



ORKUSTOFNUN
Vatnsorkudeild



Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen hf.
Verkfræðiráðgjafar FRV

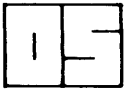
VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Hefti I: Aðaltexti

Fylgiskjöl 1-11

OS-85121/VOD-07

Reykjavík, desember 1985



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík



Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen hf.
Verkfræðiráðgjafar FRV

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Hefti I: Aðaltexti

Fylgiskjöl 1-11

OS-85121/VOD-07

Reykjavík, desember 1985

FORMÁLI ORKUSTOFNUNAR

A undanförunum árum hefur verið í notkun á Vatnsorkudeild Orkustofnunar reiknilíkan til þess að reikna virkjunarkostnað. Þetta líkan byggir á eftirfarandi þrem meginþáttum:

1. Aðferðum til þess að ákvarða stærðir og efnismagn helstu mannvirkja.
2. Aðferðum til þess að áætla byggingarkostnað mannvirkja.
3. Aðferð til þess að meta orkumátt virkjana.

Líkanið var fyrst gert um 1978 af Gunnlaugi H. Jónssyni þá starfsmanni á Raforkudeild Orkustofnunar en nú forstjóra Stjórnarsýsludeildar. Á næstu árum áður hafði verið unnið mikið starf í áætlanagerð um vatnsaflíð á Austurlandi af þremur verkfræðistofum, þ.e. Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen, Almennu Verkfræðistofunni og Virki. Verkið var unnið fyrir Orkustofnun og Rafmagnsveitur ríkisins. Til þess að samræma áætlanir þessara þriggja verkfræðistofa voru samdir hönnunarstaðlar til að meta stærðir og efnismagn í mannvirki og áætla kostnað. Þessir staðlar voru uppistaðan í fyrstu gerð virkjanalíkansins.

Virkjanalíkanið er notað við forathuganir á virkjunum. Í líkaninu eru margar einfaldanir, sem gera það að verkum að það er ekki ætlað til eiginlegrar hönnunar. Gagnsemi þess er fyrst og fremst fólgin í gerð lauslegra áætlana um virkjanir út frá takmörkuðum gögnum. Þesskonar áætlanir eru mikilvægar við kortlagningu á vatnsorku landsins og val á virkjanakostum til frekari rannsókna.

Forsendur sem gengið er út frá í virkjanalíkaninu, að því er varðar kostnað o.fl., þarf að endurskoða reglulega. Slík endurskoðun hefur nú verið gerð á Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen að beiðni Orkustofnunar, og er gerð grein fyrir henni í eftirfarandi skýrslu. Njótum við þar góðs af hönnunarvinnu verkfræðistofunnar að virkjunum fyrir Landsvirkjun, en vegna þeirrar vinnu fylgist stofan mjög vel með verðbreytingum á sviði mannvirkjagerðar fyrir virkjanir. Auk síðustu endurskoðunar kostnaðarjafna er hér safnað saman ýmsum athugunum tengdum hönnun virkjana sem líta má á sem bakgrunn fyrir virkjanalíkanið. Sérstaklega á það við um viðaukana í fyrra bindi skýrslunnar, en viðaukarnir í seinna bindinu tengjast meira raunverulegri hönnun. Flestir viðaukana eru upprunalega samdir fyrir Landsvirkjun en birtir í þessu riti með vitund hennar og vilja.

Það er von okkar á Orkustofnun að þessi skýrsla geti orðið nýtileg handbók um mörg atriði sem tengjast hönnun vatnsorkuvera og mati á vatnsorku landsins. Með það í huga er hún gefin út.

Reykjavík í desember 1985

Haukur Tómasson



**Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen hf.
Verkfræðiráðgjafar FRV**

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

STÖÐVARHÚS

$$K_{SH} = 239 \left[\frac{n N}{H} \right]^{0,3}, \quad \text{Mkr} \quad (\text{jafna [4.1] bls. 26})$$

$$\text{eða } K_{SH} = 143,5 N^{0,45} H^{-0,3}, \quad \text{Mkr} \quad (\text{jafna [4.3] bls. 26})$$

VÉLAR OG RAFBÚNAÐUR (jafna [4.5] bls. 26)

$$K_{VR} = 4,2 \left[\frac{5,7n + 0,75}{H^{0,5}} + 0,77n + 0,16 \right] \left[\frac{N}{n} + 20 \right], \quad \text{Mkr}$$

$$\text{eða } K_{VR} = 46,04 N^{0,826} H^{-0,183}, \quad \text{Mkr} \quad (\text{jafna [4.6] bls. 27})$$

STÖÐVARHÚS OG VÉLBÚNAÐUR (jafna [4.8] bls. 28)

$$K_{SV} = 105 N^{0,75} H^{-0,22}, \quad \text{Mkr}$$

ADKOMUGÖNG (jafna [4.4] bls. 26)

$$K_{AG} = 150 L, \quad \text{Mkr}$$

BOTNRÁSIR (jafna [5.1] bls. 29)

$$K_{BR} = 0,042 HHQ_0^{0,5} (h_{\max} + 30), \quad \text{Mkr}$$

STÖÐVARINNTAK (jafna [5.2] bls. 29)

$$K_{SI} = 3,4 Q^{0,73}, \quad \text{Mkr}$$

VEITUINNTAK (jafna [5.3] bls. 29)

$$K_{VI} = 1,5 [(YV - LV)Q]^{0,5}, \quad \text{Mkr}$$

STÖÐVARBYGGÐ (jafna [5.4] bls. 29)

$$K_{SB} = 24 + 0,06 N, \quad \text{Mkr}$$

VEGAGERÐ (jafna [5.5] bls. 30)

$$K_{VG} = 1,15a + 1,9b, \quad \text{Mkr}$$

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

Stofnkostnaður á verðlagi í desember 1984

Í greinargerð frá desember 1985 miðast allur áætlaður kostnaður við verðlag í desembermánuði 1983. Kostnaðarjöfnur hafa verið endurskoðaðar miðað við verðiag og gengi í desembermánuði 1984, sbr. eftirfarandi yfirlit.

ALSTÍFLUR (jafna [2.1] bls. 12)

$$K_{SA} = \sum_{i=1}^n [443 h_i^2 + 3803 h_i + 3911] 10^{-6} l_i, \text{ Mkr}$$

YFIRFALLSSTÍFLUR (jafna [2.2] bls. 14)

$$K_{SY} = \sum_{i=1}^n [3305 h_i^2 + 31580 h_i + 36549] 10^{-6} l_i, \text{ Mkr}$$

LÁGPRÝSTIGÖNG (jafna [3.4] bls. 17)

$$K_{LG} = 9,085 Q^{0,527} + 25, \text{ Mkr/km}$$

VEITUGÖNG (jafna [3.2] bls. 16)

$$K_{VG} = 9,421 d^{1,1908} + 25, \text{ Mkr/km}$$

FALLGÖNG (jafna [3.8] bls. 20)

$$K_{FG} = 17,35 H^{0,04} Q^{0,55} H^{0,03} + 50, \text{ Mkr/km}$$

PRÝSTIPÍPUR (jafna [3.10] bls. 22)

$$K_{PP} = 1,5 \left[[8 + 0,0109 H^{1,2} - 0,289 H^{0,6}] d^{2,1} + 10 \right] \text{ Mkr/km}$$

ADRENNSLISSKURÐIR (jafna [3.11] bls. 25)

$$[485V_S + 100V_G + 255V_f] 10^{-6}, \text{ Mkr}$$

VEITU- OG FRÁRENNSLISSKURÐIR (jafna [3.12] bls. 25)

$$[370V_S + 100V_G + 255V_f] 10^{-6}, \text{ Mkr}$$

FORMÁLI

Eftirfarandi greinargerð er samin í því skyni, að unnt verði að bera saman virkjunarkosti með hóflegum tilkostnaði, áður en ráðizt yrði í kostnaðarsamari undirbúning og áætlanagerð.

Augljóst er að í því markmiði verður að stytta sér leið með ýmsum nálgunum, sem í sumum tilvikum eru umdeilanlegar. Það er hins vegar von okkar, að slík einföldun hafi ekki marktæk áhrif á niðurstöður eða öllu heldur notagildi þeirra.

Verk þetta hefur orðið mun umfangsmeira en í upphafi var ætlað. Sjálfar hönnunar- og kostnaðarforsendurnar skipa þar tiltölulega lítið rúm, en í fylgiskjölum er leitast við að skýra hugtök og aðferðir, sem að baki liggja.

Í langflestum tilvikum eru þannig bein tengsl milli fylgiskjala og forsendna, en að öðru leyti er þar fjallað um mál sem upp hafa komið í starfi okkar undanfarinn áratug að áætlanagerð og hönnun vatnsorkuvera á Íslandi og þá einkum fyrir Landsvirkjun. Með því höfum við viljað halda til haga ýmsu, sem að gagni mætti koma í framtíðinni, þótt það tengdist ekki beint umræddu verkefni.

Í fylgiskjali 1 er m.a. gerð grein fyrir áætlun okkar um nýtanlega vatnsorku á Íslandi, sem að stofni til er frá árinu 1978. Eftir að áætlun Orkustofnunar um tæknilega virkjanlegt vatnsafl á Íslandi, 64 TWh/a, lá fyrir á árinu 1981, hefði mátt álykta, að í áætlun okkar væri nýtanleg vatnsorka, 31 TWh/a, vanreiknuð. Með hliðsjón af breyttu verðmætamati á orku undanfarin ár er heldur ekki ólíklegt að svo kunni að reynast, þótt aukin áherzla á verndun umhverfis vegi þar á móti. Þessu til áréttingar má til dæmis nefna, að á árinu 1952 var heildarorka í rennandi vatni í heiminum talin 49.000 TWh/a en þar af væri tæplega tíundi hluti þess virði að virkja, 4.700 TWh/a (Mosonyi 1966). Á árinu 1976 var nýtanleg orka hins vegar áætluð um það bil 9.700 TWh/a (World Energy Conference of Energy Resources, 1976). Á Íslandi er orka í rennandi vatni talin 187 TWh/a (Orkustofnun) og er áætlun okkar um nýtanlega orku því sem næst sjötti hluti hennar. Umræddar efasemdir hafa þó líklega lítil áhrif á áætlun um jafnaðarlegan stofnkostnað vatnsorkuvera á Íslandi, en á honum byggjast m.a. veigamiklar hönnunarforsendur um jaðarkostnað.

Í fylgiskjali 2 er fjallað um uppbyggingu kostnaðaráætlana. Þar er farið inn á nokkuð nýjar brautir að því er varðar hlutdeild ófyrirséðs kostnaðar í áætlunum á frumstigum hönnunar. Þá er nú meðtalinn áætlaður meðalkostnaður vegna vatnsréttinda og landspjalla, en sá þáttur var áður ótalinn í áætlunum verkfræðiráðgjafa.

Í fylgiskjöllum 3 til 5 er fjallað um orkukostnað og jaðarkostnað afls og orku. Hér hljóta niðurstöður að verða umdeilanlegar og ekki sízt vegna þess, hversu þær eru háðar tölulegum forsendum um vexti, vöxt orkuþarfar o.fl. Vandamál þetta varðar einna mest jaðarkostnað orku, þar sem niðurstöður byggjast einnig á verulegri einföldun á því, hvernig vaxandi orkuþörf er fullnægt með röð virkjana. Við höfum talið þetta leyfilegt við áætlanagerð á frumstigum hönnunar, en niðurstöður hafa engu að síður verið lagðar til grundvallar að ákvörðun á hagkvæmustu víddum vatnsvega o.fl. á síðari hönnunarstigum undanfarin ár.

Dæmi um fylgiskjal, sem einna sízt tengist sjálfum hönnunarforsendum, er fylgiskjal 16, þar sem allitarlega er fjallað um leka úr uppistöðulónum og áhrif þéttiaðgerða. Þar leggjum við áherzlu á, að aðstæður séu kannaðar ítarlega, áður en kemur til framkvæmda, þar sem annars sé öldungis óvíst, að þéttingar hafi tilætluð áhrif og svári kostnaði.

Okkur er ljóst að hönnunarforsendur þessar eru á engan hátt hafnar yfir gagnrýni. Margsinnis er því bent á að nota þær með varúð og þá sérstaklega gæta þess að fara ekki út fyrir tilgreind gildismörk. Við viljum því hvetja til umræðna um þessi efni sem leiða mættu til leiðréttinga á því sem miður hefur farið. Hins vegar má ekki gleyma markmiðinu, að skapa grundvöll að einfaldri áætlanagerð á frumstigum virkjunarrannsóknna, þegar nákvæmari áætlanir svara ekki kostnaði.

Við vonum að hér hafi a.m.k. verið lagður vísir að almennum og hagrænum forsendum að áframhaldandi nýtingu vatnsorku á Íslandi. Gildi slíkra forsendna er e.t.v. ekki sízt fólgið í því, að þær myndu stuðla að samræmdum vinnubrögðum að þessu leyti. Meðal annars með tilliti til þess teljum við þær ekki síður mikilvægar en eiginlegar forsendur að lokahönnun einstakra vatnsorkuvera.

VST hf.



Loftur Þorsteinsson

VIRKJANALÍKAN OS

EFNI	bls.
FORMÁLI	i
SKRÁ YFIR FYLGISKJÖL	2
INNGANGUR	3
I. HELZTU EINKENNISSTÆRÐIR VATNSAFLSVIRKJANA	5
II. STÍFLUR	10
Markmið og stíflugerðir	10
Alstíflur	10
Yfirfallsstíflur	12
III. VATNSVEGIR	15
Markmið og vatnsvegagerðir	15
Lágprýstigöng	16
Fallgöng	20
Prýstipípur	22
Skurðir	23
Veitugöng	25
IV. STÖÐVARHÚS OG VÉLBÚNAÐUR	26
Stöðvarhús	26
Vélar og rafbúnaður	26
V. ÖNNUR MANNVIRKI	29
Botnrásir	29
Stöðvarinntak	29
Veituinntak úr miðlunarlóni	29
Stöðvarbyggð	29
Vegagerð	30
Vatnsvarnir	30
Aðrir kostnaðarpættir	30

FYLGISKJÖL

Í HEFTI I:

1. Áætlun um vatnsorku á Íslandi og líklegan kostnað við að nýta hana
2. Áætlanir um stofnkostnað
3. Orkukostnaður við stöðvarvegg og hagkvæmasta virkjunarstærð
4. Jaðarkostnaður afls og samræmdur stofnkostnaður
5. Leyfilegur jaðarkostnaður orku
6. Rekstrarfallhæð
7. Jaðarkostnaður við ákvörðun á hagkvæmstu víddum vatnsvega
8. Orkutöp í vatnsorkuverum og raforkukerfi
9. Fjöldi og gerð vatnshverfla
10. Falltöp og hagkvæmstu víddir vatnsvega
11. Vatnafræðilegar forsendur

Í HEFTI II:

12. Orkuvinnslugeta
13. Þrýstingsjöfnun
14. Ísamál
15. Tilhögun rannsókna og flokkun virkjunaráætlana
16. Leki úr uppistöðulónum og áhrif þéttiaðgerða
17. Falltöp í sprengdum göngum
18. Drög að orðasafni með enskum þýðingum
19. Stærð og þyngd francishverfla
20. Stærð og þyngd kaplanhverfla
21. Stærð og þyngd peltonhverfla
22. Stofnkostnaður stöðvarhúsa ásamt vélum og búnaði
23. Nýtni francishverfla
24. Orkuvinnsla í vatnsorkuverum 1920 til 1984
25. Áreiðanleiki kostnaðaráætlana
26. Þversniðslögun jarðganga
27. Orkuverð sem fall af nýtingartíma

VIRKJANALÍKAN OS

INNGANGUR

Eftirfarandi hönnunar- og kostnaðarforsendur fyrir vatnsaflsvirkjanir eru samdar í því skyni að unnt verði að bera saman mismunandi virkjunarkosti á einfaldan hátt og með hóflegum tilkostnaði, áður en ráðizt yrði í kostnaðarsamari undirbúning og áætlanagerð.

Hönnunarstig

Undirbúningi og hönnun vatnsaflsvirkjana hefur verið skipað á fimm stig.

1. FORATHUGUN
2. FRUMHÖNNUN
3. VERKHÖNNUN
4. ÚTBOÐSGÖGN
5. LOKAHÖNNUN

Að lokinni verkhönnun er tekin ákvörðun um, hvort ráðast skuli í framkvæmdir. Greinileg þáttaskil í virkjanaundirbúningi verða því að jafnaði milli verkhönnunar og útboðsgagnagerðar, en skil milli annarra hönnunarstiga eru í mörgum tilvikum óglögg. Á lægri stigum mótast þau fyrst og fremst af því, hversu ítarleg frumgögn eru fyrir hendi, en þau eru m.a. landsuppdrættir, rannsóknir á jarðlagaskipan og tiltæku byggingarefni og vatnafræðilegar athuganir.

Umræddar hönnunarforsendur, sem nefndar hafa verið "Virkjanalíkan Orkustofnunar" eru eingöngu ætlaðar til nota á forathugunarstigi, en áætlanir á því stigi eru að jafnaði þáttur í gerð samanburðar- og mynzturáætlana um orkunýtingu á tilteknum vatnasviðum.

Flokkun vatnsorkuvera

Vatnsorkuverum er skipað í þrjá flokka eftir stærð (afli):

A	STÓRVIRKJANIR	$10 \leq N$	MW
B	SMÁVIRKJANIR	$0,1 \leq N < 10$	MW
C	ÖRVIRKJANIR (bændavirkjanir)	$N < 0,1$	MW

Á næstu árum verður vart talið hagkvæmt að byggja minni virkjanir til almennrar orkuöflunar en 25 til 30 MW. Vegna yfirlitsathugana á virkjanlegri vatnsorku liggur þó fyrir að áætla mun minni virkjanir, allt niður í 4 til 5 MW og e.t.v. enn minni.

Önnur flokkun vatnsorkuvera, sem tíðkæpt hefur, er eftir hönnunarfallhæðum:

a	HÁFALLSVIRKJANIR	$300 \leq H$	m
b	MIÐFALLSVIRKJANIR	$30 \leq H < 300$	m
c	LÁGFALLSVIRKJANIR	$H < 30$	m

Flestar fyrirhugaðar virkjanir á Íslandi eru miðfallsvirkjanir.

Gildissvið hönnunarforsendanna

Við gerð þessara hönnunar- og kostnaðarforsendna hefur verið höfð hliðsjón af nýlegum áætlunum um vatnsaflsvirkjanir hér á landi, og hefur gildissvið þeirra m.a. mótætt af því.

Í grófum dráttum má líta svo á, að forsendurnar gildi um mið- og háfallsvirkjanir í flokki stórvirkjana með meira afli en um það bil 30 MW.

Forsendurnar byggjast að mörgu leyti á verulegum einföldunum. Vegna þess er augljós hættu á misnotkun þeirra, nema full aðgát sé höfð og þess t.d. gætt, að ekki sé farið út fyrir tilgreind gildismörk.

I HELZTU EINKENNISSTÆRÐIR VATNSAFLSVIRKJANA

$M \Sigma aQ$: meðalrennsli á virkjunarstað, Gl/a

Árlegt meðalrennsli til virkjunar

Q : hönnunarrennsli, m^3/s

Vatnsnotkun hverfla við ástimplað afl og hönnunarfalshæð.

H_{br} : verg fallhæð, m

Verg fallhæð reiknast í m sem mismunur á yfirfallshæð inntakslóns og bakvatnshæð við venjulegar aðstæður og fullt álag.

H : hönnunarfalshæð, m

(Fylgiskjal 10)

Hönnunarfalshæð (raunfallhæð við aflákvörðun) reiknast sem mismunur vergrar fallhæðar og falltapa, ΔH m, við fullt álag,

$$H = H_{br} - \Delta H, \text{ m}$$

H^* : rekstrarfallhæð, m

(Fylgiskjal 6)

Rekstrarfallhæð (raunfallhæð við orkuvinnsluákvörðun) reiknast af jöfnunni,

$$H^* = H_{br} - \gamma \Delta H - h, \text{ m.}$$

Stuðull $\gamma \leq 1$ er háður rennislislangæi um vatnsvegi og h er mismunur á yfirfallshæð og venjulegri vatnsborðshæð í inntakslóni.

P_t : afl vatnshverfils, kW

(Fylgiskjal 9)

Afl vatnshverfils reiknast af jöfnunni,

$$P_t = 9QH, \text{ kW,}$$

þar sem Q er vatnsnotkun vélar við fullt álag (ástimplað afl) í m^3/s (nýtni vatnshverfils, $\eta_T \approx 0,918$)

N: afl rafala, MW

Afl rafala reiknast af jöfnunni,

$$N = 0,00875 QH, MW \quad (\text{nýtni rafala, } \eta_G \approx 0,972)$$

E_T: verg orka, GWh/a

(Fylgiskjal 8)

Verg orka á virkjunarstað reiknast af jöfnunni,

$$E_T = \frac{H_{br} M \sum aQ}{367}, \quad \text{GWh/a}$$

E_R: rennslisorka, GWh/a

(Fylgiskjal 8)

Rennslisorka er skilgreind sem orkuvinnsla virkjunarinnar, þegar árlegt meðalrennsli nýtist að fullu. Hún ákvarðast af jöfnunni,

$$E_R = \frac{H^* M \sum aQ}{415,6}, \quad \text{GWh/a,}$$

þegar $\eta = \eta_T \eta_G \eta_S \approx 0,883$ er áætlað meðalgildi á heildarnýtni vatnshverfla, rafala og annars rafbúnaðar á virkjunarstað.

E: orkuvinnslugeta, GWh/a

(Fylgiskjal 12)

Orkuvinnslugeta (orkumáttur) virkjunar (orka við stöðvarvegg) er skilgreind sem sú viðbót í orkuvinnslu, sem virkjunin leiðir af sér í samrekstri við aðrar virkjanir á samtengdum orkuveitusvæðum.

Orkuvinnslugetan er m.a háð rennslisháttum og stærð miðlunarrýmis. Gerð þess virkjanakerfis sem virkjunin tengist við getur haft úrslitaáhrif á niðurstöður orkuvinnslureikninga.

Við samanburðar- og hagkvæmnisathuganir er orkuvinnslugeta ákvörðuð sem fall af miðlunarrými í Gl,

$$E = f(M), \quad \text{GWh/a}$$

E_N : orka til notenda, GWh/a

(Fylgiskjal 8)

Orka til notenda reiknast,

$$E_N = 0,86 E \text{ GWh/a,}$$

þegar töp í meginflutnings- og dreifikerfi reiknast 14 af hundraði orku við stöðvarvegg.

E_M/E_R : miðlunarstig

(Fylgiskjal 12)

Hlutfall orkuinnihalds miðlunarlóna af rennslisorku virkjanakerfisins.

T: nýtingarstundir, kh/a

Nýtingartími á uppsettu aflri reiknast af jöfnunni,

$$T = E/N, \text{ kh/a,}$$

þar sem E er orkuvinnslugeta í GWh/a og N uppsett afl alls í MW.

Í yfirlitsáætlunum miðast uppsett afl að jafnaði við ársálagstuðul $\lambda = T/8,76 = 0,6$. Þá er samræmdur nýtingartími $T = T_s = 5,256 \text{ kh/a}$.

K: stofnkostnaður, Mkr

(Fylgiskjal 2)

Stofnkostnaði vatnsaflsvirkjana er skipt í verktakakostnað og verkkaupakostnað.

Verktakakostnaður telst sanngjörn greiðsla til verktaka fyrir að vinna verkið miðað við, að hann hafi fjármagn, tæki og mannafla til að framkvæma það á hagkvæmasta hátt í eðlilegri samkeppni.

Verkkaupakostnaður skiptist í hönnunar- og umsjónarkostnað, undirbúningskostnað, greiðslur fyrir vatnsréttindi, skaðabætur fyrir landspjöll og fjármagnskostnað. Með undirbúningskostnaði er átt við áfallinn kostnað við undirbúning og rannsóknir fram að gerð útboðsgagna.

Við yfirlitsáætlanagerð reiknast verkkaupakostnaður sem ákveðinn hundraðshluti af verktakakostnaði.

Við samanburð og ákvörðun á hagkvæmasta virkjunarfyrirkomulagi er stofnkostnaður virkjana áætlaður sem fall af einni eða fleiri ákvarðandi stærðum, t.d. uppsettu afl (N) og miðlunarrými (M)

$$K = f(N, M) = f(E/T, M) \text{ , Mkr}$$

K_S: samræmdur stofnkostnaður , Mkr (Fylgiskjal 4)

Samræmdur stofnkostnaður er áætlaður kostnaður þegar uppsett afl samsvarar álagsstuðli 0,6 eða 5256 nýtingarstundum á ári.

Við yfirlitsáætlanagerð reiknast,

$$K_S = K + 10,3 (N_S - N) \text{ , Mkr,}$$

þar sem $N_S = E/5,256$ (samræmt afl) er uppsett afl miðað við ársálagsstuðul 0,6 og reiknað er með jafnaðarlegum jaðarkostnaði afls 10,3 Mkr/MW á verðlagi í desember 1983.

K/E: stofnkostnaður á orkueiningu, kr/kWh/a

Í skýrslum um vatnsaflsvirkjanir er oftast tilgreindur stofnkostnaður á orkueiningu, K/E kr/kWh/a, til samanburðar við aðra virkjunarkosti, þar sem K er stofnkostnaður í Mkr og E orkuvinnslugeta í GWh/a.

dK/dE: jaðarkostnaður, kr/kWh/a

Jaðarkostnaður er ákvarðaður til viðmiðunar, þegar leitað er hagkvæmra lausna við hönnun.

J: leyfilegur jaðarkostnaður, kr/kWh/a (Fylgiskjal 5)

Við hagkvæmnisathuganir er sett skilyrðið $dK/dE \leq J$, og gildir jafnaðarmerkið, nema aðrar ástæður en hagkvæmnisástæður ráði lausninni.

Við yfirlitsáætlanagerð reiknast,

$$J = 22,92(0,175 + E^{-0,29}) + 10,3(1/T - 1/5,256) \text{ , kr/kWh/a,}$$

þegar orkuvinnsla er á bilinu $50 < E < 5000$ GWh/a og miðað er við verðlag í desember 1983.

k: orkukostnaður við stöðvarvegg, kr/kWh

(Fylgiskjal 3)

Orkukostnaður við stöðvarvegg ákvarðast af eftirfarandi jöfnu,

$$k = \frac{\frac{\ln(1+r)}{1 - (1+r)^{-t_0}} + v}{(1-\beta) \frac{1 - (1+r)^{-x}}{x \ln(1+r)} + \beta} \cdot \frac{K}{E}, \text{ kr/kWh}$$

Hér er:

$x = (1-\beta)E/q$, ár (fullnýtingartími)

r : vaxtafótur

t_0 : ævitími orkuvers, ár

v : árlegur rekstrar- og viðhaldskostnaður í hlutfalli af stofnkostnaði

β : hlutfallsleg upphafsnýting, $0 \leq \beta = E_0/E \leq 1$

q : árlegur jafn vöxtur orkuparfar, GWh/a^2

K : stofnkostnaður , Mkr

E : orkuvinnslugeta, GWh/a

E_0 : upphafsnýting, GWh/a

Við yfirlitsáætlanagerð er hér miðað við eftirfarandi forsendur,

$$r = 0,06, \quad t_0 = 40 \text{ ár}, \quad v = 0,008 \text{ og } q = 150 \text{ GWh/a}^2. *)$$

Með fullnýtingu í upphafi, $\beta = 1$, $x = 0$, fæst,

$$k_0 = \left[\frac{\ln(1+r)}{1 - (1+r)^{-t_0}} + v \right] \frac{K}{E}, \text{ kr/kWh}$$

eða með framangreindum tölugildum

$$k_0 = 0,0725 \cdot \frac{K}{E} \text{ kr/kWh.}$$

*) Undanfarið hefur Orkustofnun hins vegar miðað við 8% reiknivexti, rekstrarkostnað 1% og samkvæmt nýrri orkuspá er gert ráð fyrir að almenn raforkunotkun aukist um 70 til 80 GWh/a^2 næstu árin.

II STÍFLUR

Markmið og stíflugerðir

Markmið með stíflugerð vegna vatnsaflsvirkjana er þrjúþætt, þ.e. að skapa skilyrði til inntaks í vatnsvegi virkjunarinnar og að miðla vatni auk þess að skapa fallhæð eða auka við náttúrulega fallhæð.

