



ORKUSTOFNUN  
Vatnsorkudeild

**VLf-MÆLINGAR  
OG ÚRVINNSLUAÐFERÐIR**

Þorsteinn Egilsson

OS-83038/VOD-19 B

maí 1983



**ORKUSTOFNUN**  
GRENSÁSVEGI 9, 108 REYKJAVÍK

**VLf-MÆLINGAR  
OG ÚRVINNSLUAÐFERÐIR**

Þorsteinn Egilsson

OS-83038/VOD-19 B

maí 1983



EFNISYFIRLIT

INNGANGUR	4
1. KAFLI: Rafsegulfræði í sambandi við VLF-mælingar	5
1.1 Útbreiðsla rafsegulsviðs	5
1.2 Rafsegulsvið langt frá VLF-loftneti	7
1.3 Spanstraumur í leiðandi hlutum vegna VLF-sviðana	10
1.4 Segulsvið utan um leiðandi hlut. VLF-mælinga	12
2. KAFLI: Framkvæmd VLF-mælinga	16
3. KAFLI: Úrvinnsla VLF-mælinga	20
3.1 Teiknun mæliferla	20
3.2 Kortlagning VLF-fyrirbrigða	21
3.3 Túlkun einstaks ferils út frá hallanum og hringvikinu	26
3.4 Bylgjugreining VLF-ferlanna	32
NIÐURLAG	44
VIÐAUKI 1: VLF-stefnar að Íslandi	
VIÐAUKI 2: Forrit til úrvinnslu VLF-mælinga	

## INNGANGUR

Skilagreinin þessi er að nokkru leyti afrakstur sumarvinnu minnar hjá OS-VOD 1982 þar sem verkefnið var úrvinnsla á og að einhverjum hluta byrjunarverk í úrvinnslu VLF- mælinga hérlendis. Aðallega var reynt að beita aðferðum sem hafa reynst vel annarsstaðar en þó er ólíku saman að jafna þar sem VLF- tæknin er hérlendis notuð til þess að leita að vatnsleiðandi sprungum eða brotabeltum en erlendis er hún mest notuð við málmsteinaleit sem gefa mun meiri svörun. Beinn samanburður er því hæpinn.

Skilagreinin er gróf samantekt á stöðu VLF- mælinga þegar hún er skrifuð og til þess ætluð að vera uppsláttarrit þeirra sem vilja nota VLF- mælingar, gefa þeim hugmyndir um notagildi við væntanlegar rannsóknir og út frá þeirri úrvinnslutækni sem fyrir hendi er hvort búast megi við einhverjum upplýsingum frá VLF- mælingum eða ekki.

Einnig hlýtur hún að vera til þess að auðvelda þeim sem koma til með að vinna úr VLF- mælingum að setja sig inn í málið og það hvað gert hefur verið, þannig að vinnan sem hefur verið lögð í þetta verkefni nýtist eins og kostur er. Það ætti síðan að ýta undir frekari rannsóknir á VLF- mælingum, bættar úrvinnsluaðferðir og auknar framfarir á þessu sviði.

Greinin skiptist í tvo meginhluta:

1. Stiklað á stóru í þeirri rafsegulfræði sem liggur til grundvallar VLF- mælingum. Þetta er nauðsynleg undirstaða þeim sem vilja öðlast skilning á mælingunum.
2. Úrvinnsluaðferðir sem beitt hefur verið til túlkunar á VLF- mælingum hjá OS. Allflestir sem eitthvað þekkja til tölvuvinnslu ættu að geta notfært sér þennan þátt en sem næst öll úrvinnsla mælinganna er tölvukeyrð.

Við gerð forrita til úrvinnslu á mælingunum naut ég góðrar aðstoðar þýsks stúdents í jarðeðlisfræði, Ulrich Schraders. Hann sá að mestu um forritagerðina og kann ég honum bestu þakki fyrir. Einnig vil ég þakka Leó Kristjánssyni og Davíð Egilson fyrir ábendingar þeirra.

## 1.KAFLI

Rafsegulfræði í sambandi við VLF- mælingar

## 1.1 Útbreiðsla rafsegulsviðs

Við VLF- mælingar (Very Low Frequency) er notast við rafsegulsvið frá kafbátastöðvum víðs vegar um heiminn. Senditíðni þeirra er á bilinu 15 - 25kHz. Útbreiðsla rafsegulsviðs lýtur s.k. Maxwell- jöfnum í rafsegulfræði:

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla \cdot E &= \rho / \epsilon \\ \nabla \cdot H &= 0\end{aligned}\tag{1.1.1}$$

þar sem  $E$  er rafsviðið,  $H$  er segulsviðið,  $J$  er straupþéttleikinn,  $\epsilon$  er rafstuðull,  $\rho$  er hleðsluþéttleiki og  $\mu$  er segulstuðull. Megininntak þessara jafna er að breyting segulsviðs veldur rafsviði, straumur hefur umhverfis sig segulsvið og breyting rafsviðs veldur segulsviði. Heildarsegulflæði út úr lokuðum fleti er ekkert og heildarrafflæði um lokaðan flöt er í réttu hlutfalli við hleðsluna innan hans. Lögmál Ohms er skrifað sem

$$J = \sigma E, \quad \sigma = \text{eðlisleiðni}\tag{1.1.2}$$

og út frá því ásamt Maxwelljöfnum fást bylgjuútbreiðslujöfnur rafsegulsviðsins

$$\nabla^2 \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} = \left( \mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix}\tag{1.1.3}$$

Þetta eru þær bylgjujöfnur rafsegulfræðinnar sem notaðar eru í jarðeðlisfræði. Ef horntíðni sviðsins er  $\omega$  og  $r=(x,y,z)$  er stöðuvektor þá má skrifa lausnina á (1.1.3) sem

$$\begin{Bmatrix} E(r,t) \\ H(r,t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_0(r) \\ H_0(r) \end{Bmatrix} e^{i\omega t}\tag{1.1.4}$$

Staðan í (1.1.3) verður þá

$$\nabla^2 \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} = (\omega\sigma\mu i \div \mu\epsilon\omega^2) \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix}, \quad i = \sqrt{-1} \quad (1.1.5)$$

Í jarðeðlisfræði gildir almennt um segulstuðulinn  $\mu$  að hann er u.p.b. jafn segulstuðli lofts,  $\mu_0$ . Rafstuðullinn fer ekki mikið upp fyrir  $\epsilon = 10\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0$  er rafstuðull lofts, og í illa leiðandi bergi er eðlisleiðnin  $\sigma \approx 10^{-3}$  mho. Í VLF-tilvikum er senditíðnin yfirleitt undir 20kHz þannig að  $\omega\mu\sigma \approx 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2}$  og  $\mu\epsilon\omega^2 \approx 1.9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ . Þess vegna má sleppa síðasta liðnum í (1.1.5) þannig að

$$\begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} \approx i\omega\mu\sigma \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} \quad (1.1.6)$$

Sveiflustefna rafsegulbylgna er þvert á útbreiðslustefnu þeirra svo að bylgja sem ferðast í stefnu  $x$  er póluð í  $yz$ -planinu, planpóluð bylgja. Í sambandi við VLF-mælingar skiptir útslag sviðsins í  $z$ -stefnu (niður) mestu máli. Bylgja á forminu

$$e^{i\omega t + \beta z}$$

er lausn á (1.1.6) sem tekur til útslags hennar í stefnu  $z$ . Af því leiðir að

$$\begin{aligned} \beta^2 &= i\omega\mu\sigma \\ \Rightarrow \beta &= \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} (1+i) \end{aligned} \quad (1.1.7)$$

Lausnin á (1.1.6) verður þá

$$\begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - \alpha z) - \alpha z}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (1.1.8)$$

Úr jöfnu (1.1.8) fást lykilupplýsingar um hegðun bylgjunnar og þar með notagildi hennar í jarðeðlisfræði. Þátturinn  $e^{-\alpha z}$  er dempunarliður þannig að stefna verður að því að lágmarka stærðina  $\alpha$  eins og hægt er. Einn liður í því er að minnka tíðnina eins og unnt er. Það er reynt með VLF-sendistöðvum. Annar mikilvægur þáttur varðandi dempunina er leiðni efnisins sem bylgjan fer um. Á (1.1.8) sést að vaxandi leiðni (læggra eðlisviðnám) þýðir aukna deyfingu bylgjunnar. Eins og áður sagði er VLF-rafsegulsviðið frá kafbátastöðvum sem þurfa að koma

skilaboðum langar leiðir. Við slíkar aðstæður verkar lagið á milli yfirborðs jarðar og jónahvolfsins sem bylgjustokkur (waveguide). Afskurðartíðni (cut-off frequency) þess er á bilinu 1.5 - 4.0kHz, þ.e. þetta lag leiðir rafsegulbylgjur ekki ef þær hafa lægri tíðni. Af þessum orsökum er tíðnibilið 10 - 30kHz það lægsta sem nothæft er.

Hugtakið skyndýpi (skin depth) merkir þá vegalengd sem bylgja kemst í efni á sama tíma og útslag hennar minnkar niður í  $1/e$  af upprunalegu útslagi. Skyndýpi bylgjunnar í (1.1.8) er

$$\delta = 1/\alpha = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Vegna þess að  $\omega = 2\pi f$  og  $\rho = 1/\sigma$  er eðlisviðnámið þá verður skyndýpið

$$\delta = 503 \sqrt{\rho/f} \quad (1.1.9)$$

$\delta$  fæst í m ef  $\rho$  er í ohmm og  $f$  er í Hz. Einnig sést á (1.1.8) að fasaseinkun bylgjunnar er  $\alpha z$  radianar á dýpi  $z$ .

## 1.2 Rafsegulsvið langt frá VLF- loftneti

VLF- loftnet er lóðréttur vír með nokkur þúsund ampera straumi og virkar þess vegna eins og raftvípóll. Til þess að reikna sviðið frá VLF- loftneti í fjarlægð  $r$  frá því er einfaldst að að nota vektorsegulumætti  $A$  sem er þannig að

$$\nabla \times A = \mu H \quad (1.2.1)$$

Með því að nota jöfnur (1.1.1)

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{og} \quad \nabla \times H = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

fæst hlutaafleiðujafna fyrir  $A$

$$\nabla^2 A = \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad (1.2.2)$$

Vektorsegulumættið er háð tíma á sama hátt og  $E$  og  $H$  þannig að



$$\mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \sim \mu\sigma\omega A \quad \text{og} \quad \mu\epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \sim \mu\epsilon\omega^2 A.$$

Með sömu rökum og notuð eru við (1.1.5) má sleppa síðasta liðnum í (1.2.2), hún verður

$$\nabla^2 A = \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1.2.3)$$

Af jöfnum (1.1.1) og (1.2.1) fæst að

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -E = -J/\sigma \quad (1.2.4)$$

(1.2.3) verður því

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (1.2.5)$$

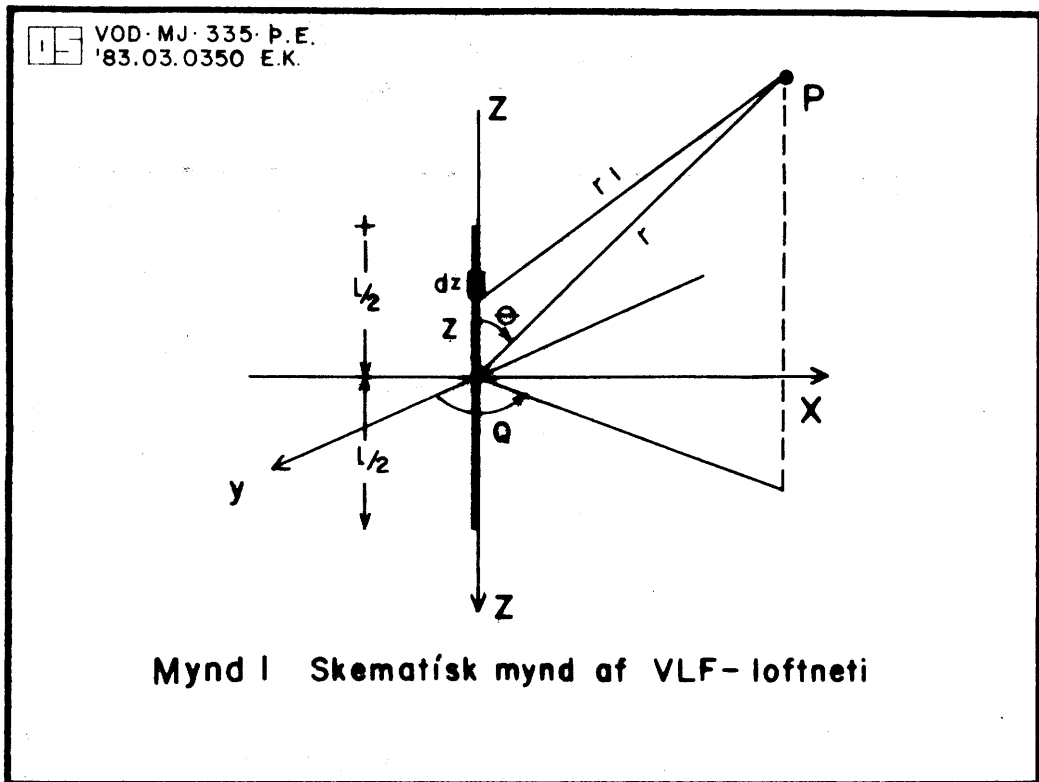
Fáguð lausn (analytical solution) þessarar líkingar er

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{J dV}{r'} \quad (1.2.6)$$

þar sem  $J$  er straupéttleikinn í rúmmálinu  $dV$  og  $r'$  er fjarlægðin í athugunarpunkt. Á mynd 1 er sýndur skemi af uppsetningu VLF-loftnets ásamt stærðum sem koma við tegrinu í (1.2.6). Segulmættið í (1.2.6) reiknast þá í punktinum  $P$  á mynd 1. Með  $\theta=90$ ,  $\phi=90$  og  $P$  mjög langt frá loftnetinu er

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{J \cdot V}{r} e_z = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I l}{x} e_z \quad (1.2.7)$$

$I$  er straumurinn í loftnetinu,  $l$  er lengd þess,  $x$  er fjarlægðin frá loftnetinu (útbreiðsla í  $x$ -stefnu) og  $e_z$  er einingarvektor í  $z$ -stefnu.



Stefna segulmættisins er þess vegna niður, mynd 1. Í (1.2.7) hefur áhrifum fasaseinkunar á beinu bylgjunni í P vegna vegalengdar verið sleppt, enda er útslagið þá orðið svo lítið þegar hennar fer að gæta. Stefna H sviðsins fæst nú skv. (1.2.1)

$$H = \frac{\nabla \times A}{\mu} = H_0 e_y = H_y \quad (1.2.8)$$

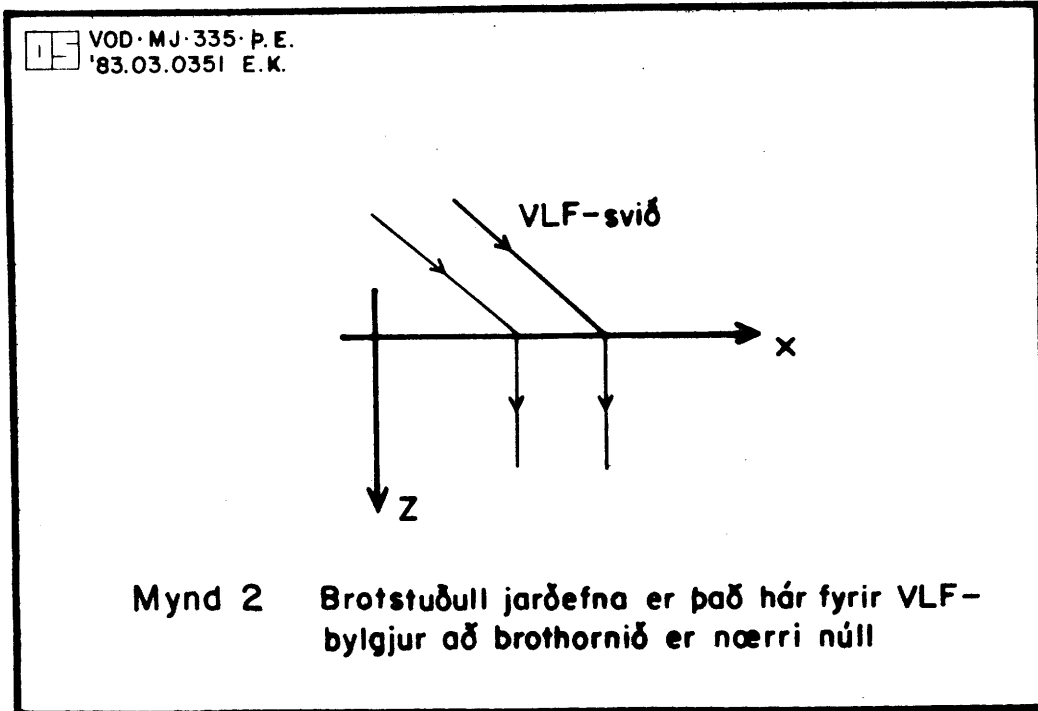
þar sem  $e_y$  er einingarvektor í stefnu  $y$ . Rafsviðið á sama stað er

$$E = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \mu H x e_x = E_0 e_z = E_z \quad (1.2.9)$$

Af jöfnum (1.2.8) og (1.2.9) sést að VLF-bylgjan sem kemur beint frá loftnetinu hefur einungis tvo sveiflupætti, segulsviðið sem sveiflast lárétt og rafsviðið sem sveiflast lóðrétt.

Eins og sjá má af (1.2.7) þá dofna sviðið skarpt með aukinni fjarlægð frá loftnetinu þannig að orka beinu bylgjunnar kemur að litlum notum við VLF-mælingar langt frá því. Sem næst öll orkan kemur úr endurköstuðu bylgjunni (sky wave). Sveiflustefna H vektorsins verður áfram lárétt en E vektorinn fær komponent í  $x$ -stenum líka. Brotstuðull

jarðefna er mjög hár fyrir rafsegulbylgjur á tíðnisviði VLF- bylgna svo að bylgjur sem lenda á yfirborði jarðar fara sem næst lóðrétt niður í það, sjá mynd 2.



### 1.3 Spanstraumar í leiðandi hlutum vegna VLF- sviðsins

Til þess að reikna spanstrauma vegna tímaháðs segulsviðs er jafna (1.1.1) notuð

$$\sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times E \quad (1.3.1)$$

Og þar sem  $\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \sim \epsilon \omega E$  og  $\omega \epsilon \ll \sigma$  í tilvikum VLF- mælinga verður líkingin

$$\sigma E = J = \nabla \times H \quad (1.3.2)$$

Sveiflustefna segulþáttarins er y-stefnan og útbreiðslan er núna í z-stefnu. Jafna (1.1.8) gefur þá með  $H = H_y$  að

$$H = H_0 e^{i(\omega t - \alpha z)} e_y, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (1.3.3)$$

$e_y$  er einingarvektor í stefnu y og  $H_0$  er sveifluvið sviðsins við yfirborð. Af líkingum (1.3.2) og (1.3.3) leiðir nú að

$$J = J_x = H_0 e^{i(\omega t - \alpha z) + \alpha z} (\alpha + i\sigma) e_x$$

⇒

$$J = \sqrt{2} \alpha H_0 e^{i(\omega t + \alpha z + \pi/4) + \alpha z} e_x$$

eða

$$J = \sqrt{\omega \mu \sigma} H_0 e^{i \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} z} \cdot \cos(\omega t + \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} z + \pi/4) \quad (1.3.4)$$

Ef borin eru saman útslög segulsviðsins og straupéttleikans fæst

$$H_{y,max} = H_0 e^{+\alpha z} \quad (1.3.5)$$

og

$$J_{x,max} = \sqrt{\omega \mu \sigma} H_0 e^{+\alpha z}$$

Þar af leiðir að

$$J_{x,max} = \sqrt{\omega \mu \sigma} H_{y,max}$$

Líkingarnar (1.3.3) og (1.3.6) gefa eftirfarandi niðurstöður varðandi VLF-mælingar. Ath. vel að sendistöðin er í stefnu x-ássins.

