



ORKUSTOFNUN
Vatnsorkudeild

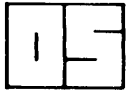
**Straumfræðistöð Orkustofnunar
Verkfræðistofan Vatnaskil**

SULTARTANGAVIRKJUN

Líkan af botnrás Sultartangastíflu

OS-84062/VOD-07

Reykjavík, júlí 1984



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Laufey Bryndís Hannesdóttir, OS
Verkfræðistofan Vatnaskil

SULTARTANGAVIRKJUN

Líkan af botnrás Sultartangastíflu

OS-84062/VOD-07

Reykjavík, júlí 1984

Dags.
09.08. 1984.

Tilv. vor
VOD/370/8451/124-84/LH-ee

Dags.

Tilv. yðar

...
Landsvirkjun
Háaleitisbraut 68
105 Reykjavík
...

Botnrás í Sultartangastíflu-Líkantilraun.

Hér með fylgir skýrsla um líkantilraun á botnrás í Sultartangastíflu. Tilraunin var gerð á Straumfræðistöð Orkustofnunar samkvæmt samningi við Landsvirkjun í samvinnu við Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen h/f og hafði Sigurjón Helgason umsjón með verkinu fyrir hennar hönd. Verkfræðistofan Vatnaskil annaðist ráðgjöf við skýrslugerð.

Smíði líkansins hófst vorið 1982 og fóru mælingar fram á tímabilinu maí til september 1982. Líkantilraunir lágu niðri þar til í mars 1984, er síðustu mælingar voru gerðar í líkaninu.

Verkinu var hagað þannig: Líkanið var í upphafi smíðað í samræmi við frumhönnun botnrásar. Í tilraunum kom í ljós að gera þurfti nokkrar breytingar sérstaklega á miðstöpli neðan við lokur og á botnrásarskurði. Með nýrri hönnun á miðstöpli, er hægt að hafa aðeins aðra lokuna opna í einu, en það var alls ekki mögulegt eins og stöpullinn var hannaður. Botnrásarskurður var í líkaninu mjúkkaður um 2 m og botninn hækkaður um 1,5 m frá upphaflegri hönnun, þannig að sprengingar minnkuðu um u.þ.b. 2000 m³. Flutningsgeta botnrásar var mæld og gerðar voru tilraunir með ísrek í inntaksskurði, sem sýndu að ísbóma framan við inntaksskurð stöðvar ísrek. Án ísbómu safnast ís saman við botnrásina og einn og einn jaki stingur sér ofan í hana.

Endanlegt líkan er í samræmi við teikningar frá Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen h/f nr. 80.066.3-40 og 45.

Virðingarfyllst

8
Orkustofnun
Vatnsorkudeild

*Lauren Tomasson
Björn Erlundsson*

Verkfræðistofan
Vatnaskil

Morr Páll Guð

EFNISYFIRLIT

bls.

EFNISYFIRLIT	2
MYNDA-TÖFLUSKRÁ	3
LJÓSMYNDASKRÁ	4
1 INNGANGUR	5
2 LÝSING MANNVIRKJA OG LÍKANSMÍÐI	6
2.1 Mannvirki	6
2.2 Helstu stærðir	6
2.3 Val mælikvarða	6
2.4 Smíði líkans	6
3 LÍKANTILRAUNIR	10
3.1 Fyrirkomulag mælinga	10
3.1.1 Rennslismæling	10
3.1.2 Vatnshæðarmæling	10
3.1.3 Op geiraloku	11
3.2 Fyrsta líkan	11
3.3 Tilraunir með endurbætur á líkani	11
3.4 Endanlegt líkan	13
3.4.1 Lýsing	13
3.4.2 Tilraun með ísrek og ísbómu	14
3.5 Rennslislykill	14
3.5.1 Niðurstöður mælinga	14
3.5.2 Fræðilegir reikningar	16
3.6 Gangainntak opnað	18
4 SAMANBURÐUR Á MANNVIRKI OG LÍKANI	19
5 NIÐURSTÖÐUR	21
LJÓSMYNDIR	23
VIÐAUKI: Rennslislyklar	31

MYNDASKRÁ

Mynd 1	Afstöðumynd	7
Mynd 2	Yfirlitsmynd	8
Mynd 3	Líkan í húsi Straumfræðistöðvar	9
Mynd 4	Grunnmynd og þversnið af botnrás	12
Mynd 5	Botn botnrásar	14
Mynd 6	Rennslislykill	15
Mynd 7	Geiraloeka í botnrás	16
Mynd 8	Þrengingarstuðull og lokuop	19

TÖFLUSKRÁ

Tafla 1	Meðalhæð vatnsborðs í þrengingu	11
Tafla 2	Rennslislykill	15
Tafla 3	Samanburður á mældum og reiknuðum stærðum	17
Tafla 4	Rennslí í Þjórsá v Sandafell, um Búrfellsvirkjun og um Sultartangalokur	20

LJÓSMYNDASKRÁ

- Ljósmynd 1 Fyrsta líkan, rennsli $400 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 2 Fyrsta líkan, rennsli $725 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 3 Breyting á líkani, botnrásarskurður þrengdur
- Ljósmynd 4 Endanlegt líkan, vinstri loka opin
- Ljósmynd 5 Endanlegt líkan, hægri loka opin
- Ljósmynd 6 Endanlegt líkan, báðar lokur opnar
- Ljósmynd 7 Ísbóma í inntaksskurði, rennsli $340 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 8 Ísbóma í inntaksskurði, rennsli $460 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 9 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak ekki með og rennsli $600 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 10 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak opið, botnrás lokað og rennsli $600 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 11 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak lokað, botnrás opin og rennsli $600 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 12 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak opið, botnrás lokað og rennsli $400 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ljósmynd 13 Hringiða í inntaksskurði í náttúrunni, lokur fullopnar rennsli um $620 \text{ m}^3/\text{s}$ (ljósm. Verkfræðist. Vatnaskil).
- Ljósmynd 14 Rennslislag í botnrásarskurði í náttúrunni, lokur fullopnar rennsli um $620 \text{ m}^3/\text{s}$ (ljósm. Verkfræðist. Vatnaskil).
- Ljósmynd 15 Botnlokur í Sultartangastíflu í náttúrunni, lokur fullopnar rennsli um $620 \text{ m}^3/\text{s}$ (ljósm. Verkfræðist. Vatnaskil).

1 INNGANGUR

Líkan af botnlökum í Sultartangastíflu er gert til að kanna hvernig mannvirknið muni standast. Könnuð er flutningsgeta botnlöka, straumlag í botnrásarskurði, inntaksskurði og við gangainntak. Athuguð eru áhrif ísreks og ísbómu í inntaksskurði.

Geiraloður af ýmsum stærðum og gerðum hafa verið rannsakaðar erlendis á undanförunum áratugum bæði með tilliti til straumlags og flutningsgetu. Mætti þar til dæmis vísa til nokkra rannsókna (sjá "Vassdrags og Havnelaboratoriet, 1974: Retningslinjer for hydraulisk utforming af tappeluker").

Líkantilraunirnar fóru fram í Straumfræðistöð Orkustofnunar og stóðu mælingarnar yfir frá maí til september 1982 og var síðan endanlega lokið í mars 1984.

Í kafla 2 er mannvirkjum og líkansmíðinni lýst en tilraununum sjálfum, þ. e. mælingum, breytingum á líkani, endanlegu líkani og rennslislykli í kafla 3. Í kafla 4 eru mannvirkin og líkanið síðan borin saman. Í viðbæti eru töflur yfir rennslislykla. Skýrslunni fylgja 15 ljósmyndir af líkaninu, prófunum á því og mannvirkinu sjálfu.

2 LÝSING MANNVIRKJA OG LÍKANSMÍÐI

2.1 Mannvirki

Í fyrirhugaðri Sultartangavirkjun liggur inntaksskurður að gangainntaki við vesturenda Sultartangastíflu (sjá myndir 1 og 2). Út úr inntaksskurði liggur botnrásarskurður að lokuvirki, og myndar hann um 120 gráðu horn við inntaksskurð. Um lokuvirki er vatni hleypt úr Sultartangalóni niður í farveg Þjórsár. Botnrásin er hönnuð fyrir $400 \text{ m}^3/\text{s}$ miðað við vatnshæð í lóni 290 m y.s. Inntaksskurður er um 220 m langur að gangainntaki og 25 m breiður. Botnrásarskurður er skv. endanlegri hönnun 10 m breiður en var upphaflega 12 m breiður og honum hallar 1%. Botnrásir eru tvær $4,0 * 5,3 = 21,2 \text{ m}^2$ að stærð en upphaflega voru þær $4,0 * 5,5 = 22,0 \text{ m}^2$ að stærð. Í botnrásunum eru geiralokur. Til vara eru tvær hjólalokur ofan við geiralokurnar.

