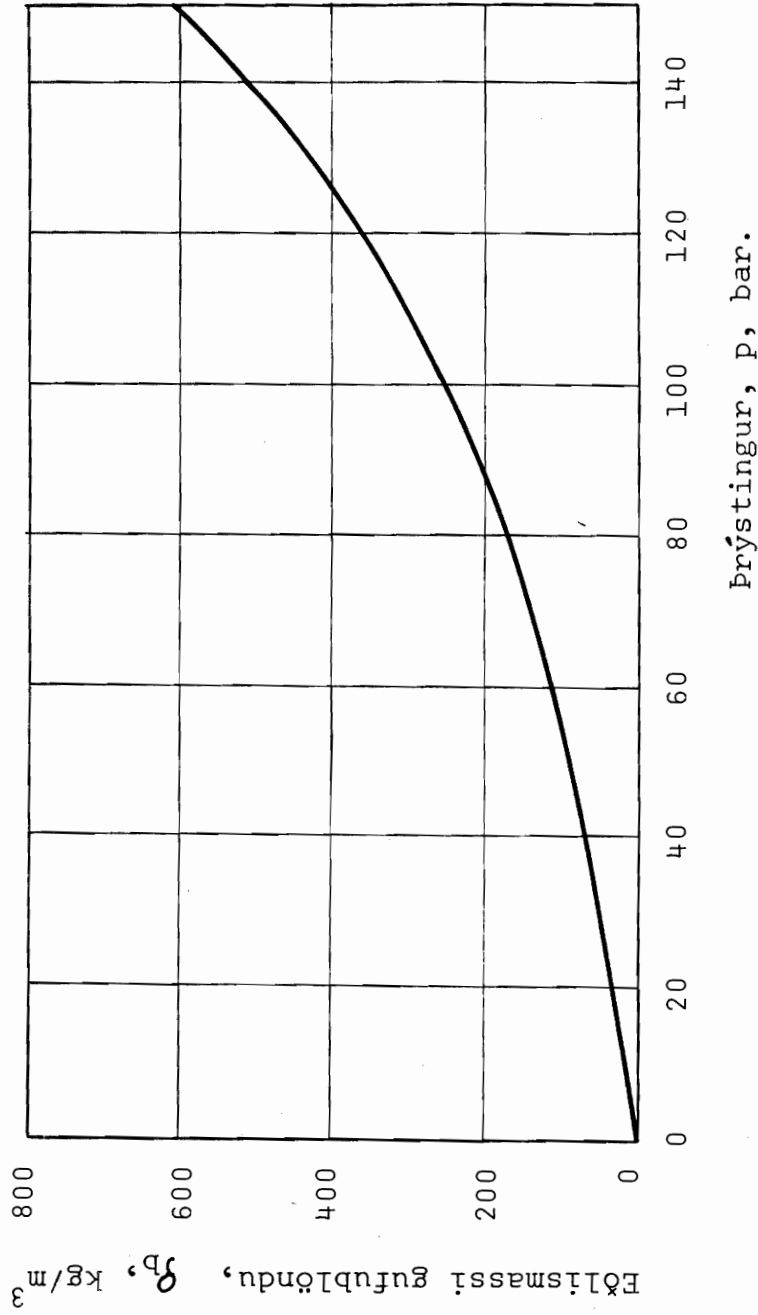
6. mynd. Spennustyrkleikabil vegna hitaþenslu, S_{PQ} , fyrir fóðurrör. Hitabil er reiknað frá 40°C.
 (a) Hitaþensla hindruð algerlega
 (b) 20% hitaþensla.