Stífluhæð eru takmörk sett af umhverfi, en að öðru leyti byggist hæðarákvörðun á hagkvæmnissjónarmiðum, þ.e. ávinningi af aukinni fallhæð eða miðlun. Ákveðið fall má í mörgum tilvikum annað hvort virkja með lágri stíflu ofar í farvegi og löngum vatnsvegum eða með hárrí stíflu neðar og stuttum vatnsvegum. Tilhögun er valin með tilliti til orkukostnaðar, þegar þannig er um að ræða mismunandi stíflustæði.

Stíflur eru flokkaðar eftir byggingarefnum í hlaðnar stíflur (steinhleðsla, sem eftir síðustu aldamót er að mestu úr sögunni), steyptrar stíflur og jarðefnastíflur (jarð- eða grjóttstíflur). Timbur er einnig notað í stíflur og þá einkum bráðabirgðastíflur. Eftir sérmarkmiðum eru stíflur flokkaðar í alstíflur, yfirfallsstíflur og lokustíflur.

Höfuðflokkun steyptra stíflna er í samræmi við stöðufræðilega uppbyggingu. Er þar um að ræða þrjú höfuðflokka, þungastíflur, stöplastíflur og bogastíflur. Stöplastíflur skiptast í þrjár gerðir, plötustíflur, vængjastíflur og raðbogastíflur, og bogastíflur í tvær gerðir, þ.e. stíflur með breytilegum og föstum geisla. Skil milli nefndra flokka eru þó ekki alltaf glögg. Þungar (efnismiklar) vængjastíflur nálgast þungastíflur að gerð og byggðar hafa verið stíflur, sem sameina eiginleika bogastíflna og þungastíflna.

Algengustu stíflur nú á tímum eru án efa jarðstíflur. Með fullkomnari jarðvinnslutækni og hlutfallslega hækkandi vinnulaunum eru þær sífellt að vinna á aðrar stíflugerðir.

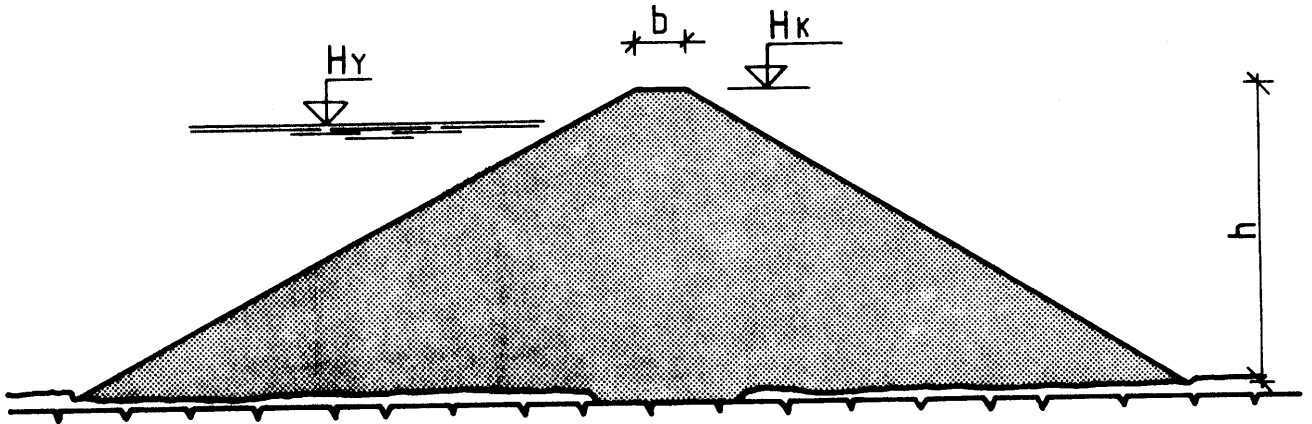
Alstíflur

Í yfirlitsáætlunum er gert ráð fyrir, að allar alstíflur séu jarðstíflur með þversniði, sem sýnt er á skýringarmynd.

Breidd stíflukrónu reiknast,

$$b = 4 + h_{\max}/30, \text{ m},$$

þar sem h_{\max} er mesta hæð stíflu í m.



Hæð stíflukrónu reiknast,

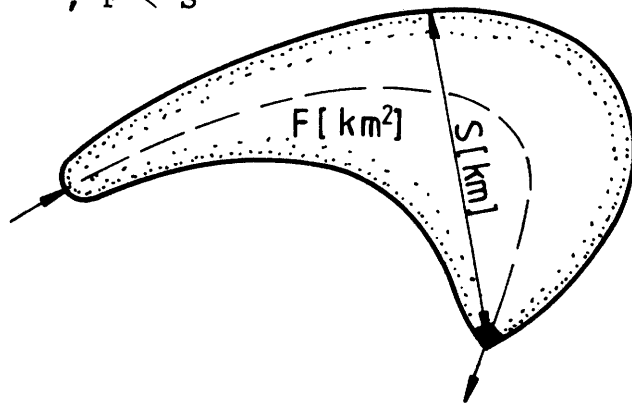
$$H_K = H_Y + h_a + 2, \text{ m y.s.},$$

þar sem H_Y er yfirfallshæð í m y.s. og h_a reiknast af jöfnunum,

$$h_a = (F/S)^{0,5} e^{0,5(1-F/S^2)}, \quad F < S^2$$

$$h_a = S^{0,5}, \quad F \geq S^2$$

$$h_a \geq 2, \text{ m}.$$



Hér er F flatarmál löns í km^2 og S lengsta beina leið eftir vatnsfleti að stíflu í km, sbr. skýringarmynd.

Heildarrúmmál stíflufyllingar er m.a. háð eiginleikum tiltækra byggingarefna, en við yfirlitsáætlanagerð reiknast það,

$$V_J = \sum_{i=1}^n \left[h_i (10^{-3} h_i + 1,7) + b + 0,5 \right] h_i l_i, \text{ m}^3,$$

þar sem stíflunni er skipt í hæfilega marga kafla með hæð h_i , m, og lengd l_i , m. Hæðin h_i reiknast að jafnaði 1 m niður fyrir yfirboðrð jarðar.

Í kostnaðaráætlunum er reiknað með greftri undan stíflu,

$$G = \sum_{i=1}^n \left[3 \cdot 10^{-3} h_i^2 + 3,9 h_i + b + 2 \right] l_i, \text{ m}^3,$$

og hreinsun á kjarnagrunni,

$$H = \sum_{i=1}^n 0,5 h_i l_i, \text{ m}^2.$$

Ennfremur er reiknað með meðalkostnaði við þéttun á berggrunni.

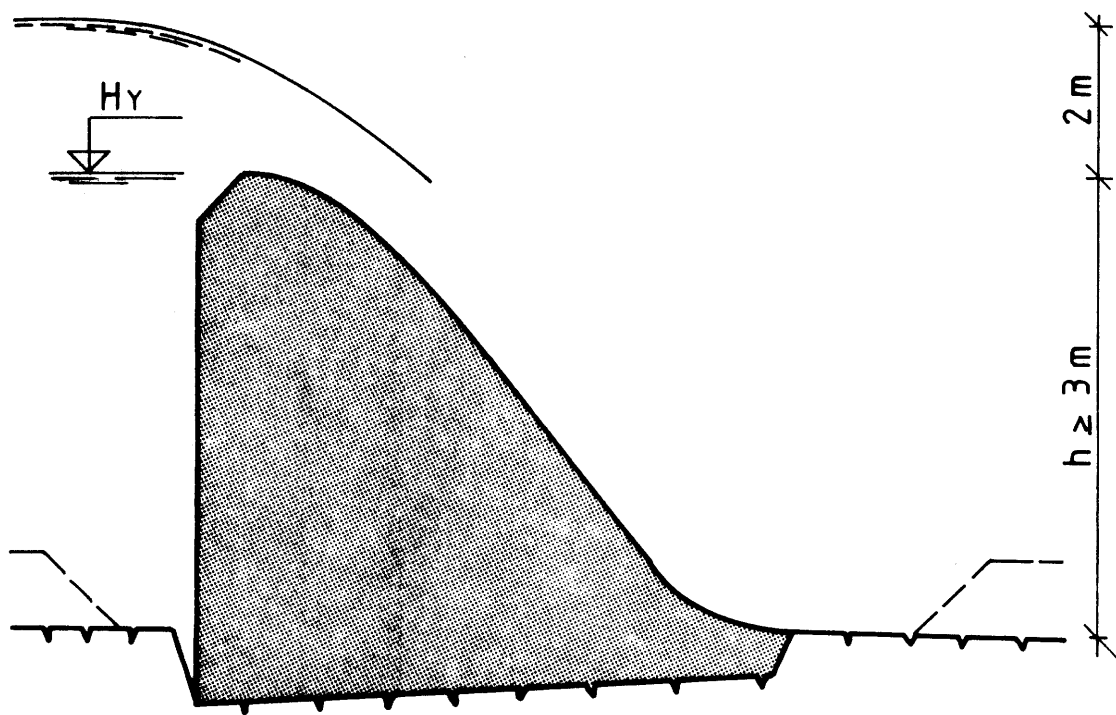
Miðað við verðlag í desember 1983 má með nálgun áætla verktakakostnað við alstíflugerð,

$$K_{SA} = \sum_{i=1}^n \left[390,45 h_i^2 + 3350,48 h_i + 3446 \right] 10^{-6} l_i, \text{ Mkr} \quad [2.1].$$

Yfirfallsstíflur

Í yfirlitsáætlunum er gert ráð fyrir, að yfirfallsstíflur séu þungastíflur úr steinsteypu, sbr. skýringarmynd.

Við nánari hönnun er hlutfall milli yfirfallslengdar og vatnsdýptar á yfirfalli í hönnunarflóði ákvarðað þannig, að stíflukostnaður í heild (kostnaður við yfirfall og aðliggjandi alstíflur) verði í lágmarki, en í yfirlitsáætlunum er reiknað með föstu hlutfalli, þ.e. að vatnsborð í lóni verði 2,0 m yfir yfirfallsbrún.



Samkvæmt því reiknast lengd yfirfallsstíflu,

$$L_Y = HHQ/6,1, \text{ m,}$$

þar sem HHQ er hönnunarflóð í m^3/s , sbr. fylgiskjal ll. Yfirföll reiknast þó ekki lægri en $h = 3 \text{ m}$, sbr. skýringarmynd.

Steypumagn reiknast,

$$V_Y = \sum_{i=1}^n \left[0,4h_i^2 + 2,5h_i + 1,8 \right] l_i, \text{ m}^3.$$

Í kostnaðarreikningum er að öðru leyti reiknað með eftirfarandi verkþáttum.

Slétt mót:

$$M_S = \sum_{i=1}^n \left[0,08h_i^2 + 2,8h_i - 2,4 \right] l_i, \text{ m}^2.$$

Hvelfd mót:

$$M_D = 5,4 \sum_{i=1}^n l_i, \text{ m}^2.$$

Sprengingar:

$$S = \sum_{i=1}^n [0,62h_i + 2,4] l_i, \text{ m}^3.$$

Gröftur:

$$G = \sum_{i=1}^n [0,8h_i + 5,4] l_i, \text{ m}^3.$$

Hreinsun á klöpp:

$$H = \sum_{i=1}^n [0,8h_i + 3,9] l_i, \text{ m}^2.$$

Steypustyrktarstál:

$$J = \sum_{i=1}^n 1,2 [13 h_i - 26] l_i, \text{ kg}.$$

Steypuskilapéttingar:

$$P = \sum_{i=1}^n [0,2 h_i + 1] l_i, \text{ m}.$$

Ennfremur er gert ráð fyrir meðalkostnaði við bergbolta og bergpéttingun.

Miðað við verðlag í desember 1983 reiknast verktakakostnaður við yfirfallsstíflugerð,

$$K_{SY} = \sum_{i=1}^n [2969h_i^2 + 28051h_i + 32981] 10^{-6} l_i, \text{ Mkr} \quad [2.2].$$

III VATNSVEGIR

Markmið og vatnsvegagerðir

Vatnsvegum virkjana er í samræmi við markmið skipt í tvo höfuðflokka, annars vegar vatnsvegi milli yfirvatns (inntakslóns) og undirvatns, en verg fallhæð virkjunar er skilgreind sem mismunur þessara vatnsborðshæða, og hins vegar veitur að inntakslóni eða milli vatnasviða.

Vatnsvegir eru ýmist opnir eða lokaðir, skurðir, stokkar eða ófyllt göng annars vegar en vatnsfyllt göng eða pípur hins vegar.

Vatnsvegir frá yfir- að undirvatni skiptast í aðrennsli að hverflum og frárennsli frá þeim. Aðrennsli er oft um lárétt eða lítið hallandi lágprýstigöng (aðrennslisgöng) og hallandi eða lóðrétt prýstigöng (fallgöng), en frárennsli um göng eða skurð. Frárennslisgöng geta ýmist verið opin eða lokuð (lágprýstigöng). Fallgöngum hallar að jafnaði á bilinu 40° til 60° eða þau eru lóðrétt. Í mjög góðu bergi hafa hins vegar á síðari árum verið sprengd göng með minni jöfnum halla frá inntaki að hverflum.

Við neðri enda aðrennslisganga (eða pípna) og efri enda lokaðra frárennslisganga eru oft opnar jöfnunarþrær (svelgir) til prýstingsjöfnunar. Með löngum hallandi aðrennslisgöngum (eða pípum) verður slíkum jöfnunarþróum að jafnaði ekki við komið. Verður þá að gera aðrar ráðstafanir til takmörkunar á prýstingsaukningu (eða falli) við skyndilegar álagsbreytingar og til að auðvelda gangstýringu hverfla. Þörf á prýstingsjöfnun fer í stórum dráttum eftir lengd vatnsvega, sbr. fylgiskjal 13.

Við efri enda aðrennslis eru inntaksvirki með lokum og ristum. Leitast er við að halda straumhraða við ristar innan við 1 m/s.

Lágprýstigöng

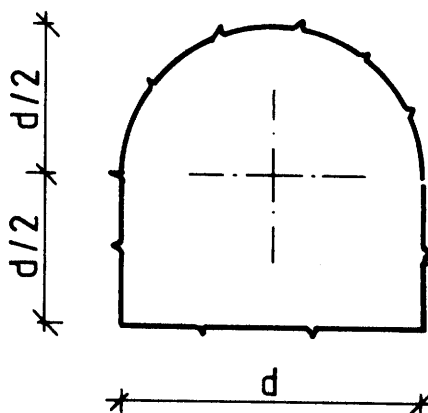
Í yfirlitsáætlunum reiknast lágprýstigöng (að- og frárennsligöng) vatnsaflsvirkjana styrkt með ásprautun á berg. Þversnið frágenginna ganga telst umritanlegt um hring, sbr. skýringarmynd.

Þversniðsflatarmál :

$$F = 0,8927 d^2, m^2$$

Streymismiðmál :

$$R = 0,25 d, m$$



Hér er d streymisþvermál (ákvarðandi þvermál) gangaþversniðsins í m.

Hrýfi ganganna reiknast $k = 0,15$ m og með góðri nálgun má reikna falltöp af jöfnunni,

$$I = 7,1371 \cdot 10^{-3} d^{-5,4063} Q^2 \quad [3.1],$$

þar sem Q er rennsli í m^3/s og streymisþvermál er á bilinu $2 < d < 16$ m.

Í kostnaðaráætlunum er reiknað með eftirfarandi:

$$\text{Sprengingar: } S = 0,8927 (d+0,12)^2, m^3/m.$$

$$\text{Ásprautun: } A = 0,154 d, m^3/m$$

Kostnaður við gangamunna, sérstakar styrkingar o.fl. reiknast 20 af hundraði annars kostnaðar og gert er ráð fyrir ófyrirséðum kostnaði 25 af hundraði.

Stofnkostnað (verktakakostnað) má með nálgun ákvarða af eftirfarandi jöfnu,

$$K_{LG} = 5247,575 d^{1,3716} + 22500 \text{ kr/m} \quad [3.2],$$

Hagkvæmasta gangavidd, \tilde{d} , fæst þegar skilyrðinu

$$\frac{\partial (\Delta K + 1,37 K_{LG})}{\partial \tilde{d}} = 0$$

er fullnægt, þar sem

$$\Delta K = 208 \cdot 10^3 IQ = 1484,5 \tilde{d}^{-5,4063} Q^3, \text{ kr/m,}$$

sbr. fylgiskjal 10.

Þá fæst:

$$\tilde{d} \approx 0,97Q^{0,4426} \text{ m} \quad [3.3],$$

og

$$K_{LG} \approx 5,03Q^{0,6071} + 22,5 \text{ Mkr/km} \quad [3.4].$$

Q	\tilde{d}	K_{LG}	v	I	
m ³ /s	m	Mkr/km	m/s	o/oo	
	[3.3]	[3.4]		[3.1]	fskj.10
7	2,295	38,89	1,489	3,919	4,010
10	2,688	42,85	1,550	3,403	3,438
15	3,216	48,54	1,625	2,904	2,902
20	3,653	53,50	1,679	2,593	2,576
30	4,371	62,16	1,759	2,211	2,185
50	5,479	76,58	1,866	1,811	1,785
70	6,359	88,83	1,939	1,586	1,565
100	7,447	104,87	2,020	1,378	1,363
150	8,911	127,86	2,116	1,175	1,169
200	10,121	147,97	2,187	1,050	1,049
300	12,110	182,98	2,292	0,895	0,903
500	15,182	241,33	2,430	0,733	0,749

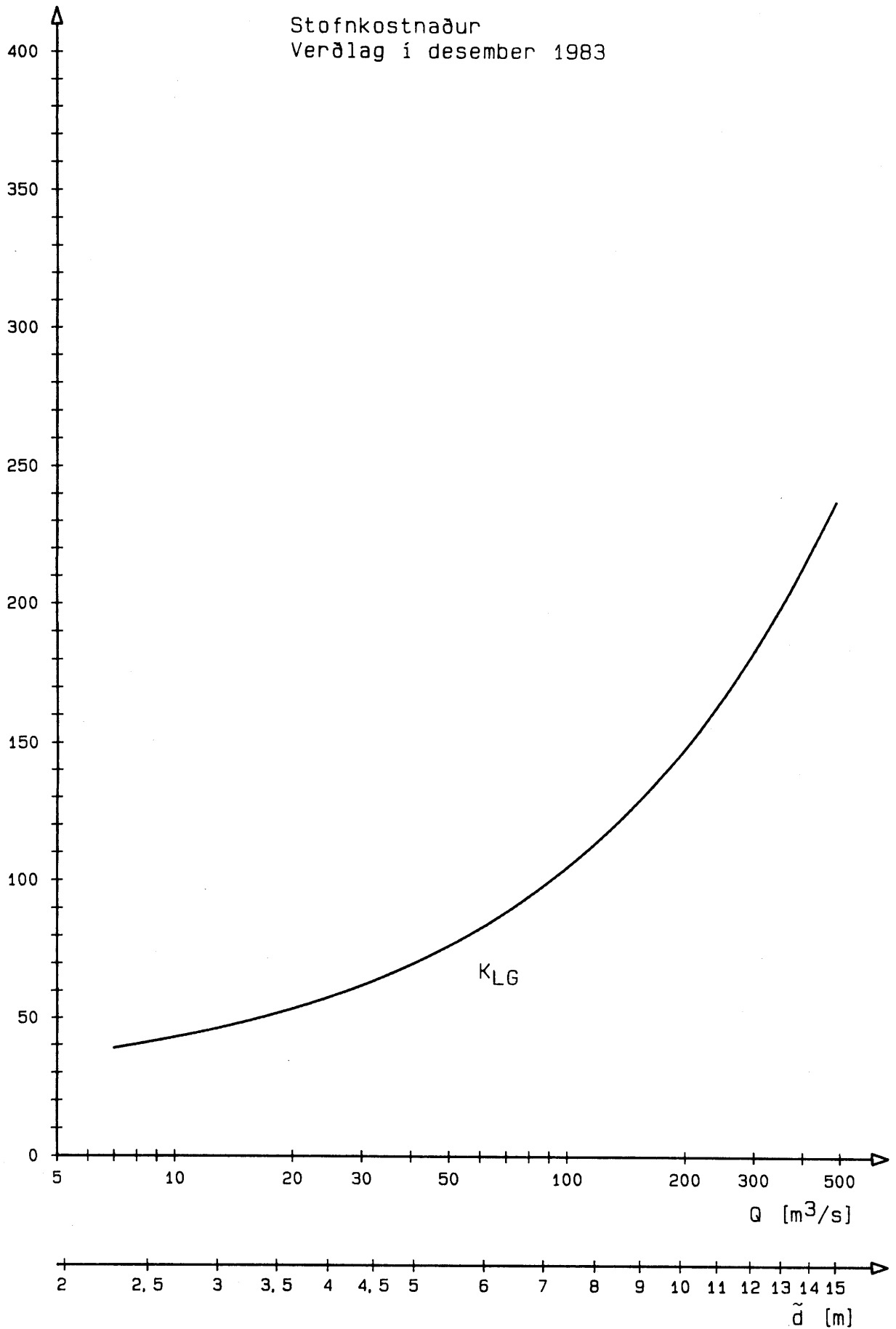
Falltöp samkvæmt jöfnu [1] í fylgiskjali 10 eru skráð til samanburðar við reiknuð falltöp samkvæmt nálgunarjöfnu [3.1].

Virkjanalíkan OS

Lágþrýstigöng

K_{LG} [Mkr/km]

Stofnkostnaður
Verðlag í desember 1983

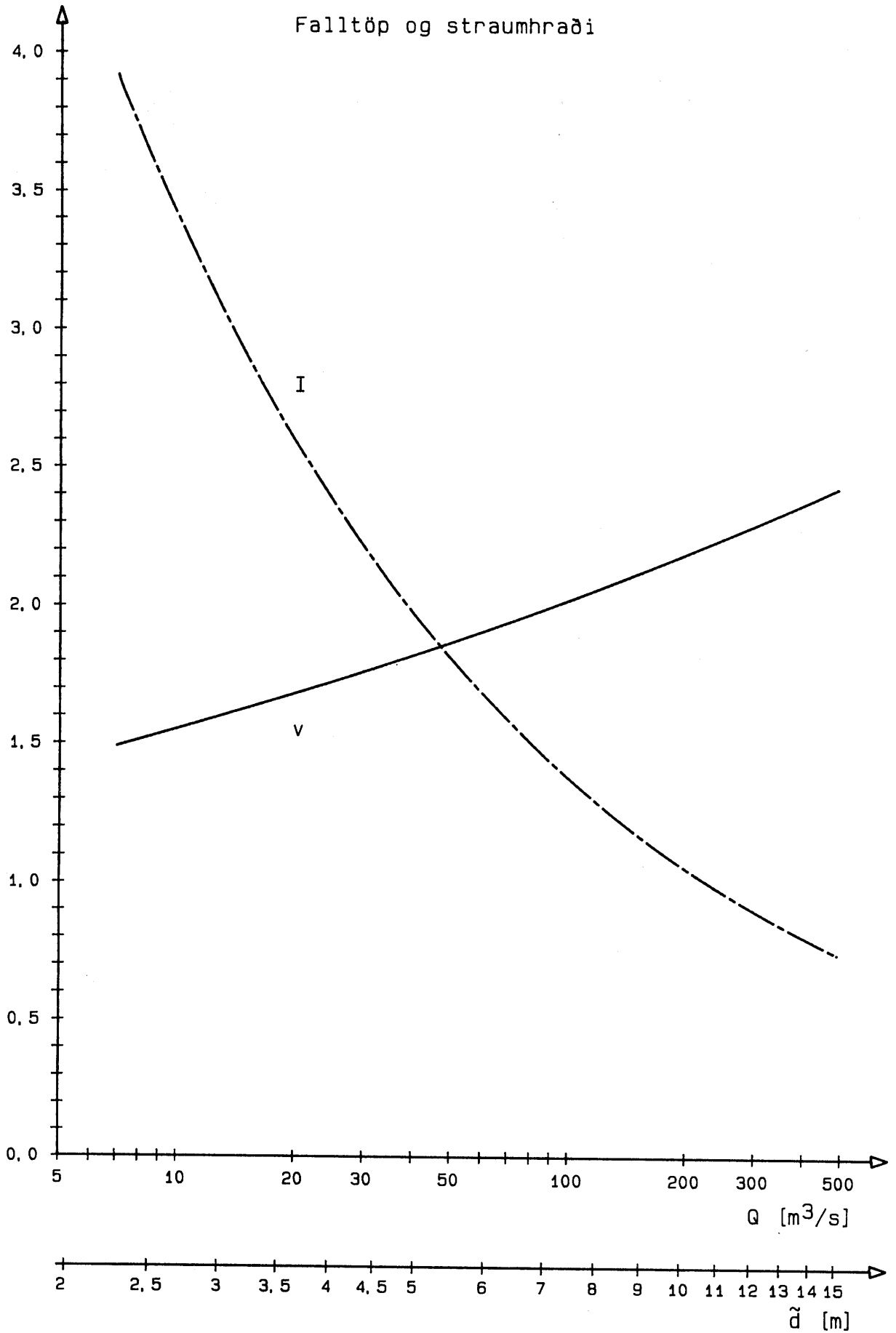


Virkjanalíkan OS

Lágprýstigöng

I [%]
v [m/s]

Falltöþ og straumhraði



Fallgöng

Lóðrétt eða hallandi (halli 40° til 60°) þrýstigöng reiknast hringlaga stálfóðruð með 0,5 m þykkri steypu milli bergs og fóðringar. Stofnkostnað (verktakakostnað) slíkra ganga má við yfirlitsáætlanagerð ákvarða af jöfnunni,

$$K_{FG} = 1,375 \left[(4318 + 12,37H)d^2 + 16011d + 22901d^{0,6967} + 1936 \right] \text{kr/m}, [3,5],$$

þar sem d er þvermál í m, H hönnunarfalshæð í m og miðað er við verðlag í desember 1983.

Með nálgun má reikna falltöp af jöfnunni,

$$I = 1,24 \cdot 10^{-3} d^{-31/6} Q^2 \quad [3.6],$$

Þá fæst,

$$\Delta K = 257,92 d^{31/6} Q^3,$$

og hagkvæmstu viddir, $d = \tilde{d}$, þegar skilyrðinu

$$\frac{\partial (1,37K_{FG} + \Delta K)}{\partial d} = 0$$

er fullnægt.

Nokkur gildi eru skráð í dálkum a í eftirfarandi skrá.

Með nálgun fæst:

$$\tilde{d} \approx \frac{0,6183Q^{0,457}}{H^{0,03}}, \text{ m} \quad [3,7],$$

sbr. skráð gildi í dálkum b.

Með þvermáli samkvæmt jöfnu [3.7] fæst stofnkostnaður samkvæmt jöfnu [3.5], sbr skráð gildi í dálkum a og með nálgun samkvæmt jöfnunni,

$$K_{FG} = 19,0 Q^{0,5H^{0,045}} + 20 \text{ Mkr/km} \quad [3.8],$$

sbr. skráð gildi í dálkum b.

	H = 50 m		H = 100 m		H = 150 m		H = 300 m		H = 600 m	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Q=2 m ³ /s										
d m	-	-	-	-	0,721	0,73	0,714	0,72	0,702	0,70
K _{FG} Mkr/km					48,56	49,3	48,99	49,7	50,58	50,2
Q=5 m ³ /s										
d m	-	-	1,120	1,12	1,115	1,11	1,100	1,09	1,074	1,06
K _{FG} Mkr/km			71,20	71,1	71,42	72,1	73,02	73,8	77,31	75,6
Q=10 m ³ /s										
d m	1,561	1,57	1,551	1,54	1,542	1,52	1,516	1,49	1,473	1,46
K _{FG} Mkr/km	97,37	95,0	97,38	98,3	98,14	100,4	101,73	104,2	110,35	108,2
Q=20 m ³ /s										
d m	2,154	2,16	2,137	2,12	2,121	2,09	2,078	2,05	2,011	2,01
K _{FG} Mkr/km	135,85	133,4	136,62	140,0	138,50	144,1	145,99	151,7	162,97	160,0
Q=40 m ³ /s										
d m	2,956	2,97	2,928	2,91	2,903	2,87	2,836	2,81	2,733	2,75
K _{FG} Mkr/km	194,94	191,4	197,38	203,8	201,50	211,6	216,58	226,1	249,53	242,3
Q=60 m ³ /s										
d m	3,549	3,57	3,513	3,50	3,480	3,46	3,394	3,38	3,264	3,31
K _{FG} Mkr/km	244,31	238,3	248,47	255,8	254,81	267,0	277,27	287,9	325,59	311,9
Q=80 m ³ /s										
d m	4,037	4,07	3,994	3,99	3,954	3,94	3,853	3,86	-	-
K _{FG} Mkr/km	288,73	279,1	294,62	301,5	303,15	315,8	332,83	342,7		
Q=100 m ³ /s										
d m	4,459	4,51	4,409	4,42	4,364	4,36	-	-	-	-
K _{FG} Mkr/km	300,00	316,0	337,63	342,9	348,33	360,2				

Prýstípur

Við yfirlitsáætlanagerð reiknast hagkvæmasta meðalþvermál prýstíþpna af jöfnunni,

$$\tilde{d} = 0,8722 Q^{0,4128} \left[8 + 0,0109H^{1,2} - 0,289H^{0,6} \right]^{-0,1376}, \text{ m [3.9].}$$

Verktakakostnað að meðtöldum ófyrirséðum kostnaði má áætla af jöfnunni

$$K_{PP} = 1,25 \left[(8 + 0,0109H^{1,2} - 0,289H^{0,6}) \tilde{d}^{2,1+10} \right], \text{ Mkr/km [3.10].}$$

Er þá miðað við verðlag í desember 1983.

