



ORKUSTOFNUN  
Vatnsorkudeild



Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen hf.  
Verkfræðiráðgjafar FRV

# VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Hefi II: Fylgiskjöl 12-27

OS-85121/VOD-07

Reykjavík, desember 1985



ORKUSTOFNUN  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík



Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen hf.  
Verkfræðiráðgjafar FRV

# VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Hefti II: Fylgiskjöl 12-27

OS-85121/VOD-07

Reykjavík, desember 1985

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 12**

**Orkuvinnslugeta**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Orkuvinnslugeta

Áreiðanlegar áætlanir um orkuvinnslugetu (orkumátt) virkjana eru ekki síður mikilvægar en áætlanir um stofnkostnað. Orkuvinnsla einstakra virkjunaráfanga er ákvörðuð með tölrekstri og orkumáttur tilgreindur sem mismunur á orkuvinnslugetu virkjanakerfisins eftir tilkomu nýju virkjunarinnar og orkuvinnslugetu grunnkerfis, sem nýja virkjunin tengist við. Orkumáttur einstakra virkjana er þannig háður tímaröð virkjananna.

Hér á eftir er sett fram tilgáta um líklegt samband milli orkuvinnslu, rennslisorku og miðlunarstigs, sem skilgreint er sem hlutfall orkuinnihalds miðlunarlóna af rennslisorku ( $E_M/E_R$ ), sbr. meðfylgjandi línurit I. Þótt slík orkuvinnsluákvörðun geti aldrei komið í staðinn fyrir nákvæmari ákvörðun með tölrekstri, gæti hún orðið fljótvirk og líklega tiltölulega áreiðanleg aðferð til að bera saman mismunandi leiðir til að fullnægja vaxandi orkupörf. Auk þess gæti hún gefið vísbendingar um hugsanlegar villur í nákvæmari orkuvinnsluákvörðunum.

Í meðfylgjandi skrá er gert ráð fyrir ákveðinni tímaröð virkjana. Miðað við hana er skráð rennslisorka kerfisins eins og hún áttlast á hverjum tíma ( $E_R$ ) og einnig orka í fullum miðlunarlónum ( $E_M$ ). Jafnframt er skráður orkumáttur kerfisins ( $E$ ), sem summa af núverandi áætlunum um orkuvinnslugetu einstakra virkjunaráfanga. Í núverandi áætlunum gætir án efa misræmis í tilgreindum orkumætti einstakra virkjana, sem líklega felst einkum í ósamræmi að því er varðar forsendur um virkjanaröð.

Sem dæmi um áhrif af röðun virkjunaráfanga má geta þess, að reiknuð orkuvinnsluaukning með Blönduvirkjun er 771 GWh/a (sjá skrá), en komi virkjunin á eftir Kvíslaveitu ásamt Búrfellsvirkjun II yrði reiknuð orkuvinnsla 745 GWh/a. Orkuvinnsla Blönduvirkjunar sem síðasta áfanga í tilgreindri virkjanaröð (á eftir Lagarf. II) yrði hins vegar 725 GWh/a, sem þá er líklega nálægt raunverulegri eiginorku Blönduvirkjunar. Þar sem Stórasjávarmiðlun er sett í virkjanarröðina reiknast orkumáttaraukning 203 GWh/a. Kæmi miðlunin sem síðasti áfangi tilgreindra virkjana yrði aukningin hins vegar 264 GWh/a, sem þá er hinn raunverulegi þáttur Stórasjávarmiðlunar í heildarorkuvinnslunni.

Í skránni er tilgreint hlutfall orkuvinnsluaukningar í áfanga af tilsvarendi aukningu rennslisorku ( $\Delta \tilde{E} / \Delta E_R$ ). Athygli vekur að í sumum tilvikum er þetta hlutfall stærra en einn. Á það sér stað samfara verulegri hækkun miðlunarstigs, sem bætir orkunýtingu í því kerfi sem fyrir er.

Með þeirri einföldun, sem hér hefur verið höfð við ákvörðun á orkuvinnslugetu, eru einungis tveir þættir taldir hafa áhrif á hana, þ.e. rennslisorka kerfisins og orkuinnihald miðlunar. Aðrir þættir svo sem mismunandi rennsliseiginleikar einstakra vatnsfalla geta hins vegar haft marktæk áhrif, sem þó ættu að fara minnkandi eftir því sem kerfið stækkar. Fróðlegt er að athuga áhrif hvors hinna tveggja þátta fyrir sig, sbr. línurit II. Þar má t.d. lesa, að á miðlunarstigi 0,15 (15 %) eykur ein GWh í lóni árlega orku um 0,84 GWh/a og með einnar GWh aukningu á árlegri rennslisorku eykst orkuvinnsla um 0,64 GWh/a. Sem dæmi um slíka aðgreiningu má nefna, að af 709 GWh/a, sem Kvíslaveita ásamt Búrfellsvirkjun II er talin auka við orkuvinnslugetu virkjanakerfisins, eru nálægt 321 GWh/a vegna aukinnar miðlunar og 388 GWh/a vegna aukningar rennslisorku.

Tilgreindar tölur um rennslisorku ( $E_R$ ) og orkuinnihald miðlunarlóna ( $E_M$ ) byggjast að hluta á ágizkunum. Endurskoða þarf þessar stærðir og jafnframt áætlaða orkuvinnslu ( $E$ ) með samræmdum orkuvinnsluákvörðunum. Fengist þá mun traustari grundvöllur til að byggja á tilgátu um samband nefndra stærða.

Nánar mætti skilgreina orkuvinnslugetu sem eftirfarandi fall,

$$E = E \{ E_R, E_M, N, O \} ,$$

þar sem  $N$  er uppsett afl í kerfinu og  $O$  tákn fyrir eiginleika orkunotkunar auk áður skilgreindra stærða.

Sé hins vegar gert ráð fyrir ákveðinni staðlaðri orkunotkun og að uppsett afl í einstökum virkjunum takmarki ekki orkuvinnslu að neinu ráði, fæst,

$$E \approx E \{ E_R, E_M \} ,$$

eins og hér hefur verið reiknað með. Verður þá enn fremur að gera ráð fyrir, að engar verulegar innrennslitakmarkanir verði í einstök miðlunarlón og að tryggð sé lágmarksmiðlun fyrir alla meginhluta virkjanakerfisins. Orkuvinnsla verður þá fyrst og fremst háð heildarmiðlun, en staðsetning einstakra miðlunarlóna skiptir litlu máli.

VIRKJANIR	Núverandi áætlanir					Samkv. jöfnu			Samanb.	
	$E_R$ GWh/a	$E_M$ GWh	$E_M/E_R$	$E$ GWh/a	$\Delta E$ GWh/a	$\tilde{E}$ GWh/a	$\Delta \tilde{E}$ GWh/a	$\Delta \tilde{E}/\Delta E_R$	$\frac{E-\tilde{E}}{\tilde{E}}$ %	$\frac{\Delta E-\Delta \tilde{E}}{\Delta \tilde{E}}$ %
Grunnkerfi	5280	785	0,149	4000 (4000)		4031 (4031)	(0,763)		-0,8	(-0,8)
Blanda	6119	1072	0,175	4790	790	4802	771	0,919	-0,2	2,5
Kvíslav. Búrf. II	6698	1557	0,232	5610	820	5511	709	1,225	1,8	15,7
Vatnsfell	7145	1828	0,256	6080	470	5965	454	1,016	1,9	3,5
Villinganes	7423	1830	0,247	6270	190	6164	199	0,716	1,7	-4,5
Fljótsdalur	8959	2777	0,310	7595	1325	7672	1508	0,982	-1,0	-12,1
Urriðafoss	10098	2972	0,294	8470	875	8596	924	0,811	-1,5	-5,3
Stafnsvötn	10936	3206	0,293	9260	790	9305	709	0,846	-0,5	11,4
Sultartangi	11804	3385	0,287	9920	660	10015	710	0,818	-0,9	-7,0
Ábóti Stóráver	13294	3856	0,290	11170	1250	11296	1281	0,860	-1,1	-2,4
Núpur	13975	3979	0,285	11695	525	11846	550	0,808	-1,3	-4,5
Búðarháls	14594	4156	0,285	12245	550	12371	525	0,848	-1,0	4,8
Norðlingaa. Gljúfurl.	16105	4831	0,300	13795	1550	13741	1370	0,907	0,4	13,1
Stórisjór	16105	5635	0,350	14075	280	13944	203	-	0,9	37,9
Íshólsvatn	16686	5661	0,339	14450	375	14414	470	0,809	0,2	-20,2
Haukholt	17099	5748	0,336	14800	350	14759	345	0,835	0,3	1,4
Fjarðará	17222	5786	0,336	14905	105	14865	106	0,862	0,3	-0,9
Laxá IV	17299	5789	0,335	15005	100	14926	61	0,792	0,5	63,9
Búðafoss	17905	5978	0,334	15475	470	15446	520	0,858	0,2	-9,6
Bjallar	18296	6087	0,333	15860	385	15776	330	0,844	0,5	16,7
Hestvatn	18626	6123	0,329	16140	280	16046	270	0,818	0,6	3,7
Austurl.v.	28763	9633	0,335	24670	8530	24820	8774	0,866	-0,6	-2,8
Lagarf. II	29123	9742	0,335	24975	305	25128	308	0,856	-0,6	-1,0

$$\tilde{E}/E_R \approx 0,6 + 1,351 E_M/E_R - 1,69 (E_M/E_R)^2, \quad 0,1 \leq E_M/E_R \leq 0,35$$

$E$ : rennslisorka,

$E_R$ : orka í miðlunarlónum,

$E_M$ : núverandi áætlun um orkumátt,

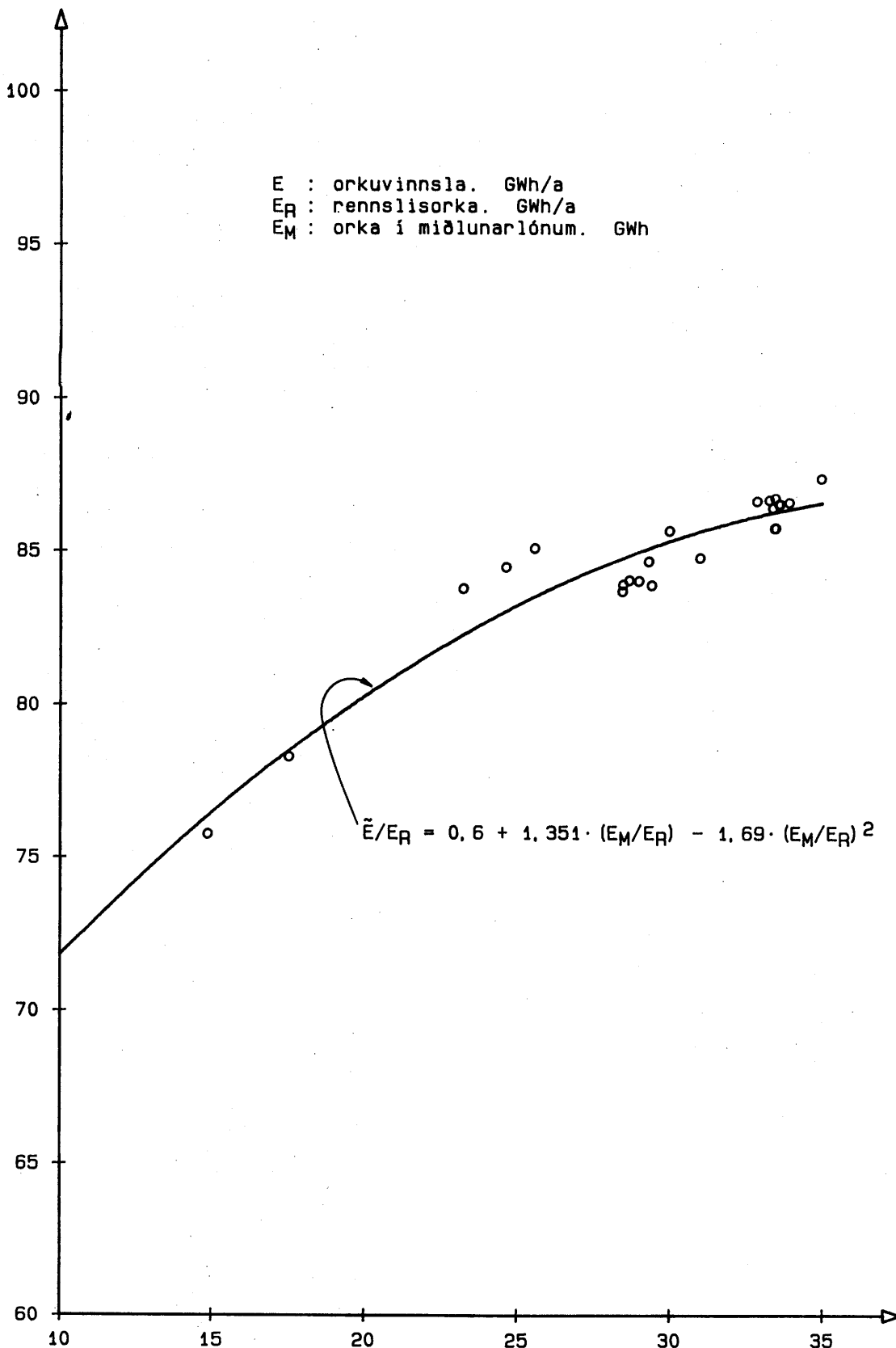
$\tilde{E}$ : reiknuð orkuvinnslugeta samkvæmt jöfnu,

$E_M/E_R$ : miðlunarstig.

# VATNSORKA Á ÍSLANDI

Orkuvinnsla sem fall af  
rennslisorku og miðlunarstigi

$E/E_R$  %



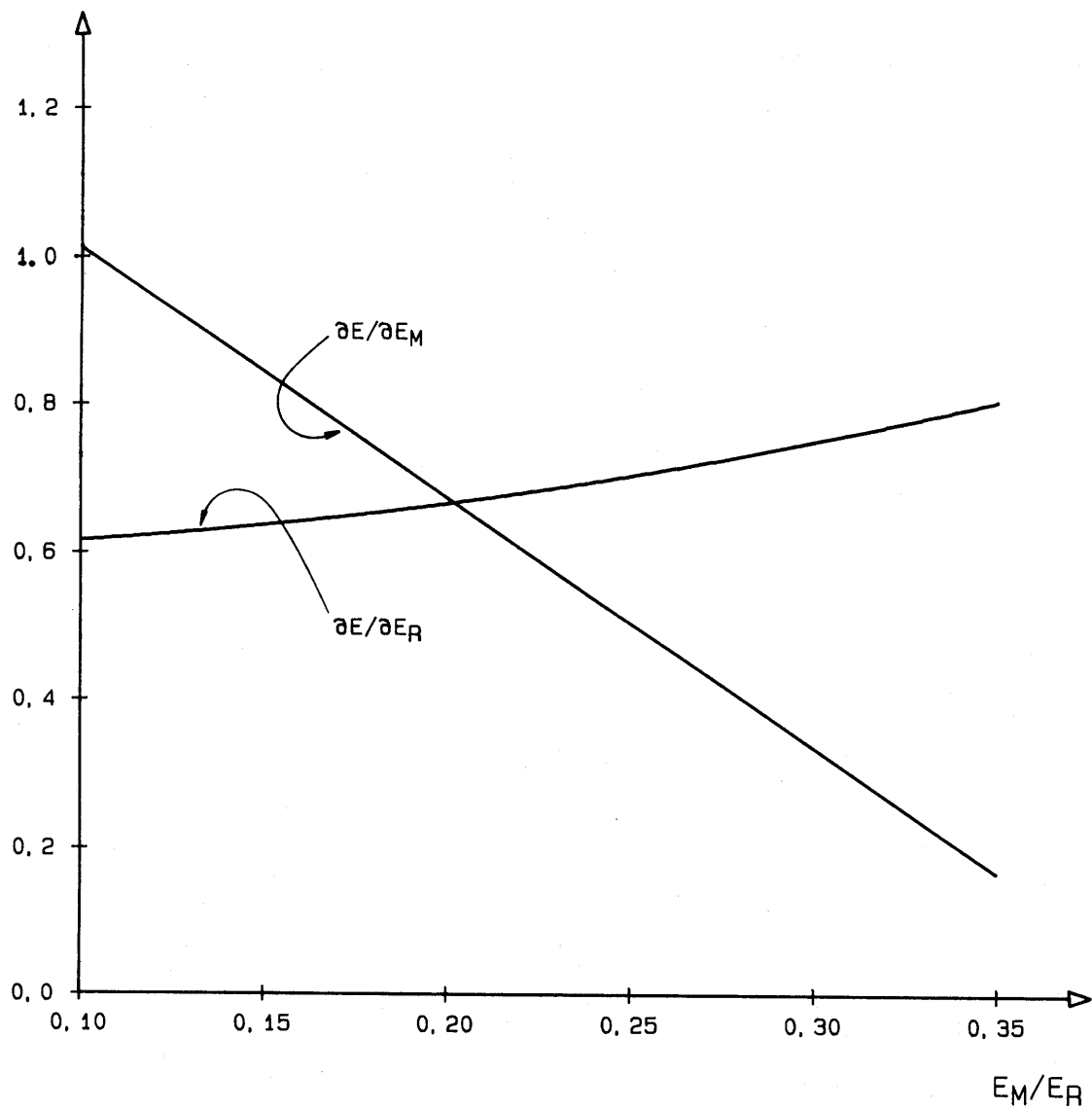
$E_M/E_R$  %

# VATNSORKA Á ÍSLANDI

Aðgreind áhrif miðlunar  
og rennslisorku á orkuvinnslugetu

$$\begin{aligned}\tilde{E}/E_R &= 0.6 + 1.351 \cdot (E_M/E_R) - 1.69 \cdot (E_M/E_R)^2 \\ \partial E/\partial E_M &= 1.351 - 3.38 \cdot (E_M/E_R) \\ \partial E/\partial E_R &= 0.6 + 1.69 \cdot (E_M/E_R)^2\end{aligned}$$

$\partial E/\partial E_R, \partial E/\partial E_M$





**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 13**

**Þrýstingsjöfnun**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Þrýstingsjöfnun

Gangstýring hverfilsamstæðna einkennist í grundvallaratriðum af gangsetningartíma hverfils  $T_m$  í s og aðrennslistíma vatnsvega  $T_w$  í s. Góðir gangstýringareiginleikar eru taldir nást, þegar skilyrðinu

$$T_m \geq 2 T_w^2 \quad [1]$$

er fullnægt.

Með "venjulegu" tregðuvægi vélasamstæðu

$$WR^2 \approx 3 \cdot 10^5 \left[ \frac{qH}{n^{1,5}} \right]^{1,25} \text{ kgm}^2 ,$$

fæst gangsetningartími

$$T_m \approx 0,366 (qH)^{0,25} n^{0,125} , \text{ s} \quad [2].$$

Hér er  $q$  vatnsnotkun hverfils við ástimplað afl í  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $H$  hönnunarfalshæð í m og  $n$  fjöldi snúninga á mínútu.

Aðrennslistími vatnsvega reiknast af jöfnunni

$$T_w = \frac{\sum l_i v_i}{gH} , \text{ s} \quad [3].$$

Hér er  $\sum l_i v_i = Lv$ , þar sem  $L$  er heildarlengd vatnsvegar í m og  $v$  er veginn meðalstraumhraði eftir lengdum í  $\text{m/s}$ ,  $H$  er hönnunarfalshæð í m og  $g$  þyngdarhröðunin  $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ .

Með skilyrði [1] má ákvarða mestu lengdir vatnsvega án þess að gera þurfi ráð fyrir sérstökum búnaði til þrýstingsjöfnunar svo sem jöfnunarpróm eða svelgjum.

Fyrir virkjun með francishverflum, aðrennslisgöngum, lóðréttum þrýstigöngum ( $l \approx H$ ) og opnu frárennsli eða svelg á frárennslisgöngum fæst mesta lengd aðrennslisganga, þar sem  $Q$  er hönnunarrennsli um vatnsvegi í  $m^3/s$  og  $N$  uppsett afl alls í MW.

$$L_{\max} \approx 8,02 \cdot \frac{H^{1,086}}{Q^{0,068}} - 2,80 \cdot \frac{H^{1,060}}{Q^{0,029}} \quad m \quad [4],$$

eða

$$L_{\max} \approx 5,81 \cdot \frac{H^{1,154}}{N^{0,068}} - 2,44 \cdot \frac{H^{1,089}}{N^{0,029}} \quad m \quad [5],$$

Er þá gert ráð fyrir hagkvæmustu viddum vatnsvega, snúningshraða vélasamstæðna nálægt leyfilegum hámarkshraða og fjölda vélasamstæðna sem næstu heilu tölu við stærðina  $p = (N/30)^{0,5}$ .

Nokkur gildi á  $L_{\max}$  í m eru í eftirfarandi skrá, sem spannar gildisviðið nokkurn veginn.

H m	N MW							
	30	45	65	100	150	225	335	500
30	144	138	134	128	-	-	-	-
45	233	225	217	209	201	-	-	-
70	395	381	368	354	341	328	-	-
110	676	652	631	607	585	563	543	-
175	1175	1133	1097	1055	1017	981	946	911
270	1966	1897	1836	1768	1705	1644	1586	1529
420	-	3204	3103	2988	2883	2781	2684	2589
650	-	-	5208	5017	4842	4672	4511	4353

Með nálgun má í stað jafna [4] og [5] reikna með

$$L_{\max} \approx 5,39 H^{1,097} Q^{-0,094} \quad [6],$$

eða

$$L_{\max} \approx 3,45 H^{1,191} N^{-0,094} \quad [7],$$

Ef gert er ráð fyrir virkjun með þrýstipípu úr stáli frá inntaki að vélasamstæðu, francishverflum, opnu frárennsli og að p jafnstórar vélasamstæður tengist pípunni fæst mesta lengd pípu,

$$L_{\max} \approx 3,895 \begin{bmatrix} Q \\ - \\ p \end{bmatrix}^{0,0938} Q^{-0,1744} H^{1,1318} A^{-0,2752} \text{ m} \quad [8],$$

Hér er Q virkjað rennsli alls í m<sup>3</sup>/s, H hönnunarfalldæði í m og stuðull A reiknast,

$$A = 8 + 0,0109H^{1,2} - 0,289H^{0,6}, \quad H \geq 75 \text{ m}$$

og

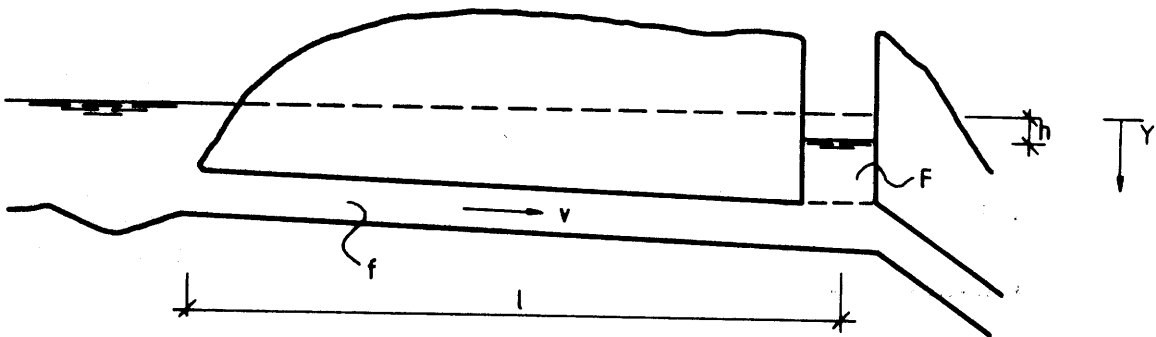
$$A = 6,08445, \quad H \leq 75 \text{ m}$$

Nokkrar lausnir á jöfnu [8] með p = 1 eru í eftirfarandi skrá.

Q m <sup>3</sup> /s	H m						
	30	50	75	100	150	300	600
2	106	188	298	412	639	-	-
3	102	182	289	398	619	1232	-
5	98	175	277	382	595	1182	
7	95	170	270	372	578	1151	2106
10	93	165	262	362	561	1118	2046
15	90	160	253	350	543	1082	1980
20	88	156	248	342	531	1057	1935
30	85	151	240	331	514	1023	1873
50	81	145	230	318	493	982	1797
70	79	141	224	309	480	955	-
100	77	137	218	300	466	929	-
150	75	133	211	291	451	-	-

Með víðari pípum eða göngum og meira tregðuvægi vélasamstæðna en hér var reiknað með má ná fullnægjandi gangstýringareiginleikum með lengri vatnsvegum en að framan greinir. Verði þeir hins vegar að marki lengri verður að gera sérstakar ráðstafanir til þrýstingsjöfnunar. Þar sem því verður við komið, er þá einfaldast og kostnaðarminnst að koma fyrir opnun jöfnunarþróms og svelgjum.

Minnsta flatarmál jöfnunarþróar og fyrstu (mestu) sveifluhæðir má við yfirlitsáætlanagerð reikna af eftirfarandi jöfnum, sbr. skýringarmynd.



$$F \geq \frac{l f v^2}{g h H}, \quad \text{m}^2$$

$$Y_{\max} = v \sqrt{\frac{l f}{g F}}, \quad \text{m}$$

$$c = h/Y_{\max}$$

$$Y_1/Y_{\max} = -e^{-0,75c}$$

$$Y_2/Y_{\max} = 0,84e^{-1,96c} + 0,16$$

$$h \approx 0,08v^2 + I \cdot l, \quad \text{m}$$

Hér er:

- g: þyngdarhröðunin  $9,81 \text{ m/s}^2$
- H: hönnunarfalshæð í m
- f: þversniðflatarmál vatnsvegar (ganga eða pípu) í  $\text{m}^2$
- F: flatarmál jöfnunarpróar í  $\text{m}^2$
- l: lengd vatnsvegar í m
- Q: hönnunarrennsli í  $\text{m}^3/\text{s}$
- v: meðalstraumhraði  $Q/f$  í m/s
- I: falltöþ við hönnunarrennsli m/m

$Y_{\text{max}}$ : ódeyfð sveifla í m

$Y_1$ : fyrsta sveifla (upp) í m

$Y_2$ : önnur sveifla (niður) í m

Jöfnurnar gilda um deyfðar sveiflur við skyndilegt álagsfall, þegar ekki er sérstakur deyfifbúnaður við pró.

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 14**

**Ísamál**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Ísamál

Yfirlitsupplýsingum um ísalög íslenzkra vatna hefur verið safnað af vatnamælingum Orkustofnunar (Sigurjón Rist 1959, 1970). Nánari athuganir hafa verið gerðar á virkjunarstöðum, einkum á Þjórsársvæðinu. Í sambandi við virkjanir þar hafa m.a. verið þróaðar reikniaðferðir til að áætla ísmyndun í straumvökum eftir veðri (Sigmundur Freysteinnsson & Björn Erlendsson 1976). Þessir reikningar hafa verið notaðir við rekstrareftirlíkingar.

Á Þjórsársvæðinu ofan Búrfells getur verið ísmyndun í ánum allt frá september til maí. Þrátt fyrir einstöku áhlaup þá eru þó október og apríl í raun litlir ísamánuðir, sbr. línurit yfir langæi varmataps á 1. mynd. Varmatapið er tilgreint í Mcal  $\text{km}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Þegar það er  $80 \text{ Mcal km}^{-2}\text{s}^{-1}$  þá myndast 1 tonn/s af ís á hverjum  $\text{km}^2$  af auðu  $0^\circ$  vatni. Á 2. mynd er línurit yfir samband varmataps frá  $0^\circ$  vatni við lofthita og vindhraða við venjulegar rakaaðstæður. Þar er einnig tafla yfir sólgeislun. Hún er hverfandi lítil frá októberlokum fram í miðjan febrúar. Á þessum tíma er enginn munur dags og nætur hvað varðar ísmyndun. Í marz-apríl hefur sólgeislun aftur á móti geysimikil áhrif, jafnvel í töluverðu frosti hækkar vatnshiti á daginn og grunnstingull losnar upp í straumvökum.

Upplýsingar um íspykkt á stöðuvötnum og íspekjutíma eru takmarkaðar. Íspykkt á Þórisvatni hefur mælt um 1 m, en töluvert af þessu hefur verið gráís. Íspekjutíminn er breytilegur eftir dýpt og hæðarlegu vatna. Á Þórisvatni er hann venjulega um 180 dagar, desember-maí. Íspekjutíminn á Mývatni er álíka langur, en nokkru fyrr á ferðinni (Sigurjón Rist 1969).

Ísamál sem tengjast vatnsaflsvirkjunum má í stórum dráttum greina í tvennt:

- A. Ísálag á mannvirki
- B. Rennslustruflanir vegna íss

A. Ísálag getur verið að einhverju leyti ákvarðandi um ýmis mannvirki, t.d. magn í þungastíflum, yfirfallslokur o.fl. og hefur þannig áhrif á stofnkostnað. Á forhönnunarstigi er ekki ástæða til sundurgreiningar, svo sem eftir hæðarlegu og landshlutum, eða nánari umfjöllunar um þetta álag frekar en annað álag. - Enda þótt mikið hafi verið rannsakað og ritað um ísálag (sjá t.d. Michel 1978) þá er þetta í flestum tilvikum allmikilli óvissu bundið enn sem komið er. Staðlar um þessi efni eru yfirleitt fátæklegir; hér á landi hefur einkum verið stuðzt hinn sovézka (SNI P-11-57-75).



B. Rennslustruflanir vegna ísa eru margvíslegar. Í náttúrulegum farvegum geta grunnstingulsstíflur og hrannir valdið þurrðum, þrepahlaupum og ágangi. Hrannir geta bæði myndast vegna langvarandi krapamyndunar í straumvökum, eins og t.d. Urriðafosshrónn í Þjórsá, og við ísalausnir á vorin eða ísabrot í vetrarhlákum, eins og t.d. í Blöndu. Vatnsborðshækkun við hrannir í stærri ám skiptir oft nokkrum metrum og geta þær valdið stórbrotnum rekstrartruflunum við virkjanir eins og kunnugt er frá fyrri tíð við veituinntak Búrfellsvirkjunar. Skylt fyrirbæri eru svokallaðar flotstíflur, þ.e. þegar krap safnast undir íspekju og þrengir að farveginum. Þetta hefur t.a.m. komið fyrir í Bjarnarlóni við Búrfellsvirkjun, en er raunar algengt í náttúrulegum farvegum.

Ísmyndun í straumvötnum byrjar með undirkælingu og svífismyndun. Svífisinn er litlar, örþunnar, kringlóttar plötur sem myndast um allan strauminn þar sem vatnið er undirkælt. Þegar straumhraði er minni en rúmlega 1 m/s safnast svífisinn fljótt saman í krapaflygsur sem fljóta á yfirborðinu og geta myndað íslummur og síðan stærri fleka þar sem straumur er hæfilega lygn. Í miklum straumi er krapið meira og minna upphrært og nær ekki að frjósa saman, eins og t.d. í Þjórsá ofan Búrfells. Jafnframt svífismynduninni sezt grunnstingull á botn og annað undir vatnsborði.

Íspekja á stærri straumvötnum myndast þannig að ísskriðið stöðvast við einhverja hindrun, t.d. lagnarísbrún, spöng, ísvarnarstreng eða stíflu, og síðan vex þekjan móti straumi. Tvisýnn straumhraði fyrir þessa íspekjumyndun er háður dýpt og lögun farvegarins, gerð og þykkt íssins, vatnshita og varmatapi. Þetta hefur lengi verið rannsóknarefni, bæði fræðilega og í náttúrunni (sjá t.d. Pariset, Hausser & Gagnon 1966, Uzuner & Kennedy 1974 og Billfalk 1982). Ef straumhraðinn er yfir tvisýnum hraða berst ís undir skörina, íspekjan þykkar og vatnsborð hækkar og geta þannig myndast aftur skilyrði til íspekjumyndunar áfram upp eftir farveginum. Við verstu aðstæður pressast íspekjan saman í rykkkjum og getur orðið margra metra þykk eins og kunnugt er í stærri hrönnum. Sams konar fyrirbæri geta gerzt við ísalausnir.

Íspekjumyndun í litlum ám er venjulega með öðrum hætti og skipta skarir og grunnstingulsstíflur þar meira máli.

Virkjanaskurðir eru hannaðir þannig að ís, sem í þeim myndast eða í þá berst, valdi sem minnstum rekstrartruflunum. Í inntaksskurðum verður ísinn að mynda stöðuga þekju á yfirborðinu strax í upphafi þannig að hann hrannist ekki upp eða safnist í flotstíflu undir íspekjinni. Algengt er að tvísýnn hraði fyrir venjulega skurði sé á bilinu 0,5 til 0,7 m/s. Við forathuganir er lagt til að reikna með 0,6 m/s hámarks-meðalstraumhraða í aðrennslisskurðum að inntökum, og mun það skilyrði oftast verða ákvarðandi um skurðþversnið. Eftir að sterk íspekja hefur myndast þolir hún að sjálfsögðu meiri straumhraða og eru þess dæmi að rafstöðvar eru reknar þannig að dregið er verulega úr álagi á íslagnatímanum (Beauharnois). Í stærri virkjunum vantar þá vitanlega mikið af tiltæku afli um lengri eða skemmri tíma. Í hinu óstöðuga tíðarfari hér á landi gæti þetta verið nokkrum sinnum á vetri og oft fyrirvaralítið. Þó að þessi rekstrarmáti geti komið til álita, þá er mjög hæpið að reikna með slíku á forhönnunarstigi.

Frárennslisskurði frá virkjunum er venjulega hagkvæmast að hanna með miklu meiri straumhraða. Þar þarf þá að gæta þess að hraðinn sé vel yfir tvísýnum hraða fyrir íspekjumyndun helzt 1,5 m/s eða meiri. Í mörgum tilvikum er þó rofhætta ákvarðandi um hámark straumhraðans. Í löngum frárennslisskurðum verður óhjákvæmilega krapamyndun og þarf þá að hugsa fyrir því að viðtaki sé fyrir ísinn þannig að hann hrannist ekki upp og valdi vatnsborðshækkun við virkjunina eða tjóni annars staðar.

Góð reynsla er af hönnun með hliðsjón af ofangreindum forsendum, t.d. við Hrauneyjafossvirkjun. Aðrennslisskurðurinn þar er raunar auður langtímum saman á veturnum. Vatnshiti við Sigöldu er tiltölulega hár (um 0,4 °C undanfarna vetur) svo að skurðurinn, og Hrauneyjalónið einnig að nokkru leyti, éta af sér þegar jafnvægi kemst á eftir ísalagnir. Í illviðrum hefur skurðurinn þó oft lagt aftur að meira eða minna leyti. Frárennslisskurðurinn er alltaf opinn. Í miklum kuldum byrjar ísmyndun strax nokkur hundruð metrum neðan við stöðina. Straumvökin er samfelld alla leið niður að Sultartangalóni. Þar hrannast ísinn upp efst í lóninu og áfram upp Tungná upp fyrir Hald.

Ýmsar aðrar rennslistruflanir vegna íss koma fyrir við virkjanir. Alkunn vandræði af þessu tagi eru vegna grunnstinguls á inntaksristum þegar vatnið er undirkælt. Upphitun á ristum kemur að takmörkuðu gagni nema hún sé afar mikil og er frekar lagt til að taka upp ristar eða stöðva stöðina meðan þetta ástand varir, en því lýkur þegar aðrennslisskurð eða inntakslón leggur, venjulega eftir örfáar stundir. Þess er þó dæmi frá Hrauneyjafossvirkjun að svona truflun hafi staðið í sólarhring. Ristar verður helzt að hanna fyrir fullan vatnsþrýsting en ella gera ráð fyrir fullkomnum varnarbúnaði til að loka fyrir rennsli þegar mismunaprýstingur fer í leyfilegt hámark.

