



Reykjavíkurborg

Ágjöf yfir sjóvarnir við Sæbraut og tillaga að úrbótum



Bryndís Tryggvadóttir
Sigurður Sigurðarson
Pétur Ingi Sveinbjörnsson
September 2021



Útgáfa	Dagsetning	Endurskoðun	Útgefið af	Útgefið til
Útgáfa A	21.9.2021		BT, SS, PIS	
Drög A	24.6.2021		BT, SS, PIS	
Upplýsingar um skýrslu				
Verkkaupi:				
Verkefni:	Ágjöf yfir sjóvarnir við Sæbraut og tillaga að úrbótum			
Verkefnisnúmer.:				
Aðgengi:	<input type="checkbox"/> Ópið	<input checked="" type="checkbox"/> Dreifing háð samþykki verkkaupa	<input type="checkbox"/> Lokað	
Höfundar:	Bryndís Tryggvadóttir, Sigurður Sigurðarson og Pétur Ingi Sveinbjörnsson			
Tilvísun:				
Forsíðumynd	Ágjöf upp á Skúlagötu í Reykjavík á morgunflóðinu þann 24. Mars 1970. Tekið af Sveini Þormóðinssyni og birt í Morgunblaðinu morguninn eftir			



Helstu niðurstöður

Í skýrslu þessari er fjallað um ágjöf yfir sjóvarnir á landsvæði Reykjavíkurborgar við Sæbraut. Tilgangurinn er að meta nauðsynlega hækkun sjóvarna eða þykkingu grjótkápu með bermu þannig að kröfur um ágjöf yfir þær séu uppfylltar.

Ágjöf sjávar á land, annað hvort yfir manngerðar sjóvarnir eða náttúrulega sjávarkamba, er nokkuð flókið ferli þar sem ýmsir veðurfarslegir þættir og sjávarföll ráða ferðinni. Sjávarhæð á hverjum tíma ræðst af sjávarföllum og áhlaðanda vegna lágs loftþrýstings, vegna vinds sem blæs að landi og vegna öldu sem brotnar úti fyrir ströndinni ef þannig hagar til. Þó að veðurfarsþættirnir séu innbyrðis háðir þá eru sjávarföllin og veðurfarsþættirnir óháðir atburðir. Það er síðan aldan sem kemur upp að ströndinni sem skapar ágjöfina. Oft hagar þannig til að á hærri sjávarstöðu kemst hærri alda upp að ströndinni. Það getur bæði verið vegna þess að aldan við rót sjóvarnarmannvirkis eða sjávarkambs er dýpisháð eða þá að öldusveigjuáhrifa gætir minna á hærri sjávarstöðu. Við aðstæður líkt og finnast í Rauðarárvík við Sæbraut er það ekki orkumikil úthafsalda sem veldur mestum usla. Heldur er það samspil af sterkum vind, vindöldu og hárri sjávarstöðu þar sem vindurinn knýr krappar stuttar öldur að sjóvörnum og feykir þeim svo langar vegalengdir yfir landsvæðið handan sjóvarnarinnar.

Það eru sem sagt samlíkur sjávarhæðar og ölduhæðar upp við ströndina sem ráða líkum á ágjöf yfir sjóvarnir og náttúrulega sjávarkamba. Aðferðin sem Vegagerðin notar í þessum tilgangi byggir á að nota 40 ára langar tímaraðir fyrir öldu og vind á hafi og stjarnfræðileg sjávarföll. Úr þessum tímaröðum eru einangraðir um 2000 óháðir aftaka atburðir sem síðan eru notaðir til að herma 350.000 aftaka atburði á hafi. Aðferðin varðveitir þá fylgni sem er milli breytanna í útgildum. Aftaka atburðirnir eru síðan færðir inn á Faxaflóa og upp á ströndinni með öldulíkani og hermílíkani. Þá er komið gagnasafn 350.000 aftaka atburða upp við ströndina.

Fyrir hvern aftaka atburð í stóra gagnasafninu upp við ströndina er ágjöf yfir sjóvarnir reiknuð fyrir þá staði sem eru til skoðunar. Við ágjafarreikninga eru notaðar reynslulíkingar sem byggja á stóru safni líkantilrauna víðs vegar að úr heiminum. Notast er við svokallaða hönnunarlíkingu þar sem meðaltal líkantilrauna fyrir sambærilegt mannvirki er notast við í ágjafareikningum auk öryggisstuðla. Þá er líkindafræðilegri úrvinnslu beitt á niðurstöðurnar til að finna endurkomutíma ágjafar á hverjum stað og jafnframt hve mikið þurfi að hækka eða breyta sjóvörnum til að uppfylla fyrirfram settar kröfur um ágjöf.

Sem möguleg hækkun og breyting á sjóvörnum á svæði Reykjavíkurborgar við Sæbraut eru bæði skoðaðir hefðbundinn tveggja grjótlaga sjóvarnargarður og garður með þykkari grjótvörn, þar sem grjótbarmu hefur verið bætt framan á sjóvörnina. Hefðbundinn sjóvarnargarður er byggður úr tveimur lögum af brimvarnargrjóti auk síulaga þar undir.

Ofangreindir ágjafarreikningar hafa verið gerðir fyrir 7 reiknipunkta fyrir öldu sem liggja á grunnslóð meðfram þeim hluta Sæbrautar sem liggur milli Hörpu og Kirkjusands. Sjóvörninni er síðan skipt niður í stöðvar með 100 m millibili þar sem stöð 100 er næst Hörpu og stöð 1900 við Kirkjusand. Ágjafareikningarnir fyrir reiknipunktana eru síðan túlkaðir fyrir hverja stöð.

Niðurstöður ágjafareikninga þessa verkefnis eru þær að ráðast þurfi í betrubætur á sjóvörninni aðallega á tveim köflum, þ.e. þeim hluta sem liggur gengt gatnamótum Sæbrautar og Snorrabrautar, stöðvar 700 til 900, og kafla sem liggur gengt gatnamótum Sæbrautar og Kringlumýrabrautar, stöðvar 1800 til 1900, auk kafla næst Hörpu, stöð 100.

Við aðstæður líkt og finnast við Sæbraut verður ágjöf helst í hvassviðri þegar norðanátt feykir stuttum kröppum öldum sem ná yfir sjóvörnina langar vegalengdir. Þessi hluti ágjafar er ekki inni í hefðbundnum ágjafarreikningum en getur verið afgerandi þáttur í hvassviðri þegar reiknuð ágjöf er lág. Þessi ágjöf er ekki líkleg til að valda skemmdum á mannvirkjum



en getur við þær aðstæður sem eru við Sæbraut haft áhrif á öryggi og flæði umferðar. Þetta kemur vel fram á myndböndum af flóðaatburðum við Sæbraut. Í ljósi þess voru í loka fasa þessa verkefnis reiknislegar niðurstöður sem miðuðust við fyrirfram gefin viðmiðunarmörk fyrir ágjöf endurskoðaðar.

Lagt er til að í stöðvum 700 til 900 verði sjóvörnin annað hvort hækkuð í +5,4 m með hefðbundnu sniði án bermu eða í +5,0 m með 3 til 4 m breiðri bermu. Að í stöðvum 1800 til 1900 verði sjóvörnin annað hvort hækkuð í +5,6 m án bermu eða +5,4 m með 2 til 3 m breiðri bermu. Í stöð 100 nægði að hækka sjóvörnina í +5,0 m án bermu eða í +4,7 m með 2 til 3 m breiðri bermu.

Við skoðun á framkvæmdakostnaði er rétt að benda á að hér eru niðurstöður túlkaðar miðað við 100 m milli sniða. Því þarf að bæta við um 50 m til sitt hvorrar handar til að fá lengd viðgerðar, þó háð aðstæðum. Þannig er líklegt að lengd viðgerðar við stöðvar 700 til 900 verði um 300 m löng.

Niðurstöður ágjafarreikninga á hærri sjávarstöðu, þar sem stuðst er við spár um hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar annars vegar eftir 30 ár og við lok aldarinnar hins vegar, sýna að töluverðar líkur séu á að hönnunarkröfur sjóvarnarinnar eftir ofangreindar breytingar verði enn uppfylltar eftir 30 ár og mögulega lengur. Þar sem eðlilegur líftími sjóvarnarmannvirkja er um 30 til 40 ár þá gefst færi á að endurskoða forsendur og hönnun að þeim tíma liðnum.



Efnisyfirlit

Helstu niðurstöður.....	i
Efnisyfirlit.....	iii
1 Inngangur.....	1
2 Hæðarkerfi og sjávarföll.....	2
3 Sjávarhæð.....	3
3.1 Loftþrýstingsáhlaðandi.....	3
3.2 Vindáhlaðandi.....	4
3.3 Ölduáhlaðandi.....	5
3.4 Hækkun sjávarborðs vegna hnattrænnar hlýnunar.....	5
4 Hermun aftaka atburða.....	7
4.1 Afmörkun óháðra aftaka atburða.....	8
4.2 Hermun byggt á samlíkum.....	8
4.3 Safn aftaka atburða flutt upp að ströndinni.....	10
4.3.1 Aftaka flóðaatburðir við Sæbraut.....	12
4.4 Vind- og ölduáhlaðandi á grunnslóð.....	13
5 Mat á ágjöf yfir flóðvarnargarð.....	15
5.1 Viðmiðunarkröfur fyrir ágjöf samkvæmt EurOtop 2018.....	15
5.2 Ágjöf yfir flóðvarnargarð.....	15
6 Sjóvarnir við Sæbraut.....	17
6.1 Ágjöf hjá reiknipunkti S1.....	19
6.2 Ágjöf hjá reiknipunkti S2.....	21
6.3 Ágjöf hjá reiknipunkti S3.....	23
6.4 Ágjöf hjá reiknipunkti S4.....	25
6.5 Ágjöf hjá reiknipunkti S5.....	27
6.6 Ágjöf hjá reiknipunkti S6.....	29
6.7 Ágjöf hjá reiknipunkti S7.....	31
6.8 Niðurstöður ágjafarreikninga við Sæbraut.....	33
7 Þekkt aftakaveður.....	35
7.1.1 Aftakaveður 2. nóvember 2012.....	35
7.1.2 Aftakaveður 10.-11. desember 2019.....	36
8 Samantekt.....	37
9 Heimildir.....	38



1 Inngangur

Reykjavíkurborg hefur fengið Vegagerðina til að greina og skoða ágjöf yfir sjóvarnir við Sæbraut. Þar hefur komið fyrir á undanförunum árum að sjór hefur gengið yfir varnir og valdið óþægindum fyrir umferð sem og vegfarendur hjóla- og göngustíga á svæðinu. Ágjöf yfir sjóvarnir við Sæbraut hafa lengi verið til ama og hefur Reykjavíkurborg þurft að hreinsa grjót, þang og þara af göngustígum við sjóvörnina á minnst tveggja ára fresti að meðaltali yfir síðastliðna áratugi. Í því sambandi má nefna myndbönd af ágjöfinni, m.a. myndbönd frá 2. nóvember 2012 sem tekin voru af Kristni Jóni Eysteinsyni og Erni Marínó Arnarsyni sem bæðu er á facebook síðu Kristins og á YouTube. Þessi myndbönd hafa fengið töluverða athygli, sjá:

<https://www.facebook.com/kristinnj75/videos/4829940994980>

<https://www.youtube.com/watch?v=aG3J6PH5S2s&t=9s>

Í verkefninu verður notast við aðferðarfræði sem var þróuð í Bretlandi í þeim tilgangi að geta lagt betur mat á hættu á sjávarflóðum og endurkomutíma flóðaatburða. Aðferðarfræðin var tekin upp í meistaraverkefni í HÍ þar sem hún var innleidd og aðlöguð að íslenskum aðstæðum veturinn 2020. Síðan þá hefur þessi aðferðarfræði verið notuð hjá Hafnadeild Vegagerðarinnar við mat á flóðahættu víðsvegar um land, þar á meðal Sauðárkróki, Vík í Mýrdal og nú síðast fyrir Faxaflóahafnir á Granda.



2 Hæðarkerfi og sjávarföll

Í Reykjavík eru aðallega notuð tvö hæðarkerfi. Annars vegar hæðarkerfi Faxaflóahafna, sjókerfi með „núll“ lítið eitt neðan við meðalstórstraumsfjöru. Hitt kerfið er hæðarkerfi Reykjavíkur, gamalt hæðarkerfi með „núll“ nálægt meðalsjávarhæð. Þá hafa Landmælingar Íslands ákvarðað eitt samhæft hæðarkerfi fyrir Ísland, ISH2004, sem á að miðast við meðalsjávarhæð við landið allt. Tafla 1 sýnir hæð stórstraumsflóðs og fjöru, meðalsjávarhæð og sjókortanúll í þessum þremur hæðarkerfum.

Tafla 1 Sjávarföll og samanburður á hæðarkerfum í Reykjavík

		Hæðakerfi Faxaflóahafna [m]	Hæðarkerfi Reykjavíkur [m]	Landshæðakerfi ISH2004 [m]
Meðalstórstraumsflóð	MStFl	+4,0	+2,18	+1,73
Meðalsjávarhæð	MSH	+2,1	+0,28	-0,17
Meðalstórstraumsfjara	MStFj	+0,2	-1,62	-2,07
Sjókortanúll		+0,0	-1,82	-2,273

Í þessari skýrslu verða allar hæðir gefnar í hæðarkerfi Reykjavíkur sem er með „núll“ 1,82 m ofar en „núll“ í hæðarkerfi Faxaflóahafna. Þannig er tölugildi á hæðum sjóvarna 1,8 m lægri í hæðarkerfi Reykjavíkur en í hæðarkerfi Faxaflóahafna.



3 Sjávarhæð

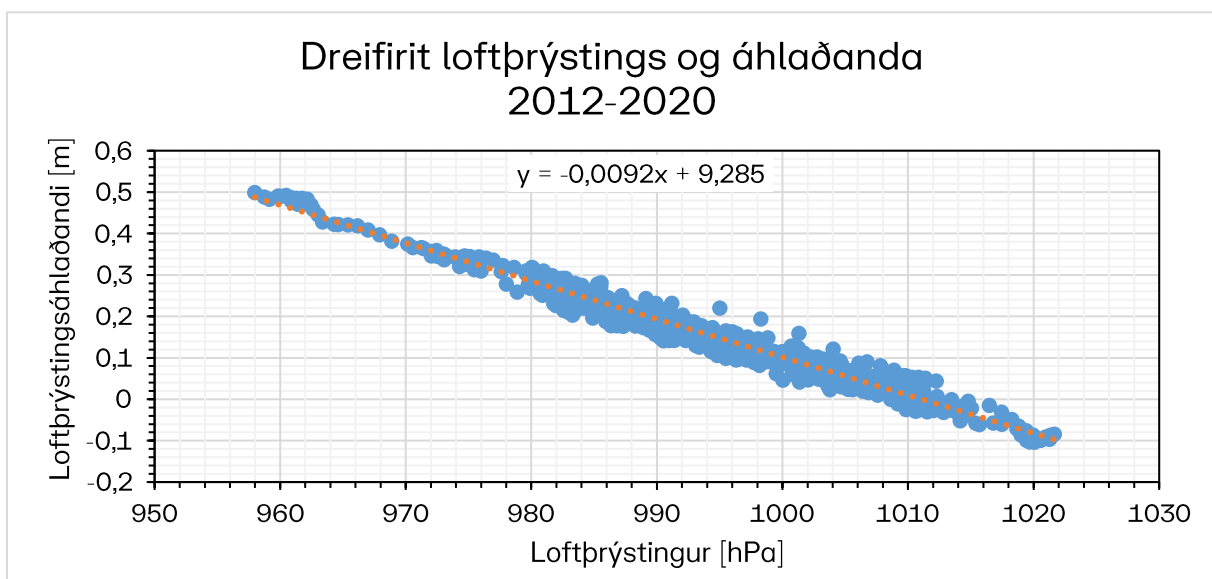
Sjávarhæð á hverjum tíma er samspil ýmissa þátta. Stærst veða stjarnfræðileg sjávarföll sem stafa af aðdráttarafli tungls, sólar og reikistjarna. Sjávarföllin ráðast af gangi himintunglanna og eru því fyrirfram þekkt og gefin út í sjávarfallatöflum. Á degi hverjum fara tvær sjávarfallabylgjur umhverfis landið og þegar aðdráttarafli tungls og sólar leggjast saman er stórstreymt en smástreymt þegar tungl og sól toga þvert á hvort annað.

Auk stjarnfræðilegra sjávarfalla hafa ýmsir veðurfarslegir þættir áhrif sem leggjast ofan á sjávarföllin, svokallaður áhlaðandi. Greint er á milli áhlaðanda af þrennskonar uppruna. Fyrst ber að nefna áhlaðanda vegna loftþrýstings, í lágum loftþrýstingi hækkar yfirborð sjávar en lækkar á móti þegar loftþrýstingur er hærri. Vindáhlaðandi myndast þegar vindur blæs yfir haffletinum. Vindáhlaðandi er lágur þar sem er aðdjúpt en hærri þar sem grynningar ná langt út. Vindhraði og lengd aðdrags hafa áhrif á stærð hans, en þó er dýpi stærsti áhrifaþátturinn þar sem vindáhlaðandi verður yfirleitt ekki mikill nema að það sé aðgrunnt og grynningar ná langt út. Að síðustu ber að nefna ölduáhlaðanda. Hann myndast upp við land þar sem öldur brotna á grynningum utan strandar og aðstæður haga því þannig til að sjór á ekki greiða leið út til hliðar við grunnbotin.