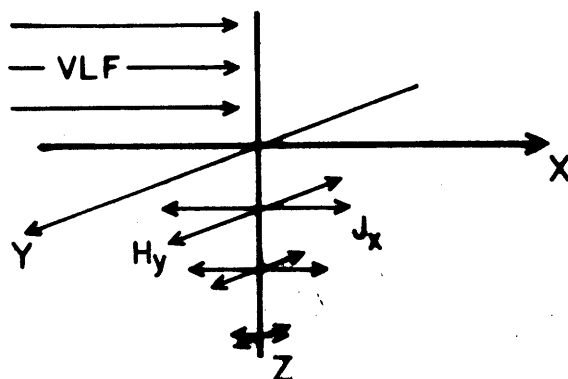
1. Bylgjan fer um illa leiðandi efni,  $\sqrt{\omega \mu \sigma}$  lítil stærð. Rafsegulsviðið ferðast um efnið án mikillar deyfingar (1.3.5) en myndar um leið litla spanstrauma vegna (1.3.6). Því fæst mjög lítið spansvið (secondary magnetic field).

2. Bylgjan fer um vel leiðandi efni,  $\sqrt{\omega \mu \sigma}$  er stór tala. Mikil deyfing verður á rafsegulsviðinu í stefnu z en sterkur spanstraumur myndast í efninu í stefnu x. Hann verður mestur ofan til en dofna fljótt með dýpi, sbr. jöfnu (1.3.6). Spansviðið verður hér sterkt.

3. Afstaða sendistefnu VLF-sviðsins til legustefnu leiðarans skiptir megin máli og verður leiðarinn að liggja sem mest samsíða VLF-sendistefnunni vegna þess að bylgjan spanar rafstrauminn í x-stefna. Þetta er útskýrt á mynd 3.



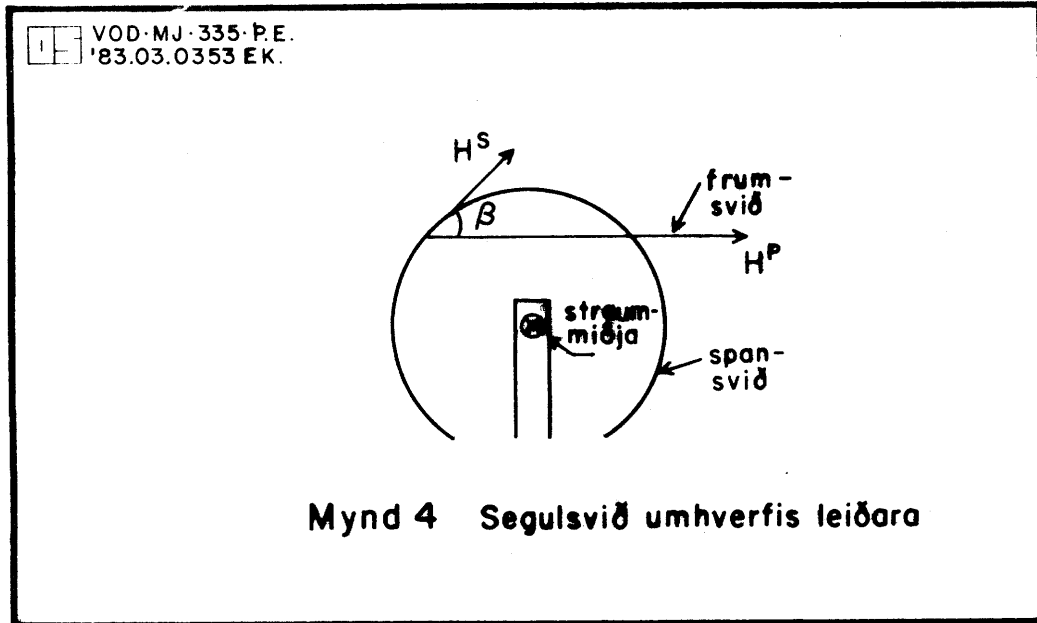
VOD·MJ·335·P·E.  
83.03.0352·E.K.



Mynd 3 VLF-sviðið ferðast samsíða x-ásnum. Segulsviðið sveiflast samsíða y-ásnum en deyfist eftir því sem neðar dregur. Straumurinn spanast samsíða x og er mestur við yfirborð leiðarans sem hann spanast í

#### 1.4 Segulsvið utan um leiðandi hlut. VLF-mælingar.

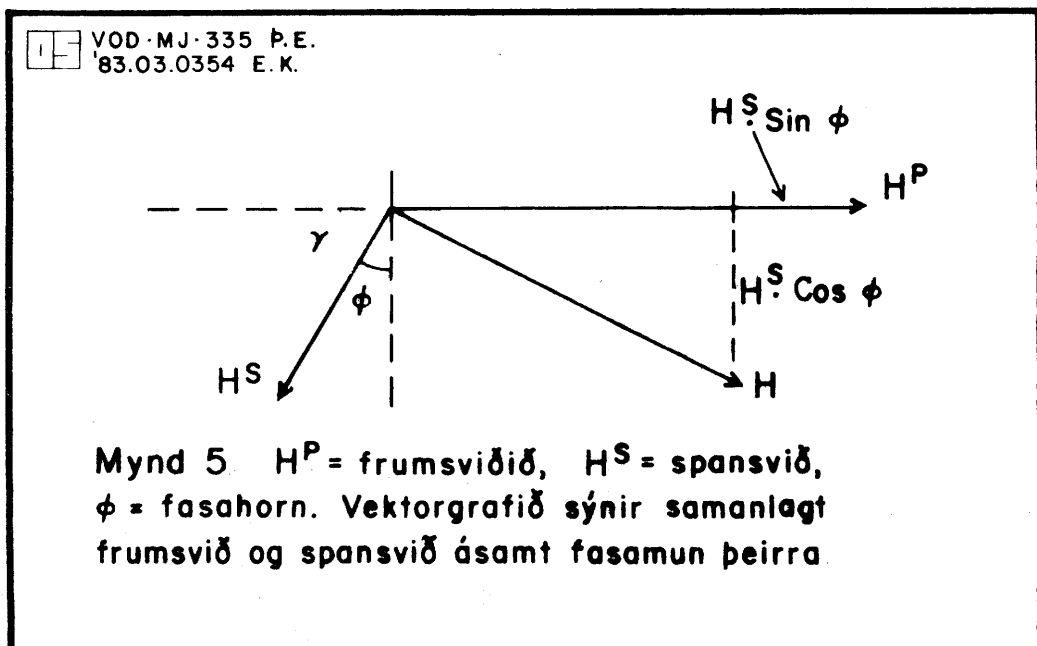
Rafstraumur sem spanast í leiðandi hlutum hefur umhverfis sig segulsvið (secondary magnetic field). Segulsviðið á hverjum stað í nánd við leiðara er þess vegna vektorsamlagning frumsviðsins (primary field) og spansviðsins, sjá mynd 4. Þegar segulsvið með horntíðni  $\omega$  verkar á rafrás verður spennan í rásinni 90 á eftir sviðinu. Síðan ef viðnám hennar er R og sjálfspansfastinn er L

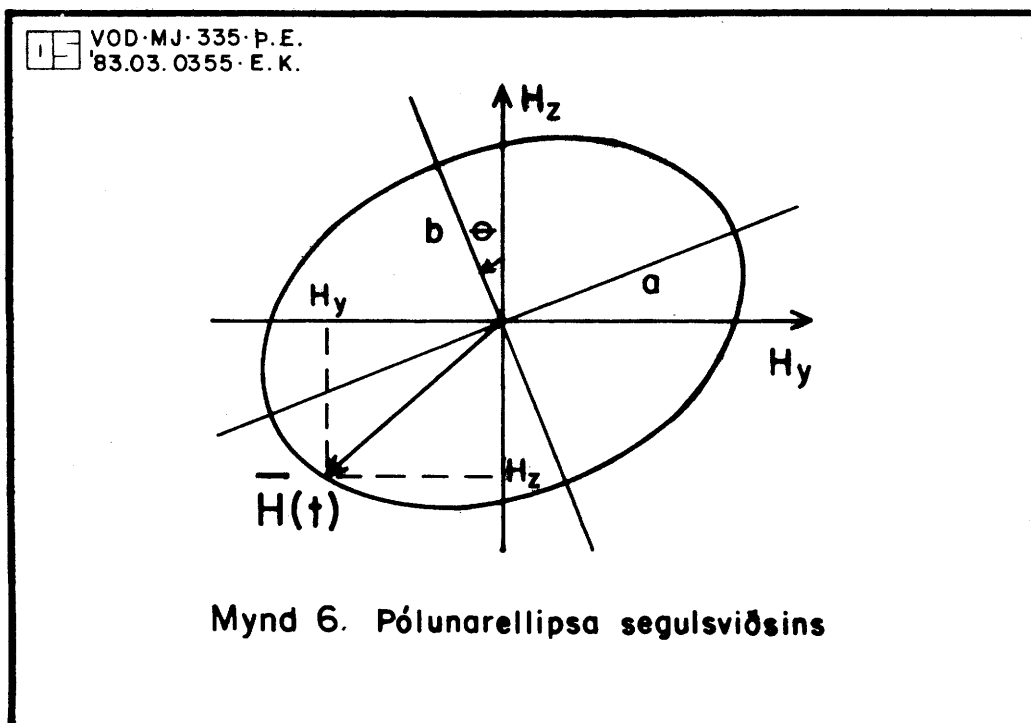


Þá verður fasvikið milli frum- og spansviðsins  $90 + \phi$  þar sem

$$\phi = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

Þegar  $R \rightarrow \infty$  þá er  $\phi = 0^\circ$  sem svarar til illa leiðandi efnis. Spansviðið er þá  $90$  úr fasa við frumsviðið. Ef hins vegar  $R \rightarrow 0$  þá er  $\phi = 90^\circ$  en það svarar til vel leiðandi hluta. Eins og sést á mynd 5 er sá hluti spansviðsins sem er úr fasa við frumsviðið  $H^S \cdot \cos \phi$ , (out-of-phase component, quadrature component). Þátturinn sem er í fasa við frumsviðið er  $H^S \cdot \sin \phi$ , (in-phase component).





Vegna þess að spansviðið hefur lóðréttan þátt,  $H_z = H^S \cdot \sin\beta$ , myndar segulsviðsvektorinn ellipsu í  $H_y$   $H_z$ -plani, sjá mynd 6. Pólunarellipsan hefur bæði halla langáss frá láréttu (tilt angle) og hringvik (eccentricity) sem er hlutfallið á milli skammáss og langáss hennar. Ef  $H^P \gg H^S$  þá reiknast halli langássins

$$\theta \approx \frac{H^S \cdot \sin\beta \cdot \sin\phi}{H^P} \quad (1.4.1)$$

og hringvikið er

$$e \approx \frac{H^S \cdot \sin\beta \cdot \cos\phi}{H^P} \quad (1.4.2)$$

Vegna þess að  $H_z = H^S \cdot \sin\beta$  þá verða (1.4.1) og (1.4.2)

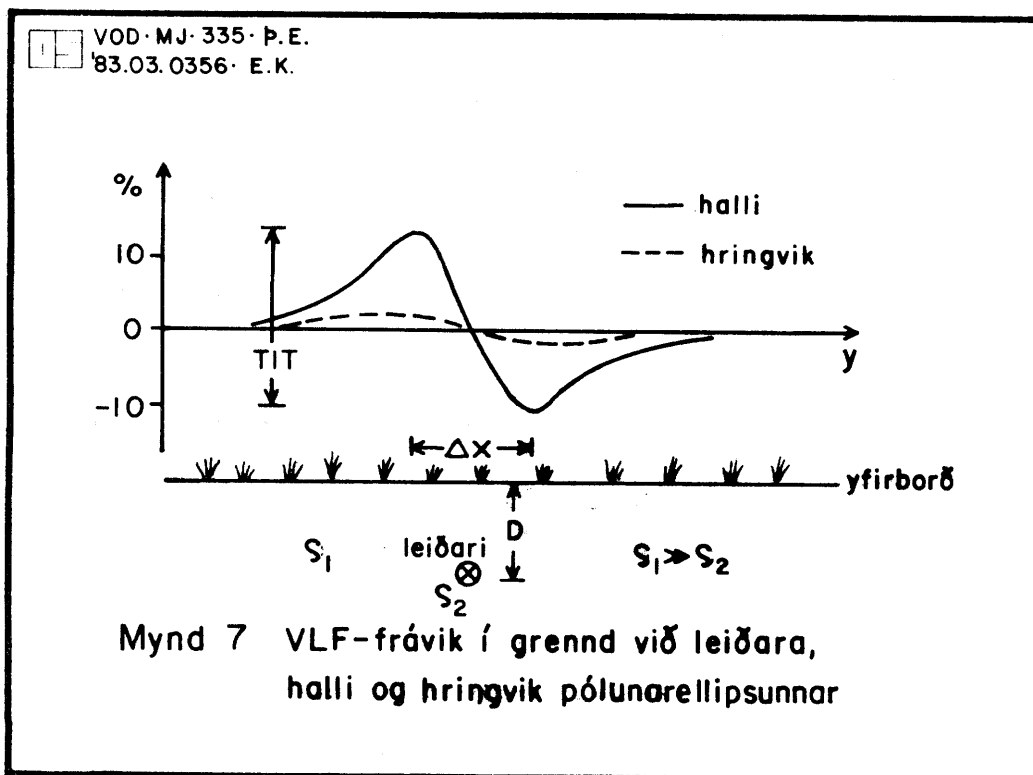
$$\theta \approx \frac{H_z \cdot \sin\phi}{H^P} \quad (1.4.3)$$

$$e \approx \frac{H_z \cdot \cos\phi}{H^P}$$

Á jöfnum (1.4.3) sést að hallinn á pólunarellipsunni í hverjum mælipunkti er lóðrétti þáttur spansviðsins, sem er samfasa frumsviðinu, sem hlutfall af frumsviðinu. Hringvikið mælir hins vegar lóðréttan þátt spansviðsins, sem er mótfasa frumsviðinu, sem hlutfall af frumsviðinu.

Mælitækið EM-16 sem er notað til VLF- mælinganna er þannig byggt að það mælir hallann og hringvikið á ellipsunni og gefur það upp í  $\%$ -um, sjá annars bækling með notkunarleiðbeiningum og fylgir tækinu (EM-16, Operational Manual, Geonics Ltd.). Þar sem spansviðið er alltaf háð lögun leiðarans skal litið á spansvið nokkurra nytsamra líkana til þess að athuga grundvallartúlkun VLF- mælinga.

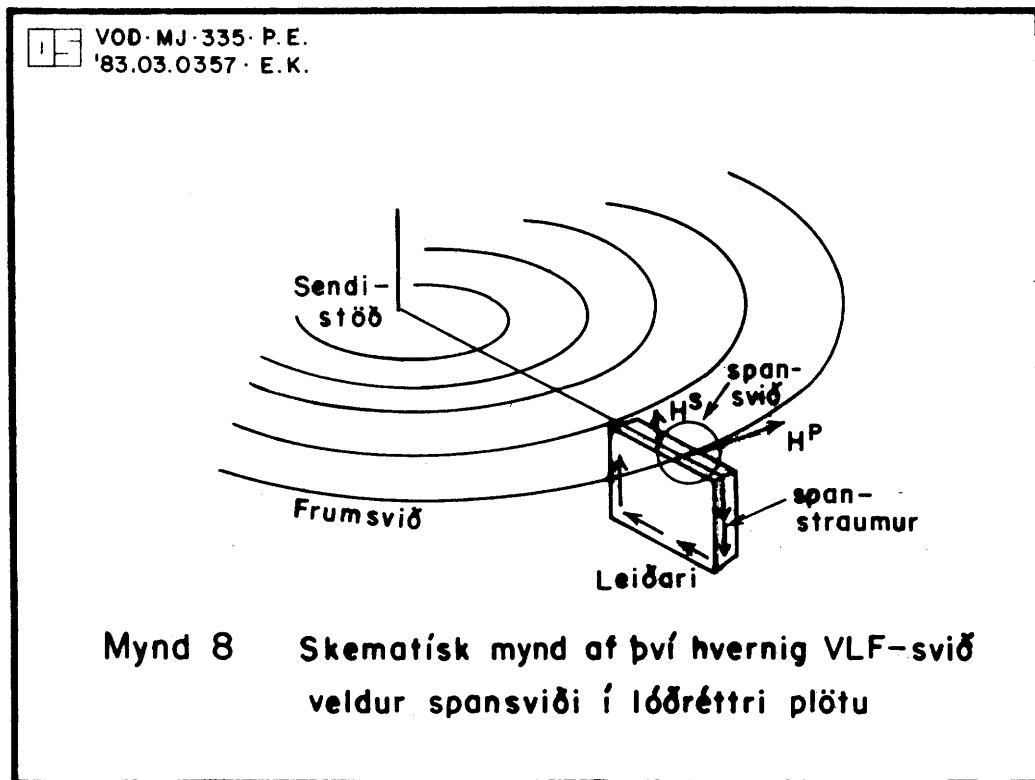
a) Beinn og langur vír, sjá mynd 7. Myndin sýnir VLF- spansvið frá beinum, löngum og góðum leiðara. Eins og sést þá kemur fram mjög skarpur toppur í nánd við leiðarann. Ef vírinn



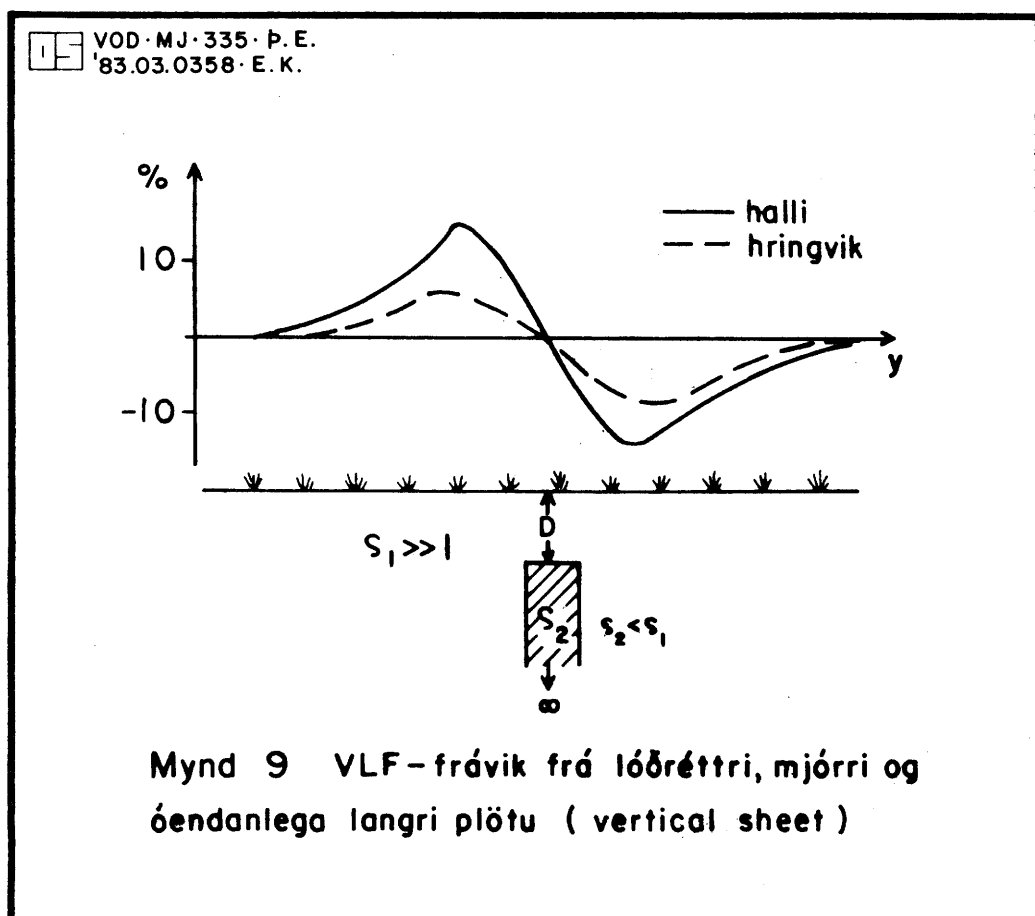
er færður ofar þá minnkar vegalengdin  $x$  en TIT (topp í topp) gildið stækkar. Hið gagnstæða skeður ef vírinn er færður neðar.

b) Lóðrétt plata (vertical sheet). Þetta er vinsælasta fyrirbærið til þess að finna með VLF- mælingum. Hún mælist afar líkt beina vírnum ef neðri jaðar hennar nær niður fyrir dýptarskynjun bylgna vegna þess að þá skynjar VLF- mælingin aðeins straum í aðra áttina. Þetta er útskýrt á mynd 8.