Um veituskurði milli vatnasviða og vatnsfalla og frá miðlunarlónum að inntakslónum gildir hið sama og fyrir aðrennslis- og frárennslisskurði. Auk þess er rétt að minna á að skurðir með litlu rennsli, eða minna en 15-20 m<sup>3</sup>/s, geta verið varhugaverðir. Þegar rennsli fer niður fyrir þetta geta grunnstingulsstíflur o.p.h. orðið meira eftir því sem rennsli er minna eins og kunnugt er af smáám og lækjum.

Auk rennslistruflana í vatnsvegum og veituskurðum þarf að hafa í huga breytingar á sjálfum vatnsföllunum vegna virkjana. Rennslishættir og ísalög geta breytt bæði til hins betra og verra. Á forathugunarstigi er þetta ekki rannsakað að marki, en umhverfisbreytingar af þessum ástæðum ber að hafa í huga.

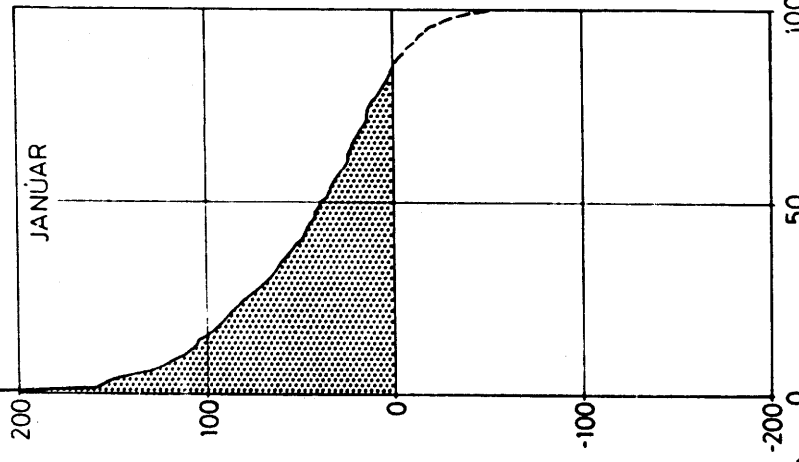
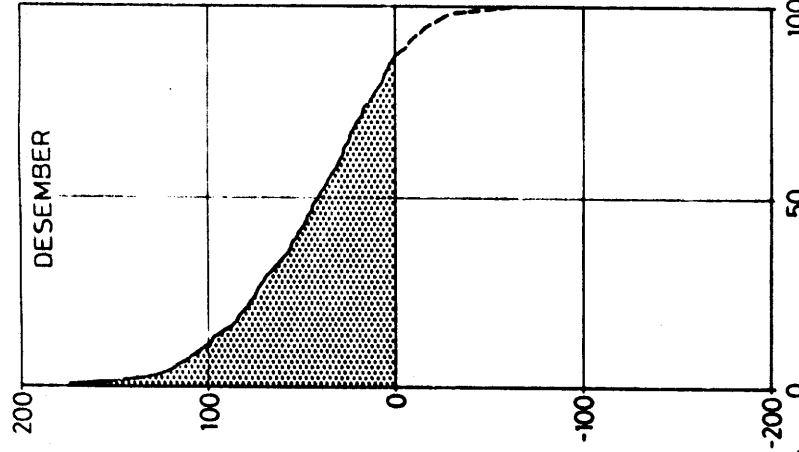
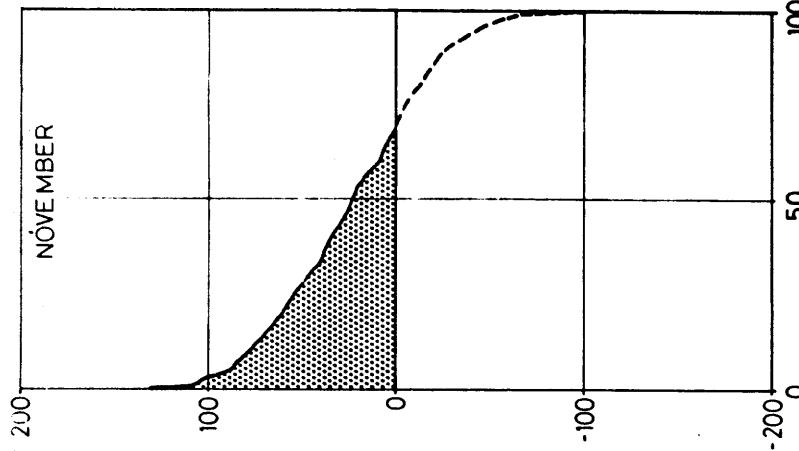
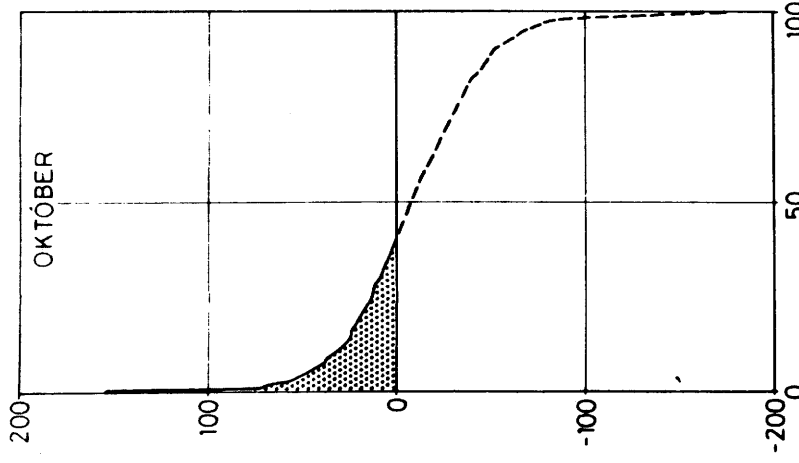
#### Heimildir

- Billfalk, L. 1982: Ice cover Formation and Break-up of Solid Ice Covers on Rivers. Inst. för vattenbyggnad, KTH, Stockholm.
- Drouin, M. 1984: The La Grande River, A Full Scale Ice Hydraulic Laboratory. Proc. IAHR Ice Symposium, Hamburg, Vol. I.
- Michel, B. 1978: Ice Mechanics. Les Presses de l'Université Laval, Québec.
- Pariset, E., Hausser, R., Gagnon, A. 1966: Formation of Ice Covers and Ice Jams in Rivers. J. Hydr. Div. Vol. 92, No HY6.
- Sigmundur Freysteinnsson, Björn Erlendsson 1976: Wintertime Water Surface Heat Exchange Calculations. Proc. Nordic Hydrological Conference, Reykjavík.
- Sigurjón Rist 1959: Ísalög. Almennt yfirlit. Skilagrein 180, Raforkumálaskrifstofan, Vatnamælingar.
- Sigurjón Rist 1969: Mývatnsísar. Hafsinn. Almenna bókafélagið, Reykjavík.
- Sigurjón Rist 1970: River and Coastal Ice Problems in Iceland. Proc. IAHR Symposium, Ice and Its Action on Hydraulic Structures, Reykjavík.

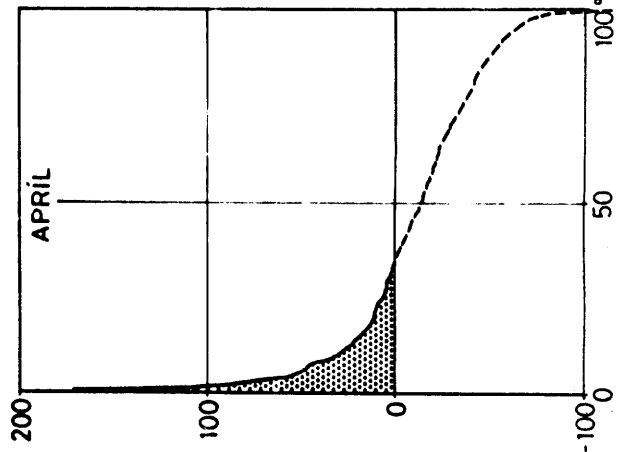
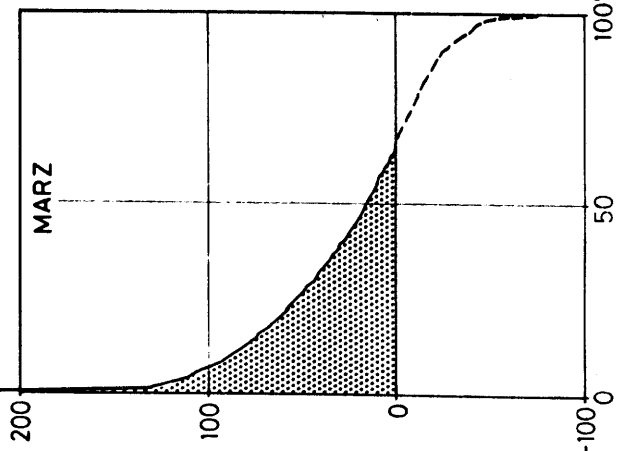
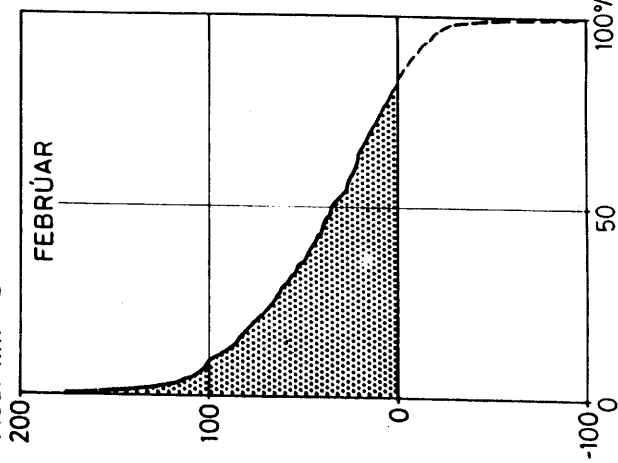
SNiP-11-57-75, "Construction Standards and Rules,  
Part II. Design Standards, Chapter 57, Loads  
Exerted on Hydraulic Structures by Waves,  
Ice and Ships", National Research Council of  
Canada, Technical Translation 1968, from  
Russian original Moscow 1976, Ottawa 1980.

Uzuner, M.S., Kennedy, J.F. 1974:  
Hydraulics and Mechanics of River Ice Jams.  
IIHR Report No. 161, Iowa Institute of  
Hydraulic Research, The University of Iowa,  
Iowa City.

Mcal km<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>



Mcal km<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>



# 1.mynd

## ORKUSTOFNUN

ÞJÓRSA VÍÐ BÚRFELL  
 LANGEI VARMATAPS FRÁ 0°C VATNI  
 1949 - 1971 DAGSMÉÐALTÖL

Væð. nr. 01.15  
 Tæð. nr. 4.01  
 Málfr.

VERFRUNINGARSTOFN SIGURDÓTTURAR SP.	Stöð	Rek. nr.	Stöð
REKINGARVEIÐ	REKINGARVEIÐ	REKINGARVEIÐ	REKINGARVEIÐ
VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ
VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ
VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ	VEIÐINGARVEIÐ

Stöð: 72 BE M H  
 Dátum: FEBR 72  
 Stöð: 72 BE M H  
 Dátum: FEBR 72  
 Stöð: 72 BE M H  
 Dátum: FEBR 72

$G_0(1-\alpha)$  64 Nbr.

Sólarhringsmeðalíð Mcal km<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

JKT HÓV MÉS JAN FEB MAR APR MAI

1	22	7	1	0	4	15	37	60
2	21	6	1	0	3	16	37	61
3	20	5	1	1	3	17	38	62
4	19	5	1	1	3	18	40	64
5	18	5	1	1	3	19	42	66
6	17	5	1	1	6	18	40	64
7	16	5	1	1	6	19	41	64
8	15	4	1	1	6	19	42	65
9	14	4	1	1	7	20	43	66
10	13	4	1	1	7	21	44	67
11	12	4	0	1	7	21	45	67
12	11	4	0	1	8	22	46	68
13	10	3	0	1	8	23	46	69
14	9	3	0	1	9	23	47	69
15	8	3	0	1	9	24	48	70
16	7	3	0	1	9	25	48	
17	6	2	0	2	10	25	49	
18	5	2	0	2	10	26	50	
19	4	2	0	2	11	27	51	
20	3	2	0	2	11	27	51	
21	2	2	0	2	12	28	52	
22	1	2	0	2	12	28	52	
23	1	2	0	2	13	30	53	
24	1	2	0	3	13	30	53	
25	1	1	0	3	14	31	54	
26	1	1	0	3	14	32	56	
27	1	1	0	3	14	33	57	
28	1	1	0	3	15	33	58	
29	1	1	0	4	(15)	34	59	
30	1	1	0	4		35	60	
31	1	1	0	4		36		

$G = G_0(1-\alpha)(1-0,012 \cdot N^2)$

N	1	2	3	4	5	6	7	8
(1-0,012·N <sup>2</sup> )	0,99	0,95	0,89	0,81	0,70	0,57	0,41	0,23

LEIÐRÉTTING VEGNA SKÝJAHULU

N	1	2	3	4	5	6	7	8
Leiðr.	0	0	-2	-4	-6	-9	-13	-17

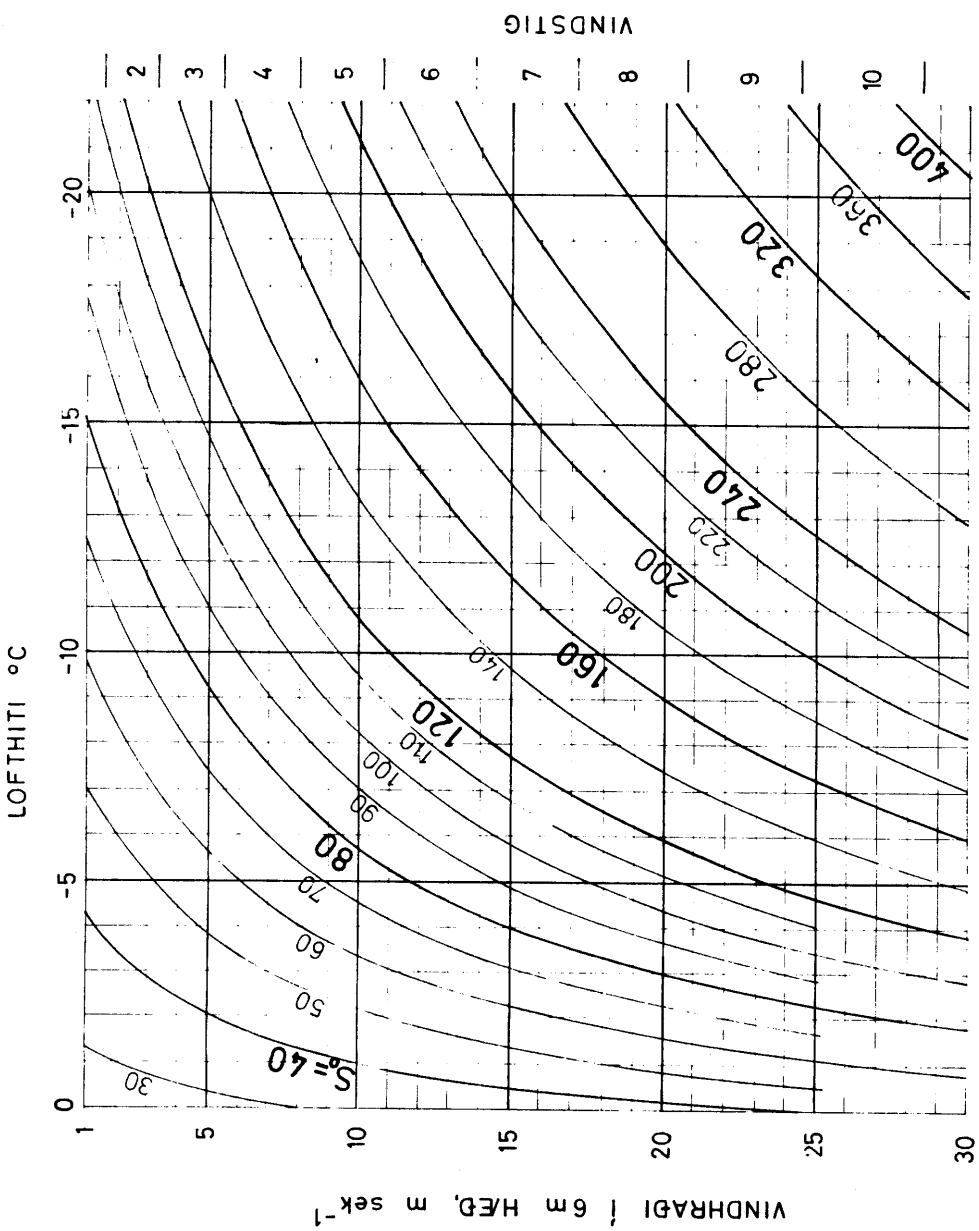
2. mynd

LANDSVIRKJUN

VARMATAP

Verk nr. 08.12. 1.01  
Maður.

VERKFRÉDISTOFA SIGURDAR THORODDSEN SF.  
 Nafn in: I.12. 69 SF/SH MH 46  
 I. brenning: 1972  
 II. brenning: 1972  
 III. brenning: 1972  
 IV. brenning: 1972  
 V. brenning: 1972  
 VI. brenning: 1972  
 VII. brenning: 1972  
 VIII. brenning: 1972  
 IX. brenning: 1972  
 X. brenning: 1972  
 XI. brenning: 1972  
 XII. brenning: 1972  
 XIII. brenning: 1972  
 XIV. brenning: 1972  
 XV. brenning: 1972  
 XVI. brenning: 1972  
 XVII. brenning: 1972  
 XVIII. brenning: 1972  
 XIX. brenning: 1972  
 XX. brenning: 1972  
 XXI. brenning: 1972  
 XXII. brenning: 1972  
 XXIII. brenning: 1972  
 XXIV. brenning: 1972  
 XXV. brenning: 1972  
 XXVI. brenning: 1972  
 XXVII. brenning: 1972  
 XXVIII. brenning: 1972  
 XXIX. brenning: 1972  
 XXX. brenning: 1972



VARMATAP FRÁ 0° VATNSFLETI, S<sub>0</sub>

Mcal km<sup>-2</sup> sek<sup>-1</sup>

SKÝJAHULA, N=0

SÓLGEISLUN, G=0

V<sub>6</sub> = 0,93 · V<sub>10</sub>

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 15**

**Tilhögun rannsókna og  
flokkun virkjunaráætlana**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Tilhögun rannsókna og flokkun virkjunaráætlana

Eftirfarandi greinargerð var upphaflega samin fyrir fund Orkustofnunar og Rannsóknarráðs ríkisins í janúar 1977 og birtist hún hér lítið breytt.

Um þessi efni var síðar fjallað ítarlega í skýrslu Orkustofnunar "FIMM ÁRA ÁÆTLUN UM RANNSÓKNIR VEGNA VATNSAFLSVIRKJANA", október 1982 (OS82098/VOD16).

#### 1. Skilgreining virkjunaráætlana.

Virkjunarundirbúningi má skipa í fimm stig.

- 1) **Forathugun.** Markmið forathugana er að leggja grundvöll að frekari rannsóknum. Þáttur í þessum athugunum eru drög að áætlunum um einstakar virkjanir, en þeim lýkur að jafnaði með samanburðar- og mynzturáætlunum um orkunýtingu á einu eða fleirum vatnasviðum. Gögn til slíkrar áætlunargerðar eru í mörgum tilvikum ófullkomin, en þegar byggt er á nægilegri þekkingu og reynslu veita áætlanirnar engu að síður tiltölulega áreiðanlegar upplýsingar um afkastagetu og kostnað.
- 2) **Frumhönnun** álitlegustu virkjunarkosta. Við frumhönnun verður að byggja á yfirlitsuppdráttum í mælikvarða 1:20.000 eða stærri mælikvarða og takmörkuðum athugunum á jarðlagaskipan og tiltæku byggingarefni. Hér verður þó einnig að byggja á líkum. Niðurstöður frumhönnunar skera úr um, hvort virkjunarrannsóknum skuli haldið áfram, en hún telst ekki fullnægjandi til ákvörðunar um framkvæmdir.
- 3) **Verkhönnun**, sem byggist á nákvæmum landsuppdráttum og ítarlegri könnun á jarðlagaskipan, m.a. með kjarnaborunum. Á þessu stigi liggja fyrir ákveðnar hugmyndir um, hvenær orkuvinnsla ætti að hefjast. Tilefni er því til ítarlegrar ákvörðunar á orkuvinnslugetu með tilliti til einkenna þess orkuveitukerfis, sem virkjunin á að tengjast við. Með verkhönnun er lagður grundvöllur að ákvörðun um framkvæmdir.



- 4) **Útboðsgögn.** Síðasti þáttur virkjunarundirbúnings, áður en kemur til framkvæmda, er gerð útboðsgagna, þar sem gerð er grein fyrir útboðsskilmálum og einstökum verkþáttum lýst nákvæmlega. Á útboðsgagnastigi má þó í mörgum tilvikum gera ráð fyrir ákveðnum undirbúningsframkvæmdum.
- 5) **Lokahönnun,** sem felur í sér gerð vinnuteikninga og lýkur með skýrslum um framkvæmdir og forsendur hönnunar og gerð veruteikninga.

## 2. Undirbúningsrannsóknir.

Undirbúningsrannsóknnum má skipa á fimm svið.

- 1) **Vatnamælingar.** Á öllum tímum ber að leggja ríka áherzlu á vatnamælingar. Þær eru grundvöllur að áætlunum um orkuvinnslugetu, miðlunarpörf og hönnunarflóð. Sæmilega örugg vitneskja um þessa þætti er ekki talin fást, fyrir en eftir a.m.k. 30 ára mælingatímabil.
- 2) **Landmælingar,** sem að meira eða minna leyti fylgja öllum stigum virkjunarundirbúnings. Forathugun má í mörgum tilvikum byggja á uppdráttum í mælikvarða 1:50.000 með takmörkuðum viðbótarmælingum. Frumhönnun verður hins vegar að byggjast á yfirlitsuppdráttum í mælikvarða 1:20.000 með 5 m mun milli hæðarlína ásamt staðbundnum viðbótarmælingum. Þegar ráðizt er í verkhönnun, verður að kortleggja nánar tiltekin landsvæði í mælikvarða 1:5.000 og takmörkuð landsvæði í enn stærri mælikvarða, áður en gengið er frá útboðsgögnum.
- 3) **Jarðfræðirannsóknir** þarf að skipuleggja í samræmi við aðra þætti virkjunarundirbúnings. Við forathugun er að mestu byggt á yfirlitsathugunum og líkum, en við frumhönnun þarf að styðjast við nánari vettvangsathuganir, þar sem þykkt yfirborðslaga er m.a. könnuð með jarðsveiflumælingum og minni háttar borunum. Fyrst á síðari stigum verður að teljast nauðsyn á kostnaðarsömum kjarnborunum og ítarlegri sýnatöku úr yfirborðslögum.
- 4) **Byggingarefnarannsóknir,** sem einnig verður að skipuleggja í tengslum við aðra þætti. Við forathugun er byggt á líkum, en á verkhönnunarstigi verða efnistökuastaðir og eiginleikar stíflu- og steypuefnis að vera nánast fullkannaðir.

- 5) **Umhverfisrannsóknir** fylgja virkjunarathugunum strax á fyrstu stigum og umhverfisáhrif þurfa að vera fullkönnuð á verkhönnunarstigi. Ástæða er til að benda á, að áhrif vatnsaflsvirkjana á umhverfi geta einnig verið jákvæð, svo sem jafnara rennsli og hitastig vatns, minni flóðahætta og tærara vatn.

### 3. Vandkvæði virkjunarundirbúnings.

Helztu annmarkar við undirbúning virkjana fyrr á árum verða e.t.v. fremur raktir til skipulagsleysis við rannsóknir en skorts á þeim. Ráðizt var í kostnaðarsamar rannsóknir og annan undirbúning einstakra virkjunarkosta áður en það var tímabært, en forathugun á vatnsaflí landsins í heild og frumhönnun álitlegustu virkjana var vanrækt. Þetta hefur hins vegar breytt verulega til batnaðar hin síðari ár.

Nákvæmar vatnamælingar eru einn mikilvægasti þáttur vatnsorkurannsóknna. Ónákvæmni mælinga stafar af slæmri gæzlu, ófullkomnum rennslislyklum og ekki sízt langvarandi truflunum af ís. Erfitt er að koma í veg fyrir ístruflanir, en neyta verður allra ráða til að minnka áhrif þeirra. Þetta er einkum mikilvægt, þar sem ístruflanir valda því, að lágrennsli vatnsfalla verður illa ákvarðað, en það getur skipt meginmáli við útreikninga á orkuvinnslu, sérstaklega þar sem miðlunarmöguleikar eru takmarkaðar.

Ákvörðun á virkjanalegu rennsli og mestu líklegu flóðum í íslenskum vatnsföllum er erfiðleikum bundin, þar sem tímabil rennslismælinga eru stutt og úrkomumælingar strjálur og óvissar, ekki sízt á hálandissvæðum. Rennsli til virkjana er því venjulega byggt á líkum, þar sem stuðzt er við mælt rennsli á vatnasviðinu og í grennd þess svo og hugsanlega úrkomu- og hitamælingar á nálægum veðurathugunarstöðvum. Slíkar rennslisákvarðanir þarf í ríkari mæli að sannprófa með samanburðarmælingum á fyrirhuguðum veitu- og stíflustæðum.

### 4. Frumstig virkjunarrannsóknna.

Fyrstu stig virkjunarrannsóknna eru forathuganir og samanburðaráætlanir með eftirfarandi kortagerð og yfirlitsathugunum á jarðlagaskipan. Á eftir fylgir frumhönnun álitlegustu virkjunarkosta, en með henni telst frumrannsóknnum lokið. Markmið frumrannsóknna er m.a. að skilgreina

vatnsorkulindir landsins og ákvarða forgangsröð frekari rannsókna.

Á frumstigi vatnsorkurannsókna verður að styðjast við ýmsar nálganir til að settu marki verði náð með hóflegum tilkostnaði og innan skynsamlegra tímamarka. Verði þannig staðið að verki, virðist ekki of mikið fært í fang að ljúka þessum athugunum á öllum helztu vatnasviðum landsins á um það bil fimm árum.

## 5. Síðari stig virkjunarrannsókna.

Síðari stig virkjunarundirbúnings hefjast með nákvæmari kortagerð og kostnaðarsömum rannsóknum á jarðlagaskipan einstakra virkjunarstaða. Ákvarðanir um að ráðast í slíka áætlanagerð ber að taka í samræmi við orkuspár og byggðapróun á hverjum tíma.

Gera má ráð fyrir, að um það bil sjö ár líði frá ákvörðun um framkvæmdir að gangsetningu virkjunar. Af því leiðir, að athuganir á fjárhagslegri afkomu og hagkvæmri tímasetningu virkjunar verða að byggjast á spám um orkupörf nokkuð langt fram í tímann. Vel grundvallaðar orkuspár eru því mikilvægur þáttur í virkjunarundirbúningi.

Val milli virkjunarkosta byggist í megindráttum á hagkvæmnisathugunum. Slíkar athuganir verða þó vart óumdeilanlegar, og með tilliti til þess er nauðsynlegt, að fyrir liggi verkhönnun nokkurra kosta, áður en ákvörðun um virkjun er tekin.

## 6. Viðhorf til vatnsorkunýtingar.

Viðhorf til umhverfismála hafa undanfarið í vaxandi mæli haft áhrif á áætlanagerð um orkunýtingu. Hafa þau í raun kollvarpað ýmsum fyrri hugmyndum um heildarnýtingu vatnsorku á Íslandi, og vegna þess er ekki sízt þörf á heildarendurskoðun að þessu leyti. Viðhorf til umhverfisverndunar hafa hins vegar verið mjög á einn veg, þ.e. allar breytingar leiði til neikvæðrar röskunar á lífríki og umhverfi. Slík sjónarmið eru augljóslega óréttmæt.

Nú er svo komið að líta má á því sem næst allt landið sem eitt orkuveitusvæði. Að öðru jöfnu skapar það meira frelsi til staðarvals virkjana, þótt æskilegt verði talið að dreifa virkjunum á landsfjórðunga m.a. með tilliti til rekstraröryggis.

Möguleikar til nýtingar annarra orkugjafa hafa að sjálfsögðu áhrif á nýtingu vatnsorku. Hér á landi er þá fyrst og fremst um að ræða jarðgufuorku, sem fyrst um sinn verður þó vart í neinum mæli samkeppnisfær við vatnsorku, þegar um er að ræða raforkuvinnslu.

Viðhorf til stóriðju verða stefnumarkandi við orkunýtingu. Um þau ríkir ágreiningur eins og kunnugt er, en hagkvæm nýting vatnsorku að einhverju marki er augljóslega bundin við orkufrekan iðnað.

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 16**

**Leki úr uppistöðulónum  
og áhrif þéttiaðgerða**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Leki úr uppistöðulónum og áhrif þéttiaðgerða

Við samanburð virkjunarkosta getur mat á líklegum leka úr uppistöðulónum og þá ennfremur, hvort lekinn skilar sér til virkjana fyrir neðan, skipt verulegu máli. Til að varpa ljósi á þessu vandamál og til að meta áhrif mismunandi þéttiaðgerða voru við undirbúning Þjórsárvirkjana á árinu 1979 gerðir fræðilegir útreikningar að þessu leyti, sem fjallað er um hér á eftir.

#### 1. Stíflur á hrauni með setlagi.

Meiri háttar mannvirkjagerð á nútímahraunum er algeng hér á landi, enda er talið að hraun þeki um 1/10 hluta landsins. Vatnsleiðni hraunanna getur valdið erfiðleikum, einkum við stíflugerð og myndun uppistöðulóna á hraunum. Stíflur hafa þó verið byggðar hér á hraunum án verulegra vandkvæða að þessu leyti, t.d. við Laxárvirkjanir í Þingeyjasýslu, Þórisós, Elliðaár, Búrfellsvirkjun, Hrauneyjafossvirkjun og á Sultartanga, en þær eru lágar. Við hærri stíflur er hætta á vandamálum vegna leka að sjálfsögðu meiri og er t.d. Sigöldustíflan dæmi um það.

Í framtíðinni verða vafalaust fleiri stíflur reistar á hraunum, og er þá mikilvægt að unnt sé að meta lekahættu á raunhæfan hátt og árangursríkum aðferðum verði beitt til þéttinga. Aðstæður geta verið með ýmsu móti og sömu aðferðir eiga ekki alstaðar við.

Eftirfarandi athuganir á leka undan stíflum eru miðaðar við sérstakar aðstæður, og má búast við, að þær líkist helst aðstæðum, þar sem jökulár renna á hraunum.

Gert er ráð fyrir, að stíflað sé á hrauni með ákveðinni vatnsleiðni (transmissivity) í lárétta stefnu, og að yfirborð þess á lónbotni sé þakið setlagi með tiltekinni lekt og þykkt. Athugað er, hvaða áhrif mismunandi langt þéttiteppi, sem lagt er á lónbotninn næst stíflunni og tengt stíflukjarnanum, hefur á leka úr lóninu. Reiknað er með, að yfirborð hraunsins, sem stíflað er á, sé lárétt, og reikningarnir eru miðaðir við lengdareiningu eftir stífluásnum.

Að sjálfsögðu eru aðstæður að jafnaði flóknari en hér er gert ráð fyrir, t.d. er vatnsleiðni hraunlaga mjög breytileg og svelgjamyndun í yfirborði alþekkt fyrirbæri. Líta verður því á allar tölur um lagþykktir, lekastuðla o.fl. sem meðalgildi.

Þrátt fyrir slíka einföldun ættu athuganir sem þessar að geta auðveldað skynsamlegt mat á leka úr uppistöðulónum við ákveðnar aðstæður, og stuðlað að raunhæfum aðgerðum til þéttinga.

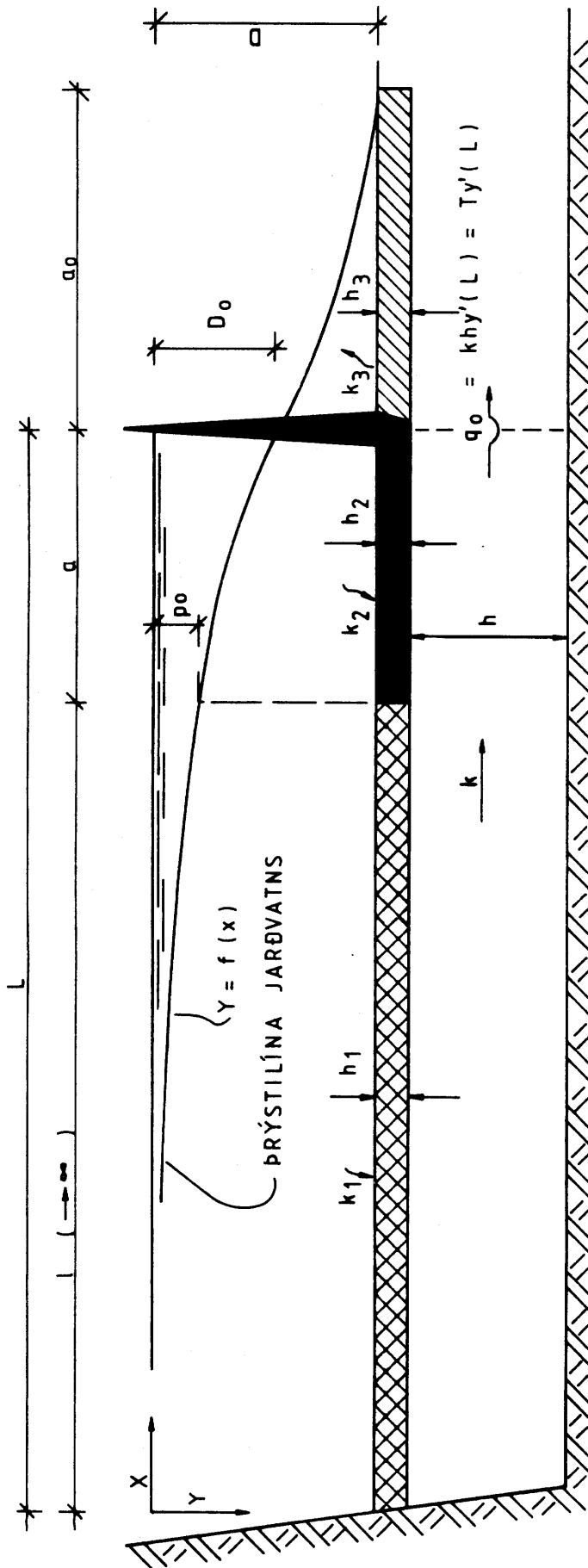
## 2. Jöfnur til ákvörðunar á leka.

Gert er ráð fyrir lekum lónbotni með lektarstuðli  $k_1$  m/s, en næst stíflu er  $a$  m langt þéttilag með lektarstuðli  $k_2$ , sbr. skýringarmynd (bls. 3).

Í fyrstu er gert ráð fyrir, að lóðhnit þrýstilínu jarðvatns í stíflu,  $D_0 \leq D$  m, séu þekkt (sjá skýringarmynd), en síðar eru þau ákvörðuð miðað við gefnar aðstæður neðan stíflu.