3.1 Loftþrýstingsáhlaðandi

Mat á loftþrýstingsáhlaðanda byggist á líkingu á hækku sjávarborðs vegna breytinga á loftþrýstingi, loftþrýstingsáhlaðandi má áætla með margföldun ákveðins stuðuls með breytingu loftþrýstings frá meðal loftþrýstingi. Þegar loftþrýstingur er lágur hækkar sjávarborð en lækkar þegar loftþrýstingur er hár. Eðlisfræðin segir að í stöðugu ástandi hækki sjávarborð um 1 cm við fall á loftþrýstingi um 1 hPa, sem svarar til að stuðullinn sé 1,0.

Loftþrýstingsáhlaðandi er hins vegar sjaldnast stöðugt ástand. Lægðir hreyfast yfir hafflötinn og með þeim einskonar „bóla“ á haffletinum undir miðju lögðarinnar. Takmörk eru á því hve hratt „bólan“ getur myndast og hvað gerist þegar lögðin gengur á land eða fer af landi út á sjó. Því er fyrrnefndur stuðull yfirleitt lægri en 1,0.



Mynd 1 Dreifirit loftþrýstings ECMWF gagna og reiknaðs áhlaðanda úr sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar í punktinum 64N 24V fyrir árin 2012-2020.

Mynd 1 sýnir dreifirit loftþrýstings úr gögnum evrópsku veðurstofunnar, ECMWF, og reiknaðs



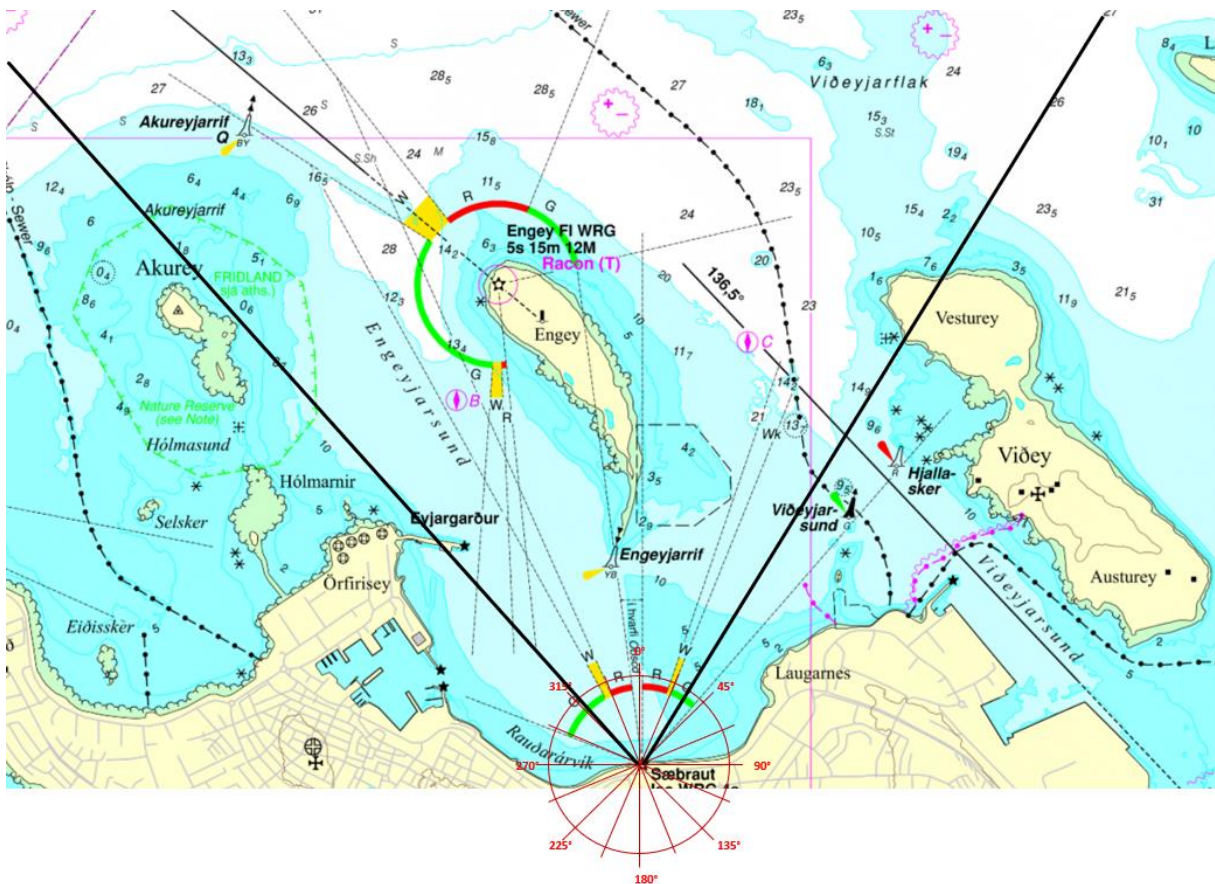
loftþrýstingsáhlaðanda úr sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar. Samkvæmt þeirri athugun er stuðullinn 0,92.

Ólafur og Páll (1991) unnu úr sjávarfallamælingum í Reykjavík fyrir árin 1956 til 1989, báru saman við stjarnfræðileg sjávarföll og ákvörðuðu stuðulinn þar 0,84.Í þessu verkefni er notast við stuðulinn 0,92.

3.2 Vindáhlaðandi

Vindáhlaðandi sjávar var áætlaður út frá jöfnu Bretschneider sem er hér fyrir neðan, þar sem U er vindhraði, h er dýpi sjávar og L er lengd aðdrags þar sem dýpsbreyting frá h_1 til h_2 á sér stað.

$$S_w = 3 \cdot 10^{-6} \cdot U^2 \cdot L \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}{g(h_1 - h_2)}$$



Mynd 2 Dýptarkort af hafsvæðinu sem notað var til að meta vindáhlaðanda við Sæbraut. Af kortavef íslenskra sjókorta Landhelgisgæslunnar og Landmælinga Íslands

Dýpi sjávar og lengd aðdrags byggist á dýptarmælingum Landhelgisgæslunnar. Fyrir hvern stað þar sem vindáhlaðandi er ákvarðaður er hafsvæðinu skipt upp í 45° geira og lengd aðdrags í miðju geirans gildir fyrir vind sem kemur úr þeim geira. Sem dæmi má sjá hafsvæðið við Sæbrautina og hvernig því er skipt upp í geira á mynd 2. Algengur vindáhlaðandi er á bilinu 0 til 20 cm, þó getur það gerst á svæðum þar sem er aðgrunnt og hvasst að vindáhlaðandi nái hátt í 30 cm. Fjallað verður nánar um stærðargráðu vindáhlaðanda á hverju svæði í undirköflum um viðeigandi staðsetningar.



3.3 Ölduáhlaðandi

Ölduáhlaðandi er sá hluti sjávarhæðar sem verður til vegna mikils öldugangs, áhlaðandinn er staðbundinn og getur breyst mikið á milli nærliggjandi svæða. Hæð þessa áhlaðanda byggist helst á lengd öldu, ölduhæð og halla strandar. Ölduáhlaðandi eykst með auknum halla strandar, lengri öldu og hærri. Mat á ölduáhlaðanda er vandmeðfarið. Hér er notast við aðferð sem Yoshimi Goda setti fram í þriðju útgáfu af *Random seas and design of matitime structures* sem gefin var út 2010 og er 33. bindi í *Advanced Series on Ocean Engineering* seríunni. Aðferðin byggist á niðurstöðum úr PEGBIS líkaninu sem hermir eftir handahófskenndum öldum úr mismunandi áttum. Þannig má meta ölduáhlaðanda með eftirfarandi jöfnu:

$$\frac{\zeta_{\theta_0=0}}{H_0} = 0,0063 + 0,768s - (0,0083 + 0,011s) \cdot \ln\left(\frac{H_0}{L_0}\right) + (0,00372 + 0,0184s) \cdot \left(\ln\left(\frac{H_0}{L_0}\right)\right)^2$$

þar sem $\zeta_{\theta_0=0}$ er ölduáhlaðandi óháður stefnu, H_0 er hæð kenniöldu við 10m dýpi, L_0 er lengd öldu og s er halli strandar.

Ölduáhlaðandi er einnig háður stefnu öldunnar miðað við ströndina sem hún kemur upp að, aðfallshorn öldu við ströndina. Áhrif öldustefnu á áhlaðandann má meta með eftirfarandi jöfnu:

$$\zeta = \zeta_{\theta_0=0} (\cos \theta_0)^{0,545+0,038 \ln\left(\frac{H_0}{L_0}\right)}$$

þar sem θ_0 er aðfallshorn kenniöldu á 10m dýpi.

3.4 Hækkun sjávarborðs vegna hnattrænnar hlýnunar

Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftlagsbreytingar (IPCC) hefur skoðað gögn og sett fram spár um hækkun sjávarborðs vegna hnattrænnar hlýnunar. Meðalhækkun sjávar á heimsvísu á tímabilinu 1901 – 2010 er metin 0,19 m af IPCC þar sem meðalhækkun frá 1993 til 2010 hafi verið svo mikið sem 3,2 mm/ári. Með þessu áframhaldi er líklegt að fyrir árið 2100 verði meðalhækkun sjávar á heimsvísu orðin um 26 - 82 cm. Útþensla vegna hlýnun sjávar stuðlar að hækkun yfirborði sjávar en aukið vökvamagn vegna bráðnun jökla er helsti orsakavaldur hærra sjávaryfirborðs. Bráðnun jökla hefur einnig í för með sér breytingar á þyngdarsviði næst jöklunum sem dregur úr hækkun sjávar á nærliggjandi svæði. Því má búast við því að hækkun sjávar við Íslandsstrendur stafi helst af bráðnun Suðurskautslandsins á meðan bráðnun Grænlandsjökuls mun hafa minni áhrif. Samkvæmt skýrslu vísindanefndar, 2018, um loftlagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi má búast við því að hækkun sjávarstöðu við Íslandsstrendur verði um 30 - 40% af hækkun meðalsjávarstöðu á heimsvísu. Óvissumörkin eru þó rífleg því bráðnun íss á Grænlandi og Suðurskautslandi hefur ráðandi áhrif á hækkun sjávar við Ísland, aukið massatap á Suðurskautslandinu gæti bætt tugum sentimetra við hækkun hér við land.

Landhæðabreytingar vegna jarðskorpuhreyfina hafa einnig áhrif á stöðu sjávar og má því nefna að samkvæmt skýrslu Veðurstofunnar má búast við 10 til 20 cm sigi á svæðinu frá Suðvesturlandi til Norðvesturlands. Jafnframt kemur fram í skýrslunni að á Suðvesturlandi til Norðvesturlands er hlutfallsleg hækkun sjávarstöðu vegna loftlagsbreytinga 30 – 34% af hnattrænni hækkun. Í heild má búast við hækkun á sjávarstöðu fyrir árið 2100 hjá Suðvesturlandi til Norðvesturlands verði á bilinu 25 – 54 cm fyrir 50 – 100 cm hnattræna hækkun. Gera má ráð fyrir að hækkun sjávarstöðu fylgi hámarksgildi á þessu bili fyrir sunnanverðan Faxaflóa. (Halldór Björnsson og fl., 2018).



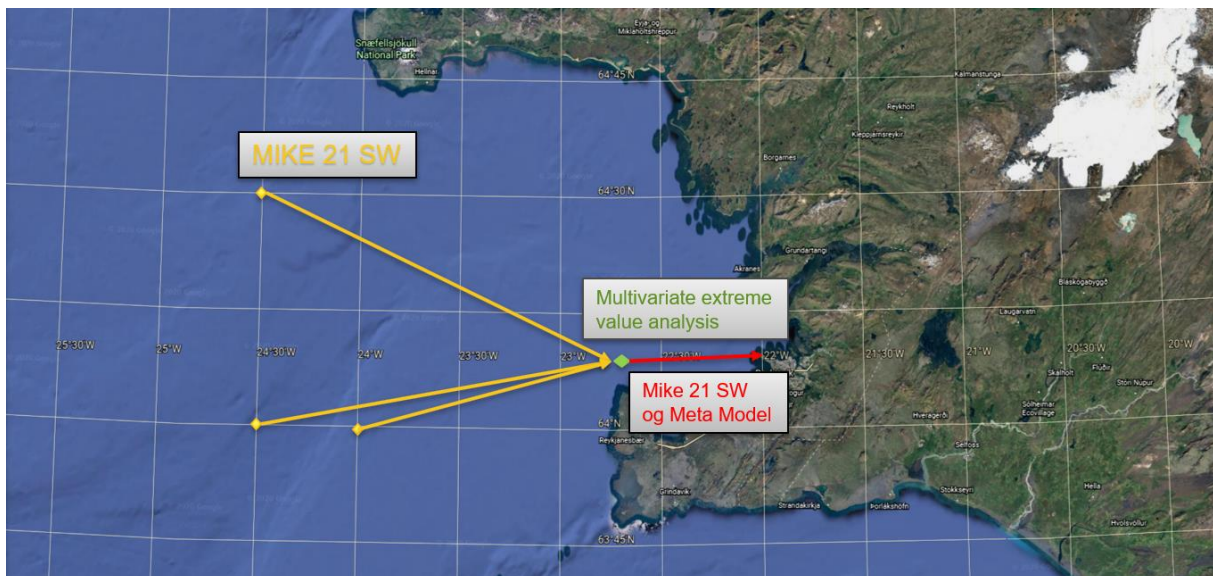
Fyrir flóðvarnargarð sem byggður er til nokkurra áratuga skal skoða þær sviðsmyndir sem gætu átt sér stað í seinni hluta líftíma flóðvarnargarðsins. Gera þarf grein fyrir því hvernig aðstæður gætu verið eftir 30 til 50 ár og taka tillit til mögulegrar aukningar í ágjöf vegna hækkunar á sjávarstöðu. Gefið að líftími slíks mannvirkis sé 30 til 50 ár þá þykir eðlileg að staða mannvirkisins sé skoðuð eftir 30 ár og metið hvort endurbóta sé þörf á allra næstu árum eða hvort það megi bíða í 10 til 20 ár. Miðað við 54 cm hækkun á sjávarstöðu fyrir árið 2100 á höfuðborgarsvæðinu má ætla að hækkun sjávarstöðu eftir 30 ár verði orðin 24 cm og er miðað við þá hækkun sjávarstöðu í tillögum að hækkun sjóvarna síðar í skýrslunni.



4 Hermun aftaka atburða

Sem mat á virkni núverandi sjóvarnar og innlegg í hönnun sjóvarna á svæðinu var myndað stórt gagnasafn af aftakaatburðum sem byggist á 40 ára sögulegri tímaröð öldu- og veðurspágagna af Faxaflóa og hafsvæðinu utan hans. Notast var við spágögn með einnar klukkustundar tímaskrefi frá evrópsku veðurstofunni, ECMWF, frá árunum 1979 til 2020 í hnitum utan við Faxaflóa, 64°N 23,5°V, 64°N 24°V og 64,5°N 24°V. Spágögnin innihalda vindhraða, vindstefnu, hæð kenniöldu, sveiflutíma og stefnu kenniöldu auk loftþrýstings við yfirborð sjávar, en hann var notaður til að meta áhlaðanda vegna loftþrýstings. Að auki var notast við tímaröð fyrir stjarnfræðileg sjávarföll í Faxaflóa sem reiknuð er út frá stjarnfræðilegum stuðlum í reiknilíkaninu MIKE frá DHI og endurreiknaða tímaröð vindgagna í mynni Faxaflóa frá Veðurstofu Íslands.

Tímaröð spágagna úr ofangreindum hnitum var keyrð í sjávarfallalíkaninu MIKE 21 SW og færð inn að mynni Faxaflóa í punkt norðan við Garðsskaga, sjá mynd 3. Þetta var gert því að aftakaatburðir utan Faxaflóa með suðaustan vind- og öldustefnum skila sér ekki að fullu inn á innri hluta Faxaflóa og því væri hætt á að slík suðaustan veður skekktu myndina við höfuðborgarsvæðið ef þau væru tekin með. Hins vegar er mun líklegra að aftakaatburður norðan við Garðsskaga skili sér inn að höfuðborgarsvæðinu og verður því í framhaldinu unnið með tímaröðina í þeim punkti. Þá voru fengin spágögn um vindhraða og stefnu norðan við Höfuðborgarsvæðið í hnti 64,2°N 22,1°V frá Veðurstofu Íslands svo notast yrði við staðbundin vindgögn í úrvinnslunni.



Mynd 3 Yfirlitsmynd yfir hafsvæðinu utan Faxaflóa sem sýnir staðsetningu spápunkta. Spágögn fyrir árin 1979-2020 frá ECMF eru fengin úr þrem hnitum (gulir tíglar) og flutt með MIKE21 SW í punkt norðan við Garðsskaga (Grænn tígull).

