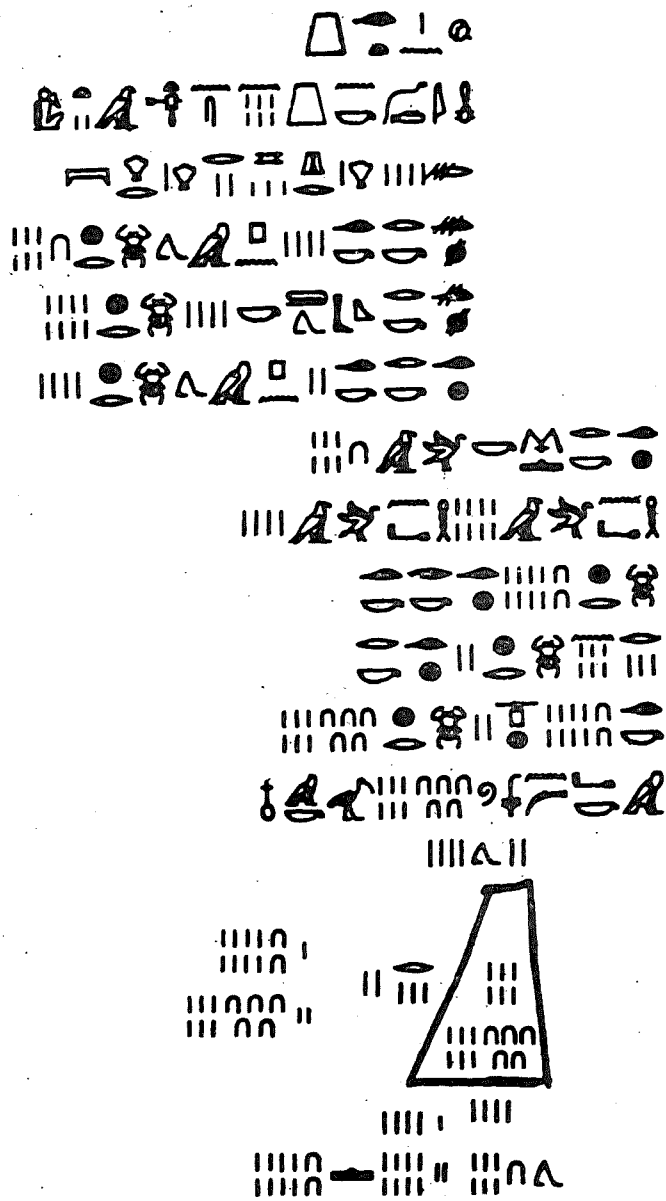


Ω OMEGA

BLAÐ STÚDENTA Í VERKFRÆÐIDEILD



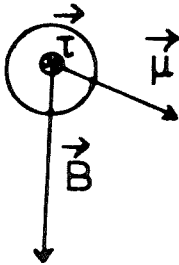
VORMISSERI 1969

próf. Þorbjörn Sigurgeirsson

UM MAGNA OG MÓÐA

Af fyrirsögninni mátti ætla, að grein þessi fjallaði um goðafræði, þar sem Magni og Móði voru synir Þórs. Svo er þó ekki. Hér verður lýst tveim mælitækjum, sem smíðuð hafa verið við Eðlisfræðistofnun og síðan Raunvísindastofnun Háskólans og hlotið hafa þessi heiti. Bæði eru tæki þessi ætluð til mælinga á segulsviði jarðar og eru þau að ýmsu leyti náskyld, eins og nöfnin benda til. Þau byggjast bæði á því, hvornig prótónur, eða vetniskjarnar, haga sér í segulsviði, svo rétt er að byrja á því að lýsa þessari hegðun.

Mynd 1



prótóna í segulsviði

Prótónan er örlítið ögn, hlaðin jákvæðu rafmagni, en það, sem snertir okkur sérstaklega í sambandi við segulmælingatækin, er að hún snýst um sjálfa sig - hefur hverfipunga- og einnig að hún er smásegull. Segulmómentið er einn af eiginleikum þeim, sem auðkennir þessa ögn og er jafn óbreytanlegt og massi hennar eða rafhleðsla. Sama er að segja um hverfipunga ("spinn") prótónunnar. Hvað stærð snertir er hann óbreytanlegur, en stefna hverfipungasektorsins getur þó breytzt. Stefna segulmómentvektorsins fellur saman við stefnu hverfipungavektorsins og breytist með henni. Sambandið á milli segulmómentvektorsins $\vec{\mu}$ og hverfipungavektorsins \vec{L} má því skrifa $\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{L}$ þar sem $\gamma = \frac{e}{2m}$ er hlutfallið á milli stærða þessa vektora. Sé prótónan í segulsviði, leitast sviðskrafturinn við að snúa prótónunni þannig, að segulmómentið fái sömu stefnu og segulsviðið. Kraftmómentið, sem verkar á prótónuna er $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$, þar sem \vec{B} er segulsviðið.