Tákn sem notuð eru í reikningum eru þessi:

- $Y_1$ , m : hæðarmunur á vatnsborði í lóni og þrýstilínu jarðvatns ofan þéttilags
- $Y_2$ , m : sami hæðarmunur á kafla með þéttilagi
- $Y_3$ , m : sami hæðarmunur neðan stíflu
- $L$ , m : reiknuð lengd uppistöðu ofan stíflu (þvert á stífluás)
- $a$ , m : lengd þéttilags ofan við stífluás
- $a_0$ , m : lengd þéttilags neðan stífluáss
- $l$ , m :  $l = L - a$
- $D$ , m : vatnsdýpi við stíflu (stífluhæð)
- $D_0$ , m : hæðarmunur á vatnsborði í lóni og þrýstilínu jarðvatns við stífluás
- $h_1$ , m : þykkt yfirborðslaga á lónbotni
- $k_1$ , m/s : lektarstuðull þeirra
- $h_2$ , m : þykkt þéttilags ofan stíflu



$$\lambda_i = \sqrt{\frac{k_i}{h_i T}} ; f(a) = \frac{(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) e^{-\lambda_2 a} - (1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) e^{-\lambda_2 a}}{(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) e^{-\lambda_2 a} + (1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) e^{-\lambda_2 a}}$$

$$D_0 = D \frac{e^{-\lambda_3 a_0} + e^{-\lambda_3 a_0}}{(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3}) e^{-\lambda_3 a_0} + (1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_3}) e^{-\lambda_3 a_0}} ; a_0 \approx T \lambda_2 D_0 f(a)$$

$$p_0 \approx \frac{2 D_0}{(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) e^{-\lambda_2 a} + (1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) e^{-\lambda_2 a}}$$



- $k_2, \text{ m/s}$  : lektarstuðull þess  
 $h_3, \text{ m}$  : þykkt yfirborðslaga (eða þéttilag) neðan stíflu  
 $k_3, \text{ m/s}$  : lektarstuðull þeirra  
 $T, \text{ m}^2/\text{s}$  : leiðni leiðandi laga undir stíflu,  
( $T = kh$ , sjá skýringarmynd)  
 $q_0, \text{ m}^2/\text{s}$  : leki á lengdareiningu undan stíflu

Um grunnvatnsrennsli annars vegar undir óþéttum lónbotni og hins vegar undir þéttilagi gilda samkynja diffurjöfnur, þ.e.

$$y_1'' = \lambda_1^2 y_1 \quad [2.1]$$

og

$$y_2'' = \lambda_2^2 y_2 \quad [2.2],$$

þar sem

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{k_1}{h_1 T}} \quad \text{og} \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{k_2}{h_2 T}} .$$

Lausnir jafnanna eru:

$$y_1 = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{-\lambda_1 x}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad [2.3]$$

og

$$y_2 = C_3 e^{\lambda_2 x} + C_4 e^{-\lambda_2 x}, \quad 1 \leq x \leq L \quad [2.4].$$

Randskilýrðin eru:

- $x \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad y_1' \rightarrow 0 \quad (i) \text{,}$   
 $x = 1 \quad \Rightarrow \quad y_1 = y_2 \quad (ii) \text{,}$   
 $x = 1 \quad \Rightarrow \quad y_1' = y_2' \quad (iii) \text{ og}$   
 $x = L \quad \Rightarrow \quad y_2 = D_0 \quad (iv) \text{.}$

Með randskilyrði (i) fæst  $C_1 = C_2 = C$ , og með skilyrðum (ii) og (iii) fæst þá,

$$C_3 = \frac{C}{2e^{\lambda_2 l}} \left[ \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{\lambda_1 l} + \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{-\lambda_1 l} \right] \quad [2.5]$$

og

$$C_4 = \frac{C}{2e^{-\lambda_2 l}} \left[ \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{\lambda_1 l} + \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{-\lambda_1 l} \right] \quad [2.6].$$

Með skilyrði (iv) fæst,

$$D_0 = C_3 e^{\lambda_2 L} + C_4 e^{-\lambda_2 L}, \quad \text{p.e.}$$

$$D_0 = \frac{C}{2} \left[ e^{\lambda_2 a} \left[ \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{\lambda_1 l} + \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{-\lambda_1 l} \right] + e^{-\lambda_2 a} \left[ \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{\lambda_1 l} + \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) e^{-\lambda_1 l} \right] \right], \quad [2.7].$$

Rennsli undir stíflu á lengdareiningu fæst af jöfnunni:

$$q_0 = T(Y_2')_{x=L} = T_2(C_3 e^{\lambda_2 L} - C_4 e^{-\lambda_2 L}).$$

Með jöfnum [2.5], [2.6] og [2.7] fæst

$$q_0 = T\lambda_2 D_0 f(a) \quad [2.8],$$

þar sem

$$f(a) = \frac{\left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \left[ e^{\lambda_2 a} e^{\lambda_1 l} - e^{-\lambda_2 a} e^{-\lambda_1 l} \right] + \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \left[ e^{\lambda_2 a} e^{-\lambda_1 l} - e^{-\lambda_2 a} e^{\lambda_1 l} \right]}{\left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \left[ e^{\lambda_2 a} e^{\lambda_1 l} + e^{-\lambda_2 a} e^{-\lambda_1 l} \right] + \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \left[ e^{\lambda_2 a} e^{-\lambda_1 l} + e^{-\lambda_2 a} e^{\lambda_1 l} \right]}$$

Nú er gert ráð fyrir, að  $l$  sé mjög stór stærð, og verða þá liðir í jöfnu fyrir  $f(a)$ , þar sem fyrir kemur stærðin  $e^{-\lambda_1 l}$  litlir í hlutfalli við aðra liði ( $l \gg a$ ). Sem mjög góða nálgun má því rita,

$$f(a) \approx \frac{(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2})e^{\lambda_2 a} - (1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2})e^{-\lambda_2 a}}{(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2})e^{\lambda_2 a} + (1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2})e^{-\lambda_2 a}} \quad [2.9].$$

Diffurjöfnu grunnvatnsrennslis neðan stíflu má rita þannig:

$$(Y_3 - D)'' = \lambda_3^2 (Y_3 - D) \quad [2.10],$$

þar sem

$$\lambda_3 = \sqrt{\frac{k_3}{h_3 T}}.$$

Lausn jöfnunnar er:

$$Y_3 = C_5 e^{\lambda_3 x_1} + C_6 e^{-\lambda_3 x_1} + D \quad [2.11].$$

Með upphafi láhnita (jafna [2.11]) í stífluási fást randskilyrðin:

$$(Y_2)_{x=L} = (Y_3)_{x_1=0} = D_0 \quad (v),$$

$$(Y_2')_{x=L} = (Y_3')_{x_1=0} = q_0/T \quad (vi) \text{ og}$$

$$(Y_3)_{x_1=a_0} = D \quad (vii).$$

Af jöfnu (v) og (vi) fæst

$$C_5 + C_6 = D_0 - D \quad \text{og}$$

$$C_5 - C_6 = \frac{q_0}{\lambda_3 T}, \quad \text{þ.e.}$$

$$C_5 = \frac{1}{2} (D_0 - D + \frac{q_0}{\lambda_3 T}) \quad \text{og}$$

$$C_6 = \frac{1}{2} (D_0 - D - \frac{q_0}{\lambda_3 T}) , \quad \text{eða með jöfnu [2.8]}$$

$$C_5 = \frac{1}{2} (D_0 (1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} f(a)) - D) \quad [2.12]$$

og

$$C_6 = \frac{1}{2} (D_0 (1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_3} f(a)) - D) \quad [2.13].$$

Af skilyrði (vii) fæst

$$C_5 e^{\lambda_3 a_0} + C_6 e^{-\lambda_3 a_0} = 0 , \quad \text{sem með jöfnum [2.12] og [2.13] gefur}$$

$$D_0 = D \frac{e^{\lambda_3 a_0} + e^{-\lambda_3 a_0}}{(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} f(a)) e^{\lambda_3 a_0} + (1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_3} f(a)) e^{-\lambda_3 a_0}} \quad [2.14].$$

Miðað við gefnar aðstæður má þannig ákvarða rennsli undir stíflu af jöfnum [2.8] , [2.9] og [2.14].

### 3. Leki við sérstakar aðstæður.

Ef ekki er sérstakt þéttilag á lónbotni næst stíflu, fæst rennsli undir stífluna með  $\lambda_1 = \lambda_2$ . Af jöfnu [2.9] fæst  $f(a) = 1$  og samkvæmt [2.8] verður rennslið þá

$$q_0 = T\lambda_1 D_0 \quad [3.1].$$

Sama niðurstaða fæst þegar  $a \rightarrow 0$ , en þá stefnir  $f(a)$  á  $\lambda_1 / \lambda_2$ .

Þegar lagt er sérstakt þéttiteppi á lónbotn næst stíflu, má í flestum tilvikum gera ráð fyrir, að það sé mjög þétt í hlutfalli við aðra hluta lónbotns. Mjög góða nálgun á rennsli undir stíflu má þá fá með markgildi á  $\lambda_2 f(a)$  þegar  $\lambda_2$  stefnir á 0.

Af jöfnu [2.9] fæst,

$$\lambda_2 \rightarrow 0 \implies \lambda_2 f(a) \rightarrow \frac{1}{1 + \lambda_1 a}$$

og af jöfnu 2.8

$$q_0 \approx T\lambda_1 D_0 \frac{1}{1 + \lambda_1 a} \quad [3.2].$$

Að jafnaði er ekki um ræða sérstakt þéttiteppi neðan stíflu. Sé gert ráð fyrir víðáttumiklu svæði með yfirborðslagi með stuðli  $\lambda_3$ , fæst af jöfnu [2.14]

$$a_0 \rightarrow \infty \implies D_0 \rightarrow D \frac{1}{1 + f(a) \lambda_2 / \lambda_3} \quad [3.3],$$

eða þegar  $\lambda_2 \rightarrow 0$

$$D_0 \rightarrow D \frac{1}{1 + \frac{1}{\lambda_3(1 + \lambda_1 a)}} \quad [3.4].$$

Með jöfnu [3.2] fæst þá

$$q_0 \approx TD \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3(1 + \lambda_1 a)} \quad [3.5].$$

Sé enn fremur gert ráð fyrir  $\lambda_1 = \lambda_3$  fæst

$$q_0 = \frac{\lambda_1 TD}{\lambda_2 + \lambda_1 a} \quad [3.6].$$

Í þessu tilviki fæst þegar  $a = 0$  (eða  $\lambda_2 = \lambda_1$ )

$$q_0 = 1/2 \cdot \lambda_1 TD \quad [3.7],$$

p.e.

$$D_0 \approx 1/2 \cdot D$$

#### 4. Dæmi um lekareikninga.

Reiknað er dæmi um leka undan 50 m hárrí stíflu á þykku hrauni. Reiknað er með mislöngu þéttiteppi ofan stíflu með lektarstuðli  $k_2 = 10^{-8}$  m/s. Þykkt þess reiknast 1,0 m. Ekki er gert ráð fyrir sérstöku þéttilag í ofan á hrauninu út frá stíflukjarnanum í átt frá lóninu, en reiknað með ákveðinni mótstöðu í hrauninu gegn streymi úr neðri lögum upp á yfirborð. Virk þykkt hraunsins er þá reiknuð 10 m og lektarstuðull í lóðrétta stefnu  $k_3 = 3 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Í heild er reiknað með eftirfarandi einkennistölum jarðlaga:

Leiðnitala hrauns (transmissivity) lárétt	$T = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$
Lektarstuðull setlags á yfirborði (breytil.)	$k_1 = 10^{-6} - 10^{-4} \text{ m/s}$
Þykkt setlags á yfirborði	$h_1 = 2,0 \text{ m}$
Lektarstuðull þéttiteppis á lónbotni	$k_2 = 10^{-8} \text{ m/s}$
Þykkt þéttiteppis á lónbotni	$h_2 = 1,0 \text{ m}$
Lengd þéttiteppis á lónbotni	$a = 20 - 300 \text{ m}$
Lektarstuðull hraunlags neðan stíflu (lóðr.)	$k_3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Virk þykkt hraunlags neðan stíflu	$h_3 = 10 \text{ m}$
Mismunur vatnshæðar í lóni og jarðvatnshæðar 1 km neðan stíflu, ( $a_0 = 1000 \text{ m}$ )	$D = 50 \text{ m}$

Niðurstöður reikninga eru í eftirfarandi skrá þar sem þessi tákni eru notuð:

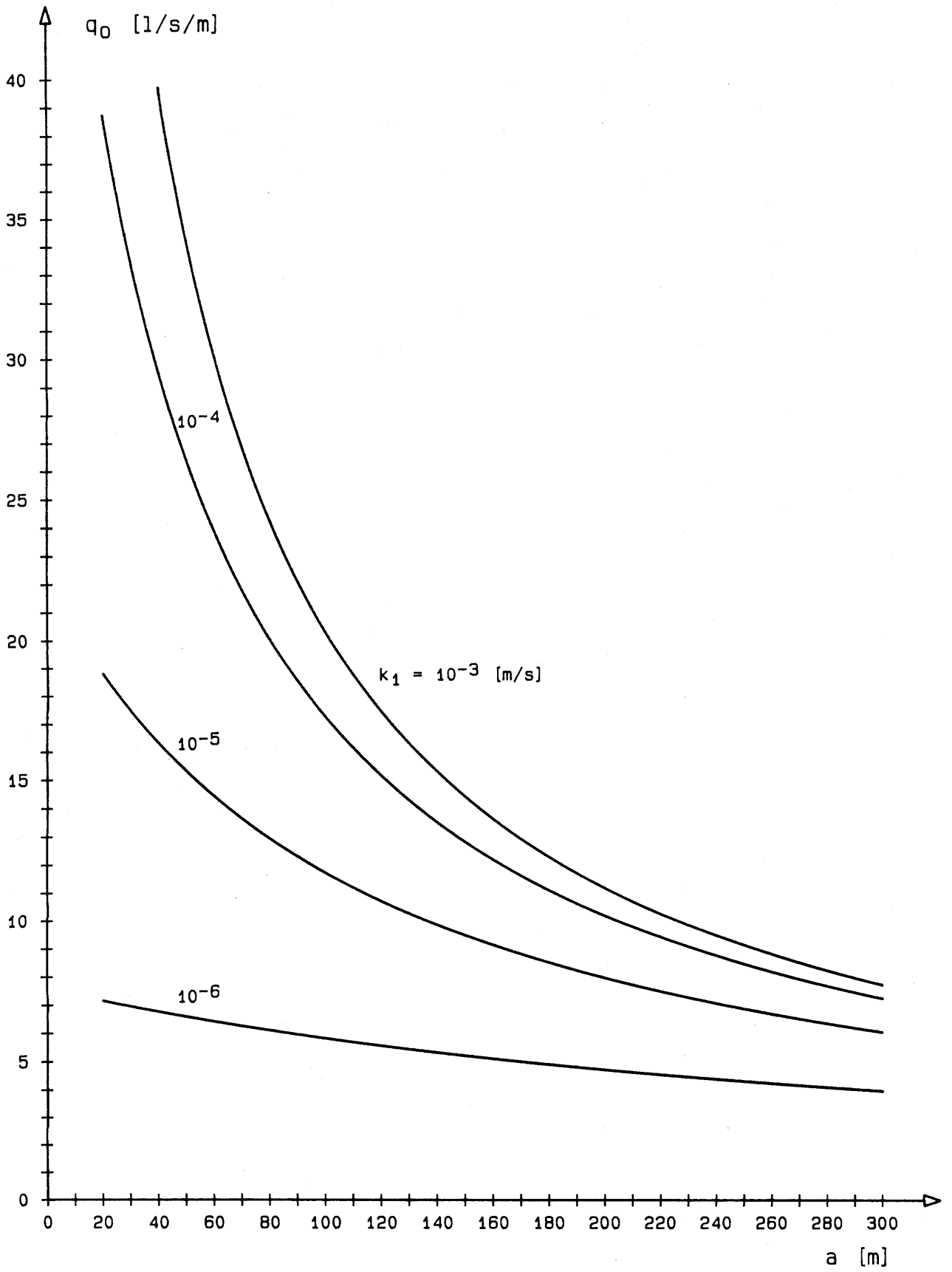
Mismunur vatnshæðar í lóni og jarðvatnshæðar við stíflukjarna	$D_0$ , m
Mismunur sömu hæða við efri rönd þéttiteppis	$p_0$ , m
Lengd teppis ásamt stíflukjarna	$a$ , m
Leki undir stíflu á lengdareiningu	$q_0$ , l/s/m

a	$k_1 = 10^{-4}$ m/s			$k_1 = 10^{-5}$ m/s			$k_1 = 10^{-6}$ m/s		
	$q_0$	$D_0$	$p_0$	$q_0$	$D_0$	$p_0$	$q_0$	$D_0$	$p_0$
m	l/s/m	m	m	l/s/m	m	m	l/s/m	m	m
20	38,7	40,00	24,50	18,8	45,14	37,62	7,2	48,15	45,28
40	29,6	42,36	18,70	16,4	45,78	32,69	6,8	48,25	42,82
60	23,9	43,82	15,12	14,5	46,26	28,91	6,4	48,34	40,61
80	20,1	44,81	12,69	13,0	46,65	25,90	6,1	48,41	38,62
100	17,3	45,53	10,93	11,8	46,96	23,47	5,9	48,49	36,81
120	15,2	46,07	9,60	10,8	47,22	21,44	5,6	48,55	35,15
140	13,6	46,50	8,56	9,9	47,44	19,74	5,4	48,61	33,64
160	12,3	46,84	7,72	9,2	47,63	18,29	5,2	48,67	32,25
180	11,2	47,12	7,03	8,6	47,79	17,03	5,0	48,72	30,97
200	10,3	47,35	6,45	8,0	47,93	15,94	4,8	48,76	29,78
220	9,5	47,55	5,96	7,6	48,08	14,98	4,6	48,81	28,68
240	8,8	47,72	5,54	7,1	48,16	14,12	4,5	48,85	27,66
260	8,3	47,87	5,18	6,8	48,25	13,36	4,3	48,88	26,70
280	7,8	48,00	4,86	6,4	48,34	12,67	4,2	48,92	25,81
300	7,3	48,11	4,57	6,1	48,42	12,05	4,1	48,95	24,97

Minnsta lengd þéttiteppis reiknast 20 m, sem er ágizkuð þykkt stíflukjarnans neðst.

Í reiknuðu dæmi verður ekki marktækur munur á leka hvort reiknað er með jöfnum [2.8], [2.9] og [2.14] eða jöfnu [3.5]. Á eftirfarandi línuriti er lekinn sýndur sem fall af  $a$  samkvæmt jöfnu [3.5] fyrir nokkur gildi á  $k_1$ .

Lektarstuðull yfirborðssets,  $k_1 = 10^{-4}$  m/s, gæti í mörgum tilvikum átt við, áður en sjálfpétting á sér stað. Í því tilviki er þéttiteppi áhrifaríkt, bæði til að draga úr leka og virkum vatnsþrýstingi ofan á botnsetið utan við teppið. Hið síðarnefnda dregur að líkindum verulega úr hættu á svelgjamyndun í setinu og bætir þar með skilyrði til sjálfpéttingar.





Í meginatriðum má segja, að gildi teppisins sé í fyrsta lagi, að það tryggir viðráðanlegan leka í upphafi, jafnvel þótt yfirborðssetið gefi sig að einhverju leyti, og í öðru lagi, að það bætir skilyrði til sjálfþéttingar utan teppisins. Í þriðja lagi kemur það í veg fyrir að jarðvatnsborð stígi að ráði inni í stíflunni, en stærðin  $D-D_0$  er mælikvarði á þá hækkun neðan stíflukjarnans.

## 5. Leki undan stíflu á hrauni með tveimur lekum millilögum.

Hér á eftir er leitast við, að ákvarða leka undan stíflu, sem byggð er á tveimur hraunlögum með leku millilagi og lekri botnurð.

Annars vegar er ekki gert ráð fyrir að þetta leku lögin, en hins vegar er reiknað með að loka efra laginu með þéttiskurði. Áhrif þéttiaðgerða eru metin og með því leitast við að sýna fram á mikilvægi þess, að aðstæður séu kannaðar til hlítar. Að öðrum kosti er öldungis óvíst, hvort aðgerðirnar komi að tilætluðum notum eða svari kostnaði.

Þótt niðurstöður byggist á nálgunum, má gera ráð fyrir tiltölulega góðu samræmi við raunverulegan leka miðað við gefnar forsendur.

Niðurstöður útreikninga eru, að í ýmsum tilvikum sé einungis að vænta óverulegs árangurs af slíkum þéttiaðgerðum. Kemur þetta heim við niðurstöður útreikninga og tilrauna, þar sem þykku samkynja lagi er lokað að hluta með þéttiskurði\*), en þær voru í stuttu máli, að þétting að minna en 25 hundraðshlutum dýptar hefði nær engin áhrif og þau yrðu ekki veruleg, fyrr en þéttitjald næði því sem næst að þéttu undirlagi. Gert var ráð fyrir misdjúpum þéttiskurði, en hliðstætt má álykta, að mjög takmörkuð áhrif verði af þéttingu með ídælingu, sem ekki tekst því sem næst fullkomlega.

-----  
\*) "Efficacy of Partial Cutoffs for Controlling Seepage Beneath Dams and Levees Constructed on Pervious Foundation" by C.I. Mansur and W.I. Perret. Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam (1948), vol. V, p. 299. Hér mætti einnig nefna niðurstöður þéttingartilrauna á stíflustæði við Tungnaá, sbr. skýrslu Orkustofnunar "SULTARTANGAVIRKJUN. Dæluprófanir 1981, desember 1981 (JI 81/04).

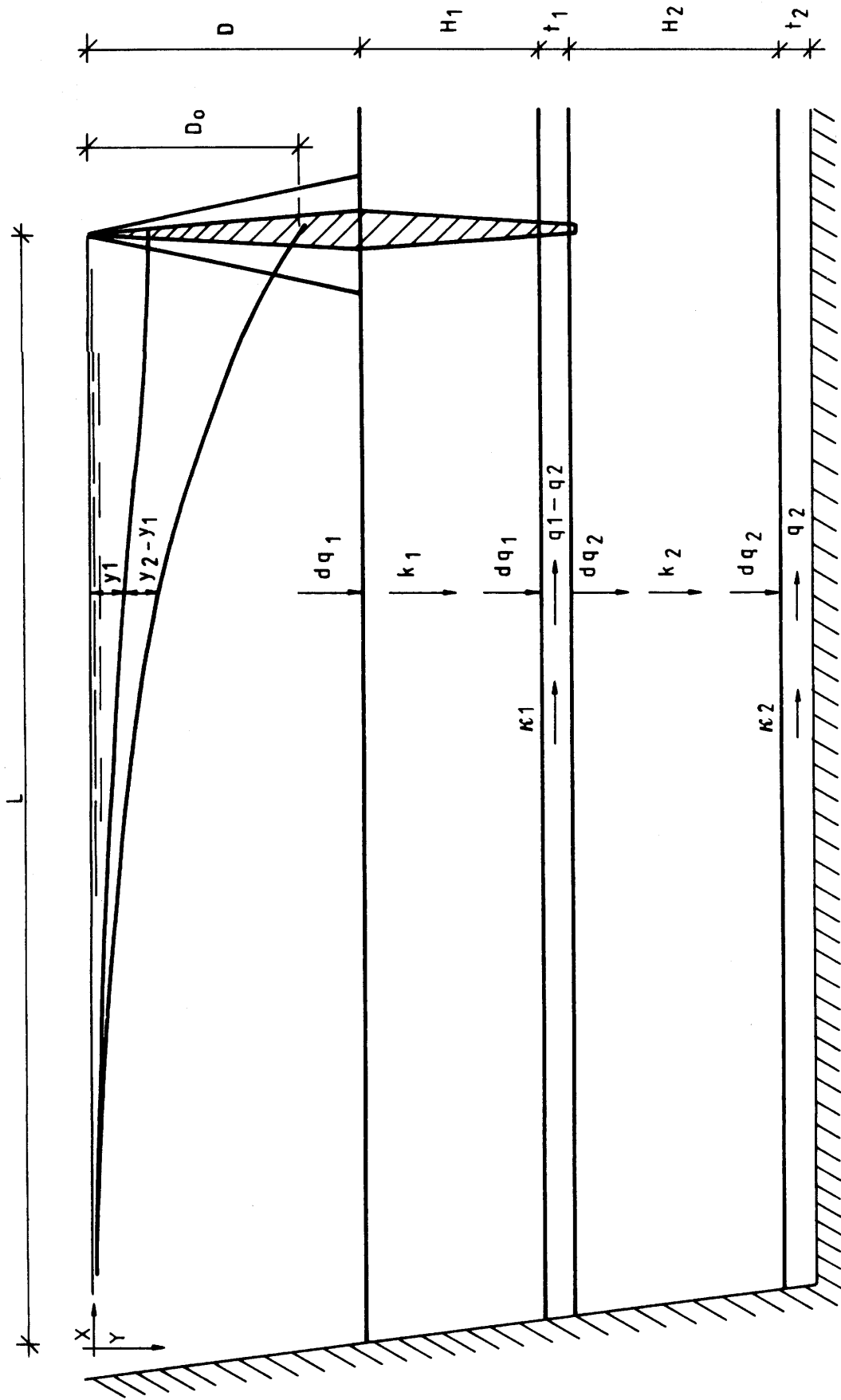
## 6. Jöfnur til ákvörðunar á leka.

Gert er ráð fyrir, að undir stíflu og uppistöðulóni séu tvö hraunlög  $H_1$  og  $H_2$  m að þykkt, sbr. skýringarmynd 3 (bls. 14). Á lagamótum og undir neðra hraunlagi eru lek lög með leiðni  $T_1$  og  $T_2$ .

Tákn sem notuð eru í reikningum eru þessi:

- $y_1$ , m : hæðarmunur á vatnsborði í lóni og prýstilínu jarðvatns í efra leka lagi
- $y_2$ , m : sami hæðarmunur fyrir neðra leka lagið
- $L$ , m : reiknuð lengd uppistöðu ofan stíflu (þvert á stífluás)
- $D_0$ , m :  $y_2$  við stífluás
- $H_1$ , m : þykkt efra hraunlags
- $k_1$ , m/s : lekt þess
- $H_2$ , m : þykkt neðra hraunlags
- $k_2$ , m/s : lekt þess
- $T_1$ ,  $m^2/s$  : leiðni efra leka lags ( $T = \kappa t$ )
- $T_2$ ,  $m^2/s$  : leiðni neðra leka lags
- $q_0$ ,  $m^2/s$  : leki á lengdareiningu undan stíflu
- $q_1$ ,  $m^2/s$  : safnaður leki gegnum efra hraunlag á lengdareiningu stíflu, fall af  $x$
- $q_2$ ,  $m^2/s$  : sami leki gegnum neðra hraunlag

Í fyrstu er gert ráð fyrir að undir stíflu sé þéttiskurður, sem nær í gegnum efra leka lagið.



$$q_0 = \alpha \sqrt{\frac{k_2 T_2}{H_2}} D_0, \quad \alpha = f(\beta) \max$$

$$f(\beta) = \frac{1}{1+\beta\gamma} \left[ (1-\beta)\gamma \frac{T_1}{T_2} \right]^{0.5} + \left[ \frac{\beta\gamma}{1+\beta\gamma} \right]^{0.5} ; \quad \gamma = \frac{k_1 H_2}{H_1 k_2} ; \left[ \frac{1}{1+\beta\gamma} \right]^{0.5} \leq \alpha \leq 1$$

Diffurjöfnur rennslis verða:

$$q_1 - q_2 = T_1 dy_1/dx$$

$$q_2 = T_2 dy_2/dx$$

$$dq_1/dx = y_1 k_1/h_1$$

$$dq_2/dx = (y_2 - y_1)k_2/H_2, \text{ p.e.}$$

$$T_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} = \left( \frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2} \right) y_1 - \frac{k_2}{H_2} y_2 \quad [6.1]$$

og

$$T_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} = \frac{k_2}{H_2} (y_2 - y_1) \quad [6.2].$$

Án þess að leysa þessar samgildu diffurjöfnur má gera sér grein fyrir mesta og minnsta leka undan stíflu.

Þegar  $T_1 \rightarrow \infty \Rightarrow dy_1/dx \rightarrow 0$ , p.e.

$y_1$  verður fasti.

Lausn á jöfnu [6.2] er þá

$$y_2 = C_1 e^{\lambda x} + C_2 e^{-\lambda x} + y_1, \text{ þar sem}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{k_2}{H_2 T_2}}.$$

Með randskilyrðunum

$$x = 0 \Rightarrow y_2' \approx 0 \quad \text{og} \quad y = L \Rightarrow y_2 = D_0$$

fæst, þegar  $L$  reiknast stór stærð,

$$y_2 \approx \frac{D_0 - y_1}{e^{\lambda L}} (e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}) \quad [6.3].$$

Rennsli undan stiflu verður

$$q_{0,a} = T_2 (y_2')_{x=L} \approx T_2 \lambda (D_0 - y_1).$$

Með  $y_1$  sem fasta verður

$$\frac{dq_1}{dx} = \frac{q_{0,a}}{L} = \frac{k_1}{H_1} y_1 = \frac{T_2}{L} (D_0 - y_1)$$

eða  $y_1 \approx 0$ , þegar  $L$  er stór stærð. Þá fæst

$$q_{0,a} \approx \sqrt{\frac{k_2 T_2}{H_2}} D_0 \quad [6.4].$$

Með  $T_1 = 0$  verður  $dq_1 = dq_2$ , þ.e.

$$y_1 = y_2 \frac{k_2/H_2}{k_1/H_1 + k_2/H_2} \quad \text{og}$$

$$y_1 - y_1 = y_2 \frac{k_1/H_1}{k_1/H_1 + k_2/H_2},$$

sem innsett í jöfnu [6.2] gefur

$$y_2 = C_3 e^{\mu x} + C_4 e^{-\mu x}, \quad \text{þar sem}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{T_2} \cdot \frac{k_1 k_2}{k_1 H_2 + k_2 H_1}}.$$

Með randskilyrðunum

$$x = 0 \implies y_2' \approx 0 \quad \text{og} \quad x = L \implies y_2 = D_0 \quad \text{fæst,}$$

$$y_2 \approx \frac{D_0}{e^L} (e^{\mu x} + e^{-\mu x}) \quad [6.5].$$

Rennsli undan stíflu verður þá

$$q_{0,b} = T_2 (y_2')_{x=L} = T_2 \mu D_0, \text{ p.e.}$$

$$q_{0,b} = \sqrt{T_2 \frac{k_1 k_2}{k_1 H_2 + k_2 H_1}} D_0 \quad [6.6]$$

$$q_{0,b}/q_{0,a} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{k_2 H_1}{H_2 k_1}}} \quad [6.7].$$

Samkvæmt framansögðu verður rennsli undan stíflu með þéttiskurði gegnum efra lagið

$$q_0 = \alpha \sqrt{\frac{k_2 T_2}{H_2}} D_0 \quad [6.8],$$

þar sem stuðull  $\alpha$  verður á bilinu

$$\sqrt{\frac{1}{1 + \frac{k_2 H_1}{H_2 k_1}}} \leq \alpha \leq 1 \quad [6.9].$$

Með  $k_1 = k_2$  og  $H_1 = H_2$  fæst t.d.

$$\sqrt{1/2} \leq \alpha \leq 1.$$

Við gerum nú ráð fyrir, að ekki hafi verið þétt undir stíflunni. Þá er jafnframt sem líkleg nálgun talið, að ákveðinn hundraðshluti leka leiti áfram niður í neðra lagið óháð  $x$ , p.e.

$$dq_2/dx = \beta dq_1/dx, \quad 0 \leq \beta \leq 1.$$

Þá fæst (sbr. bls. 15)

$$\beta \frac{k_1}{H_1} y_1 = \frac{k_2}{H_2} (y_2 - y_1) \quad \text{eða}$$

$$y_2 = y_1 \frac{\beta k_1/H_1 + k_2/H_2}{k_2/H_2} \quad [6.10].$$

Með innsetningu í jöfnu [6.2] fæst

$$T_2 \cdot \frac{d^2 y_2}{dx^2} = y_2 \frac{\beta \frac{k_1 k_2}{H_1 H_2}}{\beta \frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2}} .$$

Með randskilyrðunum

$$x = 0 \implies y_2' \approx 0 \quad \text{og} \quad x = L \implies y_2 = D_0 \quad \text{fæst}$$

$$y_2 = \frac{D_0}{e^{\lambda L}} (e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}) \quad [6.11],$$

þar sem

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{T_2} \frac{\beta \frac{k_1 k_2}{H_1 H_2}}{\beta \frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2}}}$$

$$q_{2,0} = T_2 (y_2')_{x=L} \approx \lambda T_2 D_0 \quad [6.12].$$

Af jöfnum [6.1] og [6.10] ásamt randskilyrðunum

$$x = 0 \implies y_1' \approx 0, \quad x = L \implies y_1 \approx D_0 \frac{k_2/H_2}{\beta k_1/H_1 + k_2/H_2} \quad \text{leiðir}$$

$$y_1 = D_0 \frac{k_2/H_2}{\beta k_1/H_1 + k_2/H_2} \frac{1}{e^{\mu L}} (e^{\mu x} + e^{-\mu x}) \quad [6.13],$$

þar sem

$$\mu = \sqrt{\frac{(1 - \beta) k_1}{T_1 H_1}}$$

$$(q_1 - q_2)_0 = T_1 (y_2')_{x=L} = T_1 \mu \frac{k_2/H_2}{\beta k_1/H_1 + k_2/H_2} D_0 \quad [6.14].$$

Heildarrennsli undan stíflu fæst í þessu tilviki af jöfnunum [6.12] og [6.14], þ.e.

$$q_0 = \left[ \frac{\frac{k_2}{H_2}}{\beta \frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2}} \left( (1 - \beta) \frac{k_1}{H_1} T_1 \right)^{0,5} + \left[ \frac{T_2 \frac{k_1 k_2}{H_1 H_2}}{\beta \frac{k_1}{H_1} + \frac{k_2}{H_2}} \right]^{0,5} \right] D_0 \quad [6.15],$$

þar sem  $\beta$  ákvarðast þannig, að  $q_0$  verði í hágildi.

Jafna [6.15] er að sjálfsögðu nálgun á raunverulegan leka, þar sem skilyrðið um að þrýstilínur rennslis í efra og neðra lagi séu í beinu hlutfalli hvor við aðra ( $\beta$  óháð  $x$ ) var innfært sem nálgun til einföldunar á reikningum.

Jöfnu [6.15] má rita þannig:

$$q_0 = \alpha \sqrt{\frac{k_2 T_2}{H_2}} D_0 \quad [6.16],$$

þar sem  $\alpha = f(\beta)_{\max}$ ,

$$f(\beta) = \frac{1}{1 + \beta \gamma} \left[ (1 - \beta) \gamma \cdot \frac{T_1}{T_2} \right]^{0,5} + \left[ \frac{\beta \lambda}{1 + \beta \lambda} \right]^{0,5} \quad [6.17],$$

$$\gamma = \frac{k_1 H_2}{H_1 k_2}.$$



Skilyrðið  $f(\beta) = f(\beta)_{\max}$  gefur

$$\beta = \frac{T_2(1 - \beta)(1 + \gamma\beta)}{T_1(1 + 2\gamma - \gamma\beta)^2} \quad [6.18].$$

Af jöfnu [6.18] fæst

$$T_1/T_2 \rightarrow 0 \implies \beta \rightarrow 1 \quad \text{og} \quad T_1/T_2 \rightarrow \infty \implies \beta \rightarrow 0.$$

Í fyrra tilviki fæst

$$\alpha = f(\beta)_{\max} = \left[ \frac{\gamma}{1 + \gamma} \right]^{0,5} = \left[ \frac{1}{1 + 1/\gamma} \right]^{0,5}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{k_2 H_1}{H_2 k_1}}}, \quad \text{sbr. jöfnu [6.7] bls. 17.}$$

Í síðara tilviki fæst

$$\alpha = \left[ \gamma \frac{T_1}{T_2} \right]^{0,5} = \left[ \frac{k_1 H_2 T_1}{k_2 H_1 T_2} \right]^{0,5} \quad \text{og}$$

$$q_0 = \sqrt{\frac{k_1 T_1}{H_1}} D_0 \quad [6.19].$$

Með framangreindum jöfnum fást því augljóslega rétt markgildi á leka undan stíflunni.

