



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Verkfræðistofa Guðmundar & Kristjáns hf.
Laufásvegi 12, Reykjavík

**FRUMÁÆTLUN UM FLUTNING
JARÐVARMA FRÁ HÁHITASVÆÐUM**

Áfangi 2: Gufubjöppun og vatnsdæling

OS-83018/JHD-04

Reykjavík, mars 1983



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verkfræðistofa Guðmundar & Kristjáns hf.
Laufásvegi 12, Reykjavík

FRUMÁÆTLUN UM FLUTNING JARÐVARMA FRÁ HÁHITASVÆÐUM

Áfangi 2: Gufubjöppun og vatnsdæling

OS-83018/JHD-04

Reykjavík, mars 1983

ÁGRIP

Þessi skýrsla fjallar um samþjöppun jarðgufu og dælingu á heitu holuvatni frá gufuskiljum. Hún er önnur í röðinni af þremur, sem allar fjalla um flutning jarðvarma frá háhitasvæðum. Fyrsta skýrslan (OS8207611, ágústi 1982) fjallar um pípulagnir frá jarðhitasvæði til markaðar. Þriðja og síðasta skýrslan greinir frá gerð frumáætlunar fyrir nokkrar tiltekna flutningsleiðir á grundvelli forsendna úr hinum skýrslunum.

Komist er að þeirri niðurstöðu, að samþjöppun gufu sé tæknilega vel framkvæmanleg. Kostnaður við slíka þjöppun er aftur á móti verulegur í samanburði við gufuöflunarkostnaðinn sjálfan, líklega á bilinu 30-120% eftir aðstæðum. Þrátt fyrir þetta væri unnt að virkja jarðhitasvæði til gufuþjöppunar og flutnings háþrýstigufu um langar vegalengdir fyrir verð, sem er innan við þriðjung af gufuverði frá svartoliukyntum kötlum. Arðsemi er mjög háð virkjunarstærð, gufuþrýstingi, flutningsvegalengd og, síðast en ekki síst, árlegri nýtingu.

Dæling á holuvatni frá gufuskiljum til markaðar er mjög ódýr, þ.e.a.s., ef mögulegt er að nýta vatnið niður í tiltölulega lágt hitastig (40-60°C) og ef komast má hjá útfellingum steinefna. Notkun slíks vatns til hitunar getur kostað meira en helmingi minna en notkun jarðgufu.

Samþjöppun gufu og einþétting hennar í holuvatni, sem svo yrði notað sem varmaberi, er ódýrari aðferð en flutningur á gufu beint. Þetta gildir jafnvel þó að hitastig holuvatnsins fyrir hitun sé svipað og frárennslis-hiti við nýtingu.

Dæling á 200-300°C vatni beint úr háhitaholum er ekki framkvæmanleg enn sem komið er.

Í síðasta kafla skýrslunnar (kafla 5) eru reiknuð nokkur dæmi, sem gefa samilegt yfirlit yfir orkukostnað á notkunarstað.

EFNISYFIRLIT

bls.

ÁGRIP

EFNISYFIRLIT

SKRÁ YFIR MYNDIR OG TÖFLUR 1

INNGANGUR 2

1. GUFUÞJÖPPUSTÖÐ 4

1.1 Gufuþjöppun 4

1.2 Stofnkostnaður 6

1.3 Reksturskostnaður 7

2. VAINSDÆLUSTÖÐ 8

2.1 Dæling 8

2.2 Stofnkostnaður 10

2.3 Reksturskostnaður 10

3. EIMÞÉTTING Í HOLUVAINI 12

4. BORHOLUDÆLUR 13

5. DÆMI 14

MYNDIR OG TÖFLUR 19-29

SKRÁ YFIR MYNDIR OG TÖFLUR

- Mynd 1: Þjöppun í 20 bar abs. án millikælingar
- Mynd 2: Þjöppun í 20 bar abs. með millikælingu
- Mynd 3: Þjöppun í 30 bar abs. án milliælingar
- Mynd 4: Þjöppun í 30 bar abs. með millikælingu
- Mynd 5: Gufuþjöppun - háþrýstigufa (7 bar abs.) frá skiljustöð pr. kg. af gufu frá þjöppu
- Mynd 6: Gufuþjöppun - enthalpía og hitastig gufu frá þjöppu og þjöppunarorka
- Mynd 7: Gufuþjöppustöð - stofnkostnaður
- Mynd 8: Holuvatnshitun - gufa pr. kg. vatns frá skilju og þrýstingur frá gufuþjöppu.
-
- Tafla 1: Stofnkostnaður gufuþjöppustöðvar - afköst 100 kg/s, 20 bar abs.
- Tafla 2: Stofnkostnaður gufuþjöppustöðvar - afköst 50 kg/s, 20 bar abs.
- Tafla 3: Stofnkostnaður gufuþjöppustöðvar - afköst 25 kg/s, 20 bar abs.

INNGANGUR

Þessi skýrsla fjallar um samþjöppun jarðgufu annars vegar og dælingu á vatni (holuvatni) hins vegar.

Hér er um að ræða 2. áfanga í gerð frumáætlunar um flutning jarðvarma frá háhitasvæðum, en 1. áfangi, um gufu- og vatnslagnir, kom út í ágúst 1982 (OS82076 / JHD11). Þeim, sem betur vilja kynna sér tilgang og umfang þessarar áætlunargerðar, er bent á inngangskafli í áður nefndri skýrslu.

Eins og kunnugt er, fara afköst gufuborhola minnkandi með vaxandi þrýstingi á holutoppi, ef undan er skilið þrýstingsbilið 2 - 5 bar, þar sem heildarstreymi annaðhvort stendur í stað eða vex. Afköst minnka hægt í fyrstu, en þegar komið er upp og yfir 8 - 12 bar, fara afköst ört minnkandi uns lokunarþrýstingi holunnar er náð. Frá þessu eru að sjálfsögðu undantekningar í báðar áttir, ef svo má segja. Sumar holur eru máttlausar og þola varla 5 - 8 bar mótþrýsting, aðrar eru kröftugar og vita lítið sem ekkert af 8 - 12 bar mótþrýstingi.

Þrýstifall er óhjákvæmilegt við flutning gufueftir pípulögn frá vinnslusvæði til markaðar. Ef flutningsleiðin er löng og/eða notkunarþrýstingur hár, kann að þurfa mjög víða og þá um leið dýra gufulögn og/eða að vinnuþrýstingur gufuholanna verði svo hár, að afköst skerðist verulega. Hvort tveggja gefur tilefni til athugunar á þeim möguleika, að þjappa gufunni saman á vinnslusvæðinu. Með því móti er hægt að reka gufuholurnar á hagkvæmum vinnuþrýstingi (6-8 bar) óháðum þörfum markaðarins og flutningsvegalengdinni.

Íslensk háhitasvæði eru öll tvífasasvæði, þ.e. upp úr borholum streymir blanda af gufu og vatni (holuvatni). Blanda þessi er mismunandi gufurík, háð eiginleikum viðkomandi svæðis og vinnuþrýstingi holanna. Í mjög mörgum tilfellum er gufustreymi um eða innan við fimmtungur heildarstreymis en inniheldur þó allt að helmingi nýtanlegrar orku. Það er með öðrum orðum veruleg orka fólgin í holuvatninu, sem fer forgörðum, ef því er fleygt ónýttu.

Orkuinnihald þessa vatns má að einhverju leyti varðveita með niurdælingu í jarðhitasvæðið, og slík dæling getur einnig komið í veg fyrir ofþornun svæðisins og þar með lengt líftíma þess.

Að niðurdælingu frágenginni er augljóst, að til mikils er að vinna, ef mögulegt reynist að nýta varma úr holuvatninu. Til þess að svo megi verða, þarf í flestum tilfellum að flytja vatnið eftir pípulögnum um lengri eða skemmri veg til notandans, en slíkt krefst dælingar.

Þessi tvö atriði, gufubjöppun og vatnsdæling eru höfuðviðfangsefni þessarar skýrslu. Auk þeirra er gerð grein fyrir einþéttingu samþjappaðrar gufu í holuvatni og aðeins minnst á stöðu mála varðandi holudælur (djúpvatnsdælur).

1. GUFUÞJÖPPUSTÖÐ

Hér á eftir verður gerð grein fyrir tæknilegum forsendum gufuþjöppunar ásamt stofn- og reksturskostnaði gufuþjöppustöðvar.

Áætlanir eru við það miðaðar, að um sé að ræða nokkurn veginn sjálfstæða virkjun, sem hefur gufuþjöppun og gufuflutning að höfuðmarkmiði, hliðstætt raforkuvirkjun og stofnlínun. Virkjun og rekstur jarðhitasvæðisins sjálfs, þ.e. rannsóknir, borholur, safnæðar og skiljur eru þó ekki innifalin í áætlununum. Með þessum efnistöfum er ekki gefin nein vísbending um heppi-legt rekstrarfyrirkomulag, heldur einungis framfylgt samningi um gerð þessarar skýrslu, sem tekur eins og fyrirsegir við af skýrslu Orkustofnunar um verð á jarðgufu frá háhitasvæðum (OS82045 / JHD06) gefinni út í maí 1982.

1.1 Gufuþjöppun

Gufuþjöppun er notuð í vaxandi mæli í ýmsum iðnaði. Má þar nefna eimingu og nýtingu afgangsvarma. Gufuþjöppun er hliðstæð annarri gasþjöppun að öðru leyti en því, að hitastig er að jafnaði mun hærra við gufuþjöppun. Við samþjöppun jarðgufu þarf að taka tillit til aukaefna, sem fylgja jarðgufunni og krefjast viðeigandi ráðstafana við efnisval og hönnun eins og í jarðgufuhverflum. Til þess að þjappa gufu, sem orku, sem nærtækast er að fá úr jarðgufu, þ.e. með því að nota jarðgufuknúinn hverfil til að snúa jarðgufuþjöppu. Einnig kemur til greina að nota rafmótor, en þó því aðeins að raforka sé þegar fyrir hendi á svæðinu og að aflþörf þjöppunar sé lítil (innan við 1000-3000 kW). Þessar hugleiðingar liggja þó nánast utan þess ramma, sem þessari skýrslu er settur.