Vegna smæðar prótónunnar er ekki þess að vænta, að hreyfingarlögmál Newtons gefi rétta mynd af hegðun hennar, heldur verður að beita lögmálum skammtafræðinnar.

Hér vill þó svo vel til, að til þess að gera okkur grein fyrir undirstöðuatriðum áður nefndra segulmælingatækja þurfum við ekki að þekkja nákvæmlega háttalag hverrar prótónu, heldur fyrst og fremst meðalstefnu segulmóments margra prótóna. Þar sem meðalhegðunin svarar til hinna hefðbundnu lögmála Newtons er því unnt að öðlast skilning á undirstöðuatriðunum án þess að hafa hinar skammtafræðilegu reiknings aðferðir á valdi sínu.

Gerum þá ráð fyrir að prótónan snúist í segulsviðinu í samræmi við hreyfingarlögmál Newtons. Það hreyfingarlögmál, sem hér á við er

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

eða samkvæmt því, sem á undan er gengið

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\vec{\mu}}{dt}$$

Af líkingunni $\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma \cdot \vec{\mu} \times \vec{B}$ eða $d\vec{\mu} = d\vec{\mu} \times \vec{B} \cdot dt \cdot \gamma$ sézt að breyting $\vec{\mu}$ vektorsins er hornrétt á stefnu hans og breytir ekki stærð hans, en aðeins stefnu. Slík breyting svarar til snúningsvektorsins og er lýst með vektorlíkingunni $\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{\mu}$, þar sem $\vec{\omega}$ er snúningsvektorinn.

Sé þessi líking tengd því, sem áður er komið, fæst

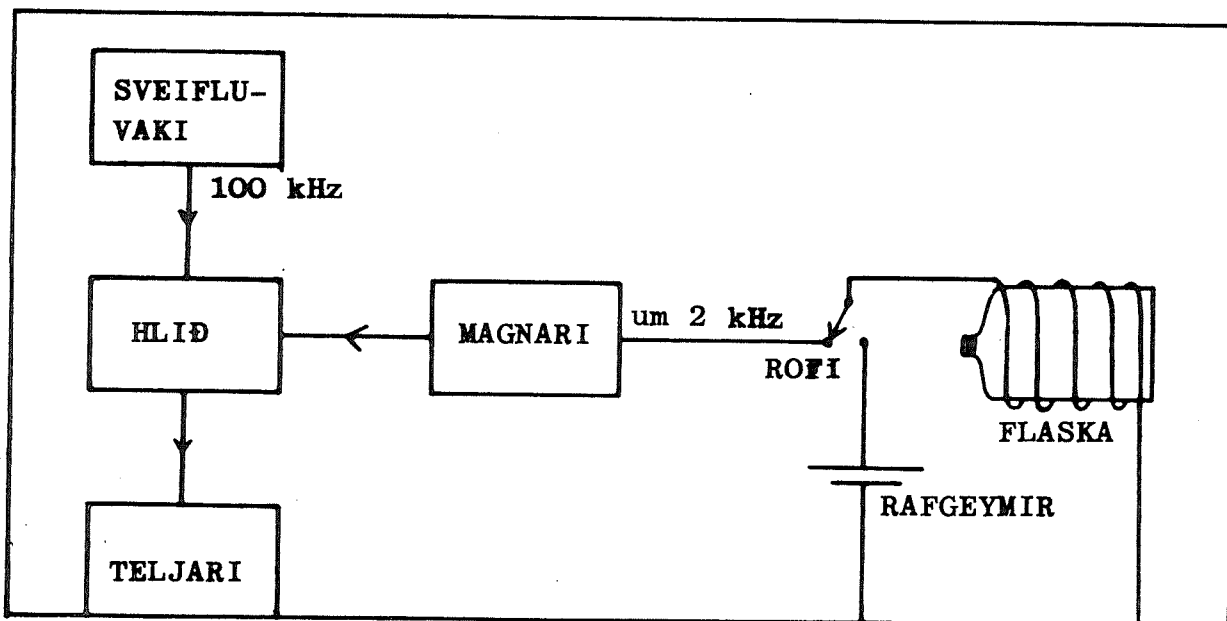
$$\vec{\omega} \times \vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{\mu} \times \vec{B} = -\gamma \cdot \vec{B} \times \vec{\mu}$$