Á mynd 4 bls. 22 er fallið  $\alpha = f(\beta)_{\max}$  sýnt á bilinu

$$0,01 \leq T_1/T_2 \leq 10 \quad \text{fyrir} \quad \gamma = 0,1, 0,3, 1,0, 3,0 \quad \text{og} \quad 10,0.$$

## 7. Áhrif þéttiskurðar á leka.

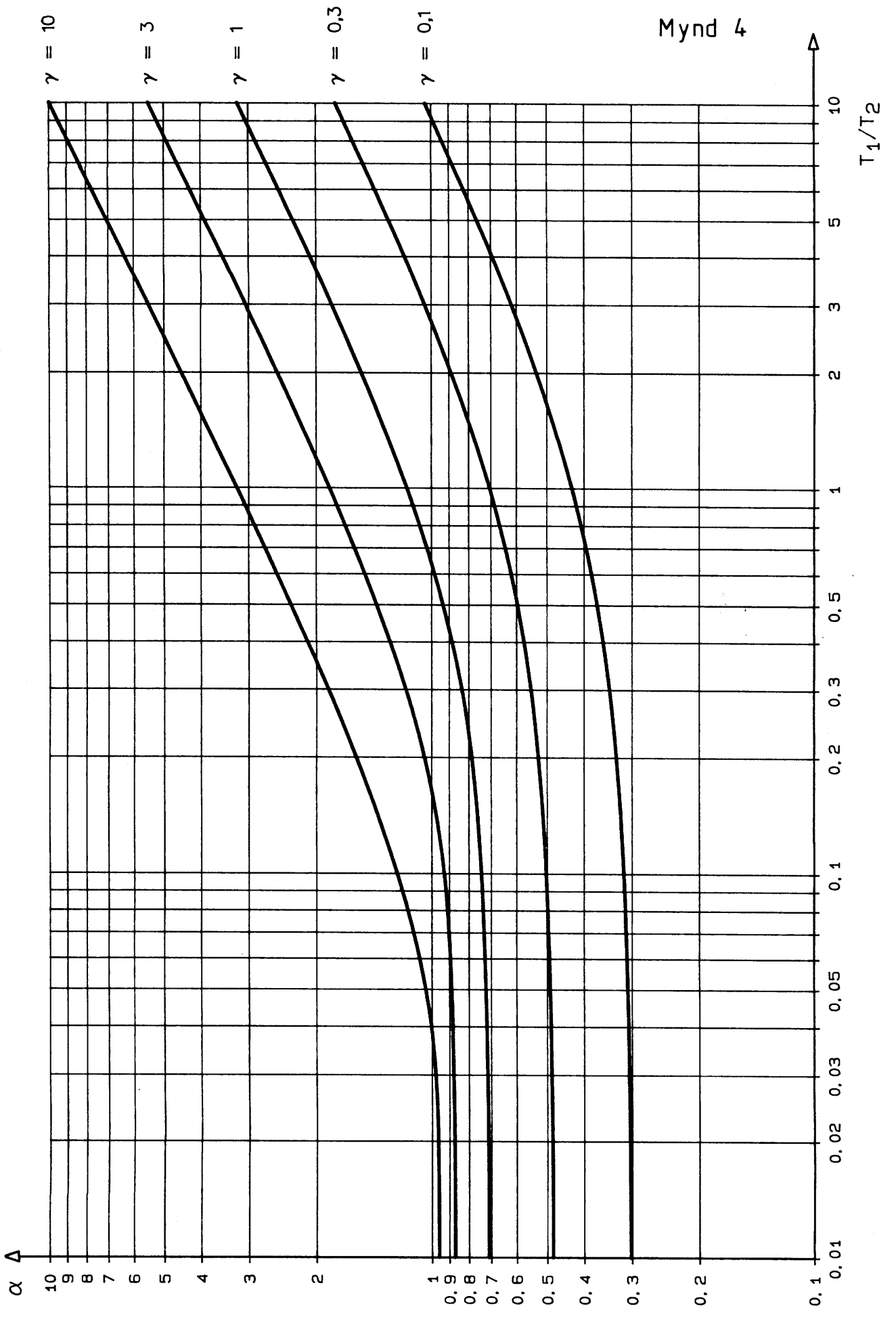
Áhrif þéttiaðgerða á leka undan stíflu verða hér athuguð í því tilviki, að

$$\gamma = \frac{k_1 H_2}{H_1 k_2} = 1$$

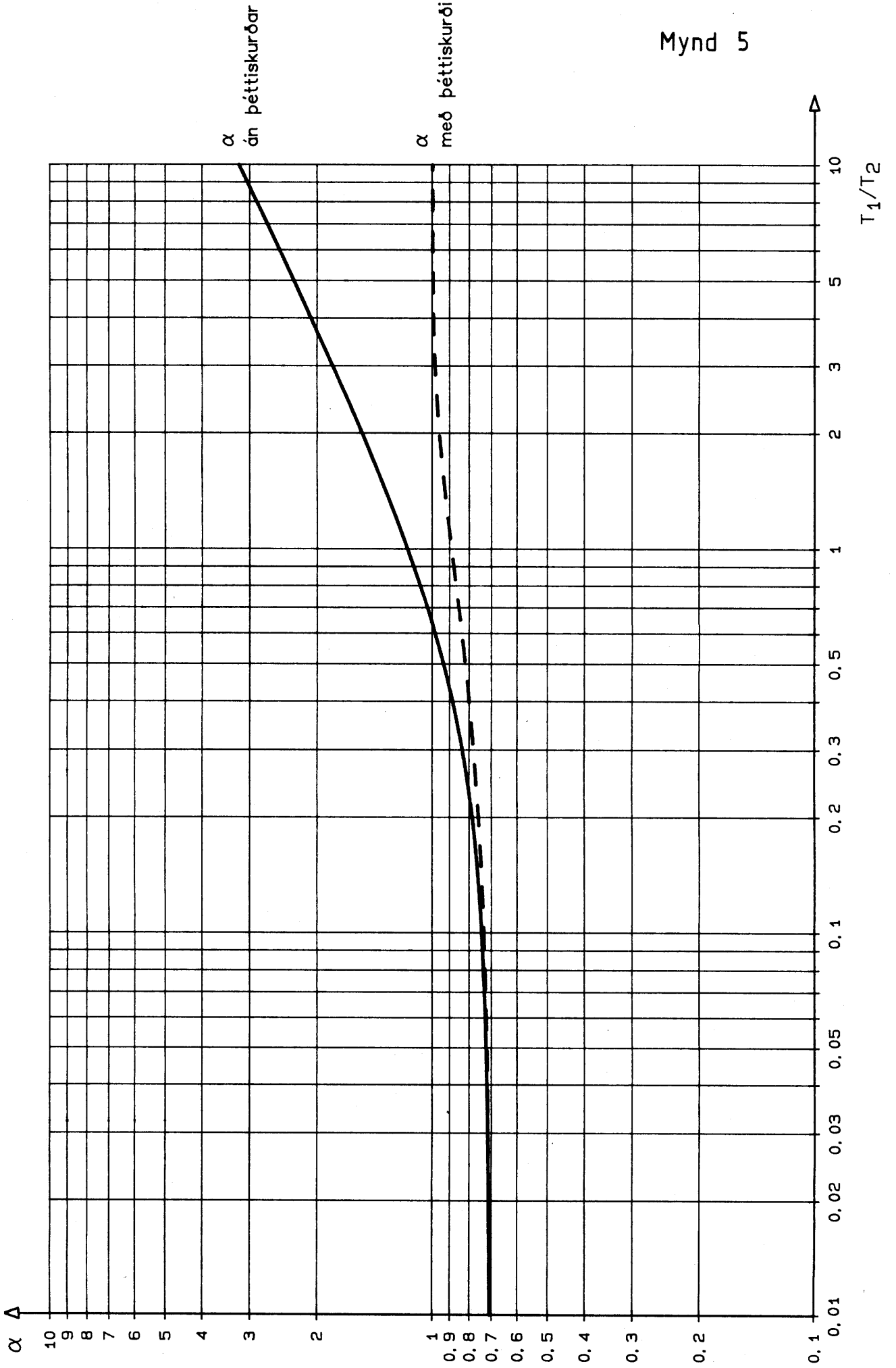
Á mynd 5 er línan  $f(\beta)_{\max} = \alpha$  sýnd sem fall af  $T_1/T_2$  ( $\alpha$ : án þéttiskurðar) og til samanburðar þau gildi, sem ætla má að  $\alpha$  taki, þegar efra lagi hefur verið lokað með þéttiskurði (strikalína). Ekki hefur verið gerð tilraun til að ákvarða einstaka punkta á síðar nefndri línu. Lega hennar er því óviss þótt markgildin ( $\sqrt{1/2}$  og 1) séu þekkt, sbr. bls. 17.

Fram kemur, að áhrif þéttiskurðar verða í þessu tilviki óveruleg þegar leiðni efra lagsins ( $T_1$ ) er verulega minni en leiðni neðra lagsins ( $T_2$ ). Áhrifin fara síðan vaxandi og minnkar lekinn um nálægt 25 af hundraði, þegar leiðni laganna er jöfn, þ.e.  $T_1/T_2 = 1$ , og allt að 70 af hundraði þegar  $T_1/T_2 = 10$ . Ætla má, að niðurstöður þessar séu í aðalatriðum nálægt réttu lagi, þótt talsverðu geti skakkað á tilgreindum hundraðstólum.

Mynd 4



Mynd 5



**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 17**

**Falltöp í sprengdum göngum**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Falltöp í sprengdum göngum

#### 1. Mælingar á falltöpum í ófóðruðum göngum.

Raunveruleg falltöp í jarðgöngum hafa ekki verið mæld hér á landi, en til eru heimildir um slíkar mælingar erlendis, einkum í Noregi og Svíþjóð.

Niðurstöður mælinga er að finna í meðfylgjandi skrá, þ.e. ákvarðaða Manningtölu,  $M^*$ , og meðalþvermál  $D$  (streymisþvermál) sem reiknað er miðað við skráð meðalþversniðsflatarmál og skeifulaga göng.

Gert er ráð fyrir, að falltöp megi ákvarða af jöfnu Darcy-Weisbachs,

$$I = \frac{\lambda}{2gD} \cdot v^2, \quad [1],$$

þar sem  $\lambda$  er núningstuðull,  $D$  streymisþvermál ganga í m,  $g$  þyngdarhröðunin ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) og  $v$  straumhraði í m/s.

Núningstuðullinn ákvarðast af jöfnu Colebrook-Whites,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{2,51}{Re} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7D} \right],$$

þar sem  $Re$  er Reynoldstala og  $k$  hrýfið í m.

Fyrir vatnsrennsli í jarðgöngum verður fyrri liður í hornklofa hverfandi lítill miðað við síðari lið, og þá fæst

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left[ \frac{3,7D}{k} \right],$$

eða eins og jafnan er oft tilgreind í heimildum

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left[ \frac{D}{k} \right] + 1,14 \quad [2],$$

Eins og fram kom eru niðurstöður mælinga gefnar með Manningtölu,  $M^*$ , þ.e. þeim stuðli í jöfnu Mannings, sem samsvarar mældum falltöpum,

$$M = \frac{v}{I^{1/2} (D/4)^{2/3}} \quad [3],$$

Af jöfnum [1] og [3] fæst,

$$\lambda = \frac{124,58}{M^*{}^2 D^{1/3}} \quad [4],$$

sem með jöfnu [2] gefur

$$M^* = \frac{11,162 \left[ 2 \log \left( \frac{D}{k} \right) + 1,14 \right]}{D^{1/6}} \quad \text{eða}$$

$$k = \frac{D}{\left[ \frac{M^* D^{1/6}}{22,323} - 0,57 \right]} \quad [5],$$

**10**

Reiknuð gildi á  $\lambda$  og  $k$  samkvæmt jöfnum [4] og [5] eru skráð í eftirfarandi skrá og einnig falltöp samkvæmt jöfnunni

$$I = \frac{v^2}{M^2 (D/4)^{4/3}} \quad [6],$$

Á meðfylgjandi línuriti 1 er sýnd samsvörun ákvarðaðs hrýfis,  $k$ , við streymisþvermál,  $D$ . Engin marktæk fylgni kemur fram milli  $k$  og  $D$ . Aðrir sem fjallað hafa um þetta, hafa komið að svipaðri niðurstöðu samkvæmt þeim heimildum, sem okkur eru kunnar (sjá heimildaskrá). Meðalgildi hrýfis er mjög nálægt 0,3 m, en dreifing er tiltölulega mikil (staðalfrávik  $\pm 0,12$  m eða nálægt 40 af hundraði).

Á línuriti 2 er sýnd samsvörun ákvaðraðra viðnámstalna við líklegustu gildi  $\tilde{\lambda}$ , þ.e. núningstuðla samkvæmt jöfnu [2] með  $k = 0,3$ .

Loks eru ákvörðuð falltöp miðað við straumhraða  $v = 1$  m/s ( $I/v^2$ ) sýnd á línuriti 3 og einnig líklegustu falltöp samkvæmt jöfnu [1] með  $\lambda = \tilde{\lambda}$ . Til samanburðar eru sýnd falltöp ákvörðuð með L og M jöfnum með  $k = \tilde{k} = 0,3$ , þ.e.

$$\tilde{L} = \frac{20,25}{\tilde{k}^{1/3}} \approx 30,3 \quad \text{og}$$

$$\tilde{M} = \frac{25,84}{\tilde{k}^{1/6}} \approx 31,6$$

Með  $k = 0,3$  gildir L-jafna, þegar  $D < 5,15$  m, og M-jafna, þegar  $D \geq 5,15$  m.

Við forathuganir á vatnsafli hér á landi voru falltöp í sprengdum (ófóðruðum) jarðgöngum löngum miðuð við hrýfi  $k = 0,5$  m, þ.e. mjög nálægt efri mörkum, sem fram hafa komið í umræddum athugunum. Líklega er hrýfi þá ofreiknað, nema göng liggja um grófstuðluð basaltlög.

Norðmenn hafa lagt til, að reikna falltöp í ófóðruðum jarðgöngum af jöfnu Mannings með Manningtölu á bilinu 31 til 33, þ.e. hrýfi á bilinu 0,23 til 0,34 m, en Norges Vassdrags- og Elektrisitetsvesen (NVE) mun a.m.k. framtil 1965 hafa reiknað með  $M = 29$ , þ.e.  $k = 0,5$  m. Samkvæmt bandarískum heimildum telst hæfilegt að meta  $M = 30,3$ , sem jafngildir hrýfi nálægt 0,38 m. Þessi samsvörun hrýfis og Manningstalna á við, þegar streymisþvermál er stærra en um það bil 5 m.



**SKRÁ YFIR NIÐURSTÖÐUR MÆLINGA**

Virkjun	D	M	$\lambda \cdot 10^3$	k	$I/v^2 \cdot 10^3$
	m	$m^{1/3}/s$		m	$m^{-2}s^2$

**NOREGUR:**

Tokke I	9,46	32,1	57,17	0,285	0,308
Innset	6,32	33,3	60,77	0,220	0,490
Tunnsjö	6,70	31,9	64,94	0,272	0,494
Tunnsjödál	7,27	33,3	57,99	0,227	0,407
Tussa	3,05	31,5	86,58	0,226	1,447
Mykstufoss	8,27	32,7	57,61	0,254	0,355
Mykstufoss	8,16	29,0	73,58	0,435	0,460
Brokke	9,08	34,4	50,46	0,201	0,283
Sokna	4,09	28,9	93,27	0,350	1,162
Kurasfossen	4,22	30,9	80,74	0,273	0,975
Straumsmo	7,53	35,3	51,01	0,171	0,345
Straumsmo	7,44	32,6	60,05	0,252	0,411
Nes	8,97	35,3	48,12	0,175	0,273
Langvatn	12,86	28,8	64,11	0,506	0,254
Tonstad	8,07	35,4	49,56	0,170	0,313
Tonstad	10,88	32,9	51,94	0,259	0,243
Kalvedalen	2,95	29,1	102,58	0,301	1,772
Kalvedalen	2,95	28,3	108,46	0,332	1,874

**SVÍÐJÓÐ:**

Alfta	6,15	27,8	87,98	0,471	0,729
Järpströmmen	11,31	34,5	46,63	0,203	0,210
Krokströmmen	10,67	34,5	47,54	0,202	0,227
Porjus I	8,02	29,4	72,00	0,408	0,458
Porjus II	8,30	33,3	55,49	0,233	0,341
Sillre	2,72	29,4	103,25	0,281	1,935
Sunnerstaholm	6,34	25,6	102,71	0,649	0,826
Tåsan	4,39	30,3	82,87	0,299	0,962
Stalon	8,57	33,3	54,90	0,234	0,327

**BANDARÍKIN:**

Big Creek 3	7,32	28,6	78,44	0,446	0,546
-------------	------	------	-------	-------	-------

Meðalgildi:

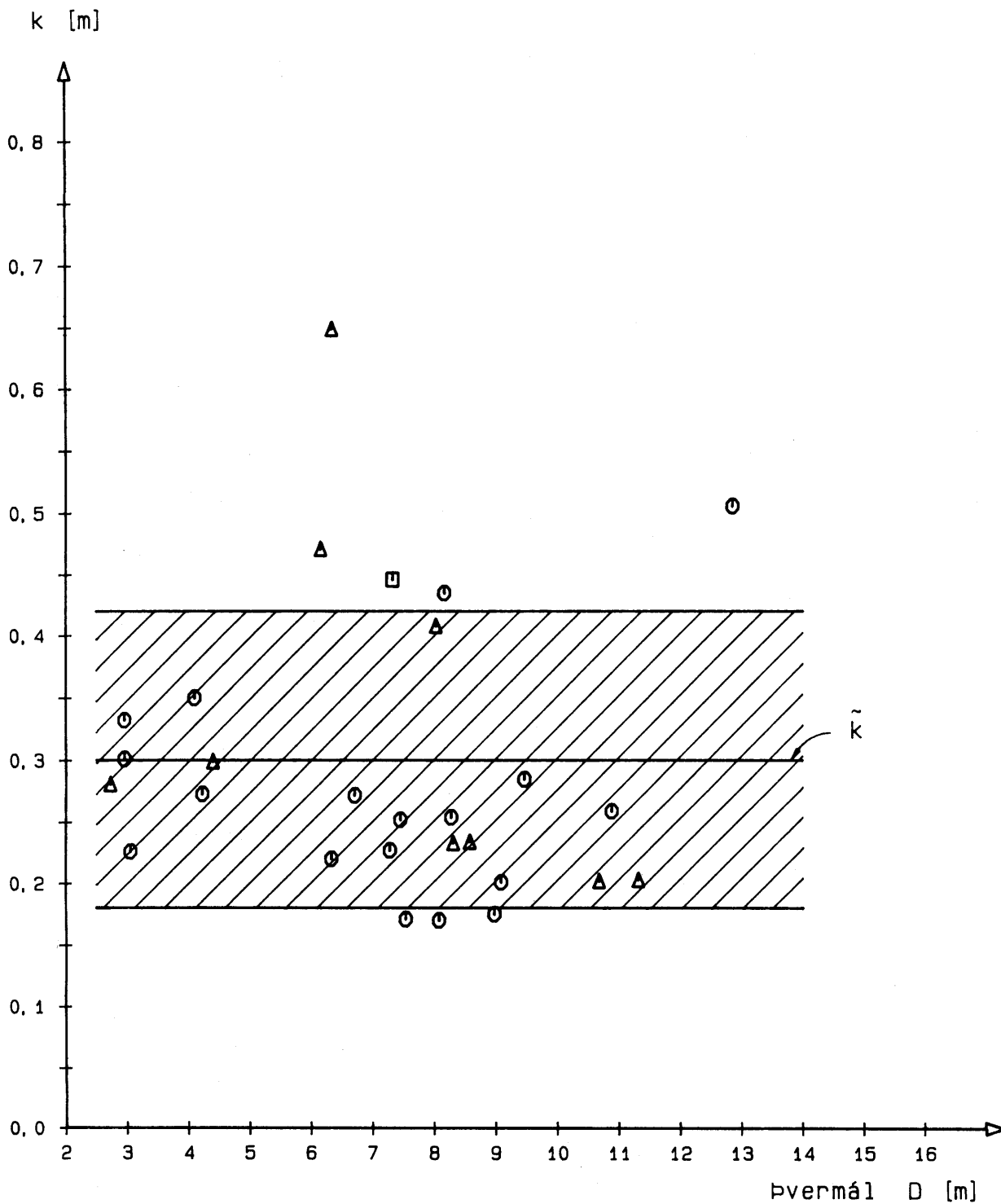
$$\tilde{k} = 0,298 \pm 0,116 \quad (38,8\%)$$

# HRÝFI SPRENGDRA JARÐGANGA

Byggt á mældum falltöpum

- Norsk göng
- ▲ Sænsk göng
- Bandarísk göng

$$\tilde{k} \approx 0,30 \pm 0,12 \text{ [m]}$$



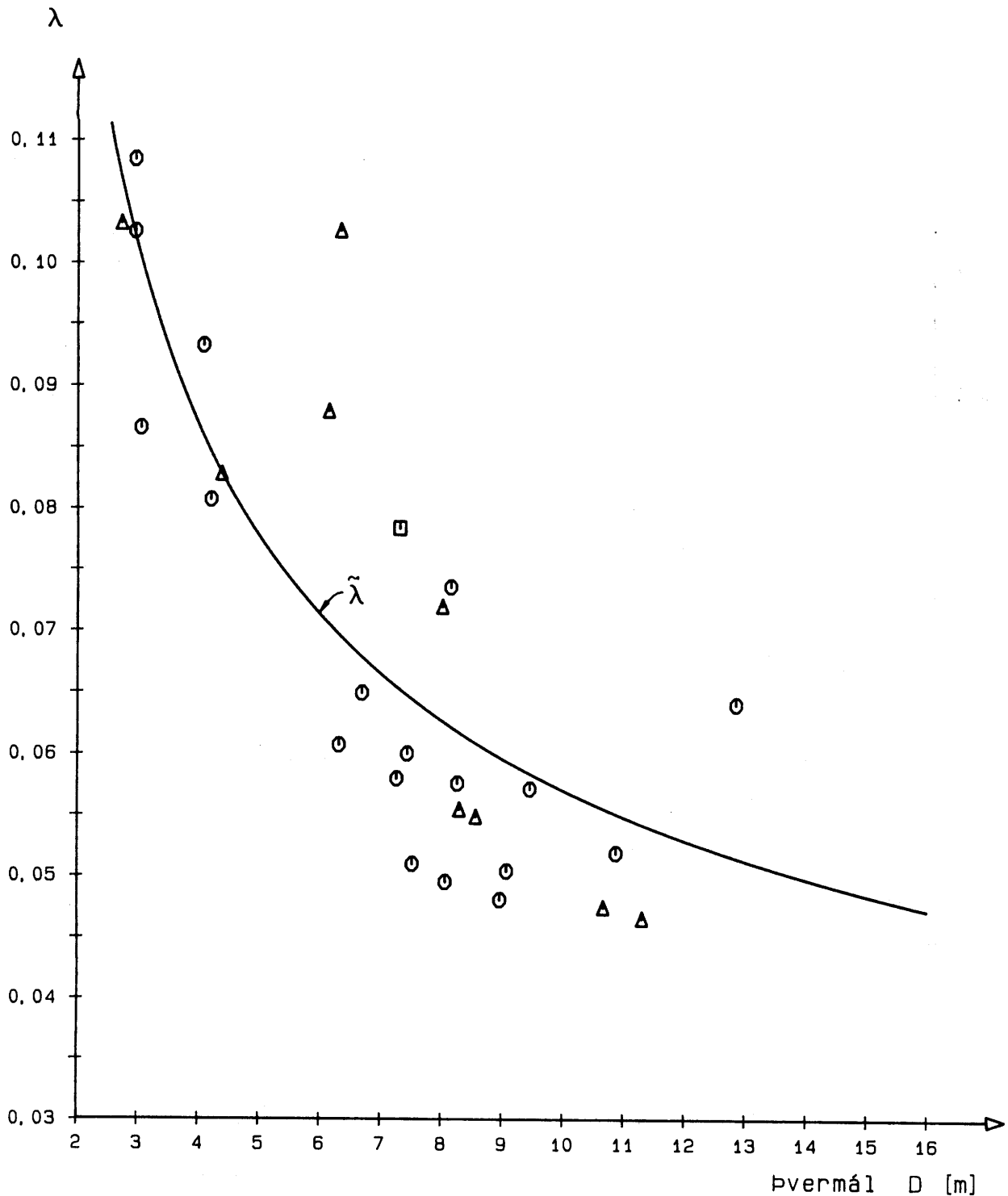
# VIÐNÁMSTÖLUR SPRENGDRA JARÐGANGA

Byggt á mældum falltöpum

- Norsk göng
- △ Sænsk göng
- Bandarísk göng

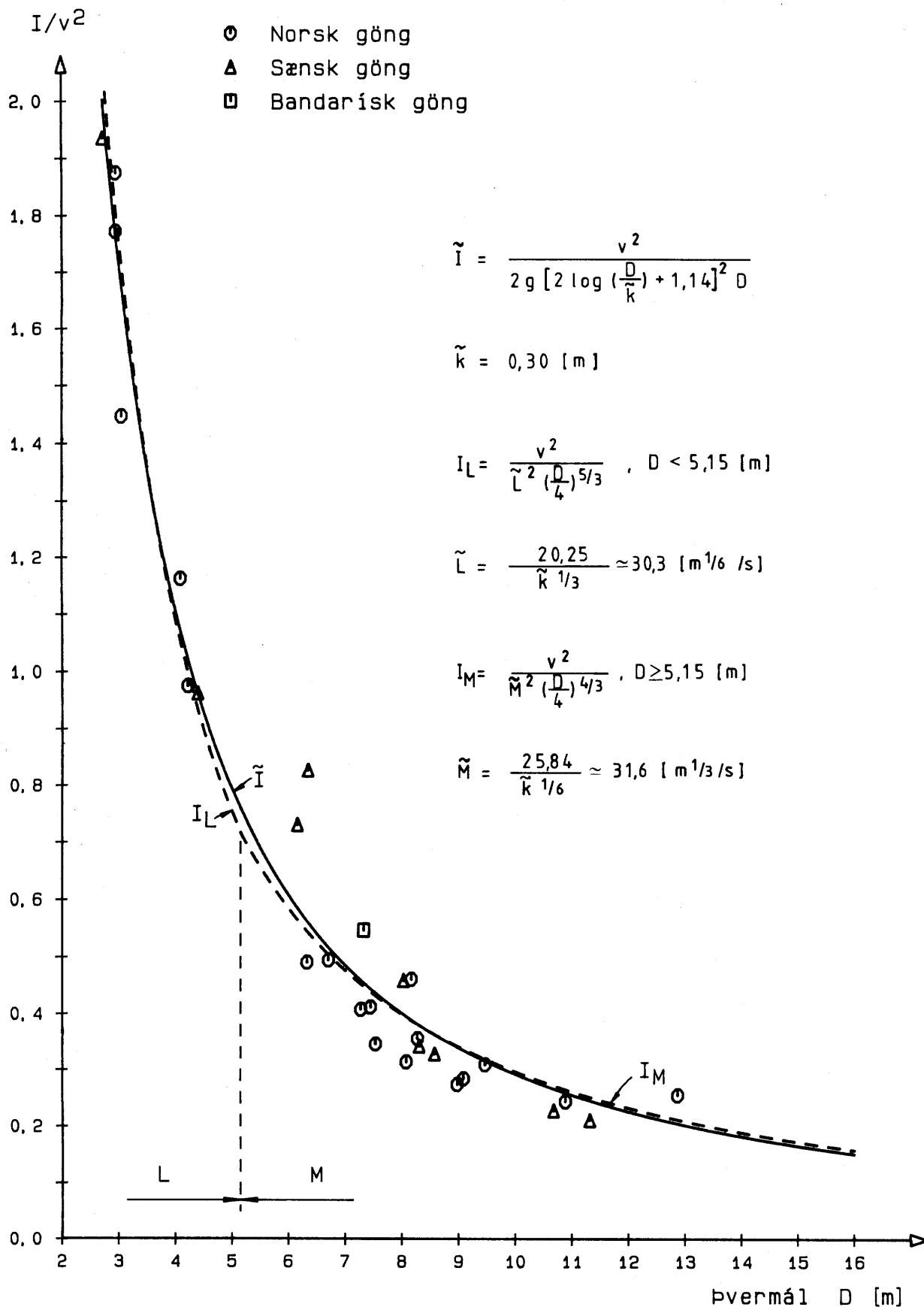
$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{[2 \log(\frac{D}{R}) + 1,14]^2}$$

$$\tilde{k} = 0,30 \text{ [m]}$$



# FALLTÖP Í SPRENGDUM JARÐGÖNGUM

Byggt á mældum falltöpum



## 2. Falltöp í húðuðum jarðgöngum.

Í sprengdum göngum fer ekki hjá því, að þversnið verða óregluleg og breytileg. Jafnvel þó að göngin séu vel sprengd má því gera ráð fyrir falltöpum vegna formviðnáms (form drag) auk núningstapa vegna hrýfis yfirborðsins. Falltöp vegna formviðnáms má hugsa sér sem meira eða minna "samfelld staktöp", þannig að samfelldu töpin í heild verði:

$$I = \begin{bmatrix} f & p \\ - & - \\ D & L \end{bmatrix} \begin{matrix} v^2 \\ - \\ 2g \end{matrix} \quad [7],$$

Þar sem  $f$  er núningsstuðull háður hrýfi og streymisþvermáli en  $p$  er einhvers konar fall af breytileika þversniðsflatarmáls. Í samsvarandi göngum, annars vegar ófóðruðum og hins vegar með þunnri steypuásprautun, yrði  $p$  hið sama, en hrýfið og þar með  $f$  myndi minnka við húðunina.

Til að hafa gagn af þessu og geta flutt reynslu frá einum stað til annars þarf að mæla bæði hrýfið,  $k_s$ , og  $p$  á staðlaðan hátt. Hrýfið mætti áætla að vissu marki eftir mælingum af gangaveggjunum út frá réttsskeið, sbr. sýnishorn af mælingum í aðkomugöngum Blönduvirkjunar á meðfylgjandi mynd. Finna þarf viðmiðunarstærð sem ekki er mjög breytileg í svipuðu bergi. Til dæmis mætti prófa að nota meðaltal mestu "dýpta" á hverju eins metra bili eins og sýnt er á er myndinni. Hrýfið hlýtur þó einnig að vera háð fleiru, svo sem áferð yfirborðsins og kleyfnistefnu bergsins.

Falltapsstuðulinn vegna formviðnáms,  $p$ , verður að ákveða út frá þversniðsmælingum í göngunum. Með hliðsjón af staktapsstuðlum fyrir þversniðsbreytingar má sem tilgátu setja fram eftirfarandi jöfnu,

$$p = c \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (1-x)^2 \quad [8],$$

þar sem  $x=A_i/A_{i+1}$ , þegar  $A_{i+1}>A_i$  og  $x=A_{i+1}/A_i$ , þegar  $A_{i+1}<A_i$ . Stuðulinn  $c$  yrði að ákveða eftir mælingum á falltapi. Við slíka reikninga gæti fjarlægð milli mældra sniða skipt miklu máli og þyrfti hún að vera skilgreind á einhvern staðlaðan máta.

Með nálgun má gera ráð fyrir eftirfarandi sambandi,

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (1-x)^2 \approx \left[ \frac{\Delta D}{D} \right]^2,$$

þar sem D er meðalþvermál (streymisþvermál) ganganna, og  $\Delta D$  einkennisstærð fyrir frávik frá meðalþvermáli.

Sé gert ráð fyrir jafnaðargildi á  $\Delta D$ , sem er óháð D fæst

$$I = \lambda \frac{v^2}{2gD},$$

þar sem

$$\lambda = f + \frac{pD}{L} \approx \left[ 2 \log \left( \frac{3,7D}{k_s} \right) \right]^{-2} + \frac{a}{D} \quad [9],$$

Engin leið er að ákvarða meðalgildi hrýfis  $k_s$  (m) og stuðuls  $a$  (m) með neinni vissu af tiltækum mælingum á falltöpum, en sem tilgátu verður hér á eftir reiknað með  $a=0,05$  m.

Þá fást eftirfarandi núningstuðlar annars vegar með  $k_s=0,23$  m (óhúðuð göng) og hins vegar með  $k_s=0,10$  m (húðuð göng), sbr. skrá á bls. 10. Einnig eru skráðar jafngildar hrýfistölur  $k$  samkvæmt jöfninni

$$\lambda = \left[ 2 \log \left( \frac{3,7D}{k} \right) \right]^{-2}.$$

D (m)	Óhúðuð göng		Húðuð göng	
	$k_s=0,23$ m	$a=0,05$ m	$k_s=0,10$ m	$a=0,05$ m
	$\lambda$	k (m)	$\lambda$	k (m)
2	0,1350	0,3224	0,0966	0,1820
3	0,1049	0,3172	0,0764	0,1725
4	0,0889	0,3116	0,0656	0,1651
5	0,0789	0,3066	0,0586	0,1593
6	0,0718	0,3024	0,0537	0,1547
7	0,0665	0,2985	0,0501	0,1509
8	0,0624	0,2952	0,0472	0,1477
9	0,0591	0,2923	0,0448	0,1450
10	0,0564	0,2897	0,0429	0,1427
11	0,0540	0,2873	0,0413	0,1406
12	0,0520	0,2852	0,0398	0,1388
13	0,0503	0,2833	0,0386	0,1371
14	0,0487	0,2816	0,0375	0,1357
15	0,0474	0,2799	0,0365	0,1343
16	0,0461	0,2785	0,0357	0,1331
Meðaltal		0,30		0,15

Samkvæmt umræddri tilgátu um núningstuðla sem fall af hrýfi,  $k_s$ , formstuðli,  $a$ , og streymisþvermáli,  $D$ , verður jafngilt hrýfi,  $k$ , háð  $D$  gagnstætt því sem reiknað hefur verið með. Breytingin er þó svo lítil, sbr. skrána, að ekki er að vænta að hún komi að neinu marki fram við mælingar á falltöpum.

Sé engu að síður leitast við að finna samband milli  $D$  og  $k$  samkvæmt áður tilgreindum mælingum fæst,

$$k = 0,3172 - 0,0027 D \text{ m,}$$

en fylgnin er nánast engin ( $r^2=0,004$ ) eins og vikið var að. Með jöfnunni fæst þó því sem næst sama hrýfi og í skránni fyrir óhúðuð göng.