Orkuþörf við þjöppun fer fyrst og fremst eftir þrýstingi að og frá þjöppu, en einnig eftir þjöppunýtni (fjöldi þjöppuþrepa, snúningshraða o.s.frv.) og, síðast en ekki síst, eftir því hvort gufan er kæld milli þrepa eða ekki. Áður en lengra er farið út í þessa sálma, er rétt að skoða, hvernig þjöppustöð tengist gufuveitunni.

Á mynd 1 er sýnd gufuþjöppustöð, sem tekur til sín 100 kg/s af jarðgufu til þjöppunar í 20 bar abs. Gufan, sem þjappa á, kemur frá háþrýstiskilju(m) gufuveitunnar við 7 bar abs., en það svarar til 7,5 - 8 bar abs. holutoppþrýstings gufuhola. Þessi þrýstingur er valinn að því gefnu, að afköst

gufuholanna séu þá í hámarki, en það getur verið talsvert breytilegt frá einu svæði til annars og jafnvel frá einni borholu til annarrar á sama svæðinu. Ef þessi þrýstingur er innan markanna 6-8 bar abs. (í háþrýstiskilju) er um óveruleg áhrif að ræða, sem naumast þarf að taka tillit til í áætlun sem þessari.

Auk þeirrar gufu, sem þjappað er, þarf gufu til að knýja þjöppuhverfilinn. Til þess að takmarka háþrýstigufunotkun hverfilsins eins og verða má, er lágþrýstigufa af holuvatni frá háþrýstiskilju soðin og hún notuð til að snúa hverflinum. Það sem á vatnar, verður svo að taka af háþrýstigufunni. Kælikerfi til eimþéttingar hverfilgufu er að öllu leyti hliðstætt og í jarðgufuvirkjun fyrir raforkuframleiðslu. Flæðiritið á þessari mynd sýnir gufupjöppun án millikælingar.

Á mynd 2 er sýnd þjöppun á sama háþrýstigufumagni við sama þrýsting. Eini munurinn er sá, að gufan er kæld í lok hvers þjöppunarþreps (nema þess síðasta) niður undir metnun með innsprautun á 100°C vatni. Þetta hefur fyrst og fremst þau áhrif, að í stað rúmra 29 MW og 33 kg/s af háþrýstigufu kemst stöðin af með rúm 27MW og tap 29 kg/s af háþrýstigufu. Vegna þessarar innsprautunar, kemur um 8% meiri gufa út úr þjöppunni en inn í hana fór (ekki sýnt á myndinni).

Ljóst er, að hagkvæmara er að nota millikælingu, ef þess er kostur. Í fyrsta lagi er heildarorkunýting jarðhitasvæðisins betri, sem sést af því, að fyrir hvert kg heildarstreymis úr borholu fást um 476 kJ nýtanlegs varma (niður í 100°C vatn), þegar millikæling er notuð, en 451 kJ án millikælingar. Samsvarandi hlutfall þjöppuorku og nýtanlegrar orku er minna eða 0,104 kJ/MJ borið saman við 0,114 kJ/MJ. Gallinn við þetta er bara sá, að vatn til innsprautunar verður að vera hreint og slíkt vatn er sjaldnast fáanlegt á jarðhitasvæðum. Það er t.d. óhugsandi að nota vatn úr gufuborholum. Ef til vill væri mögulegt að nota þéttivatn frá þjöppuhverfli, en þá þyrfti eimþétting að vera óbein með loftkælingu, sem er mun dýrari en hið hefðbundna kæliturenkerfi.

Með tilliti til þess, að í einhverjum tilvikum kann að vera mögulegt að afla ferskvatns til millikælingar, er báðum möguleikum haldið opnum í áætluninni.

Myndir 1 og 2 sýndu þjöppun í 20 bar abs. Myndir 2 og 3 sýna samsvarandi þjöppun í 30 bar abs.

Á myndum 5 og 6 eru sýnd línurit, sem á þarf að halda við gerð kostnaðaráætlana.

Mynd 5 er línurit, sem sýnir hversu mikillar háþrýstigufu þarf að afla til viðbótar þeirri gufu, sem senda á til markaðarins. Þessi viðbótargufa fer auðvitað fyrst og fremst í þjöppuhverfilinn, en einnig í litla hverfil-rafala samstæðu, sem framleiðir rafmagn til eigin nota. Afl þeirrar samstæðu er um 6% af aflþörf þjöppu. Gufunotkun beggja hverfla er innifalin í línuritinu. Jafnframt kemur fram á þessu línuriti hversu mikla gufu þurfi að þjöppa fyrir hvert kg af gufu, sem sent er frá þjöppunni og koma þá áhrif innsprautunar vatns í ljós. Þessi línurit eru unnin sem fall af þrýstingi frá þjöppu, 10-35 bar abs., en við stöðugan þrýsting að þjöppu, 7 bar abs.

Mynd 6 sýnir aftur á móti enthalpiu og hitastig gufu frá þjöppu ásamt þjöppunarorku pr. kg gufu frá þjöppu. Með þjöppunarorku er átt við málorku, þ.e. margfeldi þjöppunarorku og gufurennslis frá þjöppu gefur stærð þjöppuhverfils í kW.

Með þessi tvö línurit í höndum, sem sýnd eru á myndum 5 og 6, má finna þær upplýsingar, sem á þarf að halda við gerð kostnaðaráætlana. Dæmi um notkun eru sýnd í lokakafli skýrslunnar.

1.2 Stofnkostnaður

Stofnkostnaðaráætlun tekur til alls búnaðar, sem á þarf að halda á vinnslusvæðinu, til þess að þjappa saman jarðgufu. Gufuholur, safnæðar og skiljustöð (háþrýsti- og lágþrýstigufu) eru ekki meðtalin. Sömu leiðis er gufuæð frá þjöppustöð til byggða undanskilin. Allur annar búnaður er meðtalin eins og sýnt er í eftirfarandi kostnaðartöflum (töflum 1-3) og í línuritsformi á mynd 7.

Forsendur kostnaðaráætlunar eru hliðstæðar þeim, sem raktar voru í 1. áfanga þessarar skýrslu. Eini mismunurinn er sá að verðlag er allt miðað við 1. desember 1982 í stað 1. mars 1982.

Gengi helstu gjaldmiðla, sem við sögu koma miðast við 1. des. 1982:

1 USD	-	16,246	kr.
1 JPY	-	0,06551	kr.
1 DEM	-	6,619	kr.

Vísitala byggingarkostnaðar var bá 1482 stig. Á það skal minnt, að ekki er reiknað með opinberum aðflutningsgjöldum og söluskatti. Ennfremur þarf að bæta 40% álagi við kostnaðartölur verktakakostnaðar, vegna ófyrirséðra liða, verkfræðipjónustu, umsjónar og vaxta á byggingartíma. Allar tölur eru reiknaðar í föstum krónum, þ.e. ekkert tillit er tekið til verðbólgu.

Við umreikninga síðar meir er ráðlegt að nota gengi USD og í U.S.A. verðbólgu (ca. 5% pr. ár '82) á innflutningsliðinn og vísitölu byggingarkostnaðar á innlenda liðinn.

1.3 Reksturskostnaður

Með tilliti til þess, hversu margt er líkt með gufupjöppustöð og raforkustöð (fyrir jarðgufu), er valinn sá kostur að nota sömu forsendur við áætlun reksturskostnaðar eins og notaðar voru við gerð frumdraga að áætlun um jarðgufuaflostöð í Hengli (OS82023/JHD02) febrúar 1982. Helstu forsendur eru þá þessar:

- Ársvextir 8% og afskriftartími 25 ár
- Árlegur viðhaldskostnaður 1% af stofnkostnaði
- Árlegur starfsmannakostnaður, umsjón og tryggingar, 1,2% af stofnkostnaði

Samandregið má segja að árlegur heildarkostnaður að gufukaupum undanskildum sé 11,6% af stofnkostnaði (verktakakostnaði + 40%), að mestu óháður árlegum nýtingartíma.

2. VATNSDÆLUSTÖÐ

Gagnstætt því, sem lagt var til grundvallar í tæknilegum og fjárhagslegum forsendum gufuþjöppustöðvar, er vatnsdælustöð hér skoðuð sem hugsanleg viðbót við annaðhvort raforkustöð eða gufuþjöppustöð. Hér er sem sé ekki um sjálfstæða virkjun að ræða. Hún gerir ekki annað en dæla vatni úr gufuborholunni, enda naumast hugsanlegt að til slíkrar virkjunar yrði stofnað á háhitasvæði, því þá yrði gufunni fleygt. Eini möguleikinn, sem réttlætt gæti sjálfstæða vatnsdælustöð væri sá, að takast mætti að dæla vatni beint úr háhitaholum, áður en að suðu kemur, en slíkt er ekki tæknilega mögulegt enn sem komið er, sbr. kafla 4.

Af þessum sökum er dæmið þannig upp sett, að holuvatnsdæling ertalin aukavinnsla, sem ekki greiðir fyrir afnot af þeirri þjónustu, sem fyrir hendi er, þ.e. vélgæslu ásamt verkstæðis- og geymsluaðstöðu. Á hinn bóginn greiðir dælustöðin allan stofnkostnað henni viðkomandi svc og orku- og viðhaldskostnað. Að öðru leyti er hér um sambærilega áætlun að ræða og í kafla 1, þ.e., dælustöðin tekur við vatni frá skiljustöð og dælir því inn á aðveitulögn til markaðarins. Öflun holuvatnsins, flutningur að skiljustöð og meðhöndlun þar ásamt aðveituæð til markaðar liggur því utan ramma þessarar áætlunar.

