



## Notkun aflögunarmæla (*shape array*) í Þorskafirði

### Lokaskýrsla

---

Verkefnið er styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar

Mars 2024



# Lykilsíða

## Heiti skýrslu

Notkun aflögunarmæla (*shape array*) í Þorskaflirði

## English Title

The Use of Shape Array to Measure Settlement in Þorskaflirður

## Höfundar

Þorbjörg Sævarsdóttir, Verkbjörg  
Eggert Guðmundsson, VISTA verkfræðistofa  
Oddur S. Hagalín, Vegagerðin  
Reynir Georgsson, Vegagerðin  
Sigurbór Guðmundsson, Vegagerðin  
Guðmundur Ingi Guðmundsson, Vegagerðin

## Útdráttur

Aflögunarmæli (e. *shape array*) var komið fyrir undir vegfyllingu í Þorskaflirði til að mæla sig. Þar sem aðstæður voru erfiðar og sigmælingar mikilvægar í framkvæmdinni, var ákveðið að ráðast í þetta tilraunaverkefni. Þetta er fyrsti mælinn af þessu tagi sem settur er upp á Íslandi til að mæla lóðréttu jarðvegsaflögun á láréttan flöt, en aðferðin er þekkt erlendis og hefur m.a. verið notuð í Noregi vegna sjófyllinga. Mælinn var 50 m langur, með 1 m einingum, komið fyrir í rás -0,5 m.y.s., mælt sjálfvirkt á 4 tíma fresti og niðurstöður sendar beint upp í skýjalausn þannig að fylgjast mætti með siginu.

Niðurstöður mælinganna voru bornar saman við mælingar á hefðbundnar sigplötur og er góð fylgni á milli mæliaðferðanna. Með þessari aðferð er hægt að fylgjast mun betur með sigi, spara vinnustundir, ná fram hagkvæmni í framkvæmdinni með minni tíma ef sig kemur hratt fram og lengri tíma ef vegfylling er óstöðug. Einnig má auðveldlega færa rök fyrir því að með tíðari mælingum, t.d. með aflögunarmæli prófuðum hér, megi minnka áhættu á skerbroti í undirlagi vegna yfirálags á vegstæði, sem stuðlar að stöðugra og endingabetra mannvirki. Það er von höfunda að aðferðin verði notuð áfram og víðar.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður skýrslna ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

## Efnisyfirlit

<b>1 Inngangur</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Sigmælingar</b> .....	<b>5</b>
2.1 Sigplötur ( <i>e. settlement gauges</i> ) .....	6
2.2 Sigslöngur ( <i>e. hydrostatic tube</i> ) .....	8
2.3 Nemar sem greina hliðarfærslu – hallamælar ( <i>e. inclinometers</i> ) .....	10
2.4 Þrýstingsmælar ( <i>e. piezometers</i> ) .....	11
2.5 Aflögunarmælir ( <i>e. shape array</i> ) .....	12
<b>3 Þverun Þorskafjarðar</b> .....	<b>13</b>
3.1 Framkvæmdin .....	15
3.2 Mælingar .....	16
<b>4 Lokaorð</b> .....	<b>18</b>
<b>Heimildaskrá</b> .....	<b>20</b>

# 1 Inngangur

Mikilvægt er að Íslendingar kynni sér, aðlagi og kvarði aðferðarfræði sem reynst hefur vel annars staðar í heiminum, en íslenskar aðstæður eru yfirleitt að einhverju leiti frábrugðnar erlendum aðstæðum. Í þessu rannsóknarverkefni var möguleiki þess að nota sjálfvirkar mælingar vegna formbreytinga undir og við vegbyggingar og önnur samgöngumannvirki skoðuð.

Vöktun á sigi er nauðsynleg til að meta hugsanleg vandamál og til að stýra áhættu sem tengist tilfærslu jarðvegs á eða undir yfirborði við fergingu. Til dagsins í dag hafa sigmælingar á Íslandi aðallega farið fram með tvennum hætti, annars vegar með sigplötum sem mæla staðbundið sig þar sem þeim er komið fyrir og hins vegar sigslöngum sem mæla sig yfir þversnið vegbyggingar. Báðar þessar aðferðir eru handvirkar og eru mælingar viðkvæmar fyrir umhverfisáhrifum, svo sem hita og vindi. Aðgengi að sigslöngum getur einnig verið takmarkað, t.d. við sjávarfyllingar. Einn helsti áhættuþáttur við notkun sigplatna eru tíðar ákeyslur vinnuvéla á rör sem fast er við plöturnar, sem þarf þá að endurnýja, og dregur þar af leiðandi úr nákvæmni og áreiðanleika mælinga.

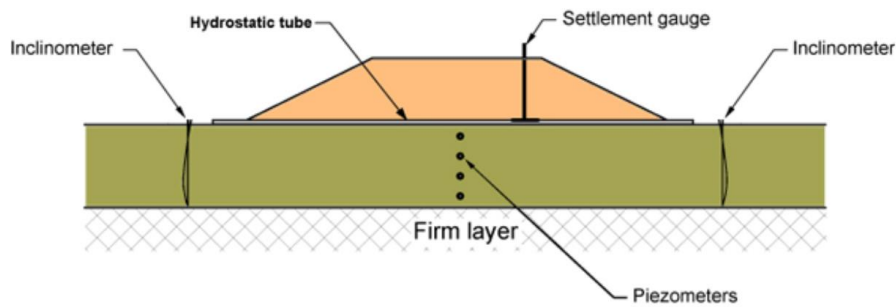
Með tíðari og auðveldu aðgengi að sigmælingum opnast möguleiki fyrir hönnuði, verkkaupa og verktaka að endurskoða sigspár með reglulegu millibili, en þannig má hugsanlega draga úr framkvæmdatíma og efnismagni í fergingar. Ef sig er minna heldur en spár gerðu var ráð fyrir, má hugsanlega draga úr yfirhæð, en að sama skapi ef sig er meira en spár gerðu ráð fyrir þarf hugsanlega að bæta við farghæð eða lengja tímamann sem farg liggur þannig að mannvirkið verði stöðugra, betra og þarfnist minna viðhalds. Þá má grípa fyrir inn í ef sigmælingar gefa til kynna brot í undirlagi vegna ofhleðslu á fargi eða mismunasigs. Sjálfvirkar mælingar spara einnig umtalsverða manntíma þar sem hver handvirk mæling á sigslöngu eða plötu tekur að minnsta kosti einn manntíma við bestu mögulegu aðstæðum, en mæling á sigslöngu krefst að lágmarki tveggja einstaklinga og tíminn getur margfaldast fljótt við erfiðar aðstæður.

Aðstæður við þverun Þorskafjarðar voru með því móti að erfitt eða nær ómögulegt var að mæla á sigslöngur, vegna þess að vindur var of mikill, blása þurfti sjó úr slöngum, lítið svæði á fyllingu til að athafna sig og erfitt að komast að slönguenda í fláa með rofvörn. Þá var oft vindasamt þannig að ómögulegt var að innmæla á sigplötur svo dögum skipti. Sig hafði mikil áhrif á framkvæmdina bæði hvað varðar tíma sem og efnismagn sem fór í fyllinguna og sigmælingar því mjög mikilvægar.

Í janúar 2023 var komið fyrir aflögunarmæli (e. *shape array*) undir vegfyllingu í öðrum áfanga þverunar Þorskafjarðar þannig að fylgjast mætti með sigi og formbreytingum undirlagsins með sjálfvirkum mælingum. Verkefnið var samstarfsverkefni Vegagerðarinnar og Vista verkfræðistofu sem er söluaðili mælisins. Vista verkfræðistofa hafði þegar sett upp aflögunarmæli til að fylgjast með láréttri tilfærslu á jarðvegi við Seyðisfjörð en þetta var í fyrsta skipti sem lóðrétt færsla var mæld með búnaðinum á Íslandi (Verfræðistofan Vista ehf, án árs).