Eins og fram hefur komið er varla neitt fyrir hendi til að ákvarða núningssstuðla húðaðra jarðganga með neinni vissu. Með hliðsjón af lauslegum athugunum á yfirborðshrýfi húðaðra aðkomuganga Blönduvirkjunar ( $k_s=0,1$ ), sbr. mynd, og framangreindum mælingum á hrýfi óhúðaðra ganga er hins vegar lagt til að reikna núningssstuðul húðaðra ganga

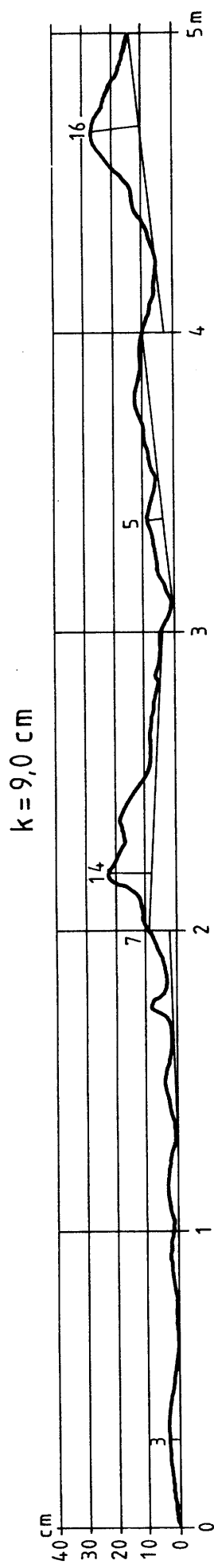
$$\lambda = \left[ 2 \log \left( \frac{3,7D}{0,15} \right) \right]^{-2},$$

þ.e. miðað við jafngilt meðalhrýfi

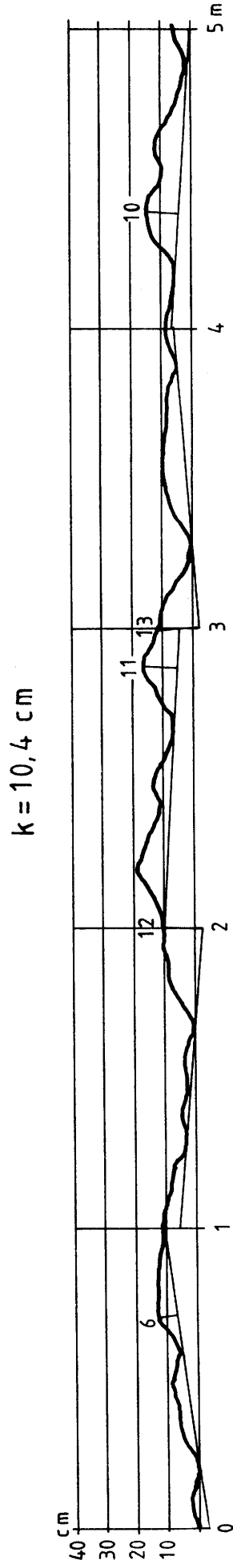
$$k = 0,15 \text{ m}$$

Æskilegt er að mæla vandlega hrýfi og þversnið væntanlegra frárennslisganga Blönduvirkjunar og setja þar upp búnað til falltapsmælinga þannig að unnt verði að hagnýta reynslu af þeim við hönnun síðari virkjana.





STÖÐ 115-120, mælt 1,5 m frá botni



STÖÐ 240-245, mælt 1,5 m frá botni

BLANDA  
Mæling á hryfi í  
aðkomugöngum

**HEIMILDIR**

Bretting, A.E., 1960: Hydraulik.

Bruland, Amund: Falltap og sprengingsmetoder. Fjellsprengningsteknikk 1983.

Huval, Carl J.: Hydraulic Design of Unlined Rock Tunnels. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Hydraulics Division, July 1969, p. 1235 - 1246.

Johansen, F.: Falltapsundersökelse i råsprengte tunneler. Vassdrags- og havnelaboratoriets forsøksvirksomhet 1965. Meddelelse nr. 8N, 1966.

Johansen, F.: Falltapsundersökelse i råsprengte tunneler. Vassdrags- og havnelaboratoriets meddelelser. Meddelelse nr. 10N, 1967.

Johansen, F.: Falltapsundersökelse i råsprengte tunneler. Vassdrags- og havnelaboratoriets meddelelser. Meddelelse nr. 14N, 1970.

Rahm, Lennart, 1983: Flow Problems with Respect to Intakes and Tunnels of Swedish Hydro-Electric Power Plants.

Solvik, Öivind: Sammenlikning av hydraulisk motstand i vanlig sprengte og fullprofilborete tunneler. Fjellsprengningsteknikk. Bergmekanikk. Geoteknikk 1979. Tapir 1980.

Solvik, Öivind: Unlined Tunnel Hydraulics. Norwegian Hydrodynamic Laboratories, division: River and Harbour Laboratory.

U.S. Army Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi: Hydraulic Design Criteria, Sheets 224-1/5 and 224-1/6, WES 1-68.

Universitetet i Trondheim - Norges Tekniske Högskole: Fullprofilboring av tunneler, Prosjektrapport 1-76.

VST, 1981: Vatnsorkurannsóknir. Falltöp í sprengdum göngum. Bréf VST til Landsvirkjunar dags. 810205.

VST, 1985: Blönduvirkjun. Falltöp í frárennslisgöngum. Bréf VST til Landsvirkjunar dags. 850419.

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 18**

**Drög að orðasafni ásamt enskum heitum**

**VATNSORKA Á ÍSLANDI**

Drög að orðasafni ásamt enskum heitum.

Í skýrslum um vatnsaflsvirkjanir hefur gætt nokkurs misræmis að því er varðar heiti hugtaka og mannvirkja. Leitast hefur verið við að samræma þessi efni sbr. eftirfarandi yfirlit, sem þó takmarkast við nokkur meginatriði.

**STÍFLUR**

Stífla	Dam
Jarðefnastífla	Embankment dam
Grjótstífla	Rockfill dam
Jarðstífla	Earthfill dam
Stíflukróna	Crest
Stífluflái, flái	Slope
Kjarni	Core
Sía	Filter
Stoðfylling	Shell
Grjótvörn	Rip-rap
Steypt stífla	Concrete dam
Þungastífla	Gravity dam
Bogastífla	Arch dam
Stöplastífla	Buttress dam
Plötustífla	Flat slab dam, Ambursen dam
Vængjastífla	Solid head buttress dam
Raðbogastífla	Multiplearch dam
Yfirfallsstífla	Overflow dam
Yfirfall	Spillway
Flóðgáttir	Gated spillway
Yfirfallsrenna	Spillway chute
Flóðskarð, varayfirfall	Fuse plug
Alstífla	Non-overflow dam
Leiðigarður	Training dike

Stemma, varnarstífla, bráðabirgðastífla	Cofferdam
Aðalstífla	Main dam
Hjástífla	Auxiliary dam
Botnrás	Bottom outlet
Inntak, stöðvarinntak	Intake
Andsteymis, vatnsmegin, vatnshlið	Upstream
Forstreymis, bakstreymis loftmegin, lofthlið	Downstream
Miðlun	Storage
Dægurmiðlun	Pondage
<b>VATNSVEGIR, LOKUR OG LOKAR</b>	
Vatnsvegur	Waterway
Skurður	Canal
Aðrennslisskurður, aðskurður	Headrace canal
Frárennslisskurður, fráskurður	Tailrace canal
Framhjárennslisskurður, hjáskurður, hjárennslisskurður	Bypass (canal)
Veituskurður	Diversion canal
Jarðgöng, göng	Tunnel
Aðrennslisgöng, aðgöng	Headrace tunnel
Frárennslisgöng, frágöng	Tailrace tunnel
Framhjárennslisgöng, hjágöng, hjárennslisgöng	Bypass tunnel
Þrýstigöng, fallgöng, risgögn	Pressure tunnel
Veitugöng	Diversion tunnel

Pípa	Pipe
Prýstipípa, prýstivatnspípa	Penstock
Steinsteypt pípa	Concrete pipe
Trépípa	Wood stave pipe
Stálpípa	Steel pipe
Festill, pípufestill	Anchor block
Stöpull, pípustöpull	Pier
Jöfnunarþró	Surge tank
Svelgur	Surge chamber
Loka	Gate
Bjálkaloka	Stop logs
Nálaloka	Needle gate
Geiraloka	Tainter gate, Radial gate
Flípaloka	Flap gate
Belgloka	Drum gate
Hólkloka	Rolling gate
Hleraloka, varaloka	Bulkhead gate
Hjólaloka	Wheeled gate
Sleðaloka, renniloka	Slide gate
Beltaloka	Caterpillar gate
Loki	Valve
Spjaldloki	Butterfly valve
Nálarloki	Needle valve
Holstraumsloki	Hollow jet valve
Keiluloki	Fixed cone valve
Kúluloki	Spherical valve
Lokuhús	Gate control house
Lokahús, lokarými	Valve chamber

## STÖÐVARHÚS, VÉLAR OG RAFBÚNAÐUR

Stöðvarhús	Powerhouse
Stöðvargólf	Station floor
Hlaðrými, uppsetningarrými	Erection bay
Rafalgólf	Generator floor
Hverfilgólf	Turbine floor
Stjórnrymi	Control room
Hverfill, vatnshverfill	Turbine
Peltonhverfill	Pelton turbine
Francishverfill	Francis turbine
Kaplanhverfill	Kaplan turbine
Skrúfuhverfill	Propeller turbine
Gangráður	Governor
Snigill	Spiral case
Sográs	Draft tube
Hverfilhjól, vatnshjól	Runner
Leiðiskófla	Guide vane
Rafall, rafali	Generator
Snúður	Rotor
Sátur	Stator
Spennir	Transformer
Aðalspennir	Main transformer
Stöðvarspennir	Station supply transformer
Tengivirki	Switchgear
Útivistirki	Switchyard
Innivirki	Indoor switchgear

**AFL OG ORKA**

Fallhæð	Head
Verg fallhæð	Gross head
Raunfallhæð	Net head
Hönnunarfallhæð	Design head
Falltap	Head loss
Rennsli	Discharge
Virkjað rennsli	Turbine discharge
Hönnunarrennsli	Rated discharge
Afl	Capacity
Uppsett afl	Installed capacity
Ástimplað afl	Rated capacity
Orka	Energy
Orkuvinnsla	Energy production
Orkuvinnslugeta, orkumáttur	Potential energy production

**VATNSBORÐ**

Forvatn, yfirvatn	Headwater
Bakvatn, undirvatn	Tailwater
Flóðvatnsborð, HV	Flood level
Venjulegt vatnsborð, NV	Normal waterlevel
Lægsta vatnsborð, LV	Low waterlevel
Alhæsta vatnsborð, vatnsborð í aftakaflóði, HHV	Flood maximum waterlevel
Allægsta vatnsborð, LLV	Minimum waterlevel
Vatnsborð í yfirfallshæð, YV	Normal maximum waterlevel



## **VIRKJUNARÁÆTLANIR**

Forathugun, drög að áætlun	Preliminary study
Frumhönnun, frumáætlun, forhönnun	Appraisal report
Verkhönnun, hönnunaráætlun	Project planning report
Útboðsgögn, útboðsáætlun	Contract documents
Lokahönnun	Project design
Vinnuteikningar	Construction drawings
Veruteikningar	As-built drawings

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Fylgiskjal 19

Stærð og þyngd francishverfla

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Stærð og þyngd francishverfla

Algengustu hverflar vatnsaflsvirkjana eru af francisgerð. Hér á eftir fara hugleiðingar um hvernig ákvarða má venjulega stærð slíkra hverfla við frumáætlanagerð. Er þá stuðzt við nýlegar greinar um þessi efni, sbr. heimildaskrá.

### Stærð útrennslisops

Samkvæmt grein í tímaritinu Water Power (1) má ákvarða stærð útrennslisops af jöfnunni,

$$D_{3WP} \approx 0,63375 n_s^{-1} (n_s + 124) Q^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m} \quad [1],$$

þegar  $Q$  er hönnunarrennsli í  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $H$  hönnunarfallhæð í m og eðlishraði  $n_s$  er skilgreindur með jöfnunni,

$$n_s = 3nQ^{0,5} H^{-0,75} \quad [2],$$

þar sem  $n$  er fjöldi snúninga á mínútu.

Samkvæmt bandarískum heimildum (2) fæst hins vegar,

$$D_{3US} \approx 4,1025 (Q/n)^{1/3} \quad \text{m},$$

eða

$$D_{3US} \approx 5,917 n_s^{-1/3} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m} \quad [3],$$

Lagt er til að reikna með einskonar meðaltali jafna [1] og [3]

$$D_3 \approx 1,95 n_s^{-2/3} (n_s + 124)^{1/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m} \quad [4].$$

Samanburður jafnanna er:

$$D_3/D_{3WP} = 3,077 n_s^{1/3} (n_s + 124)^{-1/2},$$

$$D_3/D_{3US} = 0,32956 n_s^{-1/3} (n_s + 124)^{1/2} \quad \text{og}$$

$$D_{3WP}/D_{3US} = 0,1071 n_s^{-2/3} (n_s + 124),$$

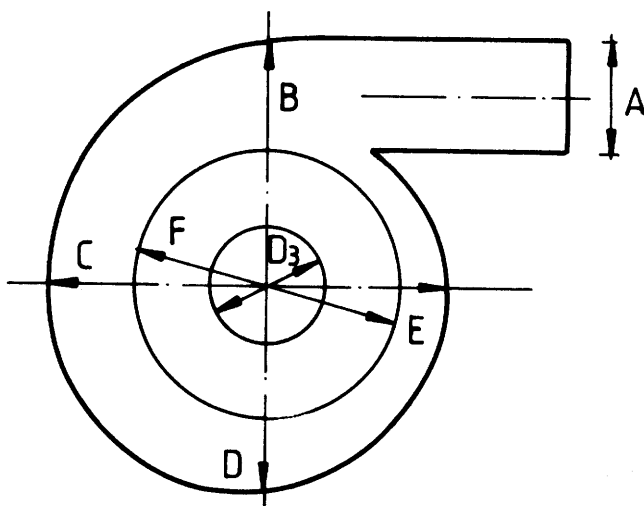
sbr. eftirfarandi skrá.

$n_s$	$D_3/D_{3WP}$	$D_3/D_{3US}$	$D_{3WP}/D_{3US}$
50	0,859	1,180	1,373
70	0,910	1,114	1,223
100	0,954	1,063	1,114
150	0,988	1,027	1,039
200	1,000	1,014	1,015
300	1,000	1,014	1,013
400	0,990	1,024	1,034

Samkvæmt þessum samanburði virðist með allgóðri vissu mega ákvarða þvermál útrennslisops af jöfnu [4] þegar  $n_s > 70$ .

### Höfuðstærðir snigils

Lagt er til, að höfuðstærðir snigils verði ákvarðaðar af eftirfarandi jöfnum, sbr. skýringarmynd, þar sem F er ytra þvermál staghrings.



$$A \approx 2,6 n_S^{-5/3} (n_S + 8)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [5]$$

$$B \approx 3,3 n_S^{-5/3} (n_S + 52)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [6]$$

$$C \approx 3,0 n_S^{-5/3} (n_S + 55)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [7]$$

$$D \approx 2,6 n_S^{-5/3} (n_S + 62)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [8]$$

$$E \approx 1,9 n_S^{-5/3} (n_S + 82)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [9]$$

$$F \approx 1,95 n_S^{-5/3} (n_S + 129)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [10]$$

Hér hefur að mestu verið stuðzt við heimild (1) , sbr. eftirfarandi samanburð.

Hlutfall	Sankv. jöfnum [5]-[10], a	Sankv. WP (1), b
A/D <sub>3</sub>	$1,33333 n_S^{-1} (n_S + 124)^{-1/2} (n_S + 8)^{3/2}$	$1,2 - 19,56 n_S^{-1}$
B/D <sub>3</sub>	$1,69231 n_S^{-1} (n_S + 124)^{-1/2} (n_S + 52)^{3/2}$	-
C/D <sub>3</sub>	$1,55844 n_S^{-1} (n_S + 124)^{-1/2} (n_S + 55)^{3/2}$	$1,5 + 48,8 n_S^{-1}$
D/D <sub>3</sub>	$1,33333 n_S^{-1} (n_S + 124)^{-1/2} (n_S + 62)^{3/2}$	$1,32 + 49,25 n_S^{-1}$
E/D <sub>3</sub>	$0,97436 n_S^{-1} (n_S + 124)^{-1/2} (n_S + 82)^{3/2}$	$0,98 + 63,6 n_S^{-1}$
F/D <sub>3</sub>	$n_S^{-1} (n_S + 124)^{-1/2} (n_S + 129)^{3/2}$	$1 + 131,4 n_S^{-1}$

$n_s$	A/D <sub>3</sub> a/b	B/D <sub>3</sub> a/b	C/D <sub>3</sub> a/b	D/D <sub>3</sub> a/b	E/D <sub>3</sub> a/b	F/D <sub>3</sub> a/b
50	1,104	-	1,014	1,040	0,995	1,001
70	1,023	-	1,004	1,025	0,992	1,001
100	0,996	-	0,998	1,013	0,989	1,001
150	0,997	-	0,996	1,006	0,988	1,000
200	1,008	-	0,998	1,003	0,987	1,000
300	1,028	-	1,002	1,002	0,988	1,000
400	1,043	-	1,005	1,002	0,989	1,000

### Aðrar stærðir

Að því er varðar aðrar stærðir vísast til heimilda, einkum (1). Stærð og lögun sogrása virðist vera all mismunandi.

### Þyngd francishverfla

Samkvæmt grein í "Water Power" (3) má meta heildarþyngd francishverfla af jöfnunni

$$G_{WP} \approx 6,3 D_3^{1,9566} H^{0,3310} \quad \text{Mg} \quad [11].$$

Sem nálgun verður hér gert ráð fyrir að eins mætti miða við jöfnuna

$$G \approx 6 D_3^2 H^{1/3} \quad \text{Mg}$$

Samkvæmt heimild (2) er eðlishraði francishverfla á bilinu

$$1331 H^{-0,5} \leq n_s < 2000 H^{-0,5}$$

Sé reiknað með  $n_s \approx 1500 H^{-0,5}$  fæst

$$G \approx 786 n_s^{-2/3} D_3^2 \quad \text{Mg}$$

eða með jöfnu [4]

$$G \approx 3000 n_s^{-2} (n_s + 124) QH^{-0,5} \quad \text{Mg} \quad [12].$$

Samkvæmt 7 tilboðum í vélar Blönduvirkjunar ( $Q = 20,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H = 279 \text{ m}$ ) var  $D_3 = 1,491 \pm 0,043 \text{ m}$  og 12 tilboðum í vélar Hrauneyjafossvirkjunar ( $Q = 93 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H = 86 \text{ m}$ )  $D_3 = 3,284 \pm 0,121 \text{ m}$ .

Samanburður á jöfnu [11] með tilgreindum stærðum og jöfnu [12] er í eftirfarandi skrá, þar sem meðalþungi samkvæmt uppgefinni þyngd í umræddum tilboðum er einnig tilgreindur.

Virkjun	Heildarþyngd vatnshverfils		
	Jafna [11]	Jafna [12]	Tilboð
	Mg	Mg	Mg
Blanda	$88,8 \pm 5,1$	83,1	$80,2 \pm 9,9$
Hrauneyjafoss	$281,9 \pm 20,7$	235,7	$237,3 \pm 30,8$

Niðurstöður samkvæmt jöfnu [12] falla mun betur að tilboðum í Blöndu- og Hrauneyjafossvirkjun en reiknuð gildi samkvæmt jöfnu [11]. Frekari sannprófunar er þó þörf, áður en almennt fæst skorið úr um notagildi þessara jafna.

Samanburður við tilboð

Tákn	Eining	BLANDA			HRAUNEYJAFOSS		
		Jöfnur	Fuji	Meðaltal 7 tilboða	Jöfnur	KMW ca.	Meðaltal 12 tilboða
Q	m <sup>3</sup> /s		20,5			93	
H	m		279			86	
n	sn/min		500			200	
n <sub>s</sub>			99,487			204,889	
D <sub>3</sub>	m	1,504	1,536	1,491 ± 0,043	3,222	3,20	3,284 ± 0,121
A	m	1,503	1,570		3,592	4,00	
B	m	3,191	3,241		6,043	6,10	
C	m	2,988	3,159		5,590	5,40	
D	m	2,767	2,918		5,041	4,90	
E	m	2,409	2,448		4,106	4,05	
F	m	3,493	3,640	3,605 ± 0,246	5,291	5,15	5,434 ± 0,180
G	Mg	83,1	70,8	80,2 ± 9,9	235,7	200	237,3 ± 30,8

Lengd milli vélasamstæðna

Samkvæmt heimild (4), línurit 10, virðist mega áætla jafnaðarlegt bil milli lóðréttra ása francishverfla af jöfnunni

$$L/D_3 \approx 26,7 n_s^{-1/3}$$

eða

$$L \approx 52 n_s^{-1} (n_s + 124)^{1/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [13]$$

en dreifing virðist allmikil.



**Heimildir**

- (1) **Modern trends in selecting and designing Francis turbines**  
by F. de Siervo and F. de Leva.  
Water Power & Dam Construction August 1976, p. 28-35.
- (2) **SELECTING HYDRAULIC REACTION TURBINES**  
United States Department of the Interior Bureau of Reclamation.  
Engineering Monograph no. 30, Washington 1976.
- (3) **Cost analysis of hydraulic turbines**  
by L. H. Sheldon.  
Water Power & Dam Construction June 1981, p. 24-28.
- (4) **Characteristics of Francis Turbines**  
by Dino Zanobetti.  
Water Power March 1959, p. 96-103.

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Fylgiskjal 20

Stærð og þyngd kaplanhverfla

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Stærð og þyngd kaplanhverfla

Hér á eftir fara hugleiðingar um hvernig ákvarða megi venjulega stærð kaplan- eða skrúfuhverfla við frumáætlanagerð. Er þá stuðzt við nýlegar greinar um þessi efni, sbr. heimildaskrá.

### Stærð útrennslisops

Samkvæmt grein í timaritinu Water Power (1) má ákvarða stærð útrennslisops af jöfnunni

$$D_{3WP} \approx 0,408 n_s^{-1} (n_s + 491) Q^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m} \quad [1],$$

þegar  $Q$  er hönnunarrennsli í  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $H$  hönnunarfalshæð í m og eðlishraði  $n_s$  er skilgreindur með jöfnunni,

$$n_s = 3n Q^{0,5} H^{-0,75} \quad [2],$$

þar sem  $n$  er fjöldi snúninga á mínútu.

Samkvæmt bandarískum heimildum (2) fæst hins vegar,

$$D_{3US} \approx 4,5344 (Q/n)^{1/3} \quad \text{m},$$

eða

$$D_{3US} \approx 6,54 n_s^{-1/3} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m}, \quad [3],$$

Lagt er til að reikna með einskona meðaltali jafna [1] og [3]

$$D_3 \approx 1,64 n_s^{-2/3} (n_s + 491)^{1/2} Q^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m} \quad [4].$$

Samanburður jafnanna er:

$$D_3/D_{3WP} = 4,0196 n_s^{1/3} (n_s + 491)^{-1/2}$$

$$D_3/D_{3US} = 0,250765 n_s^{-1/3} (n_s + 491)^{1/2}$$

$$D_{3WP}/D_{3US} = 0,062385 n_s^{-2/3} (n_s + 491)$$

sbr. eftirfarandi skrá:

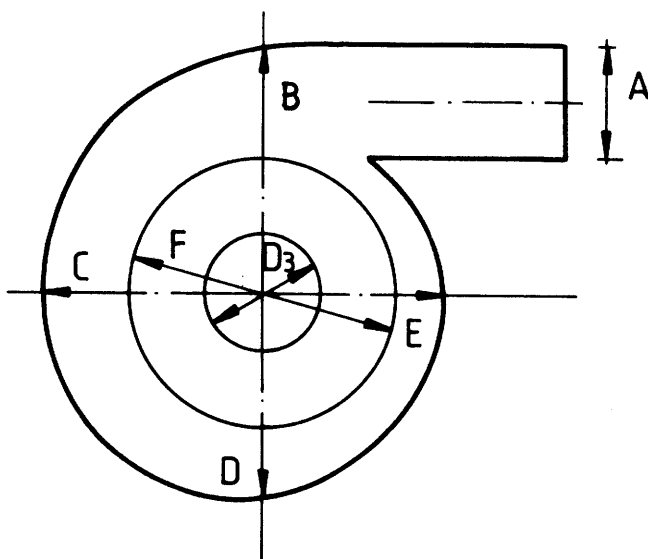
$n_s$	$D_3/D_{3WP}$	$D_3/D_{3US}$	$D_{3WP}/D_{3US}$
250	0,930	1,084	1,165
300	0,957	1,054	1,101
400	0,992	1,016	1,024
500	1,013	0,995	0,981
600	1,026	0,982	0,957
700	1,034	0,975	0,942
800	1,039	0,971	0,935
900	1,041	0,969	0,931

Allgott samræmi er milli jafna [1] og [3] þegar  $n_s > 300$ , en óhætt virðist mega reikna með jöfnu [4] á öllu gildissviði eðlishraða kaplanhverfla.

### Höfuðstærðir snigils

Gert er ráð fyrir stálsniglum, þegar eðlishraði er  $n_s < 600$  (hönnunarfalshæð  $H > 15$  m).

Höfuðstærðir stálsnigla ákvarðast af eftirfarandi jöfnum, sbr. skýringarmynd þar sem F er ytra þvermál staghrings.



$$\begin{aligned}
 A &\approx 0,656 n_S^{-7/15} (n_S+491)^{1/2} Q^{0,5} H^{-0,25} & m & [5] \\
 B &\approx 145,27 (n_S-107,22) n_S^{-5/3} Q^{0,5} H^{-0,25} & m & [6] \\
 C &\approx 126,21 (n_S-103,87) n_S^{-5/3} Q^{0,5} H^{-0,25} & m & [7] \\
 D &\approx 107,15 (n_S-99,32) n_S^{-5/3} Q^{0,5} H^{-0,25} & m & [8] \\
 E &\approx 88,08 (n_S-92,80) n_S^{-5/3} Q^{0,5} H^{-0,25} & m & [9] \\
 F &\approx 2,44 n_S^{-5/3} (n_S+154)^{3/2} Q^{0,5} H^{-0,25} & m & [10]
 \end{aligned}$$

Hér hefur að mestu verið stuðzt við heimild (1), sbr. eftirfarandi samanburð.

Hlutfall	Samkv. jöfnum [5]-[10], a	Samkv. WP (1), b
A/D <sub>3</sub>	$0,4 n_S^{1/5}$	$0,4 n_S^{1/5}$
B/D <sub>3</sub>	$88,57927 (n_S-107,22) n_S^{-1} (n_S+491)^{-1/2}$	-
C/D <sub>3</sub>	$76,95732 (n_S-103,87) n_S^{-1} (n_S+491)^{-1/2}$	$1,59 + 5,74 \cdot 10^{-4} n_S$
D/D <sub>3</sub>	$65,33537 (n_S-99,32) n_S^{-1} (n_S+491)^{-1/2}$	$1,46 + 3,24 \cdot 10^{-4} n_S$
E/D <sub>3</sub>	$53,70732 (n_S-92,80) n_S^{-1} (n_S+491)^{-1/2}$	$1,21 + 2,71 \cdot 10^{-4} n_S$
F/D <sub>3</sub>	$1,4878 (n_S+154)^{3/2} n_S^{-1} (n_S+491)^{-1/2}$	$1,45 + 72,17 n_S^{-1}$

$n_S$	A/D <sub>3</sub> a/b	B/D <sub>3</sub> a/b	C/D <sub>3</sub> a/b	D/D <sub>3</sub> a/b	E/D <sub>3</sub> a/b	F/D <sub>3</sub> a/b
250	1,000	-	0,953	0,939	0,971	1,021
300	1,000	-	1,015	0,998	1,021	1,009
350	1,000	-	1,042	1,026	1,043	1,001
400	1,000	-	1,049	1,035	1,048	0,997
450	1,000	-	1,044	1,034	1,043	0,993
500	1,000	-	1,032	1,025	1,033	0,992
550	1,000	-	1,015	1,013	1,018	0,990
600	1,000	-	0,996	0,998	1,001	0,990

### Aðrar stærðir

Að því er varðar aðrar stærðir, þar með taldar stærðir steinsteyptra snigla, vísast til heimilda þar að lútandi, einkum (1).

### Þyngd kaplanhverfla

Í grein í tímaritinu Water Power (3) er tilgreind jafna fyrir heildarþyngd kaplanhverfla.

$$G_{WP} \approx 12,3D_3^{3,3407}Q^{-0,7338}H^{0,6292}p^{0,0640} \text{ Mg} \quad [11].$$

Með jöfnunni fæst áætluð þyngd hvers hverfils, þar sem  $D_3$  er þvermál útrennsliups í m,  $Q$  hönnunarrennsli í  $m^3/s$ ,  $H$  hönnunarfalhæð í m og  $p$  fjöldi jafnstórra hverfla í orkuveri.

Jafnan byggist á upplýsingum um 29 mismunandi hverfla að afli frá um það bil 10 MW til 160 MW og var fjöldi hverfla í orkuveri frá einum til fjórtán.

Með  $D_3$  samkvæmt jöfnu [4] fæst

$$G \approx 64,2n_s^{-2,2271}(n_s+491)^{1,6704}Q^{0,9366}H^{-0,2060}p^{0,0640} \text{ Mg} \quad [12].$$

Á gildissviði eðlishraða kaplanhverfla  $250 < n_s < 900$  fæst með  $p=1$ ,

$$G \approx (3,0 \text{ til } 18,2)Q^{0,9366}H^{-0,2060} \text{ Mg}$$

Til samanburðar er jafna Mosonyi (4) fyrir stóra kaplanhverfla (bls. 847),

$$G_{MO} \approx (11,1 \text{ til } 18,5)Q^{0,8}H^{-0,2} \text{ Mg}$$

Jöfnur þessar þarf að sannprófa með tilliti til gildissviðs þeirra.

**Heimildir**

- (1) **Modern trends in selecting and designing Kaplan turbines**  
by F. de Siervo and F. de Leva  
Water Power & Dam Construction  
December 1977 p. 51-56,  
January 1978 p. 52-58.
- (2) **SELECTING HYDRAULIC REACTION TURBINES**  
United States Department of the Interior  
Bureau of Reclamation  
Engineering Monograph no. 30  
Washington 1976
- (3) **Cost analysis of hydraulic turbines**  
by L.H. Sheldon  
Water Power & Dam Construction  
June 1981, p. 24-28.
- (4) **Wasserkraftwerke I. Niederdruckanlagen**  
von Prof. Dr. E. Mosonyi  
Düsseldorf 1966

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Fylgiskjal 21

Stærð og þyngd peltonhverfla



## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Stærð og þyngd peltonhverfla

Hér á eftir fara hugleiðingar um hvernig ákvarða megi venjulega stærð peltonhverfla við frumáætlanagerð. Er þá stuðzt við nýlegar heimildir þar að lútandi, sbr. heimildaskrá.

### Þvermál hverfilhjóls og stúta

Samkvæmt grein í tímaritinu Water Power (1) má ákvarða þvermál hverfilhjóls af jöfnunni

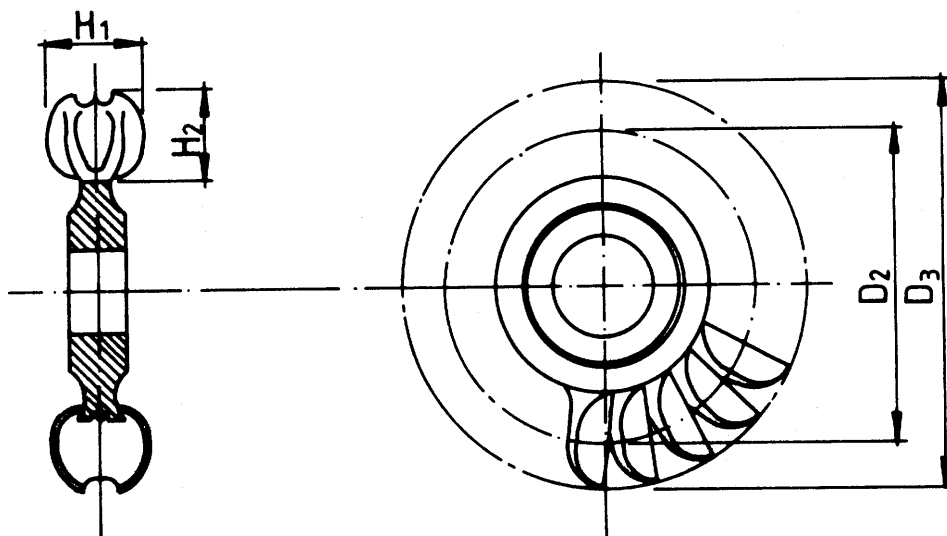
$$D_2 \approx 0,9896(139,61 n_{sj}^{-1} - 1)(Q/i)^{0,5} H^{-0,25} \quad \text{m} \quad [1],$$

þar sem  $Q$  er hönnunarrennsli í  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $H$  hönnunarfallhæð í m,  $i$  fjöldi stúta og eðlishraði  $n_{sj}$  er skilgreindur með jöfnunni

$$n_{sj} = n_s i^{-0,5} \quad [2],$$

$$n_s = 3nQ^{0,5} H^{-0,75} \quad [3],$$

þar sem  $n$  er fjöldi snúninga á mínútu.



Til samanburðar er jafna A.A. Bereshnoi (2)

$$D_{2MO} = 38H^{0,5}n^{-1} \approx 114 n_s^{-1}Q^{0,5}H^{-0,25} \quad m$$

eða

$$D_{2MO} = 114 n_{sj}^{-1} (Q/i)^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [4].$$

Hlutfallið

$$D_2/D_{2MO} = 8,68 \cdot 10^{-3} (139,61 - n_{sj})$$

er fyrir öll venjuleg gildi á  $n_{sj}$  ekki fjarri einum, sbr. eftirfarandi skrá.

$n_{sj}$	13	15	17	19	21	23	25	27
$D_2/D_{2MO}$	1,099	1,082	1,064	1,047	1,030	1,012	0,995	0,978

Samkvæmt heimild (1) ákvarðast þvermál vatnsgeisla af jöfnunni

$$D_j/D_2 \approx n_{sj} (250,74 - 1,796 n_{sj})^{-1}$$

p.e.

$$D_j \approx 0,551 (Q/i)^{0,5} H^{-0,25} \quad m \quad [5].$$

Nánast sama þvermál fæst með jöfnu (7/107) í heimild (2).

Ytra þvermál hverfilhjóls fæst samkvæmt heimild (1) af hlutfallinu

$$D_3/D_2 = 1,028 + 0,0137 n_{sj} \quad [6]$$

og stærðirnar  $H_1$  og  $H_2$  af jöfnunum

$$H_1 = 3,20D_j^{0,96} \quad m \quad [7]$$

$$H_2 = 3,23D_j^{1,02} \quad m \quad [8].$$

Að því er varðar aðrar stærðir vísast til heimildar (1).

### Þyngd peltonhverfla

I heimild (2) er tilgreind jafna kennd við A. Schoklisch fyrir heildarþyngd peltonhverfla. Með tilliti til þess, sem höfundur (E. Mosonyi) tilgreinir sem hlutfallslegar leiðréttingar eftir stærð hverfils, mætti umrita jöfnuna þannig

$$G \approx 55i^{0,35} (Q H)^{0,125} \left[ (1+19,05n_s^{-1}) Q^{0,5} H^{-0,25} \right]^{1,85} \text{ Mg [9]},$$

þar sem  $Q$  er hönnunarrennsli í  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $H$  hönnunarfalhæð í m,  $i$  fjöldi stúta og  $n_s = n_{sj} i^{0,5}$  eðlishraði.