en af því leiðir. $\vec{\omega} = -\gamma \cdot \vec{B}$

Niðurstaðan sýnir, að vektorinn $\vec{\mu}$ snýst um stefnu segulsviðsins, þannig að ef segulsviðið stefnir niður snýst vektorinn rangsælis. Hornhraðinn er $\omega = \gamma B$ eða tíðnin $\nu = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot B$ snúningar/sek.

Nú ber að minnast þess, að $\vec{\mu}$ er hér notað fyrir meðalgildi á segulmómenti margra prótóna. Sé n fjöldi prótóna í ákveðnu efnismagni, t.d. flösku af vatni, er samanlagt segulmóment allra prótóna í sýnishorninu $\vec{M} = n \cdot \vec{\mu}$ Með því að margfalda fyrri líkingar með n fæst

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{M} = -\gamma \cdot \vec{B} \times \vec{M}$$



Mynd 2
Magni.

Hvað segulverkun snertir má því líta á vatnið sem segul, sem snýst um stefnu B-sviðsins. Ef leiðsluþræði er undinn utan um vatnsflöskuna, spanast í honum riðstraumur með tíðninni $\nu = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot B = \frac{\mu}{2\pi L} \cdot B$. Nú er bæði segulmóment og hverfipungi prótónunnar þekktar stærðir, svo að mæling á tíðni riðstraumsins jafngildir mælingu á styrkleika segulsviðsins.

Svona auðvelt er þetta þó ekki. Ef við hellum vatni í flösku og vindum utan um hana leiðsluþræði, fáum við yfirleitt engan riðstraum í þræðinn. Það er vegna þess að prótónurnar snúna í allar mögulegar stefnur svo heildar-segulmóment vatnsins verður hverfandi lítið. Auk þess hefur það sömu stefnu og segulsviðið, það litla sem það er, svo ekki verður um neinn snúning að ræða um stefnu segulsviðsins. Hér verður að ráða bót á, ef mæling á að geta tekizt. Það þarf að fá prótónurnar til að raða sér sem mest í ákveðna stefnu, svo að vatnið segulmagnist, og þessi stefna þarf að vera sem þverast á stefnu segulsviðsins.

Innrammaða líkingin gefur til kynna, hvernig hægt er að stýra möndulstefnu prótónanna með segulsviðinu. Það má fá þær til að stefna í hvaða átt sem er, en þó kemur í ljós að afstæðan innbyrðis breytist ekki, þar sem öll segulmómentin snúast jafn mikið um sama ás. Með þessu móti verður prótónunum því ekki raðað.

En líkingin segir ekki allan sannleikann. Hún lýsir hegðun prótónanna þegar þær eru einar og ótruflaðar langt frá öðrum hlutum. Þar haga þær sér eins og skopparakringlur án snúningsmótstöðu. Hreyfingin heldur áfram í það endalausa og engin orkuskipti verða við umhverfið.

Vetniskjarnar vatnsins eru að vísu nokkurn veginn frjálssir að snúast eins og þá lystir, en þó má segja að um svolitla snúningsmótstöðu sé að ræða. Þessi snúningsmótstaða opnar

möguleika fyrir orkuflutning á milli prótónseglanna og vatnsins. Ef sterkt segulsvið er látið orka á vatnið, raða prótónuseglarnir sér meira og meira í stefnu sviðsins um leið og þeir gefa frá sér orku. Þannig segulmagnast vatnið í stefnu segulsviðsins, en þetta gerist ekki á einu augnabliki um leið og segulsviðið byrjar að orka á vatnið, heldur tekur það yfirleitt nokkrar sekúndur.