Á mynd 9 er sýnd VLF- mæling yfir lóðréttri, mjórri og "óendanlega" langri plötu í því sem næst óleiðandi umhverfi.



Sjálf er hún lélegur leiðari. Hér er hringvikið mun herra hlutfall af hallanum en t.d. er sýnt á mynd 7. Þetta stafar af því að í lélegum leiðurum (stórt viðnám) eykst hlutur sviðsins sem er úr fasa við upphaflega sviðið.

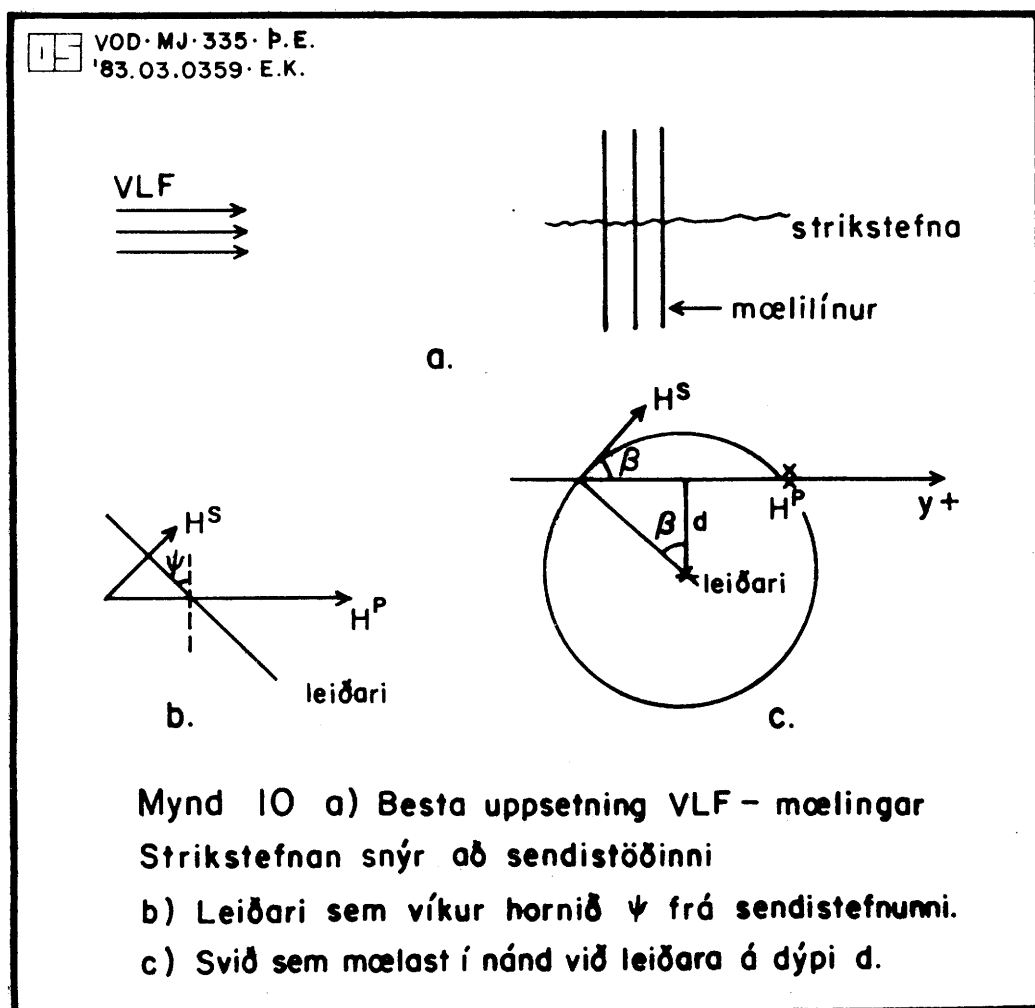
Ef VLF- sviðið nær niður fyrir hinn leiðandi hlut dregur það úr styrk spansviðsins á yfirborði vegna þess að spansviðið sem stafar frá rafstraumi í neðri jaðri hans hefur gagnstæða stefnu við það sem gerist í efri hlutanum, sjá mynd 8.

Frumskilyrði þess að VLF- frávik mælist er að bergið hafi skörp skil í eðlisleiðni. Helsta notagildi VLF- halla- og hringviksmælinga er við leit að lóðréttum, löngum og mjóum jarðfræðilegum fyrirbærum sem hafa eðlisleiðni frábrugðna þeirri sem grannbergið hefur. Í VLF- mælingum verður líka alltaf að hafa í huga jöfnu (1.1.9) sem ákvarðar skyndýpi rafsegulbylgna.

## 2.KAFLI

Frankvæmd VLF- mælinga

Til þess að VLF- mælingar geti borið góðan árangur þurfa þær að vera skipulega gerðar. Best er að setja upp mælinet þannig að 20 - 50m séu á milli mæli lína, en á milli mælipunkta eftir mæli línunum séu 5 - 15m eftir atvikum hverju sinni. Þegar verið er að skoða svæði m.t.t. meintrar brotastefnu verður að velja VLF- stefnuna (þ.e. stefnu í VLF- sendistöð) sem næst samsíða henni vegna þess að rafstraumurinn spanast samsíða útbreiðslustefnu VLF- sviðsins. Þetta er bein afleiðing af jöfnu (1.3.4). Einnig er mikilvægt að mæli línurnar standi hornrétt á VLF- sendistefnuna þar sem hún er mun betur þekkt heldur en legustefnur neðanjarðarleiddara en útreikningarnir hér á undan gera ráð fyrir að frumsviðið,  $H^P$ , og spansviðið,  $H^S$ , liggi í sama lóðrétta planinu. Á mynd 10a er sýnd ákjósanlegasta uppsetning VLF- mælingar.



Það er þó sjaldnast að völ er á uppsetningu eins og sýnd er á mynd 10a svo aðeins þarf að athuga hvaða áhrif það hefur að leiðarinn vîkur hornið  $\psi$  frá sendistefnunni, mynd 10b. Jöfnur (1.4.3) haldast óbreyttar en þetta hefur töluverð áhrif á hornið  $\beta$ . Á mynd 10c sést að  $\beta$  reiknast sem

$$\beta = \arctan \frac{y}{d} \quad (2.1.1)$$

Ef sendistefnan (og þar með mællífnan) myndar hornið  $\psi$  við leiðarann þá verður lárétta vegalengdin  $y \cdot \cos \psi$  í stað  $y$ , þannig að

$$\beta = \arctan \frac{y \cdot \cos \psi}{d} \quad (2.1.2)$$

Áhrif  $\psi$  á hallann og hringvikið eru þess vegna ljós út frá jöfnum (1.4.1) og (1.4.2).  $\psi$  minnkar hornið  $\beta$  svo að stærðirnar  $\theta$  og  $e$  minnka. Einnig verður  $\Delta x$  (mynd 7) stærra en áður um faktor  $1/\cos \psi$ , ef  $\Delta x$  er mælt eftir mællífnunni. Þetta tvennt gerir það að verkum að mæliferlarnir verða ekki eins skarpir og ella. Afar óæskilegt er að  $\psi$  verði stærra en  $30 - 35^\circ$ .

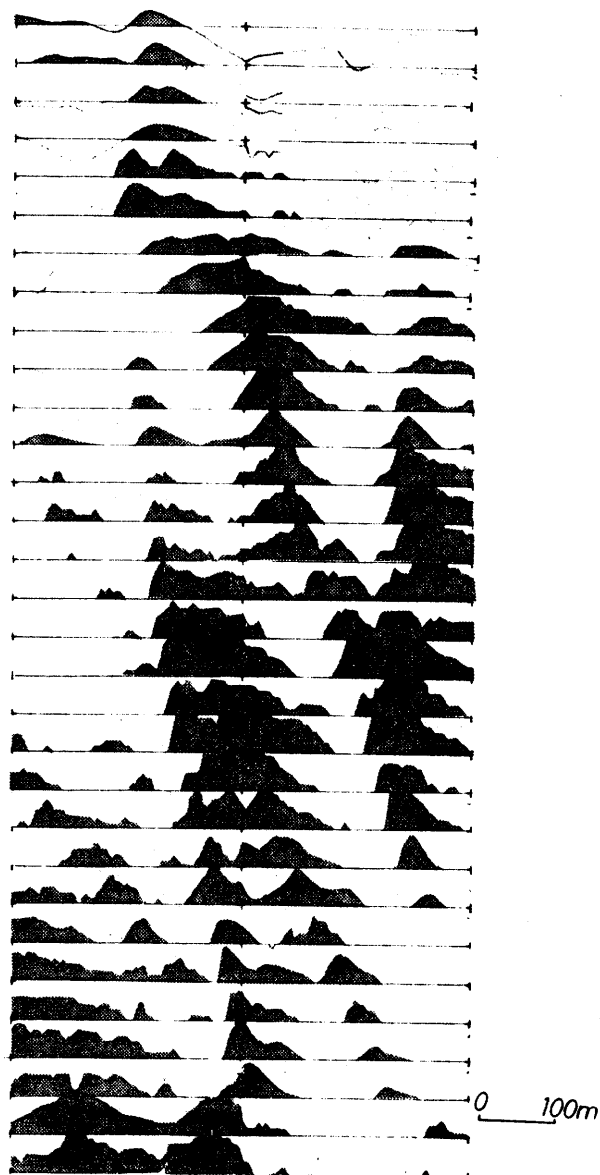
Í viðauka 1 er tafla yfir helstu VLF- sendistöðvar sem eru heppilegar sem sviðgjafar við VLF- mælingar á Íslandi. Einnig er þar mynd sem sýnir stefnuna að þessum stöðvum. Eins og sjá má af jöfnu (2.1.2) þá verður að velja VLF- sendistöð eftir meintri stefnu leiðara sem leitað er að.

## 3.KAFLI

Úrvinnsla VLF-mælinga

## 3.1 Teiknun mæliferla

Auðveldasta túlkunaraðferðin er að teikna mælingarnar sem línurit beint upp á kort af mælinetinu og athuga hvort samræmi er á milli mæliferla. Mjög gott er að dekkja svæðin undir toppunum þannig að greinilegur munur verði á + og - hlutanum. Með þessu móti er oft unnt að sjá hvort eitthvað merkilegt leynist í gögnunum. Þessi aðferð gefur legustefnur þeirra fyrirbæra sem valda spansviði og út frá lögun ferlanna má eitthvað ráða um halla þeirra. Þetta er nauðsynleg frumúrvinnsla. Á OS hefur verið skrifað forrit sem sér um þennan þátt úrvinnslunnar og býður það upp á nokkra möguleika við teiknunina. Mikilvægur valþáttur í forritinu er að slétta má ferlana þannig að skörpustu sveiflur þeirra, þ.e. hátfónisuð, eru jafnaðar út með aðferð minnstu kvaðrata (least squares). Brúunin á milli mælipunktanna er gerð með "spline"-brúunarþríliðu. Forritið er sýnt í viðauka 2 ásamt notkunarleiðbeiningum fyrir þau undirforrit sem reikna brúunina. Hægt er að fá teiknað hvort sem er hallann eða hringvikið. Á mynd 11 er sýnt dæmi um þessa úrvinnslu.



Mynd 15 Mæliferlarnir teiknaðir á kort af mælinetinu. + og - hlutar eru skyggðir mismunandi til að samsvörun á milli mæliferla komi betur fram.

### 3.2 Kortlagning VLF- fyrirbrigða

VLF- gögn, eins og þau koma beint úr mælingunni, eru oftast yfirfull af hátíðnisuði sem stafar af hárrí tífni VLF- rafsegulsviðsins (ath. að VLF- nafnið er til komið vegna þess að tífni bylgna er mjög lág miðað við tífni útvarpsbylgna). Þess vegna er ógerlegt að kortleggja VLF- fyrirbæri án nokkurrar síunar á gögnunum. Í desemberhefti af GEOPHYSICS 1969 lýsir D.C.Fraser einfaldri og mjög hentugri síunartækni til þess að fjarlægja hátíðnisuð og meðalgildi úr gögnunum auk þess sem langar sveiflur eru stórlega skertar þannig að staðbundin fyrirbæri komi fram. Síunin er gerð í tveimur skrefum

a) Diffrun.

Hún fjarlægir meðalgildið auk þess sem hún hliðrar gögnunum um  $90^\circ$  en það hefur í för með sér að þar sem halli ferilsins er mestur (beint yfir leiðaranum) fást þósitfir toppar en staðbundin háþörk og lágmörk færast í núllgildið. Með þessu móti má fá fram skýra staðsetningu fyrirbærisins. Sjá mynd 12.

b) Hátíðnisfa (Low pass).

Hún deyfir hátíðnisuðið. Sléttunarvirki er notaður til þess að mæta þessu skilyrði (smoothing operator). Ef  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  og  $P_4$  eru samliggjandi mælipunktur þá er sfunin þannig:

$$P_2 \div P_1 \quad \text{er diffurvirki}$$

og

$$0.25(P_2 \div P_1) + 0.50(P_3 \div P_2) + 0.25(P_4 \div P_3)$$

er einnig sléttunarvirki.

Út kemur sfunin

$$S_{2,3} = 0.25 \{ (P_3 + P_4) \div (P_1 + P_2) \}$$

Sleppum fastanum þannig að

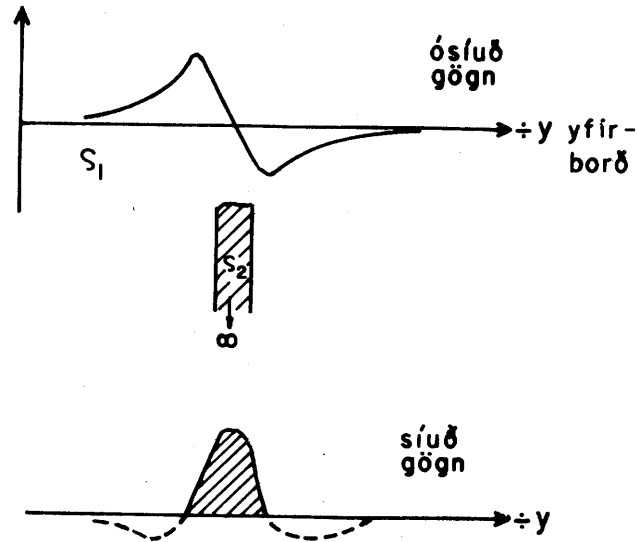
síða gildið er:

$$S_{2,3} = (P_3 + P_4) \div (P_1 + P_2)$$

sem er staðsett á kortinu mitt á milli P og P .

Á mynd 13 er sýnt hvernig auðvelt er að reikna þessa sfun með sem næst hugarreikningi.

VOD·MJ·335·P.E.  
'83.03.0360·E.K.



Mynd 12 Sýnir helstu áhrif síunar með aðferð F.C. Frasers

VOD·MJ·335·P.E.  
'83.03.0361·E.K.

SANDAFELL  
Svæði 2  
Mælilína L-118  
500 - 600 m

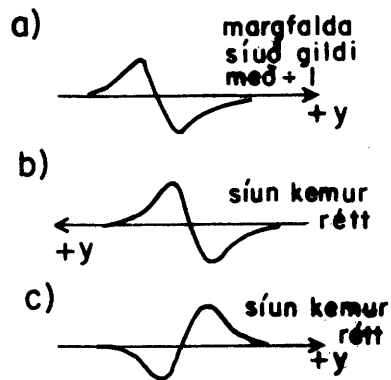
Punktur	halli %	síuð gögn	
490	3	$>(3)+(1)=4$	
500	1	$>(1)+(1)=2$	$>(1)-(4)=-5$
10	1	$>(1)+(2)=-1$	$>(5)-(2)=-7$
20	-2	$>(2)+(3)=-5$	$>(0)-(1)=+1$
30	-3	$>(-3)+(3)=0$	$>(10)-(-5)=+5$
40	3	$>(3)+(7)=10$	$>(15)-(10)=+5$
50	7	$>(7)+(8)=15$	$>(15)-(10)=+5$
60	8	$>(8)+(7)=15$	$>(13)-(15)=-2$
70	7	$>(7)+(6)=13$	$>(12)-(15)=-3$
80	6	$>(6)+(6)=12$	$>(11)-(13)=-2$
90	6	$>(6)+(6)=12$	
600	5	$>(6)+(5)=11$	

Mynd 13 Þægileg aðferð til þess að reikna út síun skv. aðferð F.C. Frasers.





VOD·MJ·335·P.E.  
'83.03.0362·E.K.

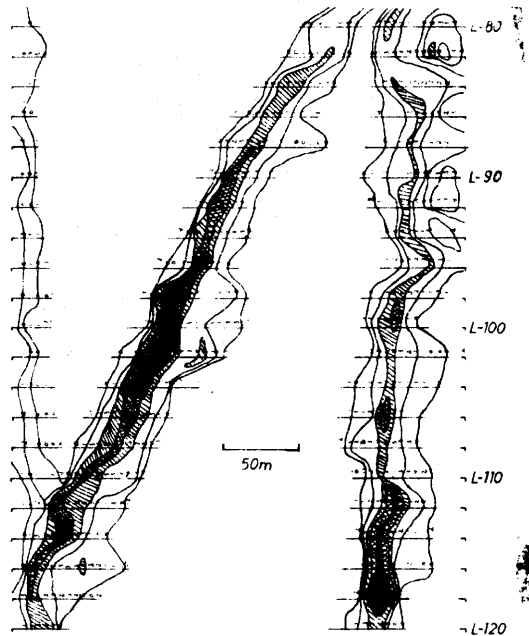


Mynd 14 Vel þarf að athuga hvort nota á póstívu-gildin út úr síunni. Labbað er í stefnu +y og mælingar teknar.

Þægilegast er að miða alltaf við póstífu gildin úr síuninni þannig að ætíð þarf að hafa lögun ferlanna í huga og athuga í hvora áttina síunin er reiknuð. Þetta er útskýrt á mynd 14.

Eins og sést á jöfnu (3.2.1) þá hefur bilið á milli mælipunktanna áhrif á viðbrögð sfunarinnar. Mælt er með því að bil á milli mælipunkta sem settir eru í þessa sfun sé 10-15m.