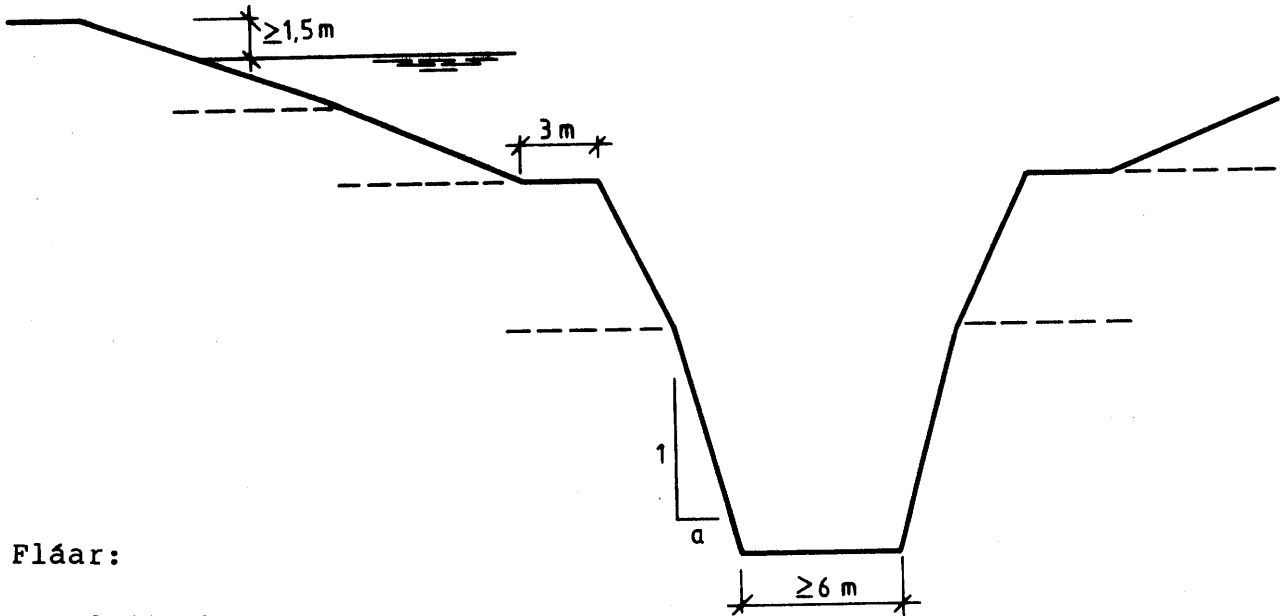
Hér er Q hönnunarrennsli í m³/s, d meðalþvermál pípu í m og H hönnunarfalldæði í m.

Fyrir H < 75 m reiknast \tilde{d} og K_{PP} eins og fyrir H = 75 m.

Q m ³ /s	H m									
	≤ 75		100		150		300		600	
	\tilde{d} m	K_{PP} Mkr/km	\tilde{d} m	K_{PP} Mkr/km	\tilde{d} m	K_{PP} Mkr/km	\tilde{d} m	K_{PP} Mkr/km	\tilde{d} m	K_{PP} Mkr/km
2	0,91	18,7	0,90	18,7	0,90	19,1	0,85	20,9	0,78	25,9
3	1,07	21,3	1,07	21,4	1,06	21,8	1,01	24,4	0,92	31,5
5	1,32	26,2	1,32	26,3	1,31	27,0	1,25	31,1	1,14	42,2
7	1,52	30,8	1,52	31,0	1,50	31,9	1,43	37,4	1,31	52,2
10	1,76	37,4	1,76	37,6	1,74	38,9	1,66	46,4	1,51	66,6
15	2,08	47,9	2,08	48,2	2,06	50,1	1,96	60,7	1,79	89,4
20	2,34	58,0	2,34	58,4	2,32	60,7	2,21	74,3	2,02	111,1
30	2,77	77,1	2,77	77,7	2,74	81,0	2,61	100,4	2,38	152,7
50	3,42	113,1	3,41	114,0	3,38	119,2	3,22	149,3	2,94	230,8
70	3,93	147,2	3,92	148,3	3,89	155,4	3,70	195,7	3,38	304,7
100	4,55	196,0	4,55	197,5	4,50	207,1	4,29	262,1	3,92	401,6
150	5,38	273,3	5,37	275,5	5,32	289,1	5,07	367,2	4,63	578,3

Skurðir

Við yfirlitsáætlanagerð er reiknað með eftirfarandi, sbr. skýringarmynd.



Fláar:

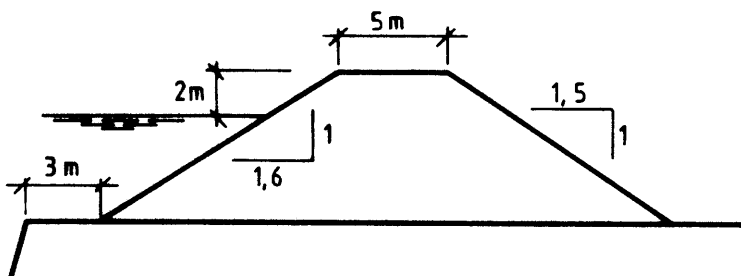
$a = 0,25$, klöpp

$a = 2,5$, yfirborðslög

Ef nánari upplýsingar um jarðlög eru fyrirliggjandi kann að vera ástæða til að breyta frá þessu.

Við verulegar fláabreytingar er gert ráð fyrir 3 m breiðum stöllum. Botnbreidd reiknast 0,6 sinnum vatnsdýpt, en þó minnst 6 m.

Gert er ráð fyrir stíflu meðfram skurði, þar sem land á skurðbakka er lægra en 1,5 m ofan við hæsta vatnsborð í skurði, sbr. skýringarmynd.



Skurðum er skipað í tvo flokka með mismunandi kröfum um straumhraða, styrkingar og þéttingar. Annars vegar eru aðrennslisskurðir virkjana og hins vegar veituskurðir og frárennslisskurðir frá virkjunum.

Í aðrennslisskurðum skal straumhraði ekki vera meiri en 0,6 m/s við venjulega vatnsborðshæð í inntakslóni og ekki meiri en 1,0 m/s við lágsta vatnsborð. Gert er ráð fyrir að klapparskurðir verði húðaðir að hluta. Í slíkum skurðum reiknast hrýfi 0,3 m en í jökulruðningi og lausum jarðlögum reiknast það 0,2 m.

Í veituskurðum, sem enda í rúmgóðum lónum, er hámarksstraumhraði 3,0 m/s, en hann skal þó miðast við áætlað straumþol jarðgrunnsins (rofhættu). Straumhraði á bilinu 0,6 til 1,5 m/s er óaskilegur vegna hættu á ístruflunum. Í frárennslisskurðum er meiri straumhraði en um það bil 2,5 m/s oftast óhagkvæmur.

Veituskurður reiknast lítt styrktir með hrýfi 0,4 m í klöpp en 0,2 m í jökulruðningi og lausum jarðlögum.

Með nálgun má reikna falltöpp í skurðum samkvæmt jöfnu Mannings,

$$I = \left[\frac{Q}{MR^{2/3}F} \right]^2 ,$$

þar sem Q er rennsli í m^3/s , R streymismiðmál í m, F þversniðsflatarmál neðan vatnsborð í m^2 og M manningtala. Streymismiðmál er,

$$R = F/U \text{ m} ,$$

þar sem U er samanlögð lengd skurðhliða neðan vatnsborðs að viðbættri botnbreidd í m.

Manningtala reiknast:

$M = 30,1$, veituskurðir í klöpp

$M = 31,6$, aðrennslisskurðir í klöpp

$M = 33,8$, aðrir skurðir

Við yfirlitsáætlanagerð reiknast verktakakostnaður af jöfnunum

Aðrennslisskurðir:

$$K_{AS} = \left[425V_S + 90V_G + 225V_F \right] 10^{-6} \text{ Mkr} \quad [3.11],$$

Veitu- og frárennslisskurðir:

$$K_{VS} = \left[325V_S + 90V_G + 225V_F \right] 10^{-6} \text{ Mkr} \quad [3.12]$$

Kostnaður við styrkingar og þéttingar er meðtalinn og miðað er við verðlag í desember mánuði 1983.

Hér er V_S heildarrúmmál sprenginga í m^3 , V_G heildarrúmmál graftrar í m^3 og V_F heildarrúmmál stíflufyllinga á skurðbökkum í m^3 .

Veitugöng

Veitugöng reiknast eins og lágprýstigöng. Nauðsynlegt þvermál ganganna, d , ákvarðast af eftirfarandi jöfnu,

$$\Delta H = Q^2 10^{-3} \left[7,1371d^{-5,406} L + 63,957(\zeta_i + \zeta_u)d^{-4} \right] \text{ m},$$

þar sem ΔH er hæðarmunur orkulína ofan og neðan ganga í m , Q er flutningsgeta ganga í m^3/s , L lengd ganga í m og ζ_i og ζ_u staktapsstuðlar við inn- og útrennsli.

Inntaksstuðulinn skal reikna á bilinu $0,1 < \zeta_i < 0,3$ og útrennslisstuðulinn á bilinu $0,1 < \zeta_u < 1,0$.

Minnstu gildin skal nota, ef skurðir með svipuðum straumhraða og er í göngunum liggja að þeim og frá, en þau stærstu, ef göngin liggja milli lygnra lóna.

Veitugöng skal hanna með straumhraða $v < 6 \text{ m/s}$.

Stofnkostnaður reiknast af jöfnu [3.2] bls. 16.

IV STÖÐVARHÚS OG VÉLBÚNAÐUR

Stöðvarhús

Í yfirlitsáætlunum reiknast verktakakostnaður við stöðvarhús af eftirfarandi jöfnu, þegar miðað er við verðlag í desembermánuði 1983.

$$K_{SH} = 206 \left[\begin{array}{c} nN \\ - \\ H \end{array} \right]^{0,3}, \text{ Mkr} \quad [4.1],$$

þar sem n er fjöldi vélasamstæðna, N uppsett afl alls í MW og H hönnunarfalldæði í m.

Sé gert ráð fyrir að fjöldi vélasamstæðna sé að jafnaði næsta heila tala við stærðina

$$n = \left[N/30 \right]^{0,5} \quad [4.2],$$

fæst með nálgun,

$$K_{SH} = 123,68N^{0,45}H^{-0,3}, \text{ Mkr} \quad [4.3],$$

Jöfnurnar teljast gilda bæði fyrir ofan- og neðanjarðarhús, þegar kostnaður við aðkomugöng er frátalinn.

Kostnaður við aðkomugöng ásamt gangamunna reiknast til jafnaðar af jöfnunni,

$$K_{AG} = 120 L, \text{ Mkr} \quad [4.4],$$

þar sem L er heildarlengd aðkomuganga í km.

Vélar og rafbúnaður

Stofnkostnaður véla og rafbúnaðar má reikna þannig,

$$K_{SH} = 3,2 \left[\frac{5,7n+0,75}{H^{0,5}} + 0,77n+0,16 \right] \left[\frac{N}{n} + 20 \right], \text{ Mkr} \quad [4.5],$$

Í búnaði orkuvers eru þá meðtaldir spennar, rofar og stöðvarkranar og enn fremur er reiknað með sérstökum vélalokum við francis- og peltonhverfla.

Með nálgun má reikna kostnað af jöfnunni,

$$K_{VR} = 35,08N^{0,826}H^{-0,183}, \text{ Mkr} \quad [4.6],$$

eða

$$K_{VR} = 0,7Q^{0,826}H^{0,643}, \text{ Mkr} \quad [4.7],$$

þegar gert er ráð fyrir fjölda vélasamstæðna samkvæmt jöfnu [4.2]

Samanburður á stofnkostnaði véla og rafbúnaðar samkvæmt jöfnu 4.5, dálkur a, og jöfnu [4.6], dálkur b, er í eftirfarandi skrá. Stofnkostnaður er skráður í Mkr.

H m	30 n=1		120 n=2		270 n=3		480 n=4	
	a	b	a	b	a	b	a	b
30	337,2	312,5	1003,1	982,1	-	-	-	-
55	288,0	279,7	854,6	879,0	1716,7	1717,4	-	-
100	252,0	250,7	746,2	787,9	1497,8	1539,5	2506,6	2476,1
180	225,7	225,1	667,0	707,5	1337,8	1382,5	2237,9	2223,6
330	205,6	201,5	606,4	633,3	1215,3	1237,3	2032,3	1990,1
600	-	-	562,2	567,6	1126,0	1109,1	1882,2	1783,9

Framanskráðar jöfnur eru taldar gilda um það bil á sviðinu,

$$30 \leq H < 650 \text{ m}, \quad 30 \leq N < 500 \text{ MW} \quad \text{og} \quad 10 \leq Q < 500 \text{ m}^3/\text{s}$$

Samanburður á heildarkostnaði stöðvarhúss og vélbúnaðar, $K_{SV} = K_{SH} + K_{VR}$, annars vegar samkvæmt jöfnum [4.1] og [4.5], a, og hinsvegar jöfnum [4.3] og [4.6], b, er í eftirfarandi skrá yfir hlutfallið b/a.

H	N MW							
m	30	45	65	100	150	225	335	500
30	0,954	1,019	1,061	0,966	-	-	-	-
45	0,974	1,042	1,085	0,990	1,029	-	-	-
70	0,990	1,059	1,104	1,010	1,050	1,002	-	-
110	0,998	1,069	1,114	1,022	1,062	1,014	1,029	-
175	0,999	1,070	1,115	1,024	1,065	1,018	1,032	0,995
270	0,992	1,062	1,107	1,018	1,058	1,012	1,025	0,988
420	-	1,047	1,090	1,005	1,043	0,997	1,010	0,973
650	-	-	1,066	0,984	1,020	0,975	0,986	0,950

Heildarkostnað stöðvarhúss og vélbúnaðar mætti einnig nálgast með jöfnunni,

$$K_{SV} = 95N^{0,75}H^{-0,25}, \text{ Mkr} \quad [4.8],$$

eða

$$K_{SV} = 2,7179Q^{0,75}H^{0,5}, \text{ Mkr} \quad [4.9],$$

Hlutfall kostnaðar, sem ákvarðast af jöfnu [4.8], af summu kostnaðar samkvæmt jöfnum [4.1] og [4.5], b/a, er skráð í eftirfarandi skrá.

H	N MW							
m	30	45	65	100	150	225	335	500
30	0,958	1,051	1,115	1,034	-	-	-	-
45	0,969	1,063	1,128	1,046	1,098	-	-	-
70	0,975	1,068	1,132	1,051	1,102	1,056	-	-
110	0,972	1,064	1,126	1,046	1,096	1,050	1,065	-
175	0,962	1,051	1,110	1,031	1,078	1,032	1,045	1,002
270	0,944	1,030	1,086	1,009	1,053	1,007	1,017	0,974
420	-	1,001	1,053	0,978	1,018	0,973	0,981	0,938
650	-	-	1,013	0,941	0,977	0,933	0,938	0,896

V ÖNNUR MANNVIRKI

Botnrásir

Kostnaður við botnrásir er í meginatriðum háður rennsli á byggingartíma og stífluhæð. Tengsl við þessa þætti eru þó óljós, en við yfirlitsáætlanagerð reiknast verktakakostnaður miðað við verðlag í desember 1983,

$$K_{BR} = 0,035HHQ_0^{0,5}(h_{max}+30), \text{ Mkr} \quad [5.1],$$

þar sem HHQ_0 er áætlað mesta aðrennsli í m^3/s , sbr. fylgiskjal 11, og h_{max} er mesta hæð stíflu í m.

Stöðvarinntak

Kostnað við stöðvarinntak má með allgóðri nálgun ákvarða af jöfnunni,

$$K_{SI} = 2,81Q^{0,73}, \text{ Mkr} \quad [5.2],$$

þar sem Q er virkjað rennsli í m^3/s .

Veituinntak úr miðlunarlóni

Verktakakostnaður við inntak úr miðlunarlóni reiknast af jöfnunni,

$$K_{VI} = 1,25 [(YV-LV)Q]^{0,5}, \text{ Mkr} \quad [5.3],$$

þar sem YV er yfirfallshæð í m y.s., LV lágsta vatnsborð í lóni í m y.s. og Q virkjað rennsli í m^3/s .

Stöðvarbyggð

Kostnað við íveruhús á virkjunarstað, geymsluskemmur o.fl. má reikna af jöfnunni,

$$K_{SB} = 20+N/20, \text{ Mkr} \quad [5.4],$$

þar sem N er uppsett afl alls í MW.

Vegagerð

Stofnkostnað varanlegra vega og vinnuvega á athafnasvæði virkjunar má reikna af jöfnunni,

$$K_{VG} = a + 1,6b, \text{ Mkr} \quad [5.5],$$

þar sem a er lengd vinnuvega í km og b lengd varanlegra vega í km.

Vatnsvarnir

Kostnaður við vatnsvarnir reiknast til jafnaðar meðtalinn í áður tilgreindum kostnaðarpáttum.

Aðrir kostnaðarpáttir

Heildarkostnaður við virkjunina reiknast allur áður talinn kostnaður að viðbættum 37 af hundraði vegna undirbúningskostnaðar, hönnunar- og umsjónarkostnaðar, greiðslna fyrir vatnsréttindi og landspjöll og vaxtakostnaðar á byggingartíma, sbr. einnig fylgiskjal 2.

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 1

**Áætlun um vatnsorku á Íslandi og
líklegan kostnað við að nýta hana**

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Áætlun um vatnsorku á Íslandi og líklegan kostnað við að nýta hana

Nýtanleg vatnsorka á Íslandi er nú talin nálægt 31 TWh/a, þegar bæði er tekið tillit til kostnaðar og líklegra takmarkana vegna verndunar umhverfis. Orkustofnun hefur hins vegar áætlað tæknilega virkjanlegt vatnsafl 64 TWh/a og heildarorku í rennandi vatni á Íslandi 187 TWh/a.

Kostnaðarmörk til aðgreiningar á virkjanlegri vatnsorku og þeirri orku, sem ekki er talið gerlegt að nýta, verða vart skilgreind á einhlítan hátt. Þá verður ætíð matsatriði, að hve miklu leyti umhverfissjónarmið munu takmarka orkunýtingu, þegar fram líða stundir. Meðal annars vegna þessa eru núverandi áætlanir um virkjanlega vatnsorku bundnar talsverðri óvissu og einnig vegna þess, að byggja verður á ágizkunum að hluta, þegar engar beinar áætlanir liggja fyrir.

Óvirkjaðri vatnsorku á Íslandi hefur eftir kostnaði verið skipað í fjóra flokka, sem skilgreindir eru þannig:

- I: Hagkvæmasti hluti orkunnar, sem að öðru jöfnu verður fyrst virkjaður.
- II: Sá hluti vatnsaflsins, sem vegna sérstakra aðstæðna verður nýttur samtímis hagkvæmasta hluta þess.
- III: Vatnsafl, sem án efa verður síðar virkjað og halda ber til haga, þannig að fyrri framkvæmdir komi ekki í veg fyrir nýtingu þess.
- IV: Vatnsafl, sem ekki er talið nýtanlegt nú, en gera má ráð fyrir að verði virkjað, þegar annað vatnsafl er fullnýtt.

Óvirkjuð vatnsorka er samtals talin 27 TWh/a og þar af falla 26 TWh/a í flokka I til III. Virkjuð orka telst nú 4 TWh/a.

Eftirfarandi er yfirlit yfir umrædda flokkun vatnsaflsins, sbr. einnig meðfylgjandi skrá IV og skýringarmynd 1. Tilgreindur kostnaður miðast við verðlag í desember 1983 og gert er ráð fyrir, að uppsett afl samsvari ársálagsstuðli 0,6 eða 5256 nýtingarstundum á ári til jafnaðar (samræmdur stofnkostnaður K_S). Á mynd 1 er kvarði, sem sýnir stofnkostnað á orkueiningu í bandaríkjadöllum. Er þá miðað við meðalgengi í desember 1983, USD = 28,652 ISK.

FLOKKUN VATNSORKUVERA Á ÍSLANDI EFTIR KOSTNAÐI

Verðlag í desember 1983.

Flokkur	Orkuvinnsla við stöðvarvegg E GWh/a	Samr. stofnk. K_S Mkr	Samræmdur stofnk. Meðal kr/kWh/a	Á bilinu kr/kWh/a
Virkjað	4000	21700	5,425	$3,91 < K_S/E$
I	18000	82950	4,608	$K_S/E \leq 5,73$
II	6000	39010	6,502	$5,73 < K_S/E \leq 8,10$
III	2000	18750	9,375	$8,10 < K_S/E \leq 11,10$
IV	1000	15190	15,190	$11,46 < K_S/E \leq 22,92$
Samtals	31000	177600	5,729	$K_S/E \leq 22,52$
Óvirkjað				
I - III	26000	140710	5,412	$K_S/E \leq 11,46$
Óvirkjað alls	27000	155900	5,774	$K_S/E \leq 22,92$

Stofnkostnaður við virkjun umræddrar heildarorku, 31 TWh/a, er, eins og fram kom, áætlaður um það bil 177,6 Gkr eða 5,73 kr/kWh/a. Tilgreindur stofnkostnaður byggist að nokkru á tiltölulega áreiðanlegum áætlunum en að mestum hluta á framreikningi eða lauslegri endurskoðun misfatarlegra áætlana, sem margar hverjar eru lítt áreiðanlegar. Að hluta er svo byggt á ágizkuðum kostnaði. Nánari flokkun að þessu leyti er í eftirfarandi skrá.

FLOKKUN VATNSORKU Á ÍSLANDI EFTIR NÁKVÆMNI ÁÆTLANA

Verðlag í desember 1983.

Flokkun áætlana	Orkuvinnsla GWh/a	Samræmdur stofnk.	
		Mkr	kr/kWh/a
Tiltölulega góð	7585	38995	5,141
Óviss og í sumum til- vikum mjög óviss	17190	83289	4,845
Ágizkun	6225	55316	8,886
Samtals	31000	177600	5,729

Af 17,2 TWh/a í flokki óvissra áætlana, fást nálægt 8,5 TWh/a með stórvirkjunum á Austurlandi, þar sem áætlaður stofnkostnaður á orkueiningu er nálægt lágmarki 3,8 kr/kWh/a. Vægi síðast nefndra virkjana er því mikið í heildarniðurstöðum, en áætlanir um þær verða enn að teljast mjög óvissar.

Óvirkjuð nýtanleg vatnsorka er, eins og fram hefur komið, talin nema 27 TWh/a að meðaltalinni orku í flokki IV. Í meðfylgjandi skrá I er gerð grein fyrir sérstökum áætlunum um að nýta nálægt 21 TWh/a, en mismunurinn, 6 TWh/a, byggist á ágizkaðri ótiltekinni orkunýtingu. Þar af áætlast rúmlega 2 TWh/a falla í flokk I. Er þá fyrst og fremst höfð í huga orkunýting á vatnasviðum Skaftár, Hverfisfljóts og Markarfljóts, en hugmyndir um orkunýtingu á þessum slóðum eru enn mjög ófullkomnar.

Í skrá II er gerð grein fyrir áætluðum stofnkostnaði starfræktra orkuver. Að því er varðar virkjanir í eigu Landsvirkjunar er þá byggt á sérstökum áætlunum. Að jafnaði liggja til grundvallar magntölur samkvæmt lokauppgjöri við verktaka en athygli er vakin á því, að kostnaður við framkvæmdir eftir að virkjunin var tekin í fullan rekstur, svo sem við síðari lónþéttingu við Sigöldu, er ekki meðtalinn. Áætlaður stofnkostnaður annarra starfræktra orkuvera er ágizkaður með hliðsjón af jafnaðarlegum stofnkostnaði.

Áreiðanlegar áætlanir um orkuvinnslugetu eru engu síður mikilvægar en mat á stofnkostnaði. Orkuvinnsla einstakra virkjunaráfanga er að jafnaði talsvert háð því kerfi virkjana, sem áfanginn tengist við, þ.e. innbyrðis tímroð virkjananna. Meðal annars vegna þess eru tilgreindar orkuvinnslutölur, sem ákvarðaðar hafa verið með tölrekstri á mismunandi tímum, ekki að öllu leyti sambærilegar. Einnig eru þær rennslisráðir, sem lagðar hafa verið til grundvallar, án efa ónákvæmar í ýmsum tilvikum.

Í skrá III er skráð orkuvinnsla starfræktra orkuvera á árunum 1975 til 1983. Af skránni virðist með nokkurri vissu mega ráða orkuvinnslugetu orkuveranna annarra en virkjana á vatnasviði Þjórsár, sem að undantekinni Búrfellsvirkjun I tengdust virkjanakerfinu á tímabilinu. Tilgreind orkuvinnslugeta Búrfellsvirkjunar I er áætlaður orkumáttur virkjunarinnar ásamt 1000 GJ miðlun í Þórisvatni, áður en Sigölduvirkjun tengdist kerfinu. Áætluð orkuviðbót með Sigölduvirkjun og Hrauneyjafossvirkjun miðast við rennsli áður en viðbótarvatni er veitt í Þórisvatn með Kvíslaveitu.

Skráð afl starfræktra orkuvera mun í flestum tilvikum vera sama og ástimplað afl. Undantekning er þó skráð afl Búrfellsvirkjunar I, 240 MW, þar sem ástimplað afl er $N_a = 210$ MW. Í öðrum tilvikum er ástimplað afl í raun mörklaust svo sem í Smyrlabjargaárvirkjun, þar sem orkuvinnsla flestra ára er mun meiri en mögulegt er með ástimpluðu afli. Í skrá III er því dalkur með skráðu "raunafli", sem er $N = N_{\max}/1,1$ eða $N = N_a$ eftir því hvort gildið er hærra. Hér er N_{\max} mesta skráð álag á hverfla virkjunarinnar.