## 2 Sigmælingar

Á Norðurslóðum hafa fjórar gerðir mælitækja eða vöktunarbúnaðar mest verið notaðar til að greina sig og formbreytingar í undirlagi: sigplötur (e. *settlement gauges*), sigslöngur (e. *hydrostatic tube*), nemar sem greina hliðarfærslu (e. *inclinometers*) og þrýstingsmælar (e. *piezometers*) (mynd 1). Þessar mælingar eru og hafa verið að hluta til handvirkar en ekki sjálfvirkar. Á Íslandi hefur nær eingöngu verið stuðst við handvirkar mælingar á sigplötur og sigslöngur. Aflögunarmælar (e. *shape array*), sem verið er að prófa hér, eru í raun röð sjálfvirkra hallamæla (Measurand, 2023; RST, 2023).



Mynd 1 – Tegundir mælitækja til mælinga og vöktunar á formbreytingum í undirlagi (Roadex Network, 2023).

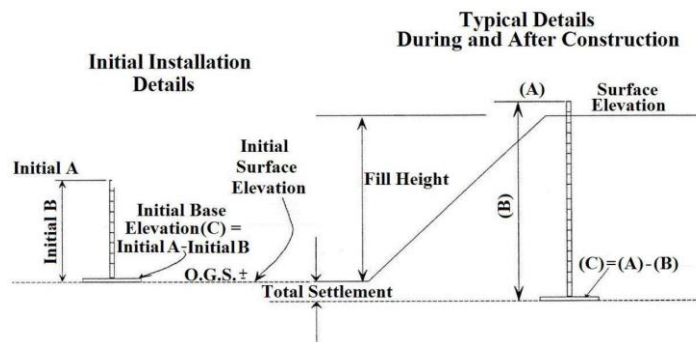
## 2.1 Sigplötur (e. settlement gauges)

Sigplötur eru ætlaðar til þess að mæla sig og sigræða, og eru því oft nýttar til að mæla formbreytingar undir undirstöðum ýmissa mannvirkja, svo sem húsbýgginga, brúa, fyllinga og stíflna. Sigplötur geta verið tvenns konar, annars vegar sigplötur á yfirborði sem síðar verður fergt og hins vegar niðurreknar sigplötur. Í báðum tilvikum er mælt á rörin með tilvísun í fastmerki þannig að mælingar séu áreiðanlegar og samanburðarhæfar. Undir vegfyllingar er mun algengara að sigplata sé lögð á yfirborð undirstöðu.

Sigplötum er komið fyrir á jöfnu undirlagi, ýmist óhreyfðu landi eða á jöfnunarlagi til þess að fylgjast með sigi undirlags við framkvæmdir. Sigplötur samanstanda af flatrí plötu (300 til 500 mm á kant) með ásoðnu röri sem er nægjanlega langt til þess að ná upp fyrir yfirborðið. Áður en fyllt er yfir sigplötuna er hæð rörsins mælt. Gæta skal varúðar þegar fyllt er að og þjappað svo að platan og rörið skekkist ekki eða skemmist. Eftir því sem fyllingin hækkar er rörið lengt, en passa þarf réttan hæðarflutning á milli röra við útreikning (mynd 2 og mynd 3) (Roadex Network, 2023; Vegagerðin, 2021c; State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau, 2015).



Mynd 2 – Skýringarmynd af uppsetningu sigplötu (Vegagerðin, 2021c).

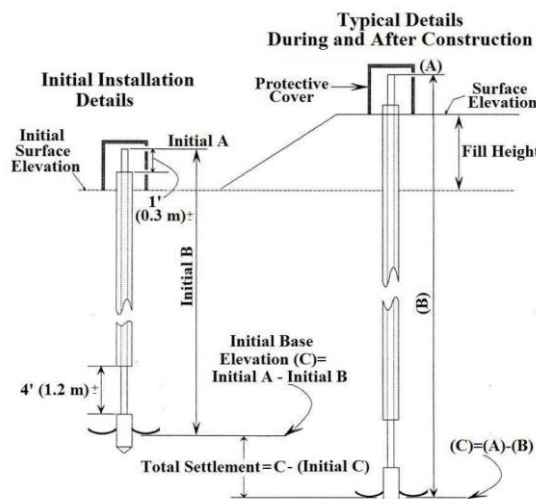


Mynd 3 – Skýringarmynd af uppsetningu sigplötu á yfirborði (State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau, 2015).

Niðurreknað sigplötur eru notaðar þegar skoða þarf hegðun jarðvegs á ákveðnu dýpi undir fyllingunni (mynd 4). Í stað plötu á botni rörsins er stuttur snigill á enda rörsins sem er skrúfaður niður í jarðveginn á ákveðið dýpi. Snigillinn sigur niður með jarðvegsmassanum sem gefur þá vísbandingu um sig jarðvegsmassans (Roadex Network, 2023; State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau, 2015).

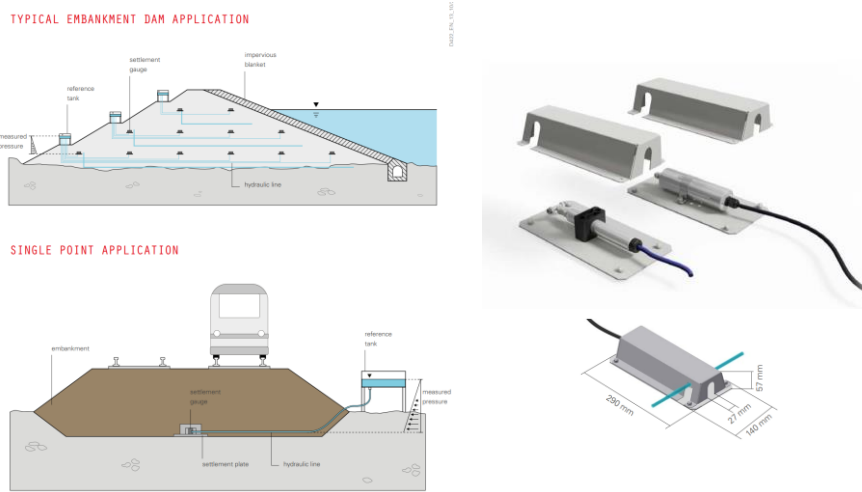
Tíðni mælinga er breytilegur og fer t.d. eftir því hversu viðkvæmt undirlagið er, hversu viðkvæmt mannvirknið er og hvar í framkvæmdinni verkið er statt. Ráðlögð tíðni mælinga er mjög mismunandi:

- Í ROADEX Network, sem er samstarfsverkefni nokkurra norður evrópskra landa, er ráðlögð tíðni mælinga um tvisvar í viku (Roadex Network, 2023).
- Í New York fylki er mælt með að mæla vikulega (State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau, 2015).
- Samkvæmt verklýsingu Vegagerðarinnar skal mælt á sigplötu á 1., 4. og 7. degi eftir að álagi (fargi) er bætt við fyllinguna og áður en nýtt álagsþrep er lagt út. Þegar farg er komið í fulla hæð skal mæla á 1., 4. 7. og 14. degi eftir gerð fyllingar og síðan á mánaðar fresti þar til fullnægjandi sigi hefur verið náð (Vegagerðin, 2021a).



Mynd 4 – Skýringarmynd af uppsetningu niðurrekinnar sigplötu (State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau, 2015).