2.1 Dæling

Dæling á vatni frá gufuskiljum er frábrugðin hefðbundinni dælingu á hitaveituvatni að tvennu leyti:

- 1) Hitastig er hærra (100–200°C)
- 2) Efnasamsetning er önnur

Fyrri atriðið gerir það að verkum, að kæla þarf áspéttingar. Þetta er tiltölulega fyrirhafnarlítið og auðvelt viðfangs, jafnvel þótt ekki sé rennandi ferskvatn til staðar. Síðara atriðið ætti heldur ekki að valda verulegum vandræðum svo fremi að hitastig holuvatnsins sé ofan útfellingarmarka (mettunarhitastig opals). Útfellingarmörk á háhitasvæðum eru m.a. háð svæðishitastigum. Þar sem svæðishitastig er á bilinu 240–280°C, má búast við útfellingum neðan 140°C, svarandi til 240°C svæðishita, og neðan 185°C, ef svæðishiti er nálægt 280°C.

Eins og getið var um í inngangi þessa kafla, er gert ráð fyrir, að dælustöð sem þessi yrði rekin í tengslum við raforkustöð eða gufubjöppustöð. Stofnkostnaður slíkra virkjana (gufubjöppustöð innifalin) er að öðru jöfnu lægri, ef notað er tvíþrýstikerfi, sbr. myndir 1-4. Lágþrýstiskiljur þessara stöðva eru reknar við þrýsting (og hitastig), sem er neðan útfellingarmarka, og þess vegna er viðbúið, að dæling holuvatns frá þessum skiljum verði vandkvæðum bundin. Hvort þetta yrði viðráðanlegt með sérhönnun dæla og/eða efnameðhöndlun vatns skal ósagt látið. Tilraunir yrðu að skera úr um það. Í þessari áætlun er ekki tekið tillit til hugsanlegs aukakostnaðar, sem þetta atriði gæti valdið, heldur einungis bent á þann möguleika að nota einþrýstikerfi við raforkuframleiðsluna eða gufubjöppunina, og láta þá vatnsdælinguna bera mismunakostnaðinn.

Til dælingar á vatni úr borholum er áætlað að koma dælum fyrir þétt við þær gufuskiljur, sem þeim er ætlað að dæla frá (háþrýsti- eða lágþrýstiskiljum). Stjórnlokar á þrýstihlið dæla eða hraðastýring yrðu notuð til að stjórna vatnsdælingu frá skiljunum. Reikna verður með, að á virkjunarsvæðinu sé fyrir hendi kerfi til frárennslislosunar, að mestu sambærilegt því, sem á þyrfti að halda, ef ekki væri um nýtingu þessa vatns að ræða. Ef til vill gæti það verið umfangsminna með hliðsjón af því vatnsmagni, sem losna þarf við á staðnum. Þetta fer allt eftir því, hversu vel vatnsmagnið (í beinu hlutfalli við raforku- eða gufufuramleiðslu) svarar til eftirspurnar.

Dælurnar sjálfar geta verið af ýmsum gerðum. Með tilliti til þess, að í skiljunum er sjóðandi vatn, þurfa dælurnar 4-8 m aðrennslishæð (háð stærð, gerð og snúningshraða dælanna). Af þeim sökum svo og með tilliti til þrýstingsþarfar við dælinguna, er að ýmsu leyti heppilegt að nota lóðréttar, margþrepa dælur, sem sökk er í stálbrunna undir dælustöðvargólfi, þannig að mótörinn einn stendur upp úr. Jafnframt er gert ráð fyrir 1450 sn/mín snúningshraða og að dælustöðin yrði búin þremur jafnstórum dælum þannig, að við full afköst þyrfti á tveimur dælum að halda. Þriðja dælan væri varadæla, tilbúin til gangsetningar fyrirvaralaust. Dælustöðin yrði því að flestu leyti mjög svipuð hliðstæðum stöðum í hitaveitukerfum hérlendis.

2.2 Stofnkostnaður

Forsendur stofnkostnaðaráætlunar eru hinar sömu og raktar voru í kafla 1.2, að því undanskildu, sem getið var um í inngangi kafla 2, þ.e. verkstaðisaðstöðu, geymslum, starfsmannaáðstöðu o.s.frv.

Til þess að gera kostnaðaráætlun, var aflað upplýsinga um verð á nokkrum stærðum lóðréttra dæla með tilheyrandi rafmótorum. Gerð var kostnaðaráætlun fyrir uppsetningu dælanna með tilheyrandi búnaði svo sem rafbúnaði, lokum, lögnum innandyra og stjórnþúnaði. Sömuleiðis var gerð kostnaðaráætlun fyrir dæluhús og dæluundirstöður.

Niðurstöðutölur þessara áætlana liggja nærri eftirfarandi jöfnum:

A. Dælur m/ lokum, lögnum og rafbúnaði:

$$\underline{\text{Efni}} = 5,58 \left[\left(\frac{\text{kW}}{480} \right)^{0,92} \times 0,16 + \left(\frac{\dot{m}}{200} \sqrt{\frac{\Delta P}{17}} \right)^{0,87} \times 0,33 \right] \text{ (MKr.)}$$

$$\underline{\text{Vinna}} = \text{Efni} \times 0,56 \text{ (MKr.)}$$

B. Dæluhús m/ undirstöðum:

$$\underline{\text{Efni}} + \underline{\text{Vinna}} = 1,67 \left(\frac{\text{kW}}{2000} \right)^{0,60} \text{ (MKr.)}$$

$$\text{kW} = \frac{\dot{m} \times \Delta P}{7,5} = \text{Heildarafþörf dælustöðvar (kW)}$$

$$\dot{m} = \text{Heildarvatnsmagn frá dælustöð (kg/s)}$$

$$\Delta P = \text{Mismunarþrýstingur dæla (bar)}$$

Jöfnur þessar gilda fyrir 200-2000 kW heildarafþörf og 100-1500 kg/s heildarvatnsmagn.

Við umreikninga á efnisliðnum vél- og rafbúnaður síðar meir með tilliti til verð- og gengisbreytinga er við hæfi að nota meðaltalsgengi USD og DEM og meðalverðbólgu í þessum tveimur löndum.

Vinnulið og dæluhús má umreikna eftir vísitölu byggingarkostnaðar.

2.3 Reksturskostnaður

Við áætlun reksturskostnaðar er eftirfarandi lagt til grundvallar:

- Ársvextir 8% og afskriftatími 15 ár
- Árlegur viðhaldskostnaður 2,5% af stofnkostnaði

Síðast, en ekki síst, er svo árlegur raforku-kostnaður vegna dælingar, sem mjög er háður árlegum nýtingarstundum dælustöðvarinnar.

Beinast liggur við, að leggja heildsölutaxta Landsvirkjunar til grundvallar eins og hann er á hverjum tíma. Taxti þessi gildir fyrir sölu á 132 kV spennu á tilteknum afhendingarstöðum. Ef afhending fer fram á virkjunarsvæði Landsvirkjunar (Þjórsár- og Tungnársvæði) er gefinn 10%

afsláttur og auk þess 5%, ef söluspenna er 220 kV. Með hliðsjón af þessu er ekki óeðlilegt að álykta sem svo, að raforka til dælustöðvar á virkjunarsvæði rafmagnsvirkjunar eða gufubjöppustöðvar (með innbyggðri rafmagnsvirkjun) yrði seld samkvæmt ofangreindum taxta að frádregnum 20% afslætti. Taxtin yrði þá þessi (1.nóv. '82):

Aflgjald	-	979,48 kr/árs kW
Orkugjald v/nýtingartíma		
o - 2500 klst.	=	31,28 aurar/kWst.
2500 - 4000	"	= 18,24 "
4000 - 8760	"	= 8,48 "

Aflgjald miðast við meðaltal fjögurra hæstu mánaðarálagstoppa ársins. Nýtingartími er fundinn sem heildarorkuúttekt deilt með meðalafloppi ársins.

3. EIMPÉTTING Í HOLUVATNI

Hér er átt við þá aðferð að þetta samþjappaða gufu í holuvatni undir þrýstingi. Við þetta hækkar að sjálfsgöðu hitastig vatnsins. Hugmyndin er því sú, að flytja jarðvarmaorku í vatnsfasa eingöngu í stað vatns- og gufufasa, sem auðvitað krefst tveggja aðveituæða, þegar um lengri vegalengdir er að ræða. Tæknilega séð er ekkert þessu til fyrirstöðu. Búnaður til innsprautunar gufu í vatnið er afar einfaldur og kostnaður hverfandi í viðbót við gufupjöppu- og dælustöð.

Á hinn bóginn er á það að líta, að hitastig vatnsins að aflokinni eimpéttingu verður óhjákvæmilega mjög hátt, það er að segja, ef hitastig gufunnar er ekki því lægra. Sem dæmi um þetta nægir að skoða mynd 3. Ef þetta á 100 kg/s af 30 bar gufu í 456 kg/s af 111°C vatni, verður hitastig vatnsins um 220°C, sem aftur þýðir, að lágmarksþrýstingur (í markaðsenda) aðveituæðar yrði að vera um 23 bar svo ekki sjóði í lögninni. Í þessu dæmi var þrýstingur frá þjöppu óþarflega hár. Sama dæmi skoðað út frá mynd 1 gæfi um 238°C, sem krefst 32 bar þjöppuþrýstings. Jafnvægispunktur er á milli þessara tveggja hitastiga, sennilega um 230°C, eða 28 bar. Ofangreind dæmi eiga við, ef svæðishiti er 270°C og, vel að merkja, ef þetta á alla gufuna.

Nú kann svo að vera, að á svæðinu sé virkjað fyrir allt í senn, raforkuframleiðslu, gufupjöppun og vatnsdælingu. Með því móti er hægt að velja hvaða hitastig sem er (ofan við skiljuhitastig) á hituðu holuvatni frá stöð. Til sérhvers hitastigs á vatni frá stöð svarar þá ákveðið hlutfall milli MW raforku og MW gufupjöppu.

Til þess að gera sér grein fyrir hversu mikla þjöppugufu (gufu frá þjöppu) þurfi pr. kg vatns, til þess að hita það úr 111°C (lágþrýstiskiljuhiti) í tiltekið hitastig, nægir að skoða mynd 8. Hún sýnir einnig lágmarksþrýsting (mettunarþrýsting frá þjöppu).

