



---

## Hönnun brimvarna við vegi og brýr

Aðferðarfræði endurskoðuð

---



Mái 2017

## Upplýsingar um skýrslu

<b>Titill skýrslu:</b> Hönnun brimvarna við vegi og brýr. Aðferðarfræði endurskoðuð.	<b>Tegund skýrslu:</b> Rannsóknarverkefni Vegagerðarinnar		
<b>Verkkaupi:</b> Vegagerðin	<b>Verkefnisstjóri/fulltrúi verkkaupa:</b> Reynir Óli Þorsteinsson		
<b>Höfundar og rýnendur:</b> Reynir Óli Þorsteinsson Ingunn E. Jónsdóttir Sigurður Sigurðarson	<b>Dagsetning</b> 10.5.2017	<b>Verknúmer</b>	<b>Fjöldi síðna</b> 40
<b>Útdráttur:</b> Aðferðarfræðin sem notuð hefur verið við hönnun brimvarna við vegi og brýr á Íslandi hefur lítið breyst undanfarna áratugi þrátt fyrir að talsverð þróun hafi átt sér stað í þeim efnum. Skoðuð var reynsla brimvarna á þremur fjarðarþverunum til að meta árangur hönnunar. Gerðir voru nýir öldufarsútreikningar með tölvulíkani og skoðaðar nýjar jöfnur til að meta grjótstærðir og hæð brimvarna. Niðurstöður öldufarsútreikninga benda til talsvert minna ölduálags á fjarðarþveranirnar en upprunaleg hönnun gerir ráð fyrir. Með þá vitneskju hefði mun meiri sveigjanleiki verið í vali á grjótstærðum og hugsanlega hefði verið hægt að nota minni grjótstærðir. Útreikningar á hæð brimvarna eru nokkuð sambærilegir milli upprunalegrar hönnunar og nýrra útreikninga þrátt fyrir að forsendur um sjávarhæð og öldu hafi breyst. Reynsla brimvarna bendir til að ágætlega hafi tekist til við að ákvarða hæð en hugsanlega hefði verið hægt að hafa meiri sveigjanleika á grjótstærðum. Ekkert viðhald hefur þurft á brimvörnunum frá því fjarðarþveranirnar voru byggðar og því grjótstærðir líklega vel yfir öryggismörkum.			
<b>Aðgengi:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Ópið <input type="checkbox"/> Dreifing háð samþykki verkkaupa <input type="checkbox"/> Lokað	<b>Staða skýrslu:</b> <input type="checkbox"/> Í vinnslu <input type="checkbox"/> Drög til yfirlstrar <input checked="" type="checkbox"/> Lokið		
<i>Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.</i>			

## Efnisskrá

1.	Inngangur .....	1
2.	Rannsóknarsvæði og gögn .....	2
2.1.	Vegkaflar .....	3
2.1.1.	Borgarfjörður .....	3
2.1.2.	Dýrafjörður .....	4
2.1.3.	Eyjafjörður .....	5
2.1.4.	Eskifjörður .....	6
2.2.	Inntaksgögn í reiknilíkan .....	7
3.	Aðferð .....	8
3.1.	Sjávarstaða .....	8
3.1.1.	Sjávarföll .....	8
3.1.2.	Loftþrýstingur .....	8
3.1.3.	Vindáhlaðandi .....	9
3.1.4.	Hækkun sjávar vegna loftslagsbreytinga .....	9
3.2.	Öldufarsreikningar .....	10
3.3.	Grjót .....	12
3.4.	Hæð upprennslis .....	13
4.	Niðurstöður .....	16
4.1.	Öldufarsreikningar .....	16
4.1.1.	Borgarfjörður .....	16
4.1.2.	Dýrafjörður .....	20
4.1.3.	Eyjafjörður .....	24
4.1.4.	Eskifjörður .....	28
4.1.5.	Samantekt .....	32
4.2.	Grjótstærðir .....	32
4.3.	Hæð brimvarna .....	34
4.3.1.	Eskifjörður .....	35
4.4.	Umræða .....	36
5.	Samantekt .....	39
	Heimildarskrá .....	40

## Myndaskrá

<b>Mynd 1</b>	Loftmynd af Borgarfirði (Kortasjá Vegagerðarinnar).	3
<b>Mynd 2</b>	Dýptargrunnur fyrir Borgarfjörð.	3
<b>Mynd 3</b>	Loftmynd af Dýrafirði (Kortasjá vegagerðarinnar).	4
<b>Mynd 4</b>	Dýptargrunnur fyrir Dýrafjörð við þverun.	4
<b>Mynd 5</b>	Loftmynd af botni Eyjafjarðar (Kortasjá Vegagerðarinnar).	5
<b>Mynd 6</b>	Dýptargrunnur fyrir innsta hluta Eyjafjarðar.	5
<b>Mynd 7</b>	Loftmynd af botni Reyðarfjarðar og Eskifjarðar (Kortasjá Vegagerðarinnar).	6
<b>Mynd 8</b>	Dýptargrunnur innan Reyðar- og Eskifjarðar.	6
<b>Mynd 9</b>	Sýnir upprennsli á slétta vörn með þéttum kjarna (mynd fengin úr EurOtop manual)	14
<b>Mynd 10</b>	Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga við Borgarfjarðarbrú.	16
<b>Mynd 11</b>	Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti B3. – Veðrið 5.11.2006 06:00.	17
<b>Mynd 12</b>	Ölduhæð í punktum B1, B2, B3 og B4 tímabilið 4.-6.11.2006.	17
<b>Mynd 13</b>	Ölduhæðir og öldustefna í innri hluta Borgarfjarðar 5.11.2006 kl. 06:00.	18
<b>Mynd 14</b>	Vindhraði og vindstefna í 64.489°N, 22.042°V tímabilið 4.-6.11.2006.	18
<b>Mynd 15</b>	Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í punkti B2.	19
<b>Mynd 16</b>	Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga.	20
<b>Mynd 17</b>	Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti D2. – Veðrið 7.2.2015 00:00.	21
<b>Mynd 18</b>	Ölduhæð í punktum D1, D2 og D3 tímabilið 6.-7.2.2015.	21
<b>Mynd 19</b>	Ölduhæðir og öldustefna í innri hluta Dýrafjarðar 7.2.2015 kl. 00:00.	22
<b>Mynd 20</b>	Vindhraði og vindstefna í 64.489°N, 22.042°V tímabilið 6.-7.2.2015.	22
<b>Mynd 21</b>	Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í D2.	23
<b>Mynd 22</b>	Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga.	24
<b>Mynd 23</b>	Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti Eyj3. – Veðrið 15.09.2013 18:00.	25
<b>Mynd 24</b>	Ölduhæð í punktum Eyj1, Eyj2, Eyj3 og Eyj4 tímabilið 15.-17.11.2013.	25
<b>Mynd 25</b>	Ölduhæðir og öldustefna í innri hluta Eyjafjarðar 15.09.2013 kl. 18:00.	26
<b>Mynd 26</b>	Vindhraði og vindstefna í 65,698°N, 18,082°V tímabilið 15.-17.11.2013.	27
<b>Mynd 27</b>	Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í punkti Eyj3.	27
<b>Mynd 28</b>	Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga.	28
<b>Mynd 29</b>	Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti E2. – Veðrið 30.12.2015 kl. 06:00:00.	29
<b>Mynd 30</b>	Ölduhæð í punktum E1, E2, E3, E4 og E5 tímabilið 29.12.-31.12.2015.	29
<b>Mynd 31</b>	Ölduhæð og öldustefna í Eskifirði 30.12.2015 kl. 06:00:00.	30
<b>Mynd 32</b>	Vindhraði og vindstefna í 64.022°N, 13.945°V tímabilið 29.-31.12.2015.	31
<b>Mynd 33</b>	Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í punkti E2.	31
<b>Mynd 34</b>	Staðsetning punkta þar sem flóðfarsmælingar voru gerðar í Eskifirði.	35
<b>Mynd 35</b>	Sjávarföll 29.-31.12.2015, í hæðakerfi sjómælinga.	36

# 1. Inngangur

Vegagerðin hannar og hefur umsjón með fjölda mannvirkja við strendur landsins sem vernda þarf gegn sjávarálagi. Um er að ræða annarsvegar strandmannvirki sem tengjast sjávarsamgöngum (hafnir, varnargarðar) og sjóvarnir og hinsvegar strandmannvirki sem tengjast vegagerð (vegfyllingar við sjó, fjarðarþveranir, brýr). Siglingasvið Vegagerðarinnar sér um hafnarmannvirkin og sjóvarnirnar á meðan Hönnunardeild Vegagerðarinnar hefur haft umsjón með hönnun vega og brúa. Í þessu verkefni verður fjallað um mannvirki sem snúa að Hönnunardeildinni og var það unnið í samstarfi við Siglingasvið Vegagerðarinnar. Verkefnið fjallar um endurmat á hönnunarforsendum brimvarna við strandvegi og brýr og hvort vert er að taka upp nýjar hönnunarforsendur.

Eftir að Siglingastofnun sameinaðist Vegagerðinni bættist við mikil þekking tengd strandmannvirkjum og sjólagi hjá stofnuninni. Æskilegt er að nýta þá þekkingu í auknum mæli. Til að mynda hefur Siglingasvið mun meiri reynslu við að meta hönnunaröldur og er betur til þess búið. Þar er rekinn gagnagrunnur yfir sjávardýpi á landgrunninu og grunnsævi þar sem hefur verið dýptarmælt. Þá notar Siglingasviðið reiknilíkön til útreikninga á öldufari og vindöldumyndun á úthafi, upp við strendur og innan hafna.

Við hönnun strandmannvirkja þarf m.a. að taka tillit til sjávarstöðu og ölduálags sem verður á mannvirkinu. Til að meta sjávarhæð og ölduálag hefur hönnunardeild Vegagerðarinnar m.a. notast við hönnunarforsendur sem Jón Helgason (1979) tók saman um útreikninga fyrir vegfyllingu í Borgarfirði. Útreikningar á öldufari hafa verið byggðir á jöfnum úr Shore Protection Manual frá árinu 1984, en síðan þá hafa öldufarsútreikningar þróast mikið. Aldrei hefur verið skoðað með skilvirkum hætti hvernig þessar hönnunarforsendur hafa reynst eða samantekt á því hvernig þær varnir sem settar hafa verið hafa staðist álagið.

Markmið verkefnisins er að kanna hvernig þessar forsendur hafa reynst. Hafa sjóvarnir sem byggðar hafa verið við vegi staðist álagið? Eru skemmdir algengar? Er algengt að grjót og möl skolist yfir vegi og því hæð vegar/rofvarnar ekki nægt? Eða er því öfugt farið? Ef viðhald hefur verið lítið sem ekkert er þá hugsanlegt að hönnunarforsendurnar séu of stífar? Niðurstöður ættu að gefa til kynna hvort hönnunarforsendur sem notaðar eru séu viðeigandi. Þá er hægt að endurmeta forsendurnar og út frá því skrifa nýjar hönnunarleiðbeiningar til að meta sjávarálag á vegi og brýr. Auk þess að endurskoða hönnunarforsendur er einnig takmarkið að byggja upp aukið samstarf á milli Hönnunardeildar og Siglingasviðs með þessu verkefni.

## 2. Rannsóknarsvæði og gögn

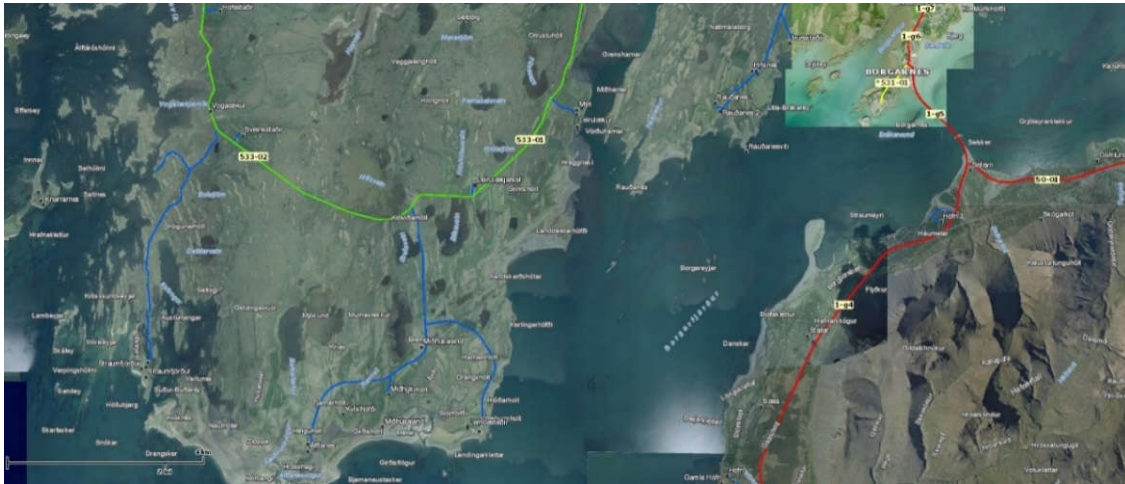
Hönnunardeild Vegagerðarinnar sér um hönnun vega og brúa utan þéttbýlis. Margir vegir liggja við strendur eða þvera firði og verða þ.a.l. fyrir áraun vegna ágangs sjávar. Fjarðarþveranir eru fyllingar sem eru lagðar út í sjó og er algengt að öflugri og víðtækari brimvörn þurfi á þær en strandvegina þar sem þveranir liggja á meira dýpi og eru oft berskjaldaðri fyrir ölduálagi. Brimvarnir sem hannaðar hafa verið fyrir fjarðarþveranir eru þær víðamestu sem Hönnunardeild Vegagerðarinnar hefur komið að. Víða liggja strandvegir í fjörum við sjávarborð og þarf reglulega að hanna minni háttar varnir fyrir þá og jafnframt ákveða veghæð út frá sjávarhæð og upprennsli öldu (hversu hátt aldann rennur upp vegfláann).

Til skoðunar voru þrjár fjarðarþveranir; í Borgarfirði, Dýrafirði og Eyjafirði og einn strandvegur í Eskifirði. Þveranirnar þrjár, voru byggðar á 8. og 9. ártugnum og því komin talsverð reynsla á þær brimvarnir sem þar voru settar. Helgustaðavegur á Eskifirði er dæmigerður strandvegur sem liggur við fjöruborð en hann skemmdist talsvert í miklu óveðri sem gekk yfir landið í desember 2015 og er því hafður með hér til skoðunar.

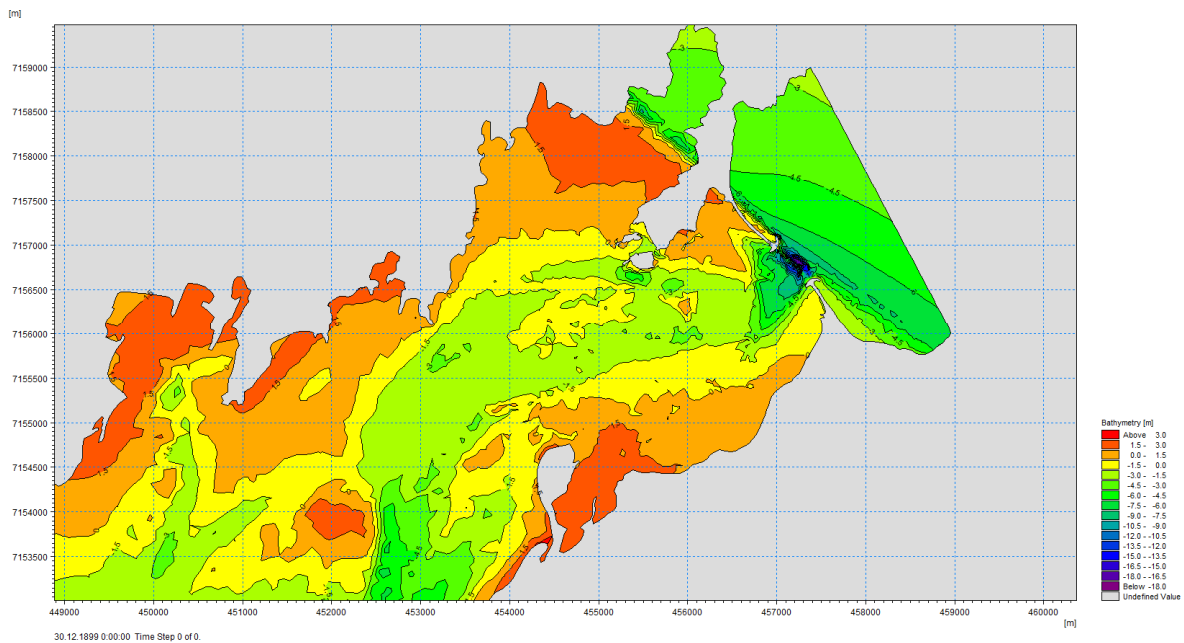
## 2.1. Vegkaflar

### 2.1.1. Borgarfjörður

Borgarfjarðarbrú var opnuð 1981 og er brimvörn sem þar var gerð ein sú víðamesta sem Vegagerðin hefur komið að. Þverun Borgarfjarðar er 1,5 km löng og Borgarfjarðarbrú um 520 m löng. Dýpi við fyllingu er um 4 til 5 m á stórstraumsflóði og er hæð vegfyllingar um 3 m ofan við hæð stórstraumsflóðs. Ekki er skoðuð innanverð brimvörn í þessu verkefni. Mynd 1 sýnir loftmyndir af Borgarfirði og mynd 2 sýnir dýptargrunn Borgarfjörð. Komin er löng og góð reynsla af þverun Borgarfjarðar og eru til talsverðar upplýsingar um hönnun hennar. Því var upplagt að skoða nánar hvernig brimvörnin hefur reynst og meta hönnunarforsendur hennar.



Mynd 1 Loftmynd af Borgarfirði (Kortasjá Vegagerðarinnar).



Mynd 2 Dýptargrunnur fyrir Borgarfjörð

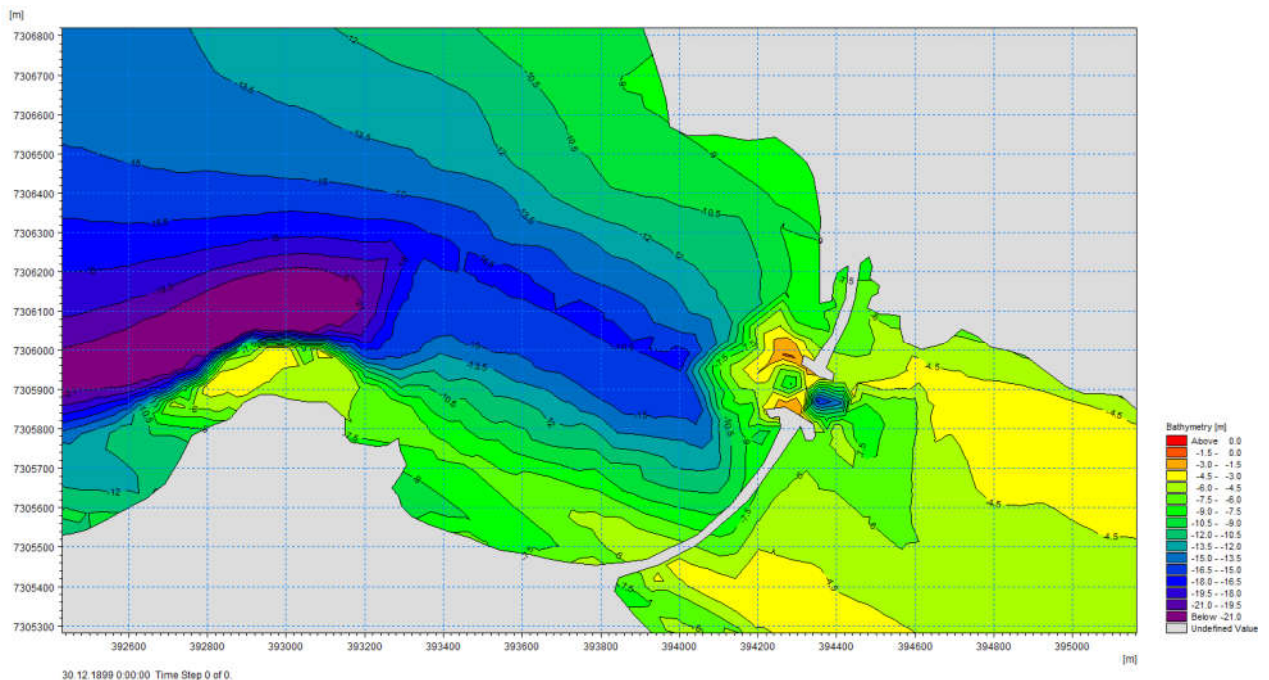


### 2.1.2. Dýrafjörður

Dýrafjörður er á Vestfjörðum og var hann þveraður árið 1990. Þverunin er um 1 km löng og brúin um 120 m löng. Dýpi við fyllinguna er allt að 12 m og er hæð fyllingar um 3 m ofan við stórstraumsflód. Skoðuð var grjótvörn á utanverða fyllingu, en sömu forsendur voru notaðar á leiðigarðar við brúarenda. Ekki var skoðuð innanverð sjónvörn í þessu verkefni. Mynd 3 sýnir loftmynd af Dýrafirði og mynd 4 sýnir dýptargrunn við þverun Dýrafjarðar. Líkt og í Borgarfirði eru til ágætar heimildir um hönnun þverunar. Einnig er talsverður tími liðinn frá framkvæmd þverunar og því komin góð reynsla á hana.