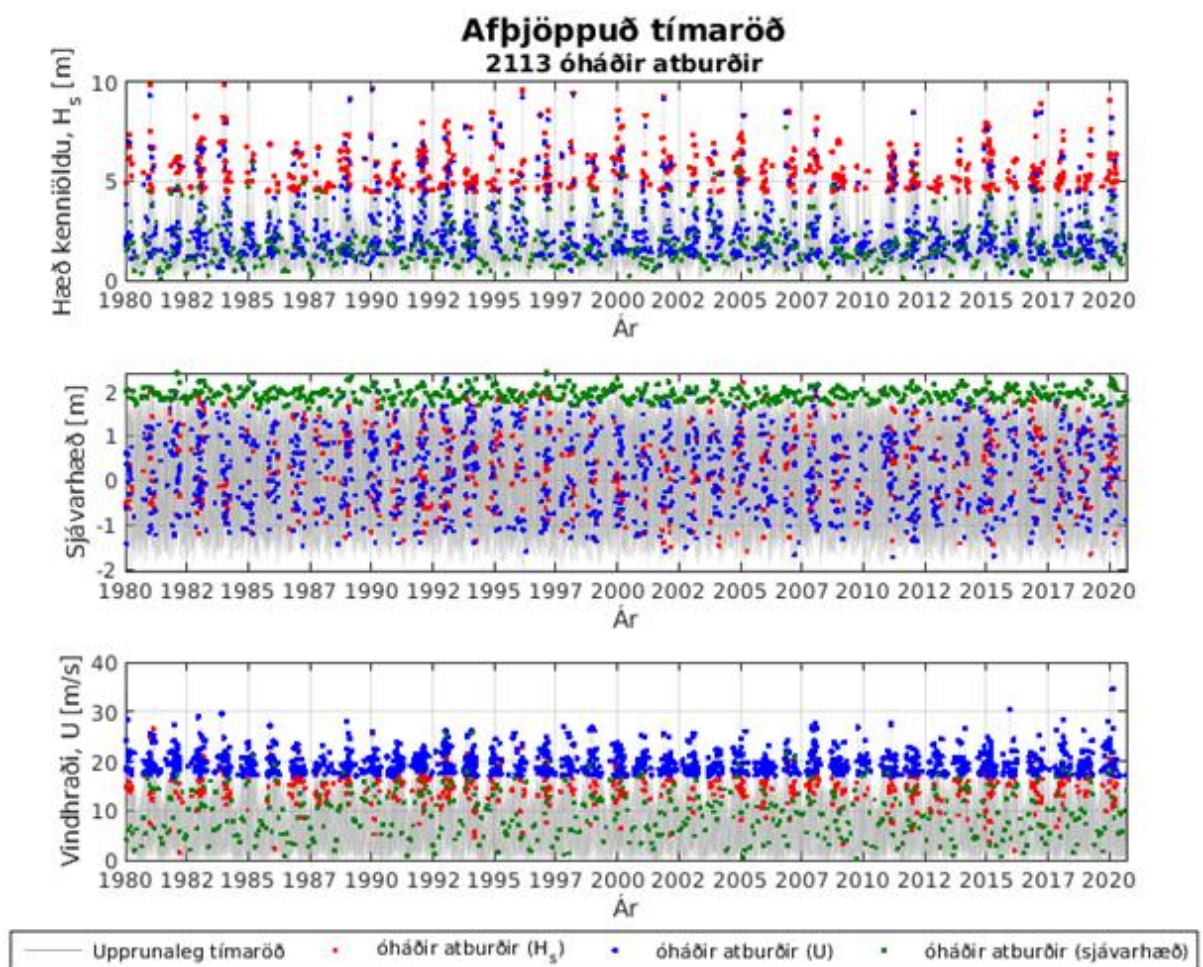
Úr tímaröðinni norðan við Garðsskaga voru einangraðir um 2000 óháðir aftaka atburðir og þeir notaðir til að útbúa gagnasafn með 350.000 óháðum atburðum þar sem í það minnsta ein af ofangreindum breytum er í hærra lagi. Gagnasafnið var útbúið með því að nota aðferðina „Multivariate extreme value modelling“ (B. Gouldby, 2014). Þar er notast við óháða atburði til að herma þær breytur sem stuðla að aftaka atburðum. Aðferðin varðveitir þá fylgni sem er milli breytanna í útgildum. Atburðirnir eru síðan færðir upp að ströndinni með öldulíkani MIKE 21 SW og með svokölluðu Meta Model hermílikani, sem er ekki öldulíkan en hermir eftir niðurstöðum MIKE öldulíkansins og sparar því keyrslutíma verulega. Sjóvörnum meðfram Sæbrautinni voru skipt upp í 7 hluta, þar sem hver hluti tekur mið af einum reiknipunkti fyrir öldu á grunslóð. Fyrri



hluti aðferðarinnar, þ.e. hermun stóra gagnasafnsins, er sameiginlegur fyrir alla punktana en með MIKE21 SW keyrslunni og hermilíkaninu skiptist verkefnið upp á milli staða. Þannig verður hættu á sjávarflóðum metin sérstaklega fyrir hvern hluta sjóvarnarinnar fyrir sig.

4.1 Afmörkun óháðra aftaka atburða

Tryggja þarf að atburðirnir, sem notaðir eru úr tímaröðinni norðan við Garðsskaga til að herma eftir, séu óháðir aftaka atburðir. Þá er átt við að ekki séu notuð tvö eða fleiri tímaskref úr sama atburðinum. Þannig eru óháðir aftaka atburðir afmarkaðir í 40 ára langri tímaröð með þeim hætti að valdir eru toppar úr tímaröðum hæðar kenniöldu, sjávarhæð og vindhraða sem eru yfir ákveðnum þröskuldsgildum og með í það minnsta 24 klst. millibili. Þröskuldsgildið fyrir hæð kenniöldu á hafi er 4,4 m, fyrir sjávarhæð + 1,4 m og 17 m/s er þröskuldsgildi fyrir vindhraða. Afmörkunin skilar 2113 óháðum atburðum sem notaðir eru til að herma 350.000 óháða aftakaatburði, sjá mynd 4.



Mynd 4 Tímaröð fyrir hæð kenniöldu (efst), sjávarhæð (mið) og vindhraða (neðst). Tímaröðin er afbjöppuð í óháða atburði út frá hæð kenniöldu (rauðir punktar), sjávarhæð (grænir punktar) og vindhraða (bláir punktar).

4.2 Hermun byggt á samlíkum

Hermun gagna er tvíþætt, annars vegar er *Multivariate Extreme Value Modelling* notað til að herma 350.000 gildi af hæð kenniöldu, vindhraða og loftþrýstingsáhláðanda út frá samlíkum



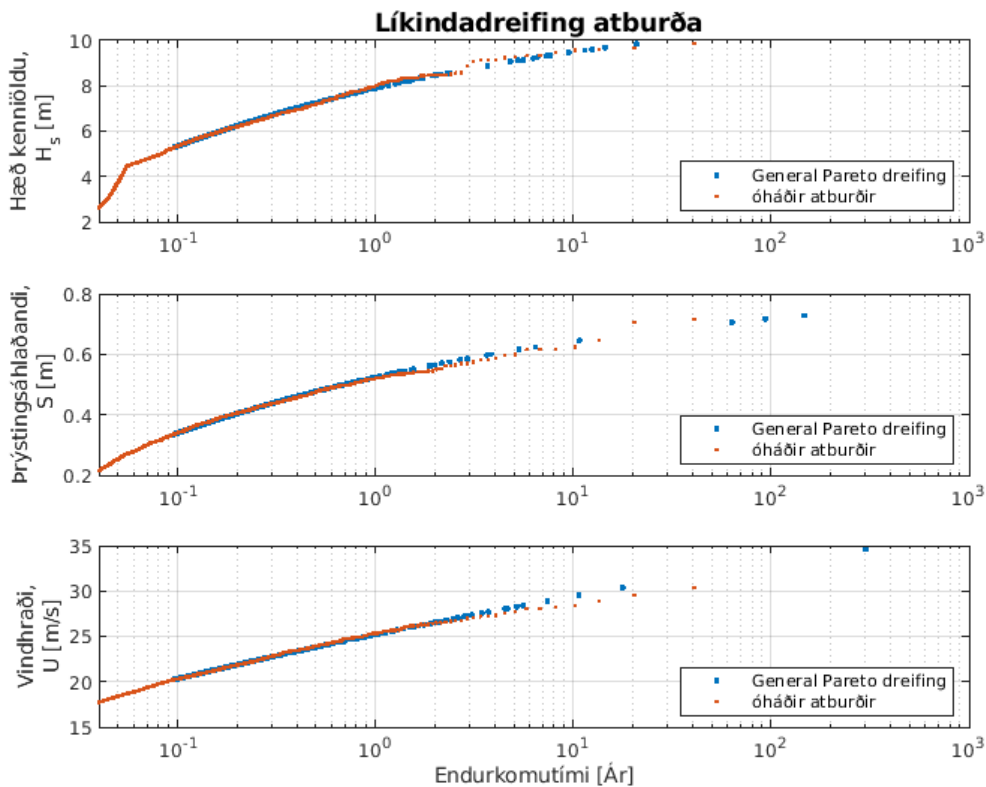
óháðra atburða. Hins vegar að nota hermdu gildin af þessum þrem þáttum til að herma hinar breytur úr sambandi sínu við þá þætti sem þegar hafa verið hermdir.

Til að byrja með er General Pareto líkindadreifingin aðlöguð að afmörkuðum óháðu atburðinum, sjá mynd 5. Líkurnar fyrir gildin sem eru fyrir ofan 80% eru færð yfir á Gumbel skala með því að taka tvöfaldan neikvæðan logra af líkunum, $Y_i = -\log(-\log(f_i))$. Þar sem f eru líkur fyrir viðeigandi gildi í einum af þremur breytunum sem verið er að herma hverju sinni, s.s. i .

Multivariate Extreme Value Modelling byggist á því að nota jöfnuhneppi til að líkja eftir sambandi milli hæðar kenniöldu, vindhraða og loftþrýstingsáhlaðanda, sbr. jöfnuna hér að neðan.

$$Y_{-i}|Y_i = aY_i + Y_i^b W$$

Þar sem Y_{-i} eru Y gildin fyrir þær tvær breytur sem skal herma og Y_i er skilyrta breytan sem hermt er eftir. Þá er a fasti á bilinu $]0,1[$, b er fasti á bilinu $] -1, 1[$ og W eru leifar sem fylgja normaldreifingu. Jöfnuhneppið er leyst sérstaklega þar sem hver breyta er skilyrta breytan með *most likelihood* aðferðinni undir því skilyrði að Y_i sé í topp 20%. Þegar búið er að leysa jöfnuhneppið er það notað með Monte Carlo aðferð til að herma 350.000 atburði þar sem neðangreind fjögur skref eru endurtekin þar til þeim fjölda atburða er náð.



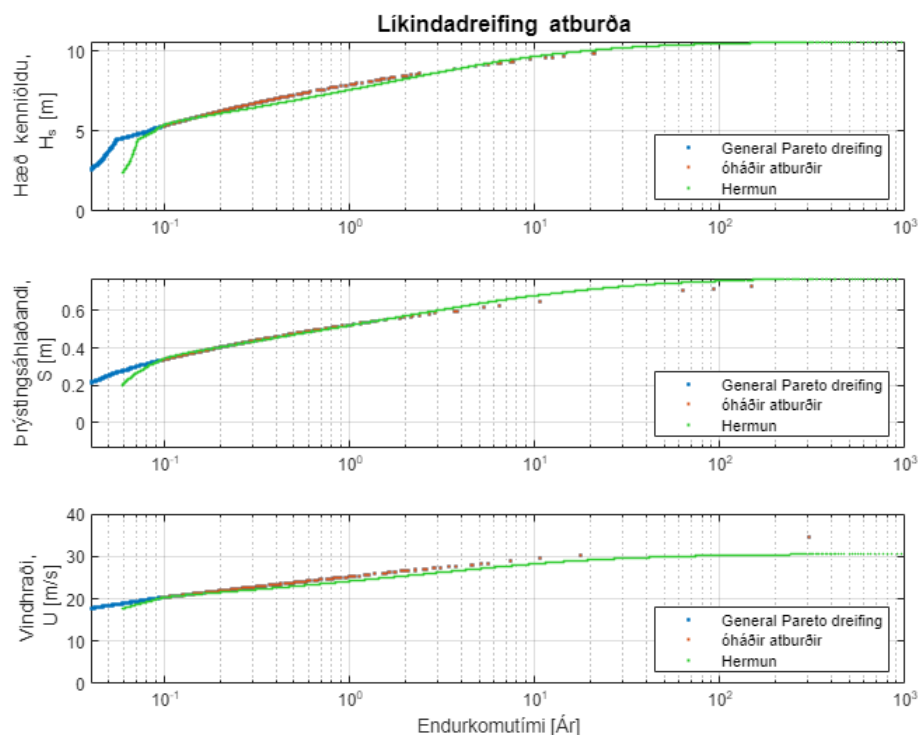
Mynd 5 Líkingadreifing (rauðir punktar) og General Pareto dreifing (bláir punktar) fyrir hæð kenniöldu (efst), loftþrýstingsáhlaðanda (mið) og vindhraða (neðst) byggt á óháðum atburðum úr 40 ára tímaröðinni.

1. Handahófskennt gildi af Y_i er valið, gefið að það sé í topp 20%,
2. Handahófskennt gildi af W er valið út frá meðaltali og staðalfrávikum sem fundið var þegar jöfnuhneppið var leyst.
3. Y_{-i} eru reiknaðar út frá jöfnu (1) með W úr skrefi 2 og viðeigandi a og b .
4. Breyta Y aftur yfir í f og nota General Pareto dreifinguna til að fá viðeigandi gildi.



Þessi aðferð skilar 350.000 óháðum aftaka atburðum þar sem í það minnsta ein af breytunum inniheldur hátt gildi. Mynd 6 sýnir samanburð líkindadreifingar á þeim þrem breytum sem hermdar voru með Monte Carlo aðferðinni og óháðu atburðunum sem *Multivariate Extreme Value Modelling* er byggð á.

Þær breytur sem eftir sitja, þ.e.a.s. öldustefna, sveiflutími kenniöldu, vindátt og stjarnfræðileg sjávarföll eru byggðar á sambandi sínu við þær þrjár breytur sem voru hermdar með Monte Carlo aðferðinni. Þá er öldustefna og sveiflutími byggð á hæð kenniöldu, vindstefna er byggð á vindhraða, og stjarnfræðileg sjávarföll byggð á loftþrýstingsáhláðanda og árstíma.



Mynd 6 Samanburður líkindadreifinga óháðra atburða (blár og rauður) og hermunar (grænn) fyrir hæð kenniöldu (efst), loftþrýstingsáhláðanda (mið) og vindhraða (neðst).

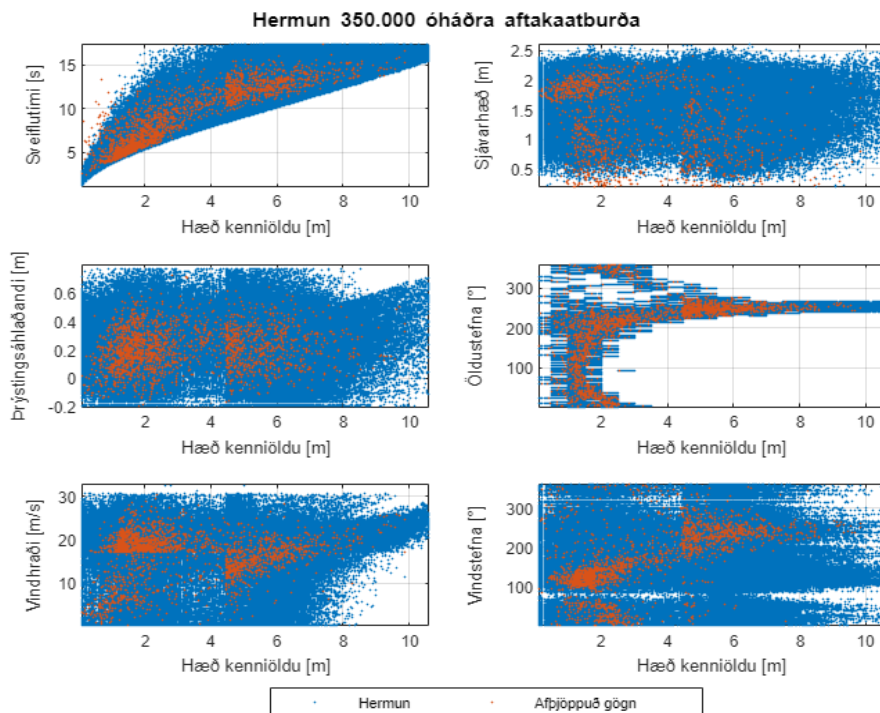
Á mynd 7 má sjá samanburð á dreifingu þeirra 2113 óháðra atburða úr 40 ára tímaröðinni (rauðir punktar) og hermun 350.000 óháðra aftaka atburða út frá 40 ára tímaröðinni (bláir punktar). Hermdu atburðirnir fylgja dreifingu aftaka atburðanna úr tímaröðinni að mestu leiti auk þess sem hærrí útgildi fást. Þetta gatasafn af 350.000 hermdum aftaka atburðum er síðan flutt af hafi og inn að grunnslóð við Sæbraut í þeim tilgangi að nota þá við mat á ágjöf yfir núverandi sjóvarnir.