2.2 Helstu stærðir

Meðalrennsli að lokum	$305 \text{ m}^3/\text{s}$
Mesta hæð í lóni	299,8 m y.s.
Meðal hæð í lóni	297 m y.s.
Lægsta hæð í lóni	290 m y.s.
Hæð botnrásarskurðar	278 m y.s.
Stærð botnrása	$2 \cdot 4 \cdot 5,3 = 42,4 \text{ m}^2$

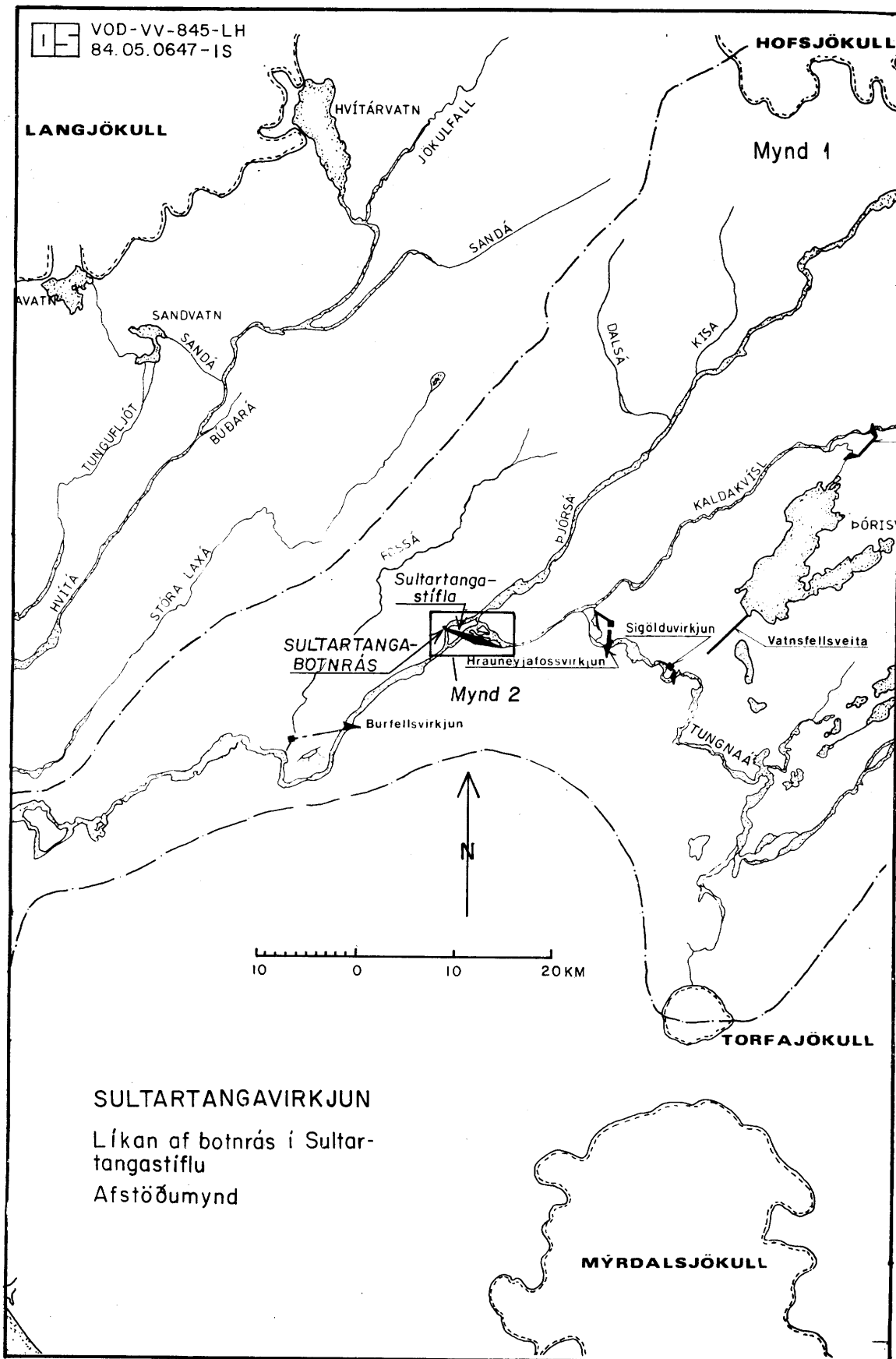
2.3 Val mælikvarða

Mælikvarði líkans var valinn þannig að líkanið gæfi straumfræðilega eftirlíkingu samkvæmt Frouds líkanlögumáli og líkanið kæmist samilega fyrir í húsi Straumfræðistöðvar. Fyrir valinu varð mælikvarðinn 1:30. Þá verða kvarðar í líkaninu þessir:

Lengd, breidd og hæð	1:30
Hraði og tími	$1:\sqrt{30} = 1:5,48$
Rennsli	$1:30^{2,5} = 1:4930$

2.4 Smíði líkans

Líkan að botnlokum í Sultartangastíflu er smíðað úr steypu og plexíglari eftir teikninum frá Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen h/f nr. 80.060.2,101, 80.066.2,213 og fl. Líkanið er um 7 m langt í stefnu inntaksskurðar og breiddin þvert á skurðinn er um 5 m, sjá mynd 3. Þróin, sem í líkaninu kemur í stað Sultartangalóns, er tiltölulega stór og er samtengd líkani af botnrás í Þúfuversstíflu. Við efri enda líkansins er þröskuldur í hæðinni 282 m y.s., þannig að vatn fer ekki að renna niður í skurðinn fyrr en vatnsborð í þró hefur náð þeirri hæð. Botnrásarskurður neðan botnloku er um 60 m í líkaninu. Líkanið var upphaflega smíðað eins og ætlunin er að nota mannvirkið í framtíðinni, þ.e. með gangainntaki. Síðan var lokað fyrir gangainntakið með blikkrenning og lokurnar reyndar þannig. Í síðasta hluta tilraunanna var opnað inn að gangainntaki. Lokuvirki og botnrásarskurður eru að mestu úr plexíglari. Meðalrennsli að lokum er $305 \text{ m}^3/\text{s}$, en það er miðað við líkankvarða 62 l/s. Mesta rennsli $700 \text{ m}^3/\text{s}$ samsvarar 142 l/s.

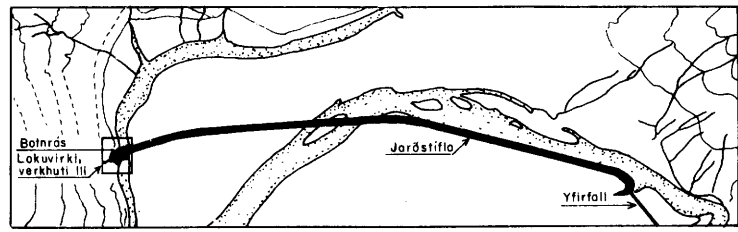
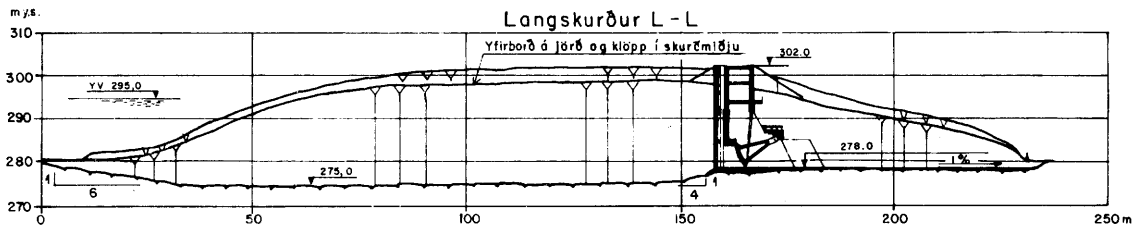
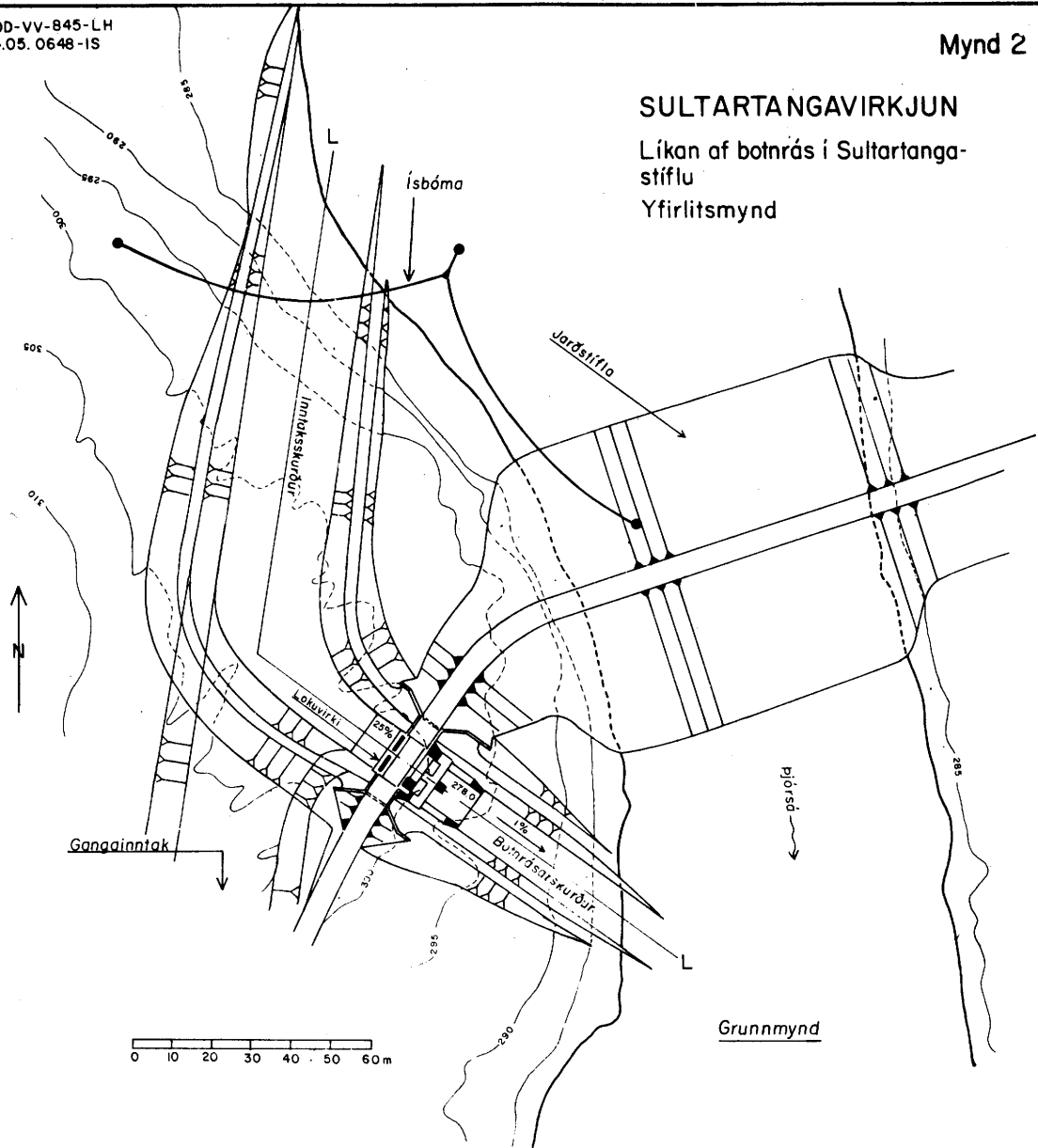