Mynd 3 Loftmynd af Dýrafirði (Kortasjá vegagerðarinnar).

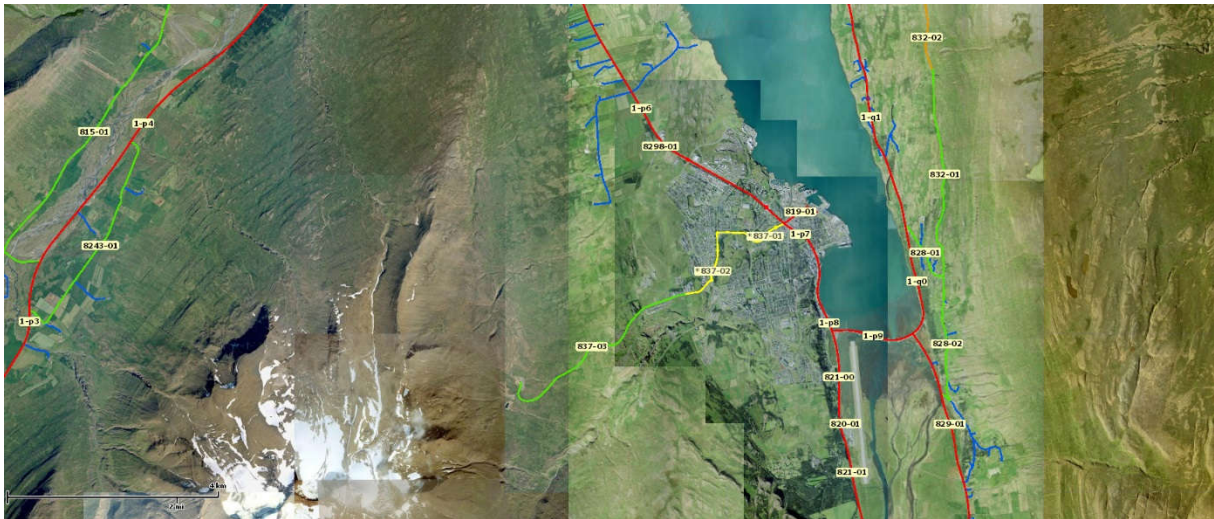


Mynd 4 Dýptargrunnur fyrir Dýrafjörð við þverun.

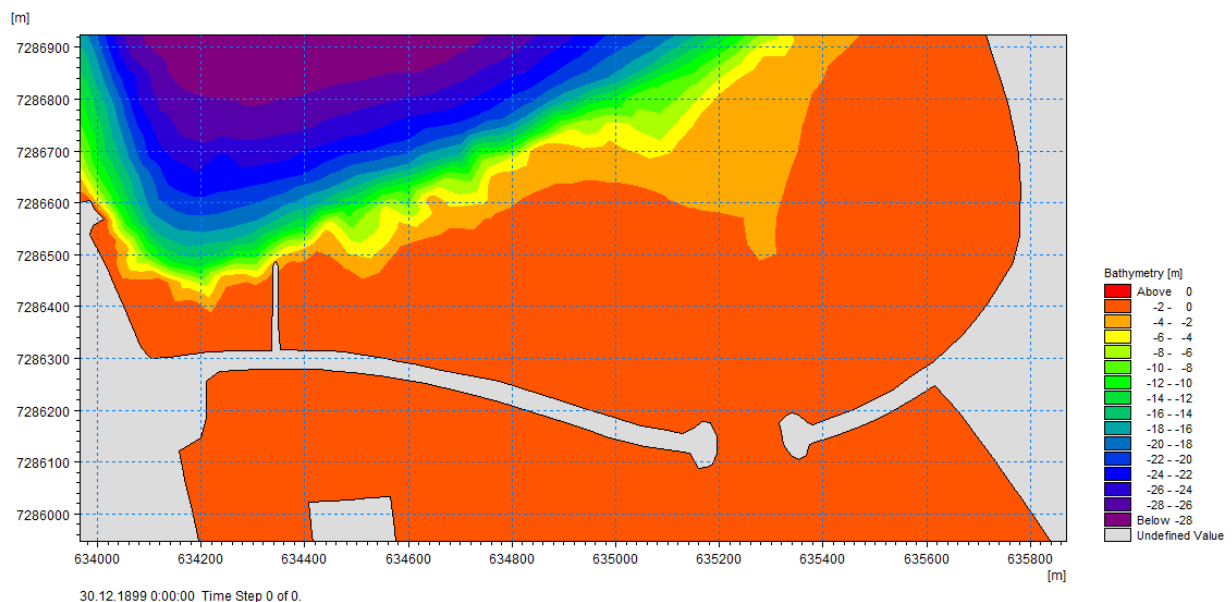


### 2.1.3. Eyjafjörður

Byggð var vegfylling og brú yfir Eyjarfjörð árið 1986. Þverunin er um 1,8 km löng og brúin um 135 m. Dýpi við fyllingu er lítið eða um 1 til 2 m á stórstraumsflóði. Veghæð fyllingar er minnst um 1,5 m ofar en hæð stórstraumsflóðs. Mynd 5 sýnir loftmynd af botni Eyjafjarðar og mynd 6 sýnir dýptargrunn við þverun Eyjafjarðar. Heldur takmarkaðar upplýsingar eru til um forsendur hönnunar en til eru góðar upplýsingar um kennistærðir vegfyllingar og brimvarnar. Langur tími er liðin frá framkvæmdum og talsverð reynsla komin á vegfyllinguna.



Mynd 5 Loftmynd af botni Eyjafjarðar (Kortasjá Vegagerðarinnar).



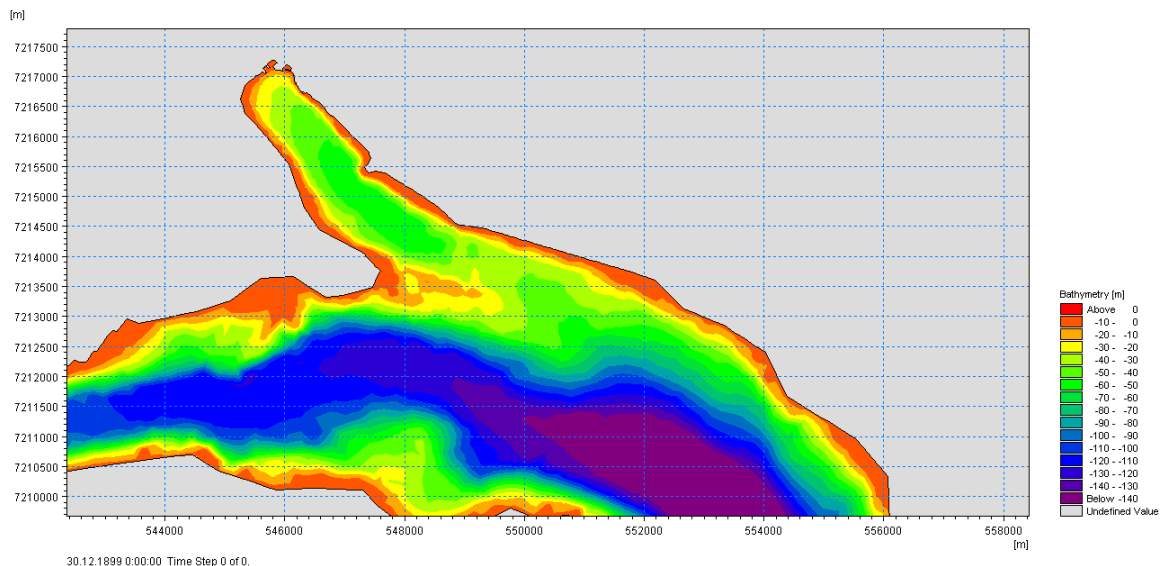
Mynd 6 Dýptargrunnur fyrir innsta hluta Eyjafjarðar.

## 2.1.4. Eskifjörður

Helgustaðavegur á Eskifirði og liggur frá Mjóeyri og til austurs. Um er að ræða malarveg og var ekki hönnuð brimvörn á vegfláann heldur var óskilgreint gróft efni úr sjávarkambinum sett í fláann. Miklar vatnsskemmdir urðu víða á vegum á Austurlandi eftir óveður sem gekk yfir landið 30. desember 2015 og var Helgustaðavegur meðal þeirra. Í kjölfar óveðursins voru teknar flóðfarsmælingar í Eskifirði en þær voru gagnlegar til að meta hvort þær forsendur sem notaðar eru til að meta sjávarhæð séu í samræmi við raunverulegar mælingar. Mynd 7 sýnir loftmynd af botni Reyðarfjarðar og mynd 8 sýnir dýptargrunn við Helgustaðaveg.



Mynd 7 Loftmynd af botni Reyðarfjarðar og Eskifjarðar (Kortasjá Vegagerðarinnar).



Mynd 8 Dýptargrunnur innan Reyðar- og Eskifjarðar.

## 2.2. Inntaksgögn í reiknilíkan

Sett var upp reiknilíkan af fyrrgreindum svæðum til að meta öldufar við mannvirkin. Reiknilíkanið er byggt á dýptargrunni sem settur er saman af dýptarmælingum frá Sjósmælingum Íslands og Vegagerðinni. Inntaksstærðir í líkanið eru öldu- sjávarfalla- og veðurgögn. Öldu- og veðurgögn eru m.a. fengin frá Evrópsku veðurstofunni, ECMWF, og eru gögnin tiltæk í punktum með  $0,5^\circ$  millibili hringinn í kringum landið með 6 klst. tíðni. Tímaraðir fyrir ölduhæð, sveiflutíma og öldustefnu eru fengnar yfir 10 ára tímabil, frá 2006 til 2010 og eru tímaraðirnar notaðar sem jaðarskilyrði reiknilíkansins. Auk öldu þarf einnig að setja sjávarföll sem jaðarskilyrði og eru tímaraðir sjávarfalla fengnar úr sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar.

Öldufarsreikningarnir byggja annars vegar á inntaksgögnum sem sett eru á jaðar reiknilíkansins og lýsa þessi skilyrði úthafsöldunni og sjávarföllunum, og hinsvegar á vindi sem látinn er blása yfir haffletinum. Vindgögn (vindhraði og vindstefna) eru fengin úr Vindatlas Veðurstofu Íslands í punktum nálægt athugunarstöðunum. Tíðni tímaraðanna er 1 klst.

### 3. Aðferð

Sköðaðar voru aðferðir og hönnunarforsendur sem notaðar voru til að hanna brimvarnir á vegfyllingar í Borgarfirði, Dýrafirði, Eyjafirði og Eskifirði. Helstu þættir sem hafa áhrif á hönnun brimvarna er sjávarstaða og ölduálag og er hægt að nota mismunandi aðferðir og forsendur til að meta þessa þætti Aðferðir og forsendur sem notaðar voru við hönnun á sínum tíma voru bornar saman við nýjar aðferðir og forsendur undir handleiðslu Siglingaviðs.

#### 3.1. Sjávarstaða

##### 3.1.1. Sjávarföll

Sjómælingar Íslands hafa gefið út töflur yfir sjávarföll í Reykjavík, Ísafirði, Siglufirði og Djúfavogi ásamt flóðbið annars staðar við Ísland. Útreikningar í töflum grundvallast á greiningu sjávarfallamælinga þar sem harmoniskir stuðlar eru greindir og meðal sjávarhæð fundin (Sjómælingar Íslands, 2012). Vegagerðin hefur notað sjávarfallatöflur Sjómælinga Íslands til að meta hæð sjávarfalla við vegi.

Fundnar eru upplýsingar um kennitölur sjávarfalla í nálægri höfn í sjávarfallatöflum. Eftir að kennitölur sjávarfalla hafa verið fundnar og settar í viðeigandi hæðarkerfi hefur hæsta stjarnfræðilegt flóð verið reiknað út frá hæsta stjarnfræðilegu flóði í Reykjavík. Hæsta stjarnfræðilega flóð er hæsta flóð sem reiknað er út miðað við venjuleg verðurskilyrði. Tafla 1 sýnir dæmi um mat á sjávarstöðu fyrir Örlygshafnarveg í Patreksfirði. Áður fyrr var mat á hæsta stjarnfræðilega flóði í Reykjavík 4,2 m, en er nú 4,6 m. Við hönnun strandvega hefur alltaf verið miðað við 4,2 m þegar lagt hefur verið mat á hæsta sjávarfall, en þetta er svolítið misvísandi og ónákvæmt mat á hæsta stjarnfræðilegu flóði.

*Tafla 1 Dæmi um mat á hæsta stjarnfræðilegu flóði í Patreksfirði.*

Kennitölur sjávarfalla	Patreks- fjörður	Reykja- vík
Meðalstórstraumsflóð	1,81	4,00
Meðalsmástraumsflóð	0,91	3,00
Meðalsjávarhæð	0,29	2,10
Meðalsmástraumsfjara	-0,33	1,30
Meðalstórstraumsfjara	-1,20	0,20
Hæsta stjarnfræðilegt flóð	1,97	4,20

Ef vegkafla sem er til sköðunar er langt frá höfn getur verið ónákvæmni í mati á kennitölum sjávarfalla við vegkaflann. Einnig getur oft verið snúið að finna út venslin á milli hæðakerfa sem verið er að hanna í og hæðakerfis Sjómælinga Íslands og þ.a.l. óvissa fólgin í samræmingu hæðarkerfa.

##### 3.1.2. Loftþrýstingur

Til viðbótar við sjávarföllin hefur veðurfar einnig áhrif á sjávarstöðu. Lækkun á loftþrýstingi hækkar sjávarstöðu og falli loftþrýstingur um 10 hPa má búast við að sjávarstaða hækki um 0,1 m (Sjómælingar Íslands, 2012). Út frá athugunum á sjávarborðsmælingum í Reykjavík var metið að hækkun sjávarborðs sé um 0,84 cm fyrir hvert hPa lækkun á loftþrýstingi (Viggósson, Eliasson, & Sigurðarson, 2016). Hönnunarforsendur Vegagerðarinnar hafa miðað við að hækkun sjávarstöðu vegna loftþrýstings sé 0,35 m sem er sú hækkun sem búast má við þegar

u.þ.b. 970 hPa lægð er yfir haffleti. Lægsti loftþrýstingur sem mælst hefur á Íslandi var árið 1929 og mældist hann 920 hPa í Vestmannaeyjum (Jónsson, 2007). Algengt er að loftþrýstingur fari undir 970 hPa.

### 3.1.3. Vindáhlaðandi

Þegar vindur blæs að landi getur það skapað vindáhlaðanda og vatnsborð getur hækkað. Við mat á áhlaðanda hefur Vegagerðin notast við reynslujöfnu úr Shore Protection Manual (SPM) frá árinu 1984:

$$s = \frac{kU^2L}{gd_1\left(1-\frac{d_2}{d_1}\right)} \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (1)$$

þar sem  $k$  er stuðull jafnt og  $3,0 \cdot 10^{-6}$ ,  $U$  er vindhraði (m/s),  $g$  er þyngdarhröðun,  $L$  er lengd atrennu/aðdraganda (m),  $d_1$  er dýpi innst í atrennu og  $d_2$  er dýpi yst í atrennu.

Önnur útlistun á vindáhlaðanda er eftir Engelund (1973):

$$s = L(\tau_s - \tau_b) / (\rho_v D) \quad (2)$$

þar sem  $\tau_s$  er skerspenna á yfirborði,  $\tau_b$  er skerspenna við botn,  $\rho_v$  er eðlisþyngd vatns og  $D$  er meðaldýpi. Ef gert ráð fyrir að skerspenna við botn sér hverfandi samanborið við skerspennu við yfirborð verður jafnan:

$$s = L\rho_l C_d U^2 / (\rho_v g D) \approx 10^{-6} U^2 / (gD) \quad (3)$$

$\rho_l$  er eðlisþyngd lofts og  $C_d$  er drag stuðull.

Í tilfelli þar sem  $d_1 = d_2$  í jöfnu verður  $x$  eru jöfnur 1 og 3 sambærilegar fyrir utan  $k$  stuðulinn ( $k=3 \cdot 10^{-6}$  í stað  $10^{-6}$ ). Í því tilfelli gefur jafna 1 þá þrisvar sinnum hærra niðurstöður.

### 3.1.4. Hækkun sjávar vegna loftslagsbreytinga

Ein afleiðingum loftslagsbreytinga er hækkun sjávar sem skapast vegna bráðnunar jökla og heimskautaíss ásamt útpenslu sjávar vegna hærri sjávarhita. Skúli Þórðarson (2012) fjallaði um tillögur um aðgerðir til aðlögunar í vegagerð vegna loftslagsbreytinga, þ.m.t. vegna hækkun sjávar:

*Hækkun sjávarborðs vegna loftslagsbreytinga er miðað við fyrirbyggjandi þekkingu mjög hægfara ferli í samanburði við ýmsa aðra þætti loftslagsbreytinga. Vegagerðin hefur nú þegar ákveðið að taka mið af 50 cm hækkun sjávarborðs við hönnun mannvirkja á strandsvæðum 5. Umfram þetta eru ekki vísbendingar um að stór þörf sé á frekari aðlögunaraðgerðum vegna núverandi mannvirkja.*

*Vegagerðin þarf hins vegar að hafa skilmerkilegt yfirlit yfir mannvirki við strendur sem verða fyrir áhrifum sjávarstöðubreytinga á næstu áratugum. Jafnframt þarf að þróa aðferðafræði um það hvernig aðlögun að hækkaðri sjávarstöðu getur orðið hluti af viðhaldi og endurbygginu núverandi mannvirkja.*

Hafa þarf í huga að fleiri þættir geta einnig haft áhrif á breytingu afstöðu sjávar og lands til langtíma eins og landriss og landsig vegna flothreyfinga jarðskorpunnar sem er mismunandi milli landssvæða (Þórðarson, 2012). Til að mynda er talsvert landris á suð-austurhorni landsins í kringum Hornafjörð vegna hopunar jökla. Þar er landris talsvert umfram hækkun sjávar og lítur út fyrir að það muni halda áfram. Í mörgum tilfellum er ódýrara að hækka brimvarnir í

stökkum í takt við hækkandi sjávarstöðu, í stað þess að byggja mannvikið strax það hátt að það ráði við hækkun sem kemur hugsanlega ekki fram fyrr en eftir 20 ár.

### 3.2. Öldufarsreikningar

Vindalda er alda sem myndast vegna skerspennu sem virkar á yfirborð hafflatar. Oft er fjallað um tvennskonar vindöldu, þá sem myndast á hafi úti og er þá oft talað um úthafsöldu og hinsvegar vindöldu sem myndast í fjörðum, í grunnsævi og við strendur. Úthafsöldur geta orðið talsvert stærri en þær sem myndast við strendur enda takmarkast þær eingöngu af styrk og lengd vindatburðar. Tíðni og stærð úthafsöldu er fundin út frá mælingum á ölduduflum og tíðnigreiningum á þeim.

Algengast er að vegir sem liggja við sjávarborð séu staðsettir þar sem áhrif úthafsöldunnar hafa minnkað talsvert, t.d. innarlega í fjörðum. Því hefur verið mun algengara við hönnun strandvega að gera ráð fyrir að vindalda sem myndast í aðdraganda að mannvirki sé ráðandi.