Með aukinni tækni hafa verið að ryðja sér til rúms sjálfvirkar mælingar á siglötur þar sem notast er við þrýstingsmæla sem tengdir eru við plöturnar (mynd 5). Sambærilegur búnaður er notaður við stíflur að Kárahnjúkum (mynd 6) (Sisgeo, 2023).



Mynd 5 – Dæmi um sjálfvirkar sigmælingar á plötur (Sisgeo, 2022).



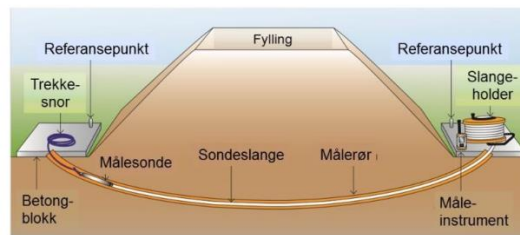
Mynd 6 – Sigmælingar að Kárahnjúkum (Iannaccone, 2015).

## 2.2 Sigslöngur (e. hydrostatic tube)

Sigslöngur er aðferð sem notuð er til að mæla lóðréttar aflaganir í vegfyllingum, við lagnir eða malarpúða og undir önnur mannvirki. Aðferðin byggist á því að mæla þrýstingsbreytingar með nema sem er dregin í gengum pípu/rör sem er komið fyrir undir fargi áður en formbreytingar eiga sér stað. Þrýstingsbreyting er skráð með ákveðnu lengdarbili eftir rörinu, og hæðir þeirra bornar saman við viðmiðunarhæðir á hælum við enda röranna (mynd 7). Þessi aðferð var þróuð af sænsku Jarðtæknistofnuninni (SGI) (Vegagerðin, 2021d; Roadex Network, 2023; Statens vegvesen, 2018).

Sigslöngur eru yfirleitt PEH plaströr með 63 mm þvermál, en lengd slöngunnar er háð lengd sniðins sem skal mæla og mælíbúnaði. Mælst er til að jafna yfirborð lands áður en slöngur eru lagðar og er best að gerð sé þröng rás, sem er sönduð áður en slöngunni er komið fyrir. Ef beygjur slanganna eru of krappar þá getur reynst erfitt að mæla á þær, og er lágmarksradíus 2,5 metrar (mynd 7 og mynd 8).



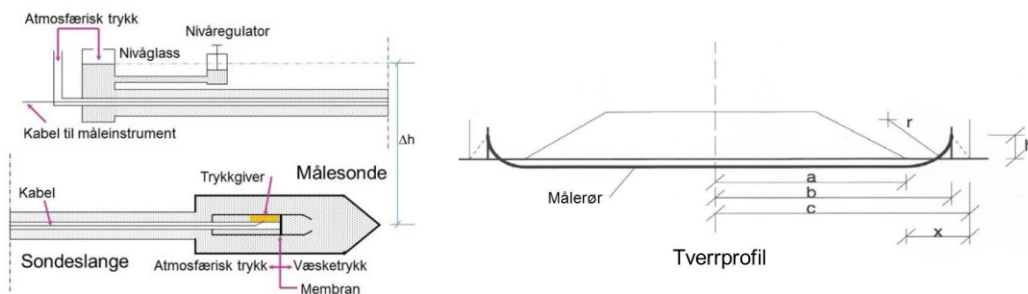


Mynd 7 – Staðsetning og lögun niðurkominnar sigslöngu undir vegfyllingu (Statens vegvesen, 2018).

Sigslöngur skulu ná út fyrir veg við fláafót og standa að minnsta kosti 1 m upp úr jarðvegi, með loki á endunum. Áður en fyllt er að þarf að hæðarmæla á land undir hverja sigslöngu, sem og mæla lengd slöngunnar og fjarlægð beggja enda frá miðlínu. Þá er sandað yfir sigslöngurnar, en góður frágangur er lyklatríði svo slangan klemmist ekki (falli saman) en þá er erfitt eða ómögulegt að mæla hana.

Flest sigslöngumælitæki samanstanda af tromlu, þrífót og aflestrartæki (mynd 8 og mynd 9), en frá flestum framleiðendum er meginreglan í mælingum sú að rafþrýstingsnemi skráir þrýstinginn gegnum himnu í mælitækinu sem orsakast af stigstýrðri vökvasúlu. Efsti hluti vökvasúlunnar (í tromlu) er stilltur af við merki á vökvasúlu, en merkið má tengja við þekkt viðmiðunarstig. Þegar þéttleiki mælivökvans (oft frostlögur) er þekktur er hægt að reikna út stigsmuninn. Vökvaþyllt slangan gefur þrýsting á aðra hlið himunnar á meðan á hinni hliðinni er op gegn andrúmsloftsþrýstingi.

Mikilvægt er að tromlunni sé komið fyrir á stöðugum stað í lágmarks halla, og í meiri hæð heldur en sigslangan. Opnað er fyrir vökvasúluna og þrýstingurinn í kerfinu er aðlagður. Það getur reynst nauðsynlegt að gefa tækinu tíma til að aðlagast umhverfishitastigi áður en mælingar hefjast, en best er að reyna að forðast hitastigsáhrif með upphituðu tjaldi á vetrum og skugga á sumrin. Þegar búið er að kvarða mælitækið, og mæla á hæl við enda slöngunnar, er stál neminn þræddur inn í slönguna og tekin mæling með ákveðnu millibili en ágætt er að miða við mælingu á meters fresti. Gott er að mæla hæð fyllingar í miðjunni, á báðum öxlum og landhæð við fláafót samhliða mælingum á sigslöngur.



Mynd 8 – Meginregla í aðferðafræði mælinga og úrvinnslu, skýringarmyndir (Statens vegvesen, 2018).



Mynd 9 – Dæmi um sigslöngumælitæki í folti (Statens vegvesen, 2018) og horft ofaní tromlu mælitækis í eigu Vegagerðarinnar.

Tíðni mælinga er breytilegur en skv. verklýsingu Vegagerðarinnar skal mælt á sigslöngur á 1., 4. og 7. degi eftir að álagi (fargi) er bætt við fyllinguna og áður en nýtt álagsþrep er lagt út. Þegar farg er komið í fulla hæð skal mæla á 1., 4. 7. og 14. degi eftir gerð fyllingar og síðan á mánaðar fresti þar til fullnægjandi sigi hefur verið náð (Vegagerðin, 2021a). Í norsku R211 handbókinni fer tíðni mælinga eftir væntanlegum sigi, sikhraða og ásættanlegu sigi og er því breytilegt eftir verkefnum. Þannig þarf í sumum tilfellum að mæla vikulega en í öðrum verkefnum er einungis mælt nokkrum sinnum á ári. Þá er mælt til að sama tækið sé notað og að sami rekstraraðili framkvæmi mælingarnar til að draga úr skekkju (Statens vegvesen, 2018).

Almennt er tímafrekt að mæla á sigslöngur auk þess sem sæta þarf lagi, t.d. ef vindur er mikill eða breyting á hitastigi er hröð getur reynst erfitt að fá nákvæma mælingu. Þá getur þurft að blása úr rörinu áður en mælt er ef vatn hefur komist inn í rörið. Reynsla höfunda er að hver mæling taki 2 einstaklinga um 30 mínútur, eða 1 manntíma, við bestu mögulegu aðstæður, þegar ekki þarf að blása úr slöngunni, ekki þarf að bíða eftir að tækið aðlagist breyttu hitastigi, vindur er lítil/enginn o.s.frv.

Vegna aðstæðna í Þorskaflirði voru mælingar tímafreakari auk þess sem meiri mannskap þurfti til verksins:

- Verður var erfitt, oft mikill vindur og ísing, auk þess eingöngu hægt að mæla á fjöru, en á flóði náði sjór af hátt upp á fyllinguna.
- Innmælingar voru erfiðari þar sem viðmiðunarpunkturinn var á fyllingunni sjálfri.
- Endar á rörinu voru út í sjó, og því þurfti iðulega að blása úr rör með borvögnum (mynd 10).