Þarna opnast leið til þess að raða prótónunum og gefa vatninu segulmóment, en snúningsmótstaðan hefur einnig í för með sér, að sú niðurröðun, sem sterka segulsviðið skapar, heldur ekki lengi eftir að segulsviðið hættir að verka, heldur ruglast niðurröðunin á líka fljótt og hún kemst á.

Þessi fræðilegi formáli verður látinn nægja og tekið að lýsa tækjum þeim sem um getur í upphafi greinarinnar. Magni var smíðaður á Eðlisfræðistofnun Háskólans á árinu 1959, en að smíðinni starfaði einkum Örn Garðarsson, verkfræðingur. Tæki af þessari gerð höfðu verið fundin upp í Bandaríkjunum nokkrum árum áður og voru að ryðja sér til rúms sem handhæg mælitæki.

2. mynd lýsir gerð tækisins. Í flöskunni er vatn eða annar vetnisauðugur vökvi, en utan um hana er undin spóla úr leiðsluþræði. Mæling hefst á því, að rofinn er tengdur rafgeyminum sem sendir straum í gegnum spóluna, en spóluásinn er látinn snúna nokkurn veginn þvert á stefnu segulsviðs jarðar. Við það skapast allsterkt segulsvið í vatninu og prótónurnar raða sér að nokkru í sviðstefnunna. Eftir nokkrar sekúndur er straumurinn rofinn, ekki skyndilega heldur er dregið úr honum svo hægt, að stefna segulmóments prótónanna í vatninu fylgir eftir stefnu segulsviðsins og hefur sömu stefnu og jarðsviðið þegar straumurinn er horfinn. Þá er smástraumur sendur í gegnum spóluna örstutta stund, þannig að stefna segulmómentsins snúist

um 90°. Segulmómentið er þá þvert á segulsvið jarðar. Spólan er nú tengd við magnarann, sem magnar straum-sveiflurnar, frá möndulsnúningi prótónanna. Spennusveiflurnar frá magnaranum stjórna raftæki, sem nefnt er hlið. Hliðið er á milli sveifluvakans, sem hefur tíðnina 100 kHz, og teljaran s. Þegar hliðið er opið, telur teljarinn sveiflurnar frá sveifluvaknum, en þegar það lokast komast sveiflurnar ekki á milli og teljarinn stöðvast. Í upphafi er hliðið lokað, en þegar nokkrar sveiflur eru komnar frá magnaranum, opnast það og helzt opið þar til ákveðinn fjöldi (N) af sveiflum er kominn til viðbótar frá magnaranum.

Nú má velja að vild, t. d. 2048. Teljarinn er stilltur á 0 í upphafi mælingar og talan n er lesin af honum þegar hann stöðvast. Þessi tala gefur tímann ($n \cdot 10^{-5}$ sek.), sem hliðið er opið, og tíðni möndulsnúnings prótónanna er þá

$$\nu = \frac{N}{n} \cdot 10^5$$
 snúningar á sekúndu.

Tölugildi stuðulsins γ í líkingunni $\nu = \frac{f}{2\pi} \cdot B$ er $2,67513 \cdot 10^8$ $\frac{wb \cdot sek}{m^2}$ og þar sem styrkleiki segulsviðs jarðar er í kringum $5 \cdot 10^{-5} \frac{wb}{m^2}$ verður tíðnin um 2 kHz. Sé N valið 2048 tekur tíðnimælingin um 1 sek. og styrkleiki segulsviðsins fæst úr líkingunni

$$\frac{2\pi \cdot 2048 \cdot 10^5}{2,67513 \cdot 10^8} = \frac{4,81022}{n} \frac{wb}{m^2}$$

Nákvæmni einnar mælingar getur orðið betri en ein gamma-eining ($10^{-9} \frac{wb}{m^2}$ eða hlutfallslega 0,0020/o, ef sveiflu-

vakinn er nægilega nákvæmur. Því er náð með því að láta kvartskrystal stjórna sveiflutíma sveifluvakans. Meiri mælinákvæmni mætti ná með því að lengja tímann fyrir tíðnimælinguna (hækka N), en vegna deyfingar segulmóments vatnsins, sem skapast af því að niðurröðun prótónanna ruglast, er ekki hægt að lengja tímann mjög mikið.

Að smíða móða hefur verið unnið við Eðlisfræði- og síðan í Raunvísindastofnun Háskólans öðru hvoru síðustu 6 árin ef með er talinn tíminn, sem fór í undirbúningsrannsóknir. Ýmsir hafa lagt þar hönd að verki og má nefna háskóla-studentana Þorstein Halldórsson og Þorvald Búason, og Björn Kristinsson verkfræðing.