Vindalda í fjörðum, í grunnsævi og við strendur er háð stiklengd/aðdraganda (lengdin þar sem vindur blæs yfir haffleti), lengd og styrk atburðar og dýpi. Vindalda hefur verið metin með jöfnu úr SPM (1984):

$$U_A = 0,71U^{1,23} \quad (4)$$

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0,283 \tanh\left(0,530\left(\frac{gd}{U_A^2}\right)^{3/4}\right) \tanh\frac{0,00565\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/2}}{\tanh\left(0,530\left(\frac{gd}{U_A^2}\right)^{3/4}\right)} \quad (5)$$

$$\frac{gT}{U_A} = 7,54 \tanh\left(0,833\left(\frac{gd}{U_A^2}\right)^{3/8}\right) \tanh\frac{0,0379\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/3}}{\tanh\left(0,833\left(\frac{gd}{U_A^2}\right)^{3/8}\right)} \quad (6)$$

Þar sem  $U_A$  er leiðréttur vindhraði (m/s),  $U$  er vindhraði (m/s),  $H$  er Ölduhæð (m),  $F$  er stiklengd (m),  $d$  er vatnsdýpi (m),  $T$  er sveiflutími öldu (s),  $g$  er þyngdarhröðun ( $m/s^2$ ).

Stiklengd öldunnar er fundin með meðaltalslengd 9 geisla sem teiknaðir eru út frá brúnni þar til þeir skera land. Bilið milli geislanna er  $3^\circ$  þ.a. heildar áhrifasvæði vinds er  $24^\circ$ .

Að öllu jafna er leitast við að hafa vegi á takmörkuðu dýpi, því er algengt að hönnunarlada sé dýpisháð. Dýpisháð alda er metin út frá mesta dýpi við mannvirki, þ.e. fundin er stærsta alda sem brotnar miðað við dýpi við t.á. Ef brotalda á því dýpi sem mannvirki er staðsett er minni en hönnunarlada er brotalda notuð. Notuð er jafna Goda (1990) til að meta brot öldu:

$$H_s = K_s H_0 \quad ef \frac{h}{L_0} \geq 0,2 \quad (7)$$

$$H_s = \min[(\beta_0 H_0 + \beta_1); \beta_{max} H_0; K_s H_0] \quad ef \frac{h}{L_0} < 0,2 \quad (8)$$



þar sem

$$\beta_0 = 0,28 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0,38} e^{20 \tan^{1,5} \theta} \quad (9)$$

$$\beta_1 = 0,52 e^{4,2 \tan \theta} \quad (10)$$

$$\beta_3 = \max \left\{ 0,92; 0,32 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0,29} \right\} e^{2,4 \tan \theta} \quad (11)$$

$$L_0 = 1,56 T^2 \quad (12)$$

þar sem  $H_s$  er kennialda framan við sjóvarnargarð,  $K_s$  er grynningarstuðull framan við sjóvarnargarð,  $h$  er dýpi framan við sjóvarnargarð (m),  $\Theta$  er botnhalli framan við sjóvarnargarð,  $H_0$  er ölduhæð á rúmsjó,  $L_0$  er öldulengd á rúmsjó.

Inntaksgögn sem þarf til að nota þessar jöfnur eru vindhraði og rúmfræðilegar stærðir sem eru háðar aðstæðum á svæðinu. Gunnar Sigurðsson (1974) mælti með eftirfarandi hönnunargildum fyrir vindhraða:

- Ákvörðun um hæð brimvarnar  $U = 25$  m/s.
- Ákvörðun um steinastærð í brimvörn  $U = 33$  m/s.

Jón Helgason (1979) mælti með eftirfarandi hönnunargildum fyrir vindhraða:

- Ákvörðun um hæð brimvarnar  $U = 28$  m/s.
- Ákvörðun um steinastærð í brimvörn  $U = 40$  m/s.

Við hönnun strandvega hefur verið stuðst við ofantalin hönnunargildi.

### Aðferð Siglingasviðs

Jöfnur 4 til 12 hafa verið allsráðandi til að meta ölduálag við hönnun vegfyllinga sem verða fyrir sjávarálagi. Þessar jöfnur voru þróaðar fyrir nokkrum áratugum síðan og hafa aðferðir og möguleikar til öldufarsútreikninga breyst. Ýmis gögn svo sem veðurfarsgögn og landlíkön hafa orðið mun betri með tímanum sem gefur möguleika á að gera ítarlegri reikninga á öldufari. Þróuð hafa verið tölvulíkön sem herma öldufar og hefur Siglingasvið Vegagerðarinnar notast við slík líkön í nokkurn tíma til að fá nákvæmari mynd af öldufari. Siglingasviðið var fengið til að meta öldufar á þeim stöðum sem til skoðunar voru.

Þegar dýpi er meira en hálf öldulengd hefur sjávarbotn ekki áhrif á útbreiðslu öldu en þegar alda kemur inn á grynna svæði eru öldulengdir og öldustefnur háðar breytingum á legu botnsins. Alda sem nálgast strönd sveigir frá upphaflegri stefnu og í átt til lands. Stefubreytingin stafar af því að hraði öldunnar er háður dýpinu sem hún ferðast yfir en hraðinn minnkar með minnkandi dýpi. Þessi hegðun er kölluð öldusveigja. Öldusveigjan frá hafi og inn firðina er reiknuð með öldusveigjuforritinu MIKE21 SW sem er þróað af dönsku straumfræðistofnuninni DHI. Nákvæmar upplýsingar um dýpi, úthafsöldu og vind eru forsendur öldufarsreikninga (Jónsdóttir & Sigurðarson, 2016).

Valinn var einn punktur utan við hvern fjörð sem einkenna á úthafsöldu á svæðinu og öldu- og veðurgagna tímaraðir fengnar frá ECMWF. Tímaraðir fyrir ölduhæð, sveiflutíma öldu, öldustefnu og sjávarföll fyrir 10 ára tímabil (2006-2015) voru notaðar á jaðar reiknilíkansins. Enn fremur voru notuð vindgögn (vindhraði og vindstefna) úr Vindatlas Veðurstofu Íslands í

punktum nálægt athugunarstöðunum. Vindgögn eru notuð í öldufarsreikningum til að herma vind yfir haffleti yfir tímabilið sem hefur áhrif á öldmyndun. Tímaraðir fyrir sjávarföll á hverjum stað eru fengnar úr sjávarfallalíkani og leiðrétt fyrir staðbundnum sjávarhæðum.

Niðurstöður voru dregnar úr líkaninu í völdum punktum framan við hvern stað sem dreifirit fyrir ölduhæð og sveiflutíma annars vegar og ölduhæð og öldustefnu hins vegar. Enn fremur er skoðað nánar eitt tilvik (óveður) fyrir hvert svæði þar sem ölduhæð reiknast há. Þar sem um er að ræða 10 ára reiknitímabil er lítið svo á að niðurstöður gefi grófa nálgun á ölduhæð með líklegan endurkomutíma um 10 ár. Gerðar hafa verið tölfræðilegar greiningar á ölduhæð með mismunandi endurkomutíma fyrir öldur inn í fjörðum og hafa þær greiningar bent til að alda með 100 ára endurkomutíma sé á bilinu 10 - 20 % stærri en alda með 10 ára endurkomutíma.

### 3.3. Grjót

Þróaðar hafa verið nokkrar mismunandi jöfnur til að meta æskilegar grjótstærðir út frá ölduhæð, eiginleikum gróts og kennisniði brimvarnar. Ein mest þekktá jafnan í þessum efnum er Hudson jafnan frá 1959 (Guler, 2013) og hefur hönnunardeild Vegagerðarinnar notast við hana. Van Der Meer þróaði jöfnur til að ákvarða steinastærðir árið 1988 og hefur Siglingasvið að mestu notað jöfnur Van Der Meer í sinni hönnun.

Jöfnur Van Der Meer eru ólíkar Hudson jöfnu að því leiti að jöfnurnar taka tillit til mismunandi eiginleika öldu (surging eða plunging), sveiflutíma, fjölda alda sem lenda á mannvirki, gleypni (porosity) varnar og hvort um sé að ræða “deep water“ eða “shallow water conditions“. “Deep water condition“ Van Der Meer jafnan er sú jafna sem Siglingasvið hefur helst notað. Árið 2004 var “shallow water condition“ jafnan endurskoðuð af Van Gent og mælir Rock Manual (2007) með að nota aðferð Van Gent fyrir “shallow water conditions“ en Van Der Meer fyrir “deep water condition“. Eingöngu voru skoðaðar jöfnur Van Der Meer og Hudson í þessu verkefni.

Jafna Hudson,

$$W_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (13)$$

þar sem  $W_{50}$  er meðalþyngd steina,  $\rho_s$  er eðlisþyngd steina,  $H$  er hæð öldu,  $K_D$  er skemmdar stuðull sem fundinn er með tilraunum,  $S_r$  er hlutfall eðlisþyngdar steina og sjávar,  $\cot \theta$  er flái brimvarnar.

Jafna Van Der Meer,

$$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi/g)H_s/T_m^2} \quad (16)$$

$$N_s = \frac{H_s}{D_{n50}} = 6,2P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^{-0,5} \quad (\text{plunging alda}), \quad (17)$$

$$N_s = \frac{H_s}{D_{n50}} = 1,0P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad (\text{surging alda}) \quad (18)$$

þar sem  $T_m$  er meðal sveiflutími öldu,  $N_s$  er stöðuleika stuðull,  $H_s$  er ölduhæð, er relative underwater density,  $D_{n,50}$  er þvermál meðalsteins í rofvörn,  $P_b$  stendur fyrir gleypni (porosity) rofvarnar,  $S_a$  er skemmdarstuðull,  $N_w$  er stuðull sem lýsir því hversu oft rofvörn þarf að standast hönnunarforsendur,  $\cot \alpha$  er halli fláa og  $\xi_m$  er surf similarity parameter.

Umskiptin frá plunging öldu og í surging öldu gerist þegar  $\xi_m$  nær krítísku gildi,

$$\xi_{mc} = (6,2P^{0,31}\sqrt{tana})^{\frac{1}{(P_b+0,5)}} \quad (19)$$

Þannig að ef  $\xi_m < \xi_{mc}$  er aldan plunging. Skv. Van Der Meer á  $P_b$  að vera 0,1 ef undirlag brimvarnar er mjög þétt en 0,4 ef undirlagið er síulag ofan á grófum kjarna. Ef  $S_a = 2$  sem eru engar skemmdir á mannvirki miðað við hönnunarforsendur.  $N_w$  er reiknað út frá fjölda alda sem skella á mannvirki á líftíma rofvarnar. Ef gert er ráð fyrir einum atburði á líftíma rofvarnar sem varir í 3 klst og sveiflutími öldu er 8,2 sek er  $N_w = 3 * 3600 / 8,2 = 1300$ . Þegar hönnunarlada er dýpisháð geta minni atburðir leitt til að hönnunarforsendum er náð og er þá  $N_w$  hærra, en ekki er ráðlagt að notað sé hærra gildi en 7500.

Gert er ráð fyrir að steinninn sé kassalaga og þyngd fundin út frá þvermáli með eftirfarandi jöfnu:

$$W = \rho_s D_{n50}^3 \quad (20)$$

### Þykkt rofvarnar og grjótflokkar

Hönnunardeild Vegagerðinnar hefur notað eftirfarandi jöfnur til að ákveða þykkt rofvarnar,

$$r = \max \left[ 0,3 ; 2,0 \left( \frac{W_{50}}{\rho_s} \right)^{1/3} ; 1,25 \left( \frac{W_{max}}{\rho_s} \right)^{1/3} \right] \quad (14)$$

þar sem  $r$  er þykkt rofvarnar (m).

Þykkt rofvarnar neðan vatnsborðs skal aukin um 50 % neðan vatnsborðs ef aðstæður á byggingarstað valda því að erfitt er að tryggja að skilyrði hönnunar séu uppfyllt hvað þykkt rofvarnar varðar.

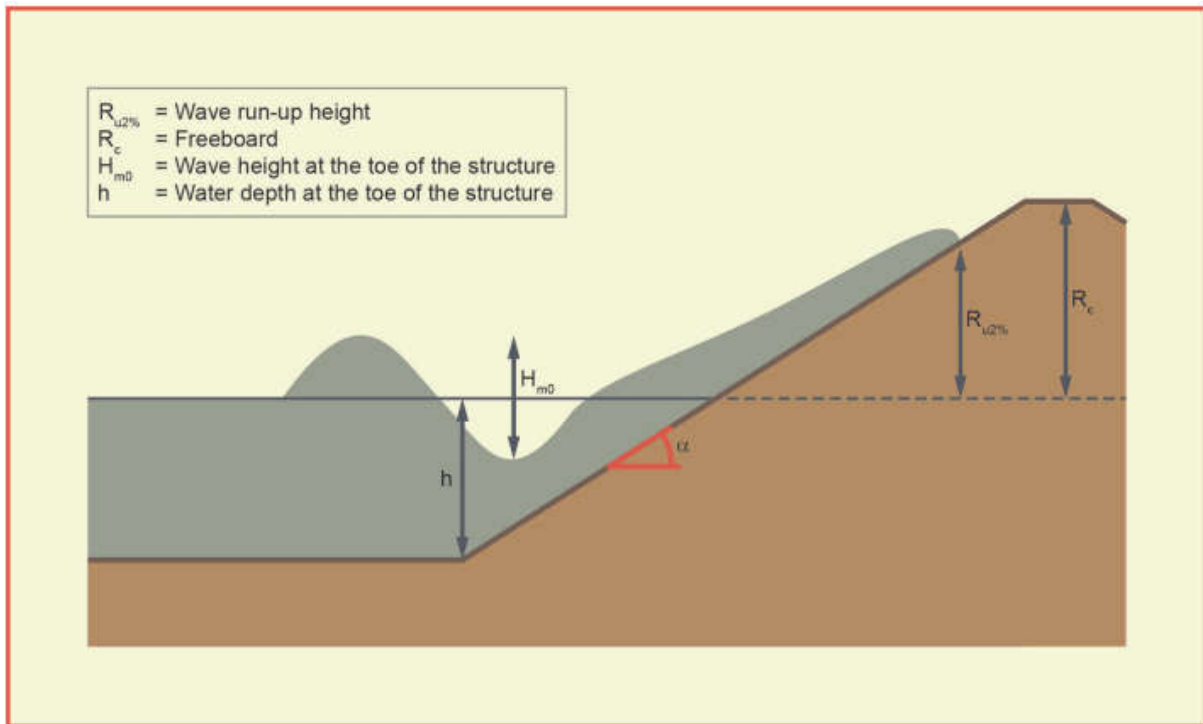
Þyngsti steinn sem nota má í brimvörn er  $W_{max} = 4 W_{50}$  og sá léttasti er  $W_{min} = 0,125 W_{50}$ .  $W_{85} = 2 W_{50}$  og  $W_{15} = 0,4 W_{50}$ .

Hönnunardeild hefur gert ráð fyrir að steinninn sé kúlulaga þegar samband þvermáls og þyngdar steins er fundið,

$$D = \left( \frac{6 W}{\pi \rho_s} \right)^{1/3} \quad (15)$$

### 3.4. Hæð upprennslis

Hæð rofvarna er háð sjávarstöðu og upprennslis. Upprennsli er háð öldu og eiginleikum brimvarnar svo sem halla og hrýfi. Upprennsli öldu,  $R_u$ , er mælt lóðrétt frá sjávarborði upp að efri brún brimvarnar. Flestar rannsóknir hafa miðast við að uppfylla skilyrði þar sem upprennslis takmarkist við að 2 % af fjölda innkomandi alda sé hærri en upprennslis  $R_{u2\%}$ . Með öðrum orðum af 100 öldum sem renna upp halla eru tvær öldur sem renna hærra en  $R_{u2\%}$  (Hughes, 2005). Þegar miðað er við að takmarka upprennslis við 2 % alda hafa rannsóknir sýnt að engar skemmdir verða á grasi innan sjóvarnar (Viggósson, Eliásson, & Sigurðarson, 2016).



Mynd 9 Sýnir upprennsli á slétta vörn með þéttum kjarna (mynd fengin úr EurOtop manual)

Upprennsli hefur verið rannsakað umtalsvert og margar jöfnur og aðferðir verið þróaðar. Hingað til hefur tíðkast að nota aðferð sem lýst er í SPM (1984). Upprennsli er þá fundið fyrir sléttan flöt með því að nota myndir 7-12 og 7-13 í SPM og síðan margfaldað með stuðli sem lýsir grófleika brimvarnar. Grófleikastuðullinn er misjafn og er hægt að finna viðmið í töflu 7-2 í SPM.

Undanfarin 20 ár hefur mikil þróun átt sér stað í að meta og skilgreina ágjöf og upprennsli og því æskilegt að beita nýrri aðferðum en þeim sem lýst er í SPM (1984) við mat á þessum stærðum. Siglingasviðið hefur m.a. notað jöfnu sem lýst er í EurOtop manual til að meta upprennsli (2016):

$$\frac{R_{2\%}}{H_{m0}} = 1,65 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{m-1,0} \quad (21)$$

$$\text{með ámark } \frac{R_{2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \text{ surgin} \gamma_\beta \left( 4 \frac{1,5}{\sqrt{\gamma_b \xi_{m-1,0}}} \right) \quad (22)$$

þar sem  $\gamma_b$  er stuðull sem tekur tillit til áhrifa bermu á upprennsli,  $\gamma_f$  tekur tillit til gerðar grjótfháa og fláa og  $\gamma_\beta$  tekur tillit til áhrifa aldna undir horni.

Frá  $\xi_{m-1,0} = 1,8$  hækkar hrjúflekastuðullinn  $\gamma_f \text{ surgin}$  línulega upp í 1 fyrir  $\xi_{m-1,0} = 10$  sem má skilgreina með:

$$\gamma_f \text{ surgin} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 1,8)(1 - \gamma_f)/8,2 \quad (23)$$

Hámark  $R_{2\%}/H_{m0} = 3$  fyrir vörn með þéttan kjarna en 2 fyrir vörn með gljúpan kjarna.

Tafla 2 sýnir gildi á  $\gamma_f$  grjótgarða með fláa 1:1,5 miðað við mismunandi gerðir. Í vegagerð er oftast um að ræða 1 lag á þéttan kjarna.

*Tafla 2 Gildi á  $\gamma_f$  grjótgarda með fláa 1:1,5 miðað við mismunandi gerðir.*

<u>Gerð varnar</u>	<u><math>\gamma_f</math></u>
Slétt yfirborð	1
1 lag, þéttur kjarni	0,6
1 lag, gljúpur kjarni	0,45
2 lög, þéttur kjarni	0,55
<u>2 lög gljúpur kjarni</u>	<u>0,4</u>

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta| \text{ fyrir } 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \quad (24)$$

Fyrir samfellda vörn er  $\gamma_b = 1$ .

Hingað til hefur einungis 2% upprennsli verið skilgreint. Ýmsar leiðir eru til sem reikna upprennsli fyrir önnur hlutföll. Við hönnun á hæð sjóvarna hefur Siglingasviðið notað útreikninga á ágjöf sem forsendur fyrir hæð varna. Ekki verður sú aðferð kynnt hér en vert væri að athuga hvort réttara væri að nota ágjöf í stað upprennslis.