Hver mæling gat því tekið allt að 2 klukkustundir fyrir 3 til 4 menn með viðeigandi búnað, eða 6-8 manntíma.

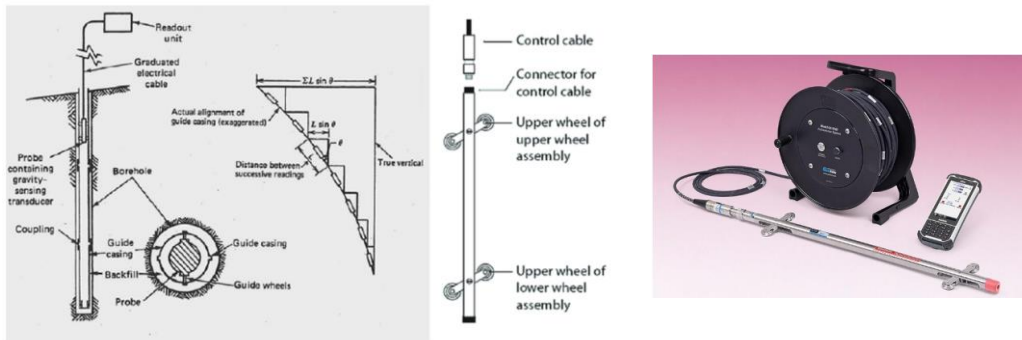


Mynd 10 – Sigslanga út í sjó, sett niður í fyrsta áfanga við þverun Þorskafljarðar.

### 2.3 Nemar sem greina hliðarfærslu – hallamælar (*e. inclinometers*)

Hallamælar skrá allar hreyfingar í jarðvegi, grjóti eða mannvirki sem fall af tíma og nýtist t.d. við vöktun á brekkum þar sem hætta er á skriðuföllum, aflögun í stoðvirkjum á byggingarstigi eða á notkunartíma. Búnaðurinn byggir á mælingu á hornabreytingum yfir mælilengd miðað við fyrir fram ákveðið viðmiðunarplan. Þegar skráðar hornabreytingar yfir mælilengdina eru lagðar saman má draga upp aflögunarferil sem fall af tíma. Hægt er að lesa af búnaðinum handvirkt, sem er ef til vill algengara við vegaframkvæmdir, en það má einnig setja upp sjálfvirka vöktun (mynd 11). Búnaðurinn getur nýst vel við vegagerð þar sem hætta er á lóðréttu sigi þar sem slíku sigi fylgir oft einhver hliðartilfærsla í stefnu frá því svæði sem álagið liggur á. Slík hliðartilfærsla getur valdið aukningu í

lóðréttu sigi fyllingarinnar um allt að 15%. Í vegagerð er mælum til að kanna hliðarfærslu yfirleitt komið fyrir við fláafót fyllingar, en slíkar mælingar geta komið sér vel þar sem óeðlilega miklar hliðarfærslur eru til staðar og geta þá t.d. nýst við greiningu á stöðugleikavandamálum jarðvegsmassans (mynd 11). Aðferðin hefur ekki verið mikið notuð við vegagerð á Íslandi og verður því ekki fjallað nánar um hana hér (Statens vegvesen, 2018; Roadex Network, 2023).

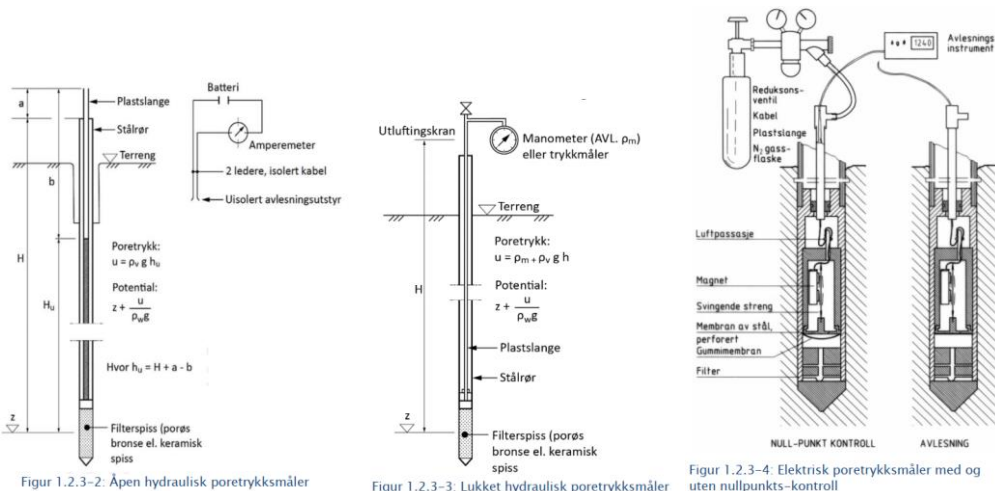


Mynd 11 – Dæmi um hallamæli (e. inclinometer) (Encardio Rite, 2019; Statens vegvesen, 2018).

## 2.4 Þrýstingsmælar (e. piezometers)

Þekking á grunnvatnsstöðu og vatnsþrýstingi í jarðvegi og bergi yfir ákveðin tíma er oft nauðsynleg þegar verið er að meta t.d. stöðugleika jarðvegs vegna fyllingarvinnu, uppgröfts, niðurreksturs staura og svo mætti lengi telja. Við fergingu leitar vatn út úr jarðvegi og hefur það ferli, þ.e. vatnslosun efnisins, mikil áhrif á magn og hraða sigsins. Til eru margar gerðir þrýstingsmæla, bæði handvirkir og sjálfvirkir, með mikla og litla nákvæmni, til að mæla lárétt og lóðrétt, frá opnum einföldum holum til lokaðra (mynd 12) (Encardio Rite, 2021; Statens vegvesen, 2018).

Ein gerðin er titringsvíramælir (e. vibrating wire piezometer) sem samanstendur af segulmögnum vír og áfastri þynnu. Vírin er með mikinn togstyrk og er hann fastur í annan endann á meðan hinn endinn er festur við þynnu sem bognar í hlutfalli við þrýsting sem hún verður fyrir. Þannig er kerfið næmt fyrir þrýstingsbreytingu, þar sem spennan á vírnum breytist með breyttum þrýstingi (mynd 12). Þar sem ekki er verið að skoða vatnsþrýsting í þessu verkefni þá verður ekki fjallað frekar um þrýstingsmæla hér.



Figur 1.2.3-2: Ápen hydraulisk poretrykksmælar

Figur 1.2.3-3: Lukket hydraulisk poretrykksmælar

Figur 1.2.3-4: Elektrisk poretrykksmælar med og uten nullpunkts-kontroll

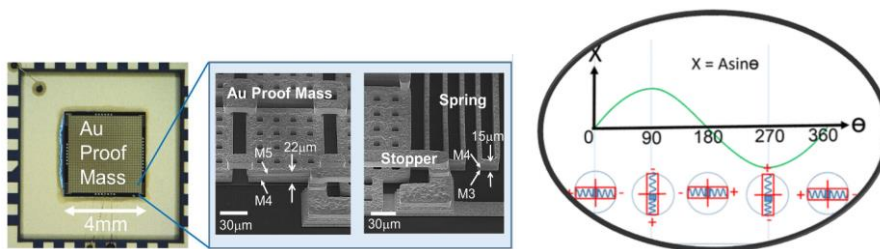
Mynd 12 – Dæmi um þrýstingsmæla (e. piezometers) (Statens vegvesen, 2018).