VOD-VV-845-LH
84.05.0648-IS

Mynd 2

SULTARTANGAVIRKJUN

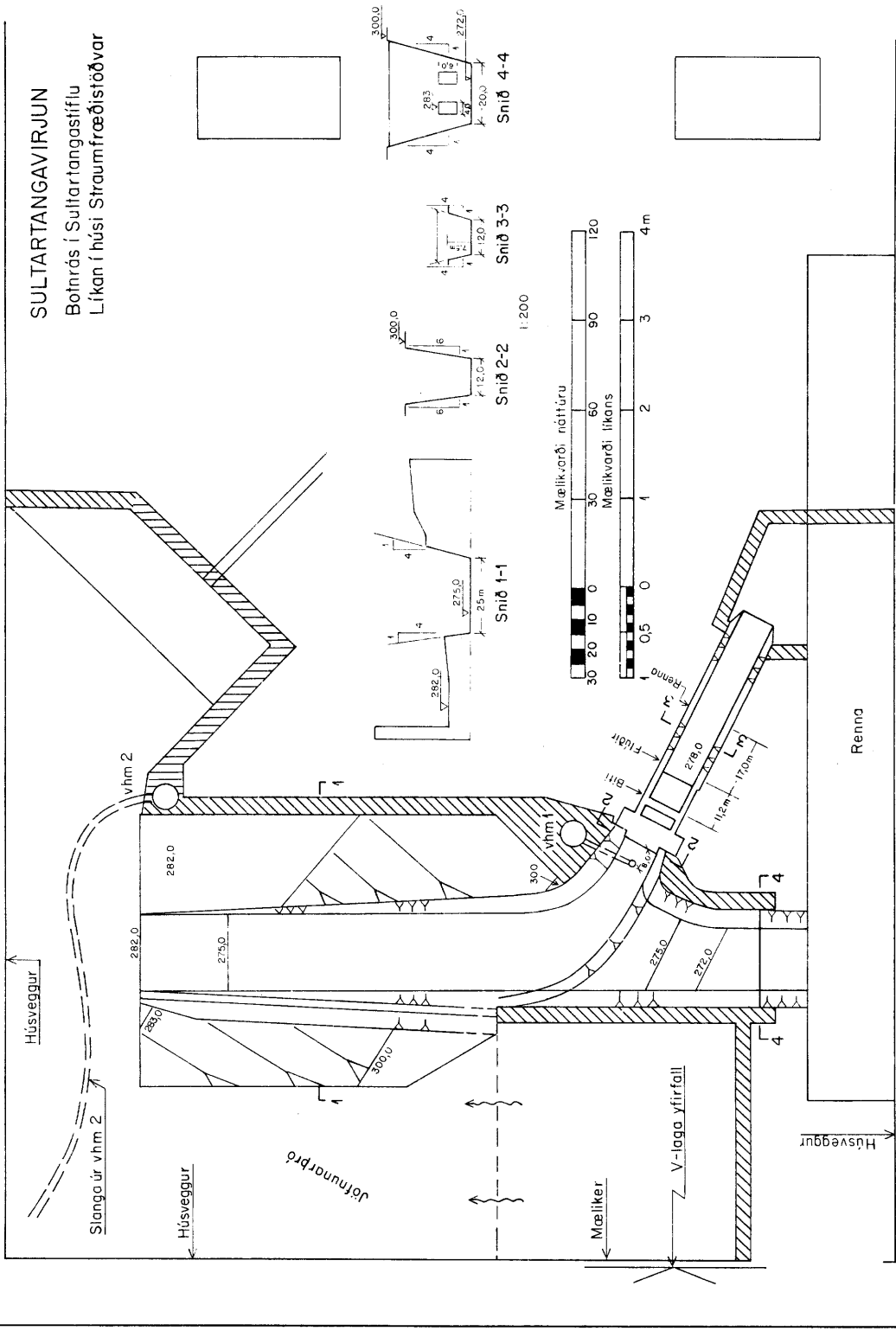
Líkan af botnrás í Sultartanga-
stíflu
Yfirlitsmynd



Mynd 3

SULTARTANGAVIRJUN
Botnrás í Sultartangasíflu
Líkan í húsi Straumfræðistöðvar

VOD-VV-845-LH
B4.04.0649-IS



3 LÍKANTILRAUNIR

3.1 Fyrirkomulag mælinga

3.1.1 Rennslismæling

Rennsli til líkansins kemur beint úr V-laga yfirfalli Straumfræðistöðvar. Yfirfallið hefur verið kvarðað. Líking fyrir rennsli um yfirfallið miðað við vatnshæð í kerri yfir neðsta punkti í vaffi er :

$$Q = 1,317 h^{2,45}$$

þar sem h er vatnshæð í m og Q er rennsli í m^3/s . Til þess að fá rennsli í náttúrunni er Q margfaldað með 4930, samanber kaflann un val mælikvarða. Vatnshæðarmælir í kerri Straumfræðistöðvar stendur á haus þannig að við álestur 0,5 m er vatnsborð í lægstu stöðu. Líking fyrir rennsli í Sultartangalíkani er því:

$$Q = 1,317 (0,5 - \text{álestur í kerri})^{2,45}$$

þar sem álestur í kerri er í m. Í síðasta hluta tilraunar hefur þessari líkingu verið breytt, þ. e. frá vori 1984, og er þannig:

$$Q = 1,317 (0,5022 - \text{álestur í kerri})^{2,45}$$

Rennsli breytist smávegis með tíma og nákvæmni álesturs í kerri er meiri við lítið rennsli en mikið.

3.1.2 Vatnshæðarmæling

Vatnshæðarmælir eru tveir, þeir sömu og notaðir voru í líkani af botnrás í Þúfuversstíflu, sjá staðsetningu mæla á mynd 3. Mælarnir eru hallamældir inn miðað við líkanið. Líkingarnar fyrir mælana sem gefa vatnshæð í lóni í m y.s. ef álestur á mæla, h í cm, er þekktur eru:

$$V_{hm} 1 : V_h \text{ lón (m y.s.)} = h \cdot 0,30 + 267,23$$

$$V_{hm} 2 : V_h \text{ lón (m y.s.)} = h \cdot 0,30 + 267,33$$

Í síðasta hluta tilraunanna vorið 1984 hefur líkingum fyrir mælana verið breytt þótt þeir séu á sama stað og eru:

$$V_{hm} 1 : V_h \text{ lón (m y.s.)} = h \cdot 0,30 + 246,18$$

$$V_{hm} 2 : V_h \text{ lón (m y.s.)} = h \cdot 0,30 + 182,51$$

Vatnsborð í botnrásarskurði er mælt á þremur stöðum, þ. e. undir bita, á flúðum og í rennu. Mælistaðir eru sýndir á mynd 3. Eins og fram kemur hér að aftan er botnkvóta botnrásarskurðar breytt í líkaninu, en vatnsborð á mælistöðum í skurði er enn miðað við upphaflegan kvóta.

3.1.3 Op geiraloku

Op geiraloku er stillt eftir álkubbum sem sniðnir hafa verið nákvæmlega. Op af stærðinni 1 m, 2 m, 3 m, 4 m og 5 m voru notuð. Þrenging vatnsgeislans neðan loku var mæld fyrir þrjú mismunandi op. Það var gert þannig að kvarðar voru límdir einn hvoru megin utaná lokuvirkið nokkurn veginn þar sem geislinn verður þynnstur. Vatnsborð geislans var síðan lesið af kvörðunum. En það vill sveiflast upp og niður og er þar að auki ekki lárétt, þannig að ekki er að búast við mikilli nákvæmni á mælingu. Mæld meðalhæð vatnsborðs í þrengingu er gefin upp í töflu 1. Mælinákvæmni er metin um 0,1 m í náttúrunni.

Tafla 1 Meðalhæð vatnsborðs í þrengingu

Op	Y	k_m
(m)	(m)	(m/m)
2	1,34	0,67
4	2,85	0,71
5	4,12	0,82

Þar sem Y er mælt vatnsdýpi í þrengingu og k_m er mældur þrengingarstuðull, það er Y/op .