4.3 Safn aftaka atburða flutt upp að ströndinni

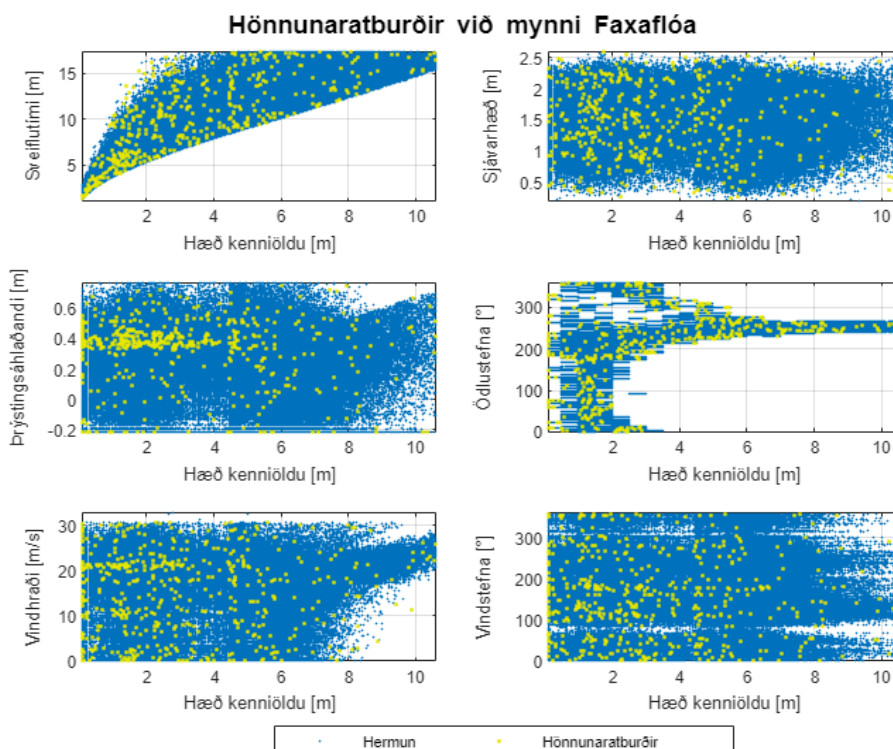
Til að sjá hvernig þessir atburðir hegða sér á grunnslóð við Reykjavík eru atburðirnir færðir af hafi, frá mynni Faxaflóa og upp að völdum stöðum við Sæbrautina. Vegagerðin notar öldulíkanið MIKE21 SW til að flytja ölduatburði úr úthafspunkti á hafi og upp að ströndinni. Hér er MIKE öldulíkanið notað saman með *Meta Model* hermilíkani sem byggir á *Radial Basis* falli til að færa alla 350.000 atburðina á grunnslóðir. Þessar tvær aðferðir eru notaðar saman því óraunhæft er að flytja alla 350.000 atburðina að grunnslóð með öldulíkaninu vegna of langs reiknitíma. Þess í stað eru 500 hönnunaratburðir valdir úr hermda gagnasafninu sem eru lýsandi fyrir það hvernig punktaský 350.000 atburðanna hegðar sér, sjá mynd 8, og þeir keyrðir með MIKE21 SW. Niðurstöðurnar úr keyrslunni ásamt hönnunaratburðunum eru notaðir til að hanna hermilíkanið sem lýsir sambandi milli atburðanna úr mynni Faxaflóa og á grunnslóð við Sæbraut. Líkanið sem lýsir sambandi atburða á þessum tveim stöðum er síðan notað til að færa alla 350.000 atburðina á grunnslóð. Frekari lýsing á *Meta Model* hermilíkaninu og *Multivariate Extreme Value Modelling*



aðferðinni má finna í meistaraverkefninu *Mat á aftaka sjávarflóðum: Innleiðing aðferða sem byggist á samlíkum útgilda* (Bryndís Tryggvadóttir, 2020).



Mynd 7 Vind- og haffræðileg gögn 350.000 óháðra aftaka atburða úr hermun (bláir punktar) borin saman við dreifingu óháðra aftaka atburða úr 40 ára tímaröðinni (rauðir punktar).



Mynd 8 Vind- og haffræðileg gögn hönnunaratburða (gulir punktar) sem valdir eru úr 350.000 atburða hermuninni (bláir punktar)



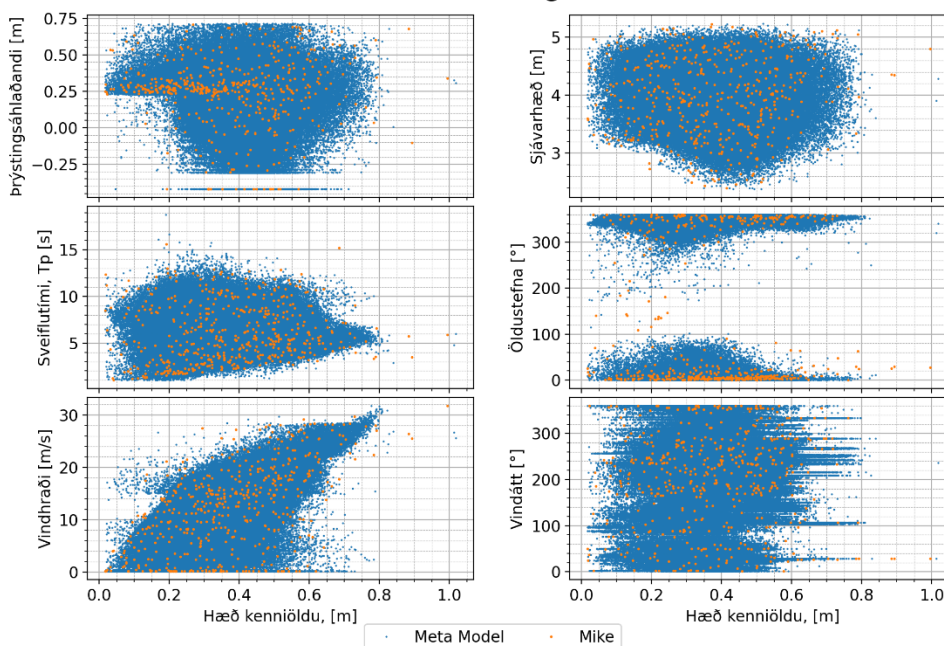
4.3.1 Aftaka flóðaatburðir við Sæbraut

Sjónvörnum við Sæbraut hefur verið skipt upp í sjö hluta, þar sem hver hluti tekur mið af einum reiknipunkti fyrir öldu úr líkankeyrslu MIKE21 SW, S1-S7, sjá mynd 9. Reiknipunktarnir eru allir á 10 m dýpi nema S7 sem er á 5,5 m dýpi. *Meta Model* hermilíkanið var aðlagð að hverjum punkti fyrir sig og notað til að flytja alla 350.000 aftaka atburðina að þeim 7 punktum sem eru til athugunar. Á mynd 10 má sjá niðurstöður hermilíkansins fyrir punktinn S1 ásamt hönnunaratburðum sem fluttir voru að grunnslóð með MIKE21 SW. Mynd 11 sýnir samanburð á endurkomutíma kenniöldu í hverjum punkti. Þar má sjá að hæð kenniöldu við austari hluta Sæbrautarinnar er almennt hærri en við vestari hluta hennar.

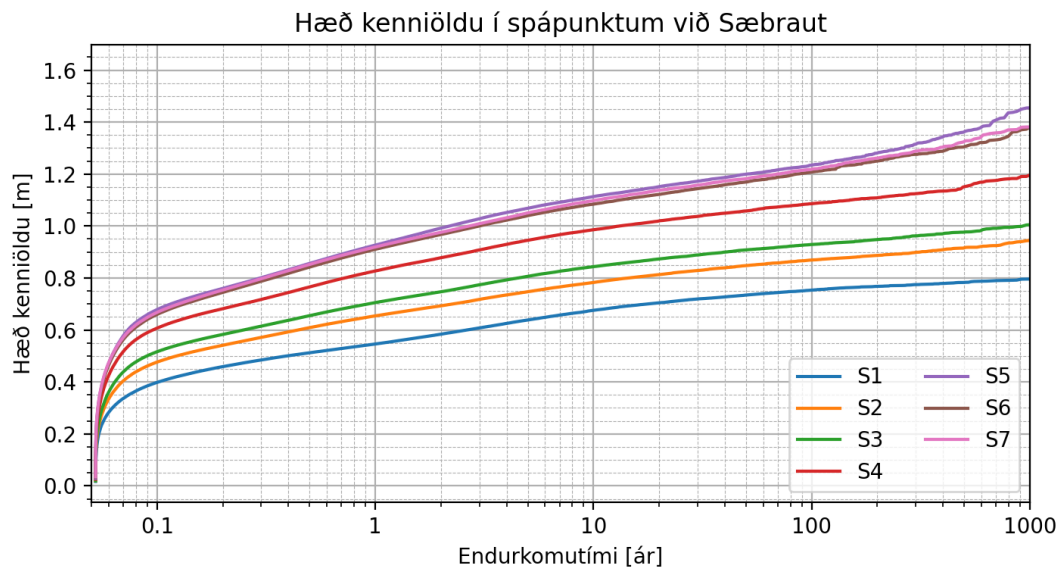


Mynd 9 Staðsetning reiknipunkta á grunnslóð við Sæbraut sem notaðar eru til að meta sjónvarnir á því svæði sem er næst punktnum.

Hermdir atburðir á grunnslóð, S1



Mynd 10 Vind- og haffræðileg gögn í punkti S1 á 10 m dýpi. Hönnunaratburðirnir (gulir punktar) voru fluttir upp að landi með MIKE21 SW öldulíkani. Gagnasafnið í heild sinni (bláir punktar) var síðan flutt að landi með Meta Model sem byggir á hönnunaratburðunum.



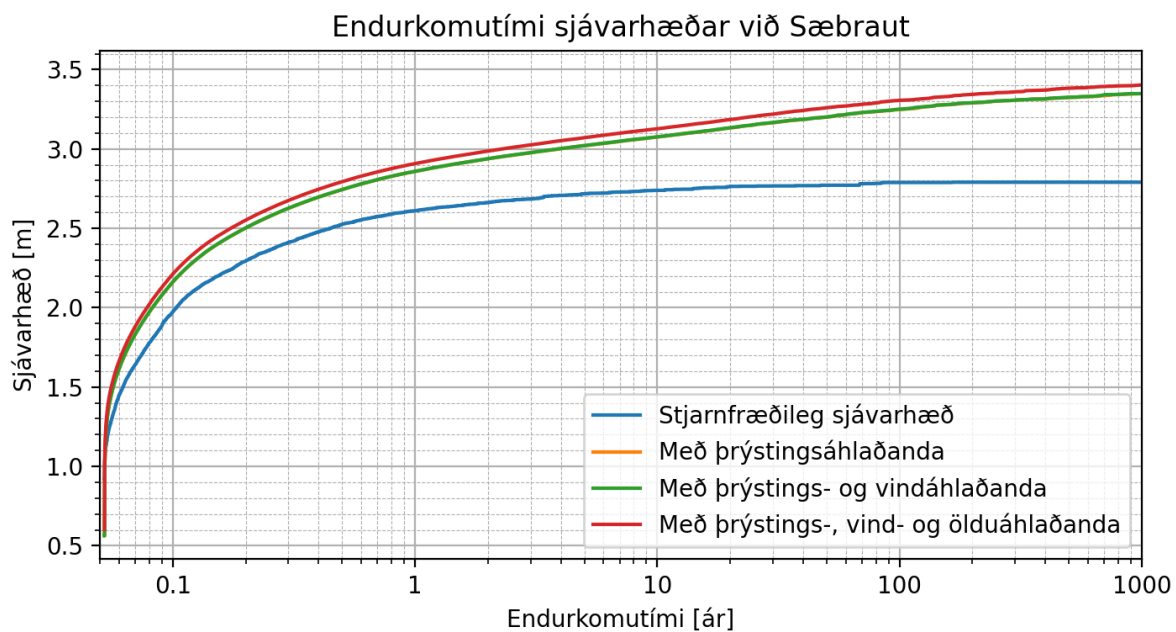
Mynd 11 Samanburður á hæð kenniöldu við hvern hluta sjóvarnarinnar við Sæbraut sem miðast við reiknipunkta öldu S1 til S7.

4.4 Vind- og ölduáhlaðandi á grunnslóð

Lagt var mat á endurkomutíma sjávarhæðar með og án áhlaðanda, þar á meðal vindáhlaðanda og ölduáhlaðanda sem metnir voru með aðferðum sem fjallað var um í kafla 3. Niðurstöður fyrir hafsvæðið við Sæbraut má sjá í töflu 2 og mynd 12. Allar hæðir gefnar í hæðarkerfi Reykjavíkur. Vindáhlaðandi á þessum svæðum er mjög lítil þar sem hann er að jafnaði innan við 0,5 cm. Því falla ferlarnir fyrir eingöngu þrýstingsáhlaðanda og bæði þrýstings- og vindáhlaðanda alveg saman. Þá hefur ölduáhlaðandi eilítið meiri áhrif á sjávarstöðuna þar sem ölduáhlaðandinn er að jafnaði um eða undir 7 cm.

Tafla 2 Endurkomutími sjávarhæðar við með mismunandi samsetningu á áhlaðanda. Hæðir í hæðarkerfi Reykjavíkur.

Endurkomutími [ár]	Sjávarhæð hjá Sæbraut [m]			
	Stjarnfræðileg sjávarhæð	Með þrýstingsáhl.	Með vind- og þrýstingsáhl.	Með vind-, öldu- og þrýstingsáhl.
1	2,61	2,86	2,86	2,91
10	2,74	3,07	3,07	3,12
100	2,79	3,25	3,25	3,31
1000	2,80	3,35	3,35	3,40



Mynd 12 Endurkomutími sjávarhæðar við Sæbraut með mismunandi samsetningu á áhlaðanda. Þar sem vindáhlaðandi bætir engu við þrýstingsáhlaðanda þá liggur græna línan á þeirri appelsínugulu. Hæðir í hæðarkerfi Reykjavíkur.



5 Mat á ágjöf yfir flóðvarnargarð

5.1 Viðmiðunarkröfur fyrir ágjöf samkvæmt EurOtop 2018

Ágjafaleiðarvísirinn EurOtop 2018 setur fram viðmiðunarkröfur fyrir ágjöf við margskonar aðstæður. Annars vegar eru settar viðmiðunarkröfur fyrir meðalágjöf yfir ákveðið tímabil og hins vegar fyrir mestu ágjöf stakrar öldu í aftaka atburði. Þar sem um er að ræða flóðahættu er eðlilegt að miða við meðalágjöf yfir ákveðið tímabil, en þar sem um er að ræða hættu fyrir fótgangandi eða akandi umferð er einnig hægt að miða við mestu ágjöf í stakri öldu.

Í EurOtop 2018 leiðarvísinum eru ýmsar kröfur settar fram um meðalágjöf yfir flóðvarnargarða. Það fer allt eftir aðstæðum, hvort fólki eða byggingum stafi hætta af og hvort hætta sé á að garðurinn sjálfur skemmist. Þá þarf einnig að taka tillit til eðli atburðanna. Við aðstæður líkt og finnast við Sæbraut, þar sem ágjöf verður helst í hvassviðri þegar norðanátt feykir stuttum kröppum öldum sem ná yfir sjónvörnina langar vegalengdir. Samkvæmt leiðarvísinum má því áætla að raunveruleg ágjöf yfir sjónvörnina sé í raun fjórfalt meiri en reiknanlegar aðferðir gefa til kynna. Þetta þarf að hafa í huga þegar hámarkságjöf er borin saman við reiknaðar niðurstöður.

Þegar um er að ræða aðstæður þar sem gangandi vegfarendur eru að jafnaði á ferli mjög nálægt sjónvörninni, skal taka tillit til þeirri hættu sem ágjöf getur skapað. Þetta á við um staði þar sem göngustígar, bílastæði eða athafnasvæði fyrir almenning, liggja upp við sjónvörnina. Í tilfellum sem að jafnaði koma einu sinni á ári við slíkar aðstæður er miðað við að vegfarendur sem eru viðbúnir og kippa sér ekki upp við að blotna við aðstæður þar sem sést til sjávar. Þá skal meðalágjöf ekki fara yfir 0,1 l/s/m og mesta ágjöf stakrar öldu skal vera innan við 50 l/m. Öryggisviðmið þess sem er öruggt fyrir vana og vel búna er meðalágjöf 1 til 10 l/s/m og hámarkságjöf stakrar öldu 500 – 2000 l/m. Hér er valið að setja neðri mörk öryggisviðmiðsins sem viðmið fyrir 10 ára endurkomutíma og efri mörk sem viðmið fyrir 100 ára endurkomutíma við aðstæður þar sem almennir vegfarendur eru á gangi.

Það skal tekið fram að við ákvörðun á viðmiðunarkröfum felst ákveðið val þar sem tekið er tillit til ýmissa þátta. Eftir aðstæðum er mögulegt að gera strangari kröfur eða veikari.

Tafla 3 Valdard viðmiðunarkröfur um hámarkságjöf m.v. endurkomutíma fyrir sjóvarnargarða við Sæbraut

Endurkomutími	Meðalágjöf q [l/s/m]	Mesta ágjöf V_{max} [l/m]
1 ár	0,1	50
10 ár	1	500
100+ ár	10	2000

5.2 Ágjöf yfir flóðvarnargarð

Fyrir hvern atburð í hermda gagnasafninu er ágjöf yfir núverandi varnargarða metin með jöfnu 6.6 úr EurOtop 2018 ágjafarleiðarvísinum, rituð hér fyrir neðan. Jafnan byggir á meðaltali af niðurstöðum líkantilauna víðs vegar að auk öryggismarka og skilar svokallaðri hönnunarágjöf sjóvarnar. Þessi jafna er notuð til að meta ágjöf, q [l/s/m], yfir varnargarð með fláa á bilinu 1:2 til 1:4/3.

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,1035 \cdot \exp \left[- \left(1,35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1,3} \right]$$

Hér er H_{m0} hæð kenniöldu við tál varnargarðsins, R_c er fríborð, þ.e. hæðarmunur milli sjávarhæðar og landhæðar bakvið varnargarðinn, $\gamma_f = 0,6$ er hrifnistuðull grjóttgarðs með meðalgleyfni, γ_β er



áhrif öldustefnu sem getur mest verið 1 fyrir öldu sem streymir hornrétt á varnargarðinn. Vegna eðli atburða á þessu svæði, sem áður er lýst, er q margfaldað með 4 til að fá lokaniðurstöðu ágjafar.