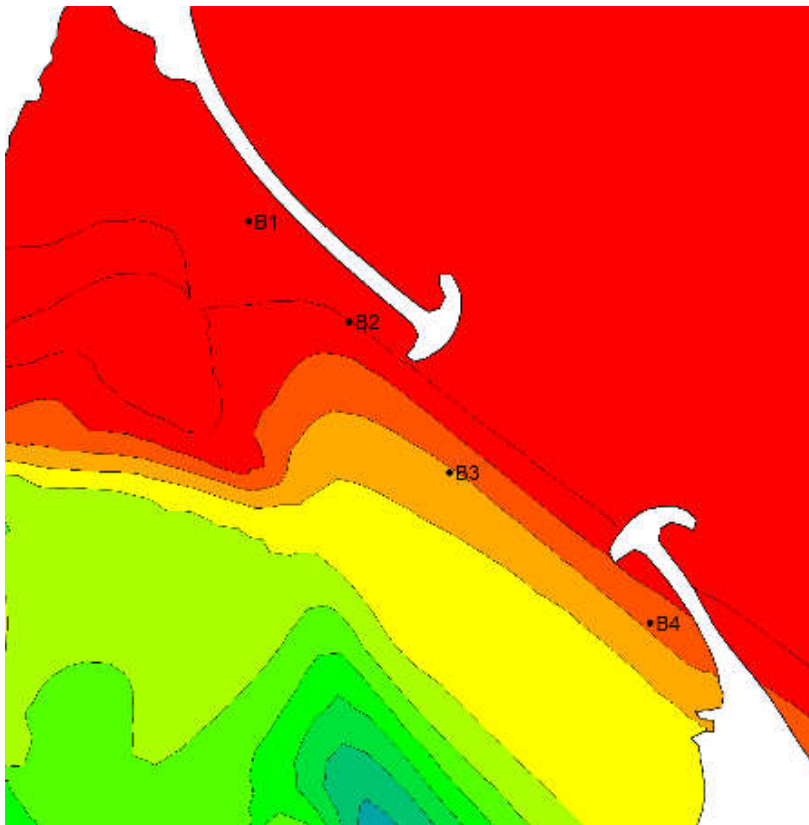
## 4. Niðurstöður

### 4.1. Öldufarsreikningar

#### 4.1.1. Borgarfjörður

Jón Helgason (1979) tók saman forsendur fyrir hönnun vegfyllingar í Borgarfirði. Hönnunaralda var ákveðin út frá stiklengd og vindhraða líkt og fjallað var um í kafla 3.2. og jöfnur 4 til 12 lýsa. Notuð var sín hvor hönnunaraldan til að meta annarsvegar grjótstærð og hinsvegar hæð brimvarnar. Hönnunaralda var metin á bilinu 2,2-2,4 m við ákvörðun um grjótstærð en 1,8 m við mat á hæð grjótvarnar.

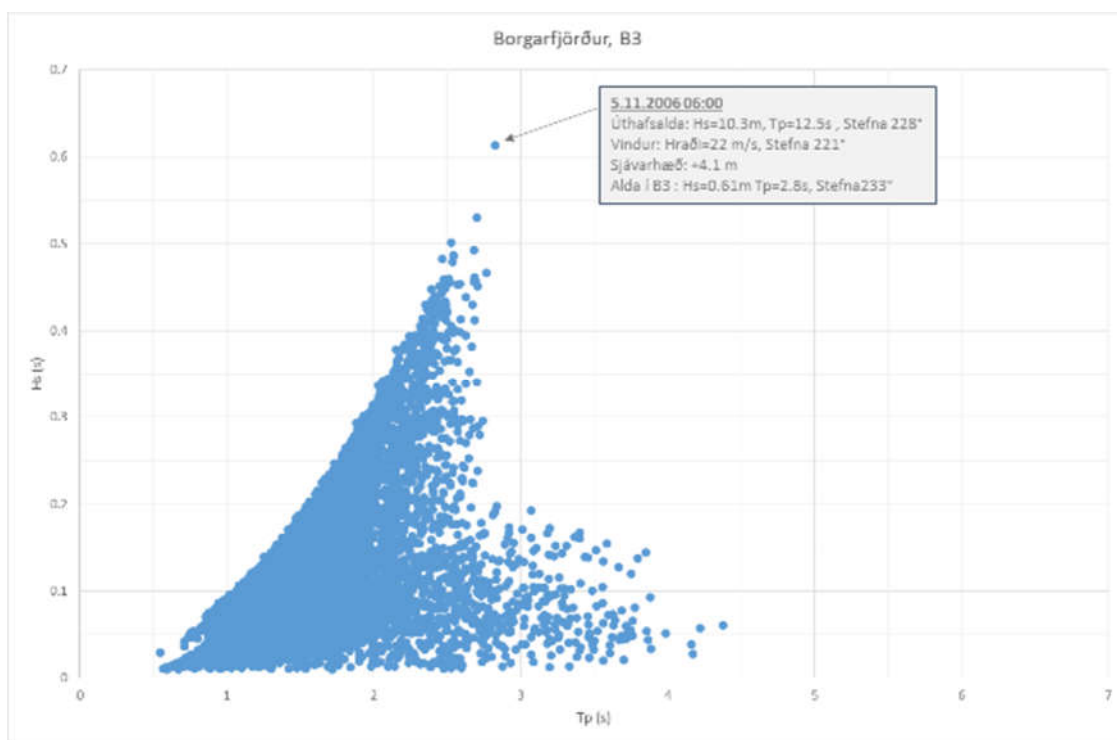
Gerðir voru öldufarsreikningar í Borgarfirði með Mike21 SW og ölduhæð, sveiflutími öldu og öldustefna hermd fyrir 10 ára tímabil (2006-2015). Valið er að skoða niðurstöður öldufarsreikninganna í fjórum punktum, B1, B2, B3 og B4, framan við þverun Borgarfjarðar. Staðsetning þeirra er sýnd á mynd 10.



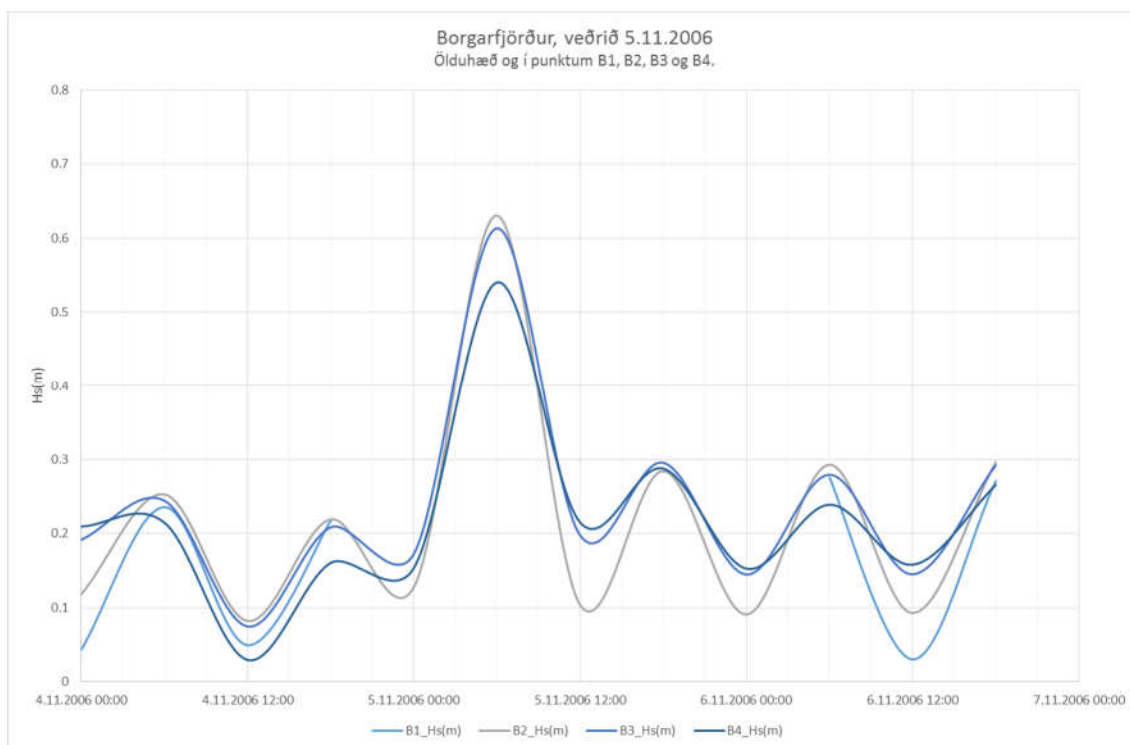
*Mynd 10* Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga við Borgarfjarðarbrú.

Mynd 11 sýnir dreifingu ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti B3. Þar er jafnframt bent á hæsta ölduhæðargildið með upplýsingum um dagsetningu atburðarins, ölduhæð úthafsöld, vindhraða o.fl. Þessi atburður sem var afleiðing veðurs sem átti sér stað á tímabilinu 4.11.-6.11.2015 var skoðaður nánar og sýnir mynd 12 ölduhæð í punktum B1, B2, B3 og B4 á tímabilinu og mynd 13 ölduhæð og öldustefnu í innri hluta Borgarfjarðar kl. 06:00 5.11.2006. Mynd 14 sýnir vindhraða og vindstefnu yfir atburðinn, en þar sést að hámarks vindhraði var um 23 m/s. Til að meta áhrif hærri sjávarstöðu vegna áhlaðanda á ölduhæð var atburðurinn keyrður aftur þar sem 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m var bætt við sjávarhæðina. Mynd 15 sýnir niðurstöður um áhrif mismunandi sjávarhæðar í punkti B2.

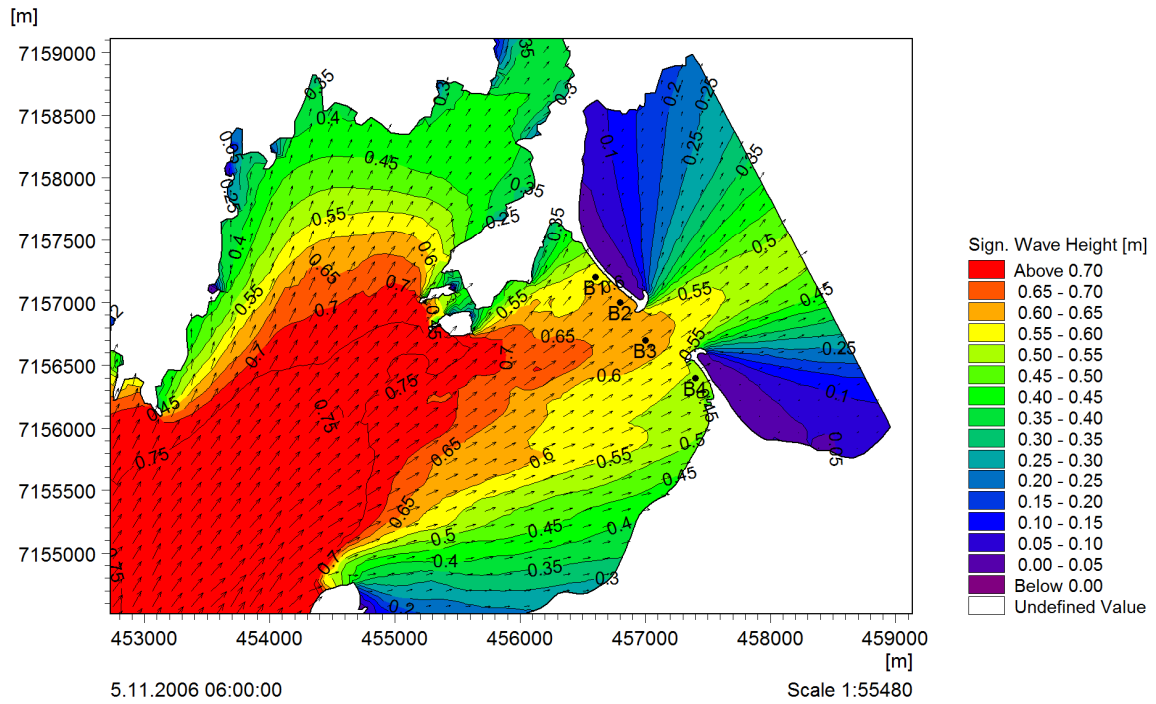




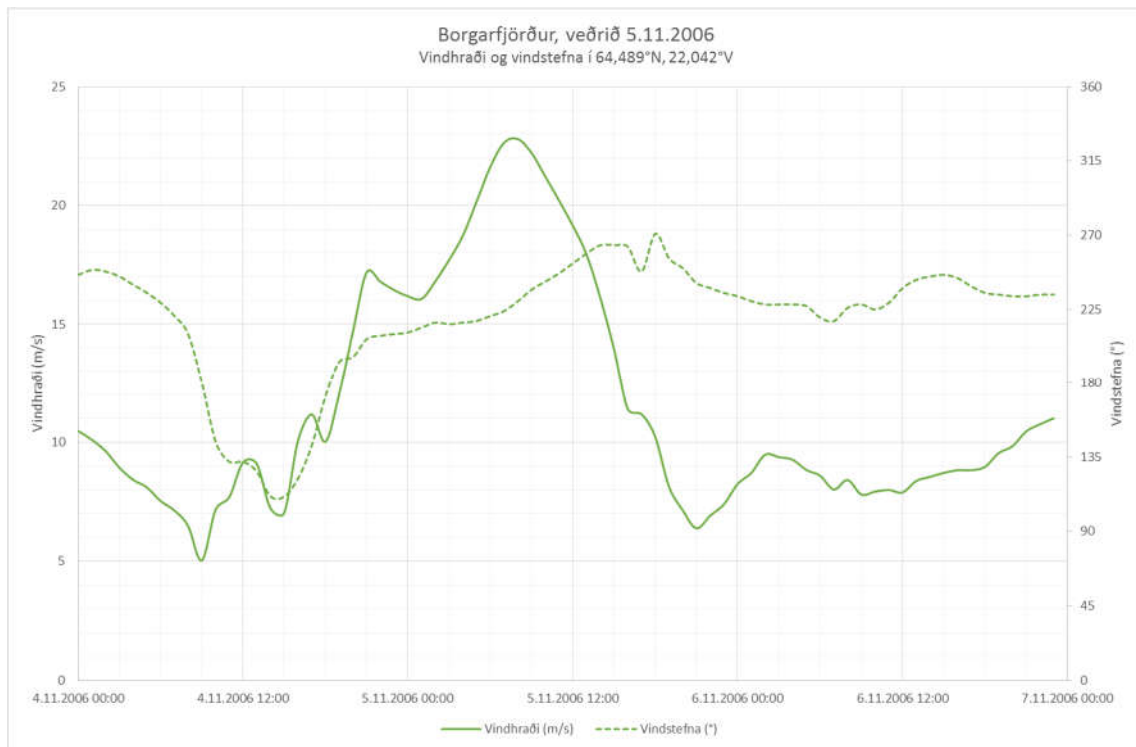
*Mynd 11 Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti B3. – Veðrið 5.11.2006 06:00.*



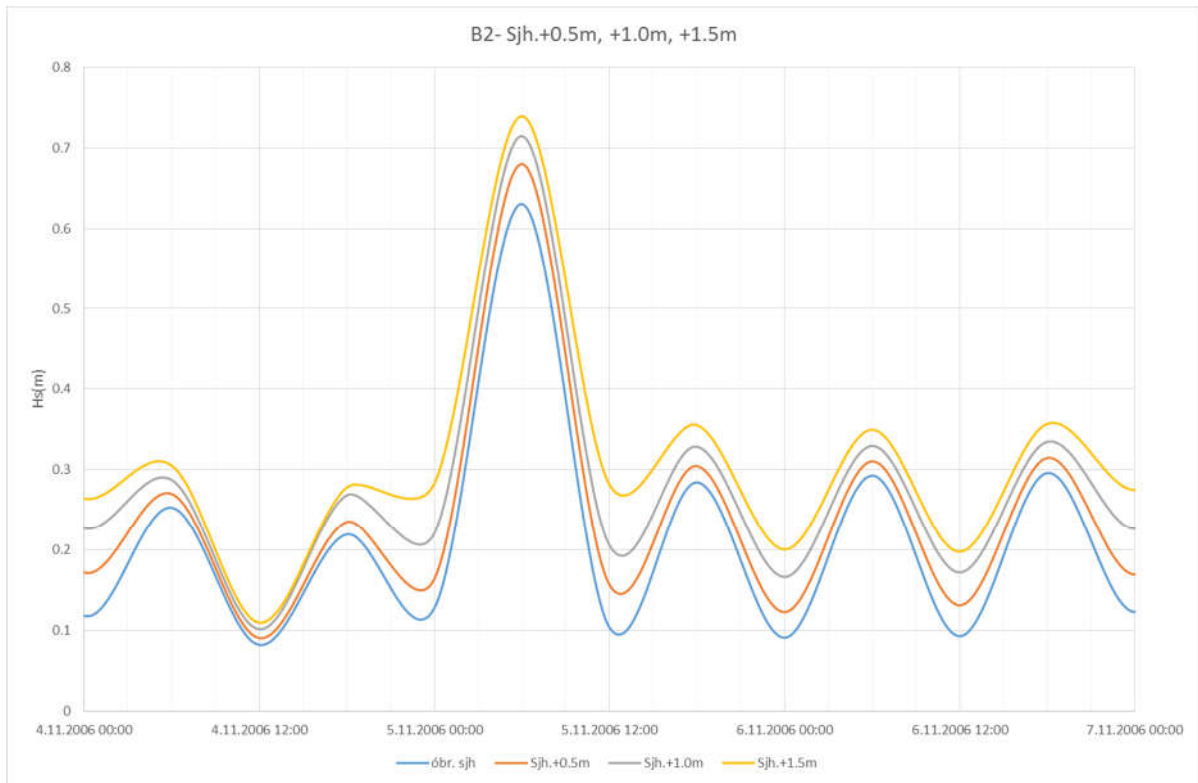
*Mynd 12 Ölduhæð í punktum B1, B2, B3 og B4 tímabilið 4.-6.11.2006.*



Mynd 13 Ölduhæðir og öldustefna í innri hluta Borgarfjarðar 5.11.2006 kl. 06:00.



Mynd 14 Vindhraði og vindstefna í 64.489°N, 22.042°V tímabilið 4.-6.11.2006.



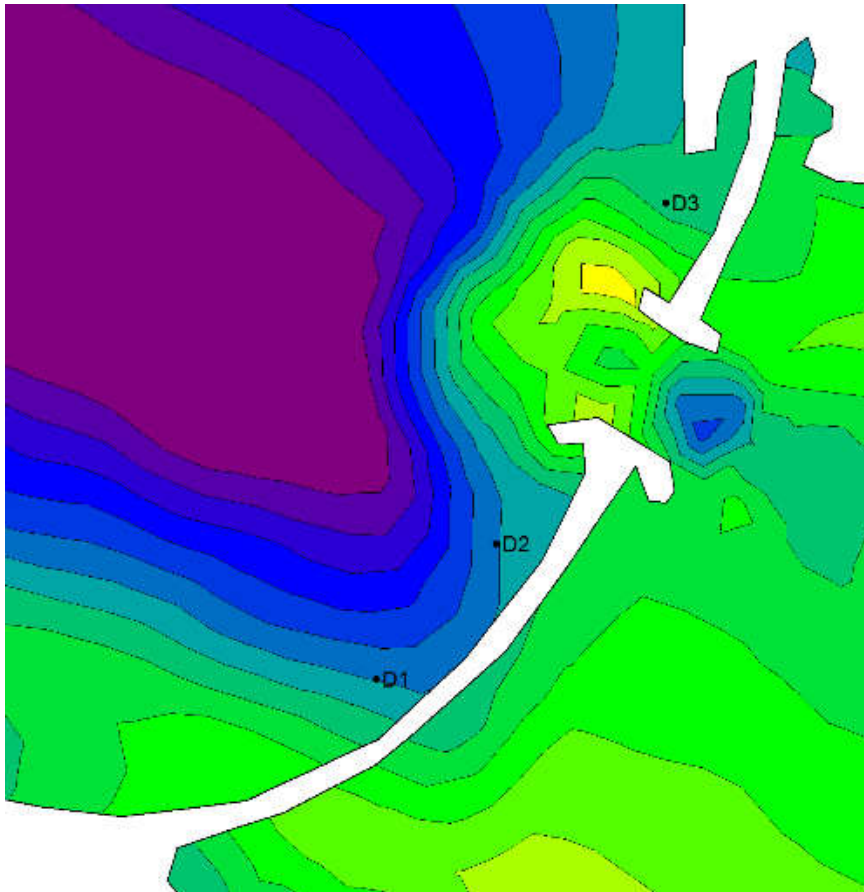
*Mynd 15 Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í punkti B2.*

Niðurstöður útreikninga benda til að fyrir 10 ára tímabil fari stærstu öldurnar ekki yfir 0,75 m.