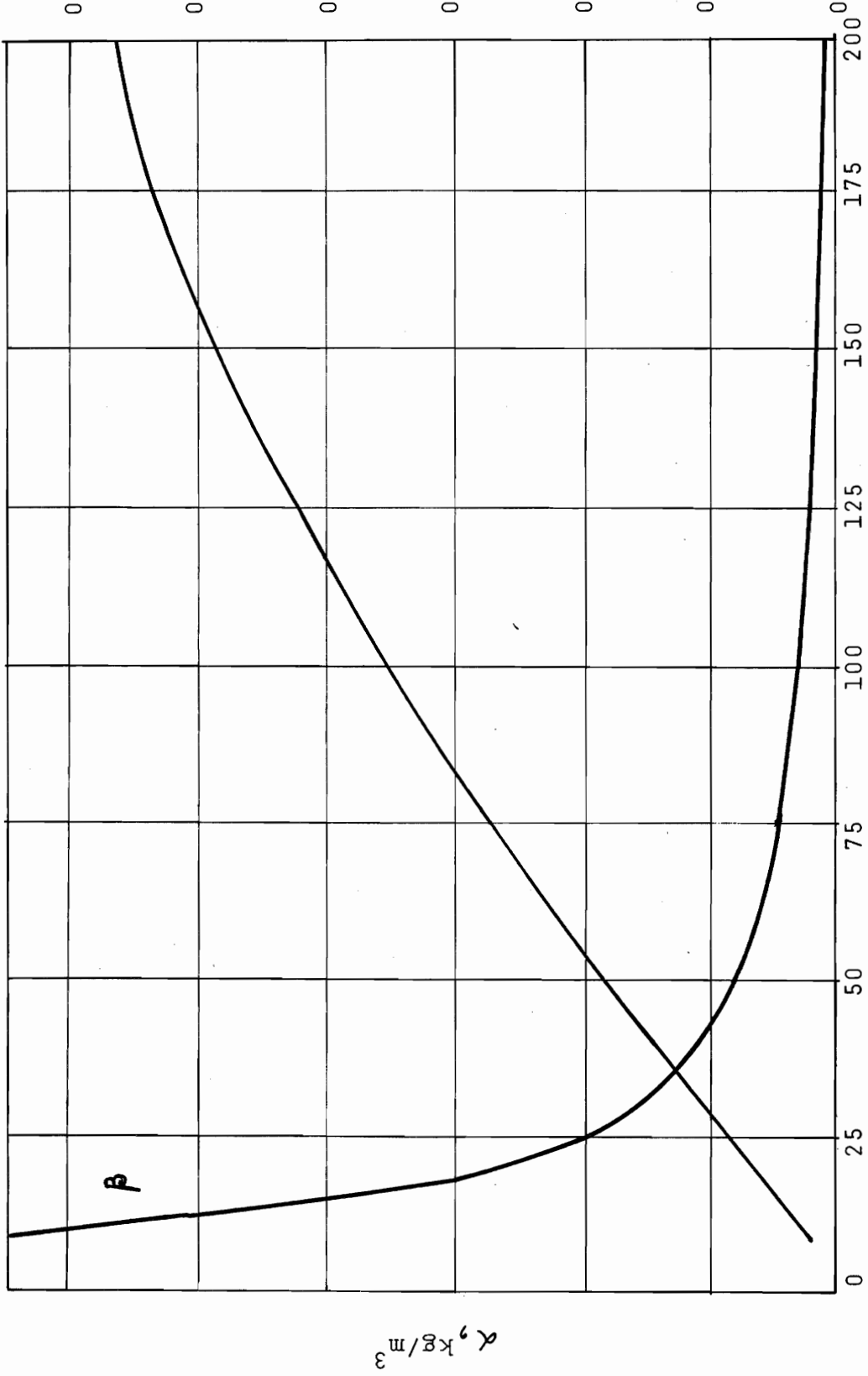
7. mynd. Algengur frágangur á háhitaborholum.



8. mynd. Suðumarksferlar - þrýstingur og hiti á mismunandi dýpi.