Engar upplýsingar eru fyrir hendi til að sannprófa gildi þessarar jöfnu.

**Heimildir**

- (1) **Modern trends in selecting and designing Pelton turbines.**  
by F. de Siervo and A. Lugaresi  
Water Power & Dam Construction  
December 1978 p. 40-48.
  
- (2) **Wasserkraftwerke II. Hochdruckanlagen**  
von Prof. Dr. E. Mosonyi  
Düsseldorf 1966

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**Fylgiskjal 22**

**Stofnkostnaður stöðvarhúsa  
ásamt vélum og búnaði**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Stofnkostnaður stöðvarhúsa ásamt vélum og búnaði

Í virkjanalíkaninu er tilgreind jafna fyrir verktakakostnað við stöðvarhús ásamt vél- og rafbúnaði (jafna 4.8 bls. 28),

$$K_{SV} \approx 95 N^{0,75} H^{-0,25} \quad \text{Mkr} \quad [1],$$

þar sem N er uppsett afl alls í MW og H hönnunarfallhæð í m.

Miðað er við verðlag í desember 1983 og ófyrirséður kostnaður er meðtalinn.

Í grein í septemberhefti tímaritsins Water Power 1981 (1) er tilsvarendi kostnaður metinn af jöfnunni

$$K_{SVWP} \approx a N^{0,92} H^{-0,32} N^{0,058} \quad \text{USD} \quad [2].$$

Stuðull a er tilgreindur  $2,1 \cdot 10^6$  miðað við USD á verðlagi ársins 1978 og allan kostnað annan en fjármagnskostnað.

Jafna [1] er talin gilda á sviðinu  $30 < N < 500$  MW og  $30 < H < 650$  m, þegar hönnunarrennsli er jafnframt á bilinu  $10 < Q < 500$  m<sup>3</sup>/s, en jafna [2] gildir hins vegar á sviðinu  $5 < N < 1000$  MW og  $10 < H < 300$  m.

Í eftirfarandi skrá eru jöfnur [1] og [2] bornar saman með  $a=96,7$ , þar sem skráð er hlutfallið

$$K_{SV}/K_{SVWP} = 0,98242 N^{-0,17} H^{0,32} N^{0,058}^{-0,25}$$

Eins og fram kemur er hlutfallslegt frávik að jafnaði innan við rúmlega 11 af hundraði en mesta frávik á sameiginlegu gildissviði um það bil tvöfalt meira eða 22 af hundraði. Í skránni eru tölur í svigum utan gildissviðs jöfnu [2].

H	N							
	30	45	65	100	150	225	335	500
m								
30	0,886	0,854	0,829	0,795	-	-	-	-
45	0,938	0,907	0,881	0,851	0,825	-	-	-
70	0,998	0,967	0,944	0,917	0,893	0,870	-	-
110	1,063	1,036	1,014	0,989	0,967	0,947	0,929	-
175	1,134	1,111	1,091	1,069	1,051	1,034	1,018	1,005
270	1,205	1,185	1,168	1,150	1,135	1,121	1,110	1,100
420	-	(1,266)	(1,252)	(1,239)	(1,228)	(1,219)	(1,211)	(1,206)
650	-	-	(1,341)	(1,333)	(1,327)	(1,323)	(1,321)	(1,321)

Jafna [2] er byggð á fyrri athugunum höfundar á smávirkjunum allt að 5 MW (2) og upplýsingum United States Department of Energy um virkjanir frá 25 til 1000 MW (3). Jafna [1] er hins vegar nálgun með hliðsjón af áætlunum um virkjanir á Islandi undanfarin ár.

Mismunur á jöfnum [1] og [2] er á sameiginlegu gildissviði varla meiri en vænta má samkvæmt eðli máls, en í höfuðdráttum kemur hann þannig fram, að umræddur kostnaður lækkar mun meira með aukinni fallhæð samkvæmt jöfnu [2] en samkvæmt jöfnu [1].

Ekki verða dregnar neinar ályktanir af samanburði þessara jafna aðrar en þær, að slíkar jöfnur ber að nota með varúð, og sérstaklega skal gæta þess að fara ekki út fyrir tilgreind gildissvið.

Hugsanlega mætti sameina jöfnur [1] og [2] á samanlögðu gildissviði þeirra með jöfnunni,

$$K_{SV}^* \approx K_{SV}^{(\ln H)/8,79} \cdot K_{SVWP}^{1-(\ln H)/8,79} \quad \text{Mkr} \quad [3].$$

Niðurstöður samkvæmt jöfnu [3] eru sýndar sem strikalinna á meðfylgjandi línuriti.

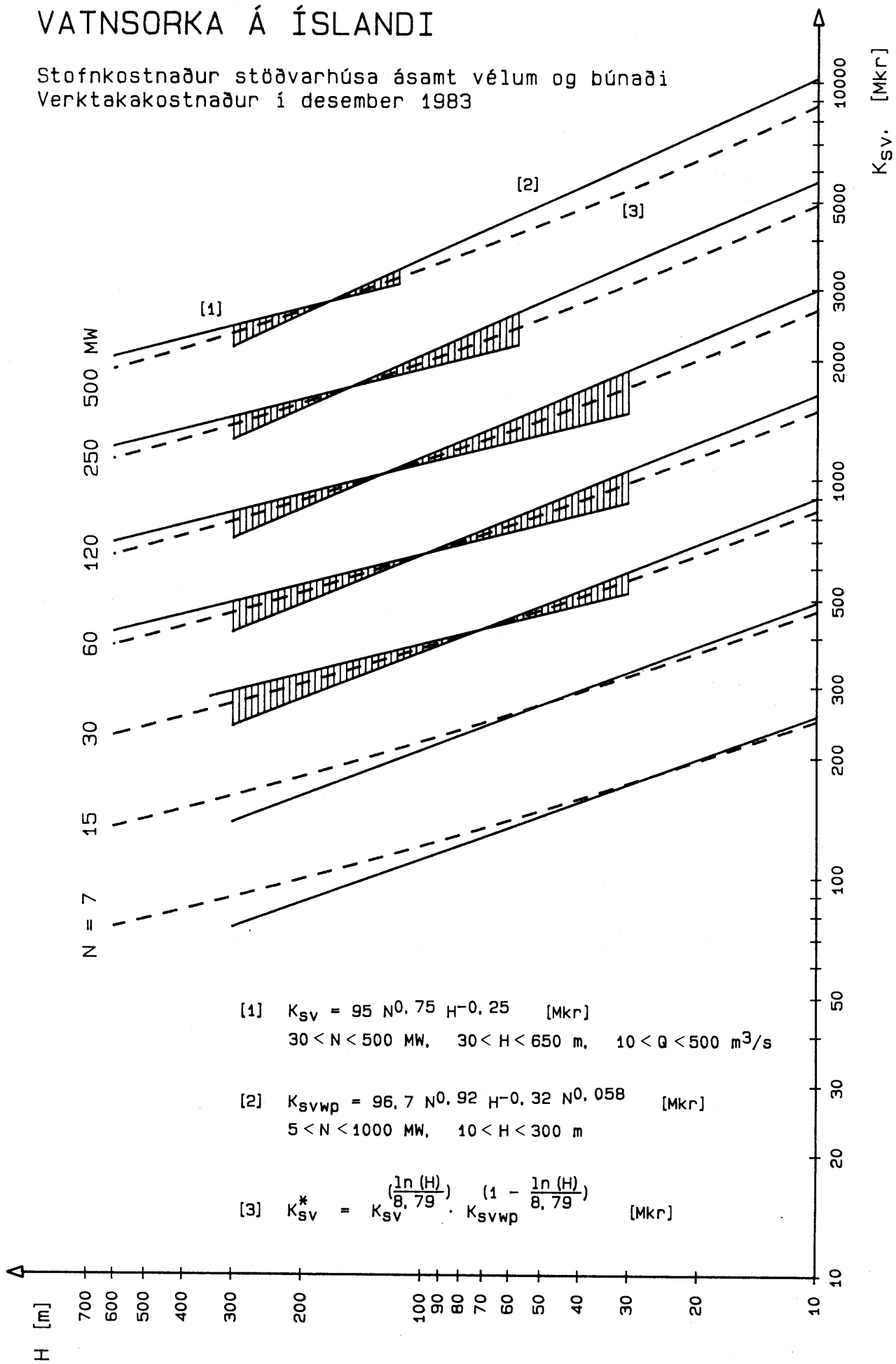
Í stað jöfnu [3] má með góðri nálgun reikna með

$$K_{SV} \approx 85,51 N^{0,8754} H^{-0,0245} \cdot H^{-0,252} \quad \text{Mkr} \quad [4]$$

á sviðinu  $7 < N < 700$  MW og  $15 < H < 450$  m.

# VATNSORKA Á ÍSLANDI

Stofnkostnaður stöðvarhúsa ásamt vélum og búnaði  
Verktakakostnaður í desember 1983





**Heimildir**

- (1) **Estimating hydro station costs**  
by J.L. Gordon  
Water Power & Dam Construction  
September 1981, p. 31-33.
- (2) **Quick estimating techniques for  
small hydro potential**  
by J.L. Gordon and A.C. Penman  
Water Power & Dam Construction  
September 1979, p. 46-51.
- (3) **Hydroelectric Power Evaluation**  
United States Department of Energy  
Report No DPE/FERC-0031, August 1979.

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**Fylgiskjal 23**

**Nýtni francishverfla**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Nýtni francishverfla

Í marzhefti tímaritsins "Water Power" 1959 er grein eftir Dino Zanobetti um einkenni francishverfla (1). Í bók sinni HYDRO POWER (2) byggir Joachim Raabe á niðurstöðum Zanobetti að því er varðar nýtni francishverfla sem fall af eðlishraða og er markmiðið að draga ályktanir um val á hverfilgerð, einkum þar sem til álita kemur að velja milli francis- og kaplanhverfla.

Samkvæmt heimild (2) má gera ráð fyrir að hámarksnýtni stórra francishverfla sé nú um það bil  $\eta_{\max} \approx 0,950$ , nýtni sömu hverfla við fullt álag  $\eta_{1,0} \approx 0,935$  og við hálf álag  $\eta_{0,5} \approx 0,895$ . Samkvæmt (1) næst slík nýtni þegar eðlishraði er um það bil á bilinu  $130 < n_s < 170$ . Eðlishraði miðast þá við afleininguna kW.

Samkvæmt framangreindum heimildum má setja fram eftirfarandi jöfnur fyrir jafnaðarlega nýtni sem fall af eðlishraða, en dreifing um jafnaðargildin er að sjálfsögðu talsverð.

Hámarksnýtni:

$$\eta_{\max} \approx 1 - 9,885 \cdot 10^{-3} n_s^{0,3} - 927,57 n_s^{-2,4} \quad [1].$$

Nýtni við fullt álag:

$$\eta_{1,0} \approx 1 - 4,3725 \cdot 10^{-7} n_s^{2,135} - 4,254 n_s^{0,905} \quad [2].$$

Nýtni við hálf álag:

$$\eta_{0,5} \approx 1 - 2,2478 \cdot 10^{-6} n_s^{1,901} - 3,8668 n_s^{-0,789} \quad [3].$$

Jöfnur þessar taka framangreind hágildi, þegar  $n_s = 150$ , sbr. línurit 1.

Samkvæmt (1) er álag við hámarksnýtni,  $\eta_{\max}$ , háð hönnunarfalshæð. Dreifing er hins vegar mikil, sbr. mynd 3 í nefndri grein.

Hér verður gert ráð fyrir eftirfarandi jöfnu,

$$k \eta_{\max} \approx \left[ 1,26 - 10^{-5} n_s^{1,6} \right]^{-1} \quad [4],$$

þar sem  $k \eta_{\max}$  er hlutfallslegt álag við hámarksnýtni.

Með jöfnum [1] til [4] má ákvarða "venjulega" nýtniferla francishverfla þegar  $n_s < 300$  á forminu,

$$\eta(k) = ak + bk^2 + ck^3 + dk^4 \quad [5],$$

þar sem k er álag í hlutfalli af nafnálagi (fullu álagi),  $0 < k \leq 1,1$ .

Nokkrir slíkir ferlar eru dregnir á línuriti 2, en reiknaðir stuðlar í jöfnu [5] eru þessir:

$n_s$	50	70	100	150	200	280
a	3,107455	3,438703	3,779968	3,987778	4,010332	4,307629
b	-3,816263	-4,812684	-5,828320	-6,483640	-6,740602	-8,758117
c	1,936007	3,180047	4,236409	4,921490	5,422881	8,880614
d	-0,352428	-0,900856	-1,262087	-1,490628	-1,763559	-3,529428
$\eta_{\max}$	0,8904	0,9300	0,9459	0,9500	0,9488	0,9452
$\eta_{1,0}$	0,8748	0,9052	0,9260	0,9350	0,9291	0,9007
$\eta_{0,5}$	0,8196	0,8574	0,8836	0,8950	0,8877	0,8538
$k \eta_{\max}$	0,7970	0,7993	0,8038	0,8132	0,8251	0,8491
$\eta_m$	0,8804	0,9187	0,9365	0,9420	0,9389	0,9245

Neðst í skránni er skráð vegin meðalnýtni samkvæmt jöfnunni

$$\eta_m \approx 0,04 \eta_{0,5} + 0,15 \eta_{0,6} + 0,24 \eta_{0,7} + 0,30 \eta_{0,8} + 0,23 \eta_{0,9} + 0,04 \eta_{1,0}$$

sem talin er góð nálgun á raunverulegri meðalnýtni, þegar um er að ræða þrjár vélasamstæður og um það bil 5000 stunda nýtingu á ári (ársálagsstuðull 0,571).

Eins og fram hefur komið er nýtni stórra francishverfla bezt þegar eðlishraði er á bilinu 100 til 200. Við lágar fallhæðir (háan eðlishraði) er unnt að ná góðri hámarksnýtni, en nýtnin fellur ört til beggja hliða frá hámarki. Meðalnýtni fellur því verulega og mun betri árangur að þessu leyti næst þá með skrúfuhverflum með stillanlegum blöðum (kaplanhverflum). Við háar fallhæðir (lágan eðlishraði) liggur nýtniferillinn mun neðar en ella. Með eðlishraða  $n_s = 50$  verður hámarksnýtni t.d. einungis um það bil 0,89. Við slíkar aðstæður má líklega ná mun betri hámarksnýtni með peltonhverfli eða um það bil 0,91.

Fróðlegt er að bera saman uppgefna nýtni í tilboðum í hverfla Blönduvirkjunar við reiknaða "jafnaðarlega" nýtni slíkra hverfla. Hönnunarrennsli er  $Q=20,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , hönnunarfali  $H=279 \text{ m}$  og fjöldi snúninga á mínútu  $n=500$ . Eðlishraði reiknast  $n_s = 3nQ^{0,5}H^{-0,75} = 99,4867$ .

Samkvæmt tilboðum þriggja álitlegustu framleiðenda voru uppgefnar nýtnitölur:

Nýtni	Esser Wyss	Kværner Brug	Fuji Electric
$\eta_{1,0}$	0,939	0,931	0,936
$\eta_{0,9}$	0,945	0,935	0,941
$\eta_{0,8}$	0,944	0,935	0,938
$\eta_{0,6}$	0,920	0,913	0,917

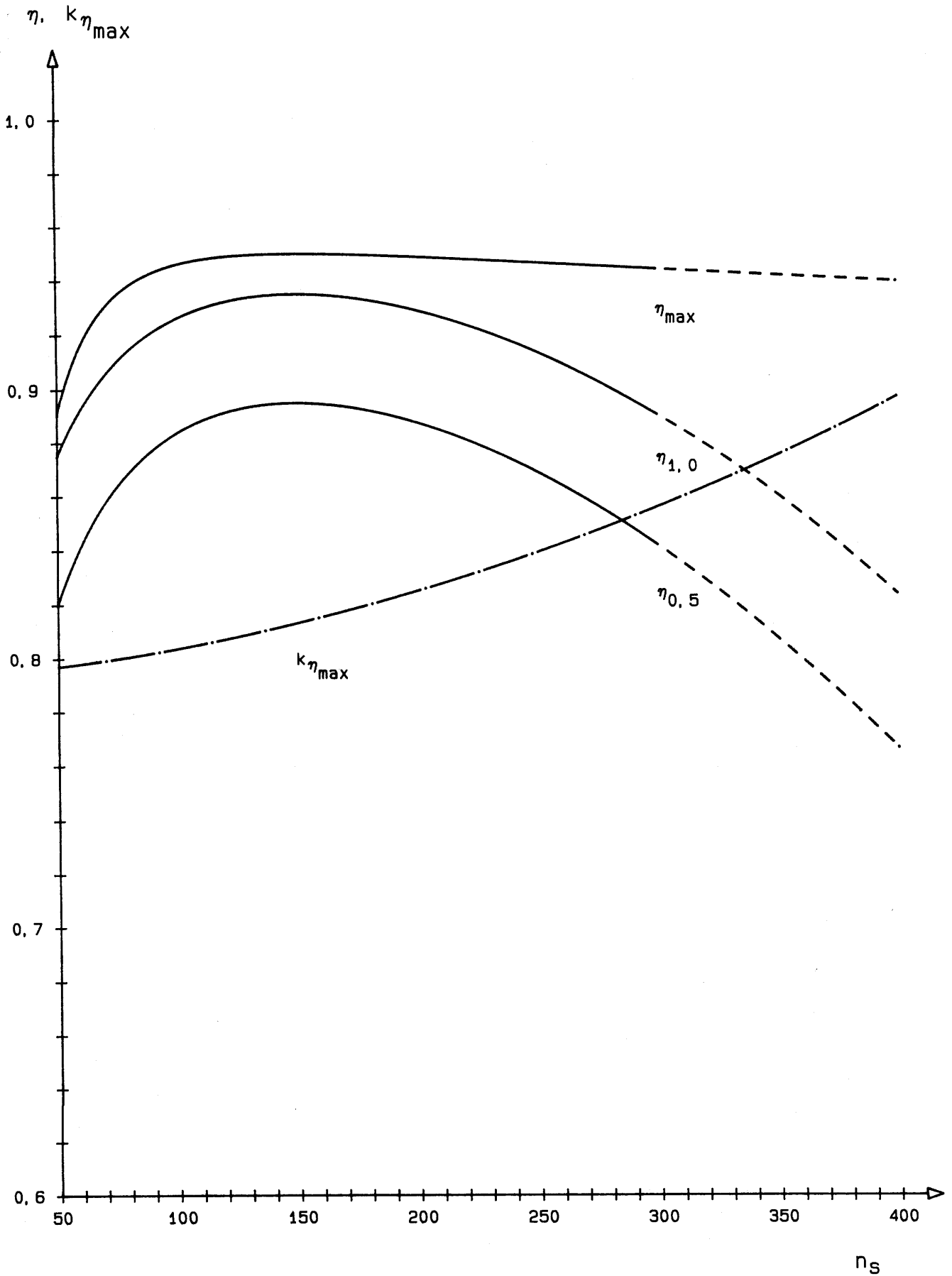
Nýtniferlarnir eru dregnir á línuriti 3, sbr. eftirfarandi skrá.

	Jafnaðarleg nýtni	Esser Wyss	Kværner Brug	Fuji Electric
a	3,775849	3,994000	3,816972	4,307389
b	-5,816015	-6,578611	-5,916759	-7,766759
c	4,224119	5,037500	4,167361	6,469444
d	-1,258200	-1,513889	-1,136574	-2,074074
$\eta_{\max}$	0,9458	0,9453	0,9356	0,9410
$\eta_{1,0}$	0,9258	0,9390	0,9310	0,9360
$\eta_{0,5}$	0,8833	0,8874	0,8792	0,8911
$k\eta_{\max}$	0,8037	0,8672	0,8483	0,9000
$\eta_m$	0,9363	0,9364	0,9279	0,9318

Góð meðalnýtni er einn af mikilvægustu þáttum við val á hverfilgerð, en aðra þætti svo sem mismunandi hverfilkostnað og mismunandi kostnað við stöðvarhús verður að taka með í myndina. Einnig ber að meta mismunandi viðhalds- og rekstrarkostnað við endanlegt val að þessu leyti.

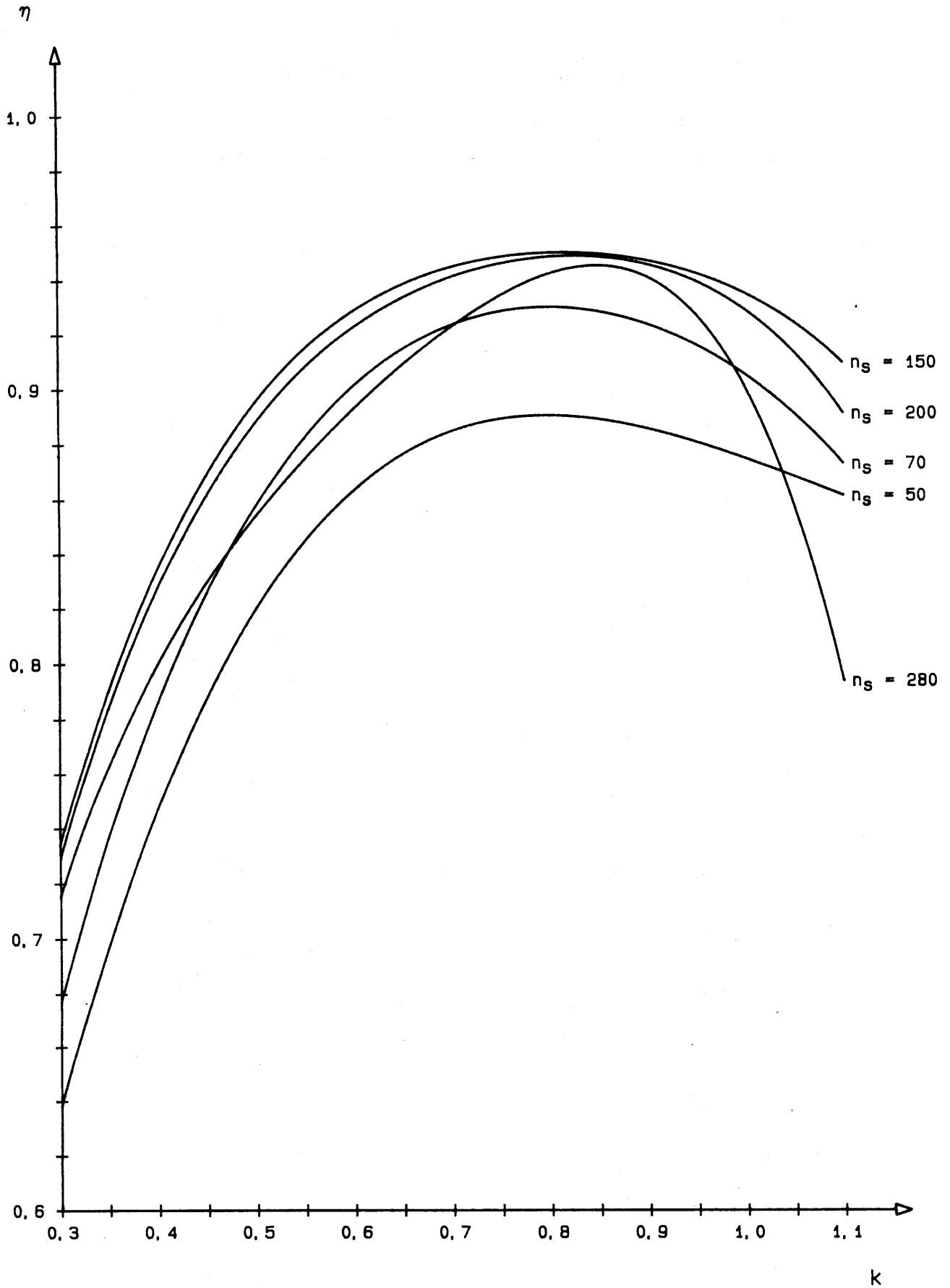
## VATNSORKA Á ÍSLANDI

Nýtni francishverfla sem fall af eðlishraða



# VATNSORKA Á ÍSLANDI

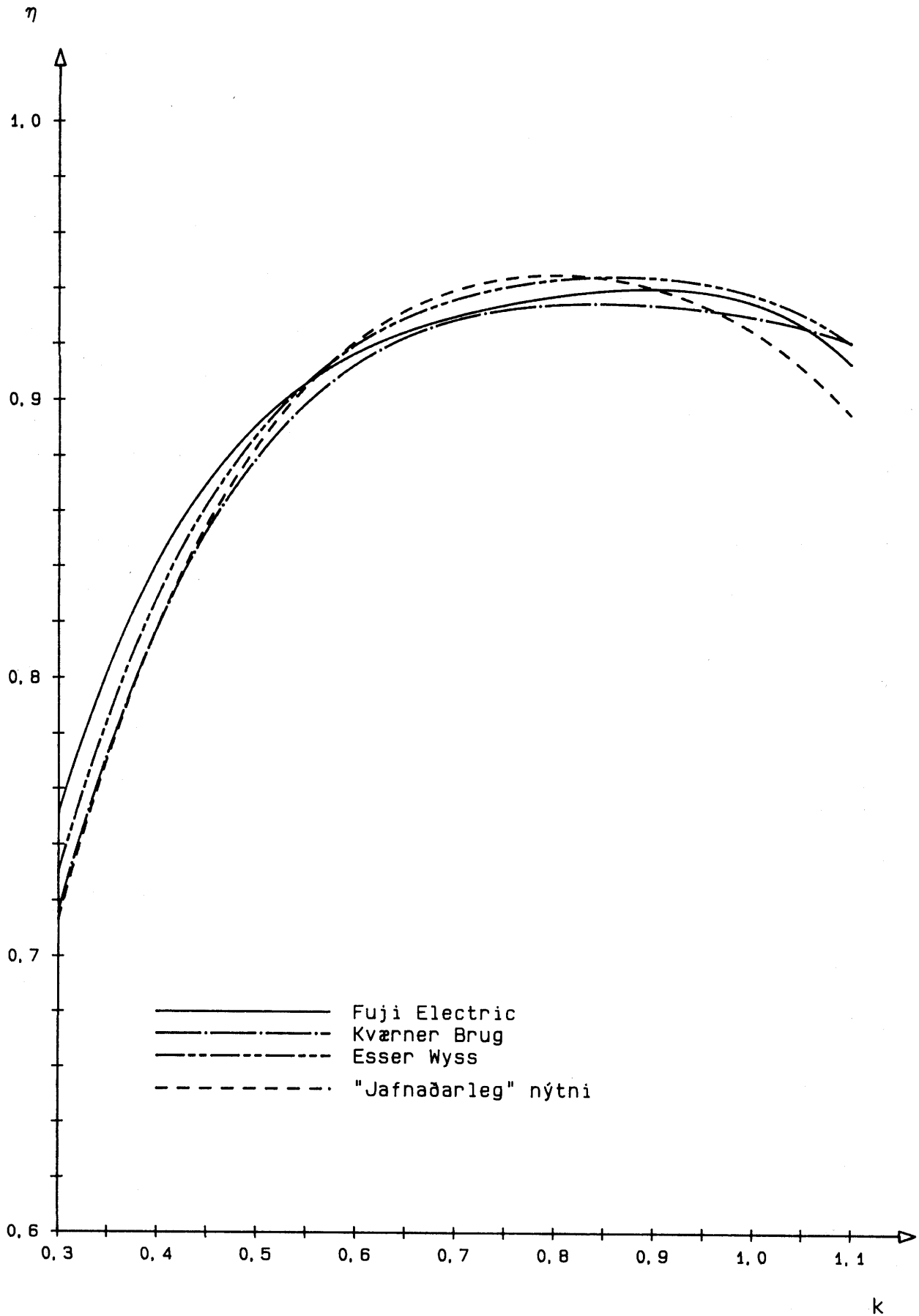
Nýtniferlar francishverfla



# VATNSORKA Á ÍSLANDI

Nýtniferlar Blönduhverfla

Línurit 3





**Heimildir**

- (1) **Characteristics of Francis Turbines**  
by Dino Zanobetti  
Water Power, March 1959  
p. 96-103.
  
- (2) **HYDRO POWER**  
by Joachim Raabe  
Düsseldorf 1985.

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 24**

**Orkuvinnsla í vatnsorkuverum 1920 til 1984**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Orkuvinnsla í vatnsorkuverum 1920 til 1984

Í tímariti Orkustofnunar frá apríl 1985 (ORKUMÁL 34-35) er skrá yfir afl og orkuvinnslu raforkuvera til almenningsparfa á Íslandi árin 1904 til 1984. Upplýsingar um orkuvinnslu vatnsorkuvera eru til frá árinu 1920, sbr. meðfylgjandi línurit.

Arunum 1920 til 1984 má skipta í fjögur tímabil. Fyrst er 18 ára tímabilið frá 1920 til 1937, þegar árleg aukning er mjög lítil eða að jafnaði innan við  $0,6 \text{ GWh/a}^2$ . Varanleg stökk verða í orkuvinnslunni árin 1954 og 1970, en tímasteiðinu frá 1938 til 1984 má skipta í þrjú tímabil með jafnaðarlegri línulegri aukningu innan hvers tímabils, 1938 til 1953  $11,8 \text{ GWh/a}^2$ , 1954 til 1969  $28,6 \text{ GWh/a}^2$  og 1970 til 1984  $159,2 \text{ GWh/a}^2$ . Af línuritinu má ráða að þrjár virkjanir, Ljósafoss, Írafoss og Búrfell, hafi markað tímamót í virkjanasögunni.

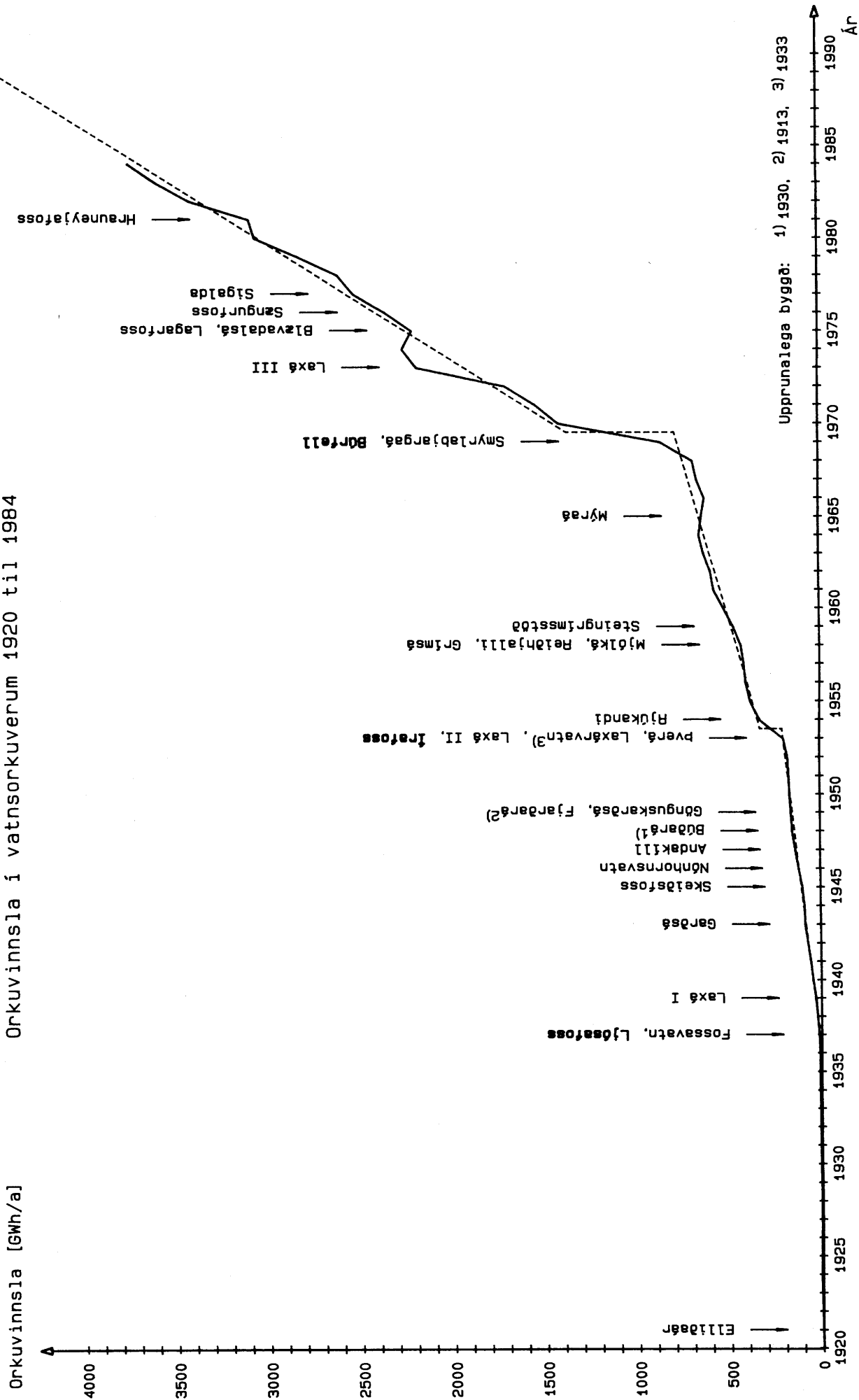
Á árinu 1975 var orkuvinnsla í vatnsorkuverum um það bil 2206 GWh. Orkumáttur virkjanakerfisins var þá talinn nálægt  $2330 \text{ GWh/a}$ , en eftir það má segja, að vatnsorkuverin hafi verið því sem næst fullnýtt allt fram til þess, að orkuvinnsla gat hafizt að marki í Hrauneyjafossvirkjun (1982).

Á árinu 1984 var orkuvinnslugeta vatnsorkukerfisins talin nema um það bil  $4000 \text{ GWh/a}$  en orkuvinnsla varð  $3738 \text{ GWh}$ . Í orkumætti er aukning vegna Kvíslaveitu þá ótalin, enda taldist hún lítil áður en fjórða áfanga veitunnar var lokið á árinu 1985.

Látið hefur verið að því liggja, að meginhluti vatnsorku á Íslandi,  $30 \text{ TWh/a}$ , yrði fullnýttur um eða fyrir miðja næstu öld. Í ljósi þróunar undanfarinna ára er slík spá eðlileg, en um hríð er talið að draga muni úr þörf á raforku, þannig að fresta megi framkvæmdum við Blönduvirkjun og Kvíslaveitu.

# VATNSORKA Á ÍSLANDI

Orkuvinnsla í vatnsorkuverum 1920 til 1984



**Yfirlit yfir orkuvinnslu raforkuvera til almenningsparfa á Íslandi árin 1920 til 1984.**

Samkvæmt ORKUMÁLUM 34-35, apríl 1985.