Þegar gögnin hafa verið reiknuð út og merkt rétt inn á kort af mælinetinu er hægt að draga jafnstyrkslínur og afmarka þannig VLF- fyrirbrigðið á kortinu. Á mynd 15 er sýnt hvernig aðferðin kemur út. Athugið aftur hversu þægilegt er að framkvæma þessa úrvinnslu úti í mörkinni. Í viðauka 2 er sýnt forrit sem reiknar þessa sfun og þar utan forrit fyrir TI 58/59 smátölvu sem gerir reikningana enn fljótlegri í sveitinni.



Mynd 15 Túlkun skv. síunaraðferð Frasers.

### 3.3 Túlkun einstaks ferils út frá hallanum og hringvikinu

Í þessum kafla verða dregnar saman nokkrar niðurstöður úr grein eftir A.S.Saydam sem birtist í nóvemberhefti GEOPHYSICS 1981. Þar birtir hann "master-kúrfur" sem ákvarða dýpi niður á mjóan og "óendanlegan" lóðréttan leiðara (vertical sheet) þar sem leiðarinn telst mjór ef þykkt hans er minni en

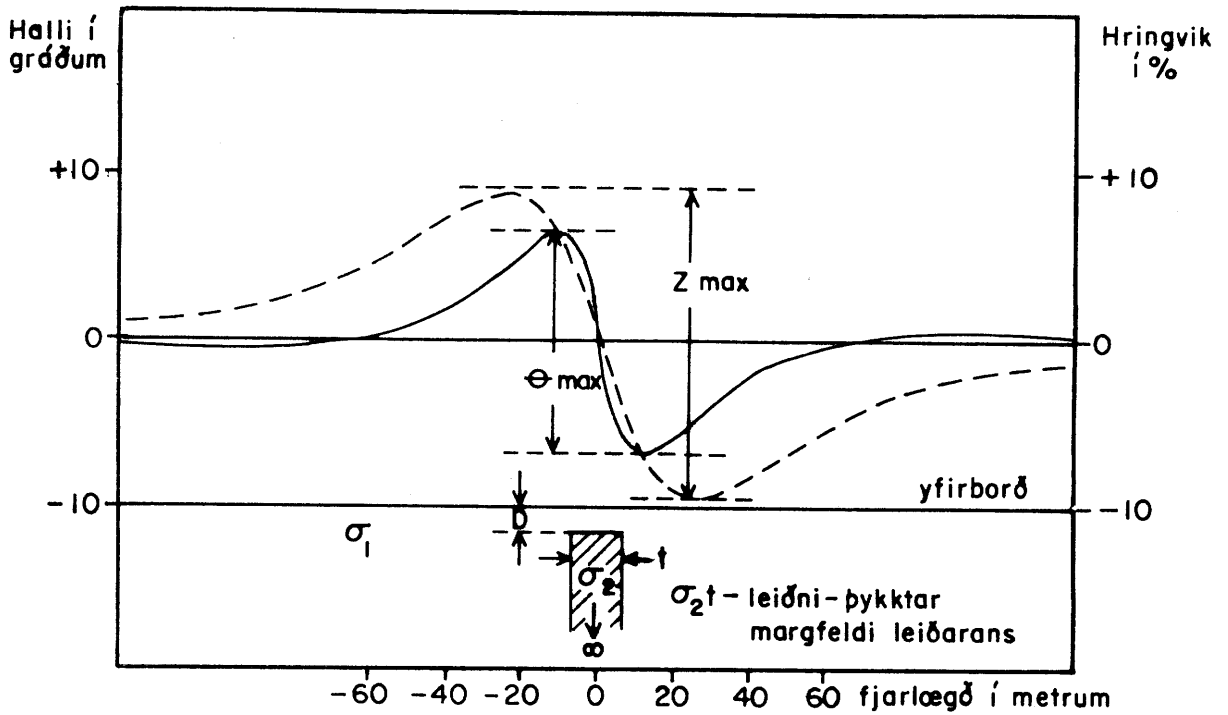
$$t_c = 300 \sqrt{\rho_2 / f}$$

þar sem  $\rho_2$  er eðlisviðnám leiðarans og  $f$  er tíðni rafsegulsviðsins. Einnig ákvarða kúrfurnar s.k. leiðni-þykktar margfeldi

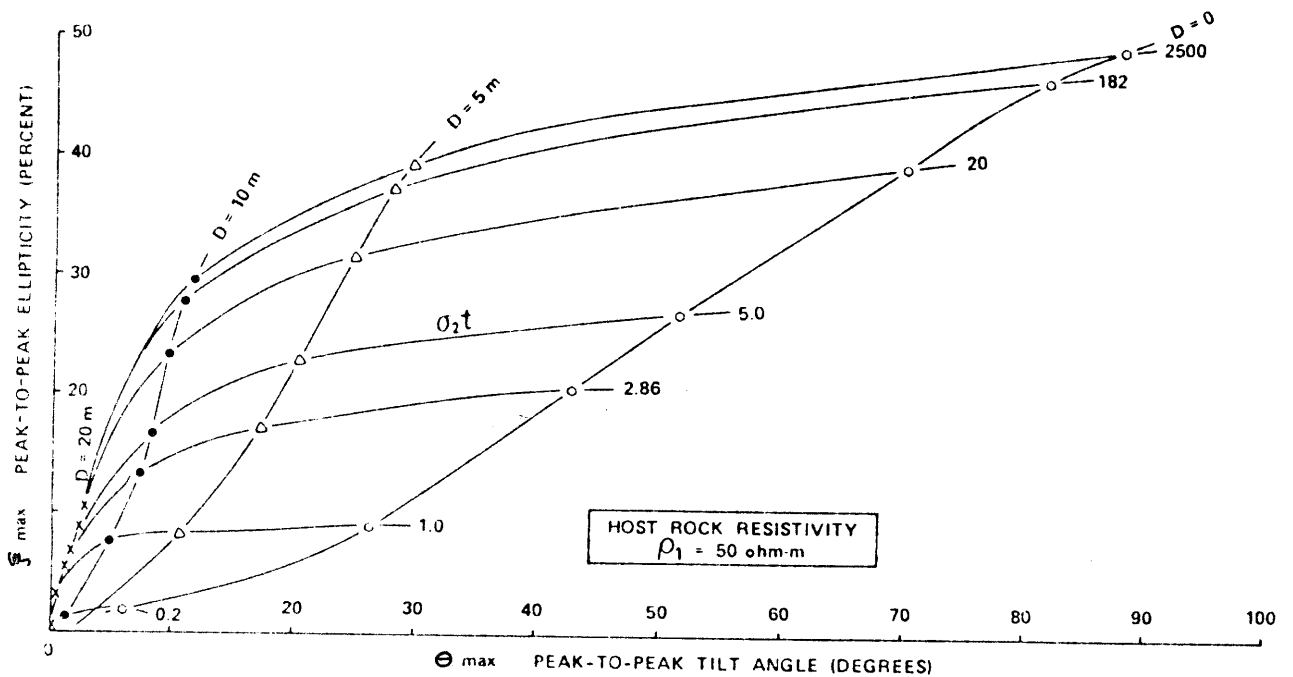
$$\sigma_2 \cdot t \quad (\text{mælt í Siemens ef } \sigma_2 \text{ er í } (\Omega\text{m})^{-1} \text{ og } t \text{ í m})$$

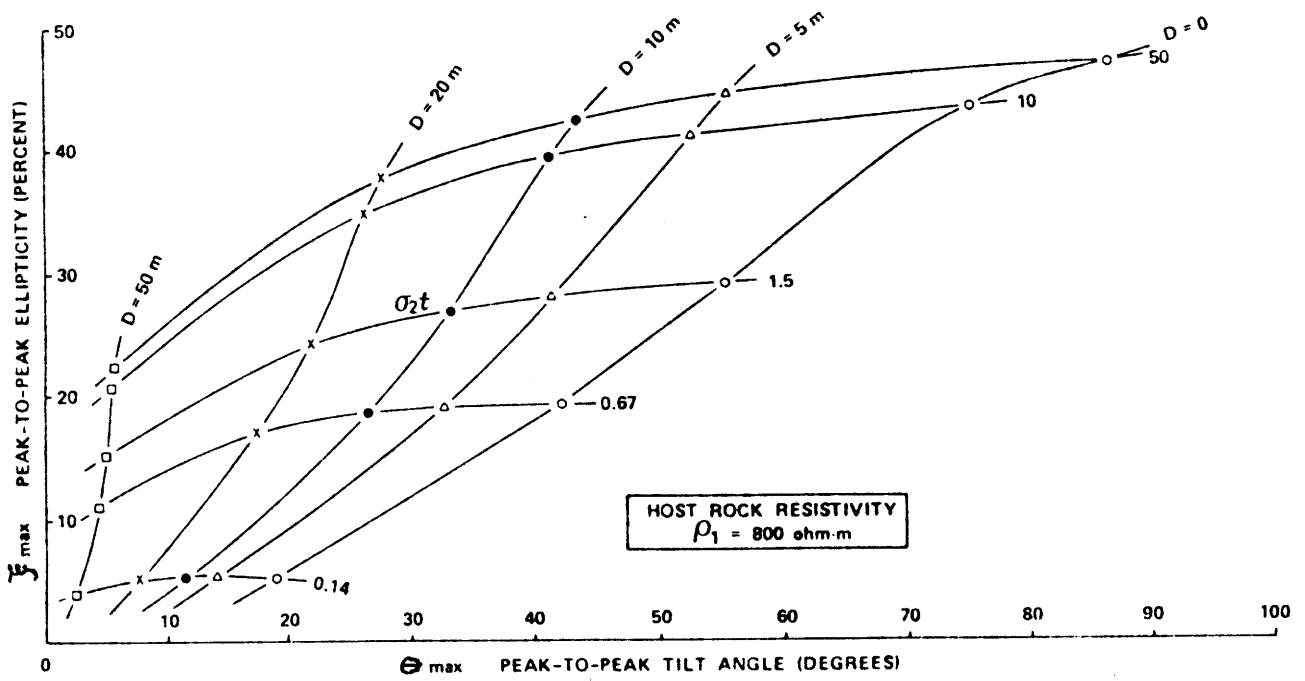
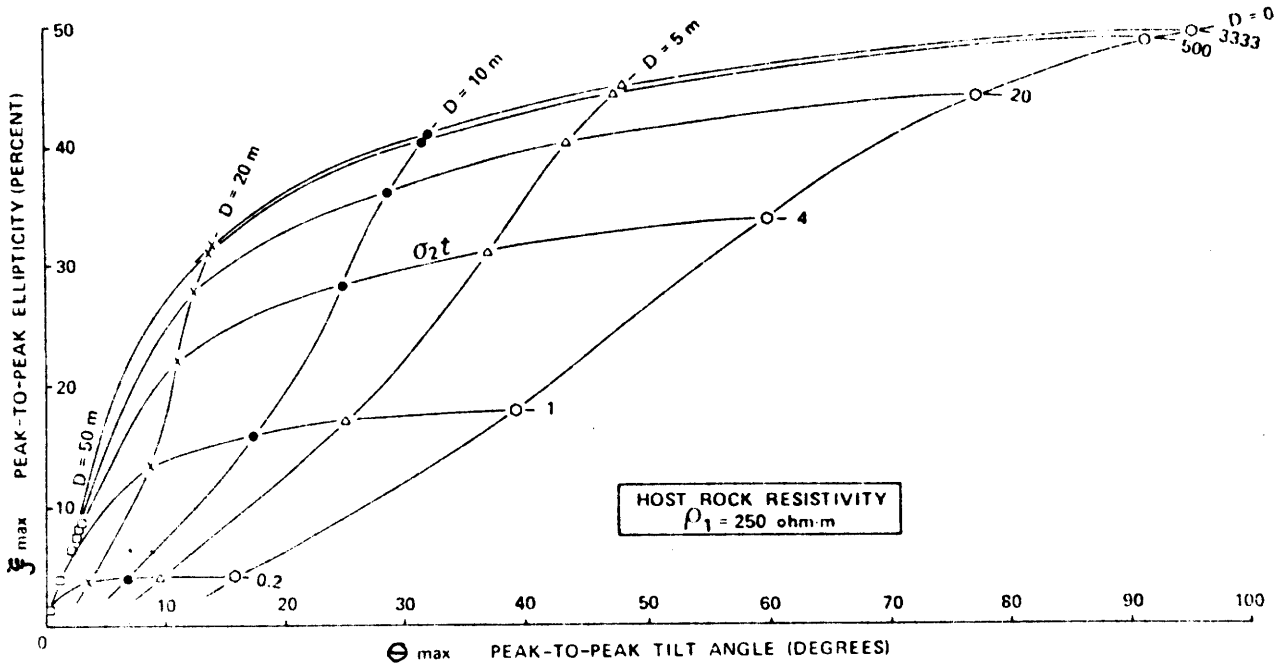
Kúrfurnar eru gerðar fyrir mismunandi leiðni grannbergs leiðarans. Á mynd 15 eru sýnd þau hugtök sem skipta máli fyrir þessa úrvinnslu. Á myndum 16 - 21 eru þessar "maser-kúrfur" sýndar. Mynd 22 sýnir dæmi um svona túlkun á mæliferlum sem teknir voru í Sandafelli. Grein Saydams er áhugaverð og er þeim sem vilja kynnast VLF- mælingum nánar bent á hana.

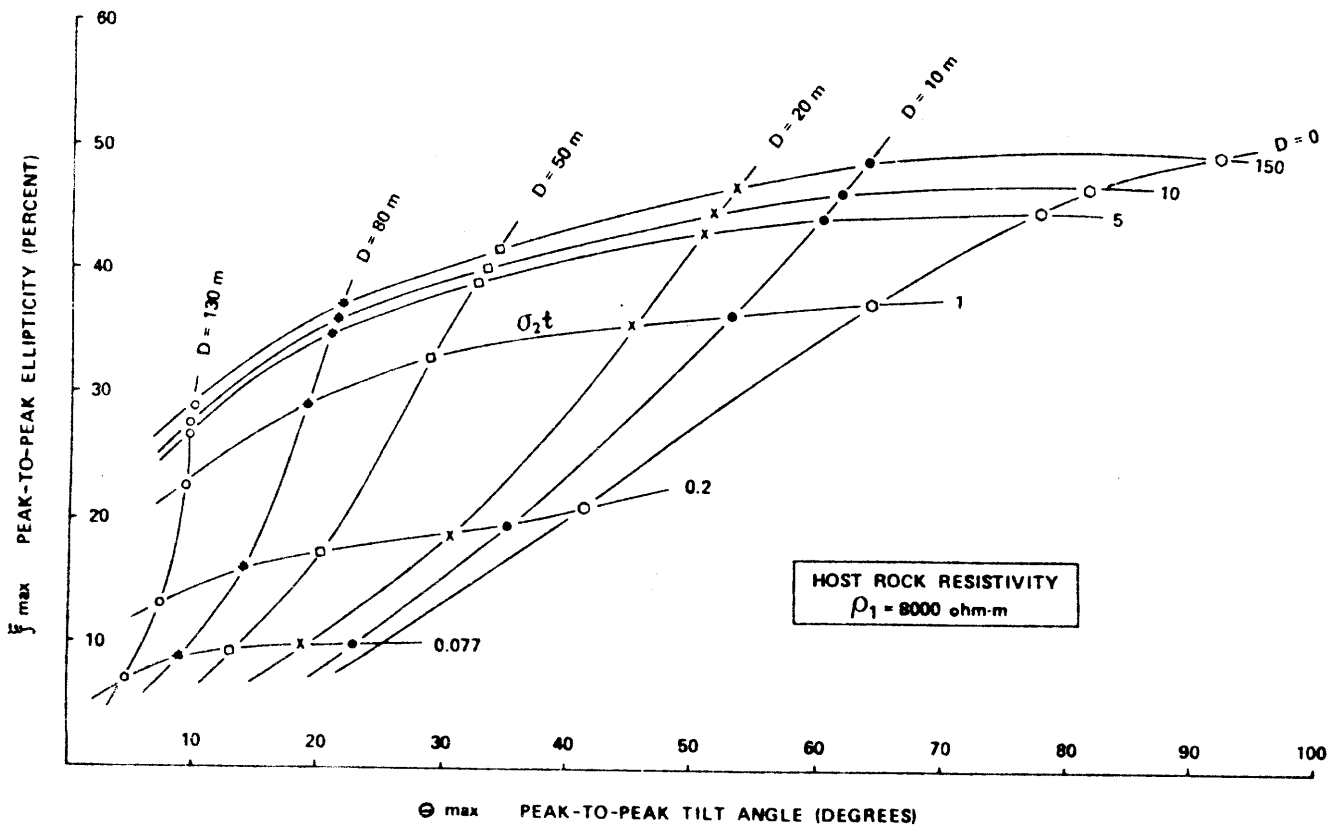
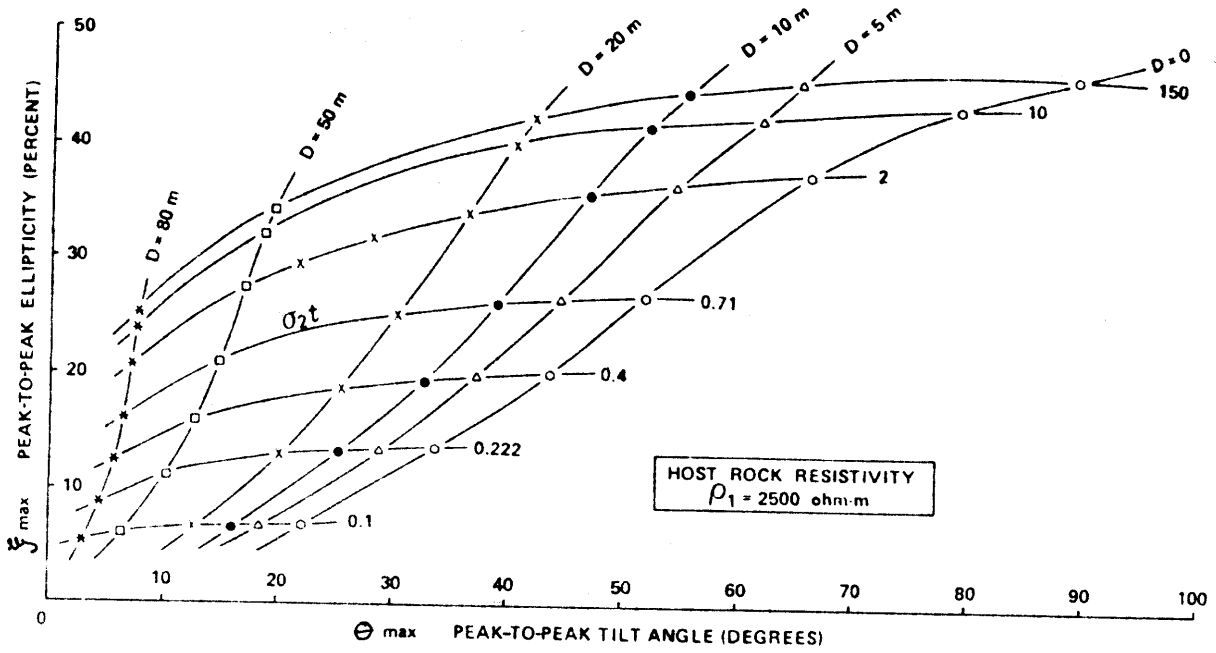
VOD·MJ·335·P.E.  
'83.03.0363·E.K.