Miðað við áætlaðan stofnkostnað vatnsorkuvera á Íslandi virðist með allgóðri fylgni ($r^2 = 0,97$) mega ákvarða "jafnaðarlegan" stofnkostnað sem fall af orkuvinnslugetu af jöfnunni,

$$K_s = 21 E^{0,8} \text{ Mkr, } 100 \leq E \leq 8500 \text{ GWh/a,}$$

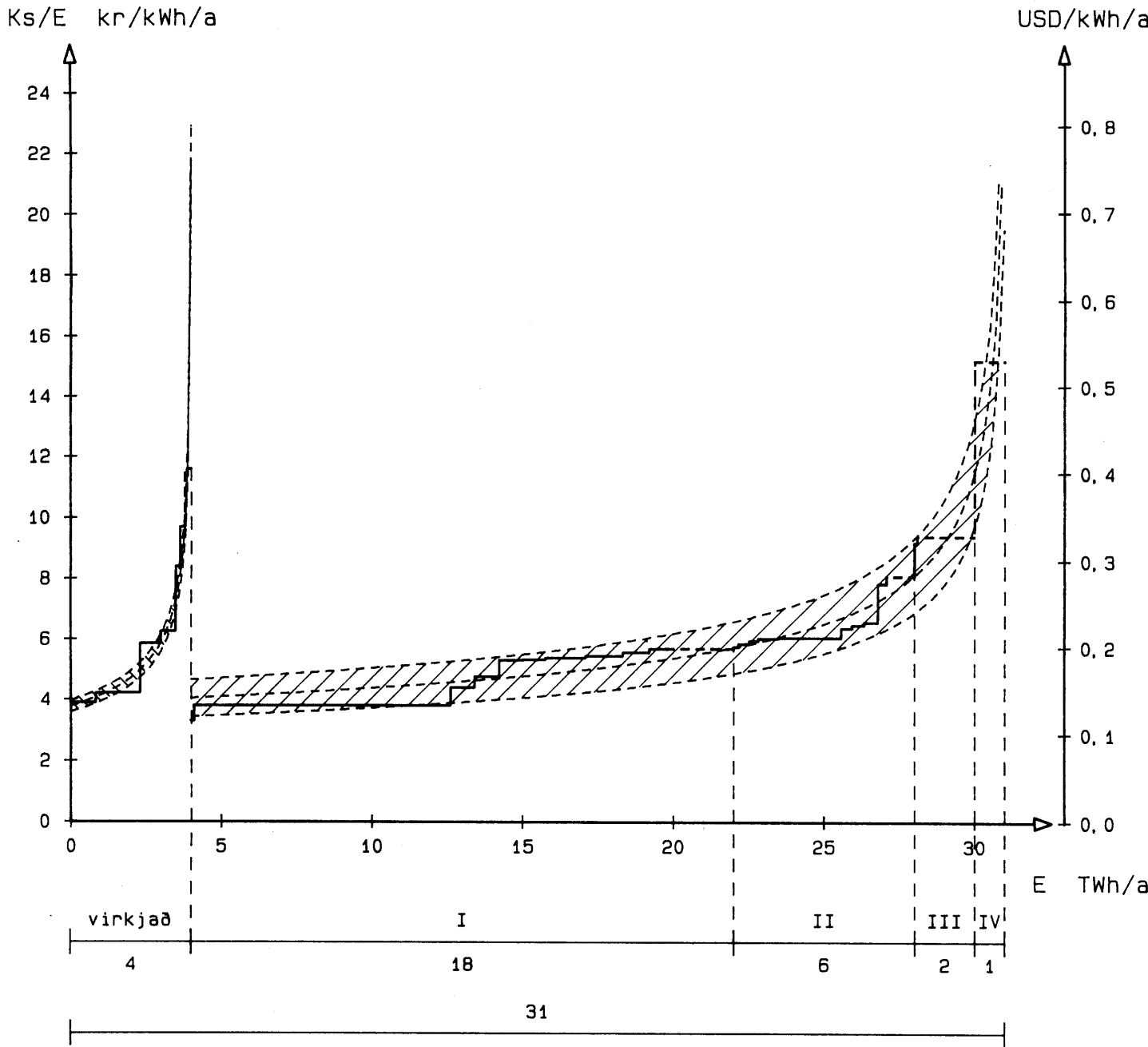
sbr. einnig skýringarmynd 2.

Við ákvörðun á framanskráðri jöfnu eru allar áætlanir um starfræktar og fyrirhugaðar virkjanir lagðar til grundvallar að undantekinni áætlun um Laxá IV (stífluhækkun og aflviðbót í Laxá III). Jafnframt er vakin athygli á því, að litið er á samstæðar framkvæmdir sem einn virkjunaráfanga í þessum skilningi, þar sem í skrá I og II eru tilgreindar samtölur um samræmdan stofnkostnað og orkuvinnslu, svo sem fyrir Búrfellsvirkjun I ásamt 1000 GJ miðlun í Þórisvatni.

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Mynd 1

Verðlag í desember 1983.

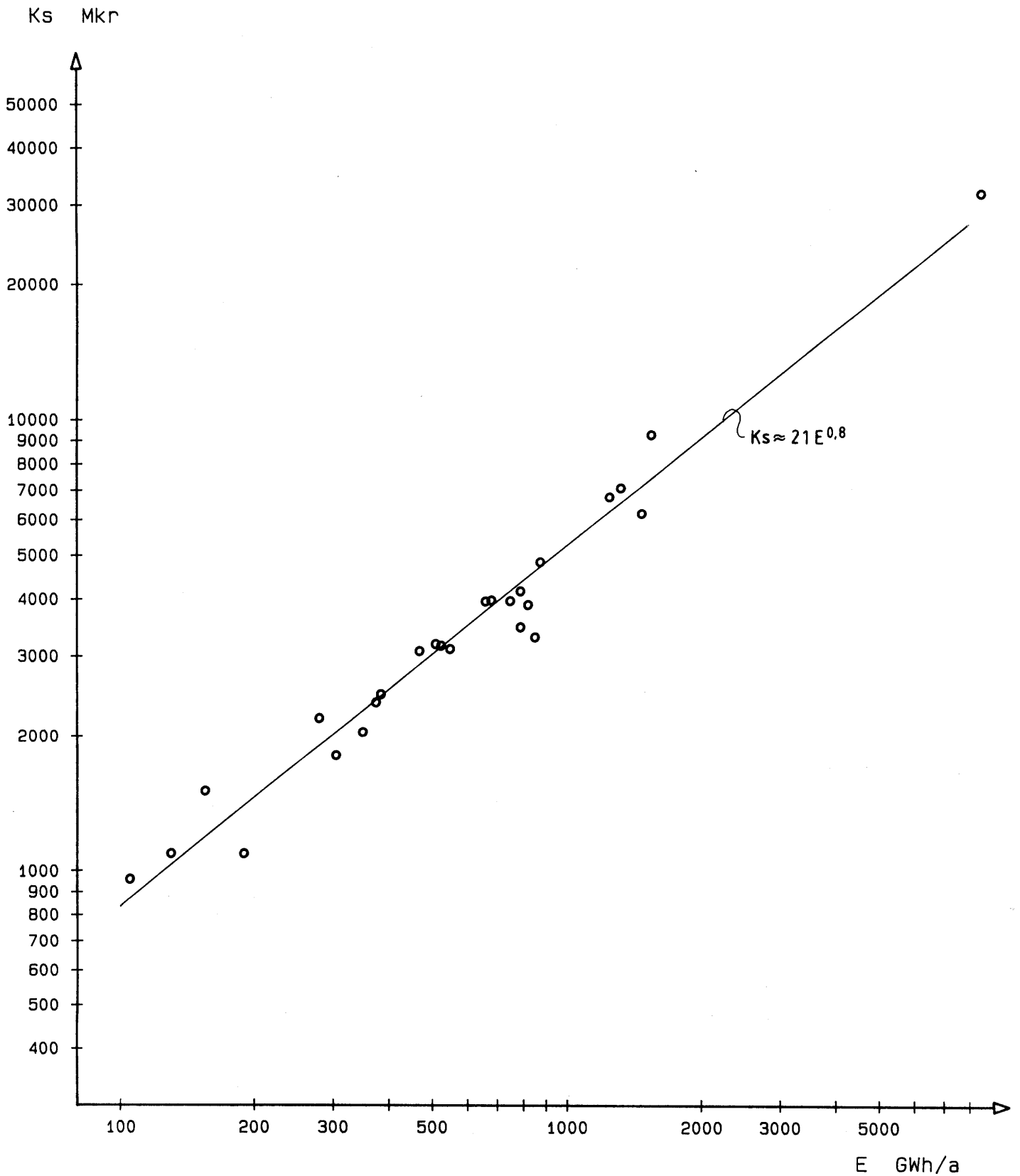


Virkjað	$3,91 < Ks/E$	kr/kWh/a
I	$Ks/E < 5,73$	kr/kWh/a
II	$5,73 < Ks/E < 8,10$	kr/kWh/a
III	$8,10 < Ks/E < 11,46$	kr/kWh/a
IV	$11,46 < Ks/E < 22,92$	kr/kWh/a

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Mynd 2

Jafnaðarlegur stofnkostnaður
sem fall af orkuvinnslugetu.
Verðlag í desember 1983.



VIRKJUN	Afl	Orka	Ársálags- stuðull	Stofnkostnaður	Samr. afl	Samræmdur stofnkostn.	Flokkur	Skýringar				
N	E	GW/h/a	E/8,76N	K	K/E	K/N	KS	Ks/E	Lands- hluti			
MW			Mkr	Kr/kWh/a	Mkr/MW	MW	Mkr	Kr/kWh/a	Mkr/MW			
KVÍSLAVEITA	-	820	0,669	1591	4,570	26,76	3912	4,771	25,07	S	I	Veita með aukinni miðlun í Þóris
BÚRFELL II	140	660	0,628	3924	5,945	32,70	3981	6,032	31,71	S	II	Virkjun eftir stíflugerð
SULTARTANGI	96	750	0,892	1285	4,680	36,56	3991	5,321	27,97	S	I	MIÐLUN
VATNSFELL	28	1550	0,606	9332	6,021	31,96	9362	6,040	31,75	S	II	Virkjun og miðlun
STÓRISJÖR	264	385	0,628	2454	6,374	35,06	2487	6,461	33,96	S	II	Virkjun og miðlun
NORÐLINGAALDA	110	550	0,571	3182	5,785	28,93	3127	5,685	29,88	S	I	Með veitu úr Sandvatni
GLJÓFURLEIT	150	525	0,638	3115	5,933	33,14	3176	6,049	31,79	S	II	Með miðlun við Reftjarnarbungu
BJALLAR	94	470	0,635	3041	6,470	35,99	3092	6,578	34,57	S	II	Með miðlun við Austurbug
BÚARHÁLS	84,5	875	0,666	4697	5,368	31,31	4867	5,562	29,23	S	I	Stífluhækkun og aflviðbót
URRIÐAFOSS	150	37,7	0,629	1869	5,362	29,53	6814	5,452	28,65	S	I	Virkjun og miðlun
ÁBÓTI	189,3	350	0,683	1966	5,617	33,61	2049	5,855	30,78	S	II	Með veitu úr Sandvatni
STÓRAVER	58,5	280	0,832	2047	7,311	53,31	2200	7,858	41,30	S	II	Með miðlun við Reftjarnarbungu
HAUKHOLT	38,4	790	0,601	3484	4,410	23,23	3487	4,414	23,20	N	I	Með miðlun við Austurbug
HESTVATN	150	190	0,723	1030	5,421	34,33	1093	5,754	30,25	N	II	Með miðlun við Austurbug
BLANDA	30	790	0,593	4206	5,324	27,67	4189	5,302	27,87	N	I	Stífluhækkun og aflviðbót
VILLINGANES	152	375	0,685	2296	6,123	36,74	2387	6,366	33,46	N	II	Stífluhækkun og aflviðbót
STAFNSVÖTN	62,5	100	0,431	407	4,070	15,36	330	3,300	17,35	N	I	Stífluhækkun og aflviðbót
ÍSHÓLSVATN	26,5	1325	0,600	7144	5,392	28,35	7145	5,392	28,34	A	I	Stífluhækkun og aflviðbót
LAXÁ IV	252	8530	0,685	10197	3,560	21,36	32440	3,803	19,99	A	I	Veita úr Jökulsá á Fjöllum
FLJÓTSDALUR	937	305	0,553	1867	6,121	29,63	1816	5,953	31,29	A	II	Virkjun og miðlun
JÖKULSÁRVEITA	20	105	0,599	962	9,162	48,10	962	9,160	48,14	A	III	Virkjað niður í Fljótisdal
HAFRAHVAMMAR	3658,4	20975	0,654	29485	4,743	27,19	102907	4,906	25,79	A	III	Eftir Brúarvirkjun
BRÚ	1146,3	6025	0,600	52993	8,796	46,23	52993	8,796	46,23	A	III	Með miðlun á Fjarðarheiði
LAGARFOSS II	730,2	4000	0,625	21381	5,345	29,28	21700	5,425	28,51	A	III	Með miðlun á Fjarðarheiði
FJARÐARÁ	3658,4	20975	0,654	29485	4,743	27,19	102907	4,906	25,79	A	III	Með miðlun á Fjarðarheiði
Átalað samtals	1146,3	6025	0,600	52993	8,796	46,23	52993	8,796	46,23	A	III	Ágizkaður kostnaður
Ótilltekib samtals	730,2	4000	0,625	21381	5,345	29,28	21700	5,425	28,51	A	III	Sundurliðun, sjá skrá II
Virkjað samtals	5534,9	31000	0,639	173859	5,608	31,41	177600	5,729	30,11	A	III	Ágizkaður kostnaður
Vatnsorka alls	5534,9	31000	0,639	173859	5,608	31,41	177600	5,729	30,11	A	III	Sundurliðun, sjá skrá II

Stofnkostnaður miðast við verðlag og gengi í Samræmt afl miðast við ársalagsstuðul 0,6 eða desember 1983. Skaðabætur fyrir landsþjóll og greiðslur fyrir vatnsréttindi eru tili jafnaðar stofnkostnaður við meðalkostnað við hugsaða aflbreytingu 10,3 Mkr/MW.

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Yfirlit yfir áæfluð orkuver

VIRKJUN	Afl		Orka E GWh/a	Arsálag- stuðull E/8,76N	Stofnkostnaður			Samræmdur stofnkostn.			Lands- hluti	Flokkur	Skýringar	
	N MW	MW			K Mkr	K/E kkr/kWh/a	K/N Mkr/MW	Samr. afl	KS Mkr	KS/E kr/kWh/a				KS/Ns Mkr/MW
BÚRPELL I	217,3		1475	0,775	4629	3,798	25,78	280,6	6254	4,240	22,29	S	I	Upprunaleg miðlun
PÓRISVATN	-				973									
SIGALDA	150		680	0,518	4209	6,190	28,06	129,4	3997	5,877	30,89	S	II	
HRAUNEYJAFOSS	210		850	0,462	3823	4,498	18,20	161,7	3326	3,913	20,56	S	I	
SULTARTANGASTÍFLA	-		130	-	838	6,446	-	24,7	1093	8,406	44,18	S	III	Miðlun
STEINGRIMSSTÓÐ	26,4				997									
LJÓSAFOSS	14,6		510	0,656	668	6,110	35,09	97,0	3201	6,276	32,99	S	II	
LJÓSAFOSS	47,8				1451									
LAXÁ I	4,6				309									
LAXÁ II	8,0		155	0,863	432	9,116	68,93	29,5	1506	9,714	51,05	N	III	
LAXÁ III	7,9				650									
RENNSLISV. VIÐ MÍVATN	-				22									Rennslisjöfnun
ORKUVER LV	686,6	3800		0,632	19001	5,000	27,67	722,9	19377	5,099	26,80			
ELLIDÁR	3,16		2,9	0,105				0,55				S		
ANDAKÍLL	7,92		31,0	0,447				5,90				V		
RJÓKANDI	0,91		7,0	0,878				1,33				V		
MJÓLKÁ	8,10		43,5	0,613				8,28				V		
REIÐHJALLI	0,40		2,7	0,771				0,51				V		
FOSSAVATN	1,16		4,5	0,443				0,86				V		
NONHORN SVATN												V		
MÝRÁ	0,06		0,2	0,381				0,04				V		
BLÁVADALSA	0,20		0,6	0,342				0,11				V		
SÆNGURFOSS	0,72		0,9	0,143				0,17				V		
PVERÁ	1,74		3,5	0,230				0,67				V		
LAXÁRVATN	0,48		3,6	0,856				0,68				N		
GÓNGUSKARÐSA	1,16		7,7	0,758				1,46				N		
SKRÍÐSFOSS	4,90		15,0	0,349				2,85				N		
GARÐSA	0,17		1,0	0,672				0,19				N		
LAGARFOSS	7,80		49,0	0,717				9,32				A		
GRÍMSÁ	2,98		15,5	0,594				2,95				A		Miðlun
ÓÐAÐVÖTN												A		
FJARÐARÁ	0,16		1,1	0,785				0,21				A		
BÚÐARÁ	0,24		0,9	0,428				0,17				A		
SMYRLABJARGAÁ	1,34		9,4	0,801				1,79				A		Veita og miðlun
PVERÁRVEITA	-													
ÖNNUR ORKUVER	43,6	200		0,524	2380	11,900	54,59	38,1	2323	11,615	61,04			Ágizkaður kostnaður
STARFRÆKT ORKUVER ALLS	730,2	4000		0,625	21381	5,345	29,28	761,0	21700	5,425	28,51			

Orkuvinnsluaukning með Sigölduvirkjun, Hrauneyjafossvirkjun og Sultartangastíflu er áætluð.

Önnur orkuvinnsla er metin með hliðsjón af orkuvinnslu undanfarna ára samkvæmt skýrslum OS, sbr. skrá III. Sjá ennfremur skrá I.

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Yfirlit yfir starfrækt orkuver

Skrá II

SKRÁ IV

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Yfirlit yfir áætlaðan samræmdan stofnkostnað.
Verðlag í desember 1983.

Flokkun		E GWh/a	Ks Mkr	Ks/E kr/kWh/a
Óvirkjuð orka I Ks/E ≤ 5,73	Áætluð	15780	70302	4,455
	Ótiltekin	2220	12648	5,697 1)
	Samtals	18000	82950	4,608
Óvirkjuð orka II 5,73 < Ks/E ≤ 8,10	Áætluð	5090	31643	6,217
	Ótiltekin	910	7367	8,096 1)
	Samtals	6000	39010	6,502
Óvirkjuð orka III 8,10 < Ks/E ≤ 11,46	Áætluð	105	962	9,162
	Ótiltekin	1895	17788	9,387 2)
	Samtals	2000	18750	9,375
Óvirkjuð orka IV 11,46 < Ks/E ≤ 22,92	Áætluð	0	0	-
	Ótiltekin	1000	15190	15,190 2)
	Samtals	1000	15190	15,190
Virkjuð orka	Áætl. kostn.	3800	19377	5,099
	Ágizk. kostn.	200	2323	11,615 3)
	Samtals	4000	21700	5,425
Orka alls	Áætl. kostn.	24775	122215	4,933
	Ágizk. kostn.	6225	55385	8,897
	Samtals	31000	177600	5,729

- 1) Ágizkaður samræmdur stofnkostnaður nálægt hámarkskostnaði í flokknum.
- 2) Ágizkaður samræmdur stofnkostnaður nálægt meðalkostnaði í flokknum.
- 3) Ágizkaður kostnaður byggður á jafnaðarlegum kostnaði.

HEIMILDIR

Helztu áætlanir og heimildir um virkjanir á Íslandi, sem tilgreindar eru í skrá I í fylgiskjalinu.

Virkjun Hvítár við Hestvatn

5. Lýsing mannvirkja og áætlun um stofnkostnað.
Skýrsla til Raforkumálastjóra.
VST, apríl 1961.

Skjálfafljót

Virkjunarathuganir 1970-1974 og drög að áætlun um 62,5 MW virkjun við ÍSHÓLSVATN.
Skýrsla samin fyrir OS.
VST sf., apríl 1976.

Virkjun Fjarðarár I

Drög að áætlun.
Skýrsla samin fyrir OS.
VST sf., júní 1976.

Hvítárvirkjanir I

Samanburðaráætlanir um nýtingu fallsins frá Hvítárvatni niður fyrir Haukholt.
Skýrsla samin fyrir OS.
VST hf., maí 1977.

Virkjun Héraðsvatna II

Hönnunaráætlun um 30 MW virkjun við VILLINGANES.
Skýrsla samin fyrir OS.
VST hf., marz 1977.

Austurlandsvirkjun

I. Tilhögun virkjana
II. Hafrahvammavirkjun
III. Brúarvirkjun
IV. Múlavirkjun
V. Fljótsdalsvirkjun. Hraunaveita
VI. Jökulsárveita. Eyjabakkaveita
Skýrsla samin af AV hf., VIRKI hf. og VST hf.
OS og RARIK, maí 1978.

Þjórsárvirkjanir

Mynzturáætlun um orkunýttingu á vatnsviði Þjórsár niður fyrir Búrfell.

Skýrsla samin af AV hf., VIRKI hf. og VST hf.
LV, október 1980.

Sultartangavirkjun

Verkhönnun 120 MW virkjunar í Þjórsá við Sultartanga.

Skýrsla samin af VST hf.
LV, maí 1981.

Blönduvirkjun

Verkhönnun 150 MW virkjunar við EIÐSSTAÐI.

Skýrsla samin af VST hf. og RT hf.
RARIK, apríl 1982.

Fljótsdalsvirkjun

Verkhönnun 252 MW virkjunar. I. Greinargerð. II. Uppdrættir.

Skýrsla samin af AV hf. HÖNNUN hf., VST hf., VIRKI hf. og RAFHÖNNUN hf.
RARIK, maí 1982.

Stækkun Búrfells(virkjunar)

Verkhönnun 140 MW virkjunar.

Skýrsla samin af AV hf. og RAFHÖNNUN hf.
LV, september 1982

Vatnsorka á Íslandi

Áætlun um nýtanlega vatnsorku á Íslandi, líklegur kostnaður við að virkja hana og samanburður við áætlaðan kostnað nýlegra eða fyrirhugaðra vatnsorkuvera í mismunandi þjóðlöndum.

Skýrsla samin af VST hf.
LV, júní 1984.

Fylgiskjalið er útdráttur úr þessari skýrslu en hún birtist einnig í enskri þýðingu í janúar 1985 og enskum útdrætti í marz sama ár.

Eftirfarandi skýrslur birtust flestar eftir að síðast nefnd skýrsla var samin, en til að auðvelda yfirlit eru hér þó einnig meðtaldar þær hlutaskýrslur um verkhönnun Kvíslaveitu, sem áður höfðu birt.

Efri-Þjórsá

Mynzturáætlun.

Skýrsla samin af AV hf.
LV, apríl 1984.

Vatnsfellsvirkjun

Verkhönnun 100 MW virkjunar.
Skýrsla samin af VIRKI hf.
LV, júní 1984.

Þórisvatnsmiðlun. Skýrsla um framvindu Kvíslaveitu

1. áfangi. Stóraverssskurður, Stófaversstífla.
2. áfangi. Svartárskurður, Svartárstífla (C₁),
Stóraversstífla (hækkun).
Skýrsla samin af VST hf.
LV, febrúar 1982.

Kvíslaveita - 1. áfangi

Verkhönnun. Stóraversstífla, Stóraverssskurður, brú, verkauki.
Skýrsla samin af VST hf.
LV, maí 1984.

Kvíslaveita - 2. áfangi

Verkhönnun. Svartárskurður, breikkun.
Skýrsla samin af VST hf.
LV, desember 1983.

Kvíslaveita - 3. áfangi

Verkhönnun. Stíflur í Svartá, Þúfuverskvísl og Eyvindarkvísl.
Skýrsla samin af VST hf.
LV, marz 1982.

Kvíslaveita - 4. áfangi

Útboðsgögn 5205.
Samin af LV og VST hf.
LV, marz 1984.

Kvíslaveita - 5. áfangi

Verkhönnun.
Þjórsárstífla, Þjórsárskurður, Austurkvíslarstífla.
Skýrsla samin af VST hf.
LV, nóvember 1984.

Þórisvatnsstíflur

Verkhönnun.
Skýrsla samin af VST hf.
LV, gormánuði 1984.

Þjórsárvirkjanir

Forathugun á virkjunaraðstæðum neðan Búrfells.
Skýrsla samin af VST hf.
OS, desember 1984.

Virkjun Austari-Jökulsár. Stafnsvatnavirkjun

Forathugun.

Skýrsla samin af VST hf.

OS, desember 1984.

Sultartangavirkjun

Áætlun um skurðvirkjun.

Skýrsla samin af VST hf.

LV, maí 1985.

Helztu skýrslur um yfirlits- og mynzturáætlanir fyrir virkjanir á einum eða fleiri vatnasviðum, sem ekki eru áður tilgreindar, eru þessar:

Álitsgerð um fullvirkjun Laxár í Suður-Þingeyjarsýslu
VST, maí 1958.

Preliminary Appraisals of some Potential Hydro-Electric Power Developments in the Þjórsá and Hvítá river Systems, Southern Iceland.

Skýrsla samin af VST
Raforkumálastjóri, ágúst 1959.

Hydroelectric Power Resources. Hvítá and Thjórsá River Systems, Southwest Iceland.

Advisory Report
HARZA, marz 1960

Survey of the Hvítá and Thjórsá River Basins Iceland.

Preliminary Master Plan
Prepared for the United Nations
NORENO Foundation Oslo, Norway, júlí 1966.
(teikningar í sérstöku hefti)

Mynzturáætlun Þjórsár- og Hvítárvirkjana.

Gerð fyrir Orkustofnun
VST sf., apríl 1967.

Vestfjarðavirkjanir. Arnarfjarðarár.

Virkjunarathuganir
AV, júní 1967.

Virkjun Skjálfafljóts.

Samanburðaráætlanir. Áætlun um virkjun við Íshólsvatn.
Skýrsla samin af VST sf.
OS, janúar 1973.

Austurlandsvirkjun.

Yfirlit yfir virkjunarathuganir á vatnasviðum Jökulsár á Fjöllum, Jökulsár á Brú og Jökulsár í Fljótsdal.
Skýrsla samin fyrir OS.
VST sf., október 1975.

Vestfjarðavirkjanir.

Vatnsfjarðarvirkjun. Frumáætlun.
Aðrir valkostir á Glámusvæði.
Skýsla samin af AV hf.
OS, apríl 1977.

Niðurstöður í þessum yfirlitsáætlunum og nokkrum áður tilgreindum er að finna í eftirfarandi skrá.

Vatnasvið	Áætlun ár	Áætluð orkuvinnsla GWh/a	Höfundar	Ath.
Laxá	1958	855	VST	
Þjórsá Hvítá	1959	5.690 2.175	VST	1)
Þjórsá Hvítá	1960	9.650 3.150	HARZA	
Þjórsá og Hvítá	1966	10.000	NORENO	
Þjórsá og Hvítá	1967	12.400	VST	
Vestfirðir, Arnarfj.	1967	79	AV	
Skjálfandafljót	1973	1.370	VST	2)
Austurland	1975	10.480	VST	3)
Vestfirðir, Vatnsfj. Vestfirðir, Glámusv.	1977	180 172	AV	
Hvítá	1977	1.710	VST	4)
Austurland	1978	10.300	AV-VIRKIR-VST	3)
Þjórsá	1980	7.640	AV-VIRKIR-VST	5)

1) Efri-Þjórsá ekki meðtalin. Að meðtalinni núverandi áætlun um hana samt. 7.240 GWh/a eða 9.415 GWh/a í Þjórsá og Hvítá.

2) 1.560 GWh/a með Fnjóská.

3) Jökulsá á Fjöllum, Jökulsá á Brú og Jökulsá í Fljótsdal.

4) Óskert rennsli um Gullfoss.

5) Vatnasvið neðan Búrfellsvirkjunar ekki meðtalið. Að því meðtöldu samkv. núverandi áætlun, samt. 9.510 GWh/a.

Núverandi áætlun um virkjanalega vatnsorku á Íslandi, 31 TWh/a, er að stofni til frá árinu 1978, sbr. bréf VST hf. til LV dags. 2. nóvember það ár. Þá var fyrst tekið ákveðið tillit til kostnaðar og líklegra takmarkana vegna verndunar umhverfis. Vatnsaflinu var þá einnig fyrst skipað í "hagkvæmnisflokka".

Önnur yfirlit yfir nýtanlega vatnsorku á öllu landinu eru helzt þessi:

VATNORKA Á ÍSLANDI og notkun hennar,

eftir Jón Þorláksson verkfræðing.

Nefndarálit meirihluta fossanefndarinnar, er skipuð var 22. október 1917, bls. 67-120.

Reykjavík 1919.

VATNSAFL ÍSLANDS,

eftir Sigurð Thoroddsen, verkfræðing.

Orkulindir og iðnaður.

Sérprentun úr tímariti VFÍ 1.-6. hefti, 47. árg. 1962, bls 4-16.

VATNSAFL Á ÍSLANDI,

eftir Hauk Tómasson, forstöðumann Vatnsorkudeildar OS.

Tímarit VFÍ 66. árg. 1981 bls. 33-38.

Yfirlit yfir niðurstöður þessara áætlana og núverandi áætlunar er eftirfarandi:

Áætlun	Ár	Orkuvinnsla	Ath.
Vatnorka á Íslandi	1919	26 TWh/a	
Vatnsafl Íslands	1962	35 TWh/a	
Vatnsafl á Íslandi	1981	64 TWh/a	1)
Vatnsorka á Íslandi	1984	31 TWh/a	2)

1) Tæknilega virkjanlegt vatnsafl án tillits til kostnaðar og verndunar umhverfis. Heildarorka í rennandi vatni á landinu var áætluð 187 TWh/a.

2) Áætlun VST, sem að stofni til er frá árinu 1978.

Í skrá I í fylgiskjalinu er ótiltekin orka um það bil 6 TWh/a. Er þá að nokkru byggt á áætlunum um einstök vatnsföll frá ýmsum tímum og að hluta einnig á hreinum ágizkunum.

