

Hæðar og þyngdarmælingar til eftirlits með
vinnslu háhitasvæða, ný viðhorf

Knútur Árnason

Greinargerð KÁ-98-02

1998-02-27

HÆÐAR OG ÞYNGDARMÆLINGAR TIL EFTIRLITS MEÐ VINNSLU HÁHITASVÆÐA, NÝ VIÐHORF

Landhæðar- og þyngdarmælingar hafa verið notaðar til að fylgjast með viðbrögðum jarðhitageyma við vinnslu bæði hérlendis og erlendis. Slíkt eftirlit er nauðsynlegt til að fylgjast með umhverfisáhrifum vinnslunnar og ekki síður til að fá upplýsingar um þrýsti- og massabreytingar í jarðhitageymunum. Þær upplýsingar eru mjög mikilvægar til að geta nýtt orkuforðann á sem hagkvæmastan hátt. Kostnaður við hæðar- og þyngdarmælingar hefur hins vegar verið það mikill að ekki hefur verið hægt að beita þeim eins mikið og samfelld og æskilegt hefði verið.

Í þessari greinargerð er gerð stutt grein fyrir þeim mæliaðferðum sem notaðar hafa verið og nýjum og ódýrari aðferðum sem nota má til að lækka kostnaðinn. Sett er fram tillaga að aðferðafræði sem lækkar kostnað verulega en skilar um leið ítarlegri gögnum um viðbrögð jarðhitageymanna við vinnslu.

1. Hæðarmælingar

Hæðarmælingar gefa upplýsingar um þrýstibreytingar, því að við það að vökvaprystingur minnkar í þorum bergsins falla þær saman að hluta og land sígur lítillega. Með því að kortleggja hæðarbreytingar má því fá upplýsingar um útbreiðslu þrýstibreytinga og afstæða stærð þeirra. Túlkun hæðarbreytinga yfir í þrýstibreytingar vegna vinnslu er þó háð því að ekki sé um að ræða hæðarbreytingar af öðrum orsökun svo sem jarðskorpuhreyfingar vegna höggunar og/eða tilfærslu kviku.

Hæðarmælingar á vinnslusvæði Hitaveitu Suðurnesja hafa sýnt landsig í takt við lækkandi þrýsting í jarðhitakerfinu. Ennfremur hefur mælst landsig á vinnslusvæði Hitaveitu Reykjavíkur á Nesjavöllum sem trúlega á rót sína í lækkandi þrýstingi vegna vinnslu.

Háhitavirknin er nátengd aðfærslu kviku innan eldvirku gliðnunarbeltanna og þar geta orðið verulegar afstæðar jarðskorpuhreyfingar á skömmum tíma. Jarðskorpuhreyfingar á og í nágrenni vinnslusvæðis Kröfluvirkjunar, samfara og í kjölfar Kröfluelda, hafa verið það miklar að þær hafa yfirgnæft hugsanlegar breytingar vegna vinnslu. Jarðskorpuhreyfingarnar fara minnkandi og gefur það von um að í framtíðinni megi nota hæðarmælingar til að fylgjast með útbreiðslu þrýstibreytinga. Á Ölkelduhálssvæði, austan Hengils, hafa verið í gangi jarðskorpuhreyfingar og hugsanlega er einhver hluti breytinganna sem sést hafa á Nesjallasvæðinu tengdar þeim.

Þó að landsig vegna vinnslu fari saman við minniháttar jarðskorpuhreyfingar kann að vera mögulegt að greina þar á milli að einhverju leiti. Til þess að svo megi verða þarf hinsvegar nákvæm og samfelld kort af útbreiðslu hæðarbreytinga með tíma.

1.1 Fallmælingar

Hæðarmælingar til vinnslueftirlits hérlendis hafa til þessa verið gerðar með fallmælingum. Þær eru mjög tímafrekar og kostnaðarsamar og hefur það orðið til þess að umfang mælinganna hefur verið minna en æskilegt væri. Þetta á bæði við um hversu vel útbreiðsla hæðarbreytinga er kortlögð (fjöldi mæli lína) og eins hversu ört mælingar eru gerðar.