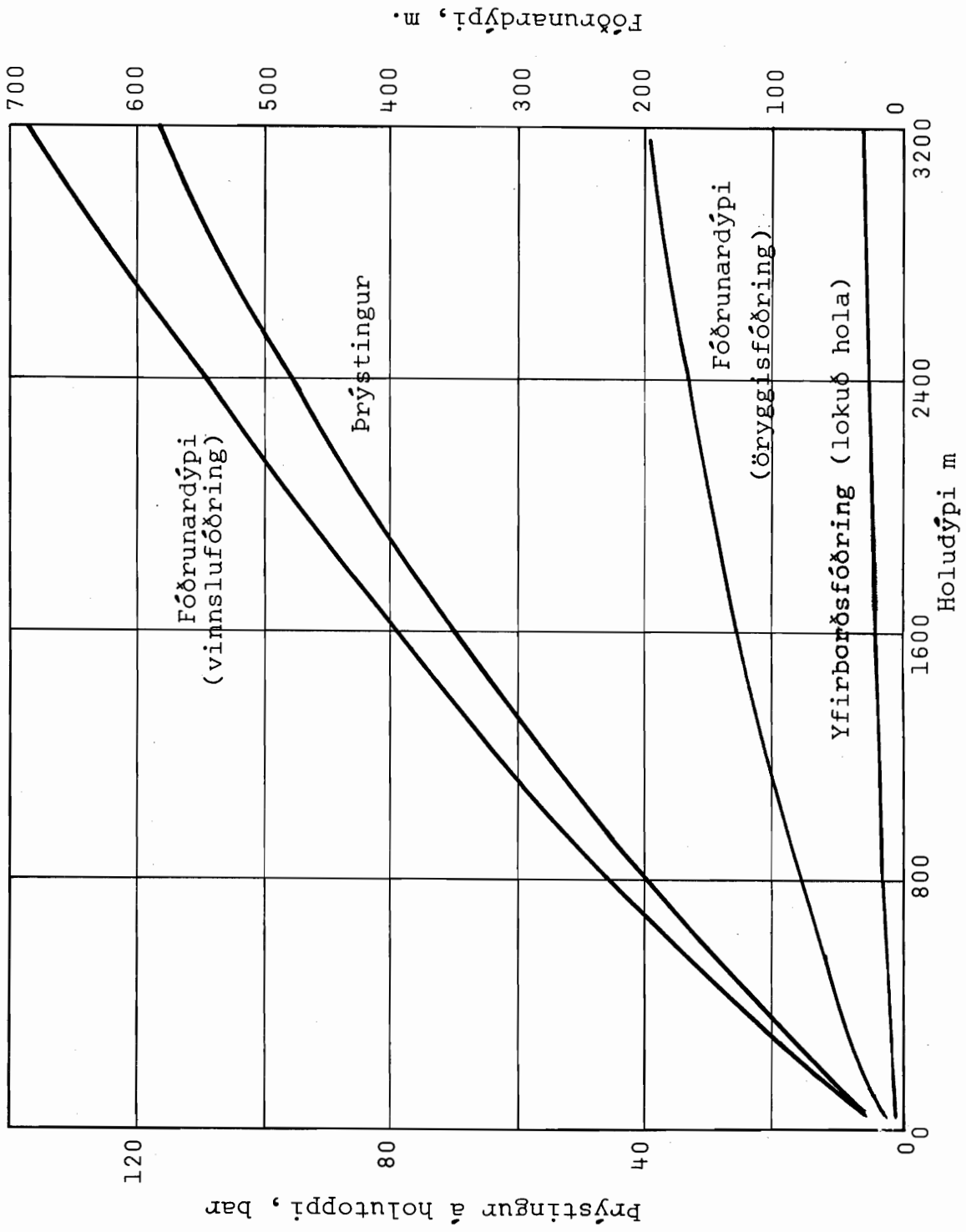


9. mynd. Eðismassi gufublöndu í borholu með innstreymsprýsting 150 bar sem fall af prýstingi.