Um nokkrar þessara áætlana hafa birzt skýrslur og eru þær áhugaverðustu e.t.v. þessar:

Virkjun Árbæjarfoss í Ytri-Rangá
Skýrsla samin fyrir Raforkumálastjóra.
VST sf. maí 1961.

Efri-Brúará
Mat á virkjunaraðstöðu.
Skýrsla samin fyrir Raforkumálastjóra.
VST sf. maí 1962

Síðast nefnd skýrsla var að hluta þýdd á ensku í september 1962. Umsögn Harza um skýrsluna er frá desember 1962 og framhaldsgreinargerð VST frá janúar 1963.

Kláffoss í Hvítá
Virkjunarmat, eftir Rögnvald Þorláksson, verkfr. o. fl.
Andakílsárviðvirðing, apríl 1964.
Endurskoðuð áætlun er frá janúar 1975.

Eystri-Rangá
Mat á virkjunaraðstöðu
Skýrsla samin fyrir Raforkumálastjóra.
VST sf., október 1964.

Virkjun Geithellnaár
Frumáætlun.
Skýrsla samin af VST sf.
RARIK, júní 1973.

Öryggi í rafokumálum á Vestfjörðum
Skýrsla samin af OS, VHS og AV hf.
OS, maí 1983.

Í skýrslunni eru endurskoðaðar áætlanir um Vatnsfjarðarvirkjun og Skötufjarðarvirkjun.

Yfirlit yfir virkjanir, sem fjallað er um í síðast töldum skýrslum er í eftirfarandi skrá, þar sem árleg orkuvinnsla er lauslega endurmetin.

Virkjun	Meðal- rennsli Gl/a	Miðlun Gl	Hönnunar- fallhæð m	Orku- vinnsla GWh/a
Eystri-Rangá, Tungufoss	632	-	31	40
Ytri-Rangá, Árbæjarfoss	1574	-	14,4	45
Brúará, Efstidalur	1223	-	71,5	170
Kljáfoss	2672	-	14,5	75
Vatnsfjörður	131	22	445	115
Skötufjörður	63	8	465	60
Geithellnaá	575	16	40	45
			Samtals	550

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 2

Áætlanir um stofnkostnað

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Áætlanir um stofnkostnað

Í eftirfarandi skrá er gerð grein fyrir sundurliðun stofnkostnaðar vatnsorkuvirkja í nokkra meginþætti. Talsverð óvissa hvílir ætíð á áætlunum um stofnkostnað og þá fyrst og fremst á áætlunum, sem gerðar eru á fyrstu stigum hönnunar. Raunhæft mat á slíkri óvissu er hins vegar miklum vandkvæðum bundið, þar sem upplýsingar um "raunkostnað" (bókfærðan kostnað) vatnsorkuvirkja eru af skornum skammti og þær hvergi nægilega ítarlegar til samanburðar við áætlaðan kostnað. Grunur hefur leikið á einhliða skekkjum í kostnaðaráætlunum, en í raun er ekki vitað, hvort þær hafa verið til staðar og þá í hve ríkum mæli.

Líklegar orsakir einhliða skekkja eru, að aðstæður séu að jafnaði metnar hagstæðari en raun verður á, og þá einkum á forathugunarstigi, þegar varasamt er að útiloka virkjun, áður en fullnægjandi vettvangsrannsóknir hafa farið fram.

Í sundurliðunarskrá er virkjunarkostnaði skipt í sex þætti. Tveir fyrst taldir þættir, áætlaður verkkostnaður (a) og ófyrirséður kostnaður (b), eru einu nafni nefndir verktakakostnaður (c). Til leiðréttingar á líklegum einhliða skekkjum reiknast hlutur ófyrirséðs kostnaðar í verktakakostnaði stigminnkandi frá forathugunarstigi samkvæmt jöfnunni,

$$b = 5 \cdot 2^{x/4} \text{ \textperthousand},$$

þar sem x er tilgreind einkennistala hönnunarstigs (sjá skrá á bls 4).

Kostnaður við rannsóknir á útboðsstigi, útboð, lokahönnun og eftirlit ásamt umsjón með framkvæmdum (d) er metinn hlutfallslega eins á öllum stigum hönnunar eða 13 af hundraði verktakakostnaðar (c), og áfallinn kostnaður vegna hönnunar og rannsókna við upphaf útboðsgagnagerðar (e) er metinn 2,4% verktakakostnaðar eða um það bil 2 af hundraði beins kostnaðar (g), þ.e. virkjunarkostnaðar í heild að frádregnum fjármagnskostnaði. Greiðslur fyrir vatnsréttindi og skaðabætur fyrir landspjöll (f) reiknast 4,1 af hundraði verkkaupakostnaðar (c) eða 3% heildarkostnaðar (k). Síðast nefndur kostnaðarþáttur (f) getur að sjálfsögðu vikið verulega frá tilgreindu meðalgildi í einstökum tilvikum.

Kostnaðarpættir d, e, f og h nefnast einu nafni verkkaupakostnaður. Samtals eru þeir metnir 37 af hundraði verktakakostnaðar. Stærstur er fjármagnskostnaður (h) 17,5 af hundraði verktakakostnaðar eða um það bil 14,6 af hundraði beins kostnaðar (g). Hlutfall þetta byggist á dæmigerðu fjárstreymi á undirbúnings- og framkvæmdatíma virkjunarinnar (rúmlega 20 árum) og um það bil 6% raunvöxtum. Áfallinn kostnaður í hlutfalli af beinum kostnaði, þ.e. heildarkostnaði að frátöldum fjármagnskostnaði, reiknast þá á hverjum tíma af jöfnunni,

$$g(t) = e^{-\left[(t+1,75)^{1/3} - (t+1,75)^{-1/3} \right] 3}, \quad -0,75 \leq t$$

þar sem t er tími til gangsetningar í árum (reiknast neikvæður eftir gangsetningu).

Samkvæmt tilgreindri jöfnu eru um það bil 2 af hundraði kostnaðar áfallinn við upphaf útboðsgagnagerðar sjö árum fyrir gangsetningu og kostnaður reiknast að fullu gjaldfallinn níu mánuðum (0,75 árum) eftir gangsetningu.

Kostnaður við virkjunarframkvæmdir reiknast til nógildis við gangsetningu og mismunur þess og beins kostnaðar telst fjármagnskostnaður, þ.e.

$$h = \left[\int_{-0,75}^{20} (1+r)^t \left| \frac{dg}{dt} \right| dt - 1 \right] 100, \quad \% \text{ af } g,$$

þar sem r er vaxtafótur.

Fjármagnskostnaður vex hratt með hækkandi vöxtum, sbr. skýringarmynd og eftirfarandi skrá.

Vaxtafótur	r	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
	% af g	9,4	14,6	20,0	25,7	31,8
Fjármagnsk.	% af c	11,2	17,4	23,9	30,7	38,0

Samkvæmt eðli máls getur fjármagnskostnaður verið mismunandi frá einum framkvæmdum til annarra, en ákvarðaður fjármagnskostnaður miðast hér við jafnaðarlegt (dæmigert) fjárstreymi, sbr. það sem áður greinir.

Í skránni er tilgreindur áætlaður tími frá mismunandi hönnunarstigum til gangsetningar virkjunar samkvæmt jöfnunni,

$$t = 2^{x/2} - 1 \text{ ár,}$$

þar sem x er áður nefnd einkennistala hönnunarstigs.

Frá lokum forathugunar reiknast þannig 15 ár til gangsetningar, um það bil fjögur ár og átta mánuðir frá útboði til gangsetningar og 3 ár til gangsetningar frá því samningsgerð um verkið er að fullu lokið. Þessi tímamörk eiga að endurspegla venjulegan umþóttunar-, undirbúnings- og framkvæmdatíma, en þau geta að sjálfsögðu vikið talsvert frá tilgreindu gildi.

Eins og vikið var að í upphafi er ekki með neinni vissu hægt að tilgreina óvissumörk áætlana á mismunandi hönnunarstigum. Líkleg óvissa er ákvörðuð af jöfnunni,

$$s = \pm 1,5 \cdot 2^{x/2} \%,$$

sbr. skrána og meðfylgjandi skýringarmynd.

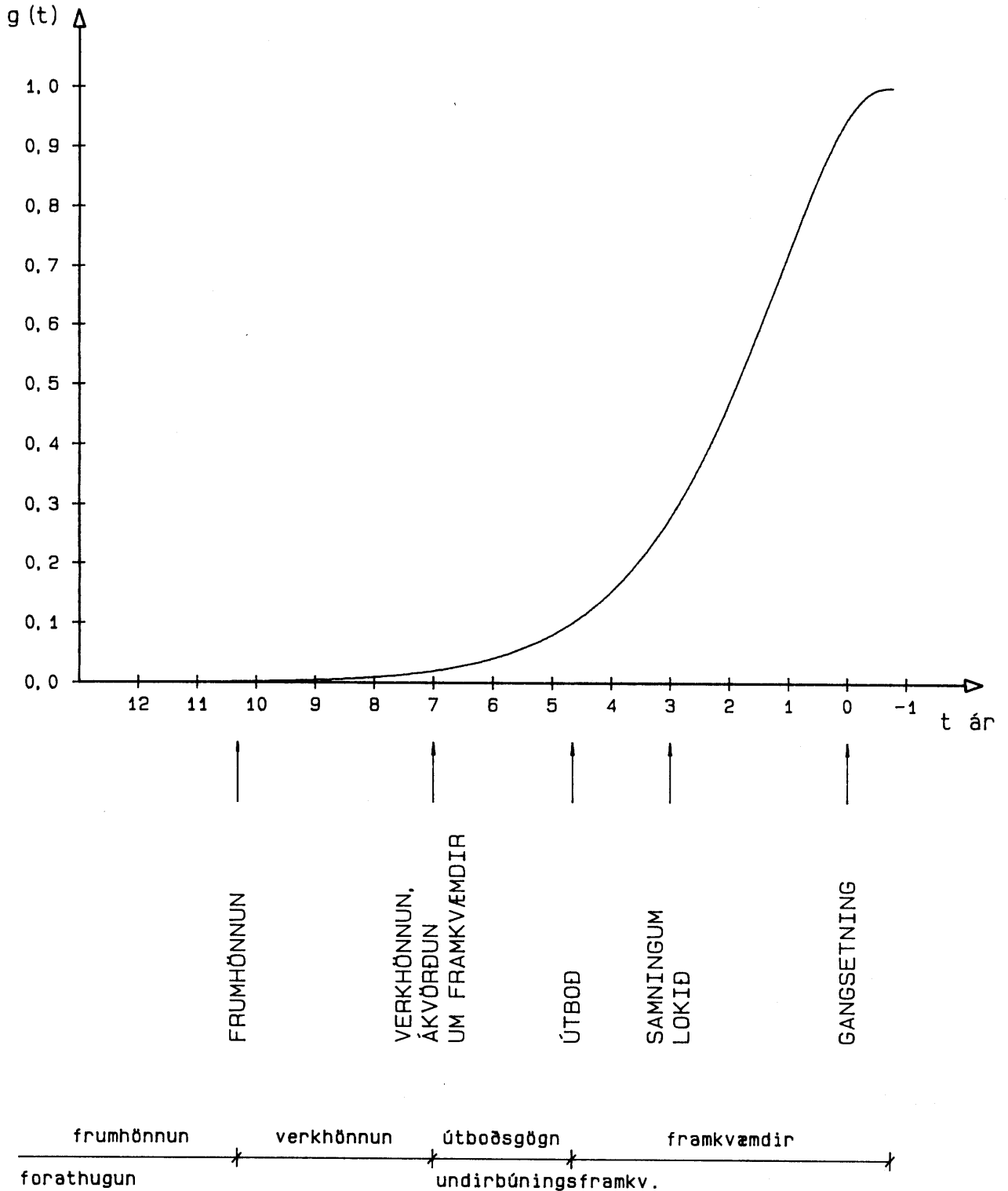
SUNDURLIÐUN STOFNKOSTNAÐAR

KOSTNAÐARÞETTIR		HÖNNUNARSTIG					
Heiti		Forath. %	Frumh. %	Verkh. %	Útboðsg. %	Verks. %	Gangs. %
Áætl. verkk.	a	80,0	83,2	85,9	88,1	90,0	95,0
Ófs. kostn.	b	20,0	16,8	14,1	11,9	10,0	5,0
VERKTAKAK.	c	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Hönn- og umsk.	d	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
Undirbúningsk.	e	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Vatnsr. o.fl.	f	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
BEINN KOSTN.	g	119,5	119,5	119,5	119,5	119,5	119,5
Fjármagnsk.	h	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
HEILDARKOSTN.	k	137,0	137,0	137,0	137,0	137,0	137,0
Óvissa í ± %	s	24,0	17,0	12,0	8,5	6,0	1,5
Ár til gangs.	t	15,0	10,3	7,0	4,7	3,0	0,0
Einkennistala	x	8	7	6	5	4	0

KOSTNAÐARÞETTIR	HLUTFÖLL í %		
VERKTAKAKOSTNAÐUR	<u>100,0</u>	83,7	73,0
Hönnunar- og umsjónarkostnaður	13,0	10,9	9,5
Undirbúningskostnaður	2,4	2,0	1,7
Greiðslur fyrir vatnsréttindi og landsspjöll	4,1	3,4	3,0
BEINN KOSTNAÐUR	119,5	<u>100,0</u>	87,2
Fjármagnskostnaður	17,5	14,6	12,8
HEILDARKOSTNAÐUR	137,0	114,6	<u>100,0</u>

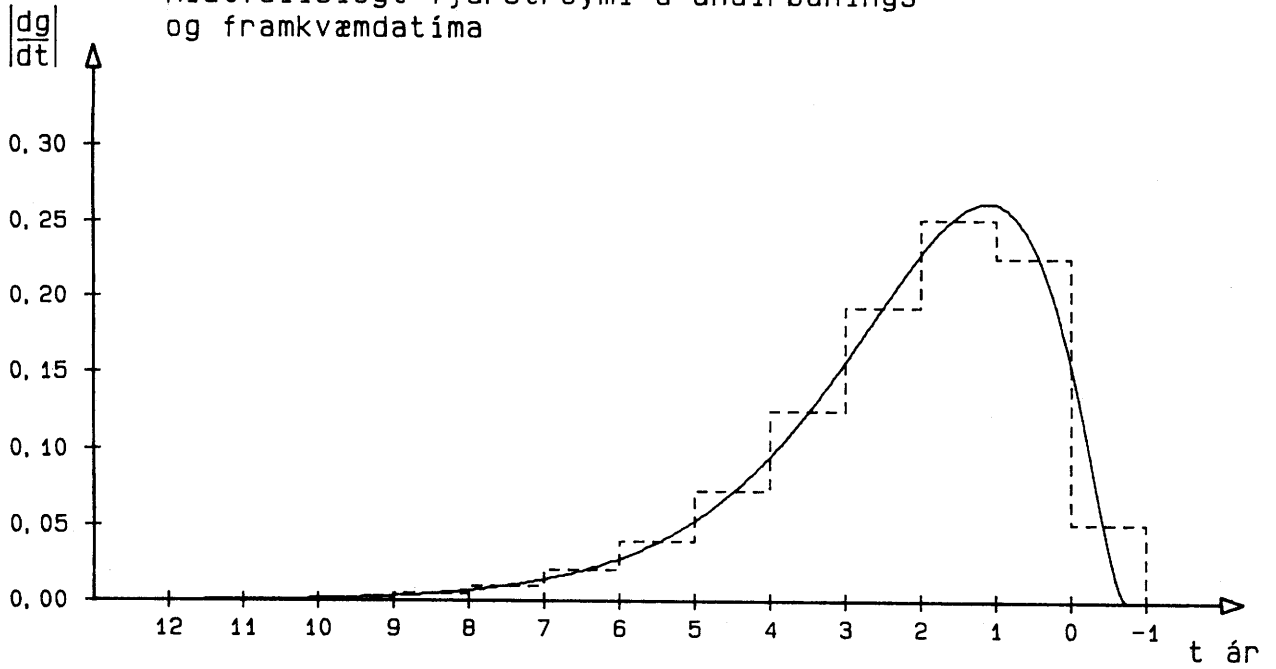
VATNSORKA Á ÍSLANDI

Hlutfallslegur kostnaður sem fall af tíma

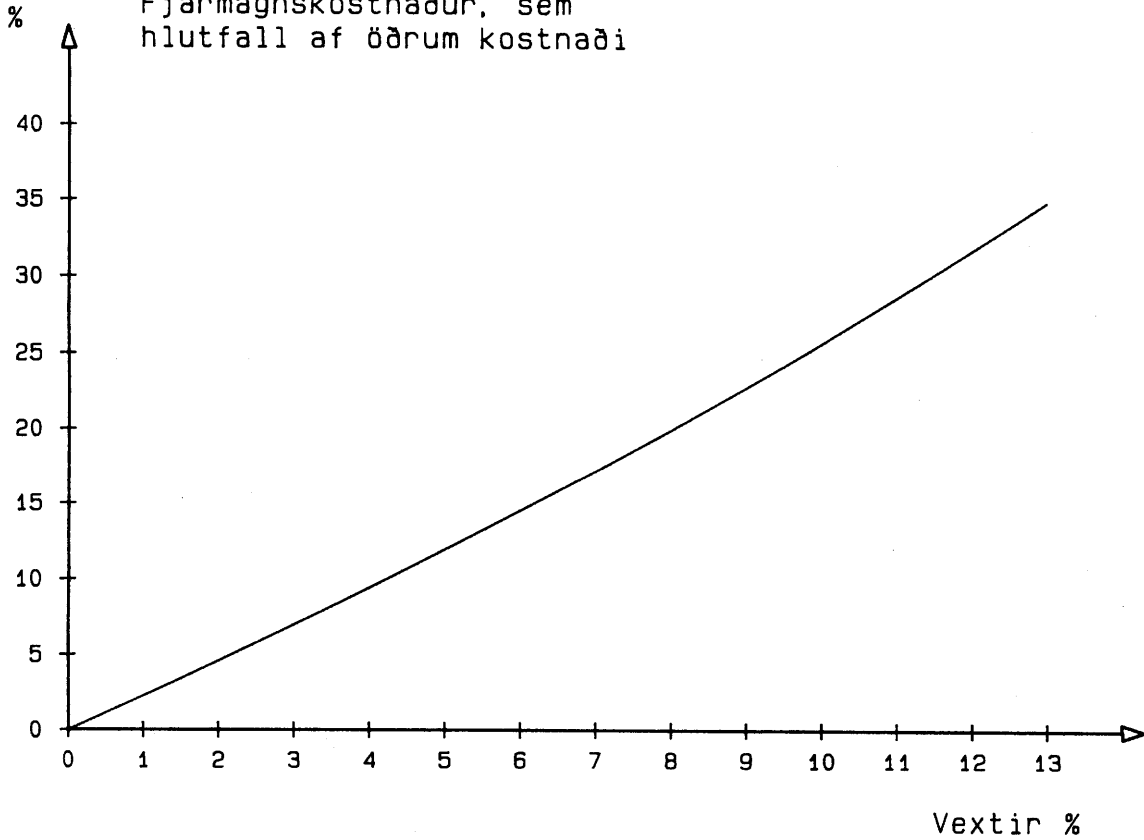


VATNSORKA Á ÍSLANDI

Hlutfallslegt fjárstreymi á undirbúnings-
og framkvæmdatíma



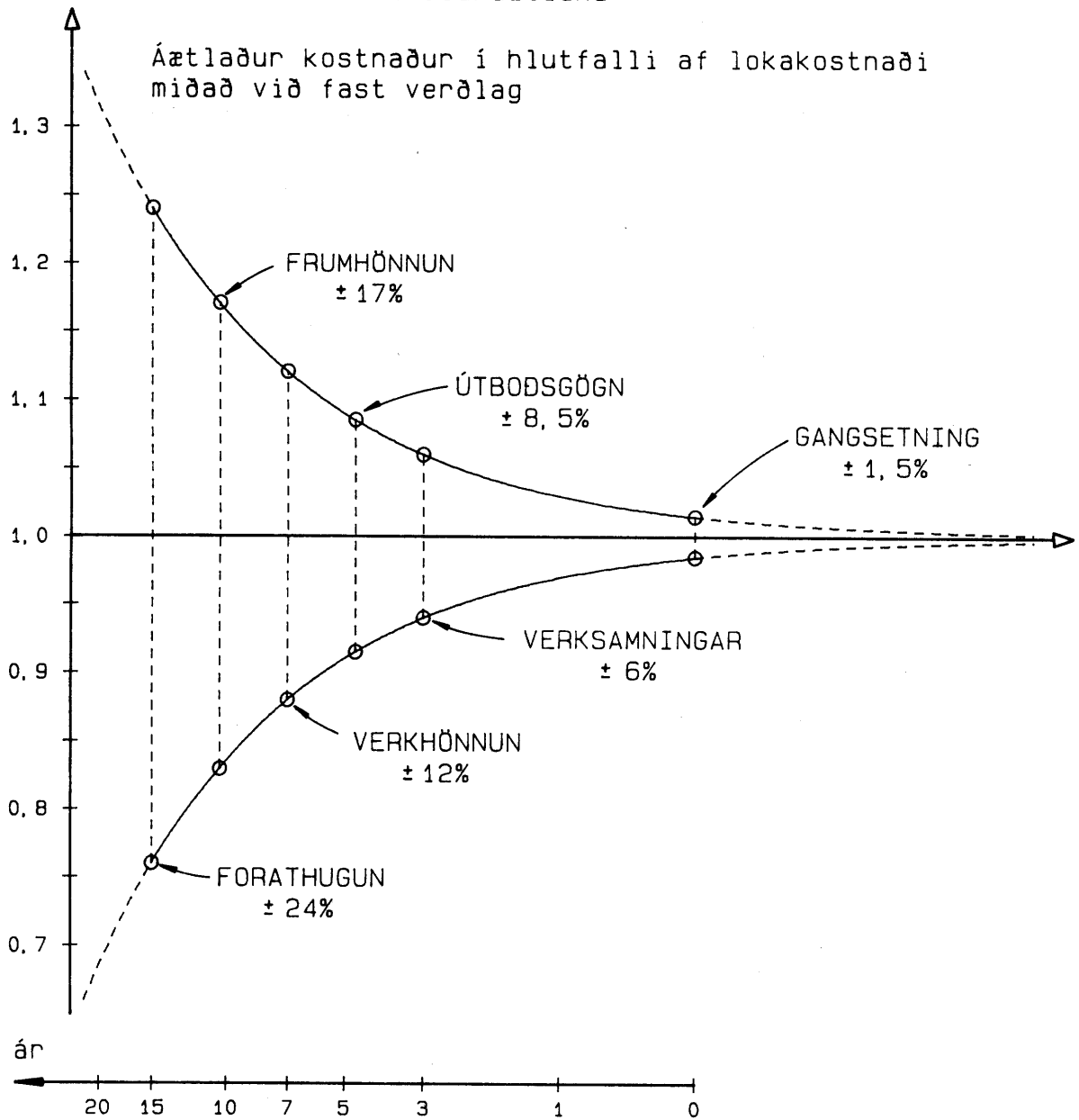
Fjármagnskostnaður, sem
hlutfall af öðrum kostnaði



VATNSORKA Á ÍSLANDI

Óvissumörk kostnaðaráætlana

Áætlaður kostnaður í hlutfalli af lokakostnaði
miðað við fast verðlag



VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 3

**Orkukostnaður við stöðvarvegg og
hagkvæmasta virkjunarstærð**

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Orkukostnaður við stöðvarvegg og hagkvæmasta virkjunarstærð

Orkukostnaður við stöðvarvegg ákvarðast af jöfnu [1], sbr. bls. 6-8.

$$k = \frac{\frac{\ln(1+r)}{1-(1+r)^{-t_0}} + v}{(1-\beta) \frac{1-(1+r)^{-x}}{x \ln(1+r)} + \beta} \cdot \frac{K}{E}, \text{ kr/kWh} \quad [1].$$

Hér er:

r : vaxtafótur

t_0 : ævitími orkuvers í árum

v : árlegur rekstrar- og viðhaldskostnaður í hlutfalli af stofnkostnaði.

$\beta = E_0/E$: hlutfallsleg upphafsnýting, $0 \leq \beta \leq 1$

$$x = \frac{E-E_0}{q} = \frac{(1-\beta)E}{q} : \text{fullnýtingartími í árum}$$

K : stofnkostnaður virkjunar í Mkr

E : orkuvinnslugeta í GWh/a

E_0 : upphafsnýting í GWh/a

q : árlegur jafn vöxtur orkubarfar í GWh/a²

Með fullnýtingu í upphafi, $\beta=1$, $x=0$, fæst

$$k_0 = \left[\frac{\ln(1+r)}{1-(1+r)^{-t_0}} + v \right] \frac{K}{E}, \text{ kr/kWh} \quad [2].$$

Eftirfarandi eru skráð nokkur gildi hlutfallsins $k/K/E$ fyrir mismunandi gildi á β og x með $r=0,06$, $t_0=40$ ár og $v=0,008$. Svigastærðir í skránni koma fram sem markgildi.

x	0	1	2	3	4	6	8	10
$\beta = 0,0$	(0,0725)	0,0747	0,0769	0,0791	0,0813	0,0860	0,0908	0,0957
$\beta = 0,2$	(0,0725)	0,0742	0,0760	0,0777	0,0794	0,0829	0,0864	0,0900
$\beta = 0,4$	(0,0725)	0,0738	0,0751	0,0763	0,0776	0,0800	0,0825	0,0849
$\beta = 0,6$	(0,0725)	0,0734	0,0742	0,0750	0,0758	0,0774	0,0789	0,0803
$\beta = 0,8$	(0,0725)	0,0730	0,0734	0,0738	0,0741	0,0749	0,0756	0,0762
$\beta = 1,0$	0,0725	(0,0725)	(0,0725)	(0,0725)	(0,0725)	(0,0725)	(0,0725)	(0,0725)

Jafnaðarlegan stofnkostnað virkjana á Íslandi má ákvarða af jöfnunni,

$$\tilde{K}_S = 21 E^{0,8}, \text{ Mkr} \quad [3],$$

þar sem E er orkuvinnslu geta á bilinu $50 < E < 5000$ GWh/a, eða

$$\tilde{K}_S/E = 21E^{-0,2}, \text{ kr/kWh/a} \quad [4].$$

Er þá miðað við verðlag í desember 1983 og að uppsett afl samsvari 5256 nýtingarstundum á ári eða ársálagsstuðli 0,6.

Af jöfnum [1] og [4] má "fræðilega" ákvarða hagkvæmstu virkjunarstærð í þeim skilingi, að orkuverð verði í lágmarki, þegar fyrir liggur að fullnægja ákveðinni upphafspörf E_0 (orka til stóriðju) auk þess að sjá fyrir árlega vaxandi orkupörf.

Lágmarksorkuverð fæst, þegar skilyrðinu

$$(1+r)^{-0,8} (1-\tilde{\beta}) E_0 / \tilde{\beta} q = \frac{0,8 + \frac{E_0}{\tilde{\beta} q} \ln(1+r)}{0,8 \left[1 + \frac{E_0}{q} \ln(1+r) \right]} \quad [5]$$

er fullnægt.

Nokkrar lausnir á skilyrði [5], $\tilde{\beta}$, er að finna í eftirfarandi skrá, þar sem enn fremur er skráður stofnkostnaður á orkueiningu samkvæmt jöfnu [4] og lágmarksorkuverð við stöðvarvegg, k_{\min} , samkvæmt jöfnu [1] með $\beta = \tilde{\beta}$ og $x = (E - E_0)/q$, þegar árlegur vöxtur orkuþarfar reiknast $q = 150$ GWh/a². Önnur tölugildi eru áður tilgreind.