1.2 GPS-mælingar

Á undanförunum árum hafa orðið miklar framfarir í landmælingatækni. Með tilkomu GPS-mælinga hafa almennar landmælingar orðið mun auðveldari og kostnaðarminni en áður var. GPS-mælitæknin hefur nú þróast svo að fýsilegra er að beita henni til hæðarmælinga en fallmælingum. GPS-hæðarmælingar eru orðnar verulega ódýrari en fallmælingar, en á móti kemur að nákvæminin er minni (um 2 cm) en í vel gerðum fallmælingum (um 2-5 mm/km). Í flestum tilfellum er réttlætjanlegt að slá af kröfum um nákvæmni til að minnka kostnaðinn.

Annað sem hafa verður í huga er að niðurstöður hæðarmælinga með fallmælingum annarsvegar og GPS-mælingum hinsvegar eru ekki beint sambærilegar. Fallmælingar mæla hæðir eftir mæli línum miðað við frjálst sjávarborð (geoíðu), en GPS-mælingar mæla hæð mælistaðar miðað við sporvölu (ellipsoíðu) jarðar. Frjálst sjávarborð getur verið breytilegt miðað við sporvöluna innan mælisvæðisins. Þetta hefur í för með sér að til þess að hægt sé að tengja eldri fallmælingagögn við GPS-mæligögn þarf að gera hæðarmælingar einu sinni með báðum aðferðum samtímis. Það er því nokkur fórnarkostnaður því samfara að skipta frá fallmælingum yfir í GPS-mælingar, en á móti kemur að mælingarnar verða ódýrari í framtíðinni. GPS-mælingarnar á mismunandi tímum eru að sjálfsögðu beint sambærilegar. Hversu mikið þarf að fallmæla þegar skipt er yfir í GPS-mælingar fer eftir því hversu umfangsmikillar tengingar (allt mælinetið eða hluti þess) er krafist milli gagnasafnanna.

1.3 SAR-bylgjuvíxl mælingar

Á allra síðustu árum hefur komið fram athyglisverð aðferð til að mæla breytingar í landhæð með tíma. Hér er um að ræða hina svokölluðu SAR-bylgjuvíxl mælingu með ratsjargervitunglum (SAR stendur fyrir ensku orðin Synthetic Aperture Radar). Aðferðin byggist á því að gervitungl fer eftir þekktum brautum frá norðri til suðurs yfir jörðu og endurtaka brautirnar sig með um mánaðar millibili. Tunglið sendir frá sér radarbylgjur og skráir endurkastbylgjurnar.

Þar sem brautirnar endurtaka sig er hægt að bera saman bylgjur sendar frá sama stað í geimnum og endurkastaðar frá sama stað á jörðu en á mismunandi tímum. Ef hæðarbreyting hefur orðið á endurkastsstaðnum í millitíðinni breytist endurkaststíminn og endurköstuðu bylgjurnar fá fasvik hvor miðað við aðra. Út frá fasvikinu og þekktri bylgjulengd radarbylgjunnar má finna breytinguna í fjarlægð milli

endurkastsstaðar og tunglsins.

Tunglið sendir til jarðar upplýsingar um endurkast frá mismunandi stöðum á yfirborði jarðar. Þær eru bútaðar niður í 100km x 100km stafrænar endurkastsbylgju"myndir" af yfirborði jarðar og er upplausn myndanna (eftir nokkra úrvinnslu) 100m x 100m. Með því að víxla saman bylgjumyndum sem teknar eru af sama svæði á jörðinni og frá sama stað í geimnum, en á mismunandi tímum, fæst mynd sem sýnir fasvik og þar með hæðarbreytingar á 100km x 100km svæði með upplausn upp á 100m x 100m.