## 2.5 Aflögunarmælir (e. *shape array*)

Shape Acceleration Array (SAA) eða aflögunarmælir er í raun rísa tommustokkur eða hallamælir sem er settur saman af fjölmörgum jafnlöngum einingum, en hver einnig er 25, 50 eða 100 cm. Hallamælunum er komið fyrir í plaströri eða fóðraðri holu, þar sem hann mælir færslu og stefnu færslu á milli eininga.

Hallamælar (e. *inclinometers*) hafa verið notaðir lengi til að mæla til dæmis lögun leiðar í borholum og fylgjast með aflögun mannvirkja sem fall af tíma. Þetta hefur reynt vel, en í sumum tilfellum þarf að koma fyrir röð mæla og fylgjast með staðsetningu þeirra staðbundið og innbyrðis. Þróun fjölnema raða (e. *multi-sensor arrays*) með leiðara beygjuskynjun gerir það nú kleift að hægt er að mæla lögun og formbreytingar með fyrirfram kvörðuðum búnaði, ShapeTape. Sama hugmyndafræð hefur verið nýtt til að þróa og framleiða ShapaArray (aflögunarmæli) sem samanstendur af stífum, samsettum einingum sem geta náð meiri námkvæmni til lengri tíma sem og bættri endingu.

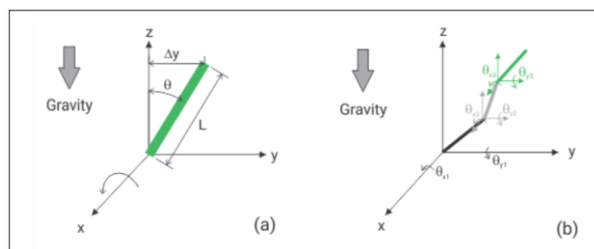
Hver eining hefur MEMS hröðunarmæli sem mælir halla og hlutfallslegt þyngdarafli í þrívídd meðfram x, y og z ásunum. MEMS skynjarinn er örlítið kort með hreyfanlegum massa tengdum fjöðrum úr kísilmálm (mynd 13). Á hverri einingu er einnig breytir sem varpar niðurstöðum úr hliðrænum í stafræn gögn, stafrænn hitamælir og örgjörvi (Measurand, án árs).



Mynd 13 – MEMS hröðunarmælir (til vinstri) samanstendur af massa sem kísilmálms fjaðrir halda. Þegar MEMS færir, færir massinn, en namar innan MEMS skynja staðsetningu massans og skila sem sínuslaga horni (til hægri)(Yamane, D et al, 2019; Measurand, án árs).

Shape Array tæknin notar MEMS hröðunarmælana til að ákvarða halla einstakra eininga með tilliti til þyngdarafilsins, en hver eining er stíf ryðfrí stöng og eru einingarnar tengdar saman með sveigjanlegum liðum en geta ekki snúist. Þannig má kortleggja lögun mælisins í þrívídd í rauntíma. Til að setja mælingarnar í samhengi eru útreikningar færslu miðaðir við upphafspunkt sem er stöðugur. Þannig má segja að Shape Array sé í raun keðja hallamæla (e. *inclinometers*), sem mæla lögun keðjunnar með því að vita innbyrðis halla og lengd hvorrar einingar innan keðjunnar (mynd 14) (Measurand, án árs).

Í þessu verkefni var notast við SAAX sem er lagður lárétt til að mæla lóðréttar færslur. SAAX getur verið allt að 200 m langur með einingar sem eru 1 m.



Mynd 14 – a) hallabreyting á einni einingu, b) halli og staðsetning fyrir samhangandi einingar (Measurand, án árs).

### 3 Þverun Þorskafljarðar

Þverun Þorskafljarðar er hluti af vegaf framkvæmdum á sunnanverðum Vestfjörðum, og liggur áfanginn frá Kinnastöðum í austri að Þórisstöðum í vestri og er 2,7 km langur (mynd 15 og mynd 16). Almennt er talið að berggrunnurinn við Þorskafljörð sé byggður upp á 5-10 m þykkum basaltlögum sem halla til suðausturs. Ísaldarjökklar hafa grafið niður í berggrunninn sem hefur síðan fyllst af seti, en austan megin í firðinum er áll, Kóngavakir, sem er um 70 m breiður og 1,5 m djúpur. Umhverfis álinn eru miklar grynningar, og á stórstraumsfjöru er aðeins állinn sem skilur á milli bakkanna. Jarðtæknilegar rannsóknir í firðinum eru teknar saman í jarðtækniskýrslu Mannvits og túlkun þeirra á lausum jarðlögum undir veginum má sjá á mynd 17 (Mannvit, 2021).

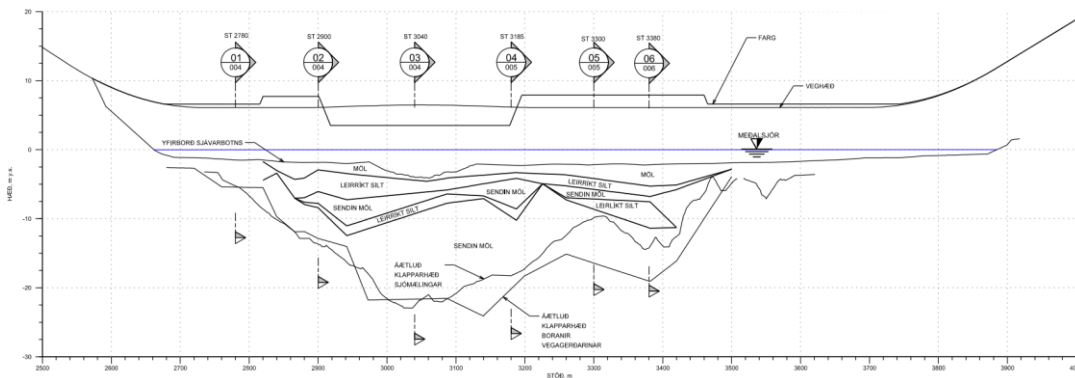
Við þverun fjarðarins var fyrst unnið að austanverðu (stöðvar 2800 til 3340), að brú, brúin síðan steypt og þegar hægt var að hleypa vatni undir hana var hafist handa við að koma út fyllingum vestan megin í firðinum (stöðvar 3340-3820). Vegna þessa var gerð uppfærð sigspá austan megin, byggða á áunninni reynslu vestan megin í firðinum (mynd 18).



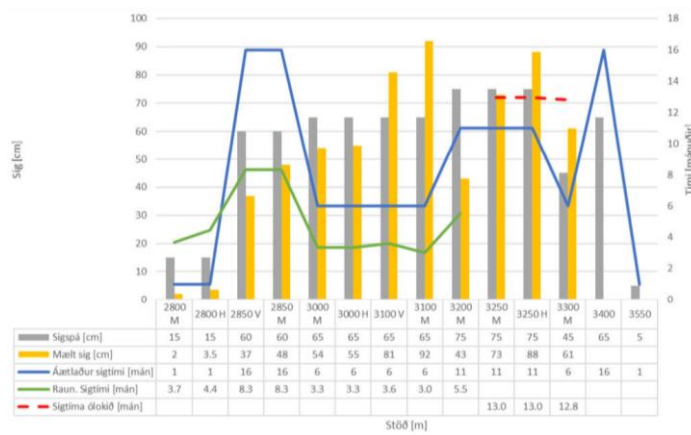
Mynd 15 – Yfirlitsmynd yfir vegaf framkvæmdir á sunnanverðum Vestfjörðum (Vegagerðin, 2022).



Mynd 16 – Yfirlitsmynd af Vestfjarðarvegi (60) yfir Þorskafljörð frá Kinnastöðum að Þórisstöðum (Vegagerðin, 2021b).