E_0	$\tilde{\beta}$	$E = \frac{E_0}{\tilde{\beta}}$	x	\tilde{K}_s/E	k_{min}	
GWh/a		GWh/a	a	kr/kWh/a	kr/kWh	USD/kWh
0	0,0000	1109,1	7,39	5,1668	0,4613	0,0161
10	0,0090	1109,2	7,33	5,1667	0,4596	0,0160
15	0,0135	1109,3	7,30	5,1666	0,4587	0,0160
20	0,0180	1109,5	7,26	5,1665	0,4578	0,0160
30	0,0270	1110,0	7,20	5,1660	0,4561	0,0159
50	0,0450	1111,7	7,08	5,1645	0,4527	0,0158
100	0,0894	1119,1	6,79	5,1575	0,4447	0,0155
150	0,1326	1131,2	6,54	5,1465	0,4373	0,0153
200	0,1743	1147,5	6,32	5,1318	0,4303	0,0150
300	0,2519	1191,1	5,94	5,0936	0,4179	0,0146
500	0,3812	1311,8	5,41	4,9963	0,3975	0,0139
1000	0,5834	1714,0	4,76	4,7360	0,3627	0,0127
1500	0,6907	2171,6	4,48	4,5171	0,3403	0,0119
2000	0,7551	2648,6	4,32	4,3412	0,3241	0,0113
3000	0,8277	3624,6	4,16	4,0772	0,3016	0,0105
5000	0,8921	5604,8	4,03	3,7369	0,2743	0,0096

Tilgreint lágmarksverð orku við stöðvarvegg í bandaríkjadöllum miðast við meðalgengi í desembermánuði 1983 USD = 28,652 ISK.

Framangreindar niðurstöður eru mjög háðar vöxtum og árlegri aukningu orku. Miðað við gefnar forsendur kemur hins vegar fram, að velja beri virkjanir með orkuvinnslugetu um það bil 1100 GWh/a, þegar upphafspörf er lítil sem engin, en leita ætti t.d. að virkjun með orkuvinnslugetu allt að 2200 GWh/a og nýta umframorku til almennra nota, ef fyrirsjáanleg orkupörf til stóriðju er nálægt 1500 GWh/a.

Einungis ber að líta á umræddar niðurstöður sem leiðbeinandi, þegar velja á milli virkjunarkosta. Raunverulegur kostnaður getur vikið talsvert frá "jafnaðarlegum" kostnaði og taka þarf tillit til margra annarra þátta.

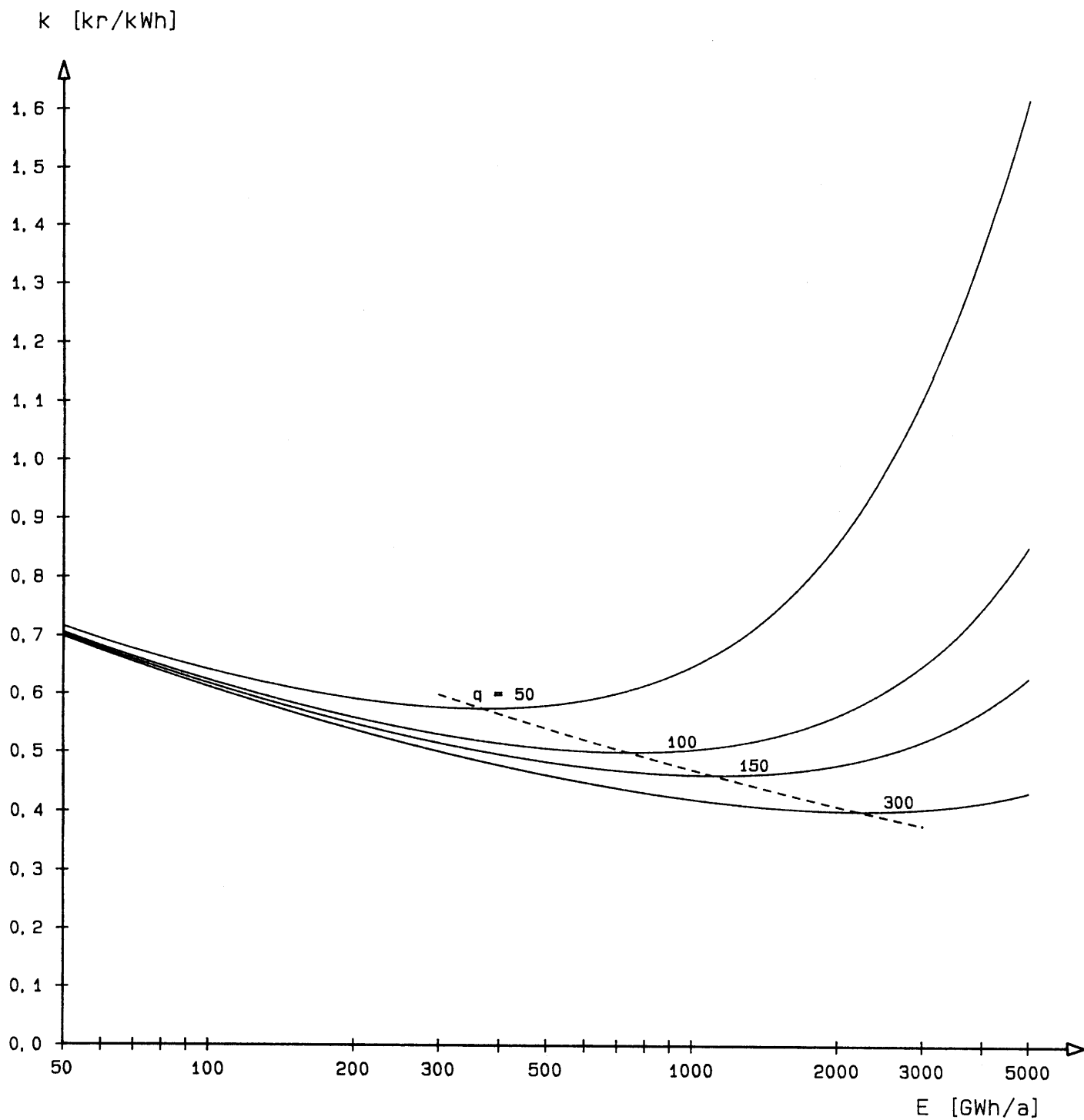
Á meðfylgjandi línuriti er jafnaðarlegur orkukostnaður við stöðvarvegg sýndur sem fall af orkuvinnslugetu virkjunar, þegar eingöngu er virkjað fyrir almenna orkunýtingu (engin upphafsnyting, $E_0 = 0$).

Reiknað er með áður greindum tölugildum, þ.e. $r = 0,06$, $v = 0,008$ og $t_0 = 40$ ár, mismunandi aukningu á árlegri orkupörf q GWh/a² og jafnaðarlegum stofnkostnaði á orkueiningu samkvæmt jöfnu[4]. Í þessu tilviki fæst hagkvæmasta virkjunarstærð þegar virkjunin fullnýtist á 7,394 árum, sbr. eftirfarandi skrá og línurit.

q	E	k_{min}	
GWh/a ²	GWh/a	kr/kWh	USD/kWh
50	369,7	0,5747	0,0201
100	739,4	0,5003	0,0175
150	1109,1	0,4613	0,0161
200	1478,8	0,4356	0,0152
250	1848,5	0,4165	0,0145
300	2218,2	0,4016	0,0140

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Jafnaðarlegur orkukostnaður við stöðvarvegg.
Verðlag í desember 1983.



Engin upphafsnyting ($E_0=0$)

q : árleg aukning almennrar orkuþarfar í GWh/a²

Núvirði virkjunarkostnaðar

Tákn, sem notuð eru í reikningunum eru þessi:

- t_0 : ævitími orkuvers í árum
- K : stofnkostnaður orkuvers í Mkr
- s : vaxtafótur lána
- r : vaxtafótur núvirðisreikninga
- v : árlegur rekstrarkostnaður sem hlutfall að stofnkostnaði
- k : orkukostnaður í kr/kWh

Gert er ráð fyrir, að tekið sé lán til virkjunarframkvæmda, sem greiðist með jöfnum greiðslum afborgana og vaxta á ævitíma virkjunar í fyrsta sinn ári eftir, að orkuverið er tekið í rekstur.

Fært til núvirðis jafngilda greiðslur þessar eftirfarandi stærð:

$$K_n = \frac{s}{1-(1+s)^{-t_0}} \cdot \frac{1-(1+r)^{-t_0}}{r} \cdot K, \text{ Mkr.}$$

Sé gert ráð fyrir að viðhald felist í endurbyggingu á t_0 ára fresti verður núvirði stofnkostnaðar í heild:

$$\sum_{i=1}^{\infty} K_n (1+r)^{-(i-1)t_0} = \frac{K_n}{1-(1+r)^{-t_0}}, \text{ Mkr} \quad [6].$$

Núvirði rekstrarkostnaðar reiknast,

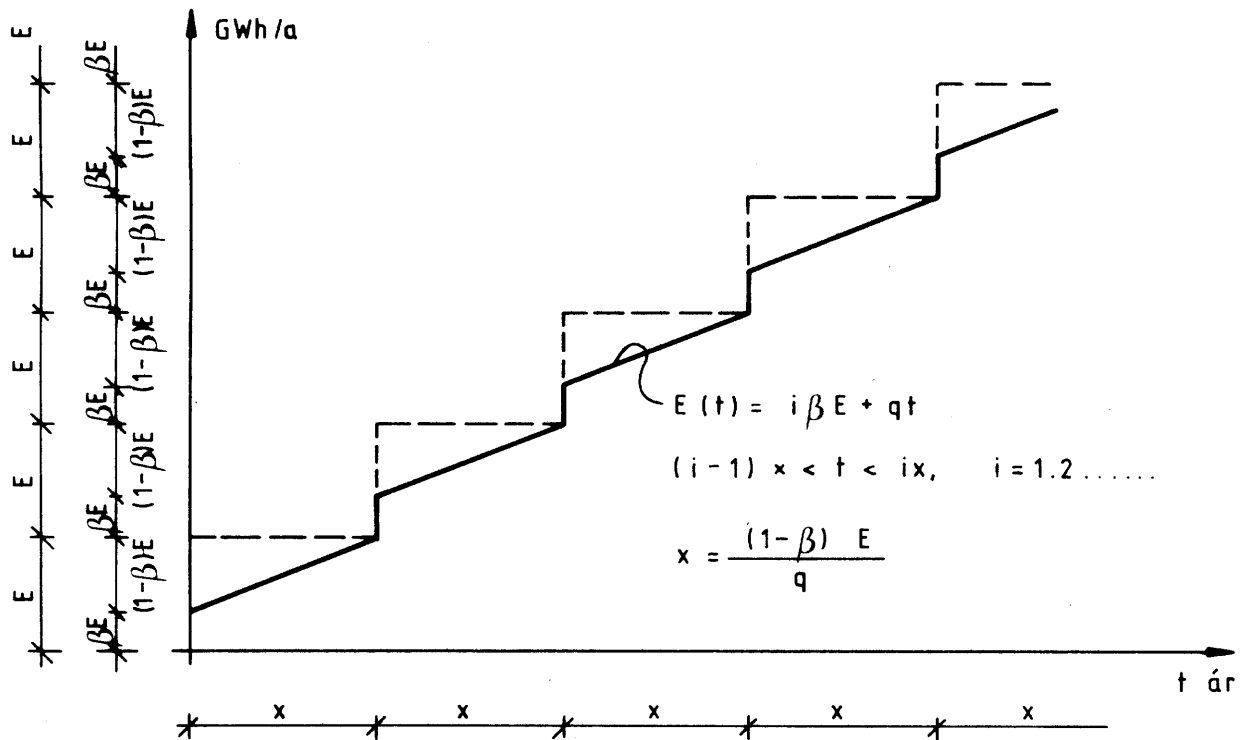
$$\int_0^{\infty} vK (1+r)^{-t_0} dt = \frac{vK}{\ln(1+r)}, \text{ Mkr} \quad [7].$$

Með $s=r$ verður $K_n = K$ og núvirði stofn- og rekstrarkostnaðar í heild verður,

$$N_K = K \left[\frac{1}{1-(1+r)^{-t_0}} + \frac{v}{\ln(1+r)} \right], \text{ Mkr} \quad [8].$$

Núvirði orkusölu

Gert er ráð fyrir línulega vaxandi orkupörf til almennra nota, sem vex um q GWh/a², en jafnframt að ákveðinn hluti orkunnar sé í upphafi nýttur til iðnaðarþarfa, $E_0 = E$ GWh/a, þar sem E er orkuvinnslugeta virkjunaráfangans í GWh/a. Þá er reiknað með að orkupörf verði fullnægt með röð jafnstórra og jafndýrra virkjana, sbr. skýringarmynd.



Samkvæmt framansögðu verður núvirði tekna af orkusölu miðað við orkuverð k kr/kWh,

$$N_E = k \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)x}^{\infty} \frac{\beta E}{(1+r)^t} dt + kq \int_0^{\infty} \frac{t}{(1+r)^t} dt, \quad Mkr$$

eða

$$N_E = \frac{kE}{\ln(1+r)} \left[\frac{\beta}{1-(1+r)^{-x}} + \frac{1-\beta}{x \ln(1+r)} \right], \quad Mkr \quad [9].$$

Orkukostnaður

Með $N_E = N_K$ fæst af jöfnum [8] og [9] :

$$k = \frac{\left[\frac{1}{1-(1+r)^{-t}} + \frac{v}{\ln(1+r)} \right] \ln(1+r) \cdot \frac{K}{E}}{(1-\beta) \frac{1-(1+r)^{-x}}{x \ln(1+r)} + \beta}, \text{ kr/kWh},$$

sbr. framanskráða jöfnu [1] .

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 4

**Jaðarkostnaður afls og
samræmdur stofnkostnaður**

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Jaðarkostnaður afls og samræmdur stofnkostnaður.

Með virkjun vatnsfalla er stefnt að því, að fullnægja ákveðinni afl- og orkuþörf, en að því er varðar einstakar virkjanir eru einingarnar afl og orka hins vegar óháðar stærðir að vissu marki. Við samanburð og ýmsar hagkvæmnisathuganir er því óhjákvæmilegt að aðgreina áhrif þessara þátta hvors fyrir sig á stofnkostnað og tekjur af rekstri. Gera má ráð fyrir, að hlutfallslega meira afl verði sett upp, þar sem viðbótarkostnaður á afleiningu er tiltölulega lágur, en á hverjum tíma verður þó nægilegt afl að vera til staðar til að sjá fyrir aflþörf og nauðsynlegu reiðuafli, þ.e. varaafli sem ætíð er til reiðu við skyndilegar reksturstruflanir.

Nú er talið, að nauðsynlegt afl (þar með talið reiðuafli) virkjana á Íslandi samsvari ársálagsstuðli 0,6 eða 5256 nýtingarstundum á ári. Með tilkomu Hrauneyjafossvirkjunar er orkuaukning talin nema 850 GWh/a, og miðað við uppsett afl, 210 MW, samsvarar það rúmlega 4000 stunda nýtingu á ári. Því má líta svo á, að með virkjuninni hafi verið búið í haginn fyrir síðari virkjanir að þessu leyti. Sé stofnkostnaður Hrauneyjafossvirkjunar sem slíkrar borinn saman við aðra virkjunarkosti með t.d. 6000 stunda nýtingu á ári, er augljóslega hallað á Hrauneyjafossvirkjun, þar sem hluti af kostnaði við hana er kostnaður við að fullnægja aflþörf fram í tímann. Sá kostnaður ætti í samanburði að skrifast á reikning síðari virkjana.

Í tengslum við yfirlitsathuganir á vatnsafli á Íslandi hafa kostnaðaráætlanir leitt í ljós, að til jafnaðar megi ákvarða þann hluta stofnkostnaðar virkjana, sem háður er mismunandi afli, af jöfnunni,

$$K_N = 94,15H^{-0,23}N^{0,82}, \text{ Mkr} \quad [1],$$

þar sem H er hönnunarfallhæð á bilinu $30 < H < 650$ m og N uppsett afl á bilinu $30 < N < 360$ MW.

Með $N = 0,00875QH$ MW fæst,

$$K_N = 1,933H^{0,59}Q^{0,82}, \text{ Mkr} \quad [2].$$

Virkjuðu rennsli eru einnig sett takmörk, þ.e. $10 < Q < 500$
 m^3/s .

Stofnkostnaður miðast hér við verðlag og gengi í desembermánuði 1983

Í samræmi við framangreindar jöfnur má ákvarða jaðarkostnað aflls,

$$\partial K / \partial N = 77,2H^{-0,23}N^{-0,18}, \text{ Mkr/MW} \quad [3],$$

eða

$$\partial K / \partial N = 181,16H^{-0,41}Q^{-0,18}, \text{ Mkr/MW} \quad [4].$$

Á tilgreindu gildissviði verður jaðarkostnaður á bilinu $6 < \partial K / \partial N < 19$ Mkr/MW, sbr. skýringarmynd.

Fyrir þær virkjanir á Íslandi, sem áætlanir ná til nú og að mestu falla innan gildissviðs umræddra kostnaðarjafna, er jaðarkostnaður á bilinu 6,7 til 18,3 Mkr/MW og að jafnaði nálægt 12,5 Mkr/MW.

Í yfirlitsáætlunum um vatnsorku á Íslandi eru virkjanir bornar saman miðað við svonefndan "samræmdan stofnkostnað" samkvæmt jöfnunni,

$$K_S = K + 10,3(E/5,256 - N), \text{ Mkr} \quad [5],$$

þar sem K er áætlaður kostnaður með uppsettu afli N, MW, og $E/5,256 = N_S$, MW, er afl miðað við ársálagsstuðul 0,6. Kostnaður við hugsaða aflbreytingu reiknast þá 10,3 Mkr/MW. Ákvörðun um að miða við fastan jaðarkostnað, sem er lægri en jafnaðargildið, byggist á því, að hlutfallslega meira afl verði sett upp í virkjunum með lágum viðbótarkostnaði á afleiningu. Þannig reiknað verða heildarniðurstöður líklega nær sanni en ella.

Miðað við jöfnu [1] fengist hins vegar,

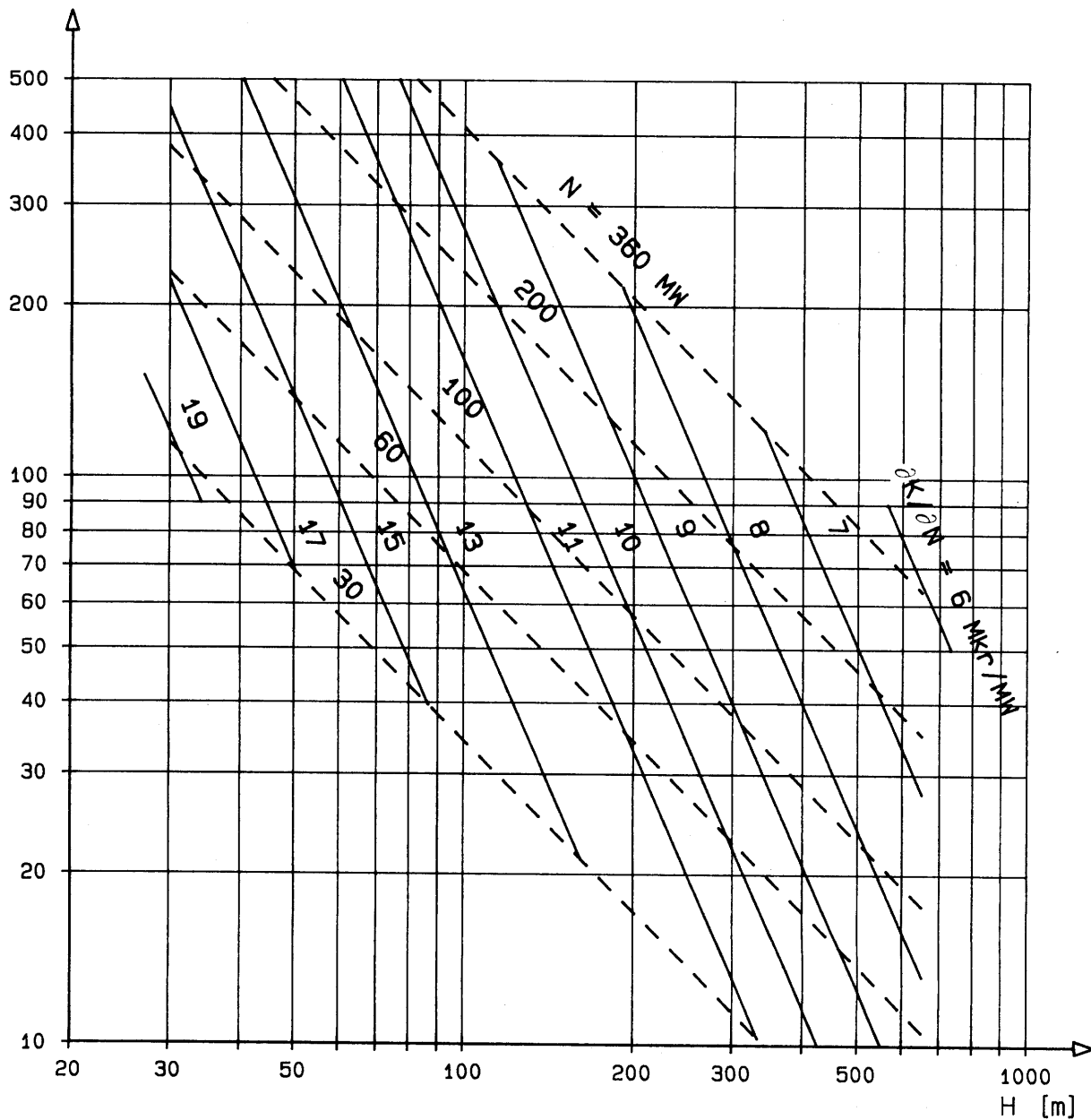
$$K_S = K + 94,15H^{-0,23} \left[\left(\frac{E}{5,256} \right)^{0,82} - N^{0,82} \right], \text{ Mkr} \quad [6],$$

sem nálgun á stofnkostnaði viðkomandi virkjunar, þegar uppsett afl hennar samsvarar ársálagsstuðli 0,6.

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Jaðarkostnaður afls.
Verðlag í desember 1983.

Q [m³/s]



$$\frac{\partial K}{\partial N} = 181,16 \cdot H^{-0,41} Q^{-0,18} = 77,2 \cdot H^{-0,23} N^{-0,18} \text{ [Mkr/MW]}$$

$$10 < Q < 500 \text{ m}^3/\text{s}, \quad 30 < H < 650 \text{ m}^3/\text{s}, \quad 30 < N < 360 \text{ MW}$$

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 5

Leyfilegur jaðarkostnaður orku

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Leyfilegur jaðarkostnaður orku

Við áætlanagerð um vatnsaflsvirkjanir verður að jafnaði ekki valin sú tilhögun, sem veitir lægst orkuverð. Athuguð eru ýmis afbrigði, svo sem mismunandi stífluhæðir og lengdir vatnsvega (mismunandi fallhæðir, mismikil miðlun) svo og hugsanlega mismiklar aðveitur frá nálægum vatnasviðum. Vandamál við val á þeirri tilhögun, sem mælt er með, eru ekki sízt fólgin í ákvörðun á jaðarkostnaði orku, þ.e. hve mikið orkuviðbót frá einni tilhögun til annarrar má kosta.

Á árinu 1979 var gerð tilraun til fræðilegrar ákvörðunar á leyfilegum jaðarkostnaði, sem fól í sér verulegar einfaldanir og einungis á við, þegar sú viðbótarorka, sem um er að ræða, verður tæplega nýtt síðar vegna kostnaðar eða annarra ástæðna svo sem vegna umhverfisáhrifa.

Miðað var við, að orkupörf yrði fullnægt með röð jafnstórra og jafndýrra virkjana um ákveðið árabil, en eftir þann tíma yrði að sjá fyrir vaxandi orkupörf með dýrri varmaorku. Reiknað var með virkjun til almennra orkunota með línulega vaxandi orkupörf og "jafnaðarlegum stofnkostnaði". Niðurstöður voru, að ákvarða mætti leyfilegan jaðarkostnað með jöfnunni,

$$J_S = \ln(1+r) \left[\frac{(\alpha-1)Nx}{(1+r)^{Nx-1}} + \frac{x}{(1+r)^{X-1}} \right] \frac{\tilde{K}_S}{E}, \text{ kr/kWh/a} \quad [1],$$

þar sem r er vaxtafótur, α einingarkostnaður varmaorku í hlutfalli af einingarkostnaði viðeigandi áfanga vatnsaflsvirkjunar, Nx árabil frá því að fyrsta virkjun í röðinni er gangsett þar til ódýr vatnsorka er þrotin, x fullnýtingartími virkjunaráfanga og \tilde{K}_S/E jafnaðarlegur einingarkostnaður viðeigandi virkjunaráfanga í kr/kWh/a (sjá nánar á bls. 5-7).

Jafnan hefur verið látin gilda fyrir orkuver með orkuvinnslugetu allt að 1500 GWh/a, en fullnýtingartími yrði að jafnaði óeðlilega langur fyrir stærri virkjanir.

Hér á eftir eru reiknuð nokkur gildi jaðarkostnaðar samkvæmt jöfnu [1] miðað við eftirfarandi tölugildi (verðlag í des. 1983).

$$r = 0,06$$

$$N_x = 55 \text{ ár}$$

$$\tilde{K}_S/E = 21E^{-0,2} \text{ kr/kWh/a, } E \text{ orkuvinnsla í GWh/a}$$

$$\alpha = \frac{22,92}{K_S/E} = \frac{22,92 E^{0,2}}{21}$$

Núgildi orkukaupa varmaorku reiknast þá 22,92 kr/kWh/a, sem með 6 % vöxtum jafngildir orkuverði um það bil 1,66 kr/kWh miðað við verðlag í desember 1983 eða 0,058 USD/kWh.

Virkjanir með orkuvinnslugetu allt að 600 GWh/a reiknast eingöngu til að fullnægja orkuþörf, sem eykst um 150 GWh/a², en fyrir stærri virkjanir er reiknað með fullnýtingartíma $x = 4$ ár, sem þýðir vaxandi hlutdeild orkufreks iðnaðar eftir stærð virkjunar.

Niðurstöður eru í eftirfarandi skrá:

E GWh/a	x a	\tilde{K}_S/E kr/kWh/a	J_S	
			[1] kr/kWh/a	[2] kr/kWh/a
50	0,333	9,603	11,315	11,382
100	0,667	8,360	10,172	10,040
150	1,000	7,709	9,548	9,371
200	1,333	7,278	9,119	8,942
300	2,000	6,711	8,524	8,395
500	3,333	6,059	7,775	7,791
1000	4,000	5,275	7,075	7,103
1500	4,000	4,864	6,766	6,760
2000	4,000	4,592	6,561	6,540
3000	4,000	4,234	6,292	6,259
5000	4,000	3,823	5,983	5,950

Með nálgun má ákvarða jaðarkostnað af jöfnunni,

$$J_S = 22,92 (0,175 + E^{-0,29}), \text{ kr/kWh/a} \quad [2],$$

sbr. skráð gildi.

Allur stofnkostnaður miðast hér við "samræmdan kostnað", þ.e. stofnkostnað virkjana, þegar uppsett afl samsvarar ársálagsstuðli 0,6 eða 5256 nýtingarstundum á ári. Jöfnu [2] má rita þannig með tilliti til mismunandi nýtingartíma T í kh/a,

$$J_T = J_S + 10,3(1/T - 1/5,256), \text{ kr/kWh/a} \quad [3].$$

Er þá miðað við fastan jaðarkostnað afls 10,3 Mkr/MW.