3.2 Fyrsta líkan

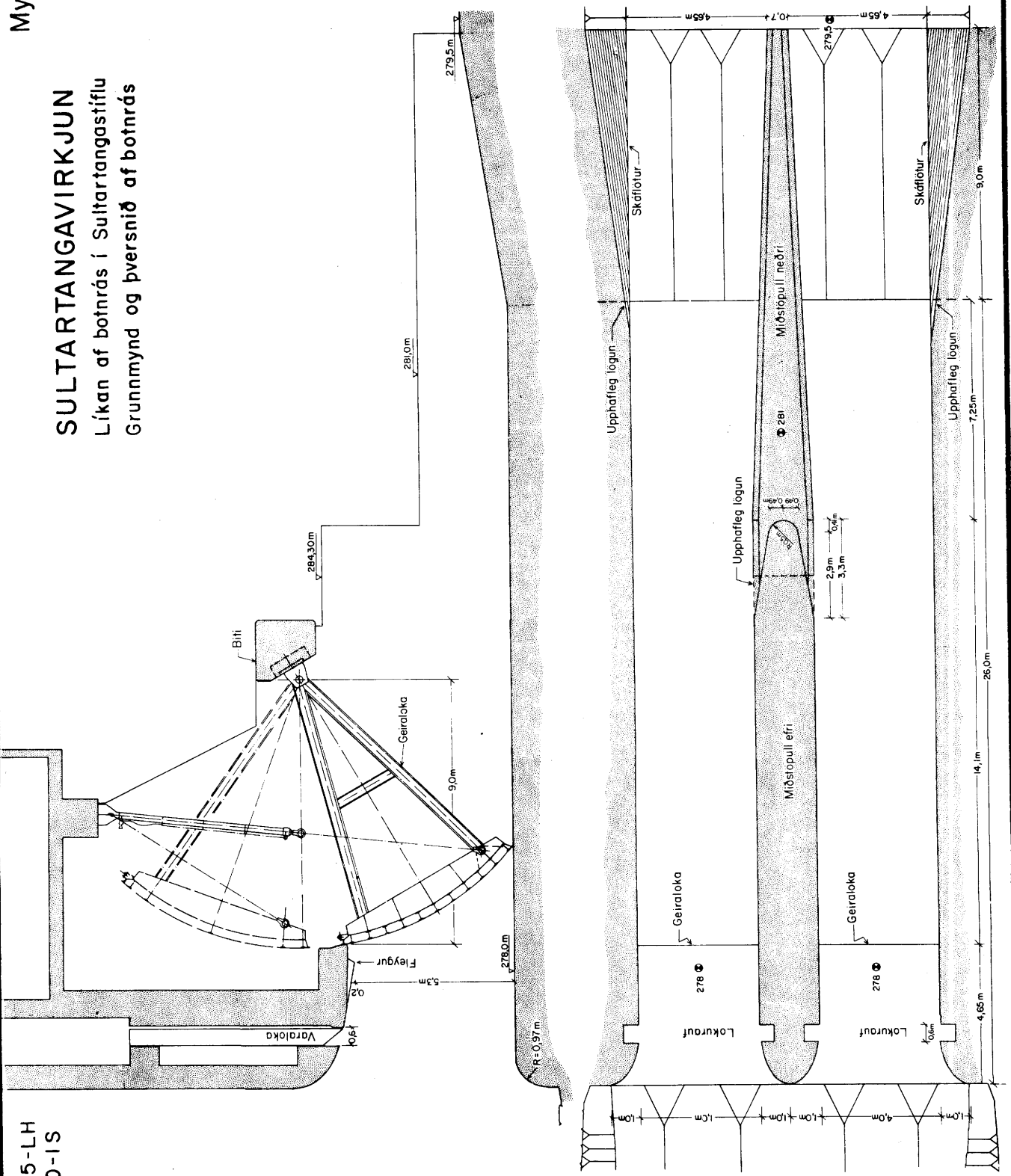
Fyrsta líkan er smíðað eftir frumteikningum (myndir 2 og 3). Í tilraunum kom í ljós að í öllum aðalatriðum var hönnunin fullnægjandi, en nokkrar breytingar þurfti að gera, sérstaklega í botnrásarskurði neðan við botnlokur. Rennsli í skurðinum var mjög órólegt, vatn skvettist langt upp á hliðar og hnútur myndast þar sem geislarnir úr botnrásunum tveim mættust (sjá ljósmyndir 1 og 2). Ef önnur loka var höfð opin en hin lokuð skvettist vatn hátt uppá hliðarveggi skurðar. Niðurstöður mælinga á rennsli, vatnshæð í lóni og vatnsborði í skurði eru gefnar í viðauka.

3.3 Tilraunir með endurbætur á líkani

Til þess að lagfæra straumlag í botnrásarskurði var hann þrengdur úr 12 m í 10 m. Við þessa aðgerð hækkaði vatnsborð í rennu um 0,8 m að meðaltali. Lítil breyting varð á vatnsborði undir bita og á flúðum. Straumlag lagaðist nokkuð þar eð vatn skvettist ekki eins upp á hliðar (sjá ljósmynd 3). Niðurstöður mælinga á vatnshæð í lóni, rennsli og vatnsborði í skurði er að finna í viðauka, mæling 5. Í viðauka eru einnig niðurstöður mælinga á öðrum tilraunum, sem fjallað er um í þessum kafla.

Mynd 4

SULTARTANGAVIRKJUN
 Líkan af botnrás í Sultartangastíflu
 Grunmynd og þversnið af botnrás



VOD-VV-845-LH
 84.06.0650-IS

Næst var skurðbotn hækkaður til þess að bæta straumlag. Hækkunin nam 0,96 m og byrjaði með fláa 1:6 10,6 m neðan bita. Fullri hækkun er náð 5,8 m neðar. Straumlag batnaði nokkuð við aðgerðina, en þó er óregla þar sem geislarnir mætast úr botnrásunum. Vatnsborð hækkði um 1 m í rennu og um 0,6 m á flúðum, en er óbreytt undir bita, (mæling 7).

Gerðar voru tilraunir með miðstöpla milli botnrásanna. Fyrst var reyndur stöpull með málín 24,9 m * 3 m * 0,96 m. Vatnsborð hækkaði um 0,2 m í rennu, nokkur lakkun var á vatnsborði á flúðum og undir bita, (mæling 8). Miðstöpull var nú stytur og breikkaður í efri enda og voru mál hans 18 m * 5 m * 0,96 m. Smá vatnsborðs hækkun varð undir bita og í rennu en vatnsborð lækkaði aðeins á flúðum, (mæling 9).

Vatnsgeisli losnaði öðru hvoru frá lofti í lokuopi. Til þess að fá stöðugra rennsli um lokuop og til þess að útiloka það að vatnsgeisli ýmist sleppi lofti eða sláist upp í loft er settur fleygur í loft rétt framan loku, (sjá mynd²4). Fleygur þrengir lokuop um 0,2 m og er því 4 m * 5,3 m = 21,2 m² hvort op. Rennslislag lagast við þessa aðgerð, (mæling 10).

Skurður neðan loku var hækkaður um 0,48 m og flái lengdur sem því svarar. Skurður hefur þá verið hækkaður um 1,44 m í heild, (mæling 11).

Síðan voru reyndar tvær gerðir af miðstöplum, sem leiddu loks til lokahönnunar hans.

3.4 Endanlegt líkan

3.4.1 Lýsing

Frá upphaflegri hönnun á mannvirkinu hafa verið gerðar fimm megin breytingar. Þær eru:

1. Botnrásarskurður mjókkaður úr 12 m í 10 m.
2. Botn botnrásarskurðar hækkaður um 1,5 m.
3. Miðstöpli milli botnrása mikið breytt.
4. Skáfletir lagðir inná hliðar í botnrásarskurði.
5. Lögun þaks framan við geiraloku breytt.

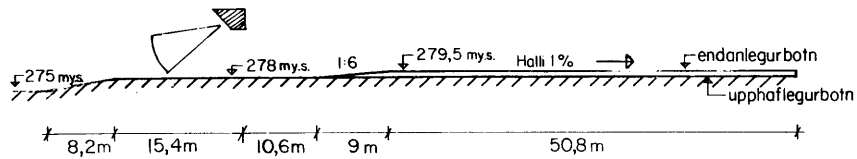
Lýsing á breytingunum kemur best fram á myndum 4 og 5. Miðstöpull í endanlegri útgáfu er tvískiptur. Efri helmingur er stuttur og rúnaður að framan en neðri helmingur er langur og lágur. Skáfletir eru lagðir inná hliðarnar þannig að ekki komi skörp brún milli þar sem hallandi veggir botnrásarskurðar taka við af lóðréttum veggjum botnrásar. Rennslislag í endanlegu líkani kemur fram á ljósmyndum 4,5 og 6.

VODVV.845-LH
84-05-0652-EP

MYND 5

SULTARTANGAVIRKJUN

Líkan að botnrás í Sultartangastíflu
Botnrásarskurður



3.4.2 Tilraun með ísrek og ísbómu

Gerð var tilraun með ísrek í inntaksskurði. Jakar úr plasti með eðlisþyngd svipaða og lagnaðarís og óreglulegir í laginu og að meðaltali sem samsvarar um 3 m í þvermál voru látnir í þróna. Jakar hrönnuðust upp að lokuvirki og einn og einn jaki stakk sér niður og fór gegnum botnlokur við rennsli 300-400 m³/s, vatnshæð í lóni 286-288 m y.s. og fullopnar lokur. Einnig var reynd ísbóma fremst í inntaksskurði til þess að stöðva ísrek. Staðsetning ísbómu er sýnd á mynd 2. Ísbóma stöðvaði jakaburð að mestu við rennsli 340-460 m³/s og vatnshæð í lóni um 292 my.s. Sjá ljósmyndir 7 og 8.