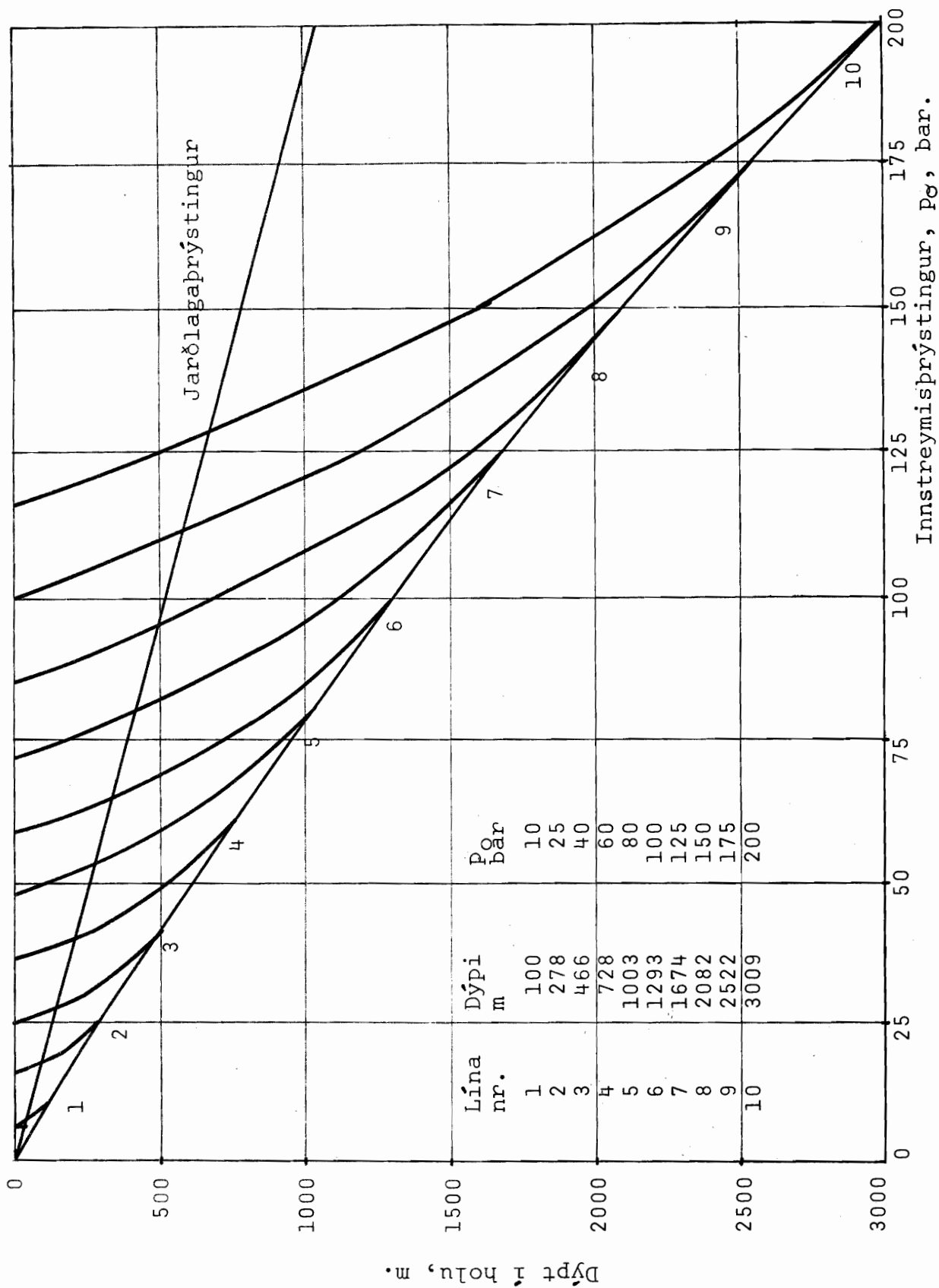


Innstreymiþrýstingur, P_0 , bar.