Hugmynd að slíku tæki kom fram í Rússlandi og Frakklandi skömmu fyrir 1960 en nokkur vandkvæði voru á því að smíða handhægt mælitæki.

3. mynd skýrir gerð tækisins. Segulmagnun vatnsins fer hér fram með öðrum hætti en í magna. Vökvanum er dælt í gegnum sterkt segulsvið og þaðan eftir mjórri slöngu inn í flöskuna, en úr flöskunni rennur vökvinn aftur til dællunar. Í seglinum snúast prótónurnar í stefnu sviðsins svo vökvinn segulmagnast. Þegar vökvinn streymir út úr seglinum er segulsviðsbreytingin nægilega hæg til þess að stefna segulmóments vökvans fellur saman við stefnu segulsviðsins á hverjum stað og á leiðinni yfir í flöskuna hefur segulmagnun vökvans sömu stefnu og jarðsviðið.

Á meðan vökvinn er á leiðinni frá seglinum til flöskunnar, minnkar segulmagnun hans, eins og áður var á minnt. Hér er um að ræða veldisfall af tímanum $M = M_0 \cdot e^{-\frac{1}{2}\tau}$ þar sem tímastuðullinn τ fer eftir vökvanum, sem notaður

er. Fyrir vatn er hann nokkrar sekúndur, og öllu meiri fyrir toluol, sem mest hefur verið notað. Þessi stutti tíma-stuðull gerir nauðsynlegt, að vökvinn komist á fáum sekúndum frá seglinum til flöskunnar, svo að fjarlægðin á milli þeirra má ekki vera of löng. Hinsvegar er nálægð segulsins ekki heppileg ef mæla á segulsviðið í flöskunni vegna segultruflana þeirra, sem hann veldur.

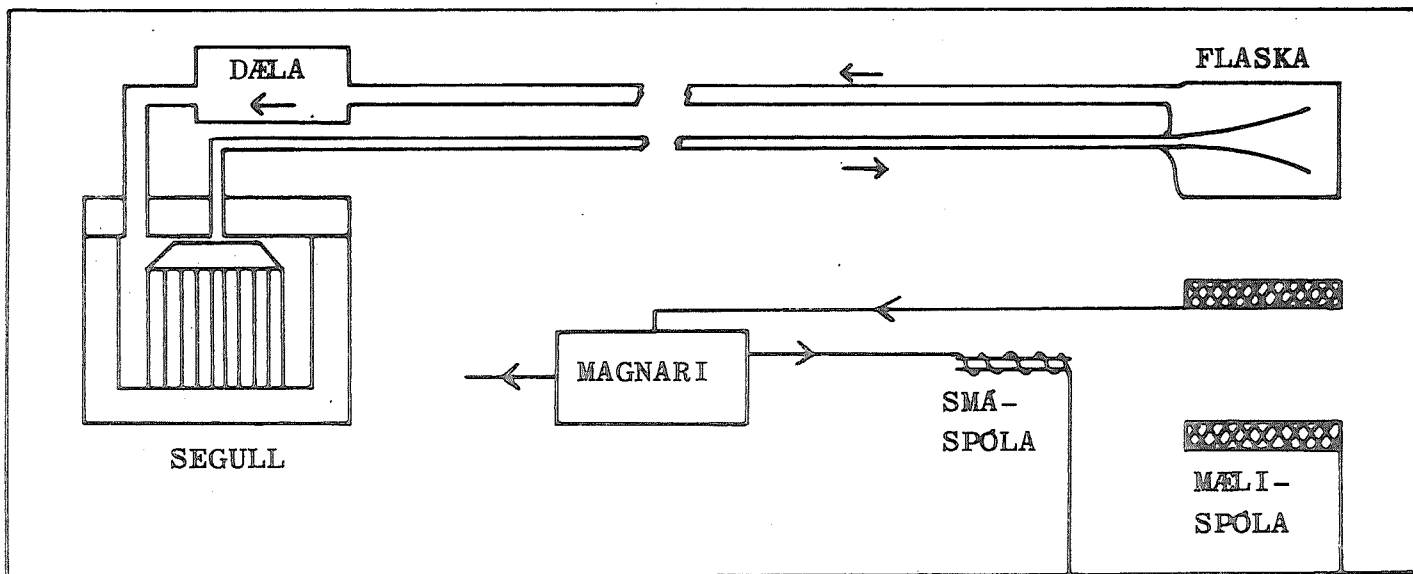
Stærð segulsins fer eftir kröfum þeim, sem gerðar eru um segulmagnun vökvans. Að öðru jöfnu verður hún í réttu hlutfalli við styrkleika segulsviðsins í seglinum, en hún fer líka eftir tímanum, sem vökvinn dvelur í seglinum. Segulmagnun vökva, sem skyndilega er settur í sterkt segulsvið, vex upp sem veldisfall af tímanum $M = M_0(1 - e^{-\frac{1}{2}\tau})$, þar sem τ er sami tímastuðullinn og áður var um getið í sambandi við minnkun segulmagnunarinnar.