Ár	Vatns- orka  GWh/a	Varmaorka		Alls  GWh/a	Ár	Vatns- orka  GWh/a	Varmaorka		Alls  GWh/a
		Jarð- varmi GWh/a	Önnur GWh/a				Jarð- varmi GWh/a	Önnur GWh/a	
1920	0,5	-	0,2	0,7	1954	326,9	-	11,6	338,5
1921	1,2	-	0,2	1,4	1955	378,9	-	11,9	390,8
1922	3,7	-	0,3	4,0	1956	405,5	-	11,8	417,3
1923	5,9	-	0,3	6,2	1957	414,6	-	13,0	427,6
1924	7,5	-	0,4	7,9	1958	430,6	-	14,9	445,5
1925	7,6	-	0,4	8,0	1959	470,1	-	14,0	484,1
1926	7,1	-	0,5	7,6	1960	522,9	-	13,1	536,0
1927	6,3	-	0,6	6,9	1961	576,1	-	12,5	588,6
1928	6,2	-	0,7	6,9	1962	592,9	-	13,1	606,0
1929	6,3	-	0,8	7,1	1963	629,0	-	11,6	640,6
1930	7,5	-	0,9	8,4	1964	653,1	-	12,6	665,7
1931	7,4	-	1,1	8,5	1965	640,7	-	22,1	662,8
1932	7,8	-	1,1	8,9	1966	623,9	-	43,7	667,6
1933	9,1	-	1,2	10,3	1967	664,5	-	31,4	695,9
1934	9,9	-	1,3	11,2	1968	686,9	-	31,7	718,6
1935	10,8	-	1,3	12,1	1969	860,1	1,9	41,3	903,3
1936	11,4	-	1,8	13,2	1970	1412,9	12,1	35,4	1460,4
1937	14,3	-	1,7	16,0	1971	1539,6	12,1	40,2	1591,9
1938	22,4	-	1,6	24,0	1972	1702,6	21,7	43,5	1767,8
1939	30,0	-	1,6	31,6	1973	2181,0	24,2	80,2	2285,4
1940	45,0	-	1,6	46,6	1974	2258,2	7,7	76,6	2342,5
1941	57,0	-	1,6	58,6	1975	2205,6	18,4	71,5	2295,5
1942	72,0	-	1,7	73,7	1976	2349,5	19,0	52,9	2421,4
1943	86,0	-	2,1	88,1	1977	2519,7	16,1	66,1	2601,9
1944	89,0	-	2,6	91,6	1978	2605,0	18,3	50,5	2673,8
1945	99,0	-	2,9	101,9	1979	2819,1	45,6	54,4	2919,1
1946	118,0	-	3,3	121,3	1980	3053,2	44,7	44,7	3142,6
1947	136,0	-	4,8	140,8	1981	3084,5	123,1	50,3	3257,9
1948	153,0	-	10,0	163,0	1982	3407,1	159,0	8,6	3574,7
1949	160,0	-	20,1	180,1	1983	3587,9	171,7	6,4	3766,0
1950	167,0	-	26,4	193,4	1984	3737,9	173,2	3,1	3914,2
1951	170,0	-	39,6	209,6					
1952	175,5	-	39,4	214,9					
1953	197,5	-	31,7	229,2					

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Fylgiskjal 25

Áreiðanleiki kostnaðaráætlana

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Áreiðanleiki kostnaðaráætlana

Iðulega hefur verið látið að því liggja að verkfræðiráðgjafar hafi við áætlanagerð vanmetið stofnkostnað vatnsaflsvirkjana. Slíkar fullyrðingar hafa þó lítt verið rökstuddar, en reynist þær réttar, þarf að greina orsakir og jafnframt að meta, hvort framkomin frávik liggi innan eðlilegra óvissumarka.

Eina leiðin til að fá með einhverri vissu skorið úr um, hversu áreiðanlegar áætlanirnar hafa verið, er samanburður við bókfærðan ("raunverulegan") kostnað við virkjanir, sem hafa verið byggðar. Við slíkan samanburð þarf að gæta fyllsta samræmis, t.d. að borið sé saman á sama verðgrundvelli og að áætlunin nái til sömu kostnaðarpátta og bókfærður kostnaður.

Eftirfarandi er skrá yfir tfu heildaráætlanir um stofnkostnað Hrauneyjafossvirkjunar, sem gerðar voru á árunum 1975 til 1985, með sundurliðun í mismunandi kostnaðarpætti. Rétt er að geta þess, að kostnaðarpáttur f (sjá skrá) var ekki meðtalinn í áætlunum verkfræðiráðgjafa fyrr en á árinu 1984, en hér hefur honum verið bætt við áætlanir frá öðrum tímum til samræmis.

Áætlanirnar eru allar framreiknaðar til verðlags í desember 1984 í hlutfalli við tilgreinda vísitölu virkjunarkostnaðar (VV). Á árunum 1975 til 1981 var ekki gerður greinarmunur á vísitölu virkjunarkostnaðar og opinberri vísitölu byggingarkostnaðar (VB), en á árunum 1982 og 1983 varð veruleg misvísun hér á. Vísitala virkjunarkostnaðar byggist á meðalhækkun stofnkostnaðar nokkurra starfræktra og fyrirhugaðra virkjana samkvæmt samræmdum áætlunum á árabílinu 1980 til 1984.

Samkvæmt skránni hefur verktakakostnaður (c), þ.e. áætlaður verkkostnaður (a) að viðbættum ófyrirséðum kostnaði (b), að jafnaði verið áætlaður nálægt 3420 Mkr á verðlagi í desember 1984 með staðalfrávikum nálægt 4 af hundraði og heildarkostnaður (k), þ.e. verktakakostnaður að viðbættum öllum verkkaupakostnaði, nálægt 4680 Mkr með sama staðalfrávikum. Beinn kostnaður (g), þ.e. heildarkostnaður að frádregnum fjármagnskostnaði (h), hefur verið áætlaður nálægt 4100 Mkr.

Áætlun framreiknuð til verðlags í desember 1984 Mkr

Kostnaðar- þættir	Ath. Dags.	1)	1)	1)	1)	1)	2)	3)	3)	3)	3)
		maí75	maí76	jan77	jan78	sep79	sep79	des80	des82	des83	des84
	VB	90	109	129	181	355	355	626	1482	2298	2745
	WV	90	109	129	181	355	355	626	1665	2659	3179
		4)	4)	4)	4)						
	USD/ISK	1,544	1,829	1,905	2,247	3,801	3,801	5,959	16,46	28,65	40,20
Áætl. verkk.	a	2923	3037	2959	2811	3161	3067	3344	3289	3195	3250
Ófs. kostn.	b	380	395	385	365	411	399	255	251	148	171
VERKTAKAK.	c	3303	3432	3344	3176	3572	3466	3599	3540	3343	3421
Hönn-, umsjk.	d	438	456	444	422	474	460	478	470	444	445
Undirbúningsk.	e	88	91	89	84	95	92	96	94	89	82
Vatnsr. o.fl.	f	131	136	133	126	141	138	142	141	133	140
BEINN KOSTIN.	g	3960	4115	4010	3808	4282	4156	4315	4245	4009	4088
Fjármagnsk.	h	555	577	562	534	601	583	605	595	562	599
HEILDARKOSTIN.	k	4515	4692	4572	4342	4883	4739	4920	4840	4571	4687
Áætlun í MUSD á verðlagi og gengi hvers tíma											
VERKTAKAKOSTINÆÐUR		61	64	71	80	105	102	119	113	98	85
BEINN KOSTINÆÐUR		73	78	85	96	126	122	143	135	117	102
HEILDARKOSTINÆÐUR		83	88	97	110	143	139	163	154	133	117

- 1) Byggt á áætluðu magni og einingarverði
- 2) Að verulegu leyti byggt á samningsbundnum greiðslum
- 3) Byggt á raunverulegu magni en áætluðu einingarverði
- 4) Nálgunargildi



Af framangreindum samanburði má ráða, að áætlanir hafi ætíð verið sjálfum sér samkvæmar með tilliti til verðbreytinga og að breytingar á verkinu á byggingartíma hefðu ekki átt að leiða til ófyrirsjáanlegra kostnaðarbreytinga. Spurningunni um hugsanlegt vanmat á "raunkostnaði" er hins vegar ósvarað enn.

Neðst í skránni er tilgreindur áætlaður kostnaður við Hrauneyjafossvirkjun í milljónum bandaríkjadala (MUSD) miðað við verðlag og gengi á hverjum tíma. Á árunum 1975 til 1980 fer þannig áætlaður kostnaður stighækkandi, sem í grófum dráttum má reikna til samræmis við verðbólgu í Bandaríkjunum. Eftir það fer áætlaður kostnaður hrífslækkandi í USD þrátt fyrir verulega hækkun á virkjunarkostnaði hérlendis umfram almenna verðbólgu. Ástæðurnar eru í sjálfu sér augljósar vegna gengisfalls íslenzkrar krónu umfram verðbólgu og þá sérstaklega miðað við bandaríkjadal.

Markmið kostnaðaráætlana er að geta boðið orku á fyrirfram umsömdu verði og þá að sjálfsögðu með skynsamlegri tryggingu fyrir hagnaði. Síðast nefndur samanburður vekur óneitanlega spurningar um gildi áætlana sem slíkra á tímum sviptinga í fjármálaheiminum.

Ef litið er á áætlaðan stofnkostnað í USD sést, að orkukostnaður hefði reiknast um 28% lægri í desember 1984 en á sama árstíma 1980 og einungis lítið eitt meiri en á árinu 1978, þegar virkjunarframkvæmdir voru boðnar út. Nú er enginn vafi á því, að virkjunarkostnaður hérlendis hefur lækkað miðað við bandaríkjadal á árunum 1982 til 1984. Á árinu 1984 er virkjunarkostnaður t.d. talinn hafa hækkað um nálægt 20 af hundraði í ISK, sem jafngildir um 15% lækkun í USD miðað við gengisbreytingu á sama tíma, en er þessi lækkun raunhæf til ákvörðunar á söluverði orku í USD?

Virkjanir hérlendis hafa að mestu leyti verið byggðar fyrir erlent lánsfé. Því er ljóst, að rekstrarkostnaður virkjana að því er varðar vexti og afborganir af lánum hefur undanfarið hækkað verulega umfram almennar verðbreytingar hér á landi. Á árinu 1984 hefði orkuverð því orðið að hækka langt umfram hækkun á vísitölu virkjunarkostnaðar til þess að endar næðu saman svo að dæmi sé tekið.

Ástand þetta hefur m.a. leitt til þess, að Landsvirkjun hækkaði bókfærðan virkjunarkostnað um nálægt 30 af hundraði á árinu 1984, þegar hækkun um 20% hefði annars talizt eðlileg.

Fjármagnskostnaður er í áætlunum verkfræðiráðgjafa skilgreindur sem mismunur á "bókfærðum" heildarkostnaði og beinum útlögðum kostnaði á föstu verðlagi (VV). Reiknast hann nálægt 14,6% beins kostnaðar miðað við dæmigert fjárstreymi á byggingartíma og 6% vexti. Af framansögðu má hins vegar ráða að þessi

kostnaðarpáttur er nú að miklum mun hærri í bókum Landsvirkjunar.

Þetta er eitt af mörgu, sem torveldað hefur samanburð áætlana við bókfærðan kostnað, þannig að ógerlegt hefur verið að fá viðhlítandi svör við spurningunni um hugsanlegt vanmat verkfræðiráðgjafa á stofnkostnaði vatnsaflsvirkjana, sem sett var fram í upphafi.

Ljóst er, að stofnkostnaður mannvirkja verður ekki ákveðinn á einhlítan hátt. Áætlanir um stofnkostnað verða því aldrei annað en mat á líklegasta kostnaði, sem oftast er bundið talsverðri óvissu.

Óvissupáttum má skipa í tvo höfuðflokka. Annars vegar eru þeir, sem ytri aðstæður valda, og hins vegar þeir, sem rekja má til áætlanagerðar verktaka og stjórnar á vinnustað.

Helztu orsakir óvissu, sem rekja má til ytri aðstæðna, eru:

- 1) Hversu ítarlegar rannsóknir liggja til grundvallar framkvæmdum? Rannsóknir á fyrirhuguðum athafnasvæðum eru oft skornar við nögl, og a.m.k. fyrr á árum var takmarkaður skilningur á gildi slíkra rannsókna.
- 2) Er vitað, að hve miklu leyti þarf að framkvæma verkið að vetrarlagi? Er áætlaður framkvæmdatími nægilega rúmur, og miðast upphaf verksins við hagstæða dreifingu framkvæmda á árstíðir?
- 3) Með hve mikilli vissu er hægt að spá fyrir um ástand vinnumarkaðar á verktíma, og hverjar eru líkur á, að nægilegur mannaflí og vinnuvélakostur fáist til verksins?
- 4) Hvernig verður veðráttu háttað?
- 5) Hvernig verður greiðslum fyrir verkið háttað?
- 6) Hverjar verða breytingar á verðlagi og að hve miklu leyti verða þær bætтар? Hér er bæði um að ræða breytingar á efnis- og launakostnaði og e.t.v. ekki sízt breytingar á samningsbundnum hlunnindum starfsmanna.
- 7) Hverjar verða hugsanlegar breytingar á skattlagningu og öðrum opinberum gjöldum?
- 8) Hversu góð verða samskipti við verkkaupa og fulltrúa hans á vinnustað?

Helztu óvissupáttir, sem að mestu leyti lúta að áætlanagerð verktaka og stjórn á vinnustað, eru þessir:

- 9) Hvert er hlutfall milli raunstunda og skráðra stunda á vinnustað, eða með öðrum orðum hverjar verða raunverulegar vinnustundir, þegar frá eru taldar tafir vegna matarhléa, flutninga starfsmanna innan vinnustaðar o.fl.?
- 10) Hver verða afköst við mismunandi verkþætti, þ.e. hvað þarf t.d. margar raunstundir til að slá upp einum fermetra af mótum o.s.frv.?
- 11) Hver er áherzla viðkomandi verktaka á að ná samningum um tiltekið verk, þ.e. hversu miklu vill hann fórna af ágóðahlut eða eðlilegum afskriftum af vinnuvélum til að koma í veg fyrir verkefnaleysi?
- 12) Hvert er viðhorf verktaka til þess, sem mætti nefna viðunandi þóknun fyrir viðkomandi verk?

Óvissupáttur 12) þarfnast e.t.v. nánari skýringar, en óhætt mun t.d. að fullyrða, að mat verktaka á kostnaði við framkvæmdir fyrir opinbera aðila sé að öðru jöfnu hærra en mat á kostnaði við tilsvarendi verk, sem t.d. væri unnið fyrir bónda í sveit. Orsakir þess má e.t.v. að nokkru leyti rekja til tilhneingingar opinberra aðila til einhliða trygginga gagnvart verktökum og til að leita síðan réttar síns gegnum seinvirkt opinbert réttarkerfi.

Mat á afköstum, sbr. óvissupátt 10), hlýtur að byggjast á reynslu viðkomandi verktaka. Sú reynsla er að sjálfsögðu ekki óbrigðul, og ljóst er, að verktakar byggja hér á mjög mismunandi mati, þar sem það heyrir vart til undantekninga, að með tilliti til einstakra verkþátta sé mat eins hálfu minna en annars.

Með hliðsjón af framansögðu þarf ekki að koma á óvart, að veruleg dreifing er að jafnaði á tilboðum í einstakar framkvæmdir. Þessu til áréttingar fylgir hér með dreifing tilboða í þá átta áfanga Blönduvirkjunar, sem þegar hafa verið boðnir út, eins og þau lágu fyrir við opnun, sbr. meðfylgjandi yfirlit.

Samtals bærust 116 gild tilboð í umrædda verkþætti, þegar frá eru talin tilboð, sem bærust sem heildarboð í vélar, lokur, pípur og annan búnað því tilheyrandi. Að jafnaði hafa því fengizt 14 til 15 boð í hvern útboðsáfanga, fæst 7 í botnrás Blöndustíflu og flest 25 í hverfla og rafala.

Í yfirlitum eru tilboðin tilgreind í hundraðshlutum af meðalboði og gerð grein fyrir hlutfallslegri dreifingu þeirra.

Hlutfall milli hæsta og lægsta boðs er að jafnaði nálægt 2,2, þ.e. á bilinu  $2,0 < K_{\max}/K_{\min} < 2,4$ . Tilboð í þrjá útboðsáfangar skera sig þó hér úr. Tilboð í botnrás Blöndustíflu voru mjög jöfn og var hæsta boð einungis 13 af hundraði herra en lægsta boð. Tilboð í lokur dreifðust hins vegar mjög mikið,  $K_{\max}/K_{\min} = 2,8$ , og tilboð í pípu, stálfóðringu á göngum og greiningar að vatnshverflum þó enn meira,  $K_{\max}/K_{\min} = 3,5$ .

Í yfirlitum er áætlun verkfræðiráðgjafa skráð í hundraðshlutum af meðalboði. Í þeim tilvikum, sem hlutfall milli hæsta og lægsta tilboðs er á bilinu 2,0 til 2,4 fellur hún eðlilega að niðurstöðum tilboða, en lægstu boð eru hins vegar verulega undir áætluðum kostnaði eða 66,5 af hundraði áætlunar til jafnaðar (á bilinu 61,4 til 76,7%).

Tilboð í botnrás Blöndustíflu voru öll lægri en áætlun verkfræðiráðgjafa. Miðað við það mætti ætla, að áætlunin væri óeðlilega há. Hlutfallslegt frávik áætlunar frá meðalboði er þó tiltölulega lítið (10,9%) og lægsta boð vikur ekki meira frá áætluðum kostnaði en vænta má (84,4 af hundraði áætlunar). Hér er því augljóslega um að ræða tilviljunarkennt fyrirbrigði, sem óþarft er að fjölyrða um.

Dreifing tilboða í lokur annars vegar og pípu, stálfóðringu og greiningar að vatnshverflum hins vegar er óeðlilega mikil eins og áður var vikið að. Miðað við niðurstöður er áætlun ráðgjafa óeðlilega lág, þótt lægstu boð séu í báðum tilvikum undir áætluðum kostnaði (lokur 82,8 af hundraði áætlunar, pípur, stálfóðring og greiningar 75,3 af hundraði áætlunar). Þrjú tilboð í lokur eru lægri en áætlaður kostnaður, en í síðara tilviki er einungis eitt mjög lágt tilboð lægra en áætlaður kostnaður.

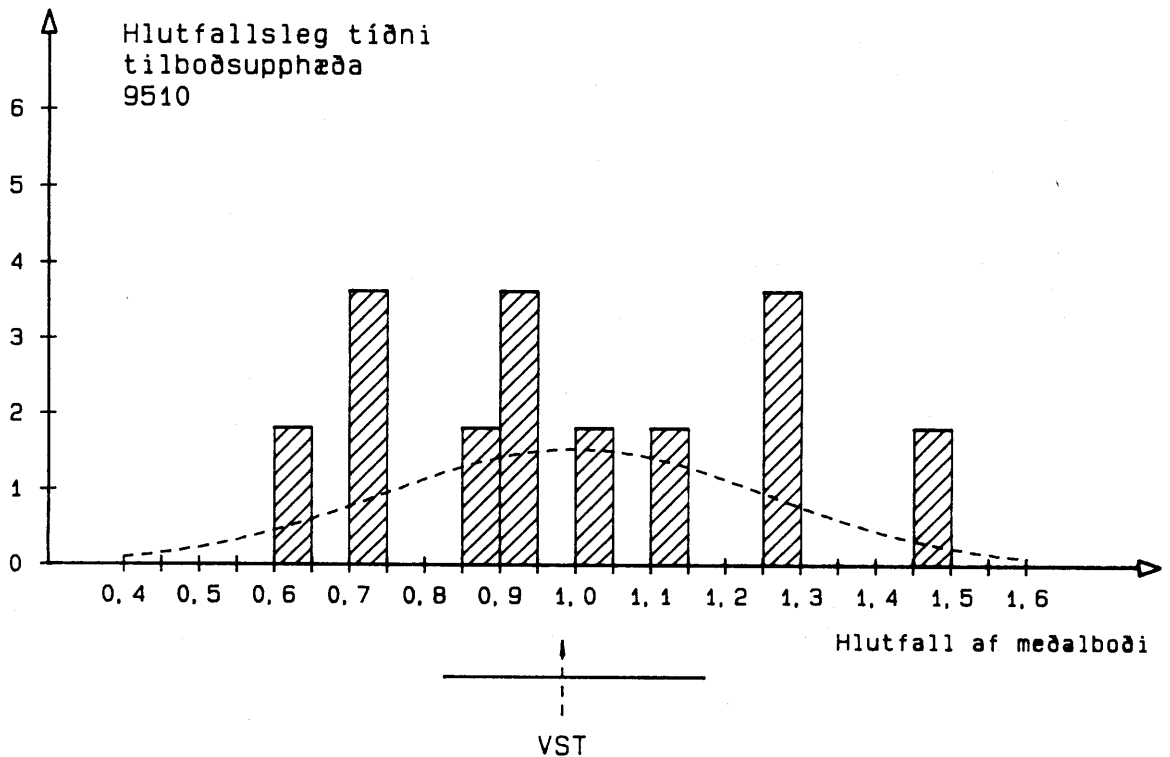
Ekki verða dregnar neinar einhlítar ályktanir um eðlileg óvissumörk kostnaðaráætlana af framangreindum tilboðum, þar sem þau eru of fá og móttast af svipuðum aðstæðum við tilboðsgerð. Niðurstöðurnar varpa þó ljósi á vandkvæði við áætlanagerð um stofnkostnað, en eðlileg óvissumörk við áætlanagerð á útboðsstigi hafa verið talin nálægt  $\pm 8,5$  af hundraði "raunkostnaðar" þegar upp er staðið. Samkvæmt eðli máls eru þessi óvissumörk þó mun hærri á einstökum verkþáttum.

BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9510  
 Neðanjarðarvirki

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði	K %
1		63,86
2		74,33
3		74,53
4		89,09
5		91,21
6		92,61
7		102,30
8		111,96
9		125,22
10		126,61
11		148,28
Áætlun		98,37

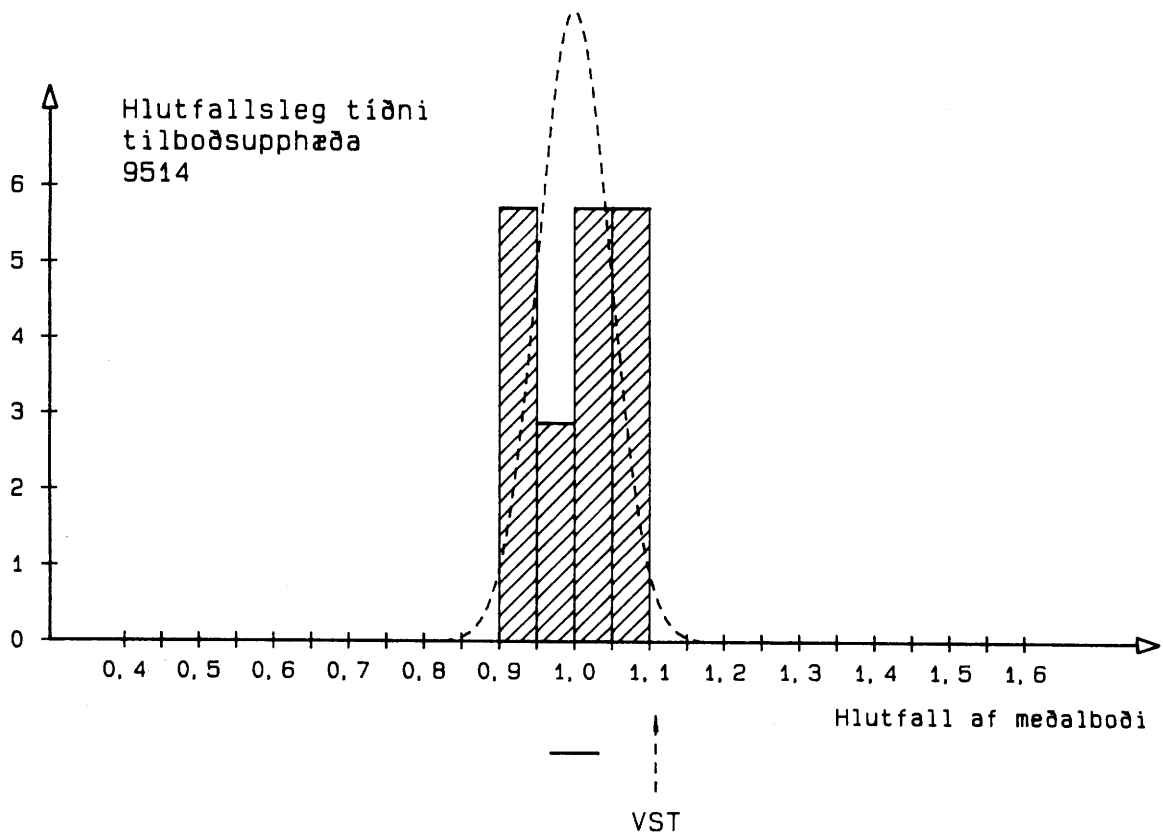
Staðalfrávik  
± 25,86%

$K_{\max}/K_{\min} = 2,32$



BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9514  
 Botnrás í Blöndustíflu.

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði	K %	
1		93,62	
2		94,35	Staðalfrávik:
3		98,31	+ 4,79%
4		100,97	
5		102,07	$K_{max}/K_{min} = 1,13$
6		105,14	
7		105,54	
Áætlun		110,87	



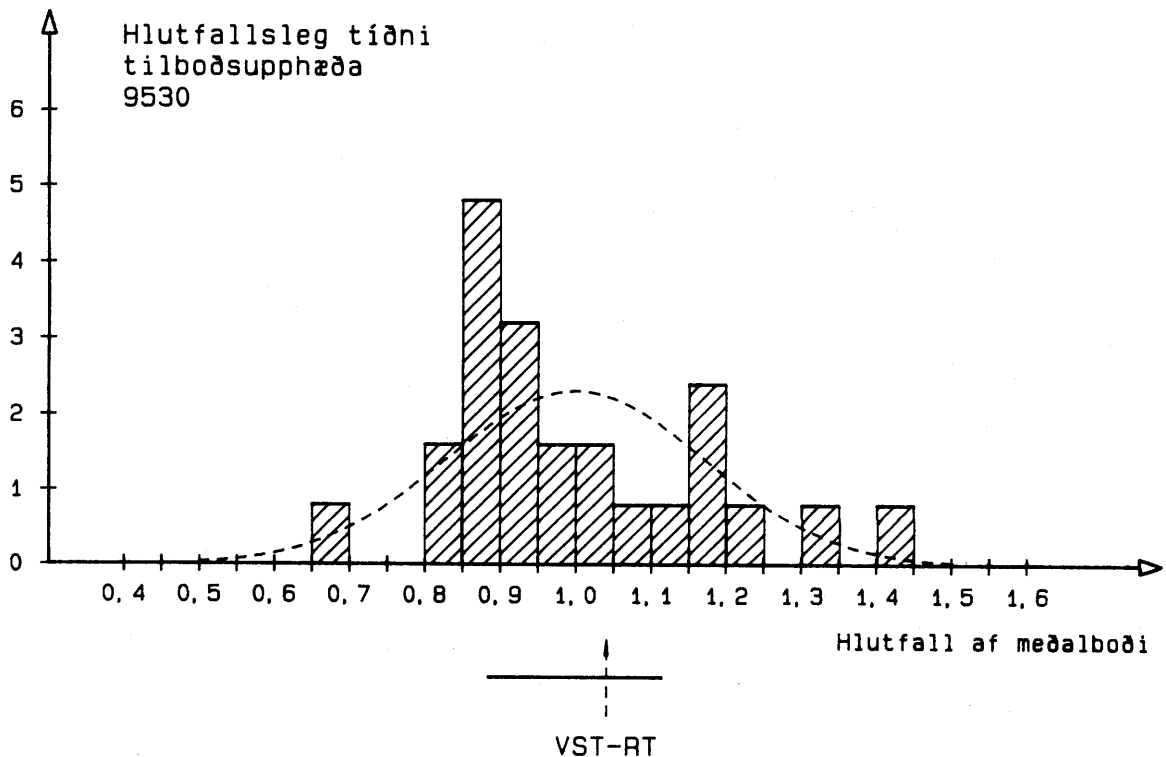
BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9530

Vatnshverflar og rafalar ásamt fylgihlutum.

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði K %	Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði K %
1	69,52	13	94,85
2	83,08	14	95,41
3	83,85	15	96,96
4	86,34	16	102,37
5	86,86	17	102,69
6	87,05	18	108,13
7	88,08	19	111,45
8	88,28	20	115,55
9	88,32	21	116,55
10	90,36	22	117,05
11	93,82	23	123,28
12	94,74	24	132,60
		25	142,82
Áætlun	104,14		

Staðalfrávik:  $\pm 17,19\%$

$K_{\max}/K_{\min} = 2,05$



BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9531

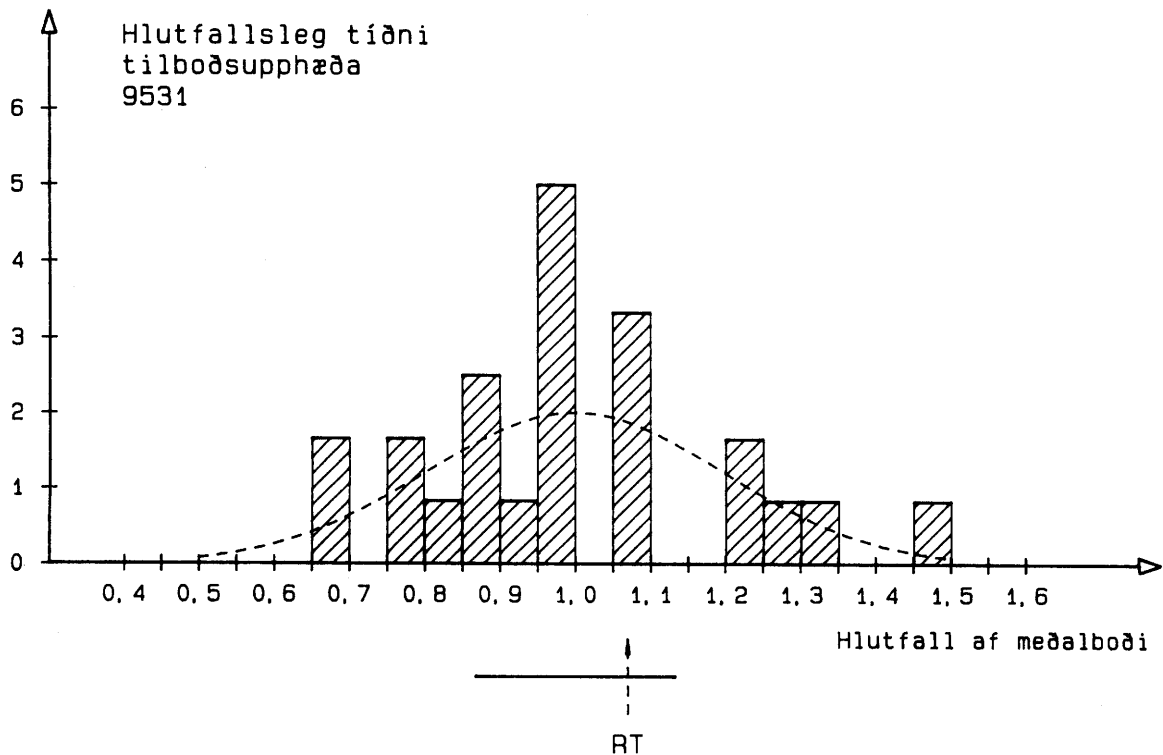
Spennar

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði	Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði
	K %		K %
1	66,99	13	98,59
2	69,15	14	99,25
3	78,80	15	99,53
4	79,82	16	105,47
5	82,62	17	107,80
6	86,80	18	108,11
7	88,03	19	108,66
8	88,31	20	123,20
9	90,40	21	124,43
10	96,41	22	125,03
11	96,83	23	130,80
12	96,87	24	148,10

Áætlun 106,95

Staðalfrávik:  $\pm 19,82\%$

$$K_{\max}/K_{\min} = 2,21$$





BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9532.