Í kafla 5 er tekið dæmi um holuvatnshitun og verður hún því ekki rædd frekar hér. Þó verður ekki svo skilið við þetta mál, að ekki sé bent á mismun þess að nýta 23 kg/s af 28 bar gufu og 100 kg/s af 111°C holuvatni og því að nýta 123 kg/s af 230°C vatni. Orkustreymið (enthalpía margfölduð með massastreymi) er það sama í báðum tilvikum, en það er ekki gefið, að hægt sé að nýta sömu orku. Það fer eftir notkunarhitastigi markaðarins. Þéttivarma gufunnar má nýta við hvaða hitastig sem er upp að mettunarhitastigi hennar. Til þessa atriðis verður auðvitað að taka tillit, þegar hagkvæmniútreikningar eru gerðir.

4. BORHOLUDÆLUR

Dælur fyrir háhitaholur þurfa að vinna við eftirfarandi skilyrði:

- Hitastig 200-280°C
- Vatnsdýpi 200-700 m
- Sand- og leirburður

Með tilliti til þessara skilyrða er ljóst, að dælur öxuldrifnar frá yfirborði, koma ekki til greina, heldur yrði að nota djúpvatnsdælur (sambyggð dæla og mótör), sem sökkt yrði niður í holurnar.

Djúpvatnsdælur hafa lengi verið notaðar til að dæla ferskvatni og reynst ágætlega. Á síðari árum hafa komið á markað dælur, sem þola hærri hita og er svo komið að dæling 90-100°C vatns er engum vandkvæðum bundin. Slík dæla er notuð í borholu hjá Hitaveitu Akureyrar.

Þróun þessara dæla er einna lengst komin í Bandaríkjunum. Síðustu fréttir af þeim málum (mars 1982) herma, að enn sem komið er hafi ekki tekist að framleiða dælu, sem til lengdar getur dælt 150°C vatni.

Það, sem mestum vandræðum veldur, er að enn skortir gúmmipakkningar og kapalefni, sem þola hitastig, þrýsting og efnasamsetningu jarðhitavökvans. Vitað er, að þróun háhitagúmmis fleygir ört fram og því mjög sennilegt, að á allra næstu árum takist að framleiða djúpvatnsdælur, sem þola 150-250°C jarðhitavökva.

Dælur sem komast í 8¹/₂" holur, geta dælt um 30-40 l/s, en 12¹/₄" holur þyrfti til að koma fyrir dælum með 50-70 l/s afkastagetu.

Ljóst er, að til mikils væri að vinna, ef takast mætti að dæla beint úr holunum í stað þess að þjappa gufu og þétta í holuvatni, jafnvel þótt ekki yrði unnt að dæla jafn miklu úr þeim og þær gætu gefið ef þær fengju að blása.

5. DÆMI

Til þess að skýra notkun þess efnis, sem hér hefur verið sett fram, verða eftirfarandi dæmi reiknuð:

Dæmi 1

Fyrirtæki í 20 km fjarlægð frá jarðhitasvæði hefur not fyrir orku til óbeinnar hitunar. Efnið, sem hita á, er 20°C heitt og þarf að hitna í 130°C. Aflþörf er áætluð 45 MW og árleg nýting aflsins 6500 klst. Á jarðhitasvæðinu á að starfrækja 60 MW raforkuver, sem nýtir bæði há- og lágþrýstigufu þ.e. tvíþrýstikerfi. Háþrýstigufan er við 7 bar abs. og lágþrýstigufan við 1,5 bar abs. Fyrirtækinu standa eftirfarandi valkostir til boða:

- A) Kaupa háþrýstigufu frá skiljustöð á 25 kr/tonnið.
- B) Kaupa vatn frá háþrýstiskiljum (við 7 bar abs.) á 140 kr/tonnið. Þessi verðlagning er þannig til komin, að með suðu á háþrýstiskiljuvatni við 1,5 bar abs. fengist lágþrýstigufa til raforkuframleiðslu, sem á þyngdareiningu skilar um 60% raforku samanborið við háþrýstigufu, þ.e., hvert tonn lágþrýstigufu er 15 kr. virði. Til þess að sjóða 1 tonn lágþrýstigufu þarf um 9,5 tonn af vatni frá háþrýstiskiljum. Þetta svarar til 1,6 kr/tonn vatns. Til þess að vega á móti því, að vélbúnaður til raforkuframleiðslu úr gufu við tvö þrýstiprep er dýrari en við einn inntaksþrýsting, er verð lágþrýstigufu lækkað í 13,30 kr/tonn, sem svarar til 1,40 kr/tonn vatnsverðs.
- C) Fá vatn ókeypis frá lágþrýstiskilju við 1,5 bar abs. (111°C).
- D) Kaupa háþrýstigufu frá háþrýstiskilju við 10 bar abs. á 35 kr/tonn. Þessi verðlagning tekur mið af því að holuafköst gætu verið um 30% minni við 10 bar en við 7 bar. (Vatn frá háþrýstiskilju myndi þá samsvarandi kosta um 2 kr/tonnið)

Hvaða valkostur (eða sambland valkosta) er hagkvæmastur fyrir fyrirtækið?

Með tilliti til lokahitastigs, 130°C, er gert ráð fyrir að hitastig varmagjafans þurfi að vera a.m.k. 150°C og þrýstingur þá 4,8 bar abs. Nýting gæti samsvarandi orðið niður í 40°C.

Valokstur A - Gufa við 7 bar abs.

Ef gert er ráð fyrir, að gufan sé mettuð, samsvarar 45 MW aflþörf 17,3 kg/s gufunotkun. Línurit í áfangaskýrslu 1, mynd 6, sýnir að það þyrfti að öllum líkindum 700 mm pípu, ef komast ætti hjá gufubjöppun. Á verðlagi í des. 1982 kostaði slík lögn 144 MKr. m/80 mm einangrun. Fastur árlegur kostnaður yrði 14,9 MKr. miðað við 8% vexti, 25 ára afskrift og 1% viðhald og umsjón. Þetta samsvarar 36,8 kr/tonn gufu. Að viðbættu gufuverði kr 25 pr. tonn verður heildarkostnaður kr. 61,80 pr. tonn, eða 8,6 aurar/kWst. og er þá ekki tekið tillit til leiðslutapa.

Annar möguleiki væri að þjappa saman gufunni. Með gufubjöppun (án millikælingar) í t.d. 20 bar, mætti komast af með 350 mm pípu. Mynd 6 í þessu hefti sýnir að enthalpía gufu frá þjöppu yrði um 3060 kJ/kg, sem þýðir, að gufurensli verður 15,6 kg/s eftir æðinni. Til viðbótar þessari gufu þarf, skv. mynd 5, $0,37 \times 15,6 = 5,8$ kg/s af háþrýstigufu (7 bar abs.) til að knýja þjöppuhverfil og rafstöðvarhverfil. Samtals er þá gufunotkun 21,4 kg/s. Samkvæmt mynd 6 er þjöppuorka 292 kJ/kg þjappaðrar gufu og þjöppuafli þá $292 \times 15,6 = 4555$ kW. Samkvæmt mynd 7 kostar slík stöð 88 MKr., sem hækkar um 40% vegna ófyrirséðs, hönnunar, vaxta o.s.frv., í kr. 123,2 MKr. Fastur, árlegur kostnaður af þessari fjárfestingu er 14,3 MKr. Orkuverð gufu frá þjöppustöð er þá 9,2 aurar pr. kWst. og eru þá 4,3 aurar/kWst. fyrir gufukaupum innifaldir (þjöppunarkostnaður er 4,9 aurar/kWst.). Þá er eftir að flytja gufuna (3 aurar/kWst.), þannig að þetta er bersýnilega mun dýrara.

Valkostur B - Skiljuvatn við 7 bar abs.

Vatnið er 165°C heitt og þarf þá 85 kg/s til að fullnægja 45 MW aflþörf. Mynd 9 í áfangaskýrslu 1 sýnir, að þrýstifall í lögn yrði 6 bör, ef lögnin væri 300 mm. Út frá því má áætla, að þrýstifall yrði um 13-15 bör, ef lögn væri 250 mm

Kostnaðarsamanburður verður þá þessi:

	250 mm	300 mm
Aðveituæð m/ 60 mm einangrun	64,4 MKr.	71,4 MKr.
Dælustöð	3,0	1,8
Fastur árlegur kostnaður	7,1 MKr.	7,7
eða pr. kWst. varma	2,42 aurar	2,63 aurar
Raforkukostnaður pr. ár	0,36 MKr.	0,15 MKr.
eða pr. kWst. varma	0,12 aurar	0,05 aurar
Vatnskostnaður pr. ár	2,78 MKr.	2,78 MKr.
eða pr. kWst. varma	0,95 aurar	0,95 aurar
Samtals pr. kWst. varma	3,49 aurar	3,63 aurar

Með tilliti til þess, að þrýstifall yrði yfir 40 bar í 200 mm lögn, má ætla að 250 mm pípa sé hagkvæmust.

Valkostur C - Skiljuvatn ókeypis við 111°C

Til þess að þetta sé raunhæfur möguleiki, verður að hita vatnið upp í 165°C. Það mætti gera með beinni einþéttingu á háþrýstigufu (7 bar abs.). Til þess að hita 1 kg skiljuvatns þarf 0,112 kg gufu, sem svarar til þess, að hvert tonn af 165°C vatni frá stöð kosti 2,50 kr. Auk þessa er þörf á 5,5 bar hærri mismunarþrýstingi yfir dælur en í dæminu hér næst á undan (Valkostur B).

Niðurstöðutölur eru þær, að orka eftir 250 mm pípu kostar 4,33 aura/kWst. og 4,46 aura/kWst. eftir 300 mm pípu.

Valkostur D - Gufa við 10 bar abs.