#### 4.1.2. Dýrafjörður

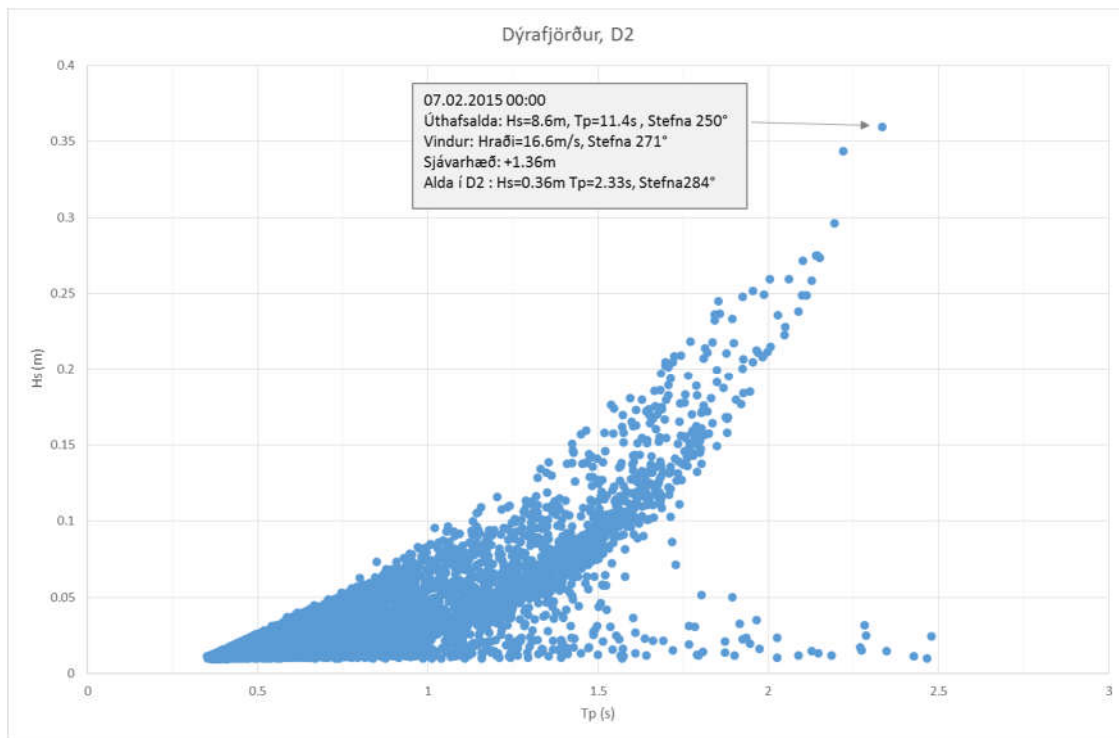
Helgi Jóhannesson (1990) hannaði brimvörn á vegfyllingu og leiðigarða á Vestfjarðarveg yfir Dýrafjörð og er umfjöllun og niðurstöður að finna í skýrslunni *Vestfjarðavegur yfir Dýrafjörð hæð og grjótvörn vegfyllingar*. Hönnunaralda sem miðuð var við var 1,85 m við ákvörðun um grjóttærð en 1,52 m við mat á hæð grjótvornar.

Ölduhæð, sveiflutími öldu og öldustefna voru hermd fyrir 10 ára tímabil (2006-2015). Valið var að skoða niðurstöður öldufarsreikninganna í þremur punktum, D1, D2 og D3 framan við þverun Dýrafjarðar. Staðsetning þeirra er sýnd á mynd 16.

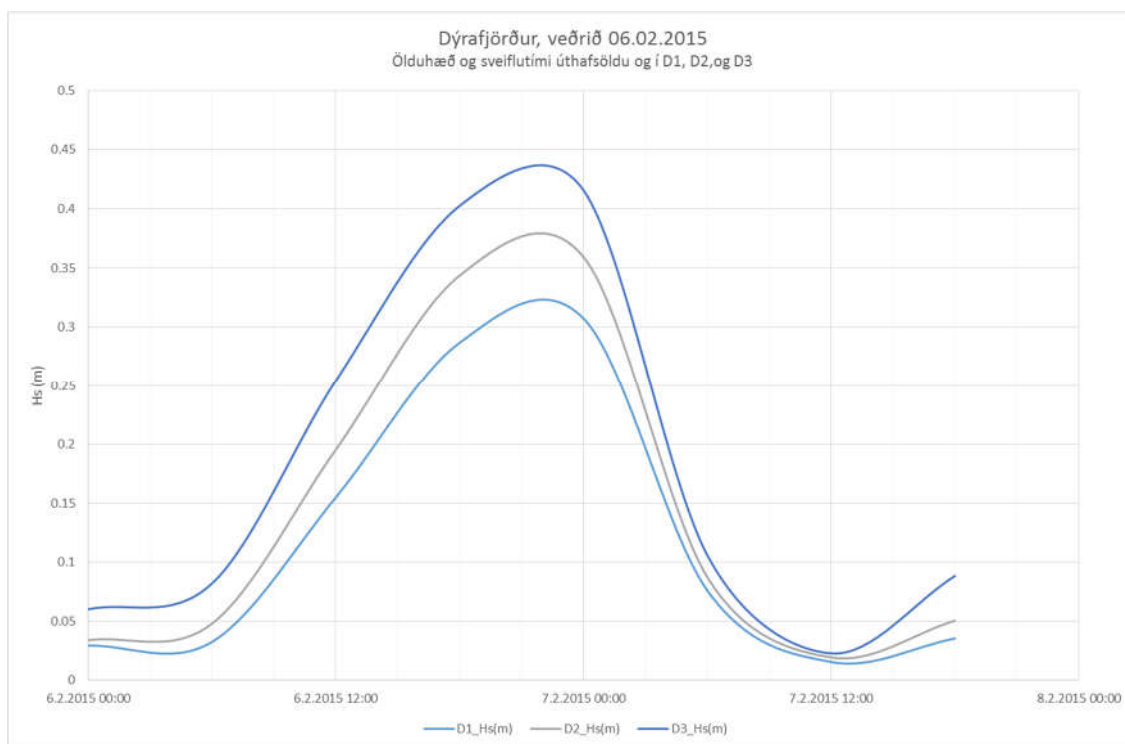


*Mynd 16* Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga.

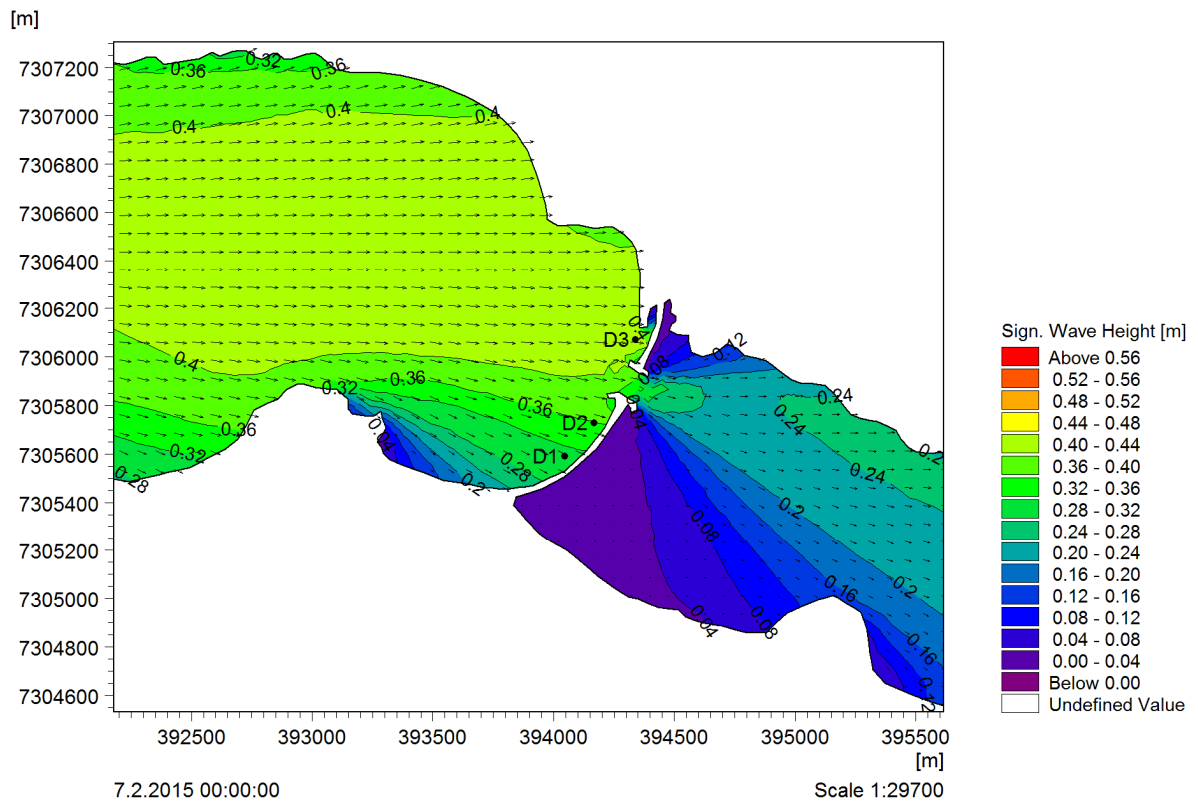
Mynd 17 sýnir dreifingu ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti D2. Þar er jafnframt bent á hæsta ölduhæðargildið með upplýsingum um dagsetningu atburðarins, ölduhæð úthafsöldu, vindhraða o.fl. Þessi atburður sem var afleiðing veðurs sem átti sér stað á tímabilinu 6.11.-7.11.2015 var skoðaður nánar og sýnir mynd 18 ölduhæð í punktum D1, D2 og D3 á tímabilinu og mynd 19 ölduhæð og öldustefnu í innri hluta Dýrafjarðar kl. 00:00 7.11.2015. Mynd 20 sýnir vindhraða og vindstefnu yfir atburðinn, en þar sést að hámarks vindhraði var um 18 m/s. Til að meta áhrif hærri sjávarstöðu vegna áhlaðanda á ölduhæð var atburðurinn keyrður aftur þar sem 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m var bætt við sjávarhæðina. Mynd 21 sýnir niðurstöður um áhrif mismunandi sjávarhæðar í punkti D2.



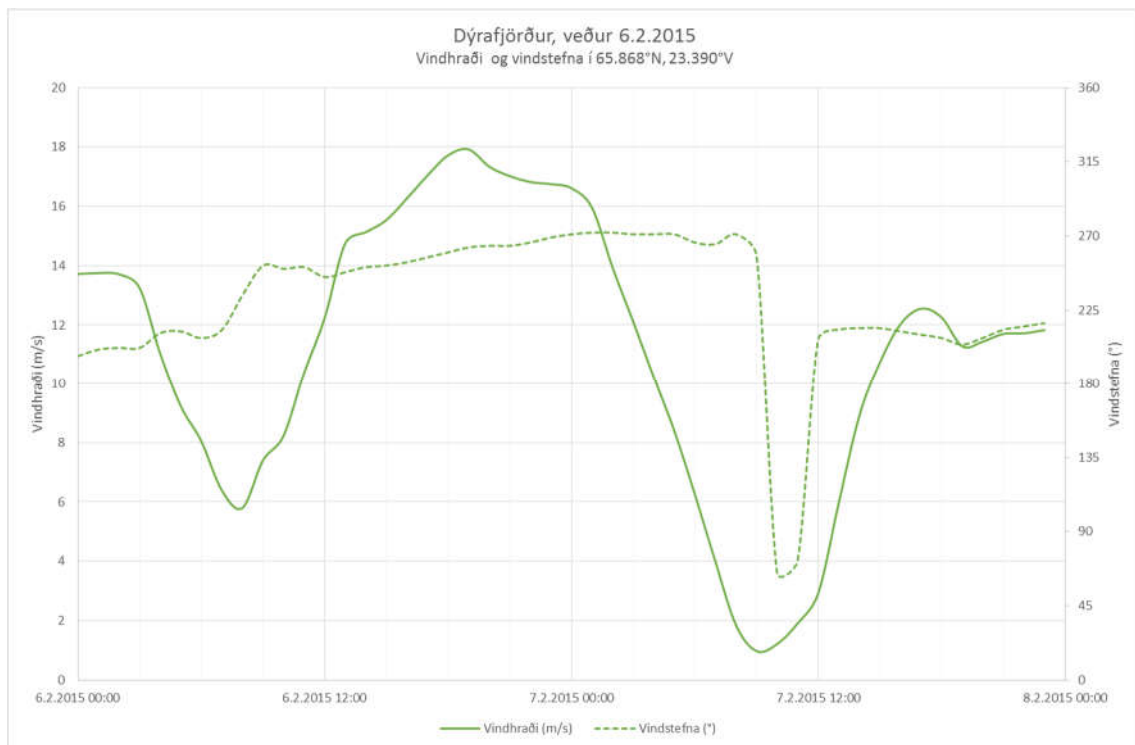
*Mynd 17 Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti D2. – Veðrið 7.2.2015 00:00.*



*Mynd 18 Ölduhæð í punktum D1, D2 og D3 tímabilið 6.-7.2.2015.*

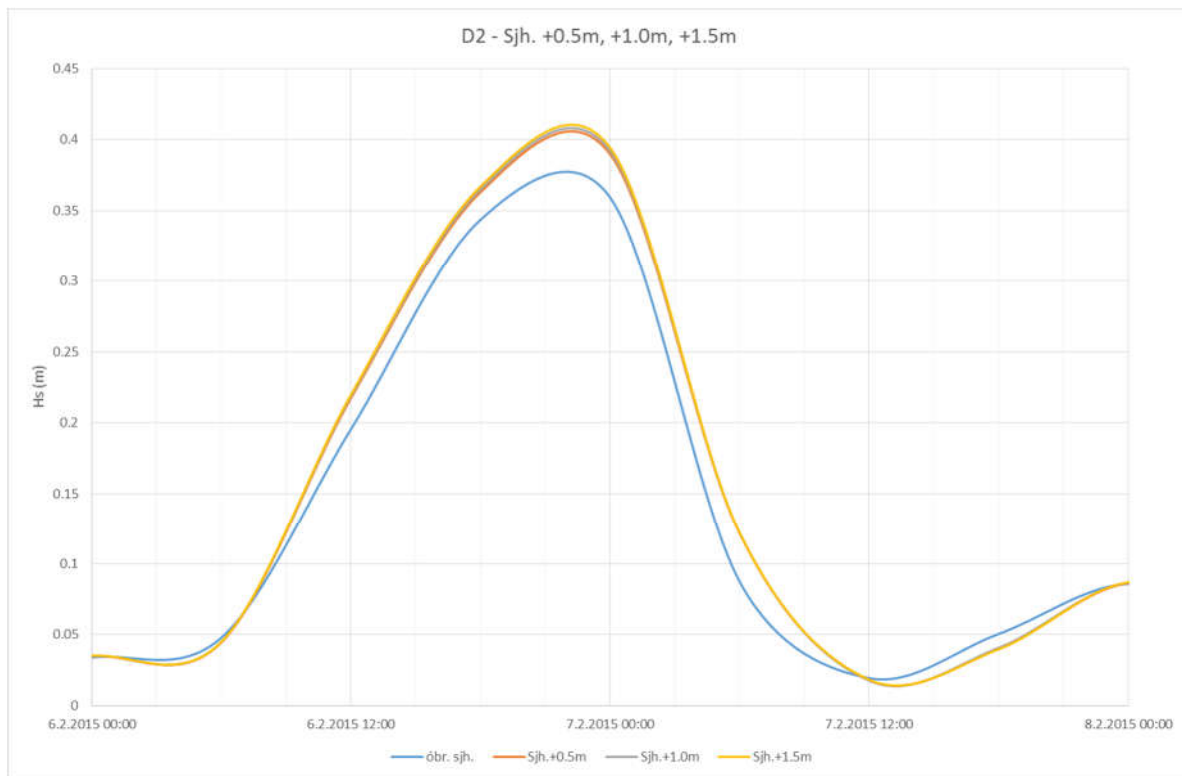


Mynd 19 Ölduhæðir og öldustefna í innri hluta Dýrafjarðar 7.2.2015 kl. 00:00.



Mynd 20 Vindhraði og vindstefna í 64.489°N, 22.042°V tímabilið 6.-7.2.2015.





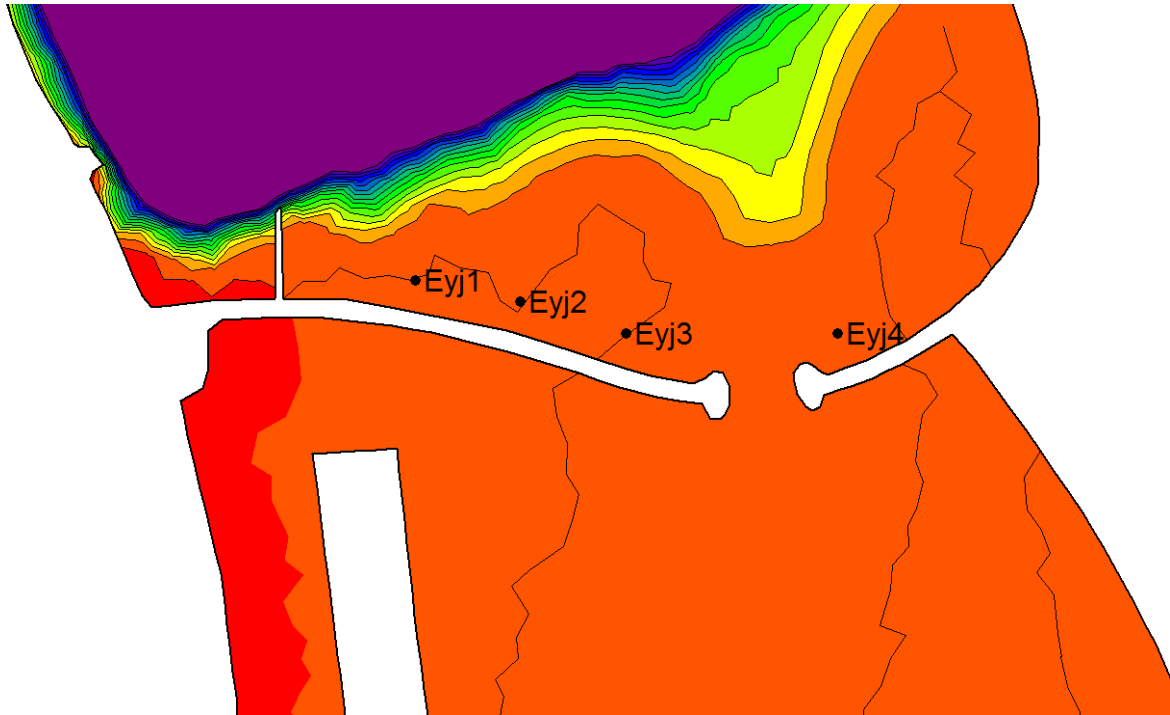
*Mynd 21 Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í D2.*

Niðurstöður útreikninga benda til að yfir 10 ára tímabil fari stærstu öldurnar ekki yfir 0,40 m.

### 4.1.3. Eyjafjörður

Ekki fannst umfjöllun um forsendur fyrir útreikninga á hönnunaröldu fyrir vegfyllinguna í Eyjafirði, en það fannst handskrifað blað um að hönnunaralda væri 1,2 m. Miðað við Hudson jöfnu á útreikningum á grjótstærð og hannaða steinastærð passar það.

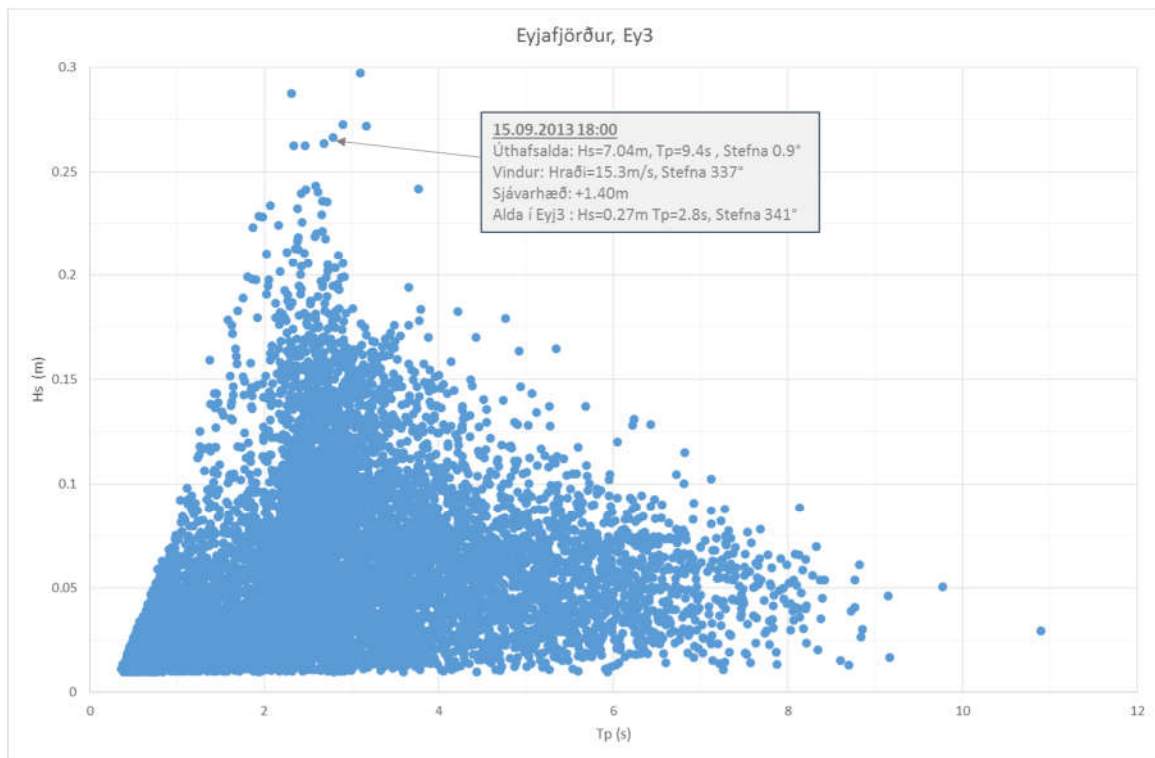
Ölduhæð, sveiflutími öldu og öldustefna voru hermd fyrir 10 ára tímabil (2006-2015). Valið var að skoða niðurstöður öldufarsreikninganna í fjórum punktum, Eyj1, Eyj2 og Eyj3 framan við þverun Eyjafjarðar. Staðsetning þeirra er sýnd á mynd 22.