Fyrir varnargarð með bermu skal gera ráð fyrir bermunni í útreikningum á ágjöf. Til þess eru ýmsar aðferðir, þar á meðal að nota Neural Network sem byggir á hermunum með ýmsum aðferðum eða notast við EurOtop 2018 leiðarvísinn sjálfan. Fyrir stórt gagnasafn líkt og unnið er með að þessu sinni þá hentar betur að nota jöfnurnar úr EurOtop 2018. Jafna 6.10, hér fyrir neðan, gefur hönnunarlágjöf yfir varnargarð með bermu:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,1035 \cdot \exp \left[- \left(1,35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_{BB} \cdot \gamma_\beta} \right)^{1,3} \right]$$

Jafnan byggist á jöfnu 6.6 þar sem bermustuðull, γ_{BB} , hefur tekið við af hrifnustuðlinum í jöfnu 6.6 úr EurOtop 2018. Bermustuðulinn má reikna með eftirfarandi jöfnu (jafna 6.11 í EurOtop 2018):

$$\gamma_{BB} = 0,68 - 4,1 \cdot s_{m-1,0} - 0,05 \frac{B}{H_{m0}}$$

eða jöfnu 4.11 í *Design and construction of berm breakwaters* (van der Meer og Sigurður Sigurðarson, 2016), þar sem $s_{m-1,0}$ er krappleiki öldur og B er breidd bermu. Vegna eðli atburða á þessu svæði er q margfaldað með 4 til að fá lokaniðurstöðu ágjafar, eins og kemur fram hér að ofan.

Mesta ágjöf stakrar öldu tekur tillit bæði til ágjafar sem og fjölda alda sem ná yfir krónu sjóvarnarinnar. Jafna 4.6 úr EurOtop 2018 skilar mati á mestu ágjöf í l/m fyrir staka öldu í atburði.

$$V_{max} = a \cdot [\ln(N_{ow})]^{1/b}$$

Þar sem:

a er stuðull $a = \left(\frac{1}{\Gamma(1+\frac{1}{b})} \right) \cdot \left(\frac{q T_m}{p_{ov}} \right)$ (Jafna 5.53)

b er stuðull $b = 0,85 + 1500 \left(\frac{q}{g H_{m0} T_{m-1,0}} \right)^{1,3}$ (Jafna 6.18)

p_{ov} eru líkur að alda gefi yfir $p_{ov} = \exp \left[- \left(\sqrt{-\ln 0,02} \frac{R_c}{R_{u,2\%}} \right)^2 \right]$ (Jafna 6.3)

$R_{u,2\%}$ er 2% upprennsli $R_{u,2\%} = 1,75 \cdot H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \xi_{m-1,0}$ ef $\xi_{m-1,0} < 1,8$ (Jafna 6.2)

$$R_{u,2\%} = 1,07 \cdot H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \left(4,0 - \frac{1,5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \text{ ef } \xi_{m-1,0} > 1,8$$

$\xi_{m-1,0}$ Breaker parameter $\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{m-1,0}}}$ (jafna 5.55)

N_{ow} er fjöldi alda sem gefur yfir $N_{ow} = p_{ov} \cdot N_w$

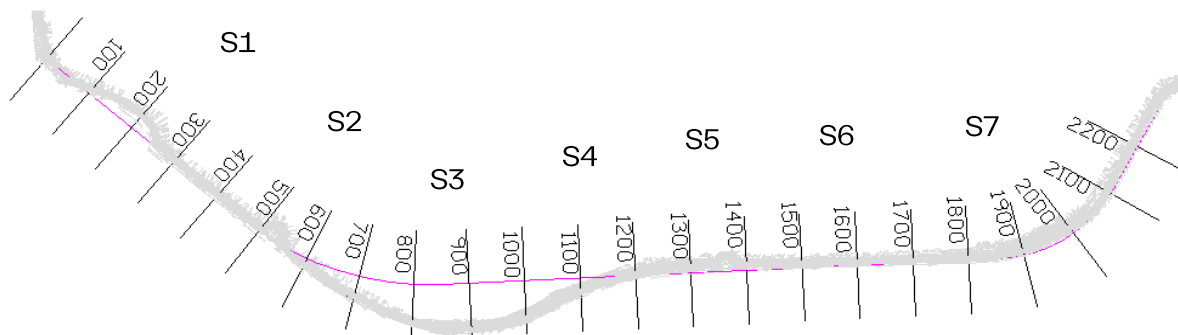
N_w er fjöldi alda á klst $N_w = \frac{3600}{T_{m-1,0}}$

Þá er $T_{m-1,0}$ sveiflutími öldu upp við sjóvörnina og q er reiknað með ofangreindum jöfnum eftir því hvort um sé að ræða sjóvörn með eða án bermu.

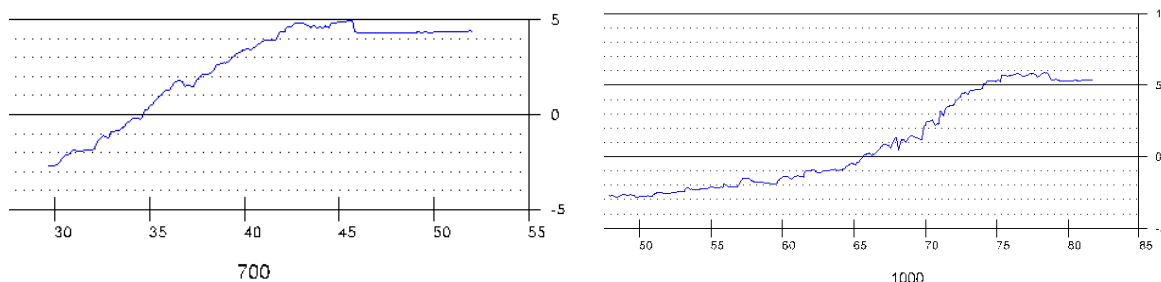


6 Sjóvarnir við Sæbraut

Stóra gagnasafnið fyrir aftakaatburði í reiknipunktum S1 til S7 var notað til að meta ágjöf yfir núverandi sjóvarnir meðfram þeim hluta Sæbrautar sem liggur milli Hörpu og Kirkjusands. Hæðarmæling á sjóvörninni var framkvæmd í apríl 2021 og miðast stærð og lögun sjóvarnarinnar við þá mælingu. Þversnið sjóvarnarinnar var skoðað í sniðum með 100 m millibili. Í hverju þversniði var metið hæð sjóvarnarinnar (krónuhæð), flái hennar, breidd krónu og krónuhæð yfir landi, sjá töflu 4. Í töflunni má einnig sjá hvaða reiknipunkti (S1-S7) þversniðin tilheyra. Allar hæðir í töflunni eru í hæðarkerfi Reykjavíkur. Staðsetningar þversniðanna má sjá á mynd 13 og dæmi um þversnið núverandi sjóvarnar má sjá á mynd 14.



Mynd 14 Yfirlitsmynd yfir sjóvörnina við Sæbraut, staðsetningu stöðva og reiknipunkta fyrir öldu á grunnslóð séð ofan frá.



Mynd 13 Dæmi um þversniðsmælingu tveggja stöðva (700 og 1000) sem notuð var til að ákvarða fláa, krónuhæð og landhæð bakvið sjóvörn.

Reiknuð var ágjöf fyrir núverandi krónuhæð auk þess sem ágjöf var metin fyrir sjóvarnir með hærri krónu og/eda með 2 m eða 4 m breiðri bermu þar sem berman er í kóta í +4 m í hæðarkerfi Reykjavíkur. Mat ágjafar fyrir áhrifasvæði S1 til S7 má sjá hér á eftir í köflum 6.1 - 6.7.

Vegna þess hvað sjávarstaða spilar stóran þátt í hættu á ágjöf er vert að meta hver ágjöf yfir sjóvörn yrði þegar sjávarstaða hefur hækkað vegna hnattrænnar hlýnunar. Því voru ágjafarreikningar endurteknir með tilliti til hækkunar á sjávarstöðu og niðurstöðurnar settar fram í töflum í köflum 6.1 til 6.7. Í þessu tilfalli verður ágjöf metin miðað við breytingu á sjávarstöðu eftir 30 ár og í lok aldarinnar. Breytingar á sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar hjá höfuðborgarsvæðinu er metin sem 24 cm hækkun eftir 30 ár og 54 cm hækkun fyrir árið 2100.

Fyrir hvert áhrifasvæði er ágjöfin fyrst sýnd á gröfum. Efra grafið sýnir ágjöf í l/s/m fyrir núverandi hæð sjóvarnar á viðkomandi svæðinu og með hækkun eða 2 m/4 m bermu. Neðra grafið sýnir ágjöf einnar stakrar öldu fyrir sömu hæðir og tegundir sjóvarnargarða og grafið fyrir ofan.

Þá er reiknuð ágjöf fyrir hvern punkt sýnd í fjórum töflum, þar sem tvær efstu töflurnar sýna niðurstöður ágjafar miðað við núverandi sjávarstöðu en neðri tvær með tilliti til hækkun á



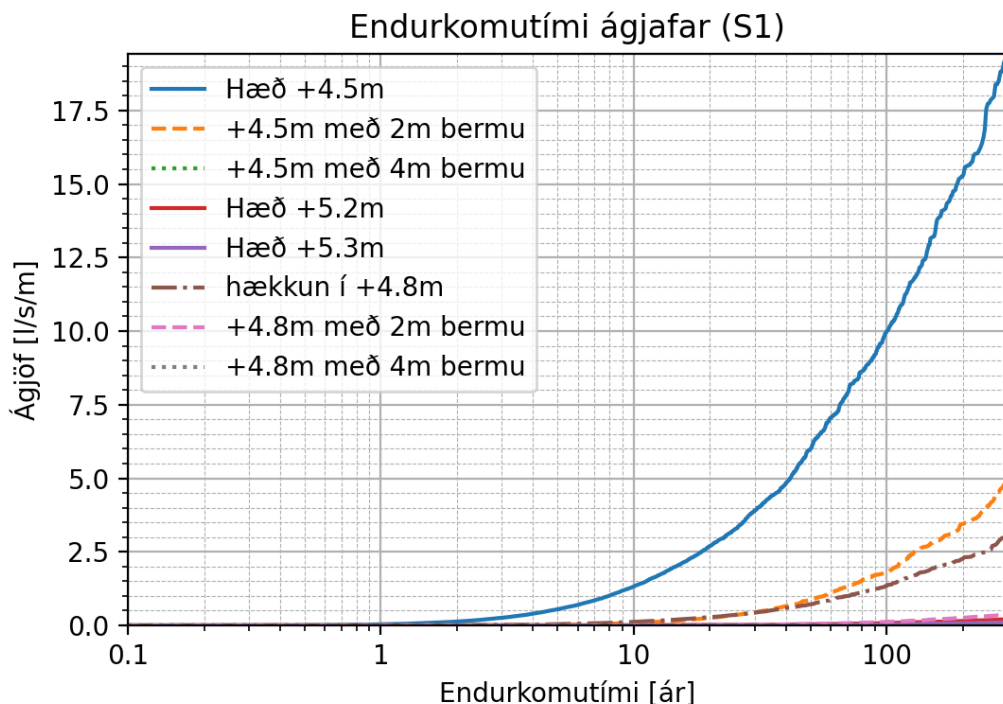
sjávarstöðu. Efri taflan fyrir núverandi sjávarstöðu sýnir niðurstöður ágjafar í l/s/m og neðri sýnir niðurstöður um mestu ágjöf stakrar öldu í l/m. Þá sýna töflurnar fyrir ágjöf með tilliti til hækkun sjávarstöðu ágjöfina í l/s/m. Töflurnar eru þrískiptar, fyrst mismunandi hæðir án bermu, þá mismunandi hæðir með 2 m breiðri bermu og síðan með 4 m breiðri bermu.

Tafla 4 Krónuhæð sjóvarnar við Sæbraut í hæðarkerfi Reykjavíkur ásamt fláa hennar, breidd krónu og hæð landsvæðis bakvið sjövnörnina, göngustígs.

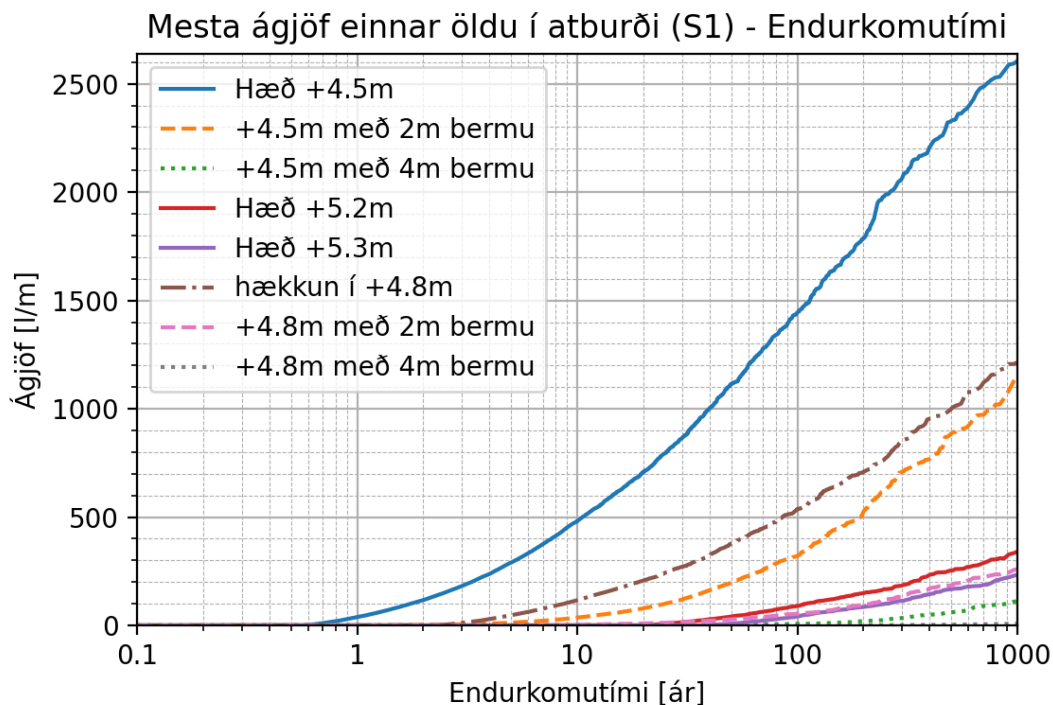
Reikni- punktur	Stöð	Krónuhæð	Hæð göngustígs	Krónuhæð yfir landi [m]	Flái	Breidd krónu [m]
S1	100	+4.5	+4.2	0.3	1:1,5	2
	200	+5.2	+4.8	0.4	1:1	2.5
	300	+5.3	+4.8	0.5	1:1,5	2
S2	400	+5.4	+4.8	0.6	1:1,5	1.5
	500	+5.1	+5.1	0.0	1:1,5	2.5
	600	+5.4	+5.1	0.3	1:1,5	3
S3	700	+4.8	+4.2	0.6	1:1,5	3
	800	+4.5	+3.8	0.7	1:1,5	3
	900	+4.5	+4.0	0.5	1:1,5	3.5
S4	1000	+5.7	+5.2	0.5	1:1,5	3.5
	1100	+5.8	+5.3	0.5	1:1	2.5
	1200	+6.3	+5.7	0.6	1:1,5	2.5
S5	1300	+5.8	+5.4	0.4	1:1,5	2.5
	1400	+5.7	+5.7	0.0	1:1,5	2
	1500	+5.5	+5.1	0.4	1:1,5	3
S6	1600	+5.6	+5.2	0.4	1:1,5	4
	1700	+5.3	+5.0	0.3	1:1,5	3
	1800	+5.2	+4.7	0.5	1:1,5	2
S7	1900	+4.8	+4.5	0.3	1:1,5	3
	2000	+5.8	+5.4	0.4	1:1,5	3.5
	2100	+7.2	+6.8	0.4	1:1,5	2.5
	2200	+9.3	+8.6	0.7	1:1,5	2.5



6.1 Ágjöf hjá reiknipunkti S1



Mynd 15 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 16 Endurkomutími mestu ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnir með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 5 S1: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar. Þær hæðir sem eru með bláan bakgrunn eru krónuhæðir stöðva á þessu áhrifasvæði.

Ágjöf [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+5.3m	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+4.5m	+4.8m	+5.2m
1	0.034	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1.3	0.12	0.004	0.002	0.087	0.003	0	0	0	0
100	10	1.4	0.083	0.04	1.8	0.12	0.003	0.035	0	0

Ágjöf einnar öldu [l/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+5.3m	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+4.5m	+4.8m	+5.2m
1	38	0	0	0	0.17	0	0	0	0	0
10	481	116	0	0	36	2.9	0	0.029	0	0
100	1446	538	90	42	321	54	2.7	7	0.001	0

Á áhrifasvæði S1 eru stöðvar 200 (+5.2 m) og 300 (+5.3 m) vel undir mörkunum um ágjöf á meðan stöð 100 (+4.5 m) er á mörkunum að ná yfir ásættanleg mörk ágjafar. Meðalágjöf í l/s/m hjá stöð 100 fer aðeins yfir mörkin í 10 og 100 ára atburðunum en ágjöf einnar öldu eru rétt undir mörkunum fyrir þá atburði. Þetta getur leitt til vandræða seinna meir líkt og sjá má á niðurstöðum um ágjöf eftir hækkun sjávarstöðu eftir 30 ár, tafla 6. Þá mun ágjöf yfir sjóvörnina við stöð 100 ná verulega yfir mörkin um ásættanlega ágjöf. Til að ágjöfin fari undir viðmiðunarmörk í stöð 100 þar annað hvort að hækka sjóvörnina um 0,3 m í +4,8 m eða að bæta 4 m breiðri bermu á meðan að 2 m breið bermu er ekki nægjanleg. Við lok aldarinnar þegar að sjávarborð hefur hækkað um 54 cm þarf annað hvort að hækka sjóvörnina í stöð 100 um 0,7 m í +5,2 m eða hækka hana um 0,3 m með 4 m breiðri bermu.