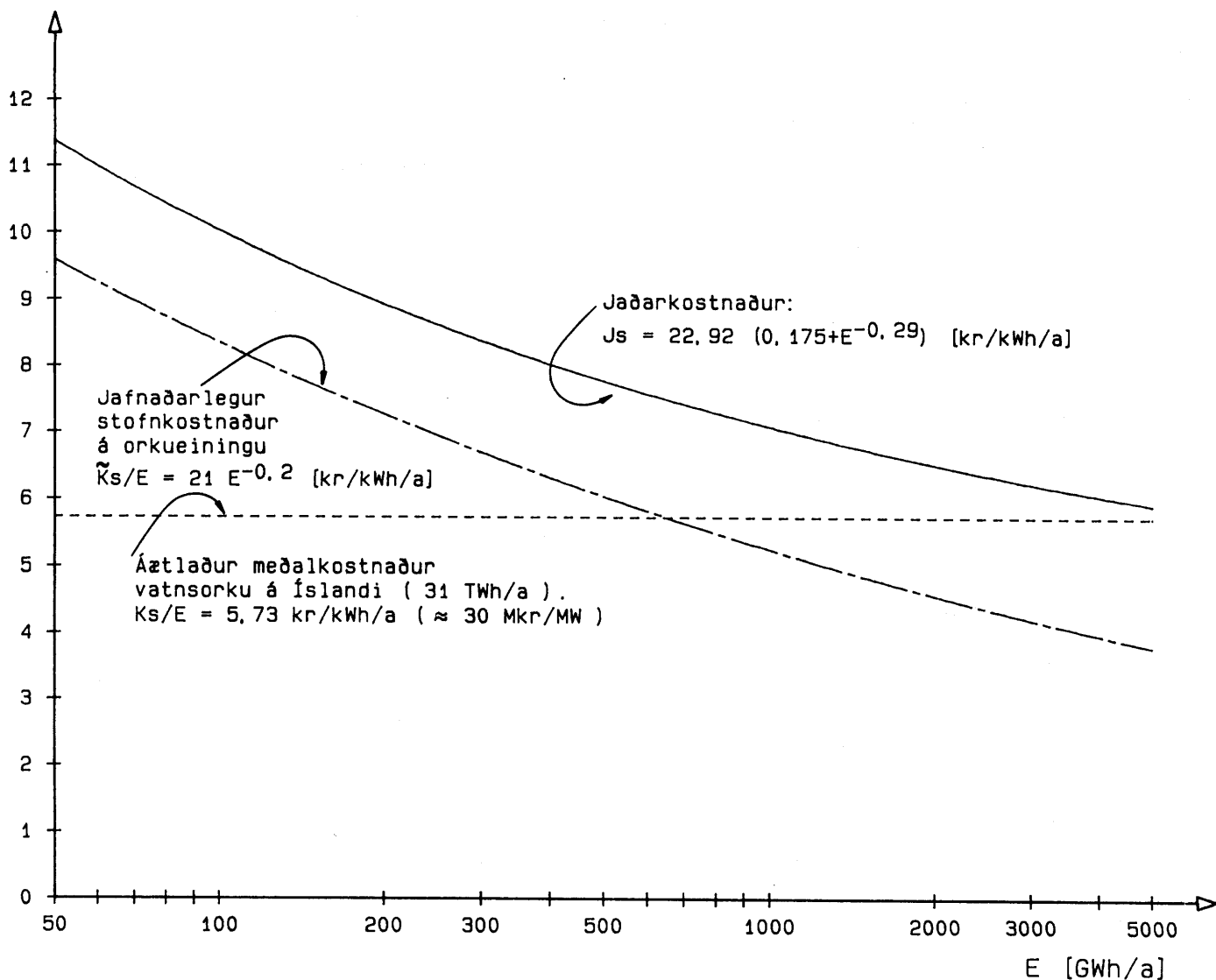
Niðurstöður framangreindrar ákvörðunar á jaðarkostnaði orku eru mjög háðar þeim tölulegu forsendum sem byggt er á. Erfitt er að ákvarða slíkar forsendur, og m.a. vegna þess verður að taka tilgreindan jaðarkostnað með varúð. Með hliðsjón af því, að meðalkostnaður virkjanlegrar orku á Íslandi (31 TWh/a) er talinn nálægt 5,73 kr/kWh/a og einingarkostnaður meginhluta óvirkjaðrar orku er innan við 11,46 kr/kWh/a, virðist hins vegar ekki óeðlilegt að reikna jaðarkostnað samkvæmt jöfnu [2], eða [3] eftir því sem við á, þegar orkuvinnsla er á bilinu $50 < E < 5000$ GWh/a. Á þetta við þá virkjunaráfanga, sem nú er verið að undirbúa, en samkvæmt eðli máls ætti leyfilegur jaðarkostnaður að fara hækkandi, þegar fram líða stundir.

Á meðfylgjandi línuriti er leyfilegur jaðarkostnaður J_S samkvæmt jöfnu [2] sýndur sem fall af orkuvinnslugetu E og til samanburðar jafnaðarlegur samræmdur einingarkostnaður orku \tilde{K}_S/E .

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Leyfilegur jaðarkostnaður orku.
Verðlag í desember 1983.

J, Ks/E [kr/kWh/a]



Tilgreindur jaðarkostnaður miðast við ársálagsstuðul 0,6 eða 5256 nýtingarstundir á ári ($T = 5,256$ kh/a).

Fyrir aðra nýtingu á afli reiknast:

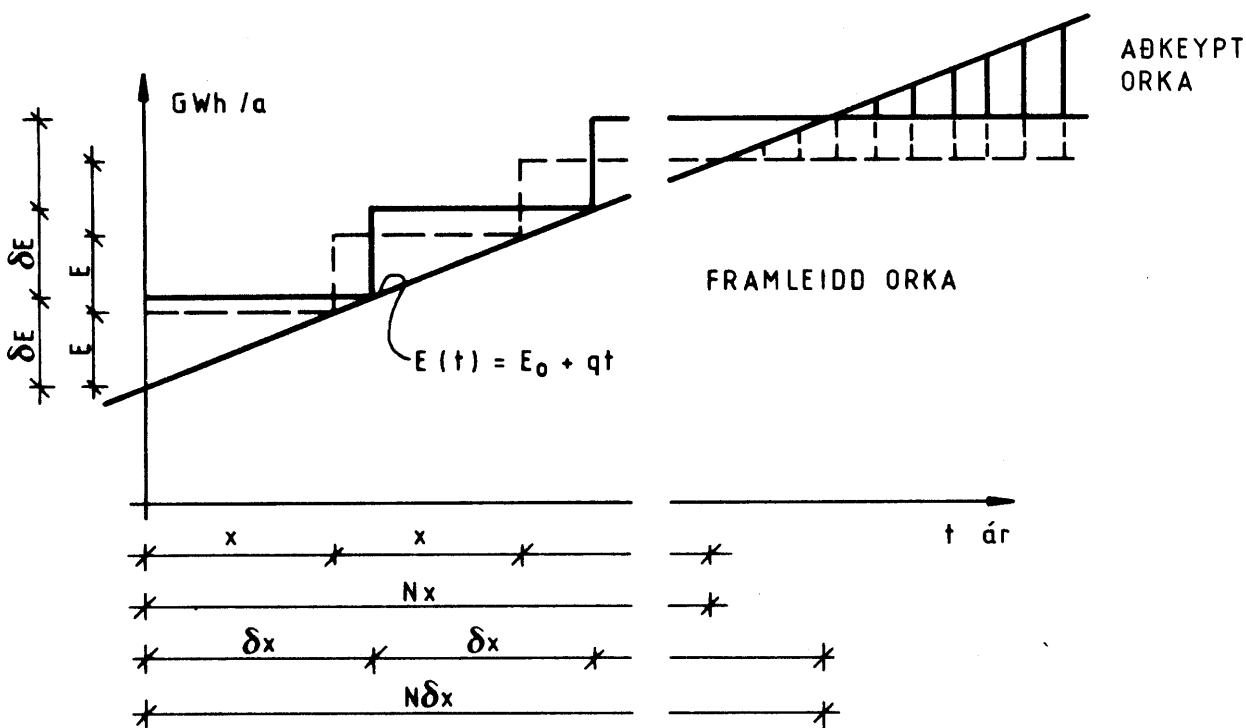
$$J_T = J_S + 10,3 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{5,256} \right) \text{ [kr/kWh/a]}$$

Grundvöllur að ákvörðun jaðarkostnaðar

Gert er ráð fyrir línulega vaxandi orkupörf sbr. skýringarmynd. Í upphafi er séð fyrir orkupörf með jafnstórum og jafndýrum áfangavirkjunum, sem hver um sig fullnægir aukinni þörf í x ár. Að því kemur að virkjanlegt vatnsafl er fullnýtt (eftir Nx ár), og þarf þá að sjá fyrir vaxandi orkunotkun með aðkeyptri (dýrri) orku.

Núgildi stofn- og rekstrarkostnaðar hvers áfanga reiknast N_K Mkr, sbr. jöfnu [8] í fylgiskjali 3, en unnt er að stækka hvern áfanga (auka við orkuvinnslugetu) í hlutfallinu $\delta > 1$ og eykst kostnaður þá hlutfallslega í γN_K ($\gamma > \delta$).

Síðar nefnd áfangaröð virkjana spannar $N\delta x$ ár, en eftir það verður að sjá fyrir vaxandi orkupörf með aðkeyptri orku eins og í fyrra tilviki.



Núvirði kostnaðar við virkjunaráfanga og aðkeypta orku verður annars vegar,

$$N_{K1} = \sum_{i=1}^N \frac{N_K}{(1+r)^{(i-1)x}} + \int_{N_x}^{\infty} k^* q \frac{t-Nx}{(1+r)^t} dt$$

og hins vegar

$$N_{K2} = \sum_{i=1}^N \frac{\gamma N_K}{(1+r)^{(i-1)\delta x}} + \int_{N\delta x}^{\infty} k^* q \frac{t-N\delta x}{(1+r)^t} dt ,$$

þar sem k^* er verð aðkeyptrar orku í kr/kWh.

Eftir umritun verða síðast skráðar jöfnur

$$N_{K1} = N_K \frac{1-(1+r)^{Nx}}{1-(1+r)^{-x}} + \frac{k^* q (1+r)^{-Nx}}{[\ln(1+r)]^2} \quad \text{og}$$

$$N_{K2} = N_K \frac{1-(1+r)^{-N\delta x}}{1-(1+r)^{-\delta x}} + \frac{k^* q (1+r)^{-N\delta x}}{[\ln(1+r)]^2}$$

Jaðarkostnaður orku við stækkun virkjunaráfanga verður,

$$g = \frac{K}{E} = \frac{\gamma K - K}{\delta E - E} , \quad \text{kr/kWh/a} ,$$

þar sem K er stofnkostnaður minni áfanga í Mkr og E orkuvinnslugeta hans í GWh/a.

Af síðast skráðri jöfnu fæst,

$$g = \frac{\gamma - 1}{\delta - 1} > 1$$

[4].

Með $N_{K1} = N_{K2}$ fæst,

$$\gamma = \left[\frac{k^* q \left[(1+r)^{-Nx} - (1+r)^{-N} \delta x \right]}{N_K [\ln(1+r)]^2} + \frac{1 - (1+r)^{-Nx}}{1 - (1+r)^{-x}} \right] \left[\frac{1 - (1+r)^{-\delta x}}{1 - (1+r)^{-N} \delta x} \right]$$

Nú er $q = E/x$ ($E_0 = 0$) og

$$\frac{N_K}{q} [\ln(1+r)]^2 = \frac{N_K}{E} x [\ln(1+r)]^2 = k(1 - (1+r)^{-x}) ,$$

sbr. jöfnur [8] og [1] með $\beta = 0$ ($E_0 = 0$) í fylgiskjali 3 .

Með $\alpha = k^*/k$ fæst þá:

$$\gamma = \left[\frac{(\alpha - 1)(1+r)^{-Nx} (1+r)^{-N} \delta x_{+1}}{1 - (1+r)^{-x}} \right] \left[\frac{1 - (1+r)^{-\delta x}}{1 - (1+r)^{-N} \delta x} \right] \quad [5] ,$$

Jaðarkostnað má nú ákvarða af jöfnum [4] og [5] , og þegar $\delta \rightarrow 1$ fæst,

$$g \rightarrow \ln(1+r) \left[\frac{(\alpha - 1)Nx}{(1+r)^{Nx-1}} + \frac{x}{(1+r)^{x-1}} \right] \quad [6] ,$$

sbr. framanskráða jöfnu [1] .

Þegar $x \rightarrow 0$ fæst:

$$g \rightarrow \frac{(\alpha - 1)Nx \ln(1+r)}{(1+r)^{Nx-1}} + 1 \quad [7] .$$

Fastur jaðarkostnaður orku

Jaðarkostnaður orku eins og hann er ákvarðaður hér að framan reiknast lækkandi í kr/kWh/a með vaxandi orkuvinnslugetu. Jaðarkostnaður er þá ákvarðaður sem nógildi við gangsetningu virkjunar. Minni munur kemur fram að þessu leyti, þegar tekið er tillit til mismunandi fullnýtingartíma, x , og jaðarkostnaður er umreiknaður í raunverulegan orkukostnað í kr/kWh, sbr. eftirfarandi skrá. Þar er gengið út frá sömu forsendum og áður að öðru leyti en því, að reiknað er með stigvaxandi árlegri aukningu á orkupörf, $q=100 \text{ GWh/a}^2$ til 250 GWh/a^2 , þegar orkuvinnslugeta eykst frá $E=50 \text{ GWh/a}$ í 5000 GWh/a .

Orku- vinnsla E	Fullnýt- ingartími x	Jafnaðarlegur orkukostnaður		Jaðarkostnaður orku	
		K_S/E	k_S	J_S	j_S
GWh/a	a	kr/kWh/a	kr/kWh	kr/kWh/a	kr/kWh
50	0,500	9,603	0,707	11,269	0,829
100	0,871	8,360	0,622	10,123	0,753
150	1,205	7,709	0,579	9,503	0,714
200	1,518	2,278	0,552	9,081	0,688
300	2,100	6,711	0,517	8,505	0,656
500	3,162	6,059	0,481	7,803	0,620
1000	5,510	5,257	0,447	6,864	0,582
1500	7,624	4,864	0,437	6,310	0,567
2000	9,600	4,592	0,435	5,910	0,560
3000	13,284	4,234	0,441	5,337	0,556
5000	20,000	3,823	0,470	4,606	0,566

Eins og fram kemur vikur reiknaður jaðarkostnaður minna en tíu af hundraði frá $j_S=0,61 \text{ kr/kWh}$ þegar orkuvinnsla er meiri en 250 GWh/a . Jafngildir það um það bil $J_S=8,4 \text{ kr/kWh/a}$, þegar miðað er við fullnýtingu í upphafi ($x=0$).

Raunhæfari ákvörðun á jaðarkostnaði en hér hefur verið fjallað um, væri að leita að hagkvæmustu röð virkjana (og þar með stærð einstakra áfanga), sem fullnægði ákveðinni orkupörf langt fram í tímann (minnst 40 ár). Erfitt er hins vegar að ákvarða nauðsynlegar forsendur með neinni vissu, og því leikur vafi á, að slíkir reikningar gæfu ábyggilegri niðurstöður en þeir, sem hér hafa verið við hafðir.

Í sumum tilvikum, eins og þegar finna þarf jöfnur til ákvörðunar á hagkvæmustu víddum vatnsvega við yfirlitsáætlanagerð um virkjanir, er of viðamikið að reikna með breytilegum jaðarkostnaði. Er þá miðað við fast gildi, t.d. $J_s = 8,4$ kr/kWh/a, sbr. það sem áður sagði. Fyrir lokaða vatnsvegi jafngildir það:

$$J^* \approx 8,4 + 10,3 \left(\frac{1}{0,24 \cdot 8,76} - \frac{1}{5,256} \right) \approx 11,3 \text{ kr/kWh/a} ,$$

sbr. einnig fylgiskjal 7.

Umræddur jaðarkostnaður, 8,4 kr/kWh/a, er nálægt 45 af hundraði hærri en áætlaður meðalstofnkostnaður á orkueiningu fyrir þá vatnsorku, sem eftir er að nýta hér á landi, u.þ.b. 5,8 kr/kWh/a sbr. fylgiskjal 1.

Til samanburðar fæst $g = 1,4$ af jöfnu [7] með $N_x = 55$ ár, $r = 0,06$ og $\alpha = 22,92/5,8 \approx 4$, sem jafngildir jaðarkostnaði $J_s \approx 1,4 \cdot 5,8 \approx 8,1$ kr/kWh/a. Ef til vill hefði því eins mátt miða við 8,1 kr/kWh/a í stað 8,4 kr/kWh/a við ákvörðun á hagkvæmustu vatnsvegavíddum. Þessi munur hefur þó engin marktæk áhrif á niðurstöður og sem dæmi um áhrif tölulegra forsendna á jaðarkostnað má nefna, að þannig ákvarðaður jaðarkostnaður yrði einnig 8,4 kr/kWh/a, ef reiknað er með $N_x = 52$ ár í stað 55 ára.

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 6

Rekstrarfallhæð

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Rekstrarfallhæð

Miðað við rennislíslangæi $Q(t)$ á einingartímabilinu $0 \leq t \leq 1$ (sjá skýringarmyndir) verður langæislína afls, þegar reiknað er með lokuðum vatnsvegum,

$$N(t) = kQ(t) \left[H_{br} - h(t) - k_1 Q^2(t) \right], \quad \text{MW} \quad [1],$$

þar sem $k_1 Q^2(t)$ eru falltöp í vatnsvegum á hverjum tíma í m, H_{br} verg fallhæð og h frávik frá vergri fallhæð sem ástimplað afl véla miðast við. Stuðull $h(t)$ er fall af tíma, en hér á eftir verður til einföldunar reiknað með föstu gildi h . Stuðull k_1 er háður gerð vatnsvega og stuðull k gerð véla. Síðast nefndur stuðull er í raun einnig háður tíma (breytilegri nýtni við mismunandi álag), en reiknað er með föstu meðalgildi.

Árleg orkuvinnsla virkjunar verður,

$$E = 8,76 \int_0^1 N(t) dt = 8,76k \left[(H_{br} - h) \int_0^1 Q(t) dt - k_1 \int_0^1 Q^3(t) dt \right], \quad \text{GWh/a} \quad [2].$$

Nú er meðalrennsli um vatnsvegi,

$$Q_m = \int_0^1 Q(t) dt, \quad \text{m}^3/\text{s},$$

og falltöp við hönnunarrennsli (fullt álag) $Q = Q(0)$,

$$\Delta H = k_1 Q^2, \quad \text{m}.$$

Þá fæst

$$E = 8,76kQ_m \left[H_{br} - h - \frac{\Delta H}{Q^2 Q_m} \int_0^1 Q^3(t) dt \right], \quad \text{GWh/a},$$

eða með

$$\beta = \frac{1}{Q^3} \int_0^1 Q^3(t) dt \quad [3],$$

$$E = 8,76 kQ_m \left[H_{br} - h - \frac{\Delta HQ}{Q_m} \beta \right] = 8,76 kQ_m H^* \quad , \quad \text{GWh/a} \quad [4],$$

þar sem H^* er rekstrarfallhæð (raunfallhæð við orkuvinnsluákvörðun).

Með nálgun má reikna $Q/Q_m \approx 8,76/T = 1/\lambda$, þar sem T eru nýtingastundir virkjunar í kh/a og λ ársálagsstuðull.

Þá fæst með

$$\gamma = \beta / \lambda \quad [5].$$

$$H^* = H_{br} - h - \gamma \Delta H \quad , \quad m \quad [6],$$

eða

$$H^* = H + (1 - \gamma) \Delta H - h \quad , \quad m \quad [7],$$

þar sem $H = H_{br} - \Delta H$ er hönnunarfallhæð virkjunarinnar (raunfallhæð við aflákvörðun).

Eins og fram hefur komið er stuðull γ háður nýtingartíma T og formi langæislinu rennslis, þ.e. , en hann verður þó ætíð á bilinu,

$$\lambda^2 < \gamma < 1 \quad [8],$$

sbr. meðfylgjandi skýringarmyndir 1 og 2.

Við yfirlitsáætlanagerð er rennslí um vatnsvegi ákvarðað af jöfnunni

$$Q(t) = \frac{Q}{1,16} \left[1 - (1 - (1,16\lambda)^2) t^{1,16\lambda} \right] \quad , \quad m^3/s \quad [9],$$

sbr. skýringarmynd 3. Er þá miðað við reiðuafli 16 af hundraði.

Með ársálagsstuðli $\lambda = 0,6$ fæst,

$$\beta = \frac{1}{Q^3} \int_0^1 Q^3(t) dt = \frac{1}{1,16^3} \int_0^1 (1 - 0,515584 t^{0,696})^3 dt \approx 0,24$$

og

$$\gamma = \frac{\beta}{\lambda} \approx \frac{0,24}{0,6} = 0,4$$

Hér að framan var reiknað með lokuðum vatnsvegum (pípum eða vatnsfylltum göngum), en gera má ráð fyrir að vatnsvegir verði að hluta opnir skurðir.

Falltöp sem fall af tíma má þá rita með jöfnunni,

$$\Delta H(t) = k_1 Q^2(t) + k_2 Q^a(t) \quad , \quad m \quad [10],$$

þar sem fyrri liður er falltöp í lokaða hluta og síðari í opna hluta. Stuðlar k_1 og k_2 og veldisvísir a eru háðir gerð vatnsvega og aðstæðum.

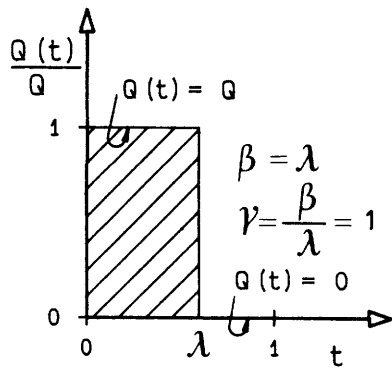
Í því tilviki ákvarðast stuðull $\beta = \gamma\lambda$ af jöfnunni,

$$\beta = \frac{k_1 \int_0^1 Q^3(t) dt + k_2 \int_0^1 Q^{a+1}(t) dt}{k_1 Q^3 + k_2 Q^{a+1}} \quad [11].$$

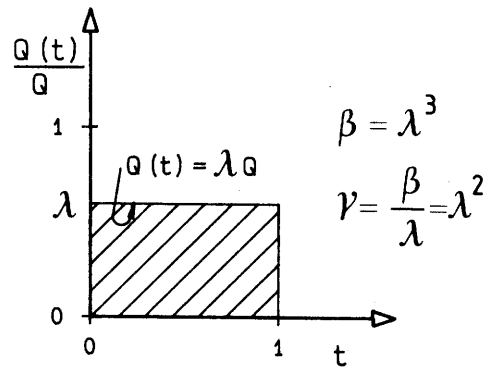
Miðað við lokaða vatnsvegi og rennslislangæi samkvæmt jöfnu [9] fást eftirfarandi gildi á γ fyrir mismunandi ársálagsstuðla λ , sbr. einnig skýringarmynd 4.

λ	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
β	0,0501	0,0949	0,1569	0,2415	0,3570	0,5148
γ	0,1671	0,2373	0,3139	0,4026	0,5099	0,6435

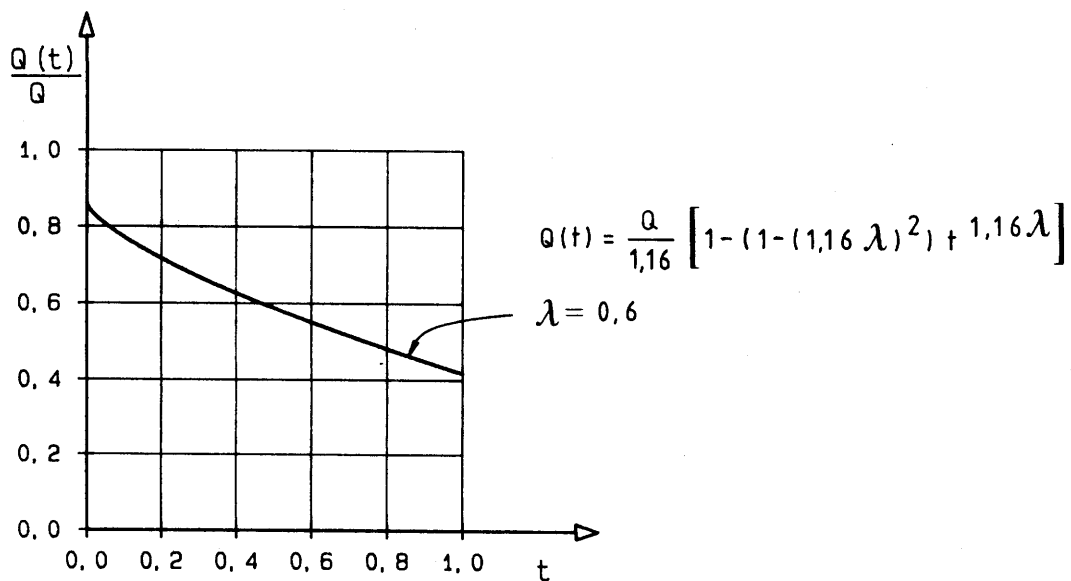
Mynd 1



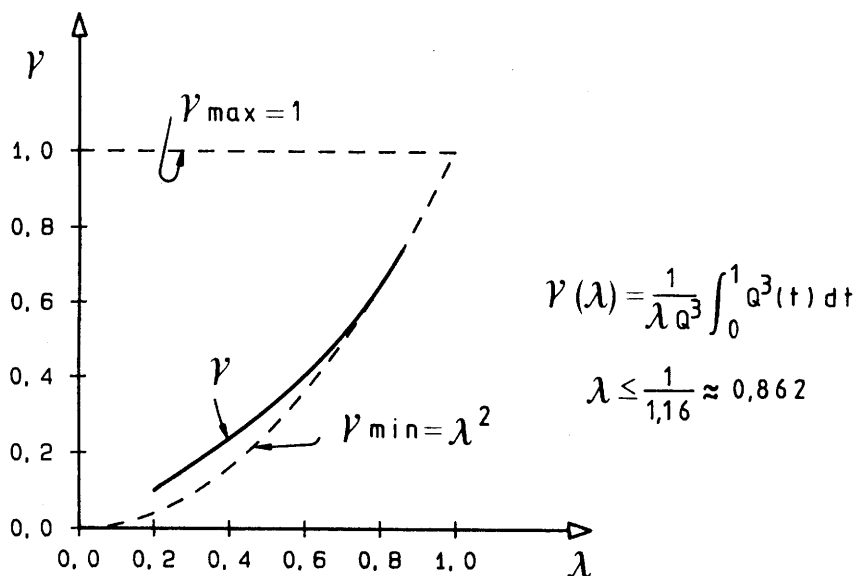
Mynd 2



Mynd 3



Mynd 4



VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 7

**Jaðarkostnaður við ákvörðun á
hagkvæmstu víddum vatnsvega**

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Jaðarkostnaður við ákvörðun á hagkvæmstu víddum vatnsvega.

Venjulegur virkjunarkostnaður er ákvarðaður sem fall af orkuvinnslu með jöfnunni,

$$\tilde{K}_S = 21E^{-0,8} \quad , \quad \text{Mkr} \quad [1].$$

Er þá miðað við verðlag í desember 1983 og ársálagsstuðul 0,6, þ.e. að uppsett afl samsvari nýtingarstundum $T_S = 5,256 \text{ kh/a}$.

Með nálgun má ákvarða venjulegan stofnkostnað miðað við aðra nýtingu á afli af jöfnunni,

$$\tilde{K}_T = \tilde{K}_S + \frac{\Delta K}{\Delta N} (N - N_S) \quad , \quad \text{Mkr} \quad [2],$$

þar sem $N = E/T$ er uppsett afl í MW, $N_S = E/T_S$ afl miðað við ársálagsstuðul 0,6, E orkuvinnsla í GWh/a og $\Delta K/\Delta N$ venjulegur jaðarkostnaður afls í Mkr/MW.

Leyfilegur jaðarkostnaður orku hefur verið metinn

$$J_S = 22,92 (0,175 + E^{-0,29}) \quad , \quad \text{kr/kWh/a} \quad [3],$$

þar sem miðað er við verðlag í desember 1983 og venjulegan stofnkostnað samkvæmt jöfnu [1]. Mat þetta á jaðarkostnaði byggist á því, að hagkvæm vatnsorka verði fullnýtt innan tiltekins árafjölda. Tilsvarandi rök gilda ekki um afl og leyfilegur jaðarkostnaður með annarri nýtingu á afli er því ákvarðaður þannig,

$$J_T = J_S + \frac{\Delta K}{\Delta N} (N - N_S) - \frac{1}{E} \quad , \quad \text{kr/kWh/a} \quad [4],$$

eða með $\Delta K/\Delta N = 10,3 \text{ Mkr/MW}$

$$J_T = J_S + 10,3 (1/T - 1/T_S) \quad , \quad \text{kr/kWh/a} \quad [5].$$

Afltöp og árleg orkutöp í lokuðum vatnsvegum ákvarðast af jöfnunum

$$\Delta N = aQ^3d^{-b} \quad , \quad \text{MW/km} \quad \text{og}$$

$$\Delta E = 8,76 \beta aQ^3d^{-b} \quad , \quad \text{GWh/a/km,}$$

þar sem d er ákvarðandi vídd vatnsvega í m. Stuðlar a og b eru háðir gerð vatnsveganna og Q er hönnunarrennsli m^3/s . Stuðull β er háður rennislíslangæi um vatnsvegina, en í yfirlitsáætlunum reiknast $\beta = 0,24$.