Bylgjulengd radarbylgna er 56mm. Breytist fjarlægðin milli tungls og endurkastsstaðar um Δl á bilinu 0 til 28mm verður fasvikið $\Delta\phi$ á bilinu 0 til 2π . En þar sem fasvikið er lotubundið með lotuna 2π , verður fasvikið einnig á bilinu 0 til 2π fyrir allar fjarlægðarbreytingar Δl á bilinu $n \cdot 28\text{mm}$ til $n \cdot 28\text{mm} + 28\text{mm}$, þar sem n er heil tala. Á bylgjuvíxlmyndunum koma landhæðarbreytingar fram sem borðar eða "áhringir" í fasvikinu þar sem hver borði svarar til afstæðra breytinga um 0 til 28mm. Ef afstæð breyting milli tveggja staða er meiri en 28mm má finna hana með því að telja borðana milli þeirra.

Upplausn SAR-mælinganna í breytingum á fjarlægð milli tungsl og jarðar er um 5mm. Radargeislinn er sendur til jarðar undir 23° horni frá lóðréttu þannig að láréttar hreyfingar koma lítillaga fram, en lóðrétti þátturinn er yfirgnæfandi. Eins og áður segir er upplausnin í bylgjuvíxlmyndunum um 100m í lárétta stefnu. Ef afstæðar hæðarbreytingar verða meira en 28mm á 100m bili er ekki hægt að telja fasviksborðana. Þetta getur þýtt að ef miklar hæðarbreytingar verða á afmörkaðri spildu, þá verði ekki hægt að ákvarða hæðarbreytinguna, en útmörk spildunnar ættu að koma greinilega fram.

Fyrsta radargervihnettinum var komið á braut árið 1992. Freysteinn Sigmundsson á Norrænu eldfjallastöðinni hefur, í samstarfi við Frönsku geimvísindastofnunina, notað SAR-bylgjuvíxlmyndir til að kanna jarðskorpuhreyfingar á Reykjanesskaga og á Kröflusvæðinu. Niðurstöðurnar sýna greinilegt landsig kringum vinnslusvæði Hitaveitu Suðurnesja og einnig landsig yfir kvikuhólfinu undir Kröflu. Einnig mun franskur stúdent í doktorsnámi vera að beita SAR-aðferðinni til að kanna jarðskorpuhreyfingar á Suðurlandi á tímabilinu 1992 til 1997 og er Hengilssvæðið innan rannsóknarsvæðis hans.

SAR-aðferðin hefur marga kosti umfram aðrar aðferðir til landhæðarmælinga. Einn meginkostur er að enga vinnu þarf að leggja í gagnasöfnun, heldur einungis í úrvinnslu. Freysteinn Sigmundsson hefur komið upp hugbúnaði á Norrænu eldfjallastöðinni til að vinna úr radarmyndunum og tekur úrvinnslan skamman tíma. Annar stór kostur við SAR-aðferðina er að með henni fæst samfelld kort sem sýnir hæðarbreytingar á stóru svæði. Þetta er mikil framför því að það mundi kosta geysiumfangsmikið mælinet og vinnu ef fá ætti samskonar upplýsingar með mælingum á jörðu niðri. Notkun SAR-mælinga hérlendis lofar mjög góðu og virðast endurkastseiginleikar hér á landi vera mjög héppilegir, einkum á hraunasvæðum innan gosbeltanna. Þess ber að geta að endurkastseiginleikar snævar eru ekki góðir og mjög breytilegir. Það þýðir að einungis er hægt að nota radarmyndir sem teknar eru að sumarlagi til að gera bylgjuvíxlmyndir.