Mynd 17 – Túlkun Mannvits á lausum jarðlögum undir vegi um Þorskafljóð, ásamt áætlaðri klöpp frá mælingum Sjóttækni og frá borunum Vegagerðarinnar (Mannvit, 2021).



Mynd 18 – Samantekt á sigspá og sigmælingum áður en byrjað var að fylla í veginn vestan við stöð 3340 (Mannvit, 2022).

Aflögunarmæli var komið fyrir við stöð 3400, en þar var gert ráð fyrir umtalsverðu sigi og löngum sigtíma og var sá hluti vegarins því á kítískri tímalínu verksins. Milli stöðva 3340 og 3470 var gert ráð fyrir um 65 cm sigi og allt að 15 mánaða sigtíma (mynd 18 og mynd 19) (Mannvit, 2021 og 2022). Þessi langi tími hefði valdið því að mannskapur, vélar og tæki hefðu líklega farið af svæðinu og að vegurinn myndi opna vorið 2024 í stað haustsins 2023. Vegna þessa langa tíma var leitað leiða til að stytta sigtímann auk þess sem endurskoðuð fyllingaráætlun var gerð (mynd 20). Ein leið til að stytta sigtíma og þá flýta verkinu er að leggja farg hraðar út og auka yfirhæð þess, en til þess að áhættan af þeirri framkvæmd sé ásættanleg þarf að fylgjast náið með siginu og geta létt fargi ef talið er að brot sé að myndast í undirlaginu. Þannig að forsendur nýrrar fyllingaráætlunar var:

- Auka varúðarráðstafanir vegna tíðari fyllinga og styttri biðtíma með fleiri og tíðari mælingum.
  - Fjölga sigplötum fjölgað bæði í miðlínu og í kanti.
  - Framkvæma daglegar mælingar fyrstu vikuna eftir að fyllingarlag var lagt út.
  - Áframhaldandi tíðni mælinga ákveðin í samráði við verkkaupa og ráðgjafa.
- Bregðast við strax og aflétta fargi ef mælingar gáfu tilefni til.
- Að skoða útfærslur á uppbyggingu vegar vegna áframhaldandi sigs að loknum fergingartíma, þar sem ekki var gert ráð fyrir að aðalsig væri komið fram fyrr en eftir 16. mánuði.

Lagþykkt [m]	Prep	1. vika	2. vika	3. vika	4. vika	5. vika	6. vika	7. vika	8. vika	9. vika	10. vika	11. vika	12. vika	13. vika	14. vika	15. vika	16. vika	17. vika	18. vika	19. vika	20. vika	21. vika	22. vika	23. vika	24. vika
2.0	1	Fylling	biðtími	biðtími																					
2.0	2		Fylling	biðtími	biðtími																				
1.0	3				Fylling	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími
1.0	4																								
1.0	5																								

Lagþykkt [m]	Prep	25. vika	26. vika	27. vika	28. vika	29. vika	30. vika	31. vika	32. vika	33. vika	34. vika	35. vika	36. vika	37. vika	38. vika	39. vika	40. vika	41. vika	42. vika	43. vika	44. vika	45. vika	46. vika	47. vika	48. vika
5	5	biðtími	biðtími	biðtími																					
6	6				Fylling	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími
1.0	7																								
1.0	8																								
1.0	9																								
10.0																									

STÖÐ 3340-3470

Mynd 19 – Upphafleg fyllingarátætlun milli stöðva 3340 og 3470, fylling, farg og biðtími eru samanlagt 64. vikur eða um 15. mánuðir (Mannvit, 2021).

Lagþykkt [m]	Prep	1. vika	2. vika	3. vika	4. vika	5. vika	6. vika	7. vika	8. vika	9. vika	10. vika	11. vika	12. vika	13. vika	14. vika	15. vika	16. vika	17. vika	18. vika	19. vika	20. vika			
2.0	1	Fylling																						
2.0	2		Fylling																					
1.0	3			Fylling	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími
1.0	4																							
1.5	5																							

Lagþykkt [m]	Prep	21. vika	22. vika	23. vika	24. vika	25. vika	26. vika	27. vika	28. vika	29. vika	30. vika	31. vika	32. vika	33. vika	34. vika	35. vika	36. vika	37. vika	38. vika	39. vika	40. vika			
1.5	6	Fylling	biðtími	biðtími	biðtími																			
1.0	7					Fylling	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími	biðtími
10.0																								

Mynd 20 – Endurskoðuð fyllingarátætlun milli stöðva 3340 og 3470, fylling, farg og biðtími eru samanlagt 35. vikur eða um 8. mánuðir en gera þurfti auka ráðstafanir og vöktun til að tryggja stöðugleika mannvirkisins (Mannvit, 2022).

### 3.1 Framkvæmdin

Aflögunarmælinum var komið fyrir vestan við brúarstæðið við stöð 3400. Þar sem gert var ráð fyrir forstyrkingu á setlögum í firðinum var ekki gert ráð fyrir sigi við fyrsta fyllingarlag. Vegna þessa var fyrsta lag fyllingar lagt út áður en sigröri og aflögunarmæli var komið fyrir. Verktaki (Suðurverk) gerði rás í fyrsta fyllingarlagið, 10. janúar 2023, þar sem slöngunni (50 mm plaströr sett inn í 75 mm rör) var komið fyrir og mælirinn svo þræddur í (mynd 21). Sigslangan lá á hálfum metra neðan við sjávarmál (u.þ.b. -0,4 m.y.s.), með 50 m löngum aflögunarmæli með 1 m hlekkjum. Rörið sem mælirinn var lagður í var haft tvöfalt (50 mm í 75 mm röri) og vítt (50 mm) í tvennum tilgangi, til að verja mælirinn fyrir skemmdum og auka líkur á því að endurheimta mætti mælinn. Eftir framkvæmdina náðist mælirinn út úr rörinu og því ekkert því til fyrirstöðu að nýta hann í önnur verkefni. Þrátt fyrir krefjandi umhverfis aðstæður, þar sem fyrsta lag fyllingar flæðir á flóði, gekk allt að óskum en verktakinn, Vista og Vegagerðin höfðu unnið góða undirbúningsvinnu.



Mynd 21 – Mynd til vinstri, rás gerð í fyrsta lag fyllingar. Miðju mynd, mælir á kefli og unnið við að koma mæli í slönguna (rörið). Mynd til hægri, búið að koma mælinum í slöngu og leggja í rásina.

Mælirinn mælir aflögun á milli hlekkja sem hreyfast með undirlaginu sem er undir fyllingunni, en upplausn mælinganna (e. resolution) fyrir hvern meter er upp á 0,012 mm og nákvæmnin (e. precision) er 0,09 mm/m. Ákveðið var að taka mælingu á fjögurra tíma fresti sem var síðan send upp

í skýjalaun Vista. Gott fjarskiptasamband er á staðnum og því auðvelt að senda gögnin með GSM módemi. Koma þurfti fyrir mæliskáp á fyllingunni til að taka á móti niðurstöðum mælinganna, en einnig má tengja tölvubúnað beint í mæliskáp og nálgast gögnin þannig (mynd 22).



Mynd 22 – Mæliskápur var settur upp á fyllingunni til að taka á móti mælingum aflögunarmælisins, en úr honum má einnig nálgast niðurstöður mælinga beint.