Miðað við mettaða gufu þarf 17,2 kg/s rennsli. Aðveituæð gæti orðið 600 mm, og myndi hún kosta 123 MKr. m/ 80 mm einangrun. Fastur, árlegur kostnaður næmi því 12,8 MKr. eða sem svarar 4,36 aurum/kWst. Við það þarf svo að bæta gufuverði, 35 kr/tonn, eða 4,82 aurum/kWst., þetta er herra verð en í Valkosti A.

Niðurstaða

Í fyrsta lagi sýna Valkostir A og D ótvírætt, að gufubjöppun er hlutfallslega dýr og borgar sig alls ekki, ef notkunarþrýstingur er innan við 5 bar abs. og gufuholurnar eru færar um að standa undir 7-10 bar abs. holutoppþrýstingi. Á hinn bóginn er orkuverð frá gufubjöppustöð, um það bil 9 aurar/kWst., engin frágangssök í samanburði við svartolíukyndingu.

Í dæminu hér að framan myndi flutningskostnaður um 350 mm lögn kosta nálægt 3 aurum/kWst. og heildarorkukostnaður því um 12 aurar/kWst. samanborið við svartolíukyndingu, 35-40 aura/kWst.

Í öðru lagi sýnir dæmið, að notkun holuvatns beint frá háþrýstiskiljuvættstöð er hagkvæmasti valkosturinn, en það verður að taka með þeim fyrirvörum, sem forsendurnar settu í upphafi. Niðurstaðan breytist til dæmis, ef lágmarksnýtingarhitastig er hækkað úr 40°C í 100°C. Við það hækkar orkuverð samkv. Valkosti B í 6,7 - 7,0 aura/kWst., en í valkosti A hækkar orkuverðið einungis í 9,5 aura/kWst. Við 120°C nýtingarhita stæðu Valkostir A og B nokkurn veginn jafnfætis.

Dæmi 2

Fyrirtæki í 20 km fjarlægð frá jarðhitasvæði hefur not fyrir orku, sem nýtist á hitabilinu 180-100°C. Aflþörf er 150 MW og árleg nýting 6500 klst. Fyrirtækinu stendur til boða háþrýstigufa við 7 bar abs. og lágþrýstiskiljuvatn við 111°C á sömu kjörum og í dæmi 1.

Hver er hagkvæmasti kosturinn fyrir þetta fyrirtæki?

Tvennt er ljóst. Í fyrsta lagi er engin meining í að nota skiljuvatnið eitt sér. Til þess er hitastigið of lágt. Í öðru lagi verður ekki komist hjá þjöppun gufunnar.

Spurningin er því þessi:

Er hagkvæmara að þjappa gufunni og þetta í skiljuvatni en að senda hana beint?

Gufumagn, sem þjappa þarf, er nálægt 57 kg/s og þyrfti samþjöppunin að vera í 20 bar abs. ef gufulögnin er 600 mm.

Ef gufan yrði þétt í skiljuvatni, þyrfti tæp 0,15 kg gufu á móti hverju kg skiljuvatns (mynd 8)

og í heild þyrfti tæp 436 kg/s af 180°C vatni til að fullnægja 150 MW aflþörf. Þrýstifall í 500 mm pípu yrði um 10 bar og þrýstingur frá dælu því um 20 bar abs. (mismunarþrýstingur dælu 18,5 bar).

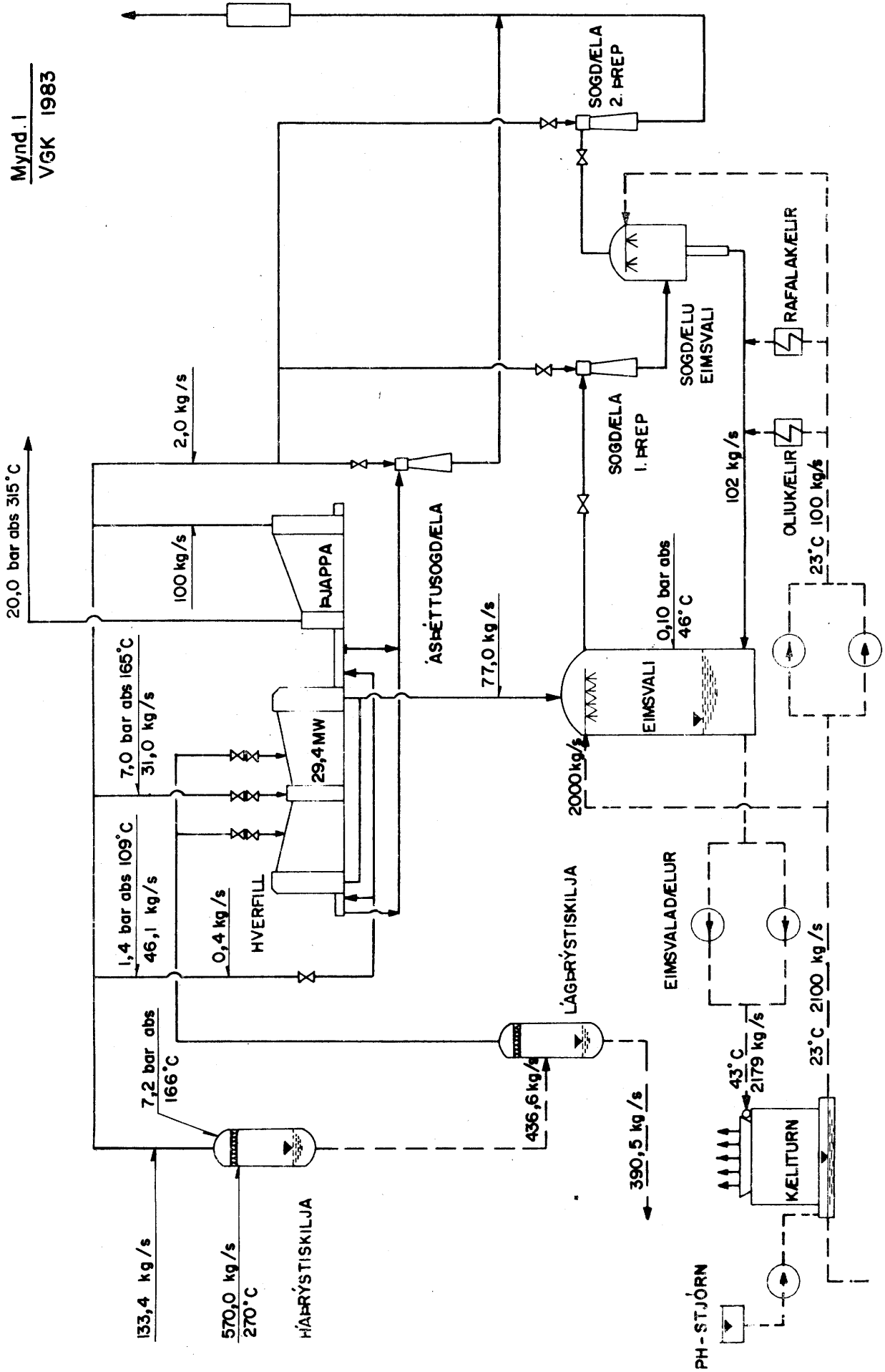
Þrýstingur frá þjöppu þarf á hinn bóginn ekki að vera mikið umfram 10 bar abs.

Kostnaðarsamanburður

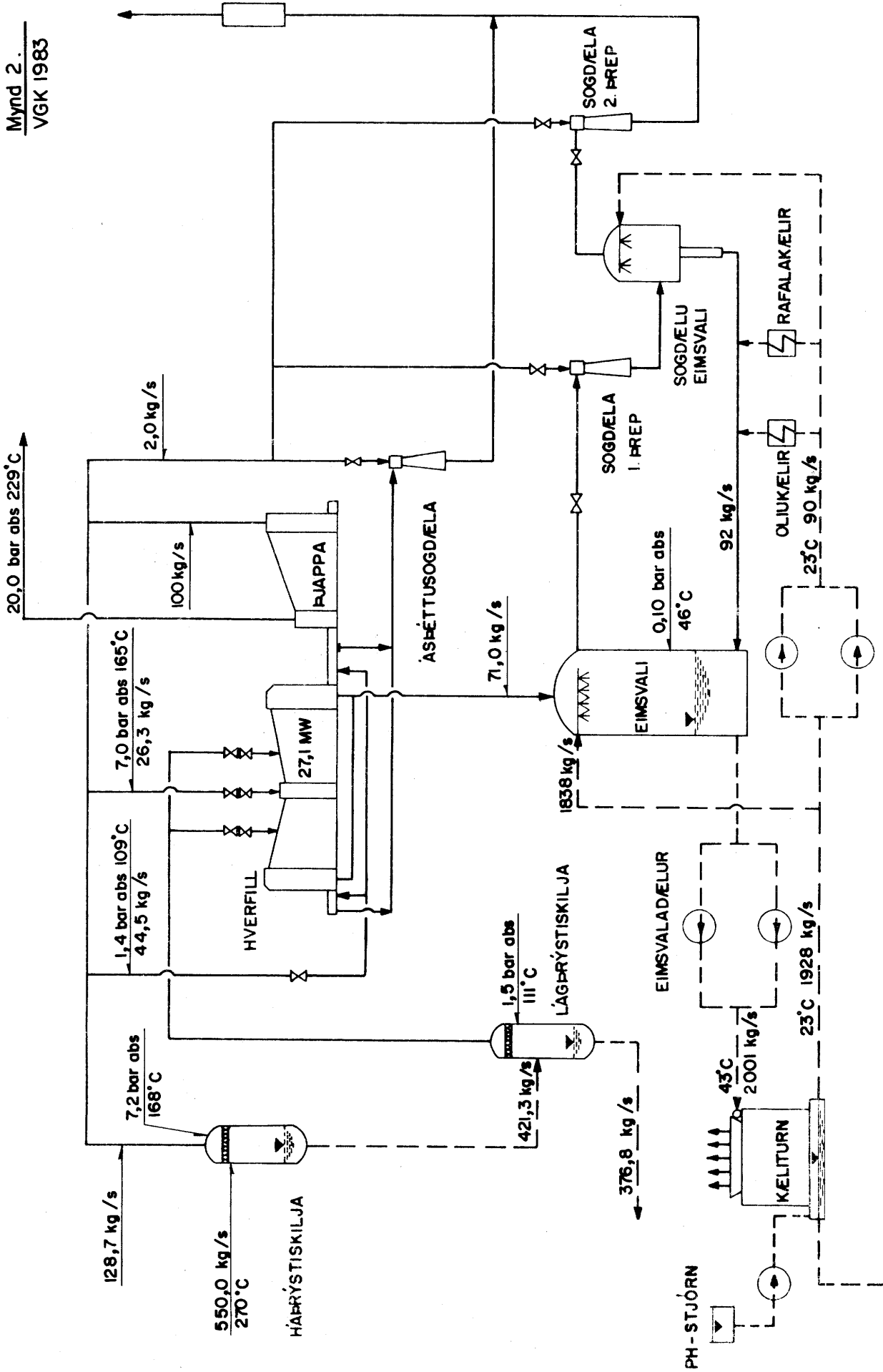
	Gufa beint	Gufa þétt
Gufuþjöppustöð	16,4 MW	5,2 MW
Dælustöð		1,1 MW
Háþrýstigufunotkun (7 bar)	78 kg/s	59 kg/s
Stofnkostnaður þjöppustöðvar	262 MKr.	136 MKr.
Stofnkostnaður dælustöðvar		14 MKr.
Stofnkostnaður pípulagnar	133 MKr.	117 MKr.
Gufukostnaður	aurar/kWst.	
Þjöppunarkostnaður	"	
Dælingarkostnaður	"	
Flutningskostnaður	"	
Samtals aurar/ kWst.	9,21	6,85