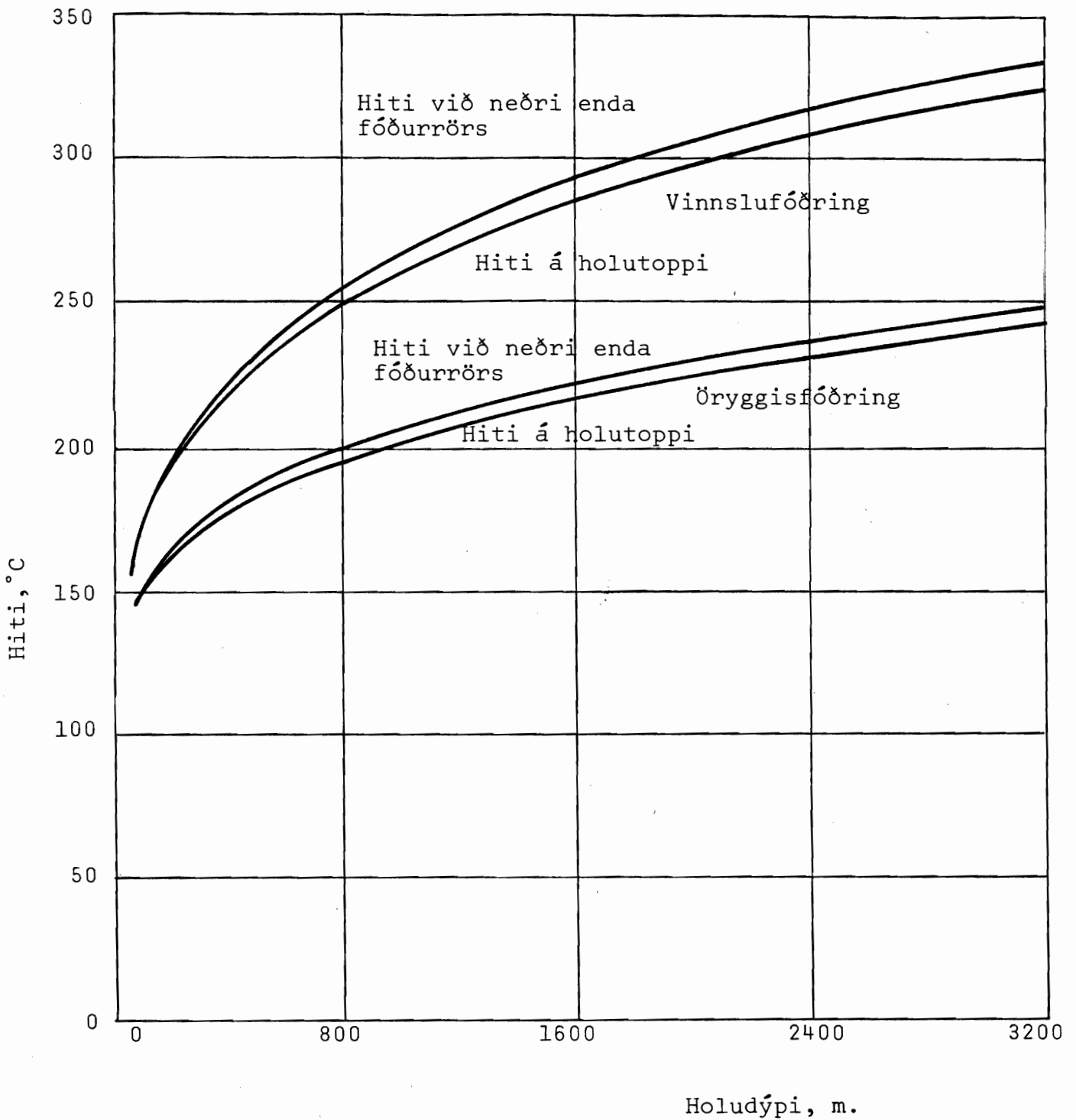
10. mynd. Gildi stuðlanna α og β í nálgunarjöfnunni $\rho = \alpha \exp(\beta p)$



11. mynd. Holutoppþrýstingur í lokaðri holu og minnstu fóðrunardýpi.