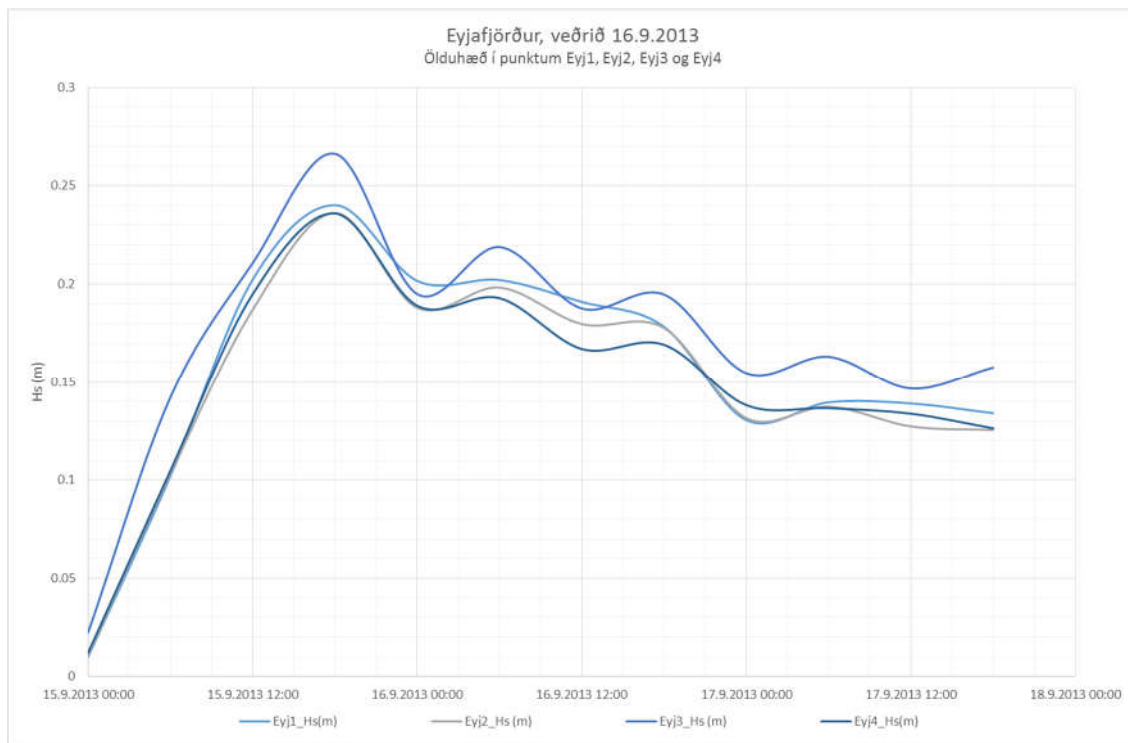
Mynd 22 Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga.

Mynd 23 sýnir dreifingu ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti Eyj3. Þar er jafnframt bent á hátt ölduhæðargildi með upplýsingum um dagsetningu atburðar, ölduhæð úthafsöldu, vindhraða o.fl. Þessi atburður sem var afleiðing veðurs sem átti sér stað á tímabilinu 15.-17.9.2013 var skoðaður nánar og sýnir mynd 24 ölduhæð í punktum Eyj1, Eyj2, Eyj3 og Eyj4 á tímabilinu og mynd 25 ölduhæð og öldustefnu í innri hluta Eyjafjarðar kl. 18:00 15.9.2013. Mynd 26 sýnir vindhraða og vindstefnu yfir atburðinn, en þar sést að hámarks vindhraði var um 15 m/s.

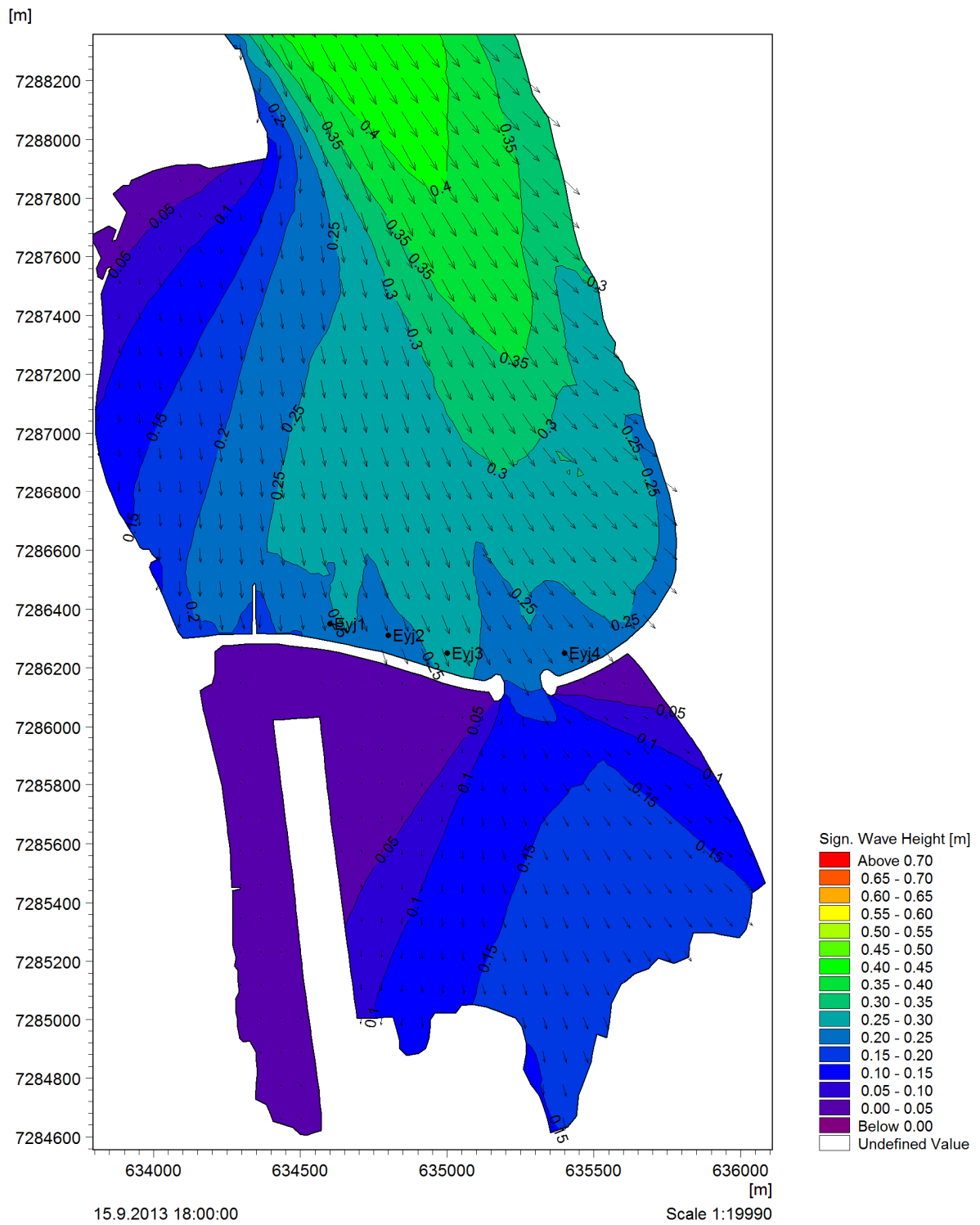
Til að meta áhrif hærri sjávarstöðu vegna áhlaðanda á ölduhæð var atburðurinn keyrður aftur þar sem 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m var bætt við sjávarhæðina. Mynd 27 sýnir niðurstöður um áhrif mismunandi sjávarhæðar í punkti Eyj3.



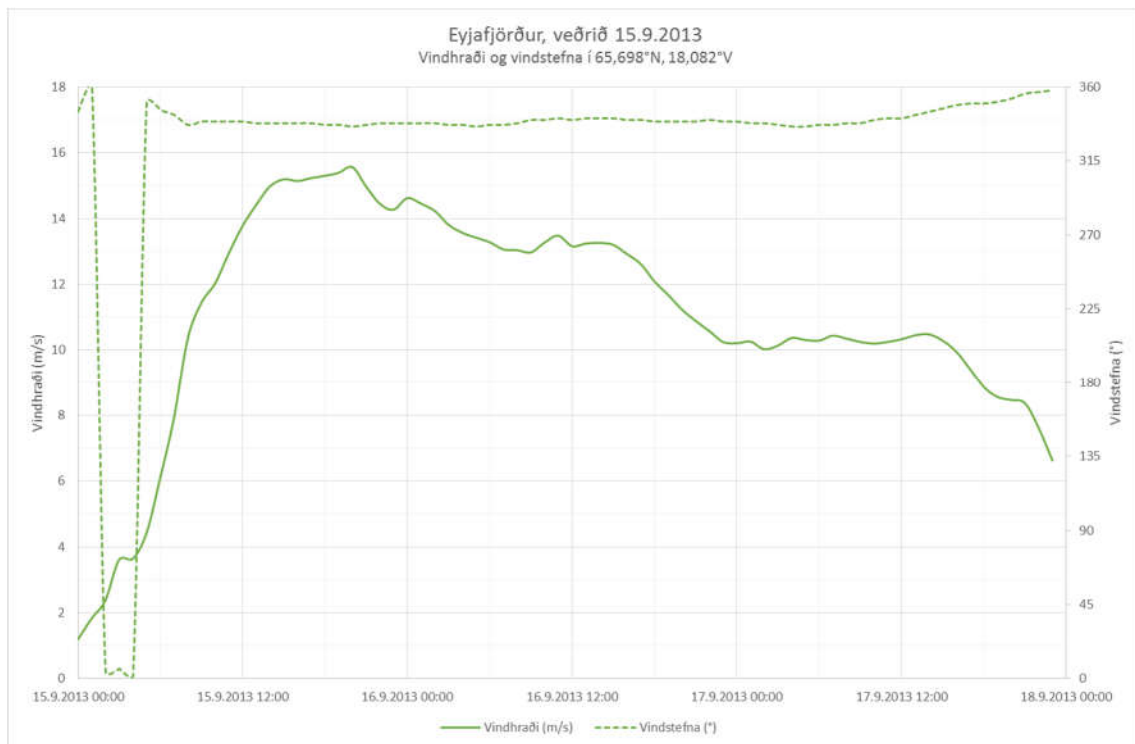
*Mynd 23 Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti Eyj3. – Veðrið 15.09.2013 18:00.*



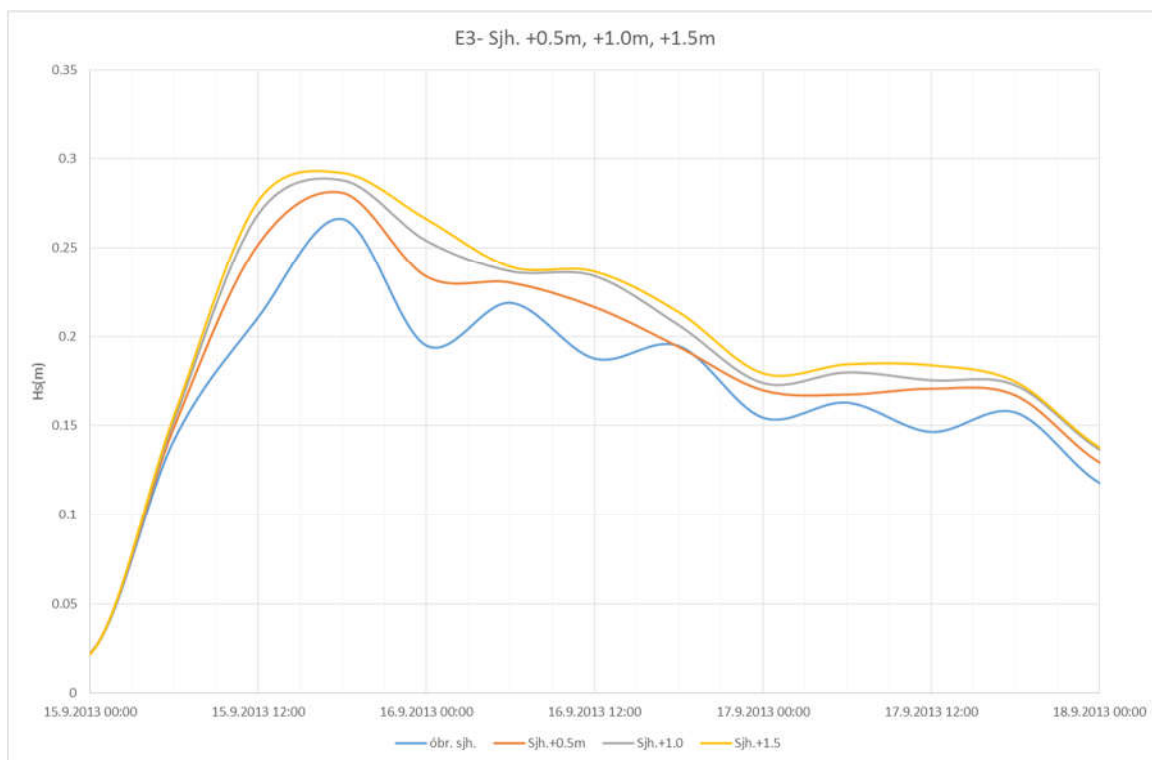
*Mynd 24 Ölduhæð í punktum Eyj1, Eyj2, Eyj3 og Eyj4 tímabilið 15.-17.11.2013.*



*Mynd 25 Ölduhæðir og öldustefna í innri hluta Eyjafjarðar 15.09.2013 kl. 18:00.*



**Mynd 26** Vindhraði og vindstefna í 65,698°N, 18,082°V tímabilið 15.-17.11.2013.

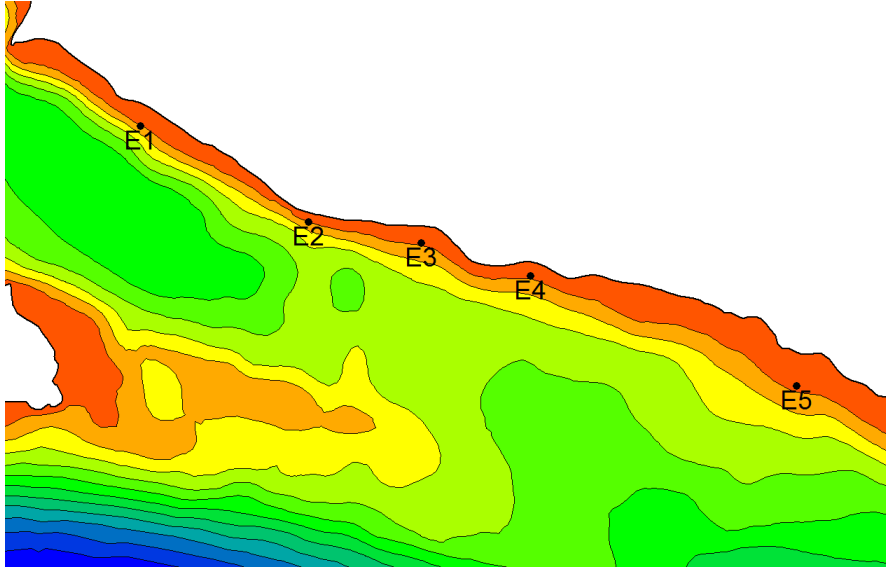


**Mynd 27** Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í punkti Eyj3.

Niðurstöður útreikninga benda til að yfir 10 ára tímabil fari stærstu öldurnar ekki yfir 0,3 m.

#### 4.1.4. Eskifjörður

Eingöngu er um nýja öldufarsútreikninga að ræða en ekki um samanburð á eldri hönnun fyrir Helgustaðaveg á Eskifirði. Ölduhæð, sveiflutími öldu og öldustefna voru hermd fyrir 10 ára tímabil (2006-2015). Valið var að skoða niðurstöður öldufarsreikninganna í fimm punktum, E1, E2, E3, E4 og E5 framan við Helgustaðaveg. Staðsetning þeirra er sýnd á mynd 28.

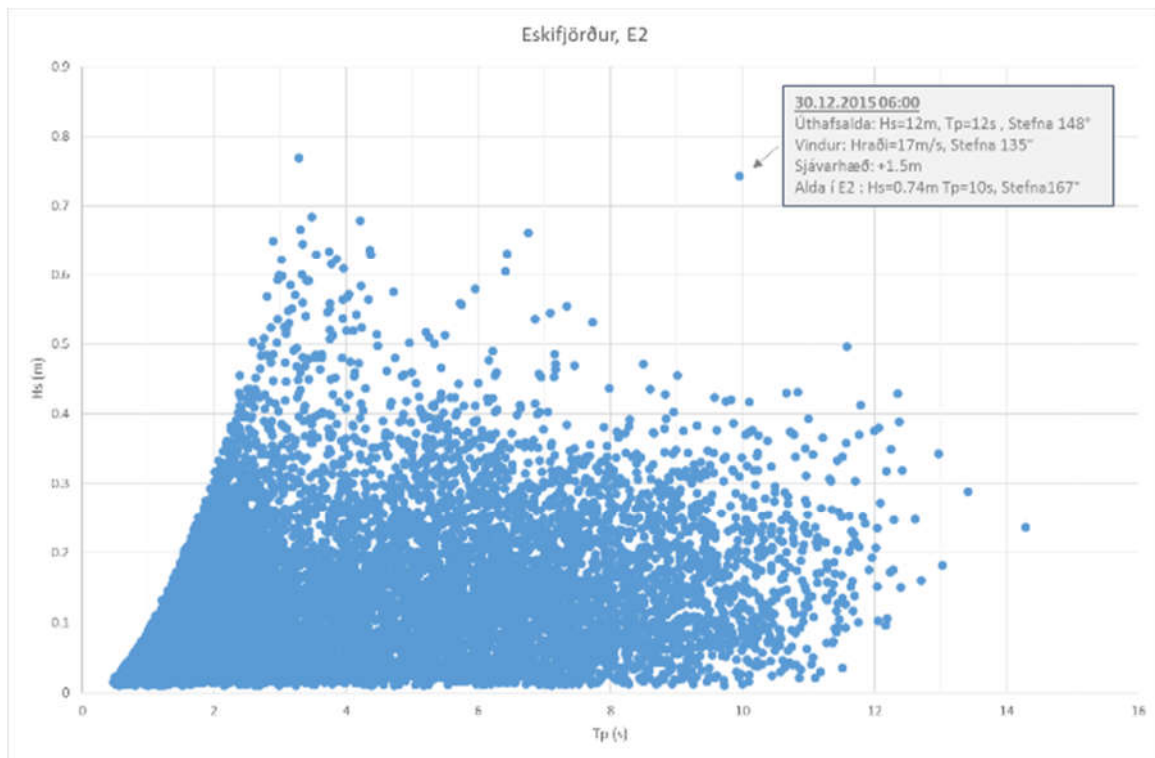


Mynd 28 Staðsetning punkta fyrir niðurstöður öldufarsreikninga.