Til þess að nálgast fulla segulmagnun (M_0) þarf vökvinn því að vera allmargar sekúndur í seglinum. Segullinn verður þá að vera því stærri sem rennslið er örara. Langur tímastuðull leyfir minna rennsli, en það stoðar lítið, þar sem þeim mun lengri tíma þarf til að vökvinn segulmagnast. Ef vökvahraðinn er aukinn og slangan þrengd að sama skapi, má að vísu auka bilið á milli seguls og flösku, en fljótt kemur að því að hraðinn verður ekki aukinn frekar og svarar til að fjarlægðin geti orðið nokkrir metrar.

Þegar öll þessi atriði eru vegin og metin, kemur í ljós að varla er unnt að uppfylla allar kröfur. Segullinn verður svo stór, að hann truflar segulsviðið, sem á að mæla. Vandinn var leystur með því að finna ráð til að stytta tímastuðullinn fyrir segulmagnun vökvans í seglinum og draga úr stærð segulsins að sama skapi. τ má stytta með því að blanda segulmagnuðu efni, svo sem uppleystu járnalti, í vökvann. Við það verða orkuskiptin við prótónurnar mun greiðari, svo að þær geta losað sig fljótt við segulorkuna og raðað sér í stefnu segulsviðsins. Það sama gerist, þegar prótóna kemur mjög nálægt yfirborði segulmagnaðs efnis. Segullinn á myndinni er þannig gerður, að í miðjunni er sísegull, rúmlega 3 cm há sivalningur úr ticonalstáli, sem er blanda úr járni, titani, kóbalti, nikkeli, áli og kopar. Utan um hann er segulhúsið, sívöl askja, 6 cm á hæð, úr mjúku járni.

Ofan á síseglinum er stykki úr mjúku járni, en milli þess og segulhússins er 1 mm bil. Í þessu bili er segulsviðið sterkast, rúmlega $1 \frac{wb}{m^2}$, og þar segulmagnast vökvinn, sem streymir þangað inn frá öllum hliðum og út um op á miðju loki segulhússins.

Til að flýta fyrir segulmagnun vökvans er fínni stálull troðið í þetta þrönga bil. Það hefur þau áhrif, að nú segulmagnast vökvinn á minna en einum tíunda hluta úr sekúndu, en án stálullar tekur það margar sekúndur. Þetta gerir mögulegt að ná góðri segulmagnun með litlum segli, en segultruflun frá seglinum, sem hér er lýst, þarf ekki að vera yfir hálfá gammaeiningu í 2 m fjarlægð. Þessa fjarlægð fer vökvinn eftir slöngunni, sem er 3 mm í þvermál, á 1 - 2 sekúndum.



Mynd 3. MÓÐI.

Þar með er fenginn grundvöllur fyrir nothæft mælitæki. Vökvarásin er sýnd efst á 3. mynd, en rafkerfið er sýnt neðar, enda þótt mælispólan eigi að vera utan um flöskuna, en smáspólan á að vera utan um slönguna frá seglinum rétt við flöskuna.

Straumsveifiurnar frá mælispólunni fara inn í magnarann, en frá magnaranum er aftur sendur straumur inn í smáspóluna. Hiutverk þessarar spólu er að snúa segulmögnun vökvans 90° svo að hún stefni þvert á jarðsviðið þegar vökvinn rennur inn í flöskuna. Annars fæst enginn riðstraumur frá mælispólunni.