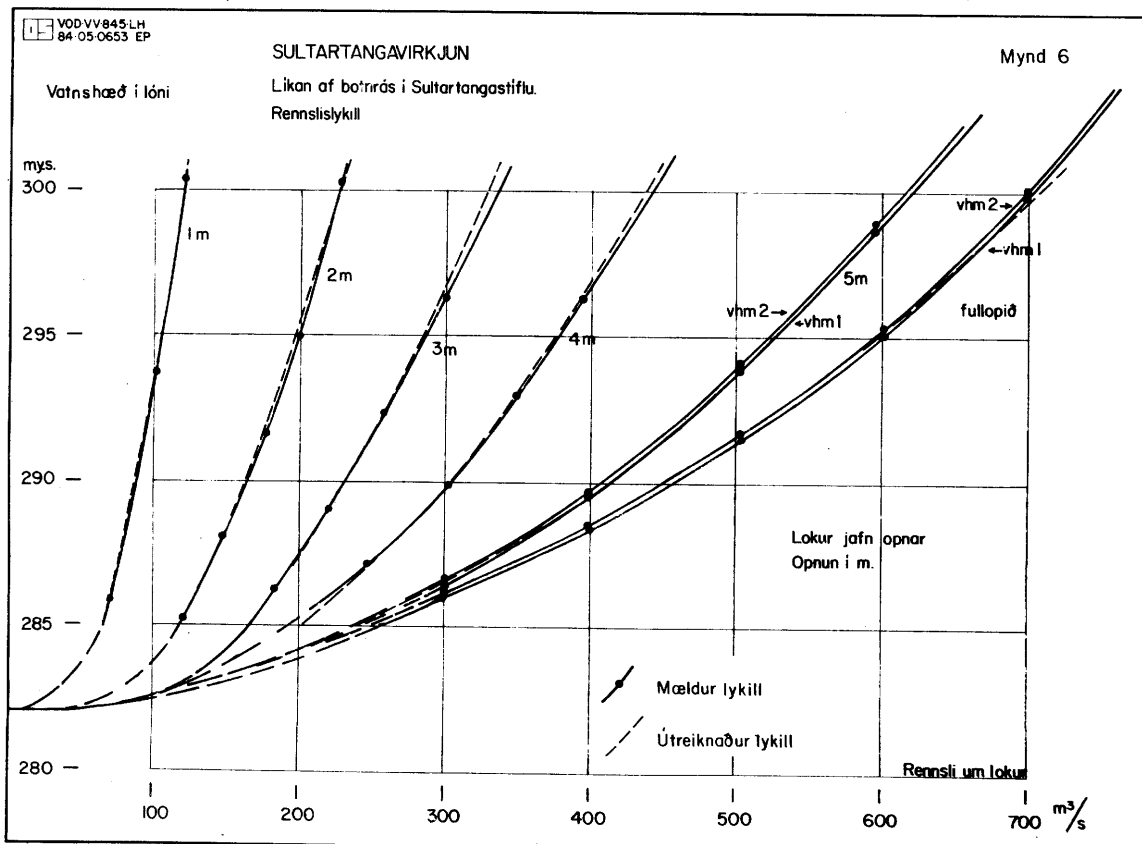
3.5 Rennslislykill

3.5.1 Niðurstöður mælinga

Rennsli er mælt fyrir lónhæðir 285 til 300 m y.s og lokuop 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m og fullopið. Niðurstöður eru skráðar í töflu 2 og á mynd 6, þar sem Q er rennsli í náttúrunni og H er vatnsborð í lóni. Vatnsborð í lóni er mælt á tveimur stöðum, í vhm 1 og vhm 2 samanber mynd 3. Vhm 2 mælir vatnsborð úti í lóni en vhm 1 mælir vatnsborð í inntaksskurði 8 m frá inntaksvirki. Vatnsborð í lóni (vhm 2) er um 0,05 m hærra en í inntaksskurði (vhm 1) við lokuop 1 til 4 m en fyrir lokuop 5 og 5,3 m er munurinn meiri. Vatnsborð í lóni er þá um 0,2 m hærra en í inntaksskurði. Einnig er gefið upp vatnsborð í botnrásarskurði.

Tafla 2 Rennslislykill

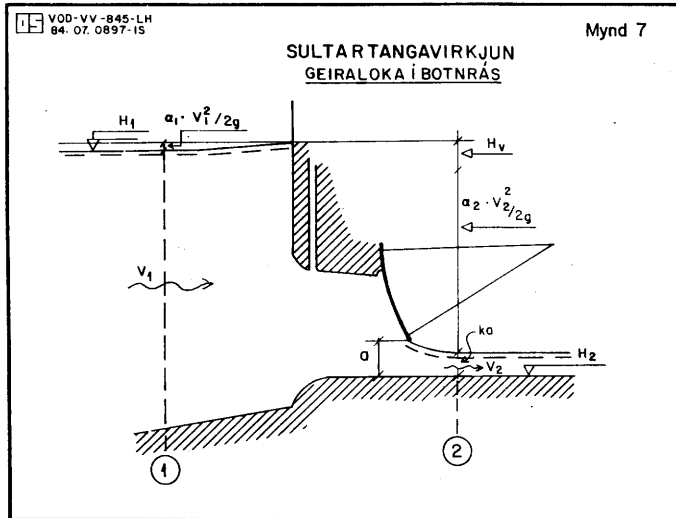
Op loku m	I		H		I		
	I	Q m ³ /s	I	m y.s.	I	Vatnsdýpi í skurði m	
	I	I	Vhm 1	Vhm 2	I	undir bita	í rennu á flúðum
1,00	I	69,67	I	285,82	285,89	I	...
1,00	I	100,44	I	293,59	293,65	I	...
1,00	I	120,54	I	300,30	300,34	I	...
2,00	I	120,39	I	285,21	285,28	I	1,47
2,00	I	147,20	I	287,97	288,05	I	1,41
2,00	I	175,90	I	291,61	291,67	I	1,47
2,00	I	198,60	I	294,91	294,97	I	1,47
2,00	I	227,40	I	300,16	300,22	I	1,47
3,00	I	183,00	I	286,39	286,41	I	2,10
3,00	I	219,80	I	289,03	289,06	I	2,13
3,00	I	259,00	I	292,37	292,39	I	2,16
3,00	I	299,20	I	296,26	296,34	I	2,16
4,00	I	246,70	I	287,06	287,13	I	2,82
4,00	I	300,50	I	289,81	289,86	I	2,94
4,00	I	348,27	I	292,89	292,93	I	2,94
4,00	I	395,10	I	296,21	296,24	I	2,94
5,00	I	300,30	I	286,33	286,60	I	4,23
5,00	I	399,90	I	289,50	289,72	I	4,23
5,00	I	503,20	I	293,83	294,05	I	4,29
5,00	I	595,60	I	298,57	298,84	I	4,32
5,3	I	299,50	I	285,88	286,10	I	4,92
5,3	I	399,90	I	288,27	288,48	I	4,89
5,3	I	503,90	I	291,40	291,67	I	4,98
5,3	I	601,10	I	294,97	295,26	I	4,95
5,3	I	700,10	I	299,76	300,01	I	5,01



3.5.2 Fræðilegir reikningar

Orkulíking fyrir rennsli um lokurnar milli sniða 1 og 2 á mynd 7 er,

$$H_1 + \alpha_1 \cdot v_1^2 / 2g = H_2 + \alpha_2 \cdot v_2^2 / 2g + k \cdot a + H_v \quad (1)$$



þar sem H_1 er mæld vatnshæð í lóni, $\alpha_1 \cdot v_1^2 / 2g$ er hraðahæð í lóni, H_2 er botnkóti í botnrás, $\alpha_2 \cdot v_2^2 / 2g$ er hraðahæð í þrengingu, $k \cdot a$ er vatnsdýpi í þrengingu þar sem a er op loku og k er þrengingarstuðull og H_v er orkutap. Orkutapið H_v er táknað með margfeldi hraðahæðar framan við loku, það er:

$$H_v = f \cdot v^2 / 2g \quad (2)$$

Rennslið er

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 = v_2 \cdot a \cdot k \cdot B \quad (3)$$

þar sem A_1 og A_2 eru þverskurðarflatarmál í sniðum 1 og 2, A er þverskurðarflatarmál fyrir framan loku og B er breidd botnrásar. Með því að taka saman líkingar 1, 2 og 3 fæst rennsliðslykillinn

$$Q = \sqrt{\frac{2g \cdot (H_1 - H_2 - k \cdot a)}{\alpha_2 / (a^2 \cdot k^2 \cdot B^2) + f/A^2 - \alpha_1/A_1^2}} \quad (4)$$

Líðurinn α_1/A_1^2 er mjög lítil stærð þar sem snið 1 er tekið úti í lóni, þar sem vatnsborð er mælt í vhm 2 og er sleppt. Hraðadreifingarstuðullinn α_2 er settur 1,0. Þrengingarstuðullinn, k , og orkutapsstuðullinn, f , eru nú ákvarðaðir út frá mælingum á vatnshæð í lóni og rennsli við mismunandi lokuop þannig að mismunur mælds og reiknaðs rennsli sé sem minnstur. Við útreikningana var notað forrit frá Verkfræðistofunni Vatnaskil. Orkutapsstuðullinn sem gaf besta niðurstöðu reyndist vera:

$$f = 0,1$$

Rennsli reiknað samkvæmt líkingu (4) ásamt mældu rennsli er sýnt í töflu 3. Rennslið er um aðra lokuna, en til þess að fá rennsli um báðar lokurnar þarf að tvöfalda rennslið. Niðurstöður reikninga á þrengingarstuðli, dýpi í þrengingu og summu kvaðratmismuna á reiknuðu og mældu rennsli eru einnig sýndar í töflu 3. Mældur þrengingarstuðull er tekinn úr töflu 1. Ágætt samræmi virðist vera milli mældra og reiknaðra stærða.

Tafla 3 Samanburður á mældum og reiknuðum stærðum

Op loku	H vhm 2 m y.s.	I I I m/s	Rennsli reiknað m/s	I I I m/s	þrengingar- stuðull mældur	I I I	Dýpi í þrengingu m	I I I m	Summa Ikvaðrat- mismuna (m ³ /s) ²
1 I	285,89	I 34,84	34,81	I ...	0,735	I ...	0,74	I 0,002	
1 I	293,65	I 50,22	50,26	I ...	0,735	I ...	0,74	I	
2 I	285,28	I 60,20	60,76	I 0,67	0,711	I 1,34	1,42	I	
2 I	288,05	I 73,60	73,74	I 0,67	0,711	I 1,34	1,42	I 0,445	
2 I	291,67	I 87,95	87,85	I 0,67	0,711	I 1,34	1,42	I	
2 I	294,97	I 99,30	98,98	I 0,67	0,711	I 1,34	1,42	I	
3 I	286,41	I 91,50	92,65	I ...	0,699	I ...	2,10	I	
3 I	289,06	I 109,90	110,40	I ...	0,699	I ...	2,10	I 2,576	
3 I	292,39	I 129,50	129,30	I ...	0,699	I ...	2,10	I	
3 I	296,34	I 149,60	148,63	I ...	0,699	I ...	2,10	I	
4 I	287,13	I 123,35	125,36	I 0,71	0,717	I 2,85	2,87	I	
4 I	289,86	I 150,25	150,23	I 0,71	0,717	I 2,85	2,87	I 5,342	
4 I	292,93	I 174,14	173,99	I 0,71	0,717	I 2,85	2,87	I	
4 I	296,24	I 197,55	196,42	I 0,71	0,717	I 2,85	2,87	I	
5 I	286,60	I 150,15	152,36	I 0,82	0,852	I 4,12	4,26	I	
5 I	289,72	I 199,95	199,73	I 0,82	0,852	I 4,12	4,26	I 5,204	
5 I	294,05	I 251,60	251,08	I 0,82	0,852	I 4,12	4,26	I	
5 I	298,84	I 297,80	297,74	I 0,82	0,852	I 4,12	4,26	I	
5,3I	286,10	I 149,75	149,67	I ...	0,957	I ...	5,07	I	
5,3I	288,48	I 199,95	200,03	I ...	0,957	I ...	5,07	I 0,150	
5,3I	291,67	I 251,95	252,22	I ...	0,957	I ...	5,07	I	
5,3I	295,26	I 300,55	300,29	I ...	0,957	I ...	5,07	I	

Lykillinn er einnig sýndur á mynd 6. Þar kemur í ljós að reiknaði lykillinn gefur yfirleitt minna rennsli við háa vatnshæð en mældi lykillinn. En við lága vatnshæð í lóni gefur reiknaði lykillinn meira rennsli en sá mældi. Lyklunum ber ágætlega sama við vatnshæðir þar á milli. Mynd 8 sýnir lokuop og útreiknaðan þrengingarstuðul.