Niðurstaðan er sem sé sú, að þrátt fyrir það, að í skiljuvatni við 111°C séu einungis 11°C nýtanlegar á þessum tiltekna markaði, borgar sig að nota þetta vatn til að þetta gufuna og vera varmaberi til markaðarins.

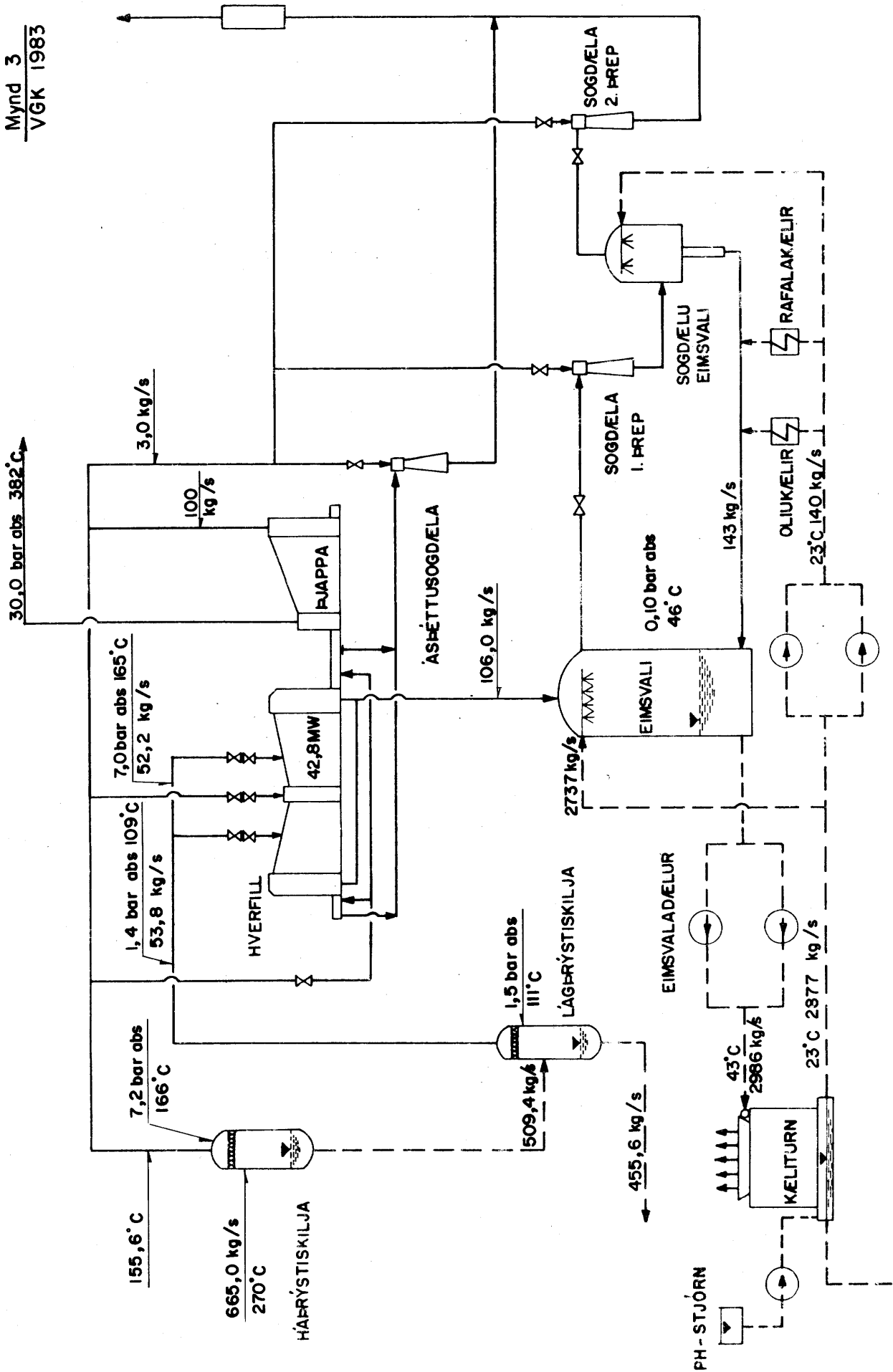
Mynd. 1
VGK 1983



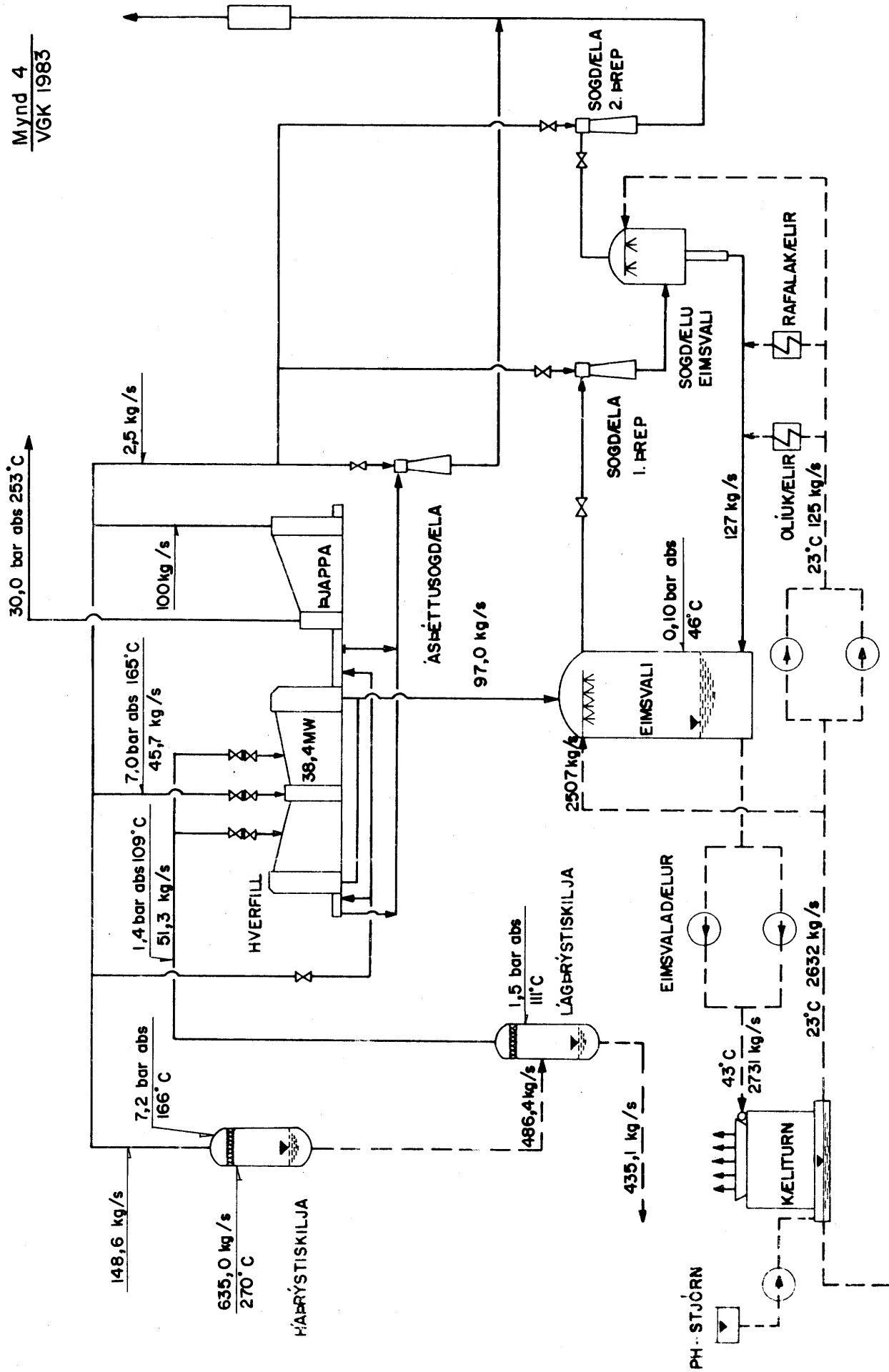
ÞJÖPPUN í 20 bar abs