Um mánuði áður en sigrórinu var komið fyrir var 5 sigplötum komið fyrir í og við ætlaðan stað sigrörsins. Tilgangurinn var að bera saman annars vegar sig mælt með aflögunarmælinum og hins vegar sig mælt á plötunum. Sigplötunum var komið fyrir þann 10. desember 2022 við stöð 3400 í hægri og vinstri kanti fyllingar og í miðlínu vegarins. Við stöð 3380 var plötum komið fyrir í miðlínu vegar og hægri kanti fyllingar þann 7. desember 2022. Fyrsta lag fyllingar var lagt nokkrum dögum fyrr við stöð 3380 borið saman við stöð 3400, en annað lag fyllingar var lagt á báðum stöðum þann 11.01 2023 þegar farið var úr 0 m.y.s. upp í 1,5 m.y.s. en aflögunarmælinum var komið fyrir þann 10.01 2023.

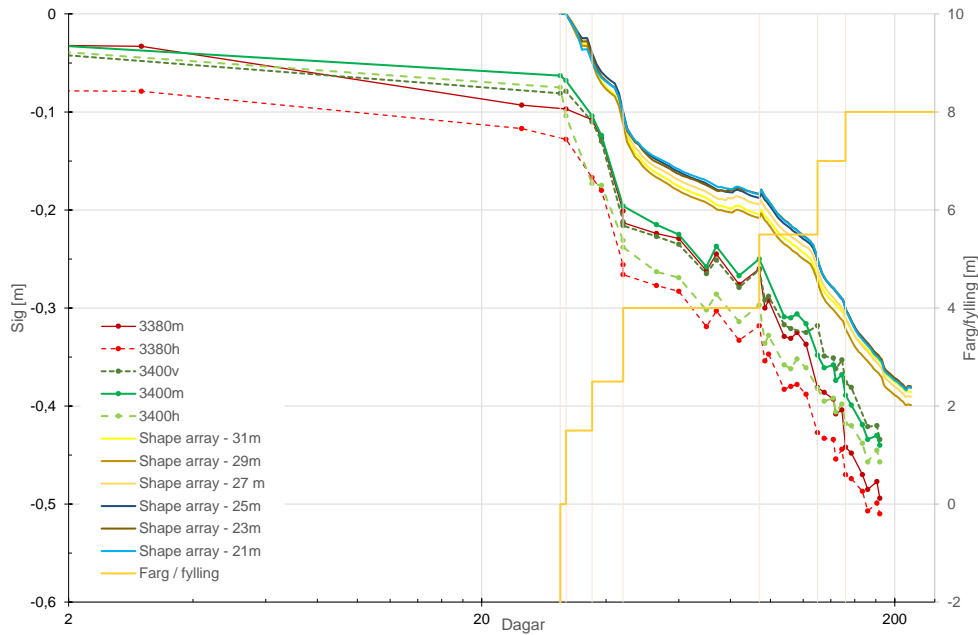
### 3.2 Mælingar

Sigplötum var komið fyrir á óhreyft yfirborð og fyrsta fyllingarlag sett út um mánuði áður en aflögunarmæli var komið fyrir og fyllingarlagi númer tvö sett út. Mælingar á sigplötum sýna að sig kom fram eftir að fyrsta fyllingarlag var sett niður bæði við stöðvar 3380 og 3400, og var sigið heldur meira við stöð 3380. Til þess að geta borið niðurstöðurnar saman sem fall af tíma var ákveðið í öllum tilfellum að setja 10.12 2022 sem dag 0, en þá var farið með fyllingarhæð úr -2,3 m.y.s. í 0 m.y.s. í stöð 3.400, ásamt því að sigplötum var komið fyrir í stöðinni. Fyllingin var byggð upp jafnt og þétt eins og sjá má í tafla 1 og á mynd 23. Á mynd 23 er búið að teikna upp fyrstu mælingu hvers sólarhrings af aflögunarmælinum undir vegbyggingunni án þess að taka tillit til sigs sem þegar var komið fram á sigplötunum. Þá er einnig búið að merkja inn dauða gula lóðréttu línu þegar bætt var á fargið (fyllinguna) og má greinilega sjá hvernig hallatala sigferilsins breytist sem gefur til kynna næmni mælinganna. Þá er athyglisvert hversu mikið hökt er í mælingum á plötum á meðan mælingar aflögunarmælisins í sigslöngunni eru mun meira aflíðandi og fara í raun bara einu sinni upp eftir að fargið (fyllingin) er lögð í 5,5 metra hæð.

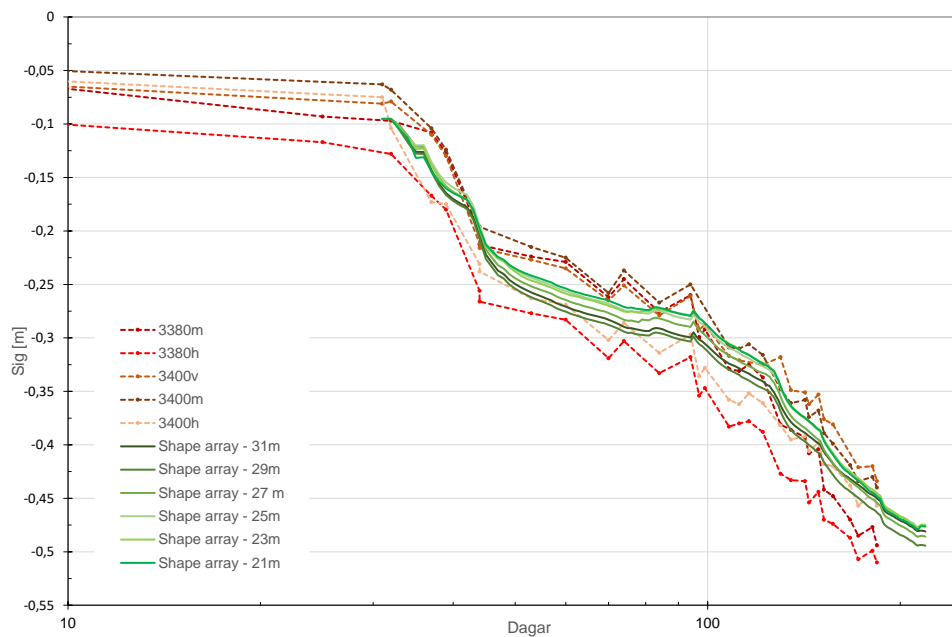


Tafla 1 – Uppbygging fargs við stöðvar 3.380 og 3.400 í Þorskafirði.

Dagsetning	Áætluð hæð fargs [m]	Fergingarlag [m]
7-10. des 2022	0	-2,3
10. jan 2023	2,3	0
11. jan 2023	3,8	1,5
16. jan 2023	4,8	2,5
23. jan 2023	6,3	4,0
14. mars 2023	7,8	5,5
19. apríl 2023	9,3	7,0
11. maí 2023	10,3	8,0

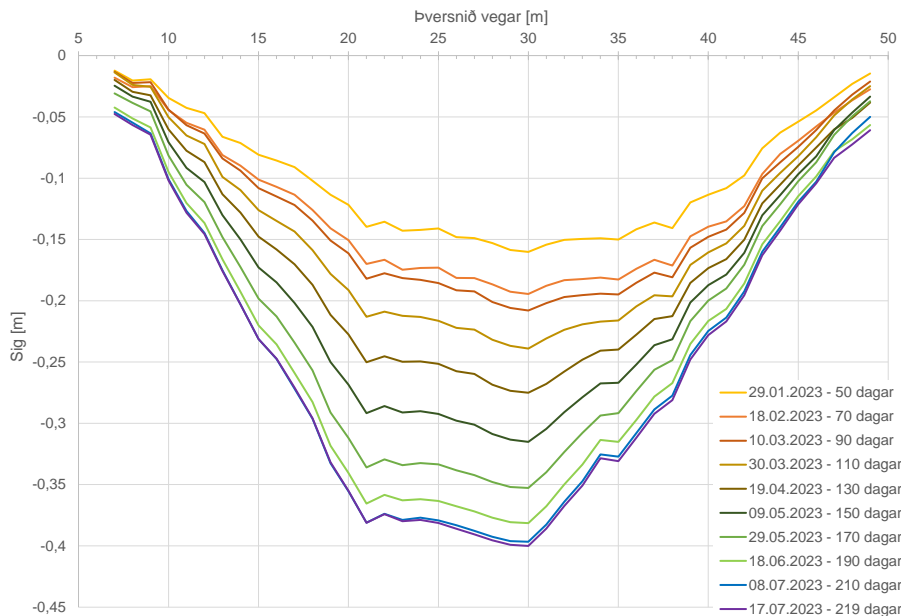


Mynd 23 – Sigmælingar á plötur og aflögunarmæli (e. shape array) án leiðréttingar.