3.6 Gangainntak opnað

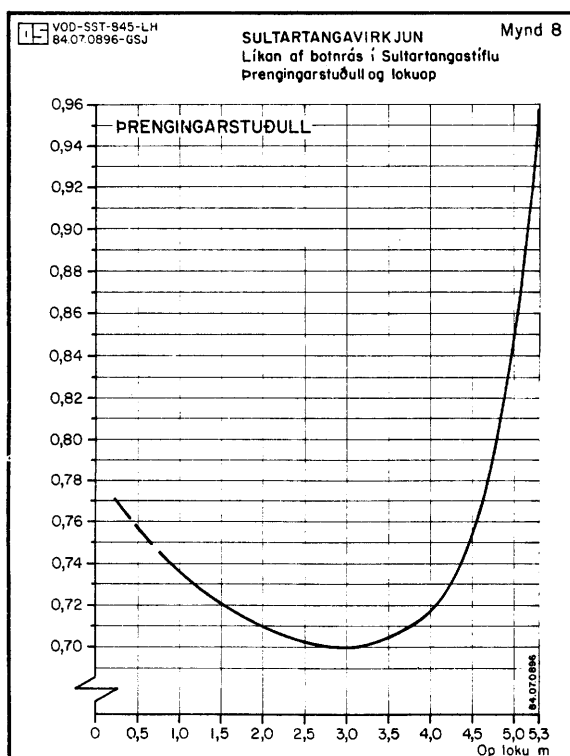
Í lok tilraunar var opnað inn að gangainntaki og gerðar athuganir á rennislislagi í inntaksskurði. Gerð voru tvö göt á spjald í enda skurðar að gangainntaki eins og fram kemur á mynd 3, snið 4. Götin hvort um sig eru $4 * 6 \text{ m}^2$ eða alls 48 m^2 . Þar sem í líkaninu var ekki gert ráð fyrir að lýsa náttúrulegum aðstæðum í göngum og vatnið steypist í fríu falli þegar það kemur út úr götunum á spjaldinu var ekki gerð tilraun til að mæla flutningsgetu gangainntaks. Til þess að athuga straumlag voru teknar myndir af því með gangainntak ýmist opið eða lokað og botnrás ýmist opna eða lokaða, sjá ljósmyndir 9,10,11 og 12.

4 SAMANBURÐUR Á MANNVIRKI OG LÍKANI

Botnrás í Sultartangastíflu hefur þegar verið í notkun einn vetur og er því ekki úr vegi að bera saman reynsluna af mannvirkinu í fullri stærð og líkanið. Það má segja að ekkert óvænt hafi komið uppá varðandi mannvirkið sjálft. En neðan við botnrásarskurðinn í farvegi Þjórsár er gjá og hefur hún grafið nokkuð út eftir að botnrásin var tekin í notkun. Ekki var í tilrauninni gerð athugun á rofhættu neðan við botnrásarskurð. Í lokahönnun botnrásarskurðar var honum breytt þannig að botninn og kverkarnar voru steiptar og verður smástallur ofan við kverkina. Þversnið skurðarins minnkar svolítið við það.

Síðastliðinn vetur var rennsli yfirleitt lítið, um $250 \text{ m}^3/\text{s}$, og var oft aðeins önnur lokan höfð opin. Við þær aðstæður rennur yfir neðri miðstöpul eins og í líkaninu. Við ísabrot í vor var rennsli sem fyrir það lítið að ísjakar stungu sér ekki niður með loku. Ísrek var einnig mjög lítið þar sem ísinn bráðnaði á lóninu og sökk.

Flutningsgeta botnrásar eins og hún mældist í líkani er borin saman við raunverulega flutningsgetu í náttúrunni. Tekið er tímabil að vori þegar ísskolun er hætt við Búrfell og allt vatn Þjórsár fer gegnum vélar Búrfellsvirkjunar og áður en farið er að reyna yfirallið á Sultartangastíflu, það er tímabilið 17. apríl til 6. maí, 1984. Í töflu 4 er þ rennsli Þjórsár við Sandafell vhm 97 meðaltal hvers dags, B er rennsli um vélar Búrfellsvirkjunar kl. 12:00, L er rennsli um lokur botnrásar í Sultartangastíflu samkvæmt rennslislykli úr líkani kl. 12:00, H er hæð vatnsborðs úti í Sultartangalóni samsvarandi Vhm 2 í líkani kl. 12:00 og O er op botnloka í m kl. 12:00 aðeins önnur lokan opin. Rennsli um botnlokur er reiknað þannig : Fyrst er á mynd 8 fundinn sá þrengingarstuðull sem lokuopið gefur, síðan er líking (4) notuð.



Tafla 4 Rennsli í Þjórsá v/Şandafell, um Búrfellsvirkjun og um Sultartangalokur

Dags.	P	B	L	H	O	P-L	P-L	B-L	B-L
1984	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m y.s.	m	m ³ /s	%	m ³ /s	%
17 .apríl	205	182	181	292,08	4,20	24	11,7	1	0,5
18 .apríl	205	189	177	292,02	4,20	28	13,7	12	6,3
19 .apríl	203	182	177	292,04	4,20	26	12,8	5	2,7
20 .apríl	193	182	167	291,94	4,01	26	13,5	15	8,2
21 .apríl	193	176	168	292,04	4,01	25	13,0	8	4,5
22 .apríl	200	184	167	291,94	4,01	33	16,5	17	9,2
23 .apríl	208	179	178	291,95	4,25	30	14,4	1	0,6
24 .apríl	208	197	179	292,06	4,25	29	13,9	18	9,1
25 .apríl	232	205	195	292,39	4,49	37	15,9	10	4,9
26 .apríl	243	212	205	292,75	4,64	38	15,6	7	3,3
27 .apríl	240	218	211	293,14	4,64	29	12,1	7	3,2
28 .apríl	243	218	214	293,45	4,64	29	11,9	4	1,8
29 .apríl	243	220	217	293,74	4,64	26	10,7	3	1,4
30 .apríl	238	213	204	294,07	4,40	34	14,3	9	4,2
1 .maí	238	222*	203	294,21	4,37	35	14,7	19	8,6
2 .maí	235	220*	202	294,23	4,34	33	14,0	18	8,2
3 .maí	235	221*	201	294,32	4,32	34	14,5	20	9,0
4 .maí	232	222*	201	294,50	4,29	31	13,4	21	9,5
5 .maí	243	224*	212	294,47	4,48	31	12,8	12	5,4
6 .maí	246	216*	211	294,39	4,48	35	14,2	5	2,3

* mælingar ekki nákvæmar

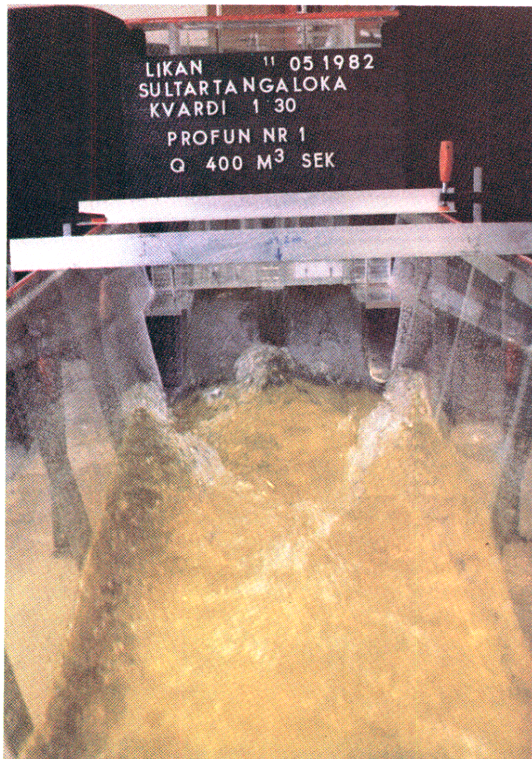
Meðaltal: 224,1 204,1 193,5 30,6 13,7 10,6 5,2

Niðurstaðan er sú að rennsli Þjórsá er um 14 % hærra en rennsli um lokur, en rennsli um Búrfell er að meðaltali 5 % hærra en rennsli um lokur. Lekur undan Sultartangastíflu, sem fram kemur í farvegi Þjórsár, hefur mælt um 7 m³/s við vatnsborð í lóni um 294 m y.s. Á tímabilinu var meðalhæð í lóni um 293 m y.s. Þannig að leki undir stíflu gæti hafa verið eitthvað minni en 7 m³/s. Það er niðurstaða þessa samanburðar að rétt sé að mæla að nýju lykilorð Sandafell og athuga hvort einhverjar breytingar hafa átt sér stað.