ÁN MILLIKÆLINGAR



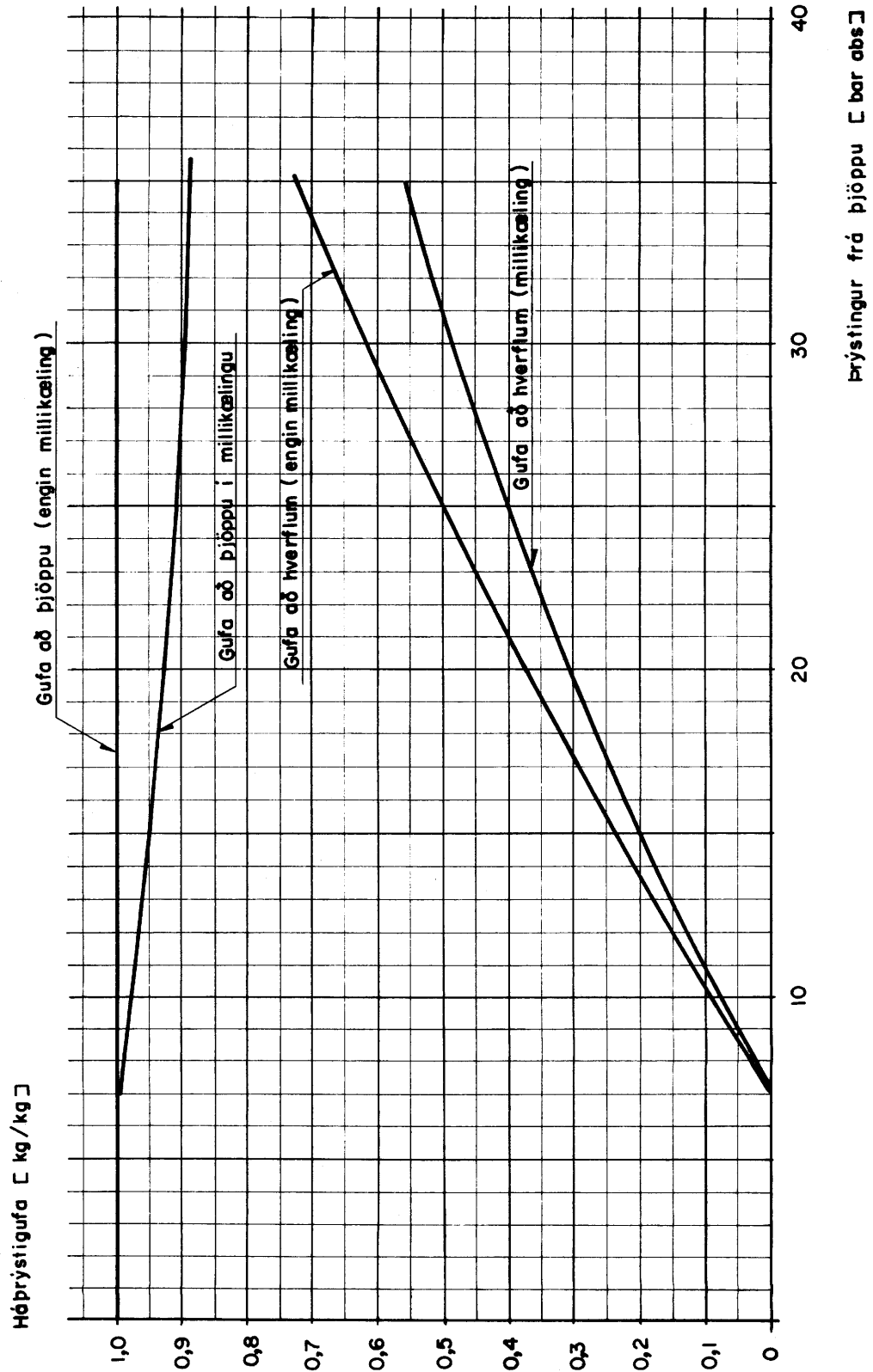
ÞJÖPPUN Í 20 bar abs
MEÐ MILLIKÆLINGU



ÞJÖPPUN í 30 bar abs
ÁN MILLIKÆLINGAR



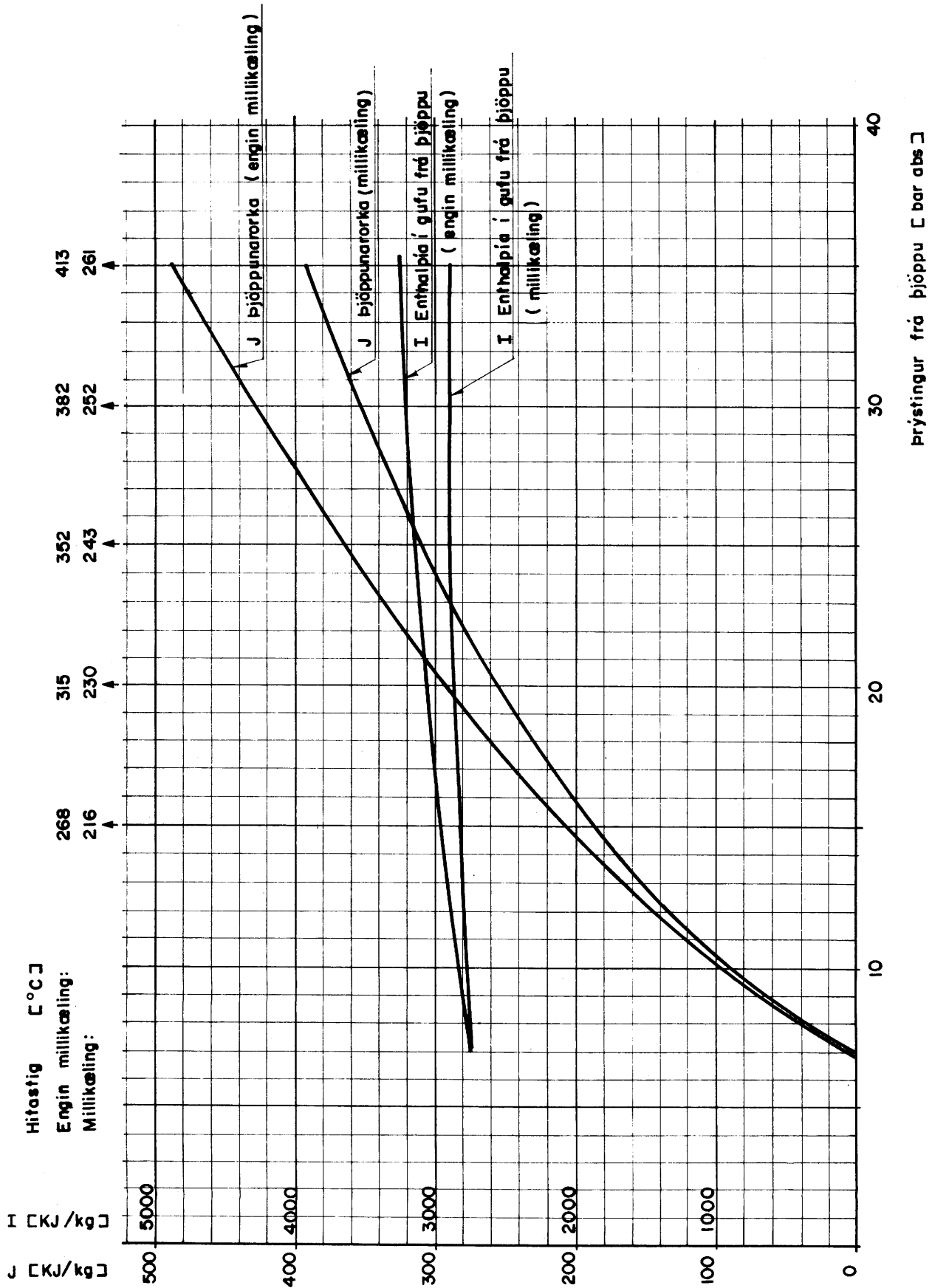
RJÖPPUN í 30 bar abs
MED MILLIK/ELINGU

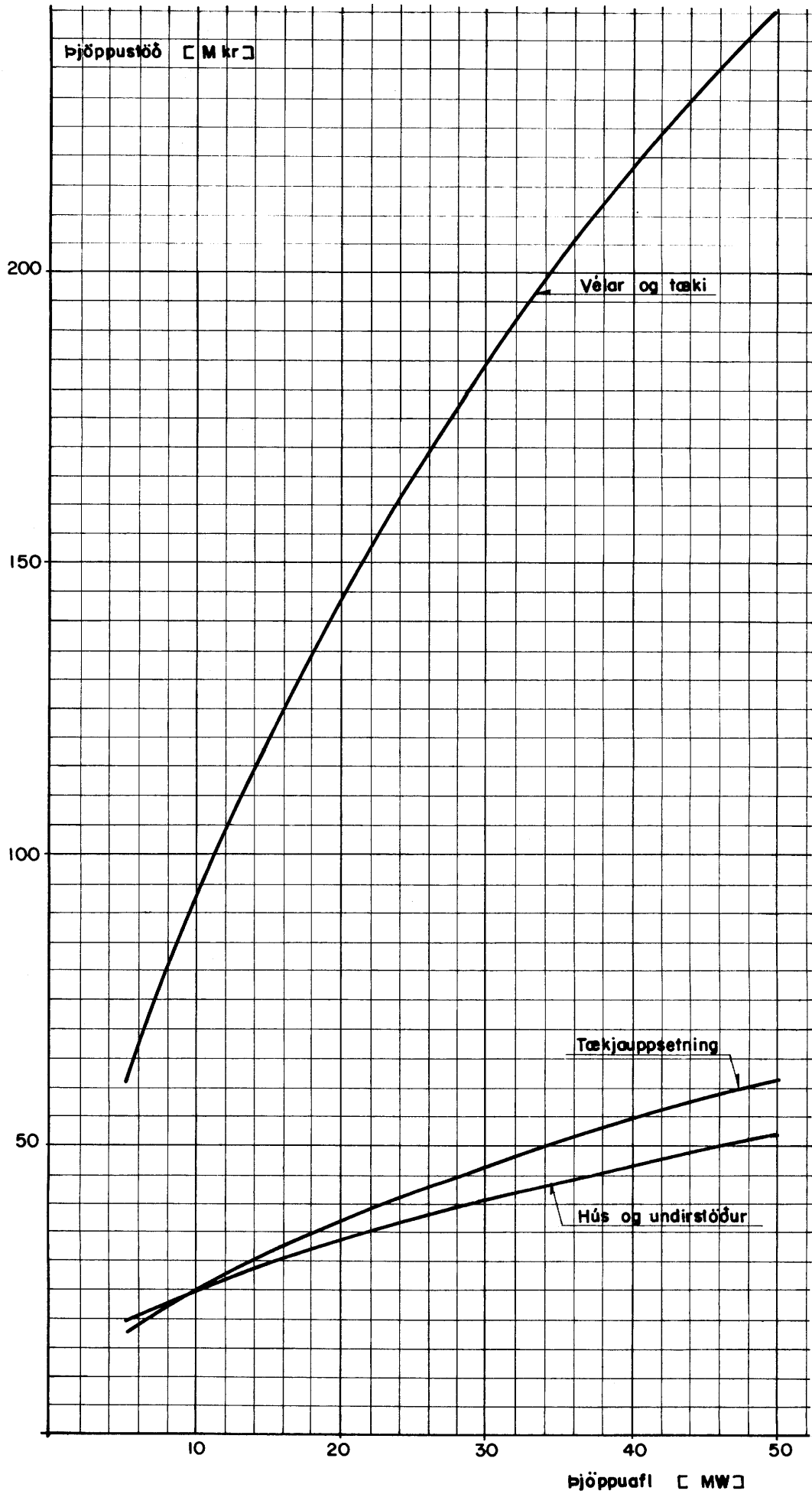
GUFUÞJÖPPUNMynd: 5
VGK 1983HÁPRÝSTIGUFA (7 bar abs)
FRÁ SKILJUSTÖÐ pr kg AF
GUFU FRÁ ÞJÖPPU