Mynd 16 Hugtök sem notuð eru til túlkunar með ferlum Saydams (myndir 17-21)

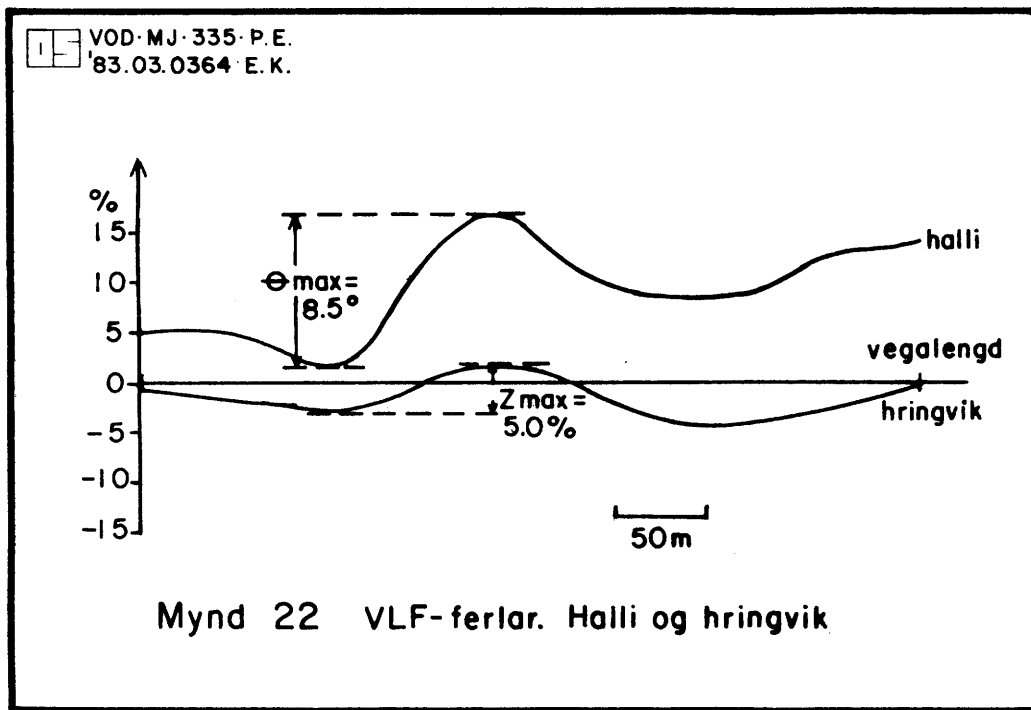




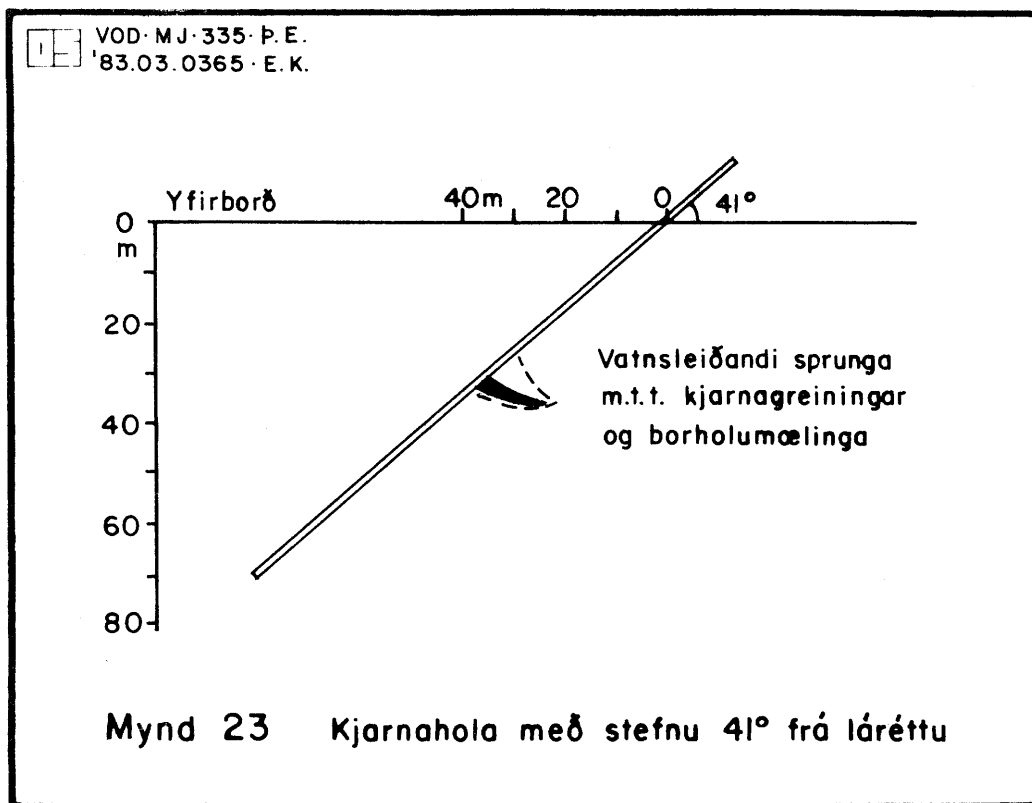


**DÆMI.**

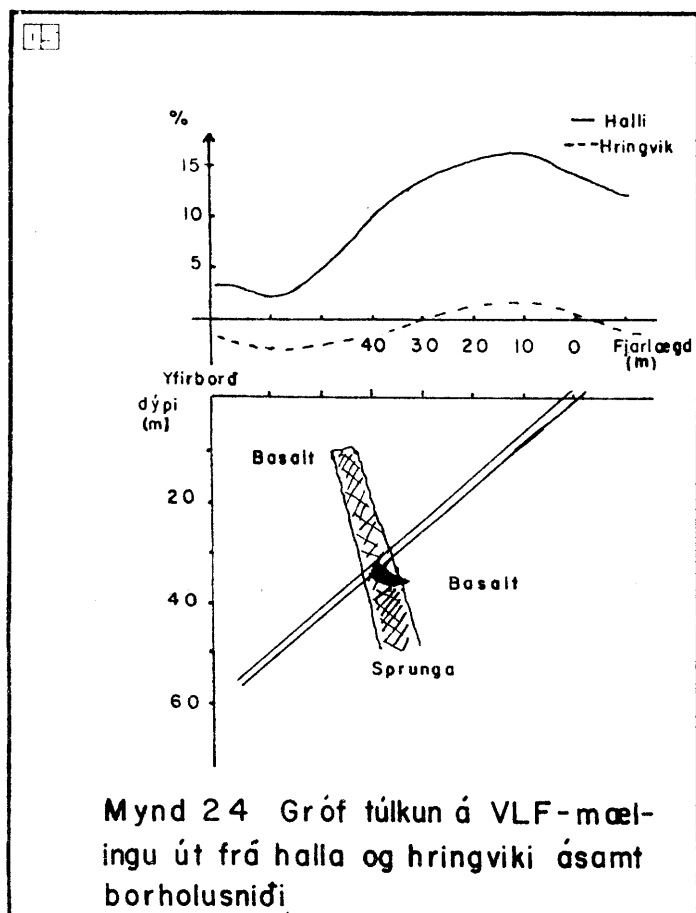
Sem dæmi um notkun þessarar úrvinnsluaðferðar eru teknar mælingar er voru gerðar á Sandafelli sumarið 1981. Mælingarnar tilheyra mælineti 2, nánar tiltekið L-102, sjá mynd 22. Eðlisviðnám yfirborðsjarðlagsins á þessum slóðum er 200 - 300 ohmm. Það liggur því beint við að nota kúrfuna sem reiknuð er fyrir 250ohmm grannberg leiðarans. Skv. aflestrinum sem sýndur er á mynd 22



er dýpið niður á sprunguna 10m og leiðni-pykktarmargfeldið er 0.30Siemens. Sé þetta borið saman við borholusnið hjá þessari mælifínu, skáholan á mynd 23, gæti þetta litið út eins og



mynd 24 sýnir. Skv. borholunni er sprungan ca 10m þykk þannig að eðlisviðnámið, reiknað út frá leiðni-þykktarmargfeldinu, er 30ohmm!

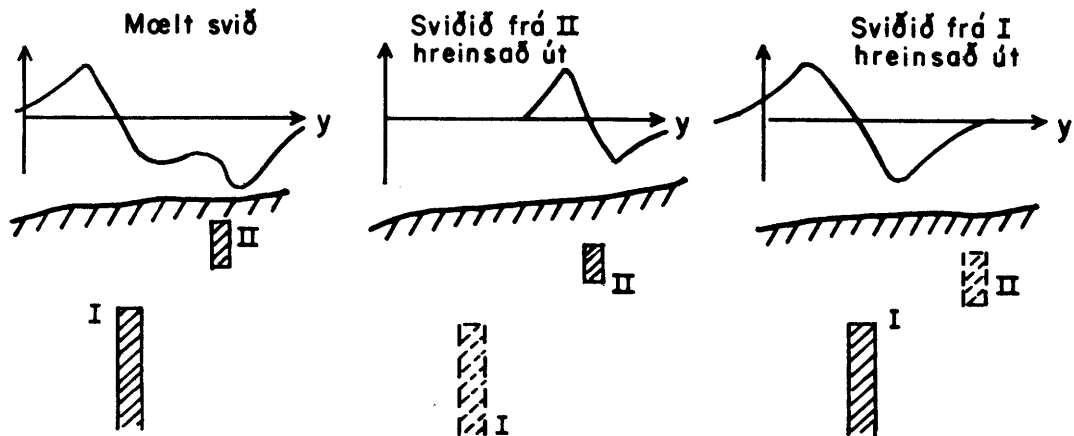




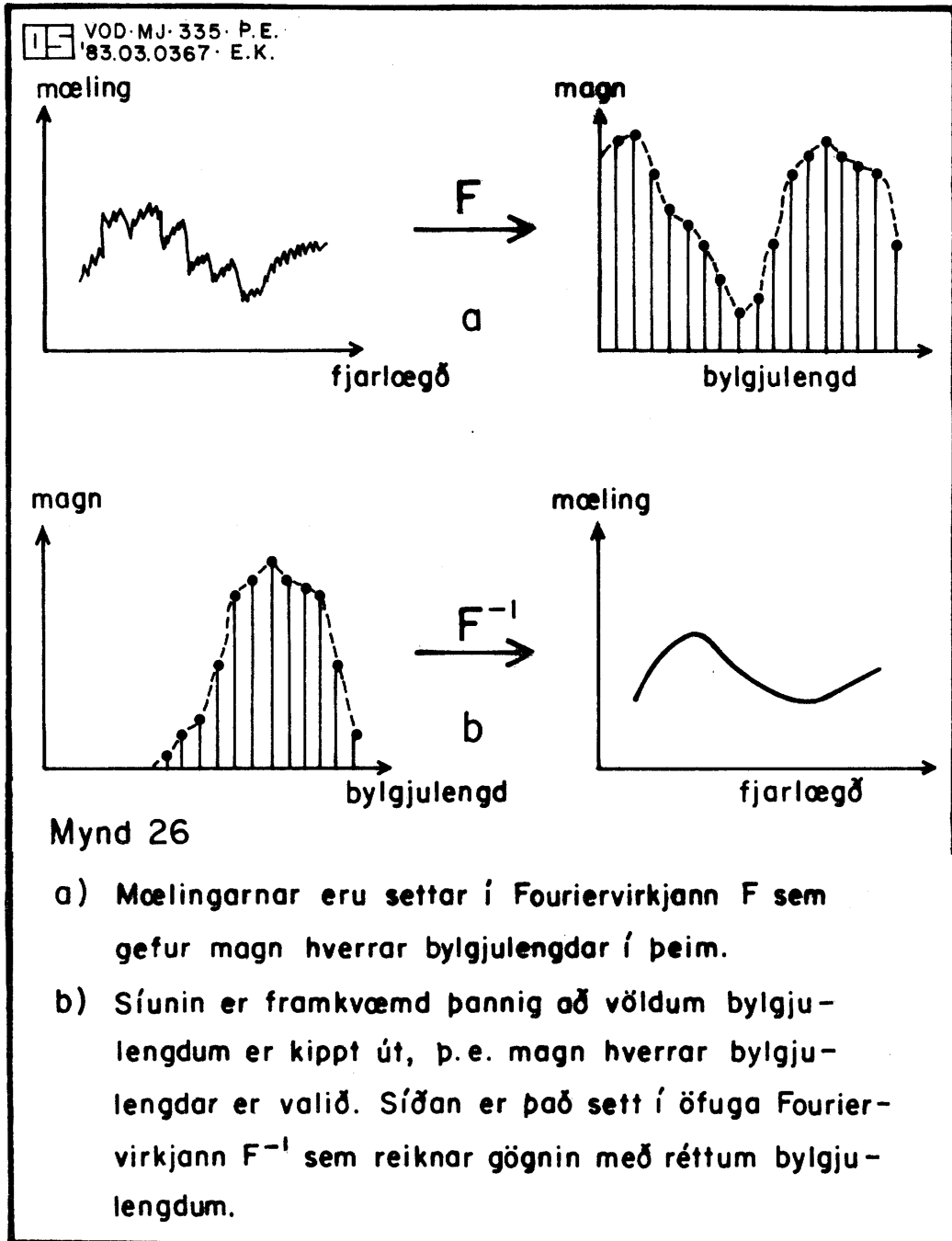
## 3.4 Bylgjugreining VLF- ferlanna

Eins og áður hefur komið fram ræðst breidd (bylgjulengd) VLF- frávik af dýpinu niður á leiðarann sem veldur spansviðinu. Með því að hreinsa ákveðnar bylgjulengdir úr gögnunum má ráða hvort skoðuð eru svið frá yfirborðsleiðurum eða leiðurum sem eru á meira dýpi. Einnig má, ef ástæða þykir til, hreinsa landslagsáhrif úr gögnunum og síðast en ekki síst hreinsa allt hátíðnisuð í burtu auk meðalgildisins. Á mynd 25 er sýnt hvernig þetta getur komið út.

VOD·MJ·335·P.E.  
'83.03.0366·E.K.



Mynd 25 Síun mæliferla m.t.t. dýpis niður á leiðara



Við síun af þessu tagi er notuð Fouriergreining og sýnir mynd 26 verkun hennar. Með því að setja gagnaröðina

$$x_n, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

í Fourierfærsluna

$$F_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{2\pi i kn/N}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.4.1)$$

fæst fram bylgjulengdarinnihald gagnanna.  $N$  er fjöldi

mælinga,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $x$  er mæling í fjarlægð  $n\Delta x$  ef  $\Delta x$  er vegalengdin á milli samliggjandi mælinga (sample interval).  $F_k$  er magn bylgjulengdarinnar  $\lambda = N\Delta x/k$ . Með því að fjarlægja valda stuðla  $F_k$  hreinsast tilheyrandi bylgjulengdir úr gögnunum. Gagnaröð  $\hat{x}_n$  sem inniheldur "réttar" bylgjulengdir er fengin með andhverfu Fourierfærslunni

$$\hat{x}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{F}_k \cdot e^{i2\pi kn/N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.4.2)$$

þar sem  $\hat{F}_k$  eru "hreinsaðir Fourierstuðlar.

Þegar unnið er með bylgjulengdir á þennan hátt eru það ekki sjálfar bylgjulengdirnar sem aðgerðin er framkvæmd á heldur bylgjutölur þeirra (wavenumber). Þær reiknast sem

$$k = \frac{1}{\lambda} \quad (3.4.3)$$

Vegna þess að fjöldi gagnapunkta er endanlegur og raðirnar  $x$  falla ekki niður í núll til endanna þarf að lagfæra gögnin svolfítið til þess að forðast dramatíska atburði í Fourierfærslunni. Það er einkum tvennt sem nauðsynlegt er að gera.

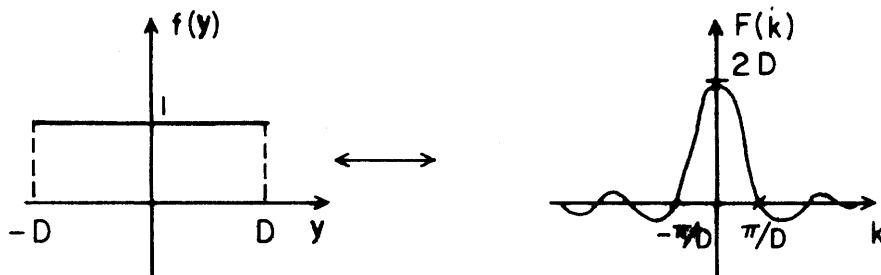
1) Losna við skyndileg stökk til endanna, enda eru þau ekki raunveruleg, til þess að minnka bylgjutölulekann sem á sér stað í Fourierfærslunni, en hann verður að sönnu aldrei útilokaður með öllu. Lekinn villir fyrir og gefur rangar upplýsingar ef hann er á "röngum" stöðum. Gott dæmi þessu til glöggvunar er Fourierfærsla fastans  $f(x)=1$ ,  $x \in (-D, D)$  en núll annars. Hún er

$$F(k) = 2D \cdot \frac{\sin kD}{kD} \quad (3.4.4)$$

Þetta er sýnt á mynd 27.



VOD·MJ·335·P.E.  
83.03.0368·E.K.