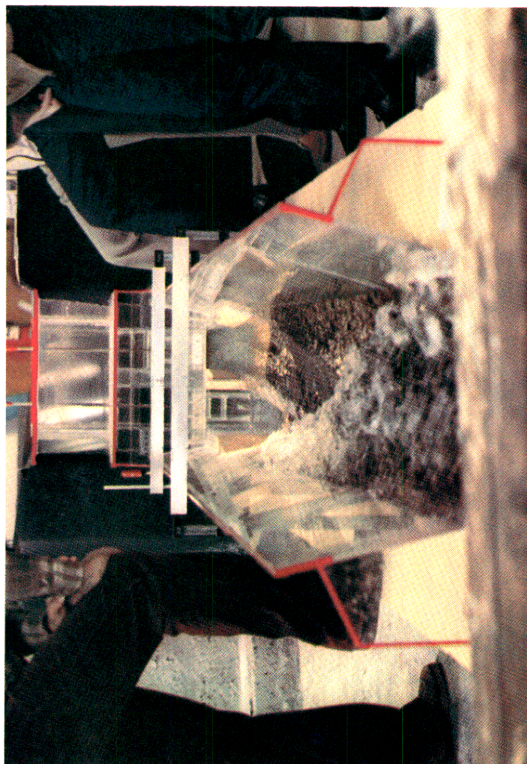
Farin var skoðunarferð á vettvangi 7. júní 1984. Þann dag voru lokur fullopnar og rennsli um þær um 620 m³/s. Tekið var upp á myndsegulband og það borið saman við sambærilegar myndir af líkaninu. Rennslislag virtist vera svipað og í líkaninu. Í líkaninu mynduðust hringiður í inntaksskurðinum ofan við lokur, sjá ljósmynd 10 og í náttúrunni eru einnig hringiður á sama stað, sjá ljósmynd 13. Við mikið rennsli í líkaninu kom fram kambur ofaná neðri miðstöpli, þegar lokur voru báðar jafnopnar. Sama gerist í mannvirkinu sjálfu, sjá ljósmyndir 14 og 15. Rennslislag í botnrásarskurði neðan miðstöplis er ólíkt því sem var í líkaninu enda eru hliðarnar í skurðinum ósléttar, þ.e. sprengt berg, en í líkaninu voru hliðarnar gerðar úr sléttu plexíglari.

5 NIÐURSTÖÐUR

Flutningsgeta botnrásarinnar reyndist í líkaninu mjög lík því sem gert var ráð fyrir í hönnun. Nokkrar breytingar voru gerðar á botnrásarskurði og miðstöpull milli botnrásanna var endurhannaður til þess að bæta straumlag þar. Skurður var mjókkaður um 2 m og hækkaður um 1,5 m frá upphaflegri hönnun, þannig að sprengingar minnkuðu um það bil 2000 m³. Með nýjum miðstöpli sem hannaður var í líkaninu er óhætt að hafa aðeins aðra lokuna opna í einu, en það var alls ekki mögulegt eins og stöpullinn var hannaður upphaflega. Ísbóma framan við inntaksskurð stöðvar ísrek. Án ísbómu safnast ís saman við botnrásina og einn og einn jaki stingur sér niður í rásina.



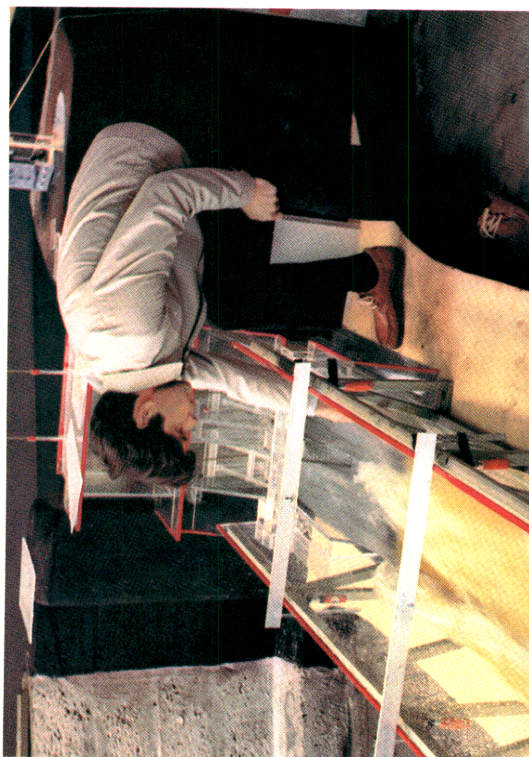
Ljósmynd 1 Fyrsta líkan, rennsli 400 m³/s



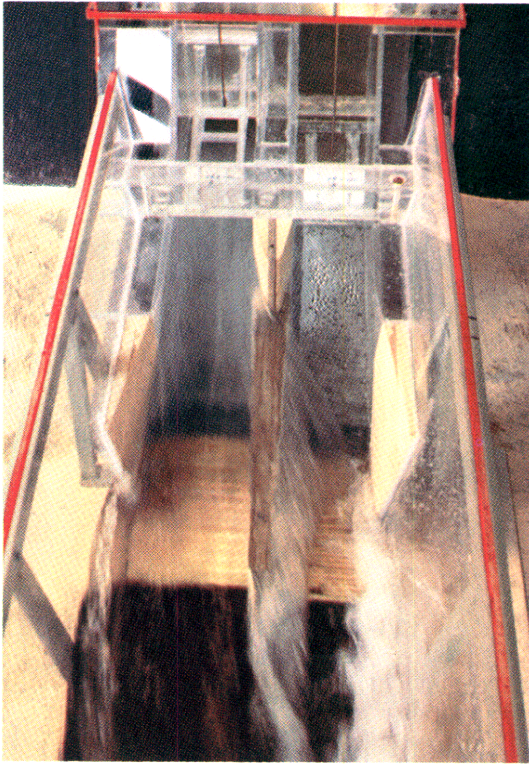
Ljósmynd 4 Endanlegt líkan, vinstri loka opin



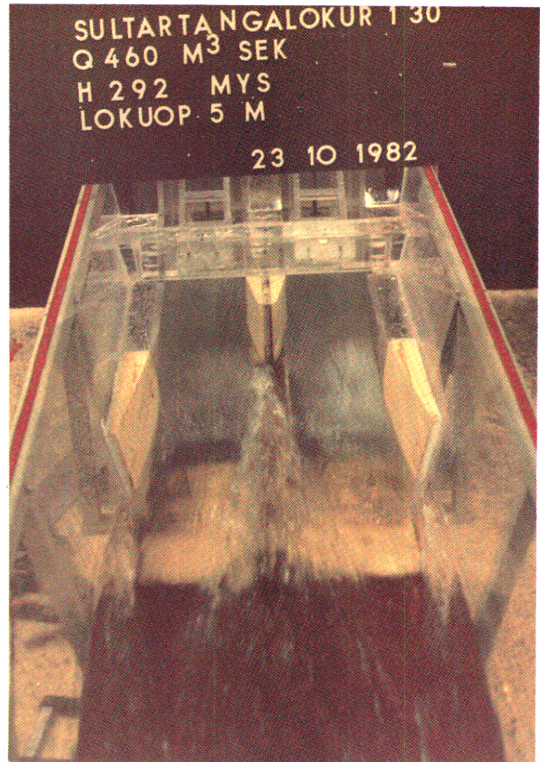
Ljósmynd 2 Fyrsta líkan, rennsli 725 m³/s



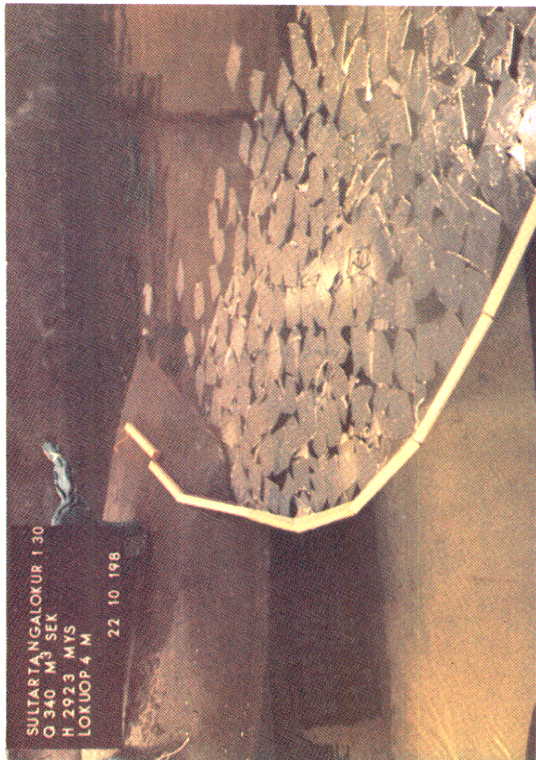
Ljósmynd 3 Breyting á líkani, botnráskurður þrengdur



Ljósmynd 5 Endanlegt líkan, hægriloka opin



Ljósmynd 6 Endanlegt líkan, báðar lokur opnar



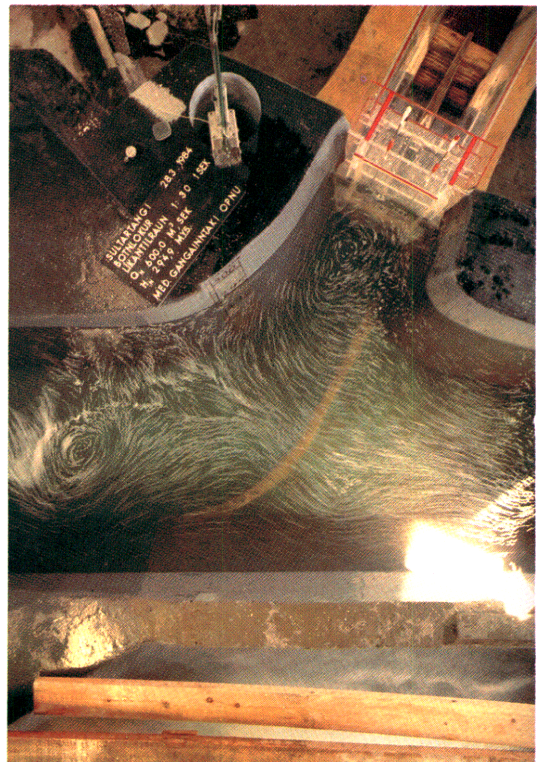
Ljósmynd 7 Ísbóma í inntaksskurði, rennsli 340 m³/s