Þó að SAR-aðferðin lofi mjög góðu, verður að hafa í huga að hún er ekki fullreynd og eftir er að staðfesta niðurstöður hennar hérlendis með mælingum á jörðu. Veigamikilið skref í þá átt væri að gera fallmælingar á vinnslusvæði Hitaveitu Suðurnesja, á Hengilssvæðinu og á Kröflusvæðinu og bera mældar hæðarbreytingar saman við niðurstöður SAR-mælinga. Ekki er heldur talið rétt, að svo komnu máli að minnsta kosti, að reida sig eingöngu á SAR-mælingar til að fylgjast með hæðarbreytingum. Sá möguleiki þarf að vera fyrir hendi að sannreyna niðurstöðurnar með mælingum á yfirborði og jafnvel getur komið upp sú staða að SAR-mælingarnar geti ekki sýnt hversu miklar hæðarbreytingarnar eru, ef innbyrðis hreyfingar verða á mjög afmörkuðu svæði, eins og rakið var hér að framan. Þá er þess einnig að geta að ekki er á þessarri stundu víst að radargervitungr verði rekin samfellt og ekki hefur verið tryggt að rekstri þeirra verði ekki hætt í fyrirsjáanlegri framtíð, þó að engin áform um slíkt hafi verið kynnt. Það er því nauðsynlegt að hafa einnig net mælipunkta til mælinga á jörðu. Það yrði best gert með GPS-mælingum því að með þeim má gera mælingar í einstökum punktum þar sem þurfa þykir, en í fallmælingum þarf að gera samfelldar mælingar og oft eftir löngum línunum.

2. Þyngdarmælingar

Þyngdarmælingar mæla þyngdarhröðun og þar með massa undir og í nálægð mælistaðar. Fjarlægð frá massamiðju jarðar ræður lang mestu um þyngdarsviðið. Sé hæðarbreyting á mælistað milli mælinga á mismunandi tímum þekkt, er hægt að leiðrétta fyrir þyngdarbreytingum vegna breytinga í hæð. Komi fram mismunur í þyngdarsviðinu eftir þá leiðréttingu, stafar hann af massabreytingum í næsta nágrenni undir mælistað. Á þessu byggja þyngdarmælingar til eftirlits með vinnslu, því ef hæðarbreytingar eru þekktar er hægt að meta massabreytingar. Sé vitað hversu mikill massi hefur verið fjarlægður við vinnsluna á að vera hægt að sjá hversu vel massaforðinn endurnýjast.

Nauðsynin á að þekkja hæðarbreytingar milli mælinga með mikilli nákvæmni hefur til þessa takmarkað notkun þyngdarmælinga við mælipunkta sem fallmældir hafa verið. Reglan hefur verið sú að gera þyngdarmælingar samtímis fallmælingunum og mæla í þeim punktum sem fallmældir eru. Vegna þess hve fallmælingarnar eru dýrar hefur ekki verið hægt að fylgjast með útbreiðslu hæðar- og massabreytinganna eins og æskilegt hefði verið. Með því að nota SAR-mælingar eða GPS-mælingar til að fylgjast með hæðarbreytingum er hinsvegar hægt að gera þyngdarmælingar vítt og breytt um vinnslusvæðið og fá heildstætt yfirlit um massabreytingar.

3. Tillaga að aðferðafræði við hæðar- og þyngdarmælingar

Hæðar- og þyngdarmælingar til eftirlits með vinnslu á háhitasvæðum hafa verið of dýrar til að hægt hafi verið að beita þeim í þeim mæli sem æskilegt hefði gerið. Eftirfarandi tillögur að aðferðafræði miða að því að gera mælingarnar verulega ódýrari, en um leið skilvirkari og þannig að þær gefi mun ítarlegri upplýsingar en áður.

Lagt er til að komið verði upp neti punkta sem mældir eru með GPS-mælingum. Mestum hluta punktanna verði komið fyrir á eldri fallmælingalínunum, en einnig má

setja upp punkta utan þeirra til að fá reglulegri dreifingu um mælisvæðið.

Samtímis verði gerðar fallmælingar eftir hluta fallmælingalínanna til að fá tengingu milli fall- og GPS-mælinga. Hversu mikið verði fallmælt fer eftir því hversu víðtækrar tengingar er óskað milli aðferðanna.

Ennfremur verði á sama tíma fengnar SAR-radarmyndir til að meta hæðarbreytingar með bylgjuvíxlmyndum og þær bornar saman við mældar breytingar með fallmælingum.