Tengivirki

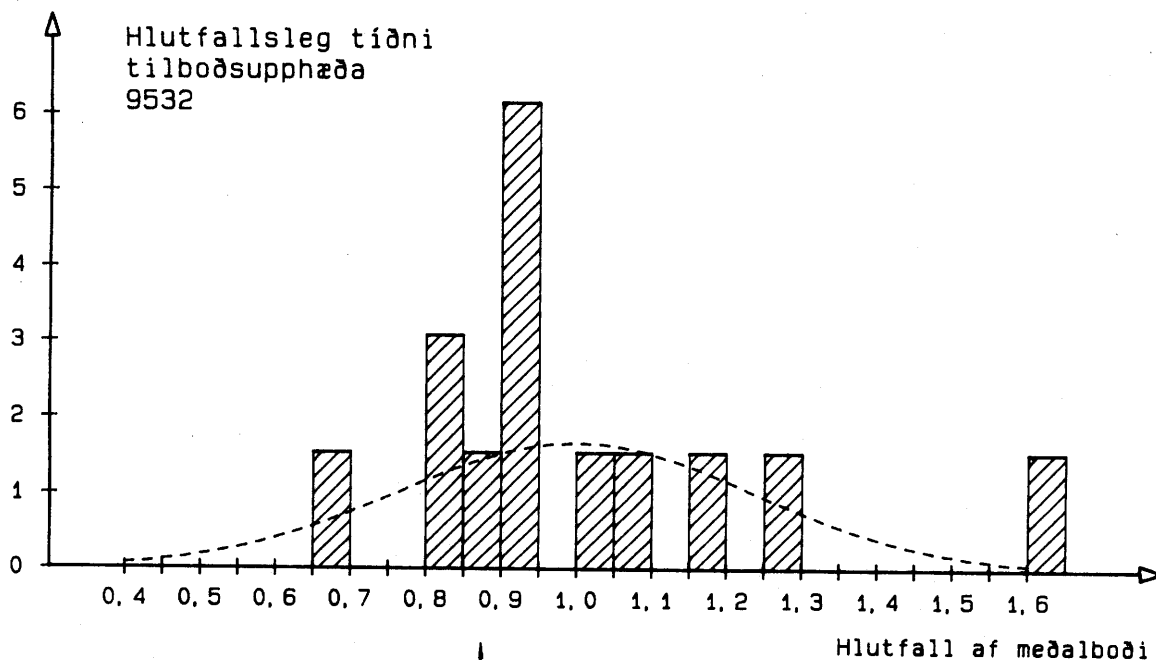
Röðun Tilboðsupphæð  
í hlutfalli af  
meðalboði

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði	K %
1		67,11
2		80,10
3		83,41
4		86,96
5		91,30
6		91,42
7		91,47
8		94,54
9		104,27
10		105,05
11		115,75
12		128,32
13		160,31
Aætlun		87,45

Staðalfrávik:

+ 23,99%

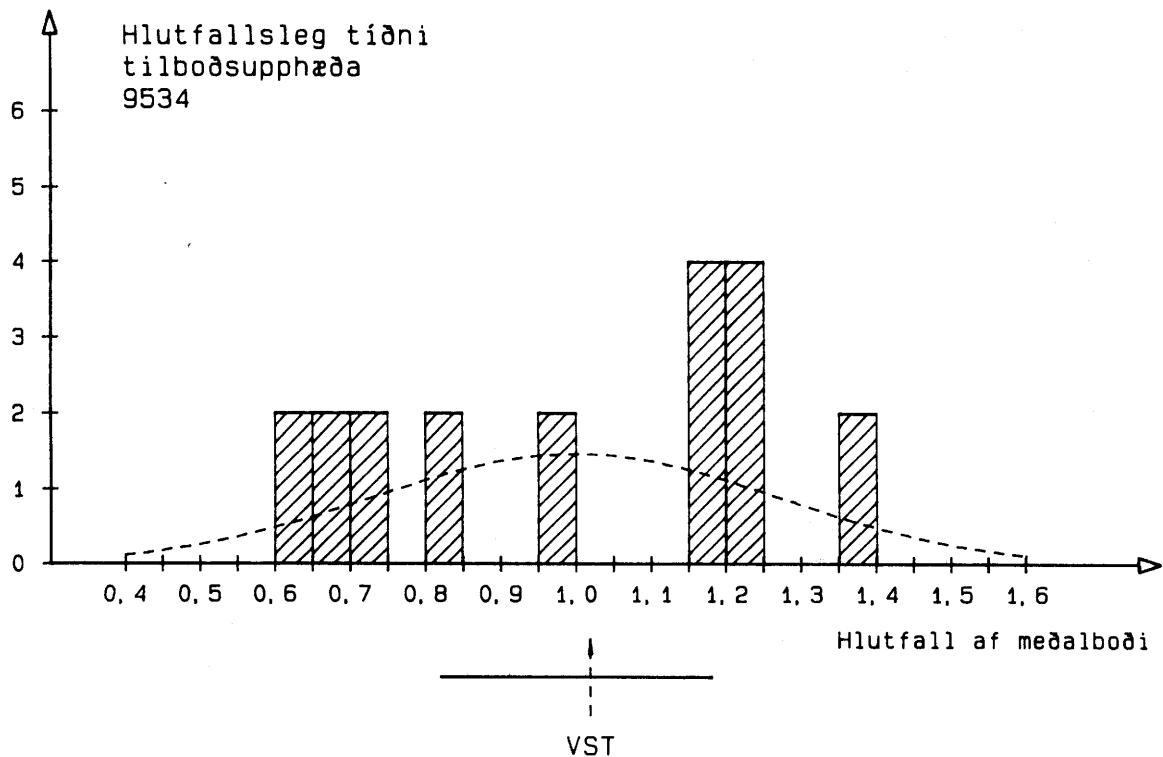
$K_{max}/K_{min} = 2,39$



BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9534

Stöðvarhúskranar

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði	K %	
1		62,50	
2		65,58	Staðalfrávik:
3		74,88	± 27,00 %
4		82,75	
5		97,21	
6		116,21	$K_{\max}/K_{\min} = 2,21$
7		119,02	
8		120,05	
9		123,86	
10		137,94	
Ætlun		101,87	

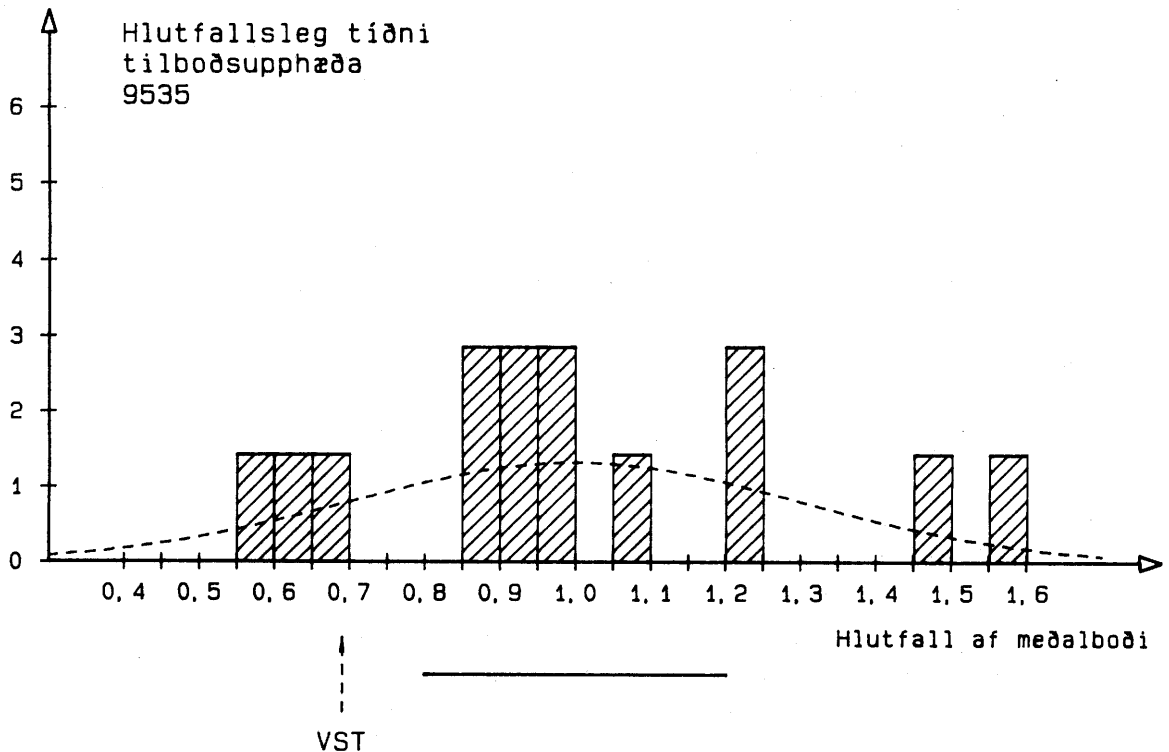


BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9535

Lokur

Röðun Tilboðsupphæð  
í hlutfalli af  
meðalboði

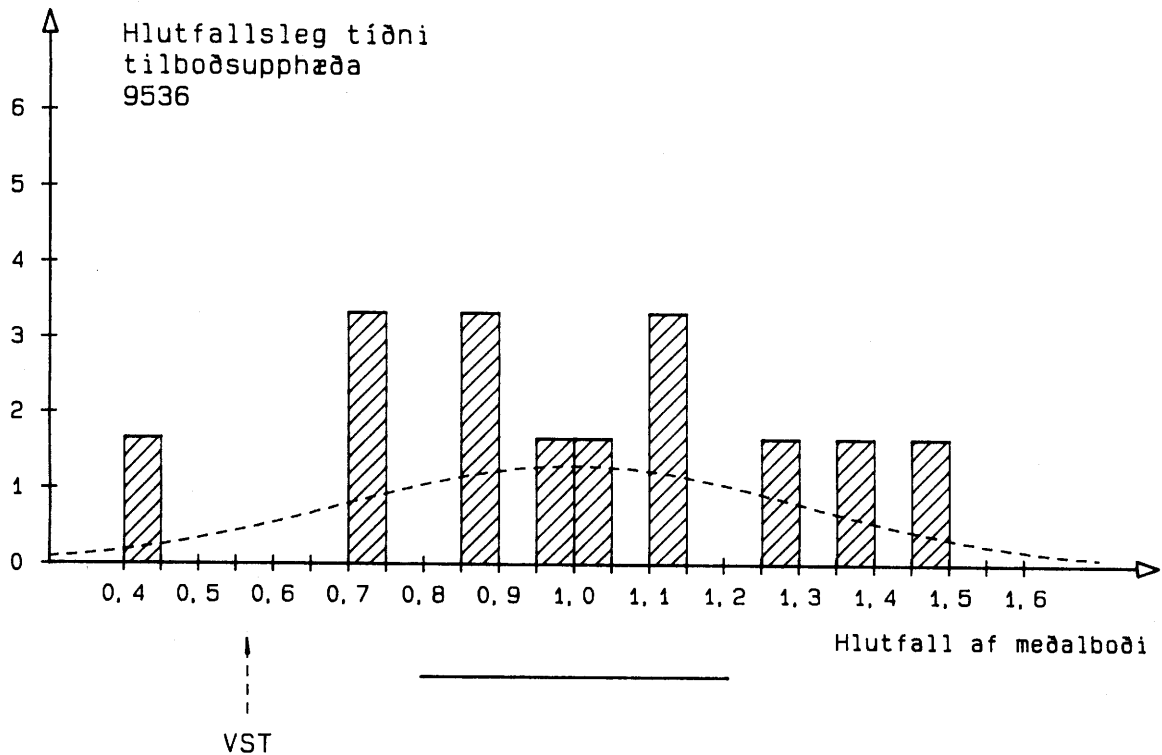
Röðun	K %	
1	57,15	
2	63,78	Staðalfrávik:
3	65,73	+ 30,13%
4	87,39	
5	88,40	
6	91,15	$K_{\max}/K_{\min} = 2,78$
7	91,89	
8	95,41	
9	99,14	
10	106,65	
11	120,69	
12	123,54	
13	149,93	
14	159,14	
Áætlun	69,01	



BLÖNDUVIRKJUN. Útboðsgögn 9536.

Pípa, stálfóðring og greiningar að hverflum.

Röðun	Tilboðsupphæð í hlutfalli af meðalboði	K %	
1		42,59	
2		70,10	Staðalfrávik:
3		72,70	
4		86,37	± 30,60 %
5		89,93	
6		96,06	
7		102,59	$K_{max}/K_{min} = 3,50$
8		110,80	
9		111,04	
10		129,49	
11		139,33	
12		148,98	
Áætlun		56,58	



**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**Fylgiskjal 26**

**Þversniðslögun jarðganga**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Þversniðslögun jarðganga

Við ákvörðun á þversniðslögun jarðganga er fyrst og fremst þrennt sem kemur til álita:

- 1) Straumfræðilegir eiginleikar
- 2) Bergtæknilegir eiginleikar
- 3) Hagræði við framkvæmdir

Miðað við straumfræðilega eiginleika er hringlaga þversnið hagkvæmast, þar sem þversniðsflatarmál er þá í lágmarki miðað við ákveðin falltöp. Í flestum tilvikum fullnægir það einnig bezt bergtæknilegum skilyrðum. Að því er varðar vinnu við sprengingar og frágang er það hins vegar óhentugt við gerð láréttra eða lítið hallandi ganga.

Því hefur verið leitast við að finna þversniðslögun, sem bezt kemur til móts við nefnda eiginleika á heildina lítið.

### Straumfræðilegir eiginleikar

Til samanburðar við hringgöng eru tekin þrennskonar gangaþversnið, skeifugöng, bogagöng og oddbogagöng (sjá skýringarmyndir). Til fróðleiks eru þessi gangaþversnið einnig borin saman við ferning og reglulegan (jafnhliða) fimmhyrning.

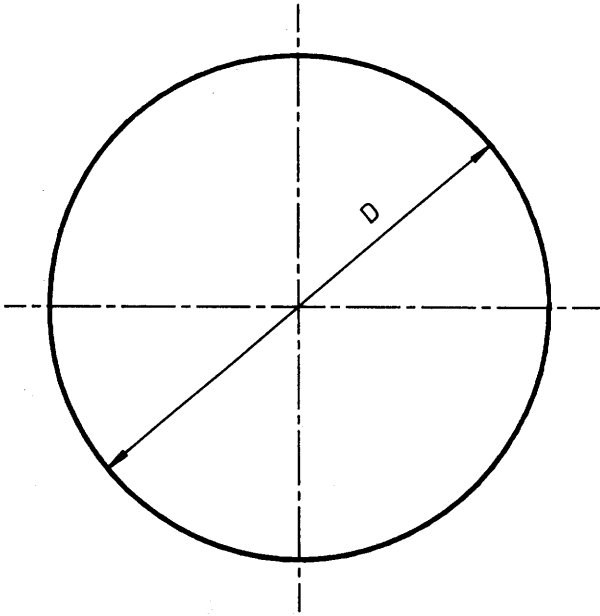
Helztu þversniðsmál mismunandi gangaþversniða eru þessi:

F: flatarmál  $m^2$

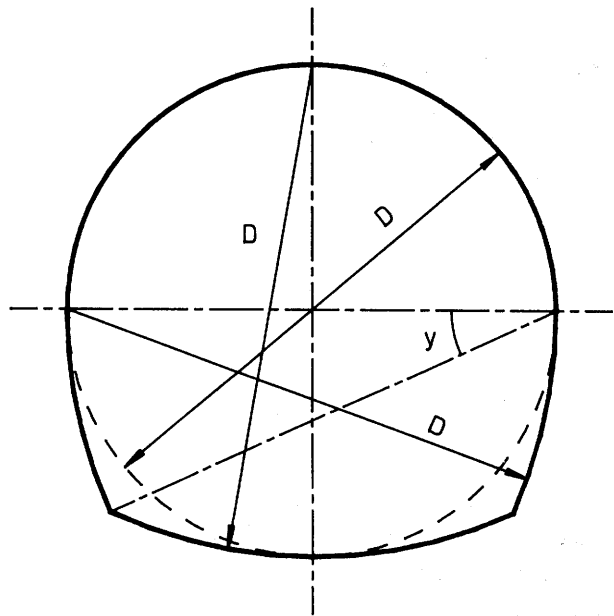
D: þvermál innritaðs hrings  $m$

U: ummál  $m$

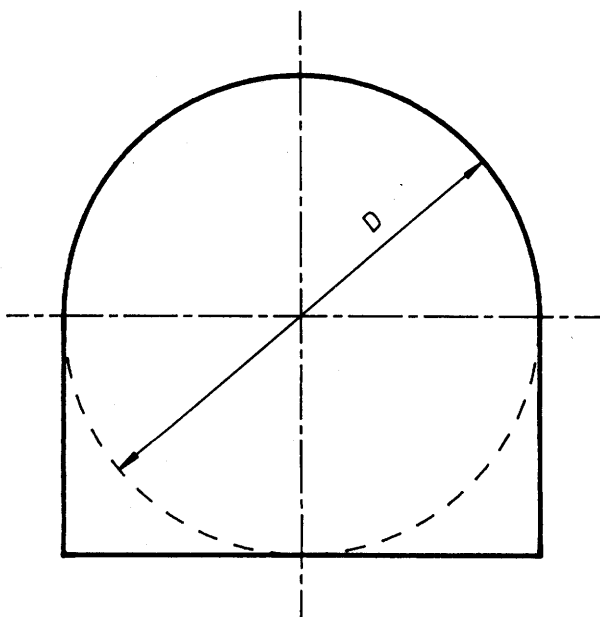
Hringgöng



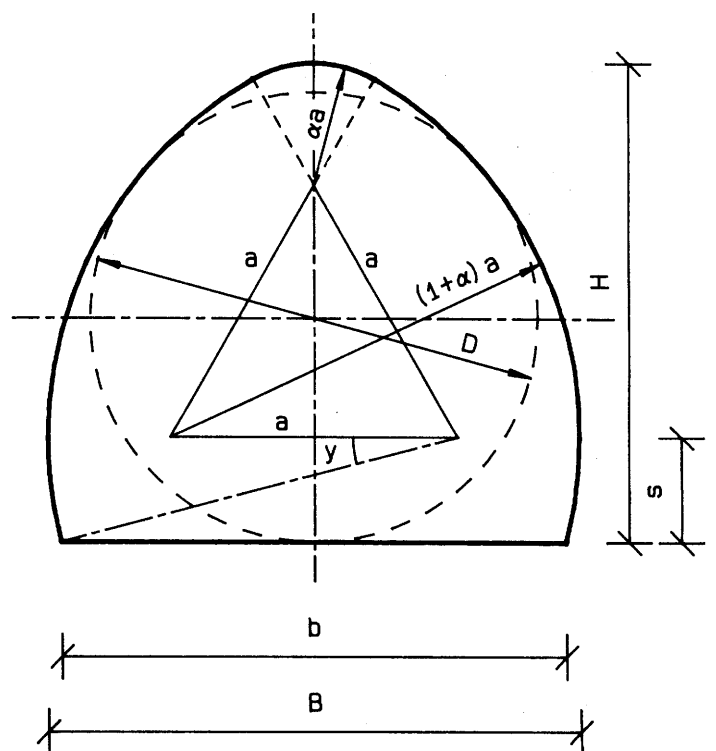
Skeifugöng



Bogagöng



Oddbogagöng



- 3 -

R: streymismiðmál m (R = F/U)

H: hæð m

B: mesta breidd m

b: botnbreidd m

## HRINGUR

$$F = \frac{\pi}{4} D^2, \quad U = \pi D, \quad R = \frac{D}{4}$$

$$\begin{aligned} D &= 1,1283792 \cdot F^{0,5} \\ U &= 3,5449077 \cdot F^{0,5} \\ R &= 0,2820948 \cdot F^{0,5} \end{aligned}$$

## SKEIFUGÖNG

$$y = \arcsin \left[ \frac{1}{4} (\sqrt{7} - 1) \right] = 0,4240310 \quad (\approx 24,3^\circ)$$

$$F = \left[ \frac{\pi}{8} + 2y - \frac{\operatorname{tgy}}{4} - \frac{\operatorname{tgysiny}}{2} - \frac{\operatorname{siny}}{2} \right] D^2$$

$$U = \left[ \frac{\pi}{2} + 4y \right] D$$

$$\begin{aligned} D &= 1,0980903 \cdot F^{0,5} \\ U &= 3,5873737 \cdot F^{0,5} \\ R &= 0,2787555 \cdot F^{0,5} \end{aligned}$$

## BOGAGÖNG

$$F = \left[ \frac{\pi}{8} + \frac{1}{2} \right] D^2, \quad U = \left[ \frac{\pi}{2} + 2 \right] D, \quad R = \frac{D}{4}$$

$$\begin{aligned} D &= 1,0583942 \cdot F^{0,5} \\ U &= 3,7793102 \cdot F^{0,5} \\ R &= 0,2645986 \cdot F^{0,5} \end{aligned}$$



ODDBOGAGÖNG

$$H = \left[ (1+\alpha) \frac{\sqrt{3}}{2} + \alpha \right] a, \quad s = \alpha a \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$F = 0,8926991 \cdot H^2$$

$$y = \arcsin \left[ \frac{\sqrt{3}\alpha}{2(1+\alpha)} \right]$$

$$F = \left[ \frac{\pi\alpha^2}{6} + \frac{\pi(1+\alpha)^2}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4} + (1+\alpha)^2 y - \frac{\operatorname{tg}y}{4} \right. \\ \left. + \left[ \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\operatorname{tg}y}{2} \right] [(1+\alpha) \cos y - 1/2] \right] a^2$$

$$\alpha = 0,4253430, \quad y = 0,2614013 \quad (\approx 15^\circ)$$

$$a = 0,6025090 \cdot H$$

$$\alpha a = 0,2562730 \cdot H$$

$$D = 0,9382144 \cdot H$$

$$U = \left[ \frac{\alpha\pi}{3} + \frac{2(1+\alpha)\pi}{3} + 2(1+\alpha)y + 2 [(1+\alpha) \cos y - 1/2] \right] a$$

$$U = 3,5726779 \cdot H$$

$$D = 0,9930007 \cdot F^{0,5}$$

$$U = 3,7813017 \cdot F^{0,5}$$

$$R = 0,2644592 \cdot F^{0,5}$$

REGLULEGIR MARGHYRNINGAR

n = fjöldi hliða

$$D = \frac{2F^{0,5}}{\sqrt{n \operatorname{tg} \pi/n}}$$

$$U = 2 \sqrt{n \operatorname{tg} \pi/n} \cdot F^{0,5}$$

$$R = \frac{D}{4}$$

I eftirfarandi skrá eru helztu þversniðsmál borin saman og jafnframt eru skráð falltöp í hlutfalli af falltöpum hringganga miðað við sama þversniðsflatarmál og að jafna Mannings gildi með góðri nálgun ( $I/I_H$ ).

ÞVER- SNÍÐS- MÁL	HRING- GÖNG	SKEIFU- GÖNG	BOGA- GÖNG	ODDBOGA- GÖNG	FIMM- HYRNINGS- GÖNG	FERNINGS- GÖNG
$D/F^{0,5}$	1,1284	1,0981	1,0584	0,9930	1,0493	1,0000
$U/F^{0,5}$	3,5449	3,5874	3,7793	3,7813	3,8119	4,0000
$R/F^{0,5}$	0,2821	0,2788	0,2646	0,2645	0,2623	0,2500
$H/F^{0,5}$	1,1284	1,0981	1,0584	1,0584	1,1732	1,0000
$B/F^{0,5}$	1,1284	1,0981	1,0584	1,1802	1,2336	1,0000
$b/F^{0,5}$	—	0,8229	1,0584	1,1184	0,7624	1,0000
$I/I_H$	1,0000	1,0160	1,0891	1,0899	1,1017	1,1747
$F/F_H$	1,0000	1,0060	1,0325	1,0328	1,0370	1,0623

Neðst í skránni er skráð flatarmál í hlutfalli af flatarmáli hringganga miðað við ákveðið rennsli og sömu viðnámstöp ( $F/F_H$ ).

#### Bergtæknilegir eiginleikar.

Reiknaðar hafa verið höfuðspennur í bergi umhverfis göng miðað við jafnar láréttar og lóðréttar spennur í berginu fyrir sprengingu ganga ( $\sigma_H = \sigma_V = 5 \text{ MPa}$ ).

A meðfylgjandi mynd eru mörkuð ytri takmörk sprunguflata umhverfis göngin annars vegar fyrir bogagöng og hins vegar oddbogagöng. Er þá gert ráð fyrir sprunguflötum þar sem höfuðspennur fullnægja skilyrðinu,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad *)$$

Hér eru  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$  höfuðspennur og  $\sigma_c$  einása brotpól bergsins.

Stuðlar  $m$  og  $s$  eru háðir gerð og gæðum bergsins, en í dæminu er reiknað með  $m=0,034$  og  $s=0,0001$ , sem með nálgun jafngildir sæmilegu gosbergi. Línur á myndinni marka fleti með sömu brotspennu  $\sigma_c$  í MPa (50, 100 og 150 MPa).

Að jafnaði er reiknað með styrkingu ganga með ásprautun eftir sprengingu. Í vissum tilvikum verður einnig að gera ráð fyrir styrkingu með bergboltum, þar sem hætta er á hruni við frekari formbreytingar. Af myndinni má ráða, að nauðsynleg lengd bolta verður minni í grennd hvirfilpunkts og á hliðum í oddbogagöngum en bogagöngum en meiri á hvelvingu til hliðar við hvirfilpunkt.

Tilsvarandi athugun á skeifugöngum myndi án efa leiða til þeirrar niðurstöðu, að þau sameini kosti boga- og oddbogaganga að þessu leyti.

### Hagræði við framkvæmdir

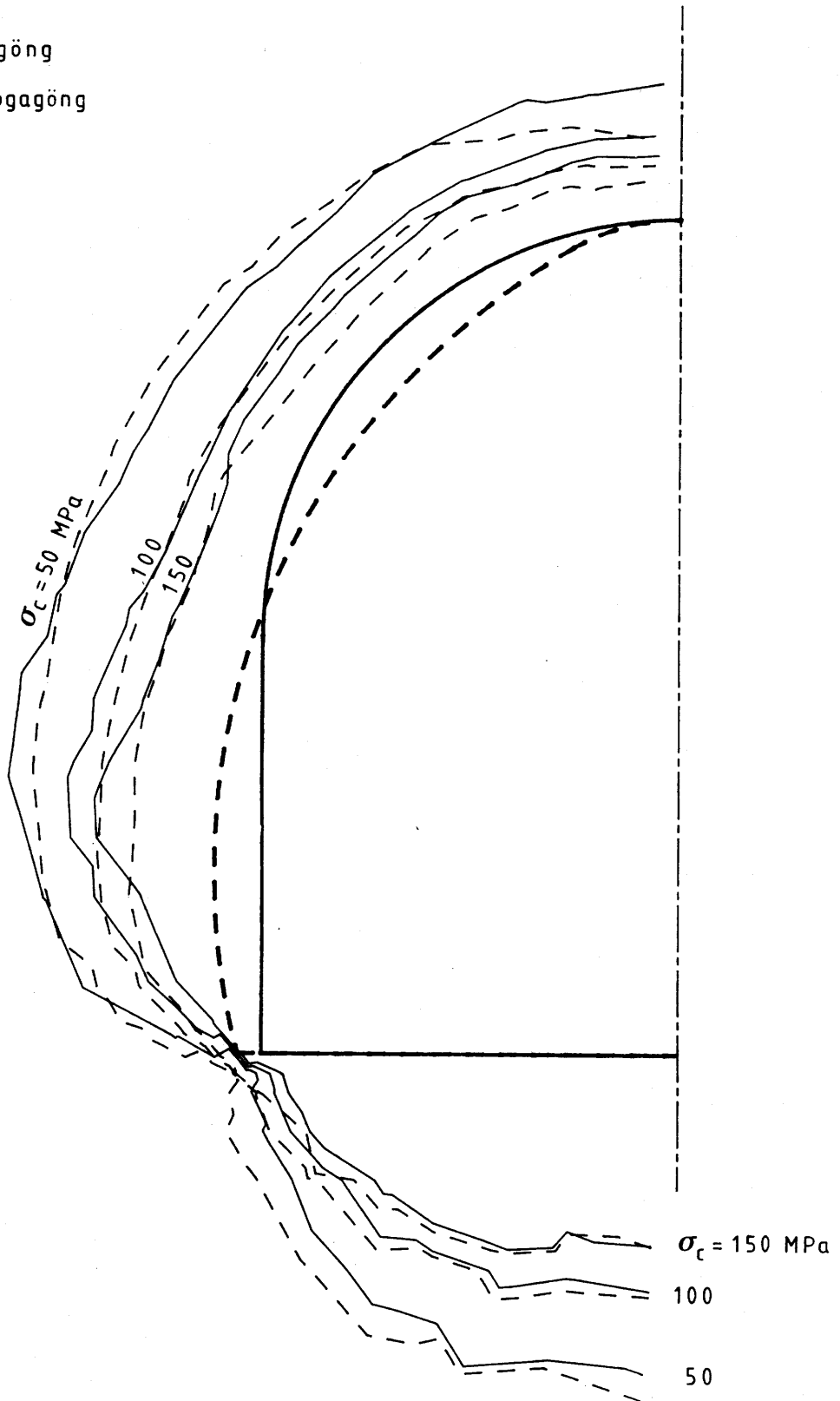
Samanburður á skeifu-, boga- og oddbogagöngum sýnir að botnbreidd verður minnst með skeifugöngum og mest með oddbogagöngum. Akveðin þörf á botnbreidd gæti þá leitt til þess, að oddbogagöng yrðu hagkvæmust, þegar þversniðsflatarmál er tiltölulega lítið. Með tilliti til hagræðis við framkvæmdir verður að öðru leyti vart gert upp á milli þessara gangagerða.

-----  
\*) sbr. "Underground Excavations in Rock"  
E. Hoek & E.T. Brown  
The Institution of Mining and Metallurgy,  
London 1980

BROT FLETIR

— Bogagöng

- - - Oddbogagöng



## Niðurstöður

Straumfræðilegir eiginleikar skeifuganga eru mun betri en bæði boga- og oddbogaganga, en að þessu leyti telst enginn marktækur munur á síðast töldum gangagerðum. Að jafnaði verður vart gert upp á milli þessara gangagerða að því er varðar bergtæknilega eiginleika, en sá munur sem fram kemur verður skeifugöngum líklega í hag.

Við jarðgangagerð hér á landi og einnig í Noregi hafa bogagöng verið algengust, en með hliðsjón af framansögðu yrðu skeifugöng líklega hagkvæmust, þegar minni botnbreidd leiðir ekki til marktæks kostnaðarauka við framkvæmdir.

**VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR**

**FYLGISKJAL 27**

**Orkuverð sem fall af nýtingartíma**

## VATNSORKA Á ÍSLANDI

### Orkuverð sem fall af nýtingartíma

Jaðarkostnaður afls í vatnsorkuverum er bæði háður uppsettu afli og raunfallhæð og auk þess er hann mismunandi eftir öðrum aðstæðum. Kostnaðaráætlanir um virkjanir á Íslandi hafa leitt í ljós að líklegt meðalgildi verði  $\Delta K/\Delta N \approx 12,5$  Mkr/MW á verðlagi í desembermánuði 1983 og að jafnaði verði jaðarkostnaðurinn á bilinu 6,7 til 18,3 Mkr/MW.

Yfirlitsáætlanir um vatnsorku á Íslandi hafa verið miðaðar við það, að uppsett afl samsvari ársálagsstuðli  $\lambda = 0,6$  eða 5256 nýtingarstundum á ári. Með þessum forsendum hefur meðalstofnkostnaður á orkueiningu verið áætlaður 5,729 kr/kWh/a og um það bil hinn sami fyrir þá vatnsorku sem eftir er að nýta, eða 5,774 kr/kWh/a. Hér er eins og áður miðað við verðlag í desember 1983 og í tilgreindum kostnaði er hvorki meðtalinn kostnaður við meginflutningskerfi né dreifikerfi, þ.e. um er að ræða orkukostnað við stöðvarvegg.

Við ákvörðun á orkuverði heildsöluaðila eins og Landsvirkjunar verður að bæta við kostnaði við meginflutningskerfi, tekjumissi vegna orkutapa og að auki eðlilegum ágóða- og áhættuhlut.

Hér á eftir verður gert ráð fyrir eftirfarandi viðbótarkostnaði.

Meginflutningskerfi:  $0,15 \cdot 5,729 \approx 0,86$  kr/kWh/a

Orkutöp:  $2,149\lambda^{-0,66} = 9 \tau^{-0,66} \%$

Ágóði og áhætta: 15 af hundraði kostnaðar

Orkutöp í meginflutningskerfi reiknast þá 3% við ársálagsstuðul 0,6, en þau breytast með  $\lambda$  á hliðstæðan hátt og orkutöp í vatnsvegum.

Gert er ráð fyrir, að raforkunotkun sé að 1/3 hluta almenn notkun með ársálagsstuðli 0,4 og að 2/3 notkun stóriðju með ársálagsstuðli 0,8, þ.e.  $\lambda = 0,6$  fyrir samanlagða notkun. Er þá jafnframt reiknað með reiðuafli 16 af hundraði. Samkvæmt því fást eftirfarandi nýtingarstundir.

	Með reiðuafli $T = \lambda \cdot 8,76$ kh/a	An reiðuafli $T_0 = \lambda \cdot 8,76 \cdot 1,16$ kh/a
Almenn notkun	3,504	4,065
Stóriðja	7,008	8,129
Heildarnotkun	5,256	6,070

Arlegur kostnaður í hlutfalli af stofnkostnaði reiknast eftirfarandi:

Almenn notkun: 0,0836

Stóriðja : 0,0725

Heildarnotkun: 0,076

Er þá gert ráð fyrir vöxtum 6%, rekstrarkostnaði í hlutfalli af stofnkostnaði 0,8%, ævitíma 40 ár, að jafnaðarlegur fullnýtingartími við almenna notkun sé 5 ár en fullnýtingu við gangsetningu á orku til stóriðju.

Með hliðsjón af framansögðu má reikna heildsöluverð orku sem fall af nýtingartíma  $T$  í kh/a af jöfnunni,

$$k = \frac{0,076 [1,15 \cdot 5,729 + 12,5(1/T - 1/5,256)] 1,15}{1 - 0,09 T^{-0,66}} \text{ kr/kWh}$$

eða

$$k = \frac{0,368 (1 + 2,969 T^{-1})}{1 - 0,09 T^{-0,66}} \text{ kr/kWh} \quad [1]$$

Með ársálagsstuðli  $\lambda = T/8,76$  fæst,

$$k = \frac{0,368 (1 + 0,3389 \lambda^{-1})}{1 - 0,02149 \lambda^{-0,66}} \text{ kr/kWh} \quad [2]$$



Orkuverð samkvæmt tilgreindum jöfnum er sýnt á línuriti, en samkvæmt þeim fæst m.a.

$\lambda$	k	
	kr/kWh	mUSD/kWh
0,4	0,708	24,7
0,6	0,594	20,7
0,8	0,537	18,8

Skráð verð í mUSD (mill) miðast við meðalgengi í desember 1983, USD = 28,652 ISK.

Hér að framan hefur verið leitast við að gera grein fyrir eðlilegu orkuverði til notenda með mismunandi nýtingu (mismunandi ársálagsstuðli), þannig að þeir beri "sanna" hlutdeild í kostnaði miðað við mismunandi aflþörf og orkutöp. Af því má þó alls ekki álykta að "rétt" framtíðarverð á orku til hins almenna notanda sé um það bil 25 mUSD og 19 mUSD til orkufreks iðnaðar. Önnur sjónarmið, svo sem tillit til mismunandi fullnýtingartíma, hagkvæmni stærðar, óbeinna tekna af iðnaði o.fl. geta kollvarpað þessum niðurstöðum eins og leitast verður við að sýna fram á með einföldu dæmi.

Fyrir liggur að sjá fyrir vaxandi orkuþörf til almennrar notkunar (árlegur vöxtur 100 GWh/a<sup>2</sup>) og orku til stóriðju 1000 GWh/a. Til greina kemur að byggja tvö orkuver annað fyrir almenna notkun með orkumætti E=500 GWh/a og hitt fyrir stóriðju með orkumætti E=1000 GWh/a, eða eitt orkuver með E=1500 GWh/a.

Gert er ráð fyrir að stofnkostnað orkuveranna megi ákvarða af jöfnunni,

$$K/E = 21E^{-0,2} + 12,5(1/T - 1/5,256) + 0,86 \text{ kr/kWh/a,}$$

sem er ákvarðaður jafnaðarlegur stofnkostnaður íslenskra vatnsorkuvera á verðlagi í desember 1983 að viðbættum stofnkostnaði meginflutningskerfis.

Þá fæst eftirfarandi samanburður, þar sem A táknar almenna notkun, S orku til stóriðju og A+S blandaða notkun.

Notkun	$\lambda$	E GWh/a	Stofnk. kr/kWh/a	Arlegt kostnaðar- hlutfall	k	
					kr/kWh	mUSD/kWh
A	0,4	500	8,108	0,0836	0,811	28,3
S	0,8	1000	5,540	0,0725	0,474	16,5
A+S	0,6	1500	5,724	0,0759	0,515	18,0

An efa yrði nú ákveðið að fullnægja sameinaðri orkupörf með einu orkuveri.

Þá má hugsa sér þrjár aðferðir til að ákvarða orkuverð annars vegar til hins almenna notanda og hins vegar til stóriðju.

I: Sama verð til beggja.

II: Stóriðja greiddi sama verð og frá virkjun fyrir stóriðju eingöngu.

III: Almennur borgaði sama verð og frá virkjun til almennra nota einna.

I þeim tilvikum fengist eftirfarandi orkuverð.

Aðferð	Til almennings		Til stóriðju	
	kr/kWh	mUSD/kWh	kr/kWh	mUSD/kWh
I	0,515	18,0	0,515	18,0
II	0,597	21,0	0,474	16,5
III	0,811	28,3	0,367	12,8

Af dæminu má ráða, að orkuverð til stóriðju verður að jafnaði einungis ákvarðað innan rúmra marka (12 - 18 mUSD) með verkfræðilegum rökum einum sér. Endanleg niðurstaða yrði því dæmigerð stjórnmalaleg ákvörðun, sem háð er eftirspurn og mati á óbeinum ávinningi af aukinni stóriðju. I öllum tilvikum er hins vegar séð fyrir því, að eðlilegur ágóði verði af orkusölunni.

Sé litið til hins almenna notanda, með mismunandi aflþörf í hlutfalli af orkupörf (mismunandi  $\lambda$ ), virðist í fljótu bragði eðlilegt að ákvarða orkuverð í gjaldskrá með jöfnu í líkingu við þá sem sett var fram í upphafi. Astæða kann þó að vera til þess að jafna orkuverð, til að notendur með mjög lágan ársálagsstuðul freistist ekki til þess að sjá fyrir afltoppum með innfluttum orkugjöfum, umfram það sem þjóðhagslega telst hagkvæmt.

Eins og fram hefur komið eru allar kostnaðartölur hér miðaðar við verðlag í desember 1983. Á árinu 1984 er virkjunarkostnaður talinn hafa hækkað um 20 af hundraði en gengi bandaríkjadals hækkaði á sama tíma um rúmlega 40%. Leiðir þetta til þess að orkuverð hækkaði um 20 af hundraði reiknað í íslenskum krónum en lækkaði um nálega 15% í bandaríkjadöllum. Þessi breyting á orkuverði í USD er þó án efa ekki til frambúðar og sýnir einungis, að við verðlagningu á orku í USD verður að taka tillit til líklegrar misvísunar milli verðlags og gengis fram í tímann.

# VATNSORKA Á ÍSLANDI

Orkuverð sem fall af nýtingartíma

Verðlag í desember 1983

Orkuverð [kr/kWh]