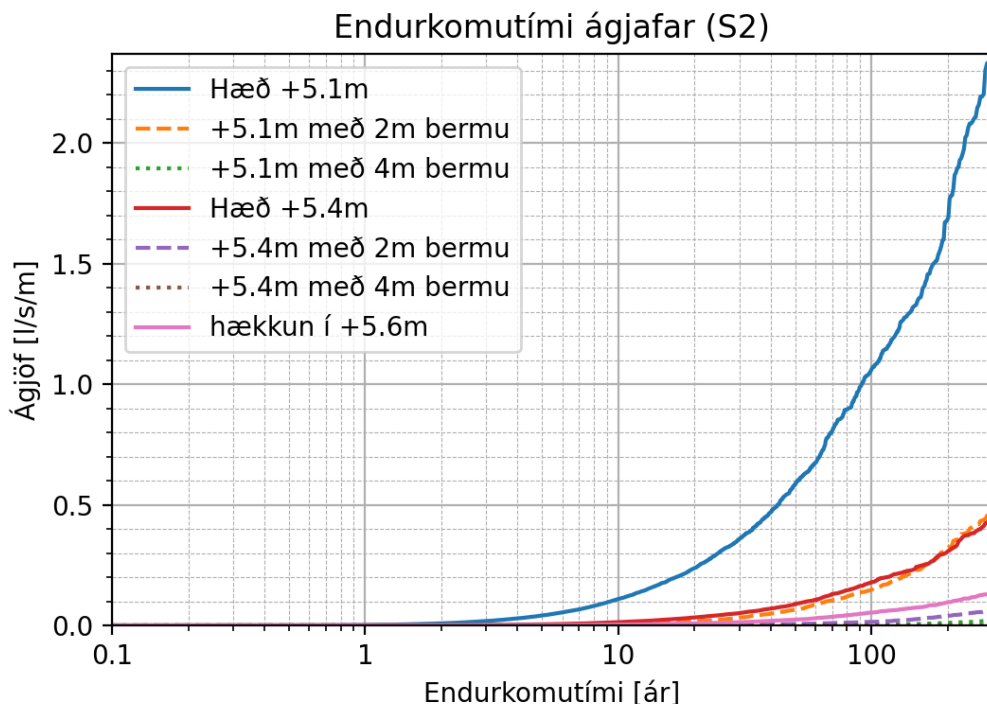
Tafla 6 S1: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+5.3m	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+4.5m	+4.8m	+5.2m
1	0.37	0.018	0	0	0.007	0	0	0	0	0
10	8.1	0.83	0.031	0.013	1.2	0.044	0	0.005	0	0
100	47	6.8	0.46	0.23	16	1.1	0.027	0.93	0.016	0

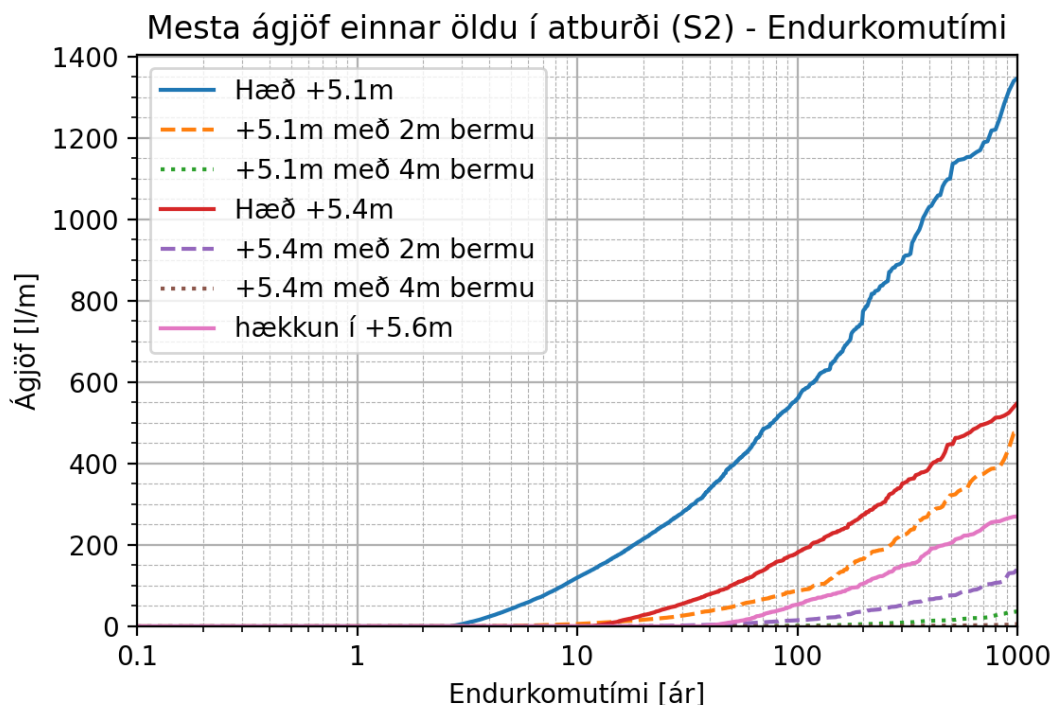
Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+5.3m	+4.5m	+4.8m	+5.2m	+4.5m	+4.8m	+5.2m
1	6	0.37	0.007	0.002	0.49	0.007	0	0	0	0
10	68	8.1	0.38	0.17	25	1.2	0.014	1.2	0.005	0
100	242	47	3.4	1.8	164	16	0.43	57	0.93	0.004



6.2 Ágjöf hjá reiknipunkti S2



Mynd 17 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 18 Endurkomutími mestu ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnir með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 7 S2: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar. Þær hæðir sem eru með bláan bakgrunn eru krónuhæðir stöðva á þessu áhrifasvæði.

Ágjöf [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.1m	+5.4m	+5.6m	+5.1m	+5.4m	+5.1m	+5.4m
1	0.002	0	0	0	0	0	0
10	0.11	0.013	0.003	0.006	0	0	0
100	1.1	0.18	0.053	0.15	0.015	0.002	0

Ágjöf einnar öldu [l/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.1m	+5.4m	+5.6m	+5.1m	+5.4m	+5.1m	+5.4m
1	0	0	0	0	0	0	0
10	120	0	0	6	0	0.008	0
100	560	181	54	88	15	1.5	0.096

Sá hluti sjóvarnarinnar sem liggur á áhrifasvæði punktsins S2 stenst þær kröfur sem lagðar voru fram í kafla 5.1 um takmörk ágjafar yfir sjóvörnina.

Miðað við niðurstöður um ágjöf með tilliti til hækkun sjávarborðs, tafla 8, má búast við því að ágjöf á þessu svæði ná ekki yfir þröskulda um hámarks ágjöf fyrr en það fer að nálgast lok aldarinnar.

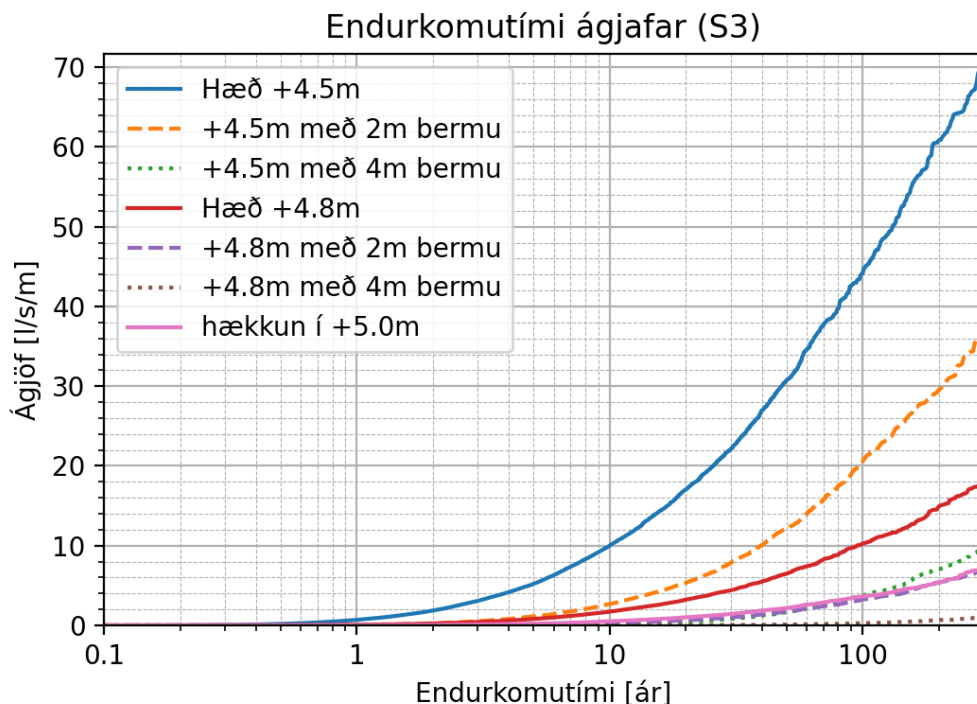
Tafla 8 S2: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/ eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.1m	+5.4m	+5.6m	+5.1m	+5.4m	+5.1m	+5.4m
1	0.015	0.001	0	0	0	0	0
10	0.55	0.072	0.018	0.051	0.003	0	0
100	4.2	0.75	0.23	0.92	0.094	0.031	0.001

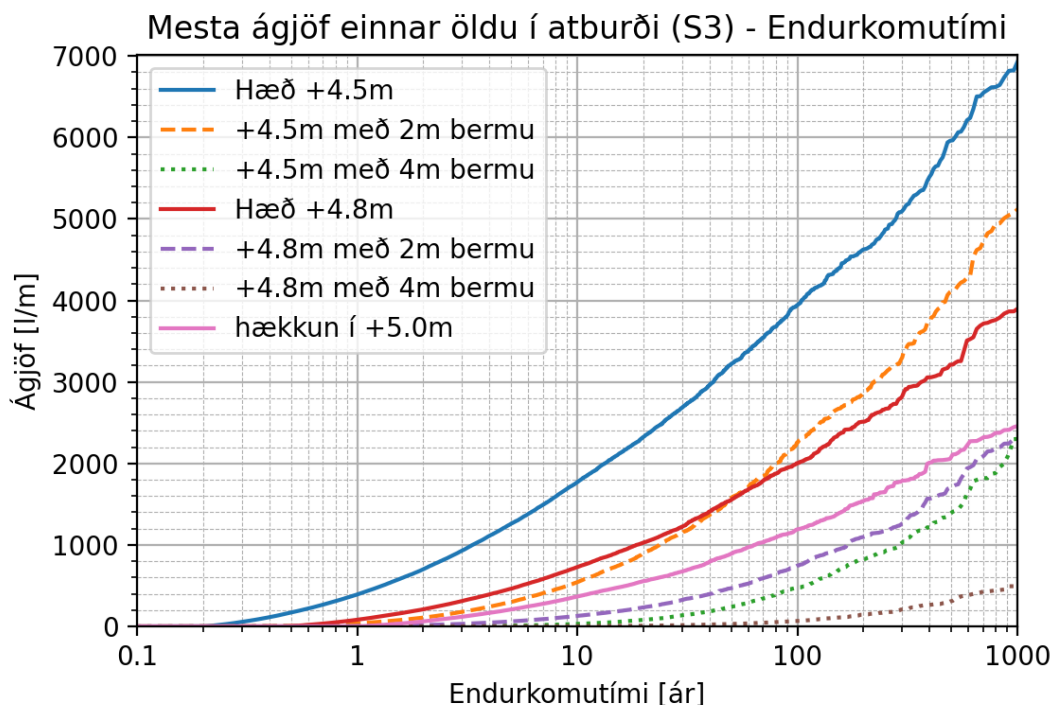
Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.1m	+5.4m	+5.6m	+5.1m	+5.4m	+5.1m	+5.4m
1	0.19	0.015	0.003	0.008	0	0	0
10	3.9	0.55	0.14	0.68	0.051	0.011	0
100	21	4.2	1.4	7.5	0.92	0.7	0.031



6.3 Ágjöf hjá reiknipunkti S3



Mynd 19 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 20 Endurkomutími mestu ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnir með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 9 S3: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar. Þær hæðir sem eru með bláan bakgrunn eru krónuhæðir stöðva á þessu áhrifasvæði.

Ágjöf [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+4.5m	+4.8m	+5.0m	+4.5m	+4.8m	+4.5m	+4.8m
1	0.7	0.072	0.015	0.063	0.003	0	0
10	10	1.7	0.52	2.7	0.28	0.14	0.005
100	45	10	3.7	21	3.3	3.8	0.28

Ágjöf einnar öldu [l/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+4.5m	+4.8m	+5.0m	+4.5m	+4.8m	+4.5m	+4.8m
1	391	82	0.67	38	3.3	0.089	0.001
10	1770	728	366	543	128	31	2.5
100	3946	2004	1192	2260	746	473	67

Við mat á ágjöf við stöðvar 700, 800 og 900 á áhrifasvæði S3 leiða niðurstöður í ljós að ágjöf nær vel yfir þröskulda um hámarkságjöf, þá sérstaklega á stöðvum 800 og 900 þar sem krónuhæð er +4.5m. Hér er áhugavert að sjá hvað 2-4m breið berma takmarkar ágjöfina mikið. Fyrir stöð 800 og 900 myndi 2m breið berma minnka ágjöfina úr því að vera verulega yfir hámarkságjöf niður í að fara rétt rúmlega yfir þröskuldana.

Með hækkun sjávar má búast við því að ástandið á þessu svæði mun fara versnandi, þar sem atburðir með eins árs til 10 ára endurkomutíma geta orðið hættulegir gangandi vegfarendum á svæðinu.

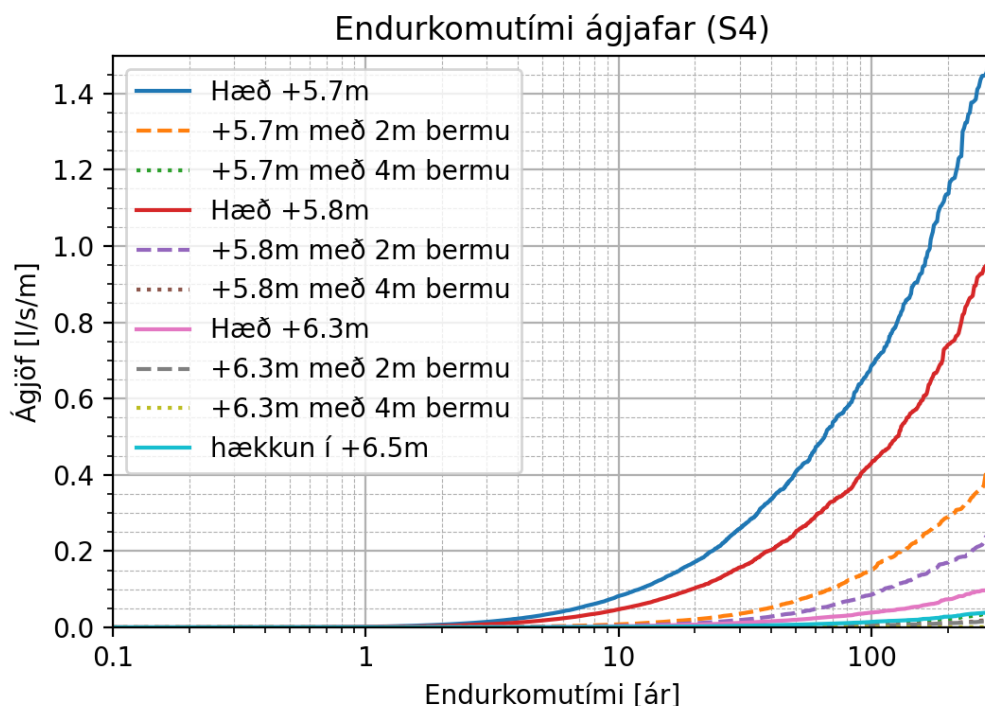
Tafla 10 S3: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+4.5m	+4.8m	+5.0m	+4.5m	+4.8m	+4.5m	+4.8m
1	3.9	0.45	0.099	0.62	0.036	0.005	0
10	38	7.2	2.2	15	1.7	1.7	0.073
100	136	34	12	83	14	28	2.3

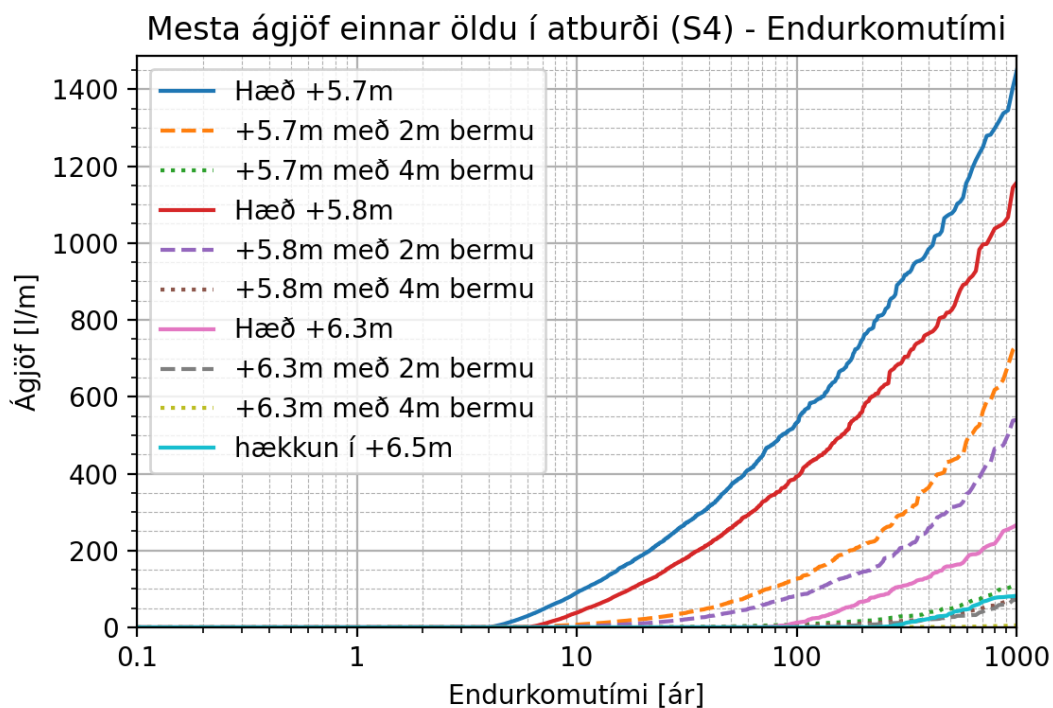
Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]									
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.5m	+4.8m	+5.0m	+4.5m	+4.8m	+5.0m	+4.5m	+4.8m	+5.0m
1	29	3.9	0.93	9.5	0.62	0.093	0.42	0.005	0
10	173	38	12	109	15	3.6	36	1.7	0.21
100	453	136	53	385	83	26	262	28	5.2



6.4 Ágjöf hjá reiknipunkti S4



Mynd 21 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 22 Endurkomutími mestu ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnir með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 11 S4: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar. Þær hæðir sem eru með bláan bakgrunn eru krónuhæðir stöðva á þessu áhrifasvæði.