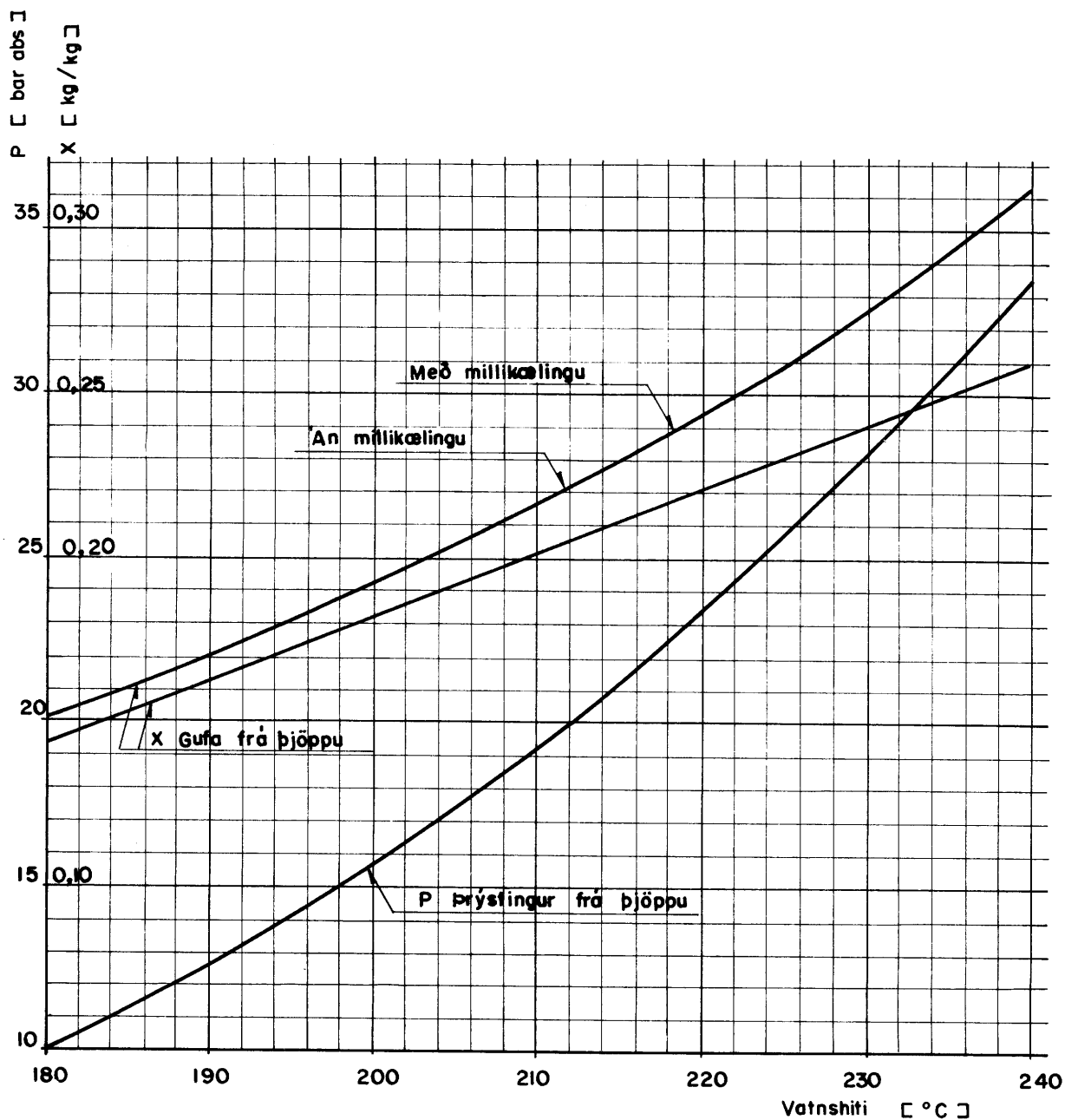
GUFUÞJÖPPUN

Mynd 6.
VGK 1983

ENTHALPÍA OG HITASTIG GUFU
FRÁ ÞJÖPPU OG ÞJÖPPUNARORKA





HOLUVATNSHITUNMynd 8
VGK 1983GUFU pr kg VATNS FRÁ SKILJU
OG ÞRÝSTINGUR FRÁ GUFUÞJÖPPU

STOFNKOSTNAÐUR

TAFLA 1

GUFUÞJÖPPUSTÖÐVARAFKÖST 100 kg/s, 20 bar abs.

VGK 1983

	INNFLUTT (MKr)	INNLENT (MKr)
1) Hverfilþjöppusamstæða 29,4 MW		
Hverfill	45,7	
Þjappa	43,7	
Eimsvali	15,4	
Varahlutir	13,4	
Flutningur og uppsetning		21,0
2) Kælikerfi f. þjöppu- og rafalahverfla		
Kæliturn	14,7	
Kælivatnsdælur og lagnir	14,3	
Varahlutir	2,9	
Flutningur og uppsetning		8,7
3) Raf- og stjórnþúnaður f. 1) og 2)	20,0	13,0
4) Hverfilrafalasangstæða 1,8 MW		
Samstæða	8,6	
Varahlutir	1,3	
Flutningur og uppsetning		1,7
Rafþúnaður	2,5	1,6
5) Stöðvarhús f. 1) - 4)		
Stöðvarhús		14,3
Vélaundirstöður		8,0
Kæliturnaprær		6,0
6) Ýmislegt, verkstæði, geymslur, starfsmannahús, vegir		12,0
Samtals verktakakostnaður	182,5	86,3

STOFNKOSTNAÐUR

TAFLA 2

GUFUÞJÖPPUSTÖÐVARAFKÖST 50 kg/s, 20 bar abs.

VGK 1983

	INNFLUTT (MKr)	INNLENT (MKr)
1) Hverfilþjöppusamstæða 14,7 MW		
Hverfill	29,3	
Þjappa	26,9	
Eimsvali	9,4	
Varahlutir	8,4	
Flutningur og uppsetning		13,1
2) Kælikerfi f. þjöppu- og rafalahverfla		
Kæliturn	8,2	
Kælivatnsdælur og lagnir	10,0	
Varahlutir	1,8	
Flutningur og uppsetning		5,5
3) Raf- og stjórnþúnaður f. 1) og 2)	15,2	9,8
4) Hverfilrafalasangstæða 1,0 MW		
Samstæða	5,8	
Varahlutir	0,9	
Flutningur og uppsetning		1,2
Rafþúnaður	2,0	1,3
5) Stöðvarhús f. 1) - 4)		
Stöðvarhús		8,7
Vélaundirstöður		4,9
Kæliturnaprær		3,3
6) Ýmislegt, verkstaði, geymslur, starfsmannahús, vegir		10,0
Samtals verktakakostnaður	117,9	57,8

STOFNKOSTNAÐURGUFUÞJÖPPUSTÖÐVARAFKÖST 25 kg/s, 20 bar abs.

VGK 1983

	INNFLUTT (MKr)	INNLENT (MKr)
1) Hverfilþjöppusamstæða 7,4 MW		
Hverfill	18,8	
Þjappa	16,6	
Eimsvali	5,7	
Varahlutir	5,3	
Flutningur og uppsetning		8,2
2) Kælikerfi f. þjöppu- og rafalahverfla		
Kæliturn	4,5	
Kælivatnsdælur og lagnir	7,0	
Varahlutir	1,2	
Flutningur og uppsetning		3,5
3) Raf- og stjórnþúnaður f. 1) og 2)	11,5	7,5
4) Hverfilrafalasangstæða 0,6 MW		
Samstæða	4,2	
Varahlutir	0,6	
Flutningur og uppsetning		0,8
Rafþúnaður	1,6	1,0
5) Stöðvarhús f. 1) - 4)		
Stöðvarhús		5,3
Vélaundirstöður		2,9
Kæliturnaprær		1,8
6) Ýmislegt, verkstæði, geymslur, starfsmannahús, vegir		8,0
Samtals verktakakostnaður	77,0	39,0