Ljósmynd 8 Ísbóma í inntaksskurði, rennsli 460 m³/s



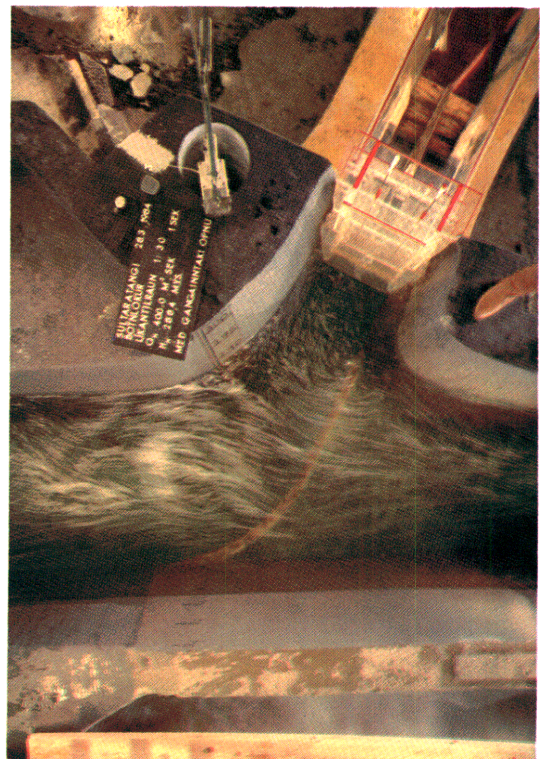
Ljósmynd 9 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak ekki með og rennsli 600 m³/s



Ljósmynd 10 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak opið, botnrás lokuð og rennsli 600 m³/s



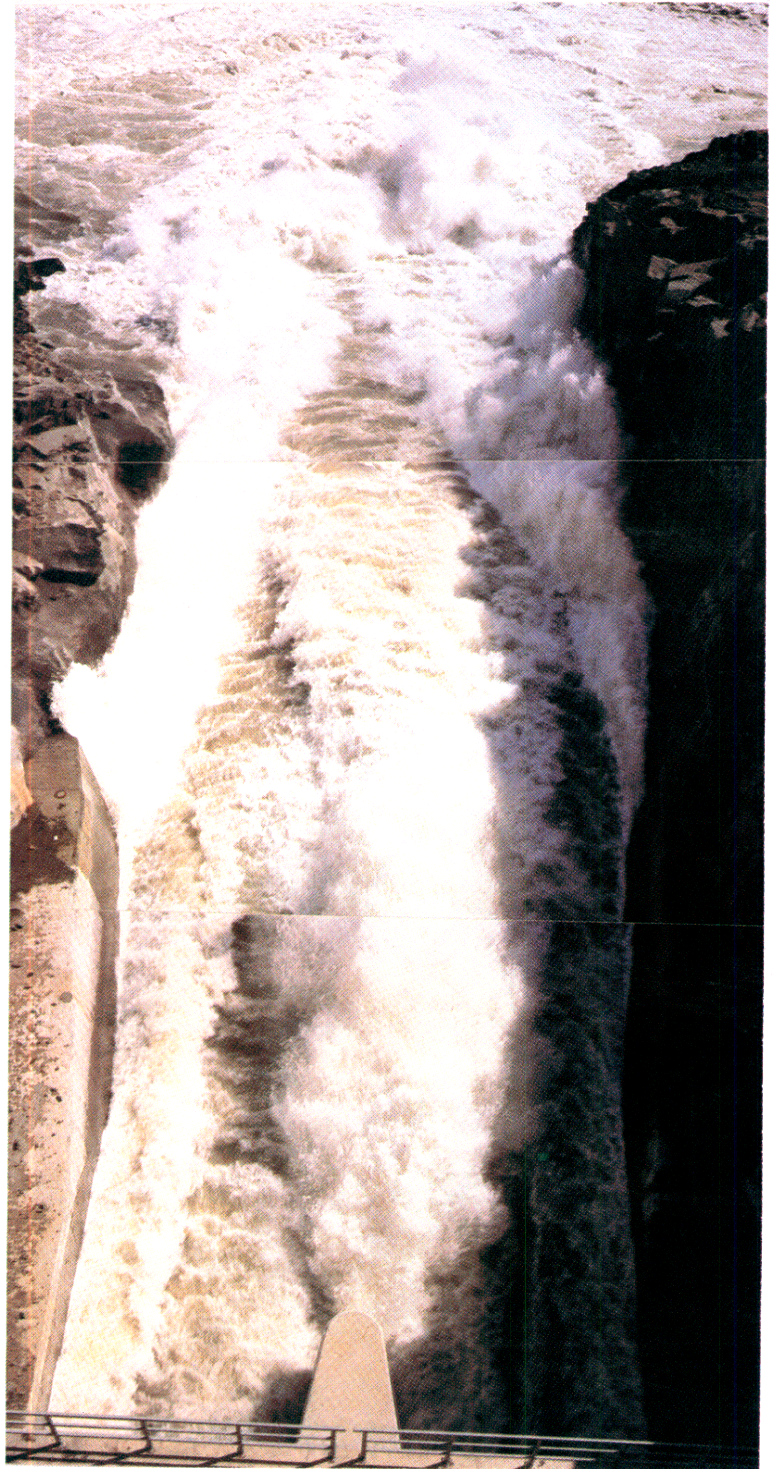
Ljósmynd 11 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak opið, botnrás opin og rennsli 600 m³/s



Ljósmynd 12 Straumlag í inntaksskurði, gangainntak opið, botnrás lokuð og rennsli 400 m³/s



Ljósmynd 13 Hringiða í inntaksskurði í náttúrunni, lokur fullopnar og rennsli um $620 \text{ m}^3/\text{s}$ (ljósm. Verkfræðist. Vatnaskil).



Ljósmynd 14 Rennslislag í botnrásarskurði í náttúrunni, lokur fullopnar og rennsli um $620 \text{ m}^3/\text{s}$ (ljósm. Verkfræðist. Vatnaskil).



Ljósmynd 15 Botnloku í Sultartangastíflu í náttúrunni, lokur fullopnar og rennsli um $620 \text{ m}^3/\text{s}$ (ljósm. Verkfræðist. Vatnaskil).

VIÐAUKI

Rennslislyklar

VIÐAUKI

Botnrás í Sultartangastíflu

Rennslislykill

Fyrsta Líkan

Op loku m	I I I I I	Rennsli m ³ /s	I I I I I	I I I I I		I I I I I		
				Vatnshæð í lóni		Vatnsdýpi í skurði		
				Vhm 1 m y.s.	Vhm2 m y.s.	undir bita m	í rennu á flúðum m	í rennu á flúðum m
2,50	I	100,42	I	282,42	282,74	1,71	1,82	4,90
2,50	I	147,20	I	285,42	285,49	1,74	0,86	6,10
2,50	I	198,40	I	289,93	290,00	1,77	1,01	3,10
2,50	I	245,70	I	295,39	295,44	1,74	1,54	2,89
2,50	I	291,60	I	301,27	301,33	1,80	1,94	2,89
4,00	I	153,70	I	282,84	283,05	2,82	2,51	2,39
4,00	I	198,60	I	284,91	285,03	2,73	1,46	2,96
4,00	I	245,50	I	286,91	287,04	2,85	1,34	3,59
4,00	I	299,20	I	289,65	289,77	2,94	1,46	3,92
4,00	I	349,10	I	292,88	292,98	2,91	1,73	4,10
4,00	I	397,80	I	296,38	296,49	2,94	2,30	7,10
4,00	I	439,60	I	299,89	299,99	2,94	4,69	7,25
fullopið	I	198,40	I	283,99	284,17	3,54	2,90	3,14
fullopið	I	198,60	I	283,95	284,16	3,30	2,99	3,11
fullopið	I	227,40	I	284,53	284,76	3,78	2,99	3,11
fullopið	I	266,60	I	285,26	285,50	4,38	2,54	3,53
fullopið	I	298,70	I	285,90	286,16	4,80	2,54	4,04
fullopið	I	300,50	I	285,91	286,18	4,68	2,57	4,04
fullopið	I	348,60	I	286,92	287,26	4,68	2,54	4,46
fullopið	I	397,50	I	288,17	288,49	4,71	2,60	4,85
fullopið	I	398,10	I	288,18	288,48	4,71	2,54	4,88
fullopið	I	502,80	I	291,29	291,51	4,80	2,24	5,00
fullopið	I	596,40	I	294,83	295,08	4,95	2,87	5,21
fullopið	I	701,70	I	299,64	299,91	4,98	3,20	5,75
fullopið	I	726,70	I	300,70	301,02	5,07	3,35	5,90

VIÐAUKI

Botnrás í Sultartangastíflu Rennslislykill Ýmsar breytingar á líkani

Mælingar 5 til 11

Mæling nr.	Rennslí m^3/s	Vatnshæð í lóni m	Vhm 1 $m y.s.$	Vhm 2 $m y.s.$	Vatnsdýpi í skurði m	undir bita m	í rennu á flúðum m
5	198,00	283,96	284,12	3,33	3,11	3,01	
5	297,70	285,86	286,13	4,65	3,29	3,85	
5	398,10	288,17	288,41	4,83	3,41	4,85	
5	502,10	291,29	291,52	4,80	3,17	4,99	
5	594,50	294,81	295,05	4,89	3,53	5,35	
5	703,00	299,61	299,91	4,95	4,07	6,05	
5	727,60	300,75	301,09	5,07	3,95	5,93	
7	447,70	289,54	289,79	4,92	4,19	5,51	
7	501,40	291,25	291,49	4,92	4,19	5,39	
7	698,76	299,40	299,69	4,95	5,00	6,53	
7	728,00	300,84	301,14	5,13	5,09	6,53	
8	447,40	290,46	290,77	4,53	4,03	5,36	
8	601,10	296,87	297,10	4,65	4,19	5,51	
8	686,90	301,50	301,41	4,56	4,67	5,69	
9	502,50	291,84	292,07	4,80	4,15	4,91	
9	602,60	295,93	296,21	4,77	4,43	5,23	
10	445,10	289,69	290,02	4,74	4,33	4,85	
10	502,80	291,55	291,82	4,74	4,15	4,50	
10	600,30	295,51	295,81	4,77	4,43	4,93	
10	702,20	300,22	300,56	4,83	4,79	5,45	
11	446,00	289,57	289,88	4,92	4,85	5,05	
11	599,10	295,09	293,40	5,01	4,85	5,00	
11	702,20	299,72	300,05	5,04	5,47	5,29	