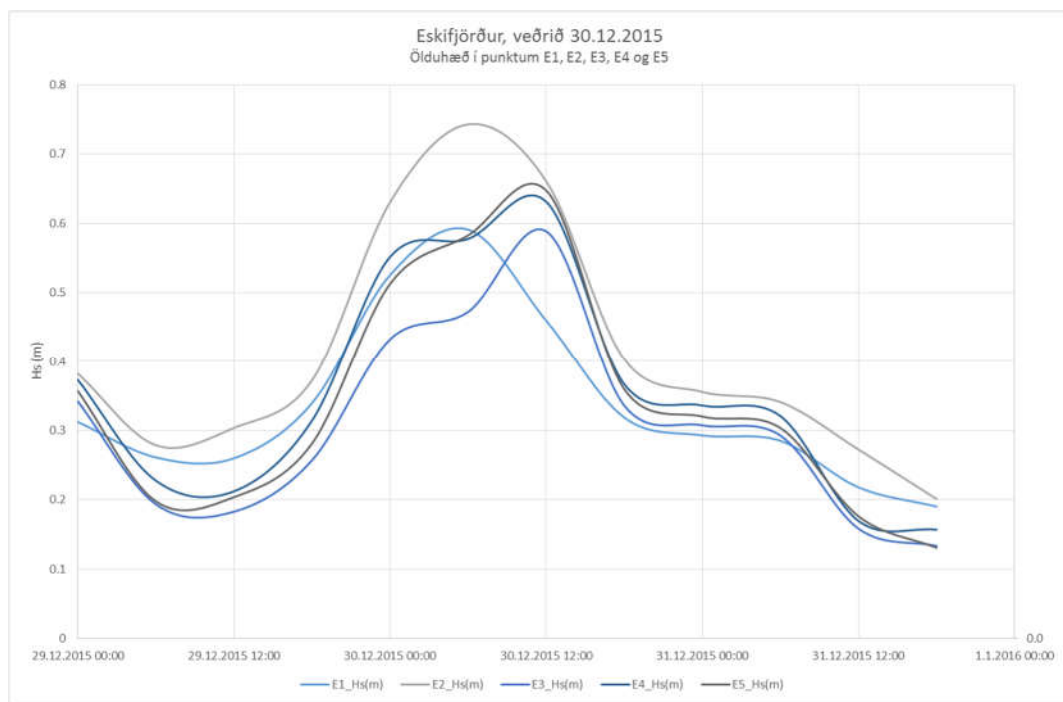
Mynd 29 sýnir dreifingu ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti E. Þar er jafnframt bent á hátt ölduhæðargildi með upplýsingum um dagsetningu atburðar, ölduhæð úthafsöldu, vindhraða o.fl. Þessi atburður sem var afleiðing veðurs sem átti sér stað á tímabilinu 29.-31.12.2015 var skoðaður nánar og sýnir mynd 30 ölduhæð í punktum E1, E2, E3, E4 og E5 á tímabilinu og mynd 31 ölduhæð og öldustefnu í innri hluta Dýrafjarðar kl. 18:00 15.9.2013. Mynd 32 sýnir vindhraða og vindstefnu yfir atburðinn, en þar sést að hámarks vindhraði var um 22 m/s.

Til að meta áhrif hærri sjávarstöðu vegna áhlaðanda á ölduhæð var atburðurinn keyrður aftur þar sem 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m var bætt við sjávarhæðina. Mynd 33 sýnir niðurstöður um áhrif mismunandi sjávarhæðar í punkti Eyj3.

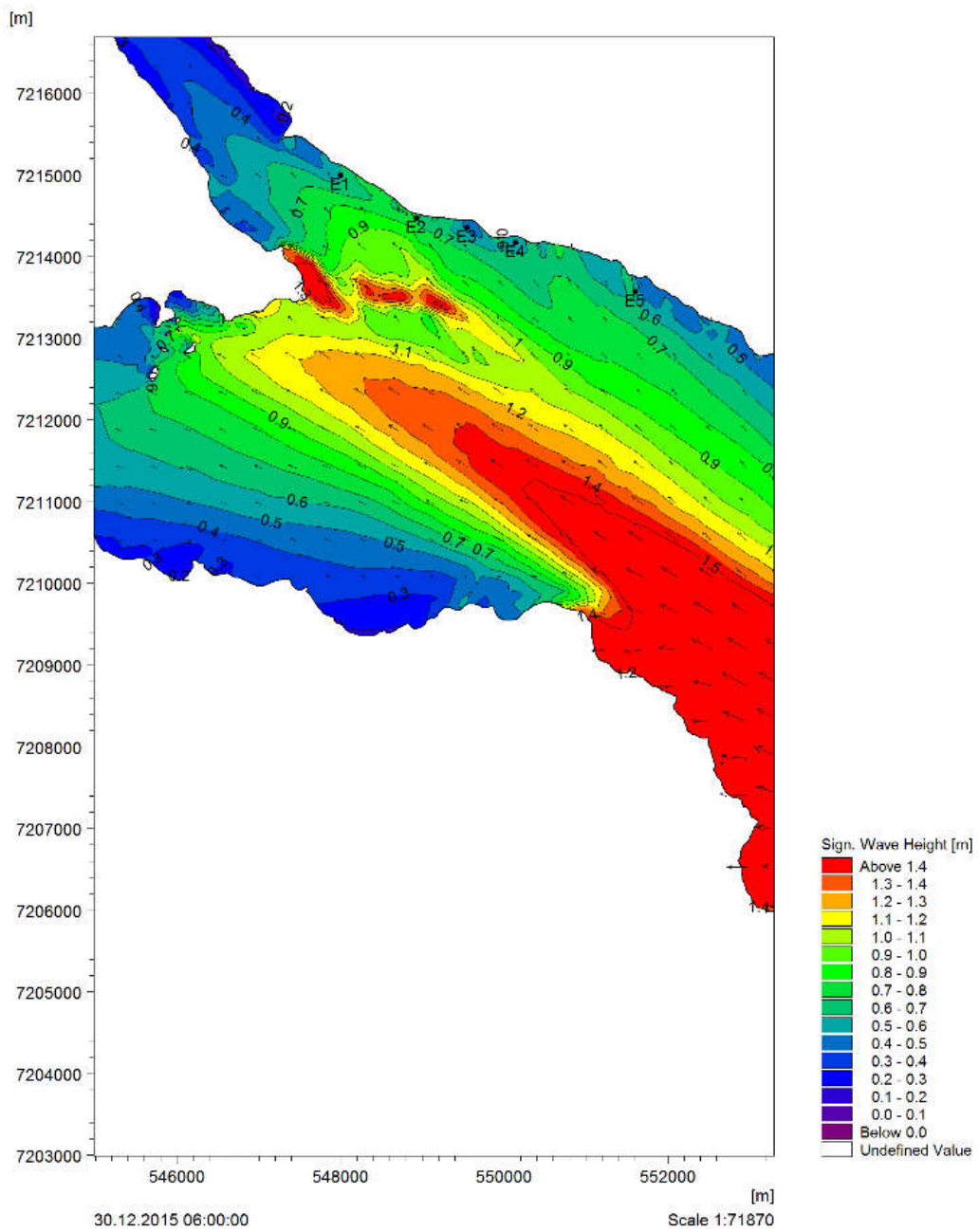




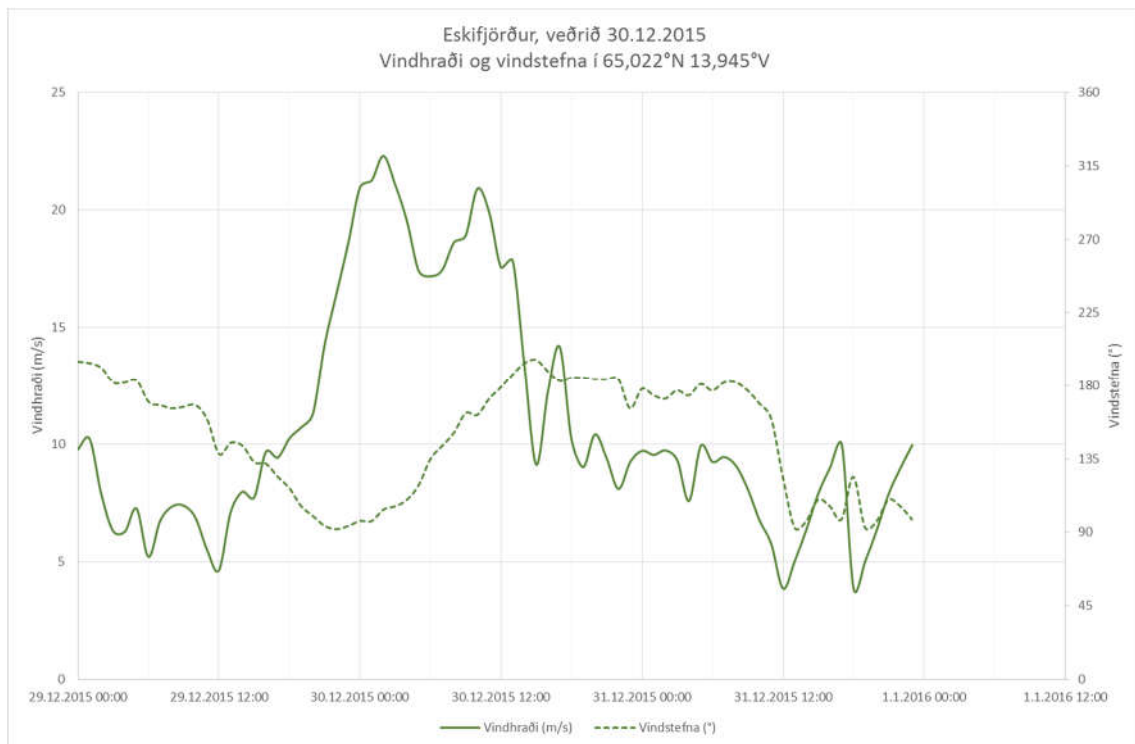
Mynd 29 Dreifing ölduhæðar miðað við sveiflutíma öldu í punkti E2. – Veðrið 30.12.2015 kl. 06:00:00



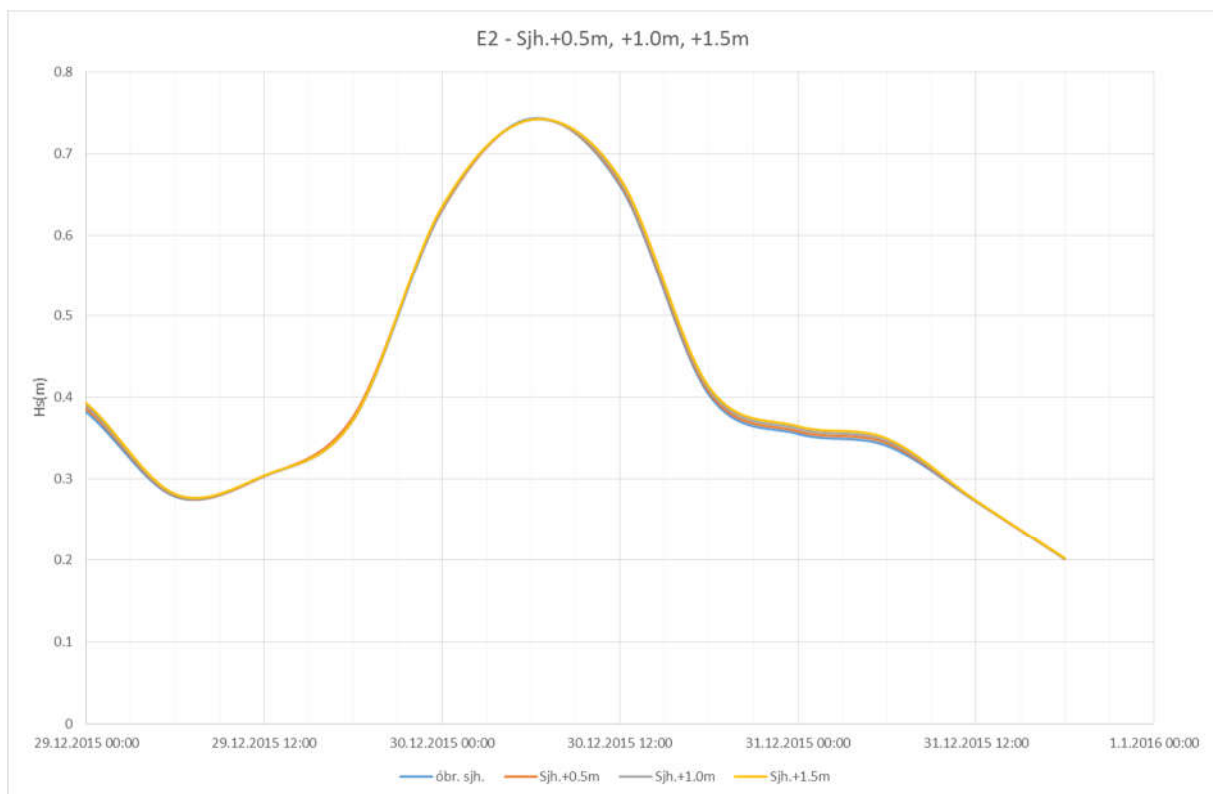
Mynd 30 Ölduhæð í punktum E1, E2, E3, E4 og E5 tímabilið 29.12.-31.12.2015.



Mynd 31 Ölduhæð og öldustefna í Eskifirði 30.12.2015 kl. 06:00:00.



**Mynd 32** Vindhraði og vindstefna í 64.022°N, 13.945°V tímabilið 29.-31.12.2015.



**Mynd 33** Áhrif mismunandi sjávarstöðu á ölduhæð í punkti E2.

Niðurstöður útreikninga benda til að yfir 10 ára tímabil fari  $H_s$  ekki yfir 0,75 m.

#### 4.1.5. Samantekt

Skóðað var öldufar yfir 10 ára tímabil, en líftími mannvirkja er talsvert lengri en það. Miðað við tölfræðilegar greiningar á ölduhæð inn í fjörðum með mismunandi endurkomutíma sem Siglingasvið Vegagerðarinnar hefur staðið að, benda niðurstöður til að alda með 100 ára endurkomutíma sé á bilinu 10 - 20 % stærri en alda með 10 ára endurkomutíma. Enn fremur, þegar atburðir í Dýrafirði og Eyjafirði eru skoðaðir nánar sést að mesti vindhraði í atburðinum í Dýrafirði var um 18 m/s og í Eyjafirði um 15 m/s. Þetta er ekki mjög hár vindhraði og er skynsamlegt að skoða hver aldan hefði verið miðað við vindhraða upp á 25-30 m/s.

Til að gæta öryggis við hönnun er því skynsamlegt að gera ráð fyrir 20 % hærri öldu en fundin var við öldufarsreikningana vegna lengdar reiknitímabils og meta öldu miðað við aukinn vindhraða.

Þróaðar hafa verið jöfnur sem lýsa sambandi vinds og öldu og eru jöfnur 4-6 dæmi um það. Jafna sem þróuð var af Donelan (1980) gerir ráð fyrir að alda sé háð vind í veldinu 1,24, af því leiðir að,

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^{1,24} \quad (25)$$

$H_{s,10}$  er ríkjandi alda eða stærsta alda sem fundin var með öldufarsreikningum,  $U_2$  er mesti vindhraði sem var þegar  $H_{s,10}$  var fundin,  $H_{s,100}$  er 20 % stærri en  $H_{s,10}$  til að taka mið af lengd reiknitímabils og  $H_{s,hö}$  er alda miðað við að vindhraði aukist frá  $U_2$  í 30 m/s.  $H_{s,hö}$  er þá ný hönnunarálda. Tafla 3 sýnir niðurstöður mats á ölduhæðum.

*Tafla 3 Niðurstöður mats á ölduhæðum.*

	$U_2$ (m/s)	$H_{s,10}$ (m)	$H_{s,100}$ (m)	$H_{s,hö}$ (m)
Borgarfjörður	23	0,75	0,90	1,25
Dýrafjörður	15	0,40	0,54	1,00
Eyjafjörður	15	0,30	0,36	0,85
Eskifjörður	23	0,75	0,90	1,25

#### 4.2. Grjótstærðir

Mat á grjótstærð var endurskóðað miðað við nýja útreikninga á öldufari. Notaðar voru bæði jafna Hudsons og jafna Van Der Meer til að reikna út grjótþyngd og niðurstöður bornar saman við hannaða grjótþyngd. Tafla 4 sýnir hönnunarbreytur og tafla 5 sýnir niðurstöður ásamt hannaðri grjótþyngd sem notuð var.

Tafla 4 Hönnunarbreytur.

Breytur fyrir allar aðferðir		Borgarfjörður	Dýrafjörður	Eyjafjörður	Eskifjörður
Ölduhæð við tá	$H_s$ (m)	1,25	1,00	0,85	1,25
Halli fláa		1:2	1:2	1:6	1:2
Eðlisþyngd steina	$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	2,8	2,8	2,8	2,8
Eðlisþyngd sjávar	$\rho_{sj}$ (t/m <sup>3</sup> )	1,025	1,025	1,025	1,025
<b>Breytur fyrir Hudson aðferð</b>					
Stöðuleika stuðull	$K_D$	2,6	2,6	2,6	2,6
<b>Breytur fyrir Van Der Meer aðferð</b>					
Gleypni stuðull	P	0,4	0,4	0,4	0,4
Skemmdar stuðull	S	2	2	2	2
Fjöldi alda	N	7500	7500	7500	7500
Meðal sveiflutími öldu	$T_m$ (s)	3,2	2,7	3,2	8,2
Hámarks sveiflutími öldu	$T_p$ (s)	3,5	3	3,5	9
Surf similarity breyta	$\xi_m$	1,8	1,7	0,72	4,64
Krítísk surf similarity breyta	$\xi_{mc}$	3,77	3,77	2,05	3,77

Tafla 5 Niðurstöður ásamt hannaðri grjóþyngd sem notuð var.

	Hannað	Hudson	Van Der Meer
	$W_{50}$ kg	$W_{50}$ kg	$W_{50}$ kg
Borgarfjörður	1100	200	165
Dýrafjörður	750	100	80
Eyjafjörður	120	21	13
Eskifjörður		180	350

Grjóþyngd ( $W_{50}$ ) miðað við nýja öldufarsreikninga er umtalsvert minni en hönnuð grjóþyngd og í Eyjafirði er um mjög lítið grjót að ræða. Athygli vekur að Hudson jafna gefur þyngra grjót að frátöldum Eskifirði. Skýrist það meðal annars af því að í jöfnu Van Der Meer er sveiflutími áhrifavaldur á grjótstærð. Í Eskifirði var sveiflutími fremur langur, en annarsstaðar var sveiflutími fremur stuttur eða á bilinu 2-3 s. Svokallaður krítískur sveiflutími ( $T_{mc}$ ) þegar alda er á mörkum þess að vera "Surging" eða "plunging" gefur stæðsta grjótið og þarf að skoða hvort sá sveiflutími sé líklegur og þá að nota hann við hönnun. Sem dæmi fyrir Borgarfjörð er krítískur sveiflutími 6,7 sek og gæfi það grjóþyngd 500 kg en útreikningar á sveiflutíma sýndu talsvert lægri sveiflutíma eða um 3 sek. Það vekur einnig athygli hversu lítið grjótið er í Eyjafirði þrátt fyrir að aldan sé um 0,85 m. Er það vegna þess að fláinn þar er mjög aflíðandi fyrir brimvörn eða 1:6.

Það er alltaf einhver óvissa um ölduhæð og sveiflutíma þótt nýir öldufarsreikningar eigi að gefa mun nákvæmari mynd um öldufar en fyrri aðferð gerði. Ekki er alltaf hagstæðast að velja grjót miðað við lágmarksþyngd á  $W_{50}$  fyrir utan það að með stærra grjóti fæst meira öryggi í virkni brimvarnar og minni líkur á að viðhald þurfi. Hagstæðara gæti verið að velja stærra grjót þegar

verið er að nota sprengt grjót sökum þess að þegar klappir eru sprengdar lenda grjótstærðirnar á ákveðnu bili en auka kostnaður fylgir því að mala grjótið í smærri einingar. Einnig er kostnaður af því að flokka grjótið og getur verið hagstætt að skilgreina grjótstærðir miðað við hvaða grjótstærðir koma úr námunni og hver er stærðardreifing þess. Þegar ákvörðun um grjótstærð er tekin er æskilegt að hún sé skoðuð í samhengi við grjóteiginleika í námunni og að vera örugglega öruggu megin við útreikninga á  $W_{50}$ . Þykkt brimvarnar er miðuð við 2 x þvermál meðalsteins og með stærra grjóti eykst þykktin og þ.a.l. efnismagnið, því þarf að reyna að finna jafnvægi sem tekur tillit til allra þátta.