Mynd 24 – Sigmælingar á plötur og aflögunarmæli (e. shape array) með leiðréttingu.

Til þess að geta borið mælingar með aflögunarmælinum saman við mælingar á plötunum þurfti að taka tillit til sigs sem þegar hafði komið fram áður en aflögunarmælirinn var lagður. Því var tekið meðaltal sigs á allar 5 plötunum þann 11. janúar og því bætt við sigi mælt með aflögunarmælingum sama dag (mynd 24). Eftir þessa leiðréttingu má sjá að sigferlarnir passa mjög vel saman, en rauðleitu línurnar sýna mælingar á plötur og grænu línurnar eru sigmælingar á slöngu með aflögunarmæli undir veginum (ekki í fláa).



Mynd 25 – Mælt sig með aflögunarmæli þvert á vegbygginguna, hér verður að athuga að 50 daga sig er 19 dögum eftir að aflögunarmælinum var komið fyrir í fyllingunni.

Athyglisvert er að skoða mælingar á slönguna sem sýna sigferilinn þvert á veginn, en þær sýna mesta sigið er í öðrum kantinum en ekki undir miðjum veginum eins og búast hefði mátt við (mynd 25). Þetta eru mikilvægar upplýsingar þar sem ferilinn myndi strax gefa til kynna ef annar kanturinn sigi mun meira heldur en hinn og/eða ef að veikleika væri að finna í fláa.

## 4 Lokaorð

Shape Acceleration Array Horizontal (SAA/SAAX) eða aflögunarmæli var komið fyrir í sigslöngu undir vegfyllingu í Þorskafríði. Var þetta gert til að fylgjast mætti betur með sigi, en aðstæður í Þorskafríði voru erfiðar, búast mátti við talsverðu sigi og var sig fyllingar á krítískri tímalínu verksins. Aðferðin er þekkt erlendis, og þar með talið í sjófyllingum og fjarðarþverunum í Noregi, en hafði ekki verið notuð hérlandis.

Það er mikilvægt að farg sé sett á í áföngum og að undirlag fái tíma til að jafna sig milli laga, en fullnægjandi sig eða aflögun þarf að vera komin fram áður en næsta lag er sett út svo og áður en vegur er fullkláraður með slitlagi. Vegna þessa er nauðsynlegt að fylgjast vel með sigi, til að vita hvenær má bæta við fyllingu/fargi og hvenær nægjanlegu sigi er náð þ.a. aflétta megi fargi og klára að byggja upp veginn.

Í Þorskafríðinum var hökt í handmælingum á sigplötur m.a. vegna veðurs en sjálfvirkar mælingar á aflögunarmæli voru mun nákvæmari, tíðari og stöðugri. Hins vegar var góð samsvörun á milli magn sigs milli aðferðanna tveggja. Er það trú höfunda að mælingar með aflögunarmæli hafi stuðlað að því

að hægt var að aflétta fargi fyrir og þar með opna fyrir almenna umferð um veginn fyrir en ella. Þannig hafi rannsóknarverkefnið sparað bæði tíma og peninga, en hver dagur í bið kostar verkkaupa og verktaka umtalsverða fjármuni, auk þess sem vegfarendur gátu nýtt mannvirknið fyrir en ella sem sparar umtalsverða vegalengd í akstri.

Vel gekk að koma mælinum fyrir og endurheimta hann eftir að hætt var að fylgjast með sigi, og er mælirinn því tilbúinn í næsta verkefni. Það er von höfunda að haldið verði áfram að nota búnaðinn sem reyndist mjög vel í þessu verkefni. Góð vöktun sigs minnkar áhættu verkefnis, getur dregið úr framkvæmdatíma, sparar umtalsverða fjármuni og ætti að leiða til stöðugra og betra mannvirkis.

## Heimildaskrá

- Encardio Rite (2019). Inclinator: Types, How It Works, & Uses. Encardio Rite, [encardio.com](http://encardio.com).
- Encardio Rite (2021). Piezometers: Types, Functions and How It Works. Encardio Rite, [encardio.com](http://encardio.com).
- Mannvit (2021). Þverun Þorskaflarðar, Vegnúmer: D60-122 Þ-H, Jarðtækniskýrsla, GIR og GDR, 3. útgáfa. Mannvit.
- Mannvit (2022). Minnisblað dagsett 15.11.2022 – Fering í Þorskaflirði. Mannvit.
- Measurand (2023). Measurand. Sótt 10. október 2023 af [measurand.com](http://measurand.com).
- Measurand (án árs). Measurand, SAAX Manual. Measurand, [measurand.com](http://measurand.com).
- Yamane, D., Konishi, T., Safu, T., Toshiyoshi, H., Sone, M., Machida, K., Ito, H. and Masu, K. (2019). A MEMS Accelerometer for Sub-mG Sensing. Sensors and Materials, Vol. 31, MYU Tokyo. <https://doi.org/10.18494/SAM.2019.2122>
- Iannaccone, Gianfranco (2015). Dams, Safety and Monitoring. [Microsoft PowerPoint - Dam monitoring - ENG - Sisgeo LA.pptx](#). Sisgeo.
- RST Portal (2023). RST instruments. Sótt 10. Október 2023 af [rstinstruments.com/](http://rstinstruments.com/).
- Roadex Network (2023). *Roads on Peat*, e-learning. Sótt 10. október 2023 af [roadex.org](http://roadex.org).
- Sisgeo (2023). Settlement Gauges. Sótt 28.11 2023 af [sisgeo.com/products/settlement-gauges/](http://sisgeo.com/products/settlement-gauges/).
- Sisgeo (2022). Multipoint, settlement systems, settlement gauges, D422. Sisgeo
- State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau (2015). Geotechnical Control Procedure: Settlement Gages and Settlement Rods. GEP-15, revision #5. State of New York Department of Transportation and Geotechnical Engineering Bureau.
- Statens vegvesen (2018). Handbok R211 Feltundersøkelser. Statens vegvesen, Noregi.
- Vegagerðin (2021a). Vestfjarðavegur (60) um Gufudalssveit, Kinnastaðir - Þórisstaðir, 1. hefti Útboðs- og verklýsing. Vegagerðin.
- Vegagerðin (2021b). Vestfjarðavegur (60) um Gufudalssveit, Kinnastaðir - Þórisstaðir, Uppdrættir. Vegagerðin.
- Vegagerðin (2021c). Sigplötur, minnisblað. Vegagerðin.
- Vegagerðin (2021d). Sigslöngur, minnisblað. Vegagerðin.
- Vegagerðin (2022). Kynning á framkvæmdum í Gufudalssveit, Reynir Georgsson. Vegagerðin.
- Verfræðistofan Vista ehf. (án árs). Seyðisfjörður – Uppsetning á Shape Acceleration Array. [vista.is/seydisfjordur-uppsetning-a-shape-acceleration-array/](http://vista.is/seydisfjordur-uppsetning-a-shape-acceleration-array/)