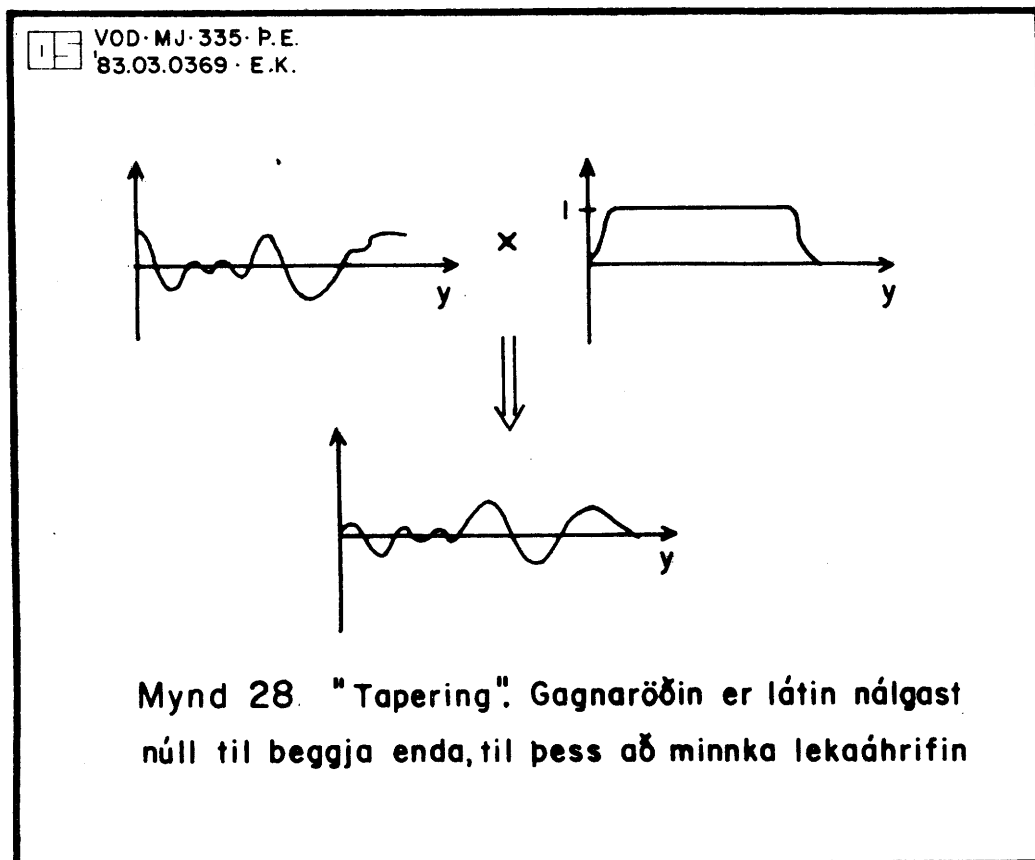


Mynd 27 Dæmi um leka í Fourierfærslu vegna skyndilegs stökks í  $f(y)$  úr núll í einn til beggja enda

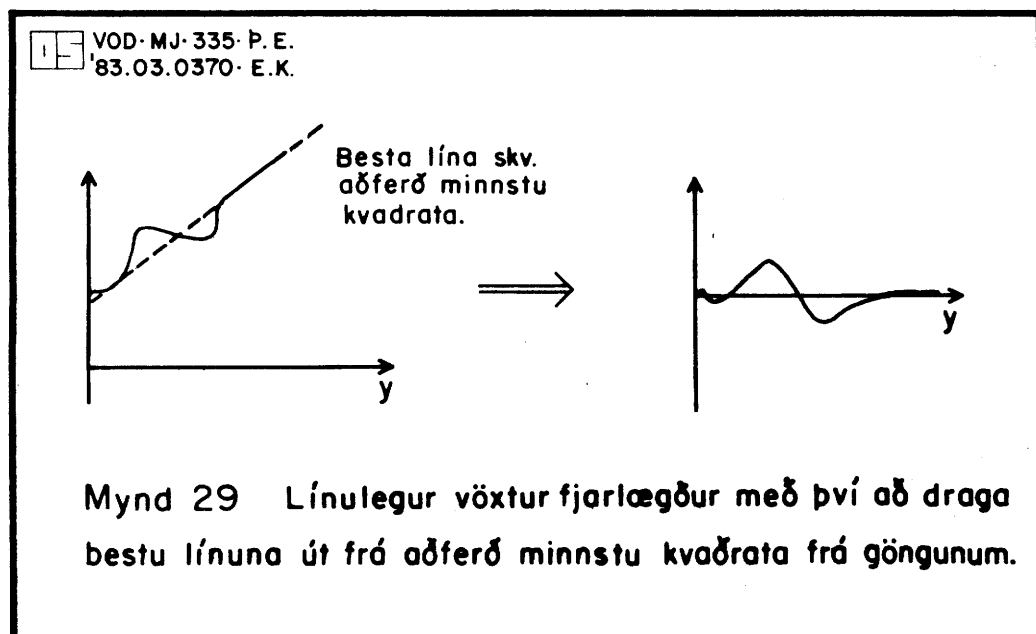
Ef lekinn væri ekki til staðar fengist toppur í  $k=0$  og ekkert þar fyrir utan. Það gerist reyndar þegar  $D \rightarrow \infty$ . Þessu lekavandamáli er hér mætt með 10%-"taperingu". Síðustu 5% gagnaraðarinnar til hvors enda eru margfölduð með cosinus-falli sem verður núll í lokin (cosine bell function). Þessi "tapering" er þannig:

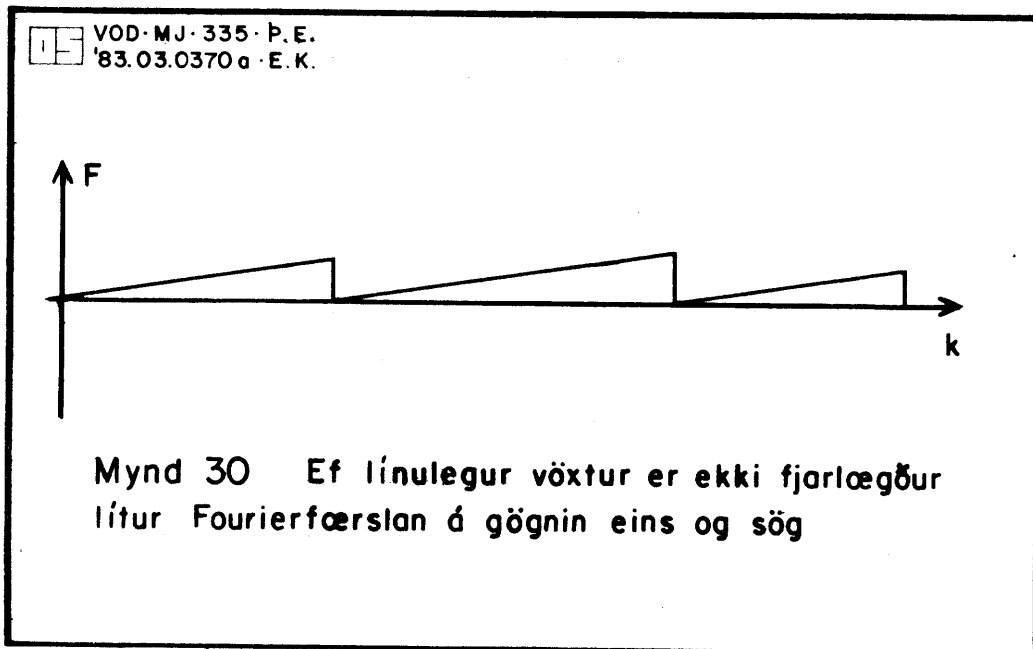
$$w_n = \left. \begin{array}{l} \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{n-1}{M} \cdot \pi \right), \quad 1 \leq n \leq M \\ 1, \quad M+1 \leq n \leq N-M \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{N-n}{M} \cdot \pi \right), \quad N-M+1 \leq n \leq N \\ 0, \quad \text{annars} \end{array} \right\} \quad (34.5)$$

Þetta er útskýrt á mynd 28.



2) Fjarlægja línulegan vöxt (linear trend). Það má gera á ýmsa vegu en hér er það gert með því að finna bestu línuna í gegnum mælingarnar með aðferð minnstu kvaðrata og draga hana síðan frá gögnunum, sjá mynd 29. Ef línulegt innihald er ekki fjarlægt úr gögnunum fæst Fourierfærsla sagtannarfalls, mynd 30, og lekavandamálið verður aftur til baka.





Gluggasmíði eins og sýnd er í (3.4.5) og brotttaka línulegs innihalds úr gögnunum eru gerð til þess að einangra bylgjutölulekann nærri þeim bylgjulengdum sem raunverulega eru í mælingunum og minnka þannig skaðvæni hans.

Fourierfærslan er framkvæmd með Fast Fourier forriti er notar punktafjölda sem heiltöluveldi af tveimur,  $N=2^j$ ,  $j=0,1,2,\dots$ . Það væri auðvitað sérstök tilviljun ef gagnafjöldinn kæmi fyrir sem veldi af tveimur en því er bjargað með því að fylla sætin sem á vantar með núllum

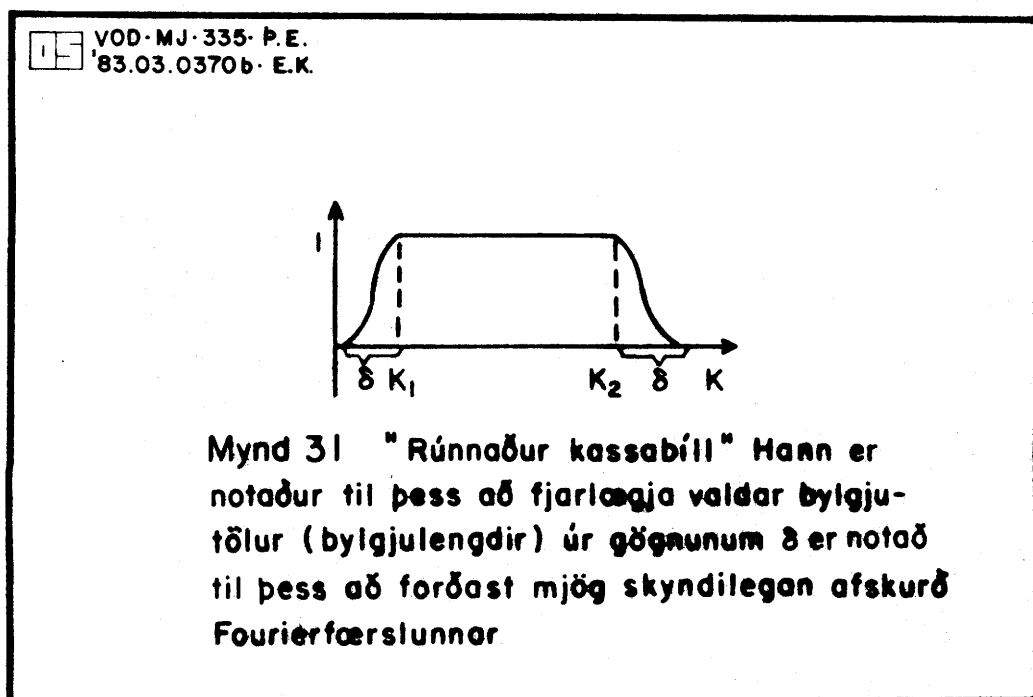
(addition of zeros).

Dæmi. 121 mæling. Næsta tala sem tveir í veldi  $j$  er  $128=2^7$ , þannig að  $128-121=7$  núllum þarfað bæta við röðina áður en Fourierfærslan er reiknuð. Fast Fourierfærslu-forritið er sýnt í viðauka 2.

Til þess að sfa burtu "óæskilegar" bylgjulengdir er notaður "rúnnaður kassabíll" (smoothed boxcar) þannig að Fourierstuðlarnir sem svara til "æskilegra" bylgjulengda eru margfaldaðir með einum en hinir eru núllaðir út. Ef hleypa á í gegn bylgjulengdum milli bylgjutalnanna  $k_1$  og  $k_2$  verður "rúnnaði kassabíllinn"

$$W_k = \left\{ \begin{array}{ll} 1/2 \left( 1 - \cos \frac{k-k_1+\delta}{\delta} \cdot \pi \right), & k_1 - \delta \leq k < k_1 \\ 1, & k_1 \leq k \leq k_2 \\ 1/2 \left( 1 - \cos \frac{k-k_2}{\delta} \cdot \pi \right), & k_2 < k \leq k_2 + \delta \\ 0, & \text{annars} \end{array} \right\} \quad (3.4.6)$$

sjá mynd 31, þar sem  $\delta$  er notað til þess að stjórna hve afklipping Fourierstuðlanna er skörp. Eftir þessa aðgerð er andhverfa Fourierfærslan reiknuð og skilar hún þá gögnum með "réttum" bylgjulengdum.



Þessi úrvinnsluaðferð er sérlega áhrifamikil til þess að ákvarða hvort einstaka mæliferill hefur einhverjar merkilegar upplýsingar að geyma þegar valdar bylgjulengdir hafa verið fjarlægðar, sjá myndir 32 og 33. Aðferðinni er einnig gott að beita við að fá mæliferlana á kort af mælinetinu og er það svipað því sem lýst er í kafla 3.1. nema hvað nú má stjórna sfuninni að eigin vali, mynd 34.

Þegar unnið er með Fourierfærslu gagnaraðar er mjög einfalt að fá fram diffrun á henni. Diffrunin gefur halla ferilsins á hverjum stað, svipað því sem er lýst í kafla 3.2. um sfunaraðferð Frasers. Vegna þess að þar sem spansvið finnst er halli VLF-ferlanna mun meiri en ella hlýtur að vera athyglisvert að skoða hallabreytingarnar þegar "vondar" bylgjulengdir hafa verið sfaðar burtu. Væntanlega er hallinn mestur beint yfir leiðaranum sem orsakar spansviðið. Sé litið betur á þetta kemur í ljós:

Ef  $F(k)$  er Fourierfærsla fallsins  $f(x)$  þá er  $f'(x)$  andhverfa Fourierfærslan af

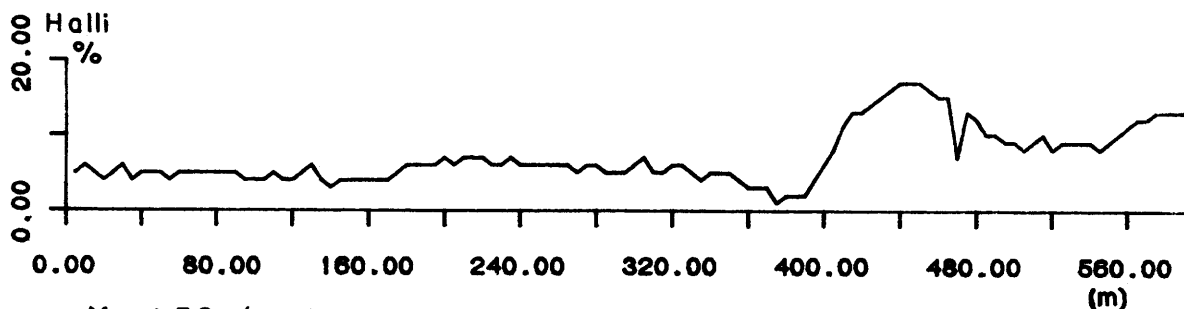
$$-2\pi ik \cdot F(k)$$

þegar  $f(x)$  er núll til beggja enda. Bylgjulengdarinnihald diffrúðu raðarinnar er auðvitað það sama og stofnraðarinnar.

Með því síðan að teikna upp póstífa hluta diffrúðu gagnaraðarinnar fæst skýr mynd af VLF-frávikunum og hvernig samsvörunin er á milli mæliferlanna séu þeir teiknaðir á kort af mælinetinu. Þetta er sýnt á mynd 35.

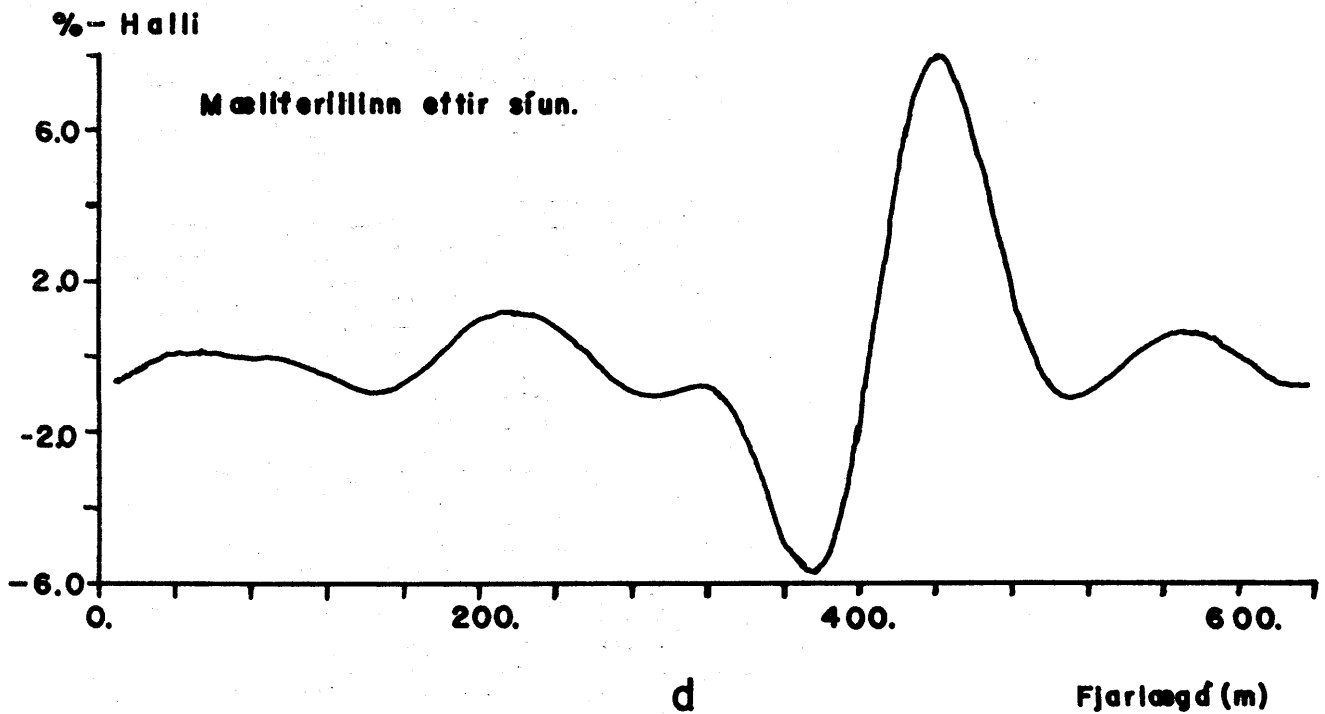
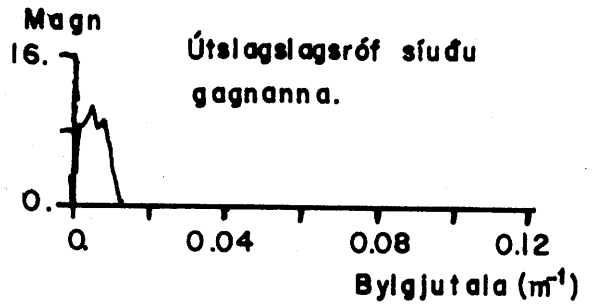
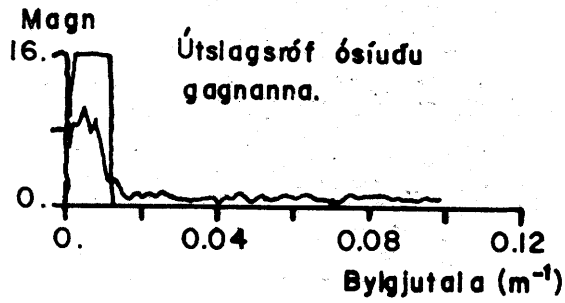
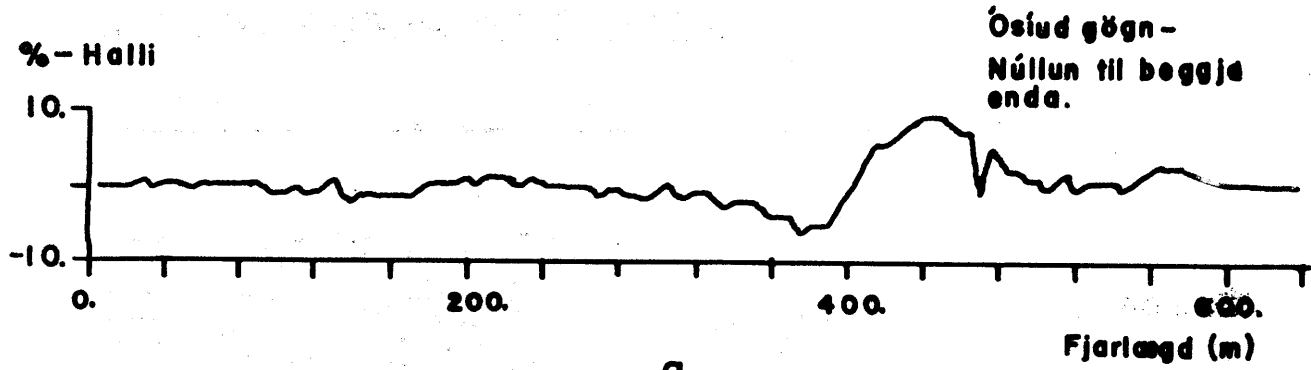
Myndir 32 - 35 eru teknar sem túlkunardæmi fyrir aðferðina sem lýst er hér á undan. Mælingarnar tilheyra mælineti sem tekið var á fyrirhugaðri jarðgangnaleið 2 í Sandafelli (Sultartangavirkjun). Mynd 32 sýnir mæliferil L-1020 eins og hann var mældur. Öll gildin eru póstíff en þó virðist einhver sveifla vera í honum.