Jafnframt þarf að benda á að strandvegir, líkt og í Eskifirði, eru oft að hluta til eða að öllu leyti á mjög takmörkuðu dýpi, þ.e.a.s. að dýpið takmarkar öldustærðina. Þegar svo háttar til er aldan fundin miðað við dýpi við t.a. grjótláa og er þá mikilvægt að greina rétt forsendur fyrir sjávarhæðum. Enn fremur er æskilegt að dýptarmæla framan við þveranir og vegi í sjó áður en að lokið er við hönnun. Tilvik þar sem alda er dýpisháð er ekki skoðað í þessu verkefni en væri vert að skoðað nánar síðar sökum þess hversu algengt þetta er við hönnun strandvega.

### 4.3. Hæð brimvarna

Mat á stjarnfræðilegu flóði, loftþrýstingsmuni, áhlaðanda og upprennisli hafa hingað til verið þeir þættir sem hafa stjórnað því hver hæð brimvarnar verður. Skoðaður var munurinn á upphaflega hannaðri hæð brimvarna og hæð brimvarna miðað við nýja öldufarsútreikninga og breyttar forsendur um sjávarhæð. Breyttar forsendur voru að nota meðal stórstraumsflóð í stað hæsta stjarnfræðilega flóðs, þar sem það eru sjaldgæfir atburðir og ótengdir óveðursatburðum. Lagt var til að hækka gildi vegna loftþrýstings í 0,7 m í stað 0,35 m, en 0,7 m samsvarar því að loftþrýstingur fari niður í um 925-935 hPa. Þegar loftþrýstingur fellur svo mikið fylgja þessum atburðum jafnan mikil óveður. Einnig er notuð önnur og nýrri aðferð við útreikninga á upprennisli en henni er lýst í kafla 3.4.

Tafla 6 sýnir niðurstöður um samanburð á grjóthæð miðað við breyttar forsendur og þær sem notaðar voru við hönnun. Athygli vekur að þrátt fyrir mismunandi forsendur er hæð brimvarna svipuð. Mesti munurinn er í Dýrafirði en þar er hönnuð hæð brimvarnar um 0,7 m hærri en reiknuð hæð brimvarnar miðað við breyttar forsendur. Skúli Þórðarson (2012) lagði til að bæta við 0,5 m hækkun við forsendur vegna loftslagsbreytinga en það er ekki tekið með í töflu 6.

*Tafla 6 Samanburður á grjóthæð miðað við breyttar forsendur og þær sem notaðar voru við hönnun*

	Sjávarhæð	Áhlaðandi	Loftþr.	Upprennsli	Hæð brimv.
Brogarfj.	0,70	0,40	0,70	2,00	3,80
Borgarfj. hannað	0,70	0,40	0,35	2,20	3,65
Dýrafj.	1,48	0,33	0,70	1,70	4,21
Dýrafj. hannað	1,68	0,33	0,35	2,53	4,89
Eyjafj.	0,77	0,15	0,70	0,55	2,17
Eyjafj. hannað	?	?	?	?	2,00
Eskifjörður	0,92	0,13	0,70	2,10	3,85



### 4.3.1. Eskifjörður

Til að kanna það hvernig forsendur sem notaðar eru til að ákvarða hæð mannvirkis reynast var gerður samanburður á reiknaðri hæð og flóðfarsmælingum sem gerðar voru í kjölfar óveðurs með endurkomutíma sem hleypur á áratugum.

Aðfaranótt 30. desember 2015 gekk djúp lægð úr suðri inn á landið og mældist lægsti loftþrýstingur inn í landi á Kirkjubæjarklaustri, 930,2 hPa. Með lægðinni fylgdi veðurofsi og gætti áhrifa veðursins um allt land. Á Dalatanga fór loftþrýstingur niður í 941,7 hPa en það hefur eingöngu gerst tvisvar frá því mælingar hófust árið 1949 (Jónasdóttir, 2016). Miklar skemmdir urðu víða á strandvegum á Austurlandi í þessu óveðri og var Helgustaðavegur meðal þeirra. Í kjölfar óveðursins voru gerðar flóðfarsmælingar sem nýtast nú til að bera saman útreikninga á hæð brimvarnar við Helgustaðaveg.

Mælt var á fjórum stöðum þann 10.03.2016 í bæjarkerfi Eskifjarðar. Mynd 34 sýnir staðsetningu mælinganna.

- Mjóeyri: Flóðfar mælt í **h=2.77**. Líklega með ágjöf.
- Við núv. brú á Eskifjarðará: Flóðfar mælt í **h=1.90**, líklega ekki með fullri ágjöf
- Á vegkanti í „Krók“: Flóðfar mælt í **h=3.00**, örugglega með ágjöf
- Um 300 m innan núv. brúar: Flóðfar mælt í **h=0.90**. Mjög nálægt venjulegu stórstraumsflóði.

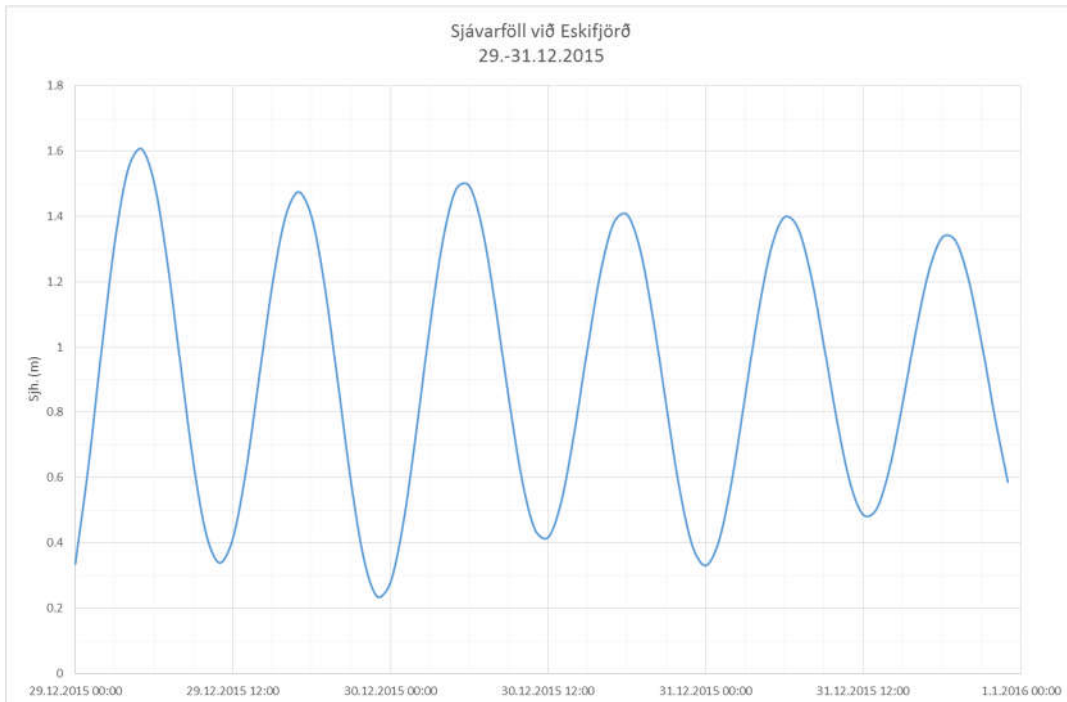


*Mynd 34* Staðsetning punkta þar sem flóðfarsmælingar voru gerðar í Eskifirði.

Mynd 35 sýnir hver sjávarföll í Eskifirði voru skv, sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar þegar óveðrið 2015 gekk yfir. Sjávarföllin eru sýnd í hæðakerfi sjómælinga en munurinn á því og bæjarkerfi Eskifjarðar er 0,98 m, þ.a. hæsta sjávarfall 30.12.2015 var um 0,5 m. Meðal stórstraumsflóð á Eskifirði er 0,92 m. Miðað við flóðfarsmælingar er hægt að áætla að umframhækkun vegna áhlaðanda, loftþrýstings og ágjafar hafi verið allt að 2,5 m við “Krók” og 2,27 m við Mjóeyri. Miðað við 941 hPa loftþrýsting gæti hækkun sjávar vegna loftþrýstings hafa orðið allt að 0,65 m. Áhlaðandi og ágjöf skýrir þá 1,85 m hækkun við Krók og 1,62 m hækkun við Mjóeyri.



Þetta passar ágætlega við niðurstöður útreikninga á hæð brimvarna sem sýndar eru í töflu 6 en þar er reiknaður áhlaðandi og upprensli 2,23 m. Reiknað upprensli var miðað við fláa 1:2, sem er líklega mun brattari flái en á ströndinni í Mjóeyri. Öldustefna og flái hafa áhrif á upprensli, brattari flái gefur meira upprensli. Talsverð óvissa fylgir þessum samanburði, lítið er vitað um mælingarstaðina svo sem halla strandar og hversu mikil áhrif ágjöf hafði á flóðfarið. Þetta gefur þó góða hugmynd og sýnir að ágætt samband er á milli forsenda sem notaðar eru við útreikninga og raunverulegs óveðursatburðar og flóðhæða sem hann framkallar.



Mynd 35 Sjávarföll 29.-31.12.2015, í hæðakerfi sjómælinga.

Nokkuð flókið er að slá á endurkomutíma veðra þar sem bæði þarf að taka tillit til dýptar lægðarinnar, ferils hennar yfir landið og afstöðu aðliggjandi veðrakerfa. Besta mat á endurkomutíma veðursins 30. desember 2015 hleypur á áratugum (Jónasdóttir, 2016). Ef endurkomutími flóð- og ölduhæðar sem sást í áðurnefndu óveðri hleypur á áratugum virðist sem mat á hæð brimvarnar í töflu 5 sé heldur íhaldssamt þegar það er borið saman við atburðinn 30. des. 2015. Reiknuð hæð brimvarnar á Helgustaðaveg er 3,85 m en flóðfar á Mjóeyri var mælt 2,77 m.

#### 4.4. Umræða

Tafla 7 sýnir samantekt á ölduhæð, grjótstærðum og hæð brimvarna miðað við upprunalega hönnun og nýja útreikninga. Þar má sjá að upprunaleg hönnun gerir ráð fyrir stærri hönnunaröldu en nýjar forsendur gera ráð fyrir. Af því leiðir að grjótstærð er mun þyngr miðað við eldri útreikninga en þá nýju. Minni munur er þó á niðurstöðum um hæð brimvarna milli gömlu og nýju útreikninganna að undanskildum Dýrafirði. Skýrist það m.a. af því að forsendum um hækkun sjávarstöðu vegna loftþrýstings var breytt í 0,7 m í stað 0,35 m og vinnur það á móti því að lægri alda er notuð til að reikna upprensli.

Tafla 7 Ölduhæð, grjótstærðir og hæð brimvarna. Upprunaleg hönnun og nýir útreikningar.

	Hannað			Hudson		WDM	
	H <sub>s</sub> (m)	W <sub>50</sub> kg	Hæð (m)	H <sub>s</sub>	W <sub>50</sub> kg	W <sub>50</sub> kg	Hæð (m)
Borgarfjörður	2,2-1,8	1100	3,65	1,25	200	130	3,80
Dýrafjörður	1,8-1,5	750	4,89	1,00	100	80	4,21
Eyjafljörður	1,5	120	2,00	0,85	26	16	2,17
Eskifjörður	-	-	-	1,20	180	350	3,85

Brimvörnin í Borgarfirði hefur ekki þurft neitt viðhald að ráði. Í upphafi þurfti að bæta við grjóti í leiðigarða sem stafaði af botnrofi við leiðigarða en annars hefur grjótið verið til friðs og ekki haggast. Eitthvað af grjótinu hefur sprungið en að mestu haldist saman þrátt fyrir það. Nokkrum sinnum hefur verið ágjöf yfir veginn en það hafa verið mjög sjaldgæfir atburðir og ekki valdið skemmdum. Nú er búið að setja leiðara sem eru steiptar einingar og virka þeir sem hækkun á brimvörn þ.e.a.s. þeir ná eilítið upp fyrir brimvörnina og hefur síðan þá ekki sést ágjöf yfir veg. Því má segja að vel hafi tekist til við að ákveða hæð brimvarnar í Borgarfirði, hún er hvorki of há né of lág. Flái og lögum brimvarnar hefur haldið sér frá framkvæmdum. Þetta er í samræmi við niðurstöður, þ.e.a.s. grjótstærðir eru vel yfir öryggismörkum og ágjöf yfir veginn er sjaldgæf sem passar við það að 2 % aldna renni upp fyrir brimvörn í stærstu atburðunum án þess þó að valda skemmdum.

Brimvörnin í Dýrafirði hefur ekki þarfnast viðhalds frá því hún var byggð. Ekki er vitað hvort eða hversu algeng ágjöf yfir veg er, en sé miðað við mun á hannaðri hæð og hæð miðað við nýja útreikninga ætti ágjöf yfir veg að vera óveruleg. Ef miðað er við nýja útreikninga á hæð og bætt er við 0,5 m vegna loftslagsbreytinga gæti hæð brimvarnar verið um 0,2 m neðar en hún er í dag. Það lítur því út fyrir að veghæð og grjóthæð í Dýrafirði sé vel innan öryggis marka.

Ekki hefur þurft neitt viðhald á brimvörn á þverun Eyjafljarðar. Aftur á móti hefur vatnað upp á veginn án þess þó að valda skemmdum að nokkru leiti. Við skoðun á brimvörn hefur flái líklega haldið sér ágætlega sjávarmegin og hefur jarðefni safnast inn á milli gjóts og fyllt upp í gloppur. Efst í brimvörn/fyllingu hefur vaxið talsvert af melgresi. Reynsla varnar er í samræmi við niðurstöður, þ.e.a.s. grjótstærðir eru vel yfir öryggismörkum og ágjöf yfir veginn er sjaldgæf sem passar við það að 2 % aldna renni upp fyrir vörn í stærstu atburðunum án þess að valda skemmdum.

Samanburður á niðurstöðum á útreikningum á hæð brimvarnar í töflu 6 á Helgustaðavegi og flóðfarsmælinga í Eskifirði benda til að ágætt samræmi sé á milli útreikningi á aftaka atburði og mælinga í kjölfari eins slíks. Hæð brimvarnar í töflu 6 er um 0,85 m hærri en flóðfarið sem mældist við “Krók“ og 1,08 m hærri en flóðfarið sem mældist á Mjóeyri en bæði flóðför voru mæld á stöðum þar sem ágjöf gætti. Hæð brimvarnar var reiknuð miðað við meðalstórstraumsflóð en sjávarfallið þegar atburðurinn átti sér stað var um 0,4 m neðan við meðalstórstraumsflóð. Áhugavert væri að skoða nánar aðferðir við útreikninga á upprennsli og hvort miða ætti frekar við útreikninga á ágjöf líkt og Siglingasvið Vegagerðarinnar gerir í sinni hönnun á brimvörnum. Einnig er mikilvægt að halda áfram að safna flóðfarsmælingum, skráningu á ágjöf og hvort að vatnar upp á vegi, svo hægt sé að bera saman niðurstöður útreikninga og mælinga á fleiri stöðum.

Greinilegt er að þær brimvarnir sem settar hafa verið á fjarðarþveranir hafa staðist álag og þær hönnunarforsendur sem notaðar hafa verið því skilað öruggri hönnun. Nýir öldufarsútreikningar benda til að hægt hefði verið að nota talsvert minna grjót í gjótvarnir fyrir þveranirnar en mat á hæð brimvarna er nokkuð sambærilegt milli gömlu og nýju útreikninganna þrátt fyrir að forsendur séu ekki þær sömu.

## 5. Samantekt

Öldufarsútreikningar benda til talsvert minna ölduálags á fjarðarþveranirnar en upprunaleg hönnun gerir ráð fyrir. Með þá vitneskju í farteskinu hefði verið mun meiri sveigjanleiki í vali á grjótstærðum og líklega hefðu minni grjótstærðir orðið fyrir valinu. Það hefði líklega þýtt sparnað bæði á efnis- og framkvæmdarkostnaði. Með meiri sveigjanleika á vali á grjótstærðum er hægt að taka tillit til grjóteiginleika í námu sem á að nota, en kostnaður fylgir mölun og flokkun og því sparnaður ef hægt er að sleppa því. Minni grjótstærðir þýðir að efnisþykktin er minni og þ.a.l. fer minna rúmmál í brimvörnina. Aukið öryggi felst í því að nota stærra grjót ásamt því að það dregur úr viðhaldi. Því getur verið skynsamlegt að nota þær grjótstærðir sem fást úr námu þótt grjótið sé stærra en útreikningar gera kröfu um.

Útreikningar á hæð brimvarna eru nokkuð sambærilegir milli upprunalegrar hönnunar og nýrra útreikninga þrátt fyrir mismunandi forsendur. Upprunaleg hönnun gerir ráð fyrir stærri öldum við útreikninga á upprennisli og í tilfalli Dýrafjarðar er notað stjarnfræðilegt flóð við mat á sjávarhæð. Nýir útreikningar miðast við meiri hækkun vegna loftþrýstings, miðað er við meðal stórstreymisflóð og önnur jafna er notuð við mat á upprennisli. Þótt að sambærilegar niðurstöður fást á útreikningum á hæð brimvarna eru forsendur nýju útreikninganna frekar í takt við raunveruleikann líkt og reynt er að sýna fram á með samanburði á flóðfarsmælingum og útreikningum í Eskifirði.

Skynsamlegt væri að skoða nánar mat á sjávarhæðum og útreikninga á upprennisli, en Siglingasvið Vegagerðarinnar hefur notast við aðra aðferð við útreikninga á hæð brimvarna og reikna þeir út ágjöf í stað upprennislis. Einnig væri gott að skoða strandvegi þar sem dýpi takmarkar ölduna en ekki gafst tækifæri til þess hér. Við það tilvik er rétt mat á sjávarhæðum mjög mikilvægt ásamt góðri nálgun á hæð og legu strandar/sjávarbotns framan veg. Mjög gott er að geta nýtt þekkingu og reynslu Siglingasviðsins við hönnun á brimvörnum fyrir vegamannvirki og er lagt til að við hönnun stærri brimvarna á vegum Hönnunardeildar Vegagerðarinnar verði settir af stað öldufarsreikningar með tölvulíkani og hönnun gerð í samráði við Siglingasviðið.

## Heimildarskrá

- EurOtop. (2016). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.* Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. Sótt frá [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Guler, H. G. (2013). *A Comparative Study on Van der Meer (1988) and Van Gent et al. (2004).* Seattle: Ports 13.
- Helgason, J. (1979). *Samantekt á forsendum og lokareikningum fyrir vegfyllingu í Borgarfirði.* Vegagerð Ríkisins .
- Hughes, S. A. (2005). *Estimating Irregular Wave Runup on Rough, Impermeable Slopes.* US Army Corps of Engineer.
- Jóhannesson, H. (1990). *Vestfjarðavegur yfir Dýrafjörð hæð og grjótvörn vegfyllingar.* Reykjavík: Vegagerðin.
- Jónasdóttir, E. B. (2016). *Minnisblað - Veðurfirli 29. til 30. desember 2015.* Veðurstofa Íslands.
- Jónsdóttir, I. E., & Sigurðarson, S. (2016). *Öldufar á Sundunum, Öldufarsrannsóknir og mat á viðleguskilyrðum í Sundahöfn.* Reykjavík: Faxaflóahafnir.
- Jónsson, T. (4. 10 2007). *Fróðleikur.* Sótt frá Veðurstofa Íslands: <http://www.vedur.is/vedur/frodleikur/greinar/nr/1056>
- Sjómælingar Íslands. (2012). *Sjávarfallatöflur 2013.* Reykjavík: Landhelgisgæsla Íslands.
- Us Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual.* . Washington DC: Department of the Army, Us Army Corps of Engineers.
- Viggósson, G., Eliásson, J., & Sigurðarson, S. (2016). *Ákvörðun á flóðhæð í Básendaflóði - Áfangaskýrsla.* Vegagerðin.
- Þórðarson, S. (2012). *Loftslagsbreytingar og vegagerð - Tillögur um aðgerðir til aðlögunar.* Reykjavík: Vegagerðin.