Ágjöf [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+6.5m	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+5.7m	+5.8m	+6.3m
1	0.002	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.082	0.048	0.003	0.001	0.008	0.004	0	0	0	0
100	0.69	0.44	0.039	0.015	0.15	0.086	0.005	0.009	0.005	0

Ágjöf einnar öldu [l/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+6.5m	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+5.7m	+5.8m	+6.3m
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	90	38	0	0	7.1	2.3	0	0.078	0.016	0
100	534	393	12	0	127	83	0.64	7.7	4.3	0.006

Sá hluti sjóvarnarinnar sem liggur á áhrifasvæði punktsins S4 stenst þær kröfur sem lagðar voru fram í kafla 5.1 um takmörk ágjafar yfir sjóvörnina.

Miðað við niðurstöður um ágjöf með tilliti til hækkun sjávarborðs, tafla 12, má búast við því að ágjöf á þessu svæði ná ekki yfir þröskulda um hámarks ágjöf fyrr en það fer að nálgast lok aldarinnar.

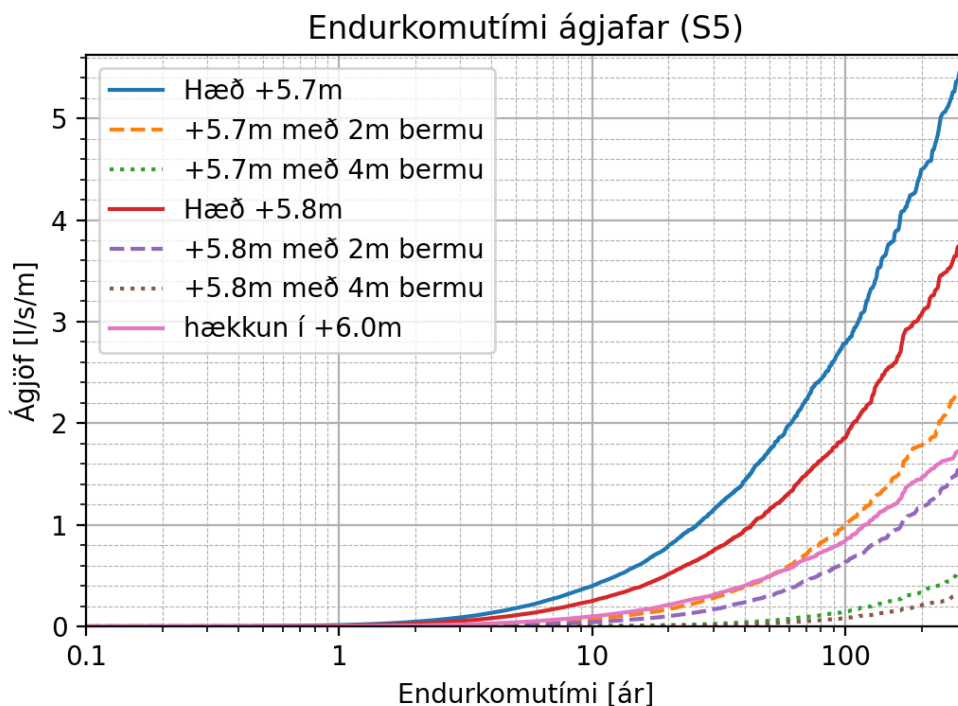
Tafla 12 S4: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+6.5m	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+5.7m	+5.8m	+6.3m
1	0.008	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.29	0.17	0.011	0.004	0.039	0.02	0.001	0.001	0	0
100	2	1.3	0.13	0.047	0.58	0.34	0.02	0.049	0.025	0.001

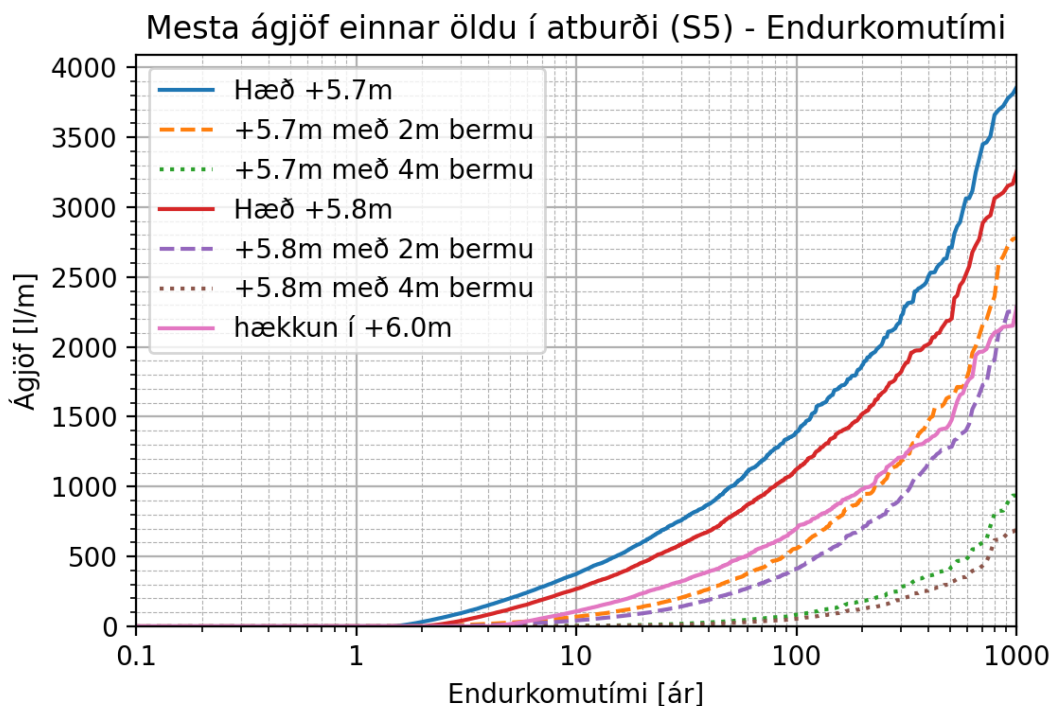
Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+6.5m	+5.7m	+5.8m	+6.3m	+5.7m	+5.8m	+6.3m
1	0.063	0.032	0.001	0	0.005	0.002	0	0	0	0
10	1.4	0.83	0.059	0.02	0.27	0.14	0.005	0.012	0.005	0
100	7.7	5	0.52	0.21	2.8	1.6	0.11	0.4	0.2	0.006



6.5 Ágjöf hjá reiknipunkti S5



Mynd 23 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 24 Endurkomutími mestu ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnir með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 13 S5: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar. Þær hæðir sem eru með bláan bakgrunn eru krónuhæðir stöðva á þessu áhrifasvæði.

Ágjöf [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.7m	+5.8m	+6.0m	+5.7m	+5.8m	+5.7m	+5.8m
1	0.013	0.007	0.002	0.001	0	0	0
10	0.4	0.25	0.098	0.073	0.042	0.004	0.002
100	2.8	1.9	0.85	1	0.64	0.15	0.083

Ágjöf einnar öldu [l/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.7m	+5.8m	+6.0m	+5.7m	+5.8m	+5.7m	+5.8m
1	0	0	0	0	0	0	0
10	375	268	108	69	42	3.4	1.7
100	1393	1124	704	559	414	84	55

Sá hluti sjóvarnarinnar sem liggur á áhrifasvæði punktsins S5 stenst þær kröfur sem lagðar voru fram í kafla 5.1 um takmörk ágjafar yfir sjóvörnina. Þó má nefna að ágjöf atburða með 10 ára endurkomutíma yfir stöð 1400, með krónuhæð í +5.7m, er ekki langt fyrir neðan þröskuldinn um hámarkságjöf, hvort sem það er tekið mið af ágjöf í l/s/m eða mestu ágjöf stakrar öldu í l/m.

Niðurstöður við mati á ágjöf með tilliti til 24 cm hækkunar sjávarstöðu leiðir í ljós að það er einmitt stöð 1400 sem er á mörkunum að standast þær kröfur sem gerðar eru til sjóvarnarinnar. Þá má búast við því að ágjöf nær verulega yfir þröskulda um hámarkságjöf í lok aldarinnar við stöð 1400, sem og að ágjöf á þeim tíma við stöð 1500 muni einni ná yfir þröskulda hámarkságjafar ef varnargarðurinn helst óbreyttur.

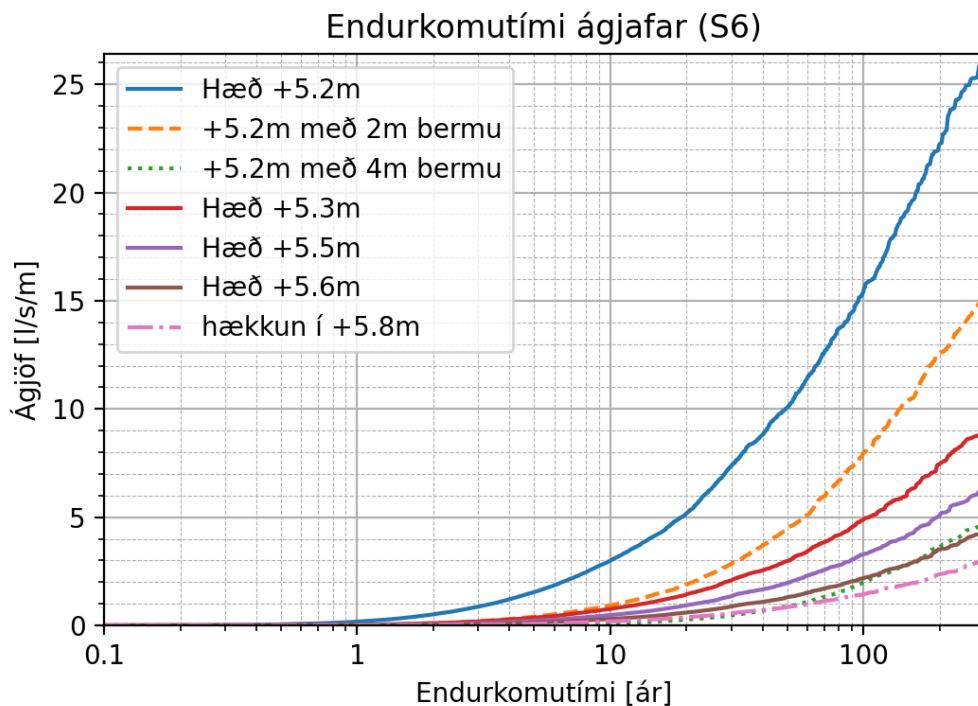
Tafla 14 S5: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.7m	+5.8m	+6.0m	+5.7m	+5.8m	+5.7m	+5.8m
1	0.052	0.029	0.009	0.005	0.003	0	0
10	1.2	0.76	0.3	0.27	0.16	0.02	0.01
100	7.1	4.8	2.2	2.9	1.9	0.57	0.32

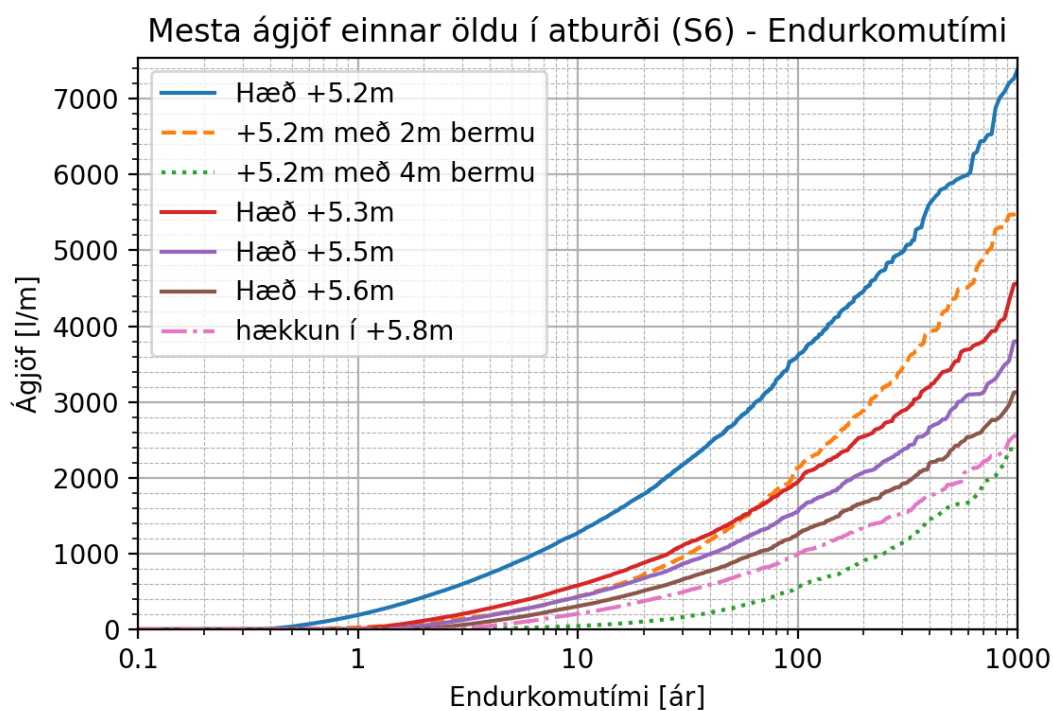
Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]							
Endurk. tími	Án Bermu			Með 2m bermu		Með 4m bermu	
	+5.7m	+5.8m	+6.0m	+5.7m	+5.8m	+5.7m	+5.8m
1	0.29	0.16	0.052	0.042	0.021	0.001	0
10	4.5	2.9	1.2	1.3	0.79	0.15	0.078
100	22	15	7.1	11	7.2	2.8	1.6



6.6 Ágjöf hjá reiknipunkti S6



Mynd 25 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 26 Endurkomutími mesta ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnir með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 15 S6: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar. Þær hæðir sem eru með bláan bakgrunn eru krónuhæðir stöðva á þessu áhrifasvæði.

Ágjöf [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.2m	+5.3m	+5.6m	+5.8m	+5.2m	+5.3m	+5.6m	+5.2m	+5.3m	+5.6m
1	0.17	0.03	0.009	0.005	0.026	0.003	0.001	0	0	0
10	3	0.76	0.3	0.19	0.92	0.18	0.059	0.093	0.011	0.003
100	16	4.9	2.2	1.4	8	2.2	0.86	2	0.37	0.12

Ágjöf einnar öldu [l/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.2m	+5.3m	+5.6m	+5.8m	+5.2m	+5.3m	+5.6m	+5.2m	+5.3m	+5.6m
1	188	6.6	0	0	27	0.46	0	0.38	0.001	0
10	1271	579	306	206	432	146	61	45	9.2	2.7
100	3616	1945	1260	1003	2135	983	545	564	179	80

Af þeim stöðvum sem eru á áhrifasvæði punktsins S6 er það stöð 1800 með krónuhæð í +5.2 m sem kemur einna verst út í mati á ágjöf þar sem ágjöf er um eða yfir þá þröskulda um hámarksággjöf sem eru í gildi. Þá er ágjöf við stöð 1700 með krónuhæð í +5.3 m er ýmist um eða undir þröskuldum um hámarksággjöf. Það er áhugavert að sjá hvað smávægileg hækkun á sjóvörninni getur haft mikil áhrif á ágjöf, auk þess að berma getur minnkar ággjöfina til muna.

Með hækkun sjávar má búast við því að ástandið á þessu svæði mun fara versnandi, þar sem atburðir við stöð 1700 (í hæð +5.3m) sem voru langt frá því að ná upp í þröskulda um hámarksággjöf eru komnir yfir þær takmarkanir eftir 30 ár og langt umfram það sem telst ásættanlegt í lok aldarinnar.