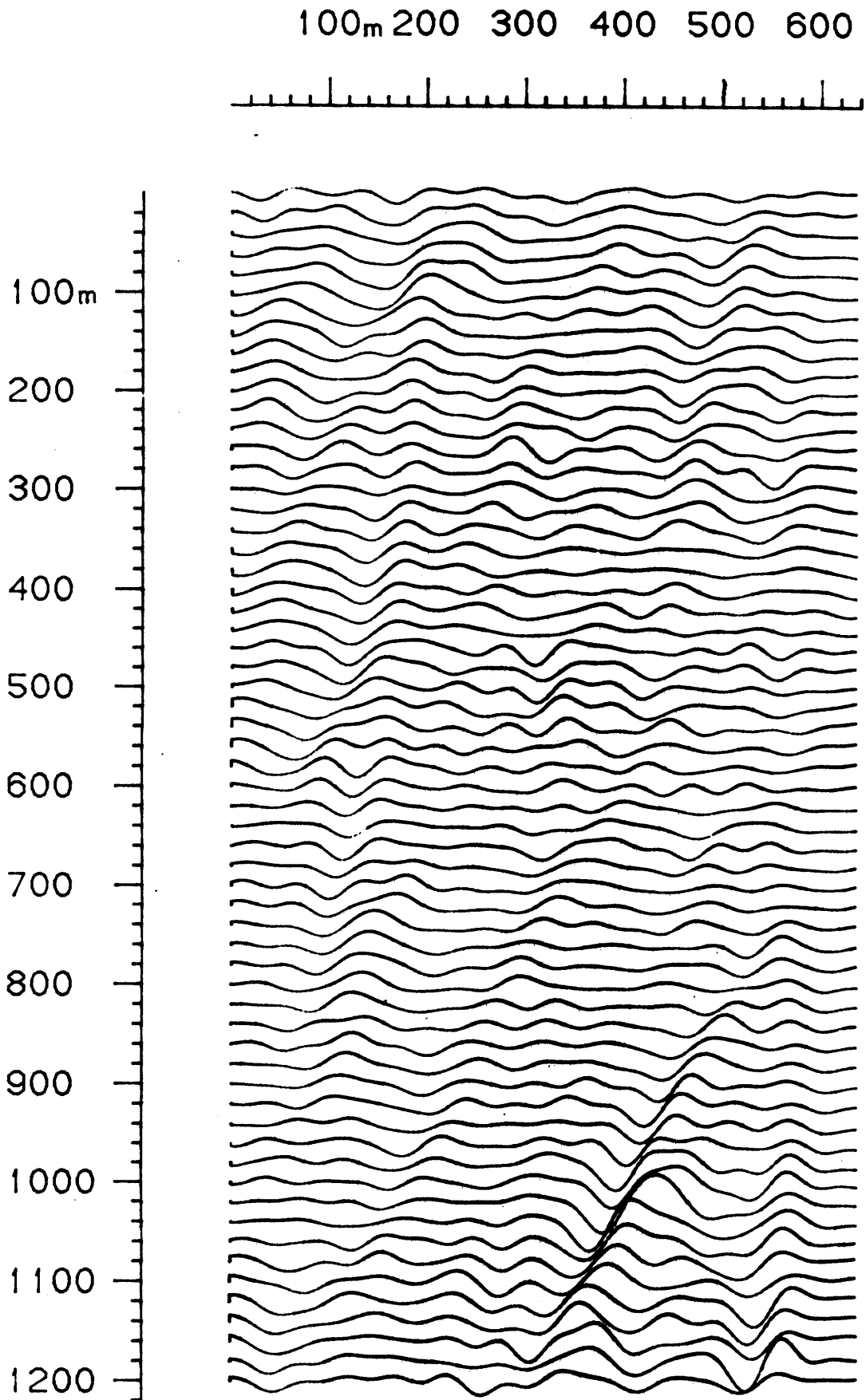
Mynd 32 Óunninn VLF-mæliferill

Á mynd 33a er sami ferillinn teiknaður eftir að búið er að fjarlægja línulegan vöxt og meðaltal. Einnig er búið að jafna báða enda að núlli. Mynd 33b sýnir útslagsróf (amplitudespectrum) ferilsins ásamt sfuninni og á mynd 33c er sýnt útslagsróf sfuðu raðarinnar. Mynd 33d sýnir síðan ferilinn þegar bylgjulengdir neðan 80m og ofan 710m hafa verið fjarlægðar. Ferillinn er nú lögulegri og auðtúlkanlegri. Mynd 34 sýnir mæliferlana setta á kort af mælinetinu eftir að bylgjulengdir neðan 50m og ofan 200m hafa verið teknar í burtu. Svæði þar sem samsvörun er á milli mæliferla koma nokkuð vel fram en eru samt ekki afgerandi. Á mynd 35 er póstífi hluti diffrúðu gagnaraðarinnar teiknaður á kort af mælinetinu. Sama sfun er notuð áfram. Eins og sést þá er myndin afar skýr og hér er orðin nokkur hættu á að oftúlka mælingarnar. Ekki getur talist skynsamlegt að túlka þessa ferla sem "eitthvað" nema þar sem greinilegar hallabreytingar sjást. Það er auðvitað óhjákvæmilegt að ferlarnir sýni einnig póstífan halla þar sem "ekkert" er undir. Hins vegar þar sem "gott" spansvið mælist er hallinn mestur beint yfir fyrirbærinu en minnkar til beggja hliða. Með þetta til hliðsjónar verður að taka beinu strikin, jafn halli, sem koma fyrir í diffrúðu röðinni með miklum fyrirvara.

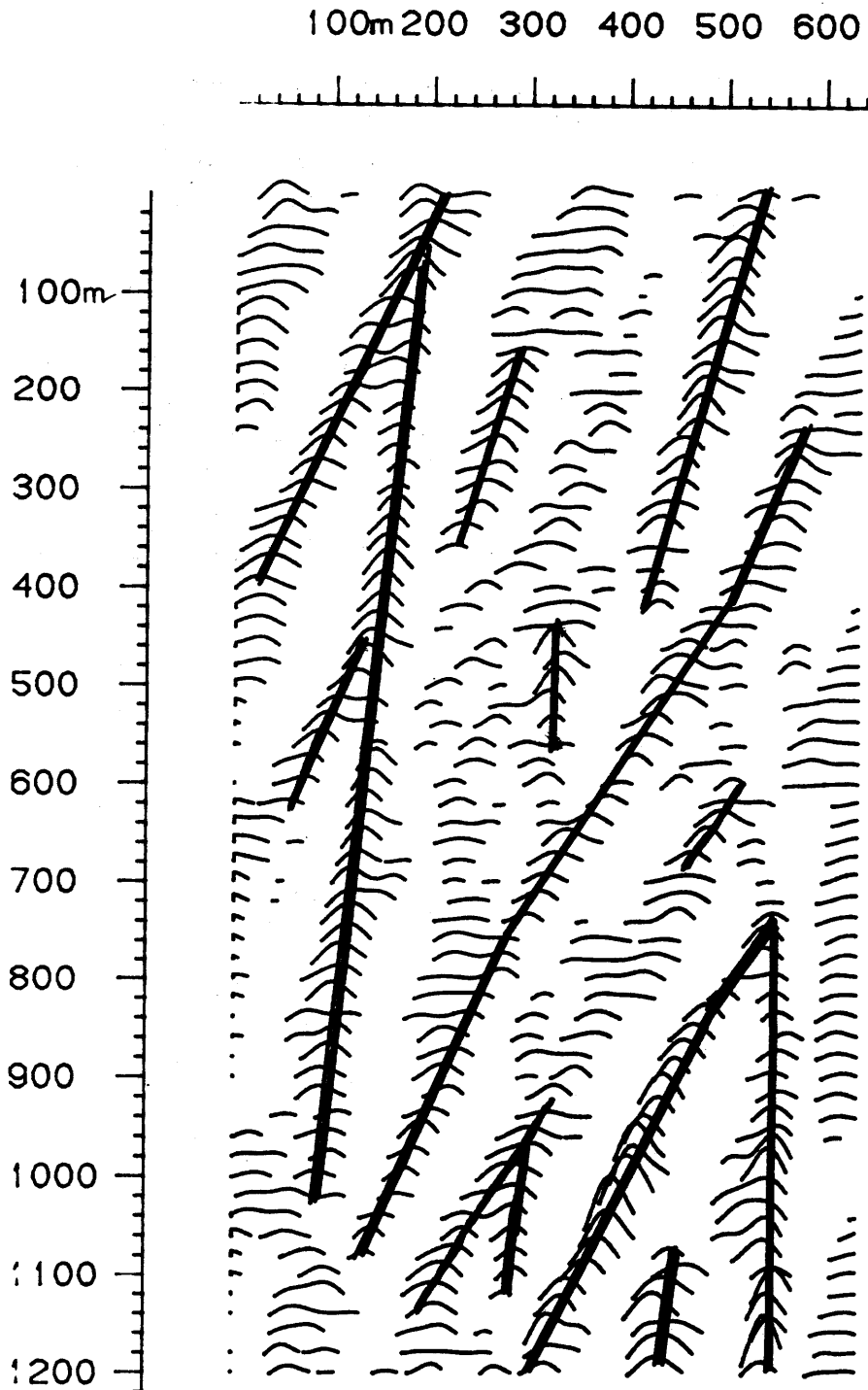


### Mynd 33.

Breytingar sem verða á mæliferlinum við síun. Bylgjulengdir ofan 710m og neðan 80m hafa verið hreinsaðar út.



Mynd 34: Allir ferlarnir hafa verið síaðir og teiknaðir upp á kort af mælinetinu.



Mynd 35: Túlkun VLF- mælinga með því að skoða diffráðar gagnaraðir. Þetta er líkt kortlagningaraðferð D.C. Frasers en hér stjórnun við síunarbílínu sjálf. Þessi aðferð auðveldar túlkunina mjög mikið. Við túlkun verður að gæta þess að oftúlka mælingarnar ekki.

## NIÐURLAG

Hérlendis er megin notagildi VLF- mælinga að leita vatnsleiðandi sprungna og brotabela. Það fer að sjálfsögðu eftir jarðfræðilegum aðstæðum hvort mælingarnar eiga við og þar fyrir utan takmarkar dýptarskynjun rafsegulbylgna notagildi þeirra.

Þegar grunur leikur á að svæði sem ætluð eru undir mannvirkjagerð séu brotin með vatnsleiðandi sprungum og þessháttar þá geta VLF- mælingarnar verið mjög heppileg forkönnun m.t.t. þess að staðsetja rannsóknarborholur. Notkun þeirra getur þannig hjálpað til við markmiðið: hámarksupplýsingaöflun fyrir lágmarkskostnað. VLF- mælingarnar eru mjög fljótgerðar og ódýrar í úrvinnslu.

Það verður að teljast mikilvægt fyrir framgang VLF- mælinga hér að sem mest sé mælt þar sem mannvirkjagerð er í vændum, þó svo frumrannsóknun sé löngu lokið, til að hægt verði að gera sér grein fyrir þýðingu þeirra í náinni framtíð.

Eitt verkefni sem ekkert er fjallað um í skilagreininni, vegna þess hve stutt það er á veg komið, er mat á landslagsáhrifum í VLF- mælingunum. Þær landslagsleiðréttingar sem gerðar hafa verið sýna að þeirra er þörf í mörgum tilfellum og að alltaf verður að taka inn þann möguleika. Það er án efa brýnasta verkefnið í framhaldi af þessari skilagrein að þróa landslagsleiðréttingar í úrvinnslu VLF- mælinga.

H E I M I L D A S K R Á

Arnold, J.O. & Andersson, S.G. 1982: VLF-matningar. -En användbar metod vid grundvattenprospektering och brunnborrning: VANNET I NORDEN, no 2 " 82.

Childers, D. & Durling, A. 1975: Digital filtering and signal processing: West Publishing.

Fraser, D.C. 1969: Contouring of VLF-EM data: GEOPHYSICS, Vol. 34: 958-967.

Geonics Ltd. 1964: EM-16, Operation manual: Geonics Ltd., Toronto, Ont.

Björn Jónasson, Pétur Pétursson, Þorsteinn Egilson & Bjarni Bjarnason 1982: Sultartangavirkjun. Jarðfræði- og grunnvatnsrannsóknir á jarðgangnaleið og stöðvarhússtöði.

Kaikkonen, P. 1979: Numerical VLF modeling: GEOPHYSICAL Prospecting, Vol. 27: 815-834.

Kraus, J.D. & Carver, K.R. 1973: Electromagnetics, 2nd ed. McGrawhill.

Otnes, R.K. & Enoschen, 1972: Digital time series analysis. Wiley Interscience.

Paterson, N.R. & Ronka, V. 1975: Five years of surveying with the very low frequency electromagnetics method. GEOEXPLORATION, Vol. 13: 7-36.

Phillips, W.I. & Richards, W.E. 1975: A study of the effectiveness of the VLF-method for location of narrow-mineralized fault zones: GEOEXPLORATION, Vol. 13: 215-226.

Saydam, A.S. 1981: Very low frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements: GEOPHYSICS, Vol. 46: 1597-1605.

Telford, V.M. Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. & Keys, D.A. 1976: Applied geophysics. Cambridge University Press.

Yuen, C.K. & Fraser, D. 1979: Digital spectral analysis: CSIRO.



V I Ð A U K I 1

VLf-sendistefnur að Íslandi

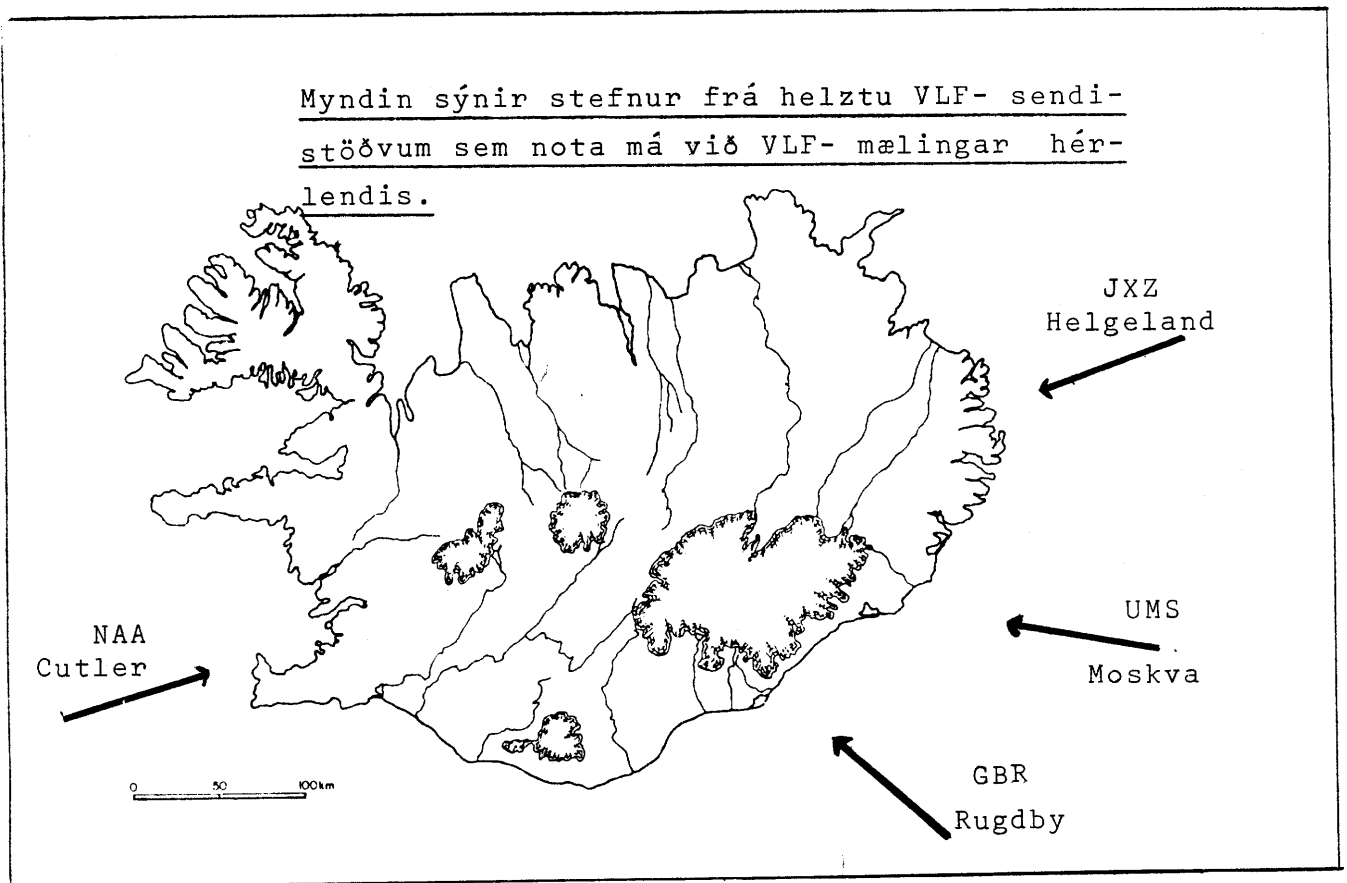




TAFLA yfir helztu VLF- sendistöðvar sem nota má við VLF- mælingar hérlandis.

<u>STÖÐ</u>	<u>STAÐSETNING</u>	<u>TÍÐNI(kHz)</u>
NAA	Cutler, Maine	17.8
GBR	Rugby, England	16.0
FUO	Bordeaux, Frakkland	15.1
JXZ	Helgeland, Noregur	16.4
UMS	Moskva, Sovét	17.1

Myndin sýnir stefnur frá helztu VLF- sendistöðvum sem nota má við VLF- mælingar hérlandis.



Dæmi um viðbrögð þegar VLF-sendistöð dettur út.

COULD YOU  
GA  
0023  
INTLX\*  
2339 ORKUST IS  
GA  
45769+1  
11 1241  
SOIL GISCO DVR

1982-08-11 REF: 0204/82

ATTN: VLF-SALESMAN

COULD YOU TELL US WHERE TO GET INFORMATION ON WHEN NAA STATION  
IS TRANSMITTING.

PLEASE GIVE QUICK ANSWERS IF POSSIBLE.

REGARDS  
TH EGILSON  
NATIONAL ENERGY AUTHORITY

SOIL GISCO DVR

2339 ORKUST IS

18.31\*  
2339 ORKUST IS

ATTN: TH EGILSON

RE: YTLX AUG 11, 82  
YREF 0204/82

NAA SHOULD RESUME OPERATION IN 3 TO 4 DAYS. REGULAR MAINTENANCE  
EVERY MONDAY 1400 TO 1800 UT. IF HOLIDAY FALLS ON MONDAY  
MAINTENANCE IS DONE ON PRECEDING FRIDAY. NAA OFF 1300 TO 2300  
UT DAILY NOV. 15 THRU 17.

REGARDS  
M ZUBER  
GISCO  
DENVER COLORADO USA\*  
2339 ORKUST IS.....