Kostir þessa tækis fram yfir móða eru þeir, að segulmögnun vökvans er miklu sterkari og því ekki þörf á mikilli mögnun straumsins frá mælispólunni, en þó einkum að með móða verður mælingin samfelld og mun auðveldara að framkvæma tíðnimælinguna.

Merkið sem móði gefur frá sér er samfelld rafsveifla með tíðni í réttu hlutfalli við segulsviðið í flöskunni á hverjum tíma. Ýmsar aðferðir má nota til að mæla tíðnina og þar með segulsviðið. Hér verður lýst aðferð, sem notuð er við segulkortagerð úr lofti, þar sem móða er komið fyrir í flaug, sem dregin er af flugvél. Merkið kemur með rafleiðslu frá flauginni upp í flugvélinu og er þar sett beint inn á segulband. Á aðra rás á sama segulbandinu er sett merki með fasta tíðni (1000 Hz) frá kristalstyrðri klukku og á þriðju rásina tímamerki frá sömu klukku á 10 sekúnda fresti. Á þessa rás fara einnig sérstök merki, sem gefin eru með því að þrýsta með hendinni á rofa. Þau hafa öfuga spennu við tímamerkin og þekkjast því frá þeim. Loks er svo ein rás á segulbandinu fyrir tal.

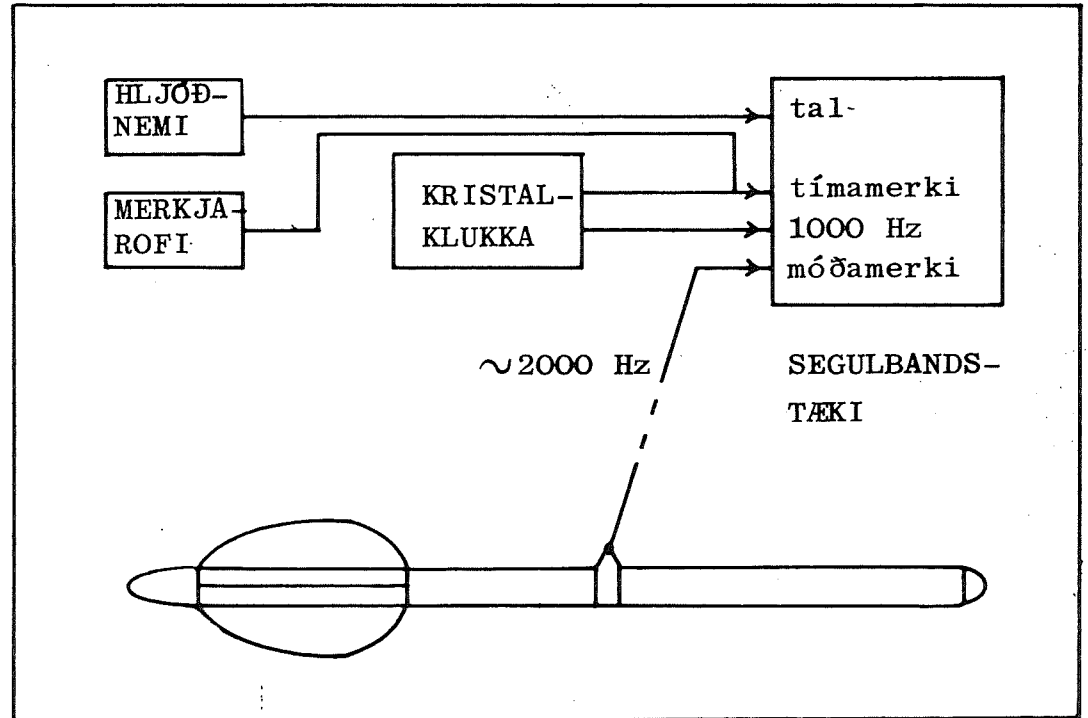
Á meðan á fluginu stendur er sjálf segulmælingin fyrirhafnar-

laus, en staðsetning er gerð með því að þrýsta á merkjarofann þegar vélin er yfir þekktum stað, merkja staðinn á kort og segja í hljóðnemann, hver staðurinn er. Tilhögun þessi er skýrð á 4. mynd