Að því gefnu (sem lítil ástæða er til að efa) að fallmælingar staðfesti niðurstöður SAR-mælinganna, er lagt til að árlega verði keyptar SAR-radarmyndir af vinnslusvæðunum og gerð kort af hæðarbreytingum út frá bylgjuvíxlmyndum. Eins og áður segir hefur Freysteinn Sigmundsson lýst sig reiðubúinn að vinna myndirnar.

Komi upp álitamál við túlkun SAR-myndanna í framtíðinni verði skorið úr með því að gera GPS-mælingar í völdum punktum eða hluta GPS-netsins. Hugsanlega kann að vera rétt að mæla allt GPS-mælinetið aftur um 5 árum eftir að það var sett upp til að staðfesta niðurstöður SAR-mælinganna. Ekki er fyrirfram hægt að fullyrða hvort það er nauðsynlegt og verður ákvörum þar um tekin á grundvelli reynslu af SAR-mælingunum og samanburði við GPS-mælingar í völdum punktum.

Þyngdarmælingar verði gerðar á nokkurra ára fresti. Hversu oft þær verði gerðar ákvarðast af þyngdarbreytingum vegna massatöku. Hafi orðið verulegar breytingar með tíma eða önnur ástæða til að ætla að massabúskapur sé að breytast verulega má gera mælingarnar tiltölulega ört (á hverju ári), en sé massabúskapurinn talinn breytast hægt má líða lengra á milli mælinga (t.d. 3-5 ár). Með því að nota SAR-mælingarnar til að kanna árlegar hæðarbreytingar á öllu vinnslusvæðinu skapast mun meira svigrúm, bæði í tíma og rúmi, og þyngdarmælingarnar þurfa ekki að vera bundnar við mælipunkta hæðarmælinga á jörðu niðri eins verið hefur hingað til.

Langmesti kostnaðurinn við hæðar- og þyngdarmælingar til eftirlits hefur verið vegna fallmælinganna. Með því að skipta yfir í GPS-mælingar lækkar kostnaðurinn við hæðarmælingarnar verulega. Fyrir dæmigert fallmælinganet á háhitasvæði er kostnaður við fallmælingu alls netsins á bilinu 5 til 6 Mkr. Kostnaður við mælingu sambærilegs GPS-mælinets er metinn á bilinu 2 til 3 Mkr. Þyngdarmæling í sama neti kostar á bilinu 2 til 3 Mkr. Sé netið mælt á fimm ára fresti verður kostnaður um 1,6 Mkr á ári að meðaltali ef notaðar eru fallmælingar, en um 1 Mkr á ári ef notaðar eru GPS-mælingar.

Kostnaður við SAR-radarmyndir og úrvinnslu til að fá bylgjuvíxlmynd sem sýnir hæðarbreytingar á öllu mælisvæðinu er metinn um 350 þkr. Kostnaðurinn við að fylgjast með hæðarbreytingum frá ári til árs með SAR-mælingum er því einungis um 350 þkr á ári. Séu að auki gerðar þyngdarmælingar á fimm ára fresti verður kostnaðurinn að meðaltali um 0,85 Mkr á ári. Sé allt GPS-mælinetið einnig mælt á fimm ára fresti verður kostnaðurinn um 1,35 Mkr á ári að meðaltali.

Ef SAR-mælingarnar reynast eins vel og vonir standa til ætti ekki að þurfa að mæla allt GPS-netið, heldur einungis valda punkta eða hluta þess. Líklegt má því telja að

reyndin verði sú að það kosti um 1 Mkr á ári að fá árlega kort sem sýnir hæðarbreytingar á öllu vinnslusvæðinu og nágrenni þess og upplýsingar um massabreytingar á 5 ára fresti. Hér er því um að ræða verulega lækkun á kostnaði jafnframt því sem mun ítarlegri og samfeldari gögn fást um viðbrögð jarðhitakerfisins við vinnslu.