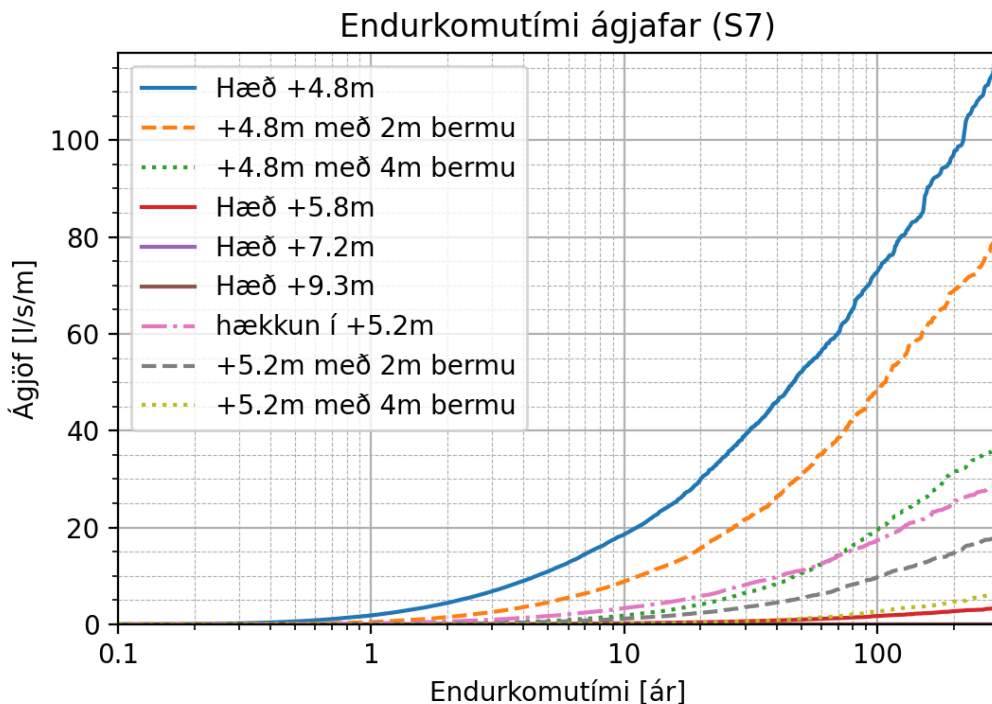
Tafla 16 S6: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.2m	+5.3m	+5.6m	+5.8m	+5.2m	+5.3m	+5.6m	+5.2m	+5.3m	+5.6m
1	0.68	0.12	0.038	0.021	0.13	0.017	0.004	0.004	0	0
10	8.7	2.3	0.92	0.57	3.3	0.67	0.23	0.48	0.061	0.015
100	37	12	5.8	3.9	22	6.1	2.6	6.9	1.4	0.47

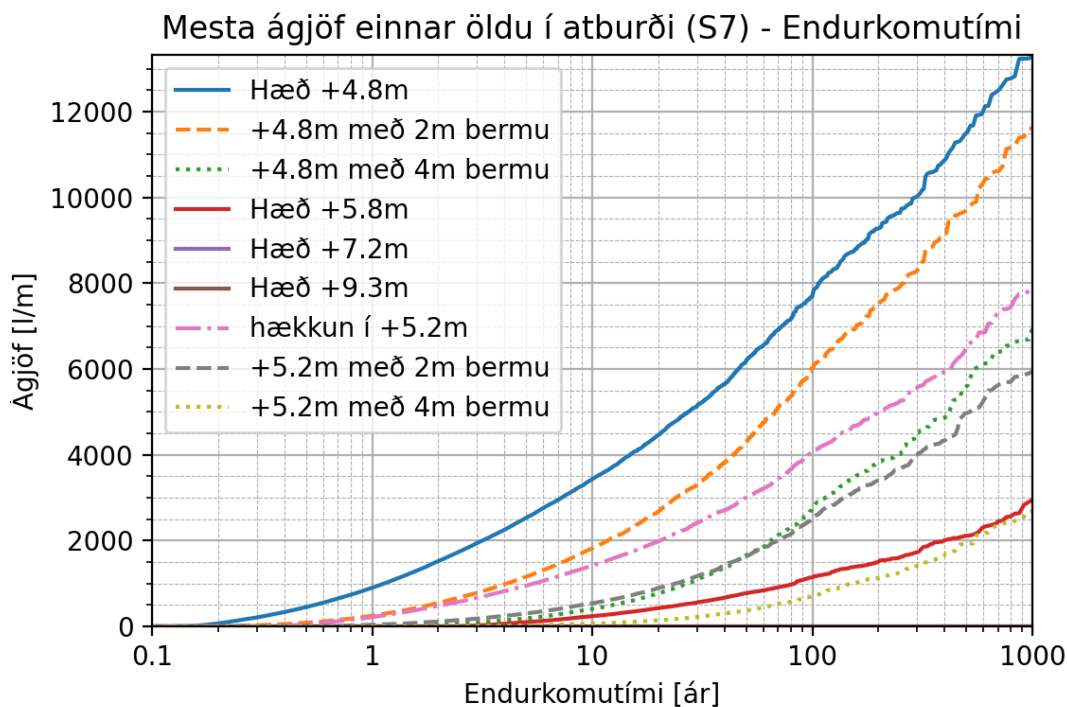
Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]										
Endurk. tími	Án Bermu				Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+5.2m	+5.5m	+5.6m	+5.8m	+5.2m	+5.5m	+5.6m	+5.2m	+5.5m	+5.6m
1	3.5	0.38	0.22	0.12	0.98	0.067	0.034	0.055	0.001	0.001
10	31	5.6	3.6	2.3	15	2	1.1	3.5	0.24	0.12
100	107	26	18	12	73	14	9.6	32	4.1	2.5



6.7 Ágjöf hjá reiknipunkti S7



Mynd 27 Endurkomutími ágjafar sjóvarnar með núverandi krónuhæð og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Mynd 28 Endurkomutími mestu ágjafar einnar öldu yfir sjóvarnar með núverandi og hærri krónuhæð, með og án 2/4m breiðrar bermu



Tafla 17 S7: Ágjöf í [l/s/m] og [l/m] yfir mismunandi samsetningar af varnargörðum með núverandi krónuhæð, hækkun og með eða án 2 m og 4 m breiðrar bermu. Gildi sem eru lituð rauð uppfylla ekki kröfur um takmörk ágjafar með viðeigandi endurkomutíma, gul gildi eru á mörkunum og græn uppfylla kröfurnar um takmörk ágjafar.

Ágjöf [l/s/m]											
Endurk. tími	Án Bermu					Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+7.2m	+9.3m	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+4.8m	+5.2m	+5.8m
1	1.9	0.2	0.006	0	0	0.49	0.035	0.001	0.024	0.001	0
10	19	3.4	0.21	0	0	8.9	1.2	0.048	1.8	0.14	0.002
100	73	17	1.7	0.004	0	48	9.9	0.74	20	2.7	0.1

Ágjöf einnar öldu [l/m]											
Endurk. tími	Án Bermu					Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+7.2m	+9.3m	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+4.8m	+5.2m	+5.8m
1	901	217	0	0	0	249	36	0	13	0.66	0
10	3434	1417	236	0	0	1825	539	50	406	65	2.3
100	7755	4065	1146	0	0	6030	2521	508	2752	713	76

Af þeim stöðvum sem eru á áhrifasvæði punktsins S7 er það stöð 1900 með krónuhæð í +4.8 m sem kemur einna verst út í mati á ágjöf þar sem ágjöf er alla jafna vel yfir þá þröskulda um hámarkságjöf sem eru í gildi. Til samanburðar eru niðurstöður útreikninga á ágjöf yfir þá stöð ef krónuhæð væri í +5.2m, þ.e.a.s. 40 cm hækkun. Þó slík hækkun minnki magn ágjafar verulega þá er hún enn þá hærri en takmörk um hámarkságjöf gefa til kynna. Það er ekki fyrr en búíð er að bæta 2 m bermu við hækkaða sjónvörnina sem magn ágjafar fer að nálgast ásættanlegt ástand.

Með hækkun sjávar má búast við því að ástandið við stöð 1900 fari versnandi en hinar stöðvarnar virðast ná að halda aftur af ágangi sjávar. Í það minnsta allt til aldamóta þegar ágjöf yfir stöð 2000 með krónuhæð í +5.8 m fer að ná yfir þröskulda um hámarkságjöf.

Tafla 18 S7: Niðurstöður ágjafareikninga eftir 24 cm og 54 cm hækkun sjávar, með og án hækkun og/eða bermu.

Ágjöf eftir 24cm hækkun sjávar [l/s/m]											
Endurk. tími	Án Bermu					Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+7.2m	+9.3m	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+4.8m	+5.2m	+5.8m
1	6.7	0.78	0.025	0	0	2.3	0.17	0.003	0.19	0.006	0
10	50	9.5	0.65	0.001	0	28	4	0.18	8.2	0.66	0.012
100	161	42	4.4	0.013	0	120	26	2.2	62	9	0.4

Ágjöf eftir 54cm hækkun sjávar [l/s/m]											
Endurk. tími	Án Bermu					Með 2m bermu			Með 4m bermu		
	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+7.2m	+9.3m	+4.8m	+5.2m	+5.8m	+4.8m	+5.2m	+5.8m
1	30	3.9	0.14	0	0	14	1.2	0.023	2.3	0.08	0
10	159	33	2.6	0.003	0	110	18	0.86	49	4.4	0.092
100	412	116	14	0.046	0	354	83	7.6	240	38	2



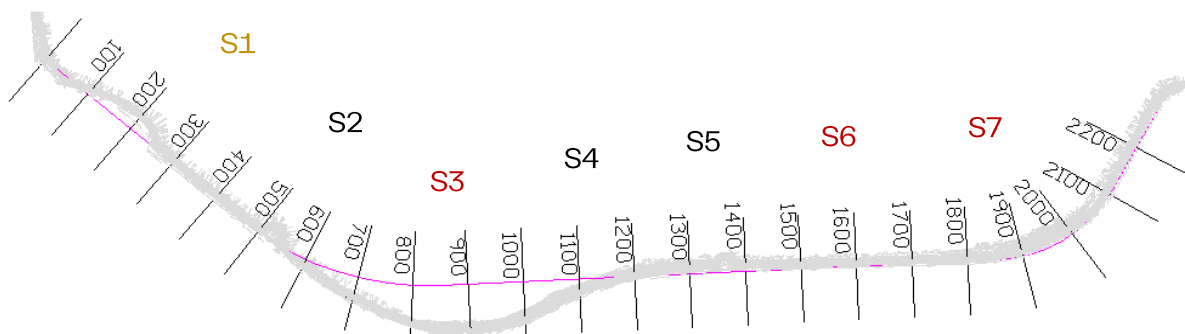
6.8 Niðurstöður ágjafarreikninga við Sæbraut

Tafla 19 sýnir samantekt á niðurstöðum kaflanna hér að ofan fyrir nauðsynlega hæð sjóvarnar á áhrifasvæðum reiknipunkta S1 til S7 byggt á niðurstöðum ágjafarreikninga. Ágjöfin fer yfir viðmiðunarmörk við punkt S3, stöðvar 700 til 900 og við punkta S6 og S7, stöðvar 1800 og 1900. Ágjöfin er mjög nálægt viðmiðunarmörkum eða rétt skriður yfir þau við punkt S1, stöð 100.

Lagðar eru fram þrjár tillögur fyrir hverja stöð þar sem þörf er á hækkun, þ.e. nauðsynleg hæð sjóvarnar án bermu, með 2 m breiðri bermu og með 4 m breiðri bermu. Mat á nauðsynlegri hæð byggir á þeim viðmiðunarmörk fyrir hámarksággjöf sem valið var að miða við, sbr. kafla 5.1. Á mynd 29 má sjá við hvaða reiknipunkt ággjöf fór yfir viðmiðunarmörkin.

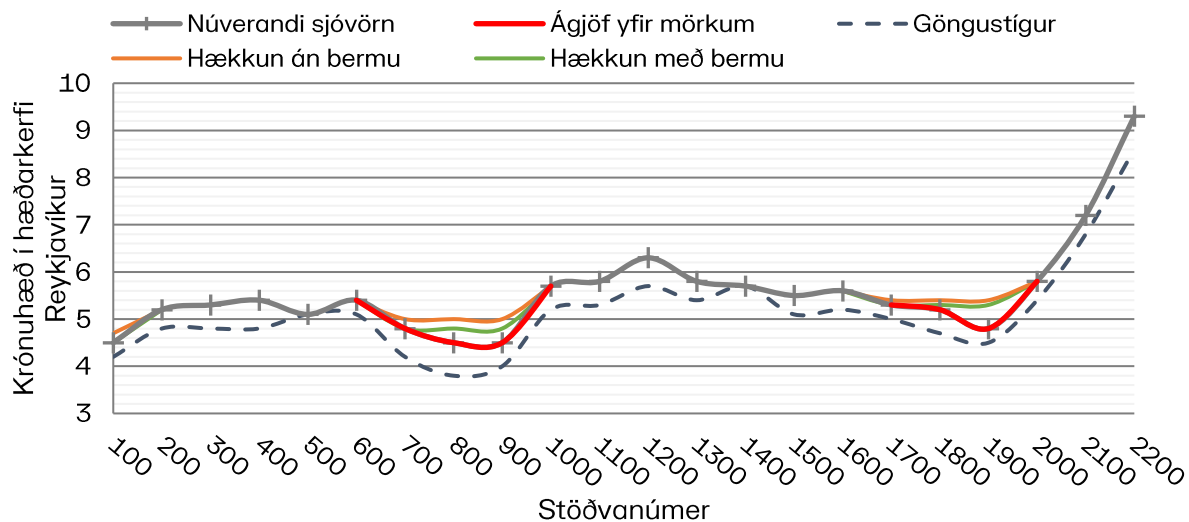
Tafla 19 Nauðsynleg hæð sjóvarnar í stöðvum þar sem ággjöf fer yfir viðmiðunarmörk á áhrifasvæðum reiknipunkta S1 til S7 byggt á jöfnu fyrir ággjöf fyrir sjóvörn án bermu og með 2 og 4 m breiðri bermu.

Áhrifasvæði	Nauðsynleg hæð sjóvarnar (m)					
	S1	S3		S6	S7	
Stöð	100	700	800	900	1800	1900
Án bermu	+4,7	+5,0	+5,0	+5,0	+5,4	+5,4
Með 2 m bermu	+4,5	+4,8	+4,8	+4,8	+5,3	+5,3
Með 4 m bermu	+4,5	+4,8	+4,5	+4,5	+5,2	+5,2



Mynd 29 Yfirlitsmynd yfir sjóvörnina við Sæbraut, staðsetningu stöðva og reiknipunkta á grunnslóð. Reiknipunktar þar sem ággjöf fer yfir viðmiðunarmörk eru sýndir rauðir, S3, S6 og S7 og gulir þar sem ággjöfin er við eða rétt skriður yfir viðmiðunarmörk, S1.

Á mynd 30 má sjá hæðarlínu núverandi sjóvarnar, þar sem búið er að merkja inná með rauðum hvar ággjöf nær yfir mörk um ásættanlega hámarksággjöf og þörf er á aðgerðum og gulu þar sem ággjöfin rétt skriður yfir mörk. Þá er einnig búið að merkja inná línuritið þá nauðsynlegu hækkun sem þarf til að ná hámarksággjöf niður fyrir valin viðmiðunarmörk sem eru notaðir til að meta sjóvörnina. Hækkunin er tvíþætt, annars vegar nauðsynleg hækkun án bermu, þar sem þversnið varnargarðsins helst svo til óbreytt fyrir utan þær breytingar sem þurfa til að hækka krónuhæð upp að ákveðinni hæð. Hins vegar er um að ræða nauðsynlega hækkun með bermu, þá er gert ráð fyrir að 2 m bermu sé bætt við utan á sjóvörnina og er nauðsynleg hæð því lægri en ef bermu er sleppt. Í flestum tilfellum þarf ekki að hækka sjóvörnina ef notuð er 4 m berma og því er það tilfelli ekki tekið fram á myndinni.



Mynd 30 Krónuhæð núverandi sjóvarnar þar sem merkt er inn hvar ágjöf fer yfir mörk. Hæð göngustígs er merkt með brotalínu og tillögur að minnstu hækkun sjóvarnar sem uppfyllir viðmiðunarmörk er merkt með appelsínugulum og grænum.



7 Þekkt aftakaveður

Við upphaf athugunar var óskað eftir upplýsingum um eftirminnilega ágjafaatburði við Sæbrautina undanfarna áratugi. Tveir atburðir stóðu upp úr hvað varðar ágjöf þar sem til voru myndskleið af ágangi sjávar á land við Sæbrautina, þeir voru 2. nóvember 2012, og 10.-11. desember 2019.

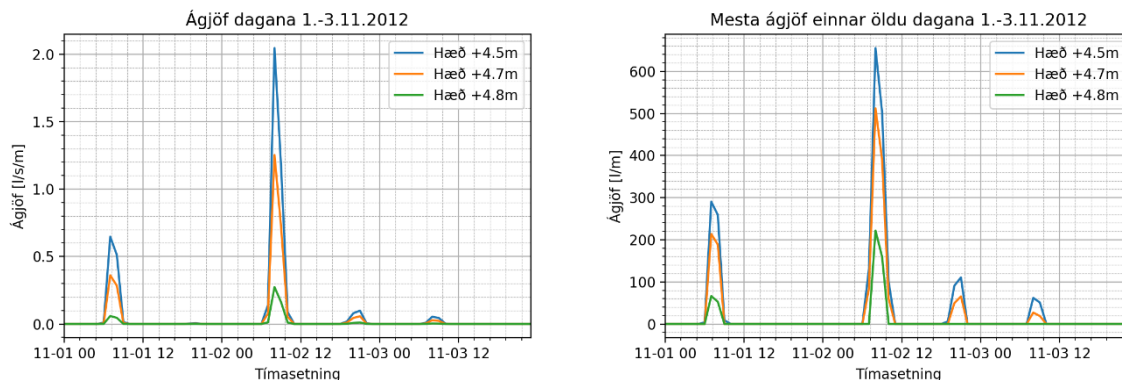
Eftir athugun á þeim myndböndum sem til eru bendir allt til þess að vissara sé að styrkja sjóvarnir við landsvæði Sæbrautar meira en ágjafareikningar og gefin viðmiðunarmörk segja til um.



Mynd 31 Sjór gengur yfir sjónvörn við Sæbraut í norðanáhlaupi þann 2.11.2012. Myndir teknar úr myndbandi (<https://www.youtube.com/watch?v=RkLbk-8D5ug>)

7.1.1 Aftakaveður 