Eftir flugið er tíðnin mæld á þann hátt, að segulbandið er spilað og sveiflur móðamerkisins sendar inn á teljara, sem tengdur er gatara fyrir pappírsmæmi. Teljaranum er stjórnað af tímamerkjunum, þannig að hvert tímamerki gefur skipun um að gatarrinn skrifi töluna, sem er í teljaranum, auk tímans. Merkin frá rofanum hafa hinsvegar engin áhrif. Hér er um að ræða gataskrift, þar sem hver gatarröð þvert yfir pappírsmæmi tákna eina tölu. Þessi skrift hefur þann kost, að tölur geta lesið hana beint af ræmunni. Fyrirkomulag mælingarinnar er sýnt á 5. mynd. Hér er líka sýndur skrifari fyrir tímamerki og aukamerki frá rofanum. Um leið og segulbandið er spilað eru skrifaðar inn á þetta línurit allar upplýsingar sem talaðar voru inn á segulbandið og réttur tími skrifaður við tímamerkin. Síðan er braut flugvélarinnar dregin inn á landakortið og tíminn merktur á brautina.

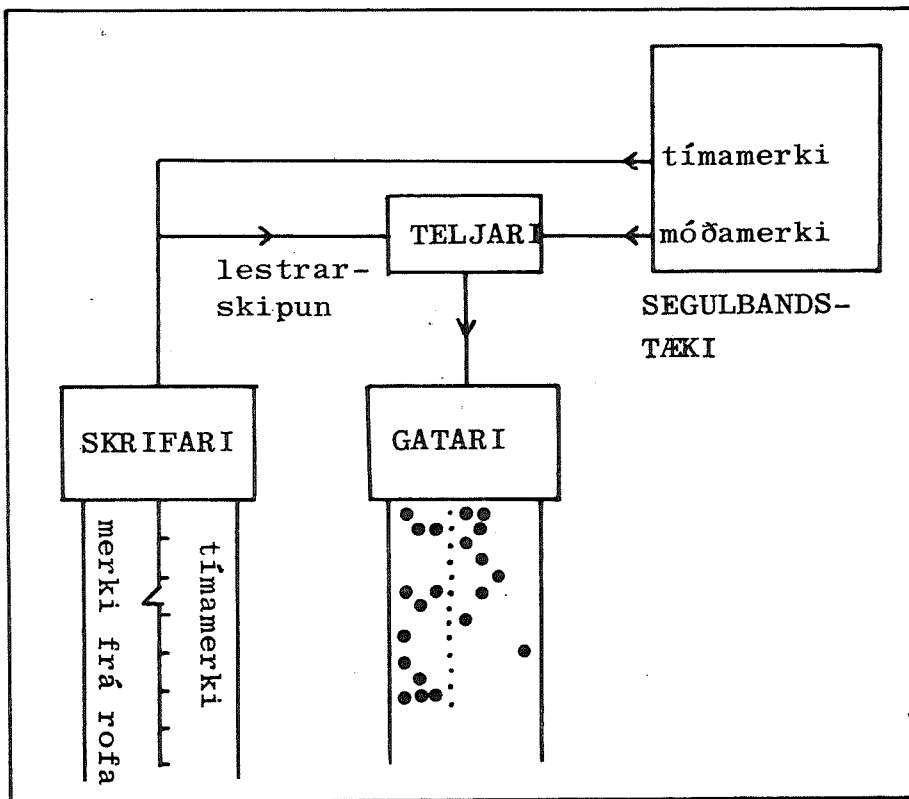
Tölván sér um alla útreikninga á segulsviðinu og skilar meðalgildum fyrir hvert 10 sekúnda tímabil í töfluformi. Með samanburði við mælingar frá Segulmælingastöðinni við Leirvog getur hún meira að segja leiðrétt fyrir tímabundinni truflun segulsviðsins á meðan á mælingu stendur. Eftir er þá aðeins að setja segulsviðsgildin inn á kortið. Allt annað er gert með sjálfvirkum vélum.

Reynslan hefur sýnt að móði er hið þarfasta tæki til segulmælinga, bæði í lofti og á jörðu niðri. Eitt slíkt tæki er stöðugt í gangi í Segulmælingastöðinni og sendir sveiflur sínar þráðlaust til Raunvísindastofnunar Háskólans, en þar



Mynd 4
Flugmóði.

er tíðnimælir, sem dregur línurit af styrkleika segulsviðsins.
Á línuritinu sjást allar breytingar segulsviðsins jafnóðum
og þær gerast.



Mynd 5
Lestrartæki fyrir flugmóða.