ABOVE SENT VIA ITT AUG 11 1982 1432 FROM SOIL GISCO DVR

WWW TELEX BANGOR MACQUE TELEWESS TELEX SNOW WHITE TELE

V I Ð A U K I 2

Forrit til úrvinnslu VLF-mælinga



```

SUBROUTINE BRUA(X,Y,NX)
C
C BRUAD EDA JAFNAD UT EFTIR THVI SEM OSKAD ER.
C
DATA JA/'J'/
WRITE(5,*) 'A AD JAFNA UT ? (J/N) '
READ(5,1) JN
IF (JN .NE. JA) GO TO 33
C
C UTJAFNAD MED UNDIRFORRITINU ICSSCV
C
CALL ICSSCV (X,Y,NX,F,C,IC,2,WK,IERR)
C
IF (IERR .NE. 0) TYPE 105,IERR
105 FORMAT ('0ICSSCV--ERROR--',I3)
GO TO 34
33 CONTINUE
C
C UNDIRFORRITID IQHSCU BRUAR A MILLI MAELINGANNA
C
CALL IQHSCU (X,Y,NX,C,IC,IERR)
C
IF (IERR .NE. 0) TYPE 115,IERR
115 FORMAT ('0IQHSCU--ERROR--',I3)
34 CONTINUE
IF (JN .EQ. JA) GO TO 37
DO 36 I=1,NX
F(I)=Y(I)
36 CONTINUE
37 CONTINUE
C
C UNDIRFORRITID ICSEVU REIKNAR FALLSGILDIN A MILLI
C MAELIPUNKTANNA.
C
CALL ICSEVU (X,F,NX,C,IC,X0,YP,1,IERR)
C
IF (IERR .NE. 0) TYPE 125,IERR
CALL PLOT (X0,YP,3)
DO 40 I=2,1000
XP=(I-1)*DELXP + X0
IF (XP .GT. X(NX) ) GO TO 41
CALL ICSEVU (X,F,NX,C,IC,XP,YP,1,IERR)
IF (IERR .NE. 0) TYPE 125,IERR
125 FORMAT ('0ICSEVU--ERROR--',I3)
CALL PLOT (XP,YP,2)
40 CONTINUE
41 CONTINUE
1 FORMAT(A1)
RETURN
END

```

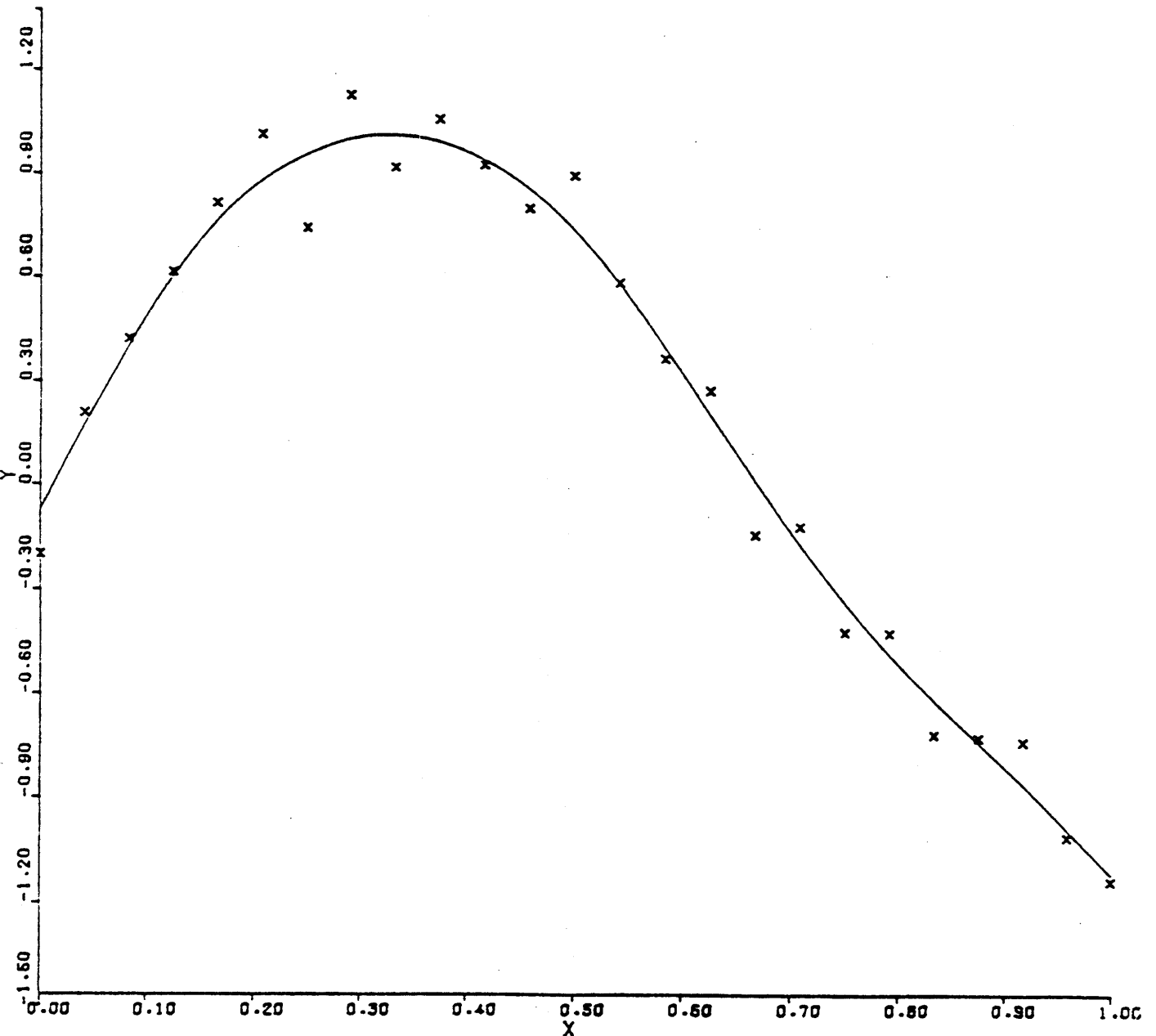
### Example

A sequence of 25 data points are generated by adding a random variable with uniform density in the interval  $[-0.2, 0.2]$  to the curve  $y = \sin(3\pi x/2)$ . ICSSCV is called with IJOB=2 (abscissae are equally spaced in  $[0, 1]$ ) to calculate a smoothing spline curve to approximate the data.

For checking purposes the following output is given:

Y(1) = -0.073  
Y(11) = 0.942  
Y(21) = -0.613

The output is represented by the following plot.



June, 1980

ICSSCV-3

IMSL ROUTINE NAME - ICSSCV

PURPOSE - CUBIC SPLINE DATA SMOOTHER  
(EASY-TO-USE VERSION)

USAGE - CALL ICSSCV (X,F,NX,Y,C,IC,IJOB,WK,IER)

ARGUMENTS

X - VECTOR OF LENGTH NX CONTAINING THE  
ABSCISSAE OF THE NX DATA POINTS  
(X(I),F(I)) I=1..NX. (INPUT) X  
MUST BE ORDERED SO THAT  
X(I) .LT. X(I+1).

F - VECTOR OF LENGTH NX CONTAINING THE  
ORDINATES (OR FUNCTION VALUES)  
OF THE NX DATA POINTS. (INPUT)

NX - NUMBER OF DATA POINTS. (INPUT)  
NX MUST BE .GE. 4.

Y,C - SPLINE COEFFICIENTS. (OUTPUT) Y  
IS A VECTOR OF LENGTH NX. C IS  
AN NX-1 BY 3 MATRIX. THE VALUE  
OF THE SPLINE APPROXIMATION AT T IS  
 $S(T) = ((C(I,3)*D + C(I,2))*D + C(I,1))*D + Y(I)$   
WHERE X(I) .LE. T .LT. X(I+1) AND  
D = T - X(I).

IC - ROW DIMENSION OF MATRIX C EXACTLY  
AS SPECIFIED IN THE DIMENSION  
STATEMENT IN THE CALLING PROGRAM. (INPUT)

IJOB - JOB SELECTION PARAMETER. (INPUT)  
IJOB = 1 SHOULD BE SELECTED WHEN  
NX IS SMALL (LESS THAN ABOUT 20)  
OR WHEN UNEQUALLY SPACED ABSCISSAE  
(X(1),X(2),...) ARE USED.  
IJOB = 2 SHOULD BE SELECTED WHEN  
NX IS LARGE AND THE ABSCISSAE ARE  
EQUALLY SPACED.

WK - WORK VECTOR OF LENGTH  
NX\*(3\*NX+5) IF IJOB=1,  
OR  
6\*NX IF IJOB=2.

IER - ERROR PARAMETER. (OUTPUT)  
TERMINAL ERROR  
IER = 129, IC IS LESS THAN NX-1.  
IER = 130, NX IS LESS THAN 4.  
IER = 131, INPUT ABSCISSAE ARE NOT  
ORDERED SO THAT X(I) .LT. X(I+1).  
IER = 132, FAILURE TO CONVERGE ON  
A MINIMUM OF THE CROSS-VALIDATION  
FUNCTION.  
IER = 133, IJOB = 2 AND THE  
ABSCISSAE ARE NOT EQUALLY SPACED.

PRECISION/HARDWARE - SINGLE AND DOUBLE/H32  
- SINGLE/H36,H48,H60

REQD. IMSL ROUTINES - EQRT2S, ICSSD, ICSSE, ICSSF, ICSSG, ICSSH,  
LEQT1B, LSVDB, LSVDF, LSVG1, LSVG2, VHS12,  
UERSSET, UERTST, UGETIO, ZXGSP

June, 1980

ICSSCV-1



IMSL ROUTINE NAME - IBCEVU

PURPOSE - EVALUATION OF A BICUBIC SPLINE

USAGE - CALL IBCEVU (X,NX,Y,NY,LX,LY,C,XL,YL,FL,IER)

ARGUMENTS

X - VECTOR OF LENGTH NX. (INPUT) X MUST BE ORDERED SO THAT X(I) .LT. X(I+1) FOR I=1,...,NX-1.

NX - NUMBER OF ELEMENTS IN X. (INPUT) NX MUST BE .GE. 2.

Y - VECTOR OF LENGTH NY. (INPUT) Y MUST BE ORDERED SO THAT Y(J) .LT. Y(J+1) FOR J=1,...,NY-1.

NY - NUMBER OF ELEMENTS IN Y. (INPUT) NY MUST BE .GE. 2.

NOTE - THE COORDINATE PAIRS (X(I),Y(J)), FOR I=1,...,NX AND J=1,...,NY, GIVE THE POINTS WHERE THE FUNCTION VALUES ARE DEFINED.

LX - X-DIRECTION INTERVAL FOR WHICH SPLINE COEFFICIENTS HAVE BEEN CALCULATED. (INPUT) LX MUST BE .GE. 1 AND LX MUST BE .LT. NX.

LY - Y-DIRECTION INTERVAL FOR WHICH SPLINE COEFFICIENTS HAVE BEEN CALCULATED. (INPUT) LY MUST BE .GE. 1 AND LY MUST BE .LT. NY.

C - 4 BY 4 MATRIX OF SPLINE COEFFICIENTS. (INPUT) THE SPLINE COEFFICIENTS CAN BE COMPUTED BY IMSL SUBROUTINE IBCICU.

XL,YL - (XL,YL) IS THE POINT AT WHICH THE SPLINE IS TO BE EVALUATED. (INPUT) THE FOLLOWING TWO CONDITIONS MUST HOLD,  
 1. X(LX) .LE. XL .LE. X(LX+1)  
 2. Y(LY) .LE. YL .LE. Y(LY+1).

FL - THE VALUE OF THE SPLINE APPROXIMATION AT (XL,YL). (OUTPUT)  
 FL = SUM OVER I,J OF  

$$C(I,J) * (XL - X(LX)) ** (I-1) * (YL - Y(LY)) ** (J-1)$$
 FOR I=1,...,4 AND J=1,...,4.

IER - ERROR PARAMETER. (OUTPUT)  
 WARNING ERROR  
 IER = 33, XL IS LESS THAN X(LX).  
 IER = 34, YL IS LESS THAN Y(LY).  
 IER = 35, XL IS GREATER THAN X(LX+1).  
 IER = 36, YL IS GREATER THAN Y(LY+1).

PRECISION/HARDWARE - SINGLE AND DOUBLE/H32  
 - SINGLE/H36,H48,H60

REQD. IMSL ROUTINES - UERTST,UGETIO

NOTATION - INFORMATION ON SPECIAL NOTATION AND CONVENTIONS IS AVAILABLE IN THE MANUAL INTRODUCTION OR THROUGH IMSL ROUTINE UHELP

```

C
SUBROUTINE FFFVLF(Y,N,YF)
C
C UNDIRFORRITID FFPVLF REIKNAR SIUNA
C SEM D.C.FRACER KOM FRAM MED I GREIN SINNI
C 'CONTOURING VLF-DATA' SEM BIRTIST I
C GEOPHYSICS ,DESEMBERHEFTINU 1969.
C
DIMENSION Y(N),YF(N),FM(4)
C
C VEKTORINN Y INNIHELDUR MAELIGILDIN,VEKTORINN YF INNI-
C HELDUR SIUDU GILDIN OG N ER FJOLDI MAELIGANNA.
C
LM = N - 3
DO 10 I = 1,LM
DO 20 K = 1,4
J = K + I - 1
FM(K) = Y(J)
CONTINUE
YF(I) = FM(3) + FM(4) - FM(1) - FM(2)
CONTINUE
10
C
C SIUDU GILDIN ERU STADSETT MITT A MILLI 2. OG 3.
C MAELIPUNKTS SEM NOTADIR ERU I HVERT SIUNARGILDI.
C
RETURN
END

```

Forrit fyrir TI 58/59 smátölvu til þess að reikna út síun D.C. Frasers. Mjög einfalt er að nota þessa aðferð úti í mörkinni.

Aðalforrit:	1.undirforrit:	2. undirforrit:
Lbl	Lbl	Lbl
A	CE	Exc
STO	RCL	RCL
04	04	02
SBR	+	STO
CE	RCL	01
SBR	03	RCL
Exc	-	03
RCL	RCL	STO
10	02	02
R/S	-	RCL
	RCL	04
	01	STO
	)	03
	STO	INV
	10	SBR
	INV	
	SBR	

Aður en byrjað er verður að setja 1.mælipunktinn í STO 01, 2. í STO 02, 3. í STO 03. 4. punkturinn er síðan settur í A og er svo gert við hvern nýjan mælipunkt sem á að reiknast með í síuninni.

```

c *****
c *** TERPRZ *****
c *****

```

```

c
c Þetta undirforrit tekur komplexan sagnavektor og
c 'taperar' 5% af hvorum enda sagnaradarinnar með
c cosinuskluukufallinu ( cosine bell function ). Með
c þessum hætti minnka afskurdarshrin. Undirforritið
c virkar aðeins með NDEC í kallsetningsu frábrugðið
c nulli.
c NDATA:= fjöldi sagnarpunkta á málisprofil.
c NDEC:= ef =0 þá fellur 'tapering' niður
c NTAPER:= fjöldi sagnarpunkta sem verða 'tapered'
c          hvoru megin.

```

```

c Subroutine TERPRZ(NDATA,NDEC)

```

```

c COMPLEX CX(128)
c COMMON CX

```

```

c IF(NDEC.EQ.0) RETURN

```

```

c PI=6.283185307178586
c NTAPER=NDATA*0.1+0.5

```

```

c Reikna 'taperfaktorana' fyrir hvert sildi og mersfalda
c þá við báða enda sagnaradarinnar.

```

```

c          DO 10 I=1,NTAPER
c             W=0.5*(1.- COS((I*PI)/NTAPER))
c             CX(I)=CX(I)*W
c             N=NDATA-I+1
c             CX(N)=CX(N)*W
10      CONTINUE

```

```

c Nulla ut sáttin sem ekki fellast með sagnarpunktum

```

```

c N=NDATA+1
c          DO 20 I=N,128
c             CX(I)=(0.,0.)
20      CONTINUE

```

```

c RETURN
c END

```

```

c *****
c *** DETRND *****
c *****

```

```

c Þetta undirforrit reiknar línulegt ánniheld sagnanna á
c forminu Co+Ci*(I-1)*Dx og drösur það frá komplexa sagns-
c vektornum. Forritið verkar á sögnin ef NDEC er frábrugðið
c nulli.

```

```

c NDATA   :=fjöldi sagnarpunkta
c NDEC    :=skvæðar hvort undirforritinu er beitt eða ekki
c Co      :=fastastuðull línunnar
c Ci      :=hallatala línunnar

```

```

c SUBROUTINE DETRND (DX,NDATA,NDEC)
c COMPLEX CX(128),CTREND
c COMMON CX

```

```

c
IF(NDEC.EQ.0) RETURN
c
Reiknun á stuðlum línunnar
c
SA=0
SIA=0
c
      DO 10 I=1,NDATA
        A=REAL(CX(I))
        SA=A+SA
        SIA=SIA+(I-1)*A
10    CONTINUE
c
N=NDATA-1
CO=(2*(2*N+1)*SA-6*SIA)/((N+1)*(N+2))
CI=6*(2*SIA-N*SA)/(DX*N*(N+1)*(N+2))
c
Línan dresin frá gögnunum
c
      DO 20 I=1,NDATA
        TREND=CO+CI*DX*(I-1)
        CTREND=CMPLX(TREND,0.)
        CX(I)=CX(I)-CTREND
20    CONTINUE
c
RETURN
END
c
*****
c
*** FFT ***
c
*****
c
Undirforrit þetta reiknar 'Fast Fourier'-farsluna á
komplexa gagnavektorunum. Það notar fjölda gagnarpunkta
sem heiltöluveldi af tveimur.
c
LX      := fjöldi punkta í CX vektorunum
SIGN    := 1 ef farslan er frá rúmi til hláðjutalna
          -1 ef farslan er frá hláðjutölum til rúms
c
SUBROUTINE FFT(LX,SIGN)
COMPLEX CX(128),CARG,CEXP,CW,CTEMP
COMMON CX
J=1
SC=SQRT(1./FLOAT(LX))
c
      DO 10 I=1,LX
        IF(I.GT.J) GOTO 100
        CTEMP=CX(J)*SC
        CX(J)=CX(I)*SC
        CX(I)=CTEMP
100     N=LX/2
200     IF(J.LE.N) GOTO 5
        J=J-M
        M=M/2
        IF(M.GE.1) GOTO 200
5       J=J+M
10     CONTINUE
c
L=1
400    ISTEP=2*L

```

```

c
      DO 20 K=1,L
      CARG=(0.,1.)*(3.14159265*SIGN*(K-1)/L
      CW=CEXP(CARG)
      DO 30 I=K,LX,ISTEP
      CTEMP=CW*CX(I+L)
      CX(I+L)=CX(I)-CTEMP
      CX(I)=CX(I)+CTEMP
30      CONTINUE
c
      CONTINUE
c
      L=ISTEP
      IF(L.LT.LX) GOTO 400
      RETURN
      END
c
      *****
c
      *****
c
      *** WDW61 *****
c
      Undirforritid reiknar sildi sionarsluggans. Fjöldi
      þeirra er aðeins helmingur af fjölda staka í sagnaröð-
      inni vegna samhverfunar í Fourierfærslunni Þessar
      færir er úr rúmi í bylgjutölur.
c
      K      :=bylgjutölurnar
      W      :=vektor sem inniheldur sionarsluggann
      AKX    :=tölusildið af K(I)
c
      SUBROUTINE WDW61 (K,W,K1,K2,DELTA,PI)
      REAL K(130),W(64),K1,K2,DELTA,AKX
c
      Reiknar sionarsluggann
c
      DO 10 I=1,64
      AKX=ABS(K(I))
      IF(AKX.LE.(K1-DELTA)) GOTO 31
      IF(((K1-DELTA).LT.AKX.AND.(AKX.LT.K1)) GOTO 32
      IF((K1.LE.AKX).AND.(AKX.LE.K2)) GOTO 33
      IF((K2.LT.AKX).AND.(AKX.LT.(K2+DELTA))) GOTO 34
      IF((K2+DELTA).LE.AKX) GOTO 35
c
31      W(I)=0.
      GOTO 10
c
32      W(I)=(1.-COS((K(I)-K1+DELTA)*PI/DELTA))*0.5
      GOTO 10
c
33      W(I)=1.
      GOTO 10
c
34      W(I)=(1.+COS((K(I)-K2)*PI/DELTA))*0.5
      GOTO 10
c
35      W(I)=0.
c
10      CONTINUE

```