Með breytttri vídd vatnsvega en óbreyttu hönnunarrennsli Q helzt nýtingartími ekki óbreyttur og við ákvörðun á hagkvæmstu víddum reiknast árleg töp,

$$\Delta K = J_S \Delta E + \left(\Delta N - \frac{\Delta E}{T_S} \right) \frac{\Delta K}{\Delta N} = \left[J_S + \left(\frac{\Delta N}{\Delta E} - \frac{1}{T_S} \right) \frac{\Delta K}{\Delta N} \right] \Delta E$$

eða

$$\Delta K = \left[J_S + \left(\frac{1}{T^*} - \frac{1}{T_S} \right) \frac{\Delta K}{\Delta N} \right] \Delta E \quad , \quad \text{Mkr} \quad [6],$$

þar sem $1/T^* = \Delta N / \Delta E = 1/8,76\beta$, sbr. framanskráðar jöfnur.

Jafngildir þetta, að töpin reiknast sem glötuð orka ΔE með einingarkostnaði

$$J^* = dK/dE = J_S + 10,3(1/T^* - 1/T_S) \quad , \quad \text{kr/kWh/a} \quad [7],$$

þegar reiknað er með venjulegum jaðarkostnaði afls 10,3 Mkr/MW. Samsvarar það að reiknað er með leyfilegum jaðarkostnaði orku J_T með nýtingartíma

$$T = T^* = 8,76 \beta \quad , \quad \text{kh/a} \quad [8].$$

Með $\beta = 0,24$ er $T^* \approx 2,10$ kh/a. Þá fæst af jöfnum [3] og [7]

E	GWh/a	50	100	200	500	1000	2000	5000
J^*	kr/kWh/a	14,3	13,0	11,9	10,7	10,0	9,5	8,9

Við ákvörðun á hagkvæmstu víddum lokaðra vatnsvega er í yfirlitsáætlunum reiknað með föstu gildi $J^* = 11,3$ kr/kWh/a. Veldur það skekkjum á ákvarðaðri vídd innan við $\pm 4\%$, þar sem jaðarkostnaður gengur inn í þessa ákvörðun í veldi á bilinu 1/6 til 1/7.

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 8

Orkutöp í virkjunum og raforkukerfi

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Orkutöp í virkjunum og raforkukerfi.

Verg orka á virkjunarstað er skilgreind með jöfnunni,

$$E_T = \frac{gH_{br}M\Sigma aQ}{3600} \approx \frac{H_{br}M\Sigma aQ}{367}, \text{ GWh/a [1]},$$

þar sem g er þyngdarhröðunin ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$), H_{br} verg fallhæð í m og $M\Sigma aQ$ meðalársrennsli til virkjunarinnar í Gl/a .

Rennslisorka virkjunar er verg orka hennar að frádregnum orkutöpum í vatnsvegum og vél- og rafbúnaði, ef allt rennsli sem til fellur væri nýtt. Rennslisorka er skilgreind með jöfnunni,

$$E_R = \eta \cdot \frac{H^*}{H_{br}} \cdot E_T \approx \frac{H^*M\Sigma aQ}{415,6}, \text{ GWh/a [2]},$$

þar sem $\eta = \eta_T \eta_G \eta_S \approx 0,883$ er áætlað meðalgildi á heildarnýtni vatnshverfla, rafala og annars rafbúnaðar á virkjunarstað og H^* er rekstrarfallhæð samkvæmt jöfnunni,

$$H^* = H_{br} - \gamma\Delta H - h, \text{ m [3]}.$$

Hér er h mismunur á yfirfallshæð, sem verg fallhæð miðast við, og "venjulegri" vatnsborðshæð í inntakslóni og H falltöp í vatnsvegum við hönnunarrennsli, en stuðull $\gamma \leq 1$ er háður rennslislangæi um vatnsvegi.

Orkuvinnslu virkjana við stöðvarvegg má skilgreina með jöfnunni,

$$E = cE_R, \text{ GWh/a [4]},$$

þar sem stuðull c er að jafnaði ákvarðaður með tölrekstri. Byggt er á tímaröðum rennslis til virkjunar á ákveðinu tímabili, samrekstri í virkjanakerfi, sem virkjunin tengist við, og ákveðnum eiginleikum orkunotkunar.

Fyrir virkjanlegt vatnsafl á Íslandi í heild verður hlutfall orku við stöðvarvegg af rennslisorku líklega nálægt 0,865. Núverandi hlutfall er nálægt 0,76, en með áframhaldandi orkunýtingu er gert ráð fyrir vaxandi miðlunarstigi, þ.e. orku í miðlunarlónum í hlutfalli af rennslisorku, og meðalgildi á c fyrir þá orku sem eftir er að nýta verður hærra en 0,865.

Í eftirfarandi skrá eru áætluð töp í raforkukerfinu greind í einstaka þætti. Í skránni eru töp sem felast í stuðli c tilgreind sem töp vegna framhjärennslis o.fl., en nánari greining er þessi:

1. Framhjärennslí í flóðum.
2. Framhjärennslí til að sjá fyrir lágmarksrennslí í árfarvegum (laxarennslí).
3. Framhjärennslí að vetrarlagi til að koma í veg fyrir ístruflanir.
4. Framhjärennslí til virkjana neðar á vatnasviðinu til að sjá fyrir aflþörf á álagstoppum.
5. Leki úr uppistöðulónum og vatnsvegum.
6. Töp vegna ýmissa rekstrartæknilegra skilyrða.

Athygli er vakin á því, að tilgreind töp í vatnsvegum og vél- og rafbúnaði í skránni miðast við fulla nýtingu á rennslí til virkjunarinnar. Raunveruleg töp fást með því að margfalda viðkomandi liði með stuðli c.

ORKA	TÁKN	% af E	% af E _R	% af E _T	% af E _N
VERG ORKA	$E_T = \frac{H_{br}}{\eta_c H^*} \cdot E$	133,8	115,7	100,0	155,6
Töp í vatnsv.*)	$-\frac{1}{\eta_c} \left[\frac{H_{br}}{H^*} - 1 \right] E$	- 2,9	- 2,5	- 2,2	- 3,4
Töp í vél- og rafbúnaði*)	$-\frac{1}{\eta_c} [1 - \eta] E$	- 15,3	- 13,2	- 11,4	- 17,8
RENNSLISORKA	$E_R = \frac{1}{c} \cdot E$	115,6	100,0	86,4	134,4
Töp vegna fram- hjár. o.fl.	$-\frac{1-c}{c} \cdot E$	- 15,6	- 13,5	- 11,7	- 18,1
ORKA VIÐ STÖÐVARVEGG	E	100,0	86,5	74,7	116,3
Töp í megin- flutningskerfi	- 0,03 · E	- 3,0	- 2,6	- 2,2	- 3,5
Töp í dreifi- kerfi	- 0,11 · E	- 11,0	- 9,5	- 8,2	- 12,8
ORKA TIL NOTENDA	$E_N = 0,86 \cdot E$	86,0	74,4	64,3	100,0

$H_{br}/H^* \approx 1,022, \eta \approx 0,883, c \approx 0,865.$

*) Töp miðuð við fullnýtingu á rennsli til virkjunarinnar.

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 9

Fjöldi og gerð vatnshverfla

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Fjöldi og gerð vatnshverfla.

Við hönnun vatnsorkuvera þarf að taka ákvörðun um fjölda vélasamstæðna og gerð vatnshverfla. Nauðsynlegt rými í stöðvarhúsi ræðst m.a. af stærð vélahluta, og við frumhönnun er þá stuðzt við tölfraðilegar upplýsingar, þ.e. reynslutölur frá virkjunum, sem byggðar hafa verið.

Með fáum og stórum vélasamstæðum verður virkjunin ódýrari, en fleiri og smærri samstæður skapa skilyrði til betri nýtingar (hærri nýtnistuðlar við hlutaálag) og rekstraröryggi verður meira. Stærð vélasamstæðna er þannig háð stærð orkuveitukerfis, sem virkjunin á að tengjast við. Glöggd dæmi um þetta eru virkjanir Landsvirkjunar, þar sem vélasamstæður hafa farið stækkandi, eftir því sem orkuvinnslugeta hefur aukizt. Við Búrfell eru vélasamstæður 35 MW (6 x 35 = 210 MW), við Sigöldu 50 MW (3 x 50 = 150 MW) og við Hrauneyjafoss eru þær 70 MW (3 x 70 = 210 MW).

Gerð vatnshverfils er háð vatnsnotkun Q og hönnunarfallhæð H og bundin véltæknilegum vanda við að ná háum snúningshraða samfara góðum nýtniferli, en með miklum snúningshraða verður stofnkostnaður lægri, þ.e. minni og léttari vatnshverflar og rafalar.

Einkennisstærð vatnshverfla er eðlishraðinn, sem nú er algengast að skilgreina með jöfnunni,

$$n_s = n P_t^{0,5} H^{-1,25},$$

þar sem P_t er afl hverfils í kW, H hönnunarfallhæð í m og n fjöldi snúninga á mínútu (snúnigshraðinn).

Afl vatnshverfils má ákvarða af jöfnunni

$$P_t = 9QH \text{ kW},$$

og þá fæst

$$n_s = 3nQ^{0,5} H^{-0,75}, \quad [1],$$

þar sem Q er vatnsnotkun hverfils við ástimplað afl í m^3/s og H hönnunarfallhæð í m.

Eins og áður sagði takmarkast efri mörk snúningshraða og þar með eðlishraði við gefnar ytri aðstæður og gerð vatnshverfils. Mörk þessi hafa þó sífellt farið hækkandi með aukinni samkeppni framleiðanda og bættri hönnun vélanna. Á árunum 1976 til 1978 birtust greinar í tímaritinu Water Power um helztu einkenni vatnshverfla, þar sem byggt er á tölfræðilegum athugunum. Þar eru eftirfarandi mörk tilgreind.

Kaplanhverflar :

$$n_s \leq 2419 H^{-0,489} , \quad [2]$$

Francishverflar :

$$n_s \leq 3470 H^{-0,625} , \quad [3]$$

Peltonhverflar :

$$n_s \leq 85,49 i^{0,5} H^{-0,243} , \quad [4]$$

Hér er H hönnunarfalldæði í m og i fjöldi stúta peltonhverfla.

Jöfnurnar byggjast á upplýsingum um kaplanhverfla, sem smíðaðir voru á árunum 1970 til 1976, francishverfla frá árunum 1970 til 1975 og peltonhverfla frá árunum 1965 til 1977.

Miðað við framansagt verða efri mörk snúningshraða.

Kaplanhverflar :

$$n \leq 806 Q^{-0,5} H^{0,261} , \quad [5]$$

Francishverflar :

$$n \leq 1156 Q^{-0,5} H^{0,125} , \quad [6]$$

Peltonhverflar :

$$n \leq 28,5 i^{0,5} Q^{-0,5} H^{0,507} , \quad [7]$$

Annað atriði, sem áhrif hefur á val milli hverfilgerða, er soghæðin h_s , þ.e. hæðarmunur á hverfilhjóli og bakvatnsborði. Til að forðast tæringu á hverfilhjóli vegna undirprýstings í straumiðu við hjólið verður að sökkva hraðgengum kaplan- og francishverflum djúpt undir bakvatnsborð, sem hefur að jafnaði í för með sér aukinn kostnað.

Efri mörk eðlishraða eru þannig í raun fall af H og h_s , þ.e.

$$n_s \leq f(H, h_s),$$

og framangreindar jöfnur eru því einungis gildar með ákveðnum takmörkunum á söghæð h_s .

Slíkar takmarkanir eru settar fram með jöfnunni,

$$h_s \leq k - \sigma H,$$

þar sem með nálgun má ákvarða k af jöfnunni,

$$k = 0,95 (10,3 - 1,1 \times 10^{-3} S).$$

Hér er S hæð hverfilhjólis í m y.s.

Í áður nefndum tímaritsgreinum er stuðull σ ákvarðaður með eftirfarandi jöfnum.

Kaplanhverflar :

$$\sigma = 6,40 \times 10^{-5} n_s^{1,46}, \quad [8]$$

Francishverflar :

$$\sigma = 7,54 \times 10^{-5} n_s^{1,41}, \quad [9]$$

Með framanskráðum takmörkunum er ekki unnt að marka ákveðin svið fyrir mismunandi hverfilgerðir. Slík svið hafa heldur ekki verið fræðilega mörkuð svo vitað sé, enda markast þau líklega fyrst og fremst með tilliti til kostnaðar og mögulegra efnisgæða, sem framþróun frá ári til árs hefur áhrif á.

Til að fá hugmynd um núverandi venjur við hverfilval er á meðfylgjandi mynd mörkuð svið fyrir allar þrjár höfuðgerðir vatnshverfla. Byggt er á einkennum um það bil 1200 vatnshverfla, sem smíðaðir voru á árinu 1950 og síðar.

Á myndinni eru einstakir hverflar markaðir með tölvu í QH-hnitakerfi (x: peltonhverfill, +: francishverfill, o: kaplan- eða skrufhverfill). Dregin eru mörk sviða, sem umlykja einstakar hverfilgerðir í úrtakinu, og eins og sést skarast peltonsvið og francissvið annars vegar og francissvið og kaplansvið hins vegar.

Línur sem sýna afl vélasamstæðu

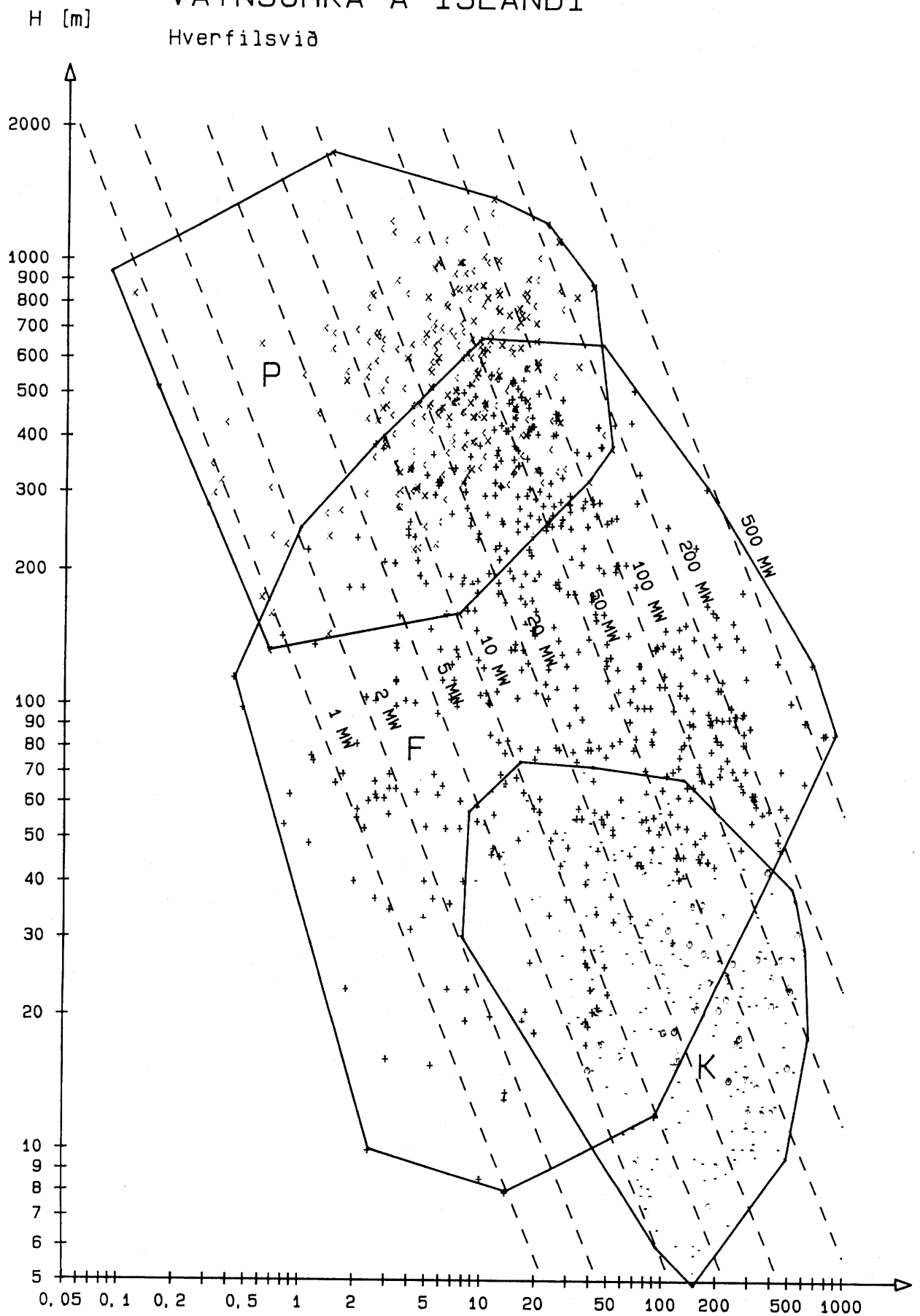
$$N = 0,00875 \text{ QH MW,}$$

eru einnig dregnar á meðfylgjandi mynd.

Hverfilsvið þau, sem mörkuð eru á myndina, eru að sjálfsögðu háð því úrtaki vatnshverfla, sem til grundvallar liggur. Úrtakið er hins vegar svo stórt og nýlegt, að það ætti að veita nokkuð haldgóðar upplýsingar um núverandi venjur við val á hverfilgerð.

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Hverfilsvið



P: peltonhverflar ×
F: francishverflar +
K: kaplan- eða skrúfuhverflar o

Q [m³/s]

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 10

Falltöp og hagkvæmustu víddir vatnsvega

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Falltöp og hagkvæmustu víddir vatnsvega.

Við ákvörðun falltapa í vatnsvegum er reiknað með eftirfarandi hrýfi k , nema nánari ákvörðun liggir fyrir.

Ófóðrað berg	$k = 0,3$	m
Steypuhúðun	$k = 0,15$	m
Steypufóðring	$k = 0,0015$	m
Stálfóðring og stálpípur	$k = 0,0003$	m
Trépípur	$k = 0,0006$	m
Skurðir í jökulruðningi og lausum jarðlögum	$k = 0,2$	m

Núningsfalltöp á lengdareiningu reiknast af jöfnu Darcy-Weisbachs,

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

þar sem λ er núningsstuðull $D=4R$ (D streymisþvermál í m, $R=F/U$ streymismiðmál í m), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (þyngdarhröðunin) og $v = Q/F$ straumhraði í m/s (Q rennsli í m^3/s og F flatarmál í m^2).

Núningsstuðullinn ákvarðast af jöfnu Colebrook-Whites,

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

$$\text{með } Re \approx \frac{vD}{1,5} 10^6$$

Auk núningsstapa reiknast sérstök falltöp (staktöp), sem í yfirlitsáætlunum má lauslega meta $0,5+0,003H_{br}$, þar sem H_{br} er verg fallhæð í m.

Hagkvæmustu vatnsvegavíddir ákvarðast þannig að summa af kostnaði vegna afl- og orkutapa og stofnkostnaði vatnsvegar verði í lágmarki. Kostnað vegna afl- og orkutapa má reikna sem verð glataðrar orku með jaðarkostnaði

$$J^* = 22,92(0,175+E^{-0,29})+10,3(1/T^*-1/5,256), \text{ kr/kWh/a} \quad [3],$$

þar sem E er orkuvinnsla í kWh/a og $T^* = \beta \cdot 8,76 \text{ kh/a}$

Orkutöp verða,

$$\Delta E = 8,75 \cdot 8760 \beta IQ, \text{ kWh/a/m} \quad [4].$$

Í yfirlitsáætlunum reiknast $\beta \approx 0,24$ fyrir lokaða vatnsvegi og reiknað er með föstum jaðarkostnaði (óháð E) $J^* = 11,3 \text{ kr/kWh/a}$.

Þá fæst,

$$\Delta K = J^* \Delta E \approx 208 \cdot 10^3 IQ, \text{ kr/m} \quad [5],$$

en I eru falltöp á lengdareiningu og Q hönnunarrennsli í m^3/s .

Hagkvæmustu vatnsvegavíddir fást, þegar skilyrðinu

$$\frac{\partial (\Delta K + 1,37K_w)}{\partial d} = 0 \quad [6]$$

er fullnægt, þar sem K_w er verktakakostnaður við vatnsveg í kr/m og d er ákvarðandi þvermál í m.

VIRKJANALÍKAN ORKUSTOFNUNAR

FYLGISKJAL 11

Vatnafræðilegar forsendur

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Vatnafræðilegar forsendur

Ákvarðaðar eru líklegar raðir rennslis til virkjana og einstakra miðlunarlóna. Miðað er við tveggja vikna rennsli sem einingu, en rennslisraðirnar ná yfir eins langt tímabil og kostur er. Undanfarið hefur að jafnaði verið miðað við 30 ár, vatnsárin 1950/51 til 79/80, en nú er farið að nota tímabilið 50/51 til 83/84.

Stuðzt er við gögn frá vatnamælingadeild Orkustofnunar, sem eru í fyrsta lagi skýrslur yfir reglubundnar vatnamælingar og í öðru lagi niðurstöður einstakra rennslismælinga. Til greina kemur að nota niðurstöður veðurathugana að einhverju leyti, þegar ekki er kostur fullnægjandi vatnamælinga.

Rennslisskýrslur, sem ná yfir allt tímabilið, verða grundvöllur allra frekari rennslisathugana. Skýrslur, sem ná yfir skemmra tímabil, eru framlengdar reikningslega, svo þær spanni það allt. Að svo miklu leyti sem unnt er, er þá mælt rennsli borið saman við rennsli nálægra mælistaða, þar sem mælt hefur verið allan tímann. Ýmsum aðferðum hefur verið beitt við framlengingu rennslisraða, sbr. skýrslu sem Verkfræðistofan Vatnaskil samdi fyrir Orkustofnun, "ATHUGUN Á FRAMLENGINGU RENNSLISRAÐA", júní 1983 (OS-83046/VOD-05).

Umræddar rennslisraðir mynda grundvöll að orkuvinnslureikningum og ákvörðun á hönnunarflóði í þeim tilvikum, sem nánari ákvörðun verður ekki við komið.

Ákvörðun á mesta líklega flóði í íslenskum vatnsföllum verður í fæstum tilvikum byggð á vatnamælingum. Til þess eru mælingatímabil of stutt, og mælingar á flóðrennsli eru einnig oft óvissar.

Við yfirlitsáætlanagerð ákvarðast flóðrennsli af eftirfarandi jöfnu, sem þó verður að styðjast við með fullri aðgát,

$$HHQ = MQ \left[\frac{(MQ)^{1/2}}{81A^{1/6}} \right] - (1 - (F/A)^{3/2})^{14} \quad , m^3/s [1],$$

þar sem HHQ er mesta rennsli á yfirfalli, MQ meðalrennsli í m^3/s , A stærð vatnasviðs í km^2 og F flatarmál lóns í yfirfallshæð í km^2 .

Með $F = 0$ fæst mesta aðrennsli,

$$HHQ_0 = 81(MQ)^{1/2}A^{1/6}, \text{ m}^3/\text{s} [2],$$

sem umrita má þannig,

$$HHQ_0 = 2,56(MQ)^{1/2}A^{2/3}, \text{ m}^3/\text{s} [3],$$

þar sem Mq er meðalafrennsli í $l/\text{s}/\text{km}^2$.

Flóð á byggingartíma reiknast við yfirlitsáætlanagerð sem 40 af hundraði mesta aðrennslis, eða

$$HHQ_b = 0,4 HHQ_0, \text{ m}^3/\text{s} [4].$$

Samkvæmt framansögðu er hönnunarflóð í hlutfalli af mesta aðrennsli,

$$\frac{HHQ}{HHQ_0} = \left[\frac{HHQ_0}{MQ} \right] (1 - (F/A)^{3/2})^{14-1}, \quad [5],$$

sbr. meðfylgjandi skýringarmynd.

Athygli er vakin á því, að við ákvörðun hönnunarflóða verður að taka fullt tillit til miðlunar ofar á vatnasviðinu.

Flatarmál lóna, F , ákveðst að jafnaði af hagkvæmu miðlunarrými samkvæmt skilyrðinu,

$$\frac{dK}{dE} = \frac{\partial K}{\partial M} \cdot \frac{dM}{dE} + \frac{\partial K}{\partial N} \cdot \frac{1}{T} = J, \text{ kr/kWh/a} [6],$$

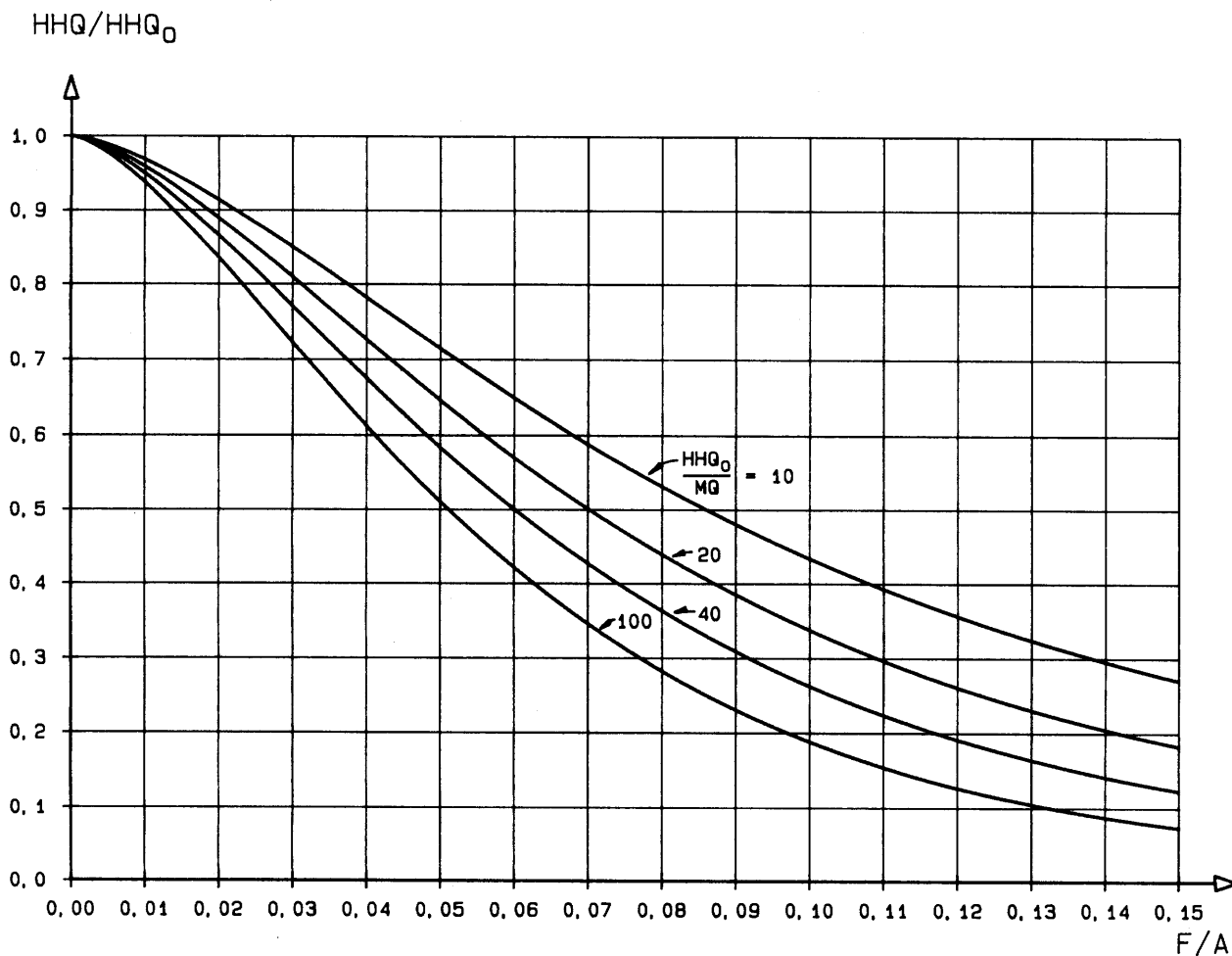
þar sem K er stofnkostnaður virkjunar sem fall af miðlunarrými M og uppsettu afli $N = E/T$. Orkuvinnslugeta E er fall af M og J er leyfilegur jaðarkostnaður.

VATNSORKA Á ÍSLANDI

Hönnunarflóð

$$HHQ_0 = 81 \cdot (MQ)^{1/2} A^{1/6} \quad [m^3/s]$$

$$\frac{HHQ}{HHQ_0} = \left[\frac{HHQ_0}{MQ} \right]^{(1 - (F/A)^{3/2})^{14-1}}$$



HHQ₀ : mesta aðrennsli í m³/s

HHQ : hönnunarflóð í m³/s

MQ : meðalrennsli í m³/s

F : flatarmál löns í km²

A : stærð vatnasviðs í km²