12. mynd. Þrýstidreifing í lokuðum borholum.

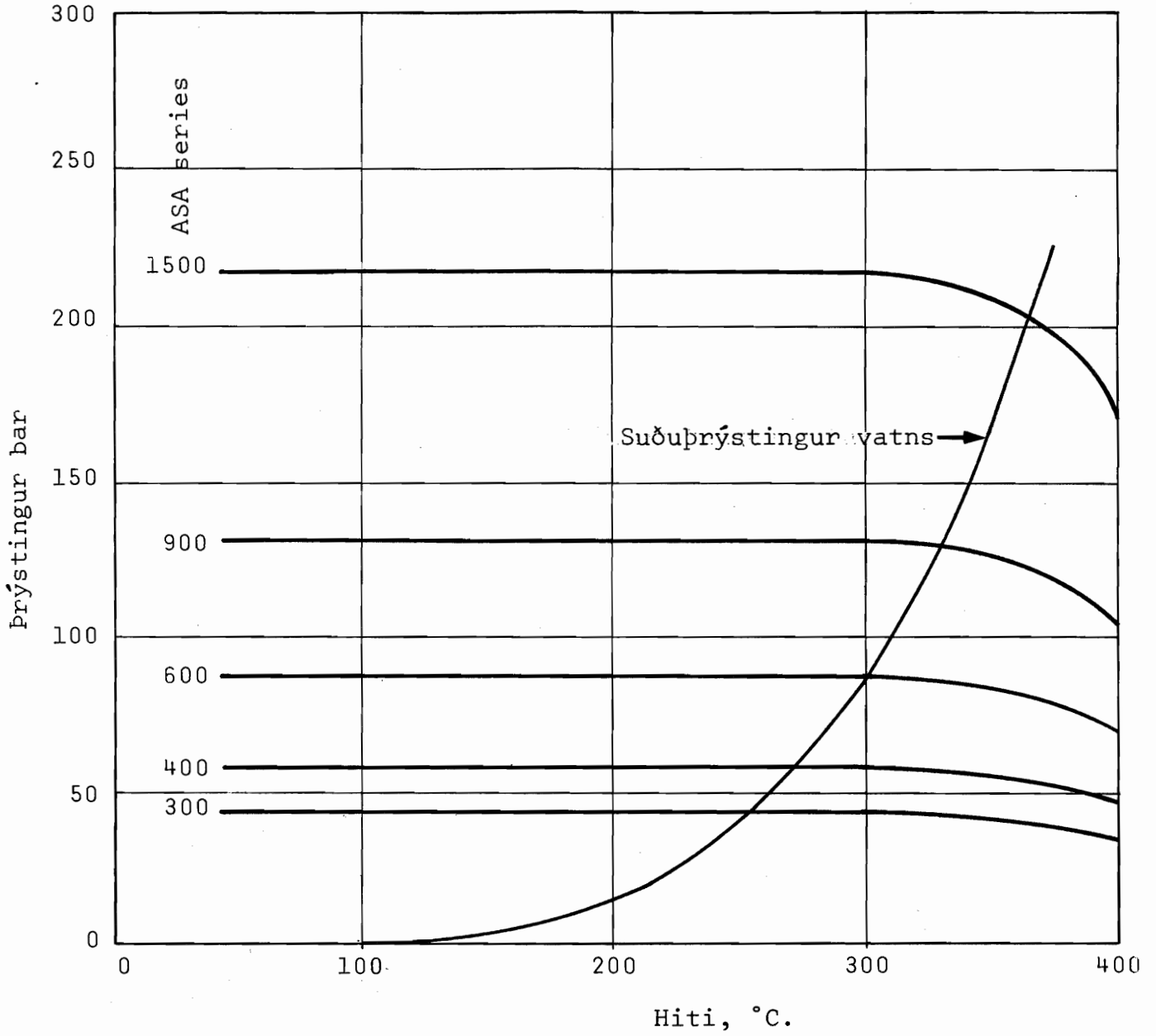


13. mynd. Hiti á holutoppi og við neðri enda fóðurrörs miðað við minnsta fóðrunardýpi.

Holudýpi, m.

	0	800	1600	2400	3200
Fóðringar	Öryggis Vinnslu Föðring 9 5/8"	H-40	J-55	C-75	
		32,3 lbs/ft-7,92 mm	36,0 lbs/ft 8,94 mm	40,0 lbs/ft 10,03 mm	43,5 lbs/ft 11,05 mm
Holutoppar	Öryggis Vinnslu Föðring 13 3/8"	H-40			
		48,0 lbs/ft 8,38 mm			
		ASA 300	ASA 400	ASA 600	ASA 900
		ASA 300	ASA 400	ASA 600	ASA 900
		ASA 300			

14. mynd. Gerð fóðurröra og holutoppbúnaðar við mismunandi holudýpi
(á við heil rör - ekki skrúfuð samskeyti)



15. mynd. Leyfilegur vinnubrýstingur í ventlum og flönsum samkvæmt ASA staðli. Samband suðuprýstings og suðuhita vatns einnig sýnt.

8581421+
8581421b mrw d

2040 vst is

may 7 1976

mannesmannröhren werke
4 duesseldorf 1
postfach 1104
mannesmann hochhaus
germany

we urgently request a replay to our letter which was sent on april 19 which is as follows.

gentlemen:

plans are under way to drill deep wells (2000 - 2500metres) into geothermal areas in iceland where it is anticipated that temperatures somewhat higher than have been measured up to now may be encountered, possibly 300 - 330 centigrades. it is planned to use casing of api specification, grades h-40 and j-55, which were delivered to iceland earlier this year under your work order no. 818/1631. according to the results of ladle analyses of the casing material and of tensile tests, the average composition and properties are as follows:

steel grade	c	si	mn	ph	s	0/0 tensile tests, y.p.	kg/mm ² t.s.	elongation0/0
h-40	.181	.201	.883	.0201	.0163	42.0	54.9	30.78
j-55	.360	.280	1.317	.0163	.0153	46.7	74.2	23.85

we have been unable to find the equivalent of these steels in din-standards. since the casing is to be used possibly at temperatures in excess of 300 centigrades we are concerned about the tensile properties at elevated temperatures. any information that you could give us on this subject would be greatly appreciated.

very truly yours,

thorbjoern karlsson
professor of
mechanical engineering

if the same information is available on n-80 and p-110 casing we appreciate receiving that also.
regards

th. karlsson
thoroddsen and partners
vst 2040

correction: we have been unable to find the equivalent

⊕
8581421b mrw d
2040 vst is

07.19#

2040 vst is va 28.6.76 8.24

8582851y mex d fsnr. 3310/6 25.6.76/mue Lo

re
decrease of yield strenght at elevated temperatures
letter of the unversity of iceland dated april 19,76

with regard to the request concerning the expected decrease
of yield strenght for casing in material grade h-40
and j-55 in case of use in geothermal areas we refer to din
17175. the mentioned hot yielding Limit values for material
grade st 45.8 can also be regarded as representative for
material grade h-40

in the meantime, we also carried out hot drawing tests for
material grade j-55 and found out that the percentage decrease
of the yield strenght corresponds to that of st 45.8.

generally, however, it should be pointed out that analogous
to din 17175, also the data mentioned in below table represent
the maximum possible reductions in yield strenght:

yield strenght reduction max. o/o as per din 1757 and for as per din 17175 and for api-qualities h-40 and j-55	temperature degrees c				
	20 c	200 c	250 c	300 c	350 c
0 o/o	19 o/o	27 o/o	35 o/o	42 o/o	

we should like to apologize for the delayed answering, however
we had to wait for the results of the hot drawing tests.

regards
mannexport vr 31 schulte-hostede

8582851y mex
8582851x mex d@
2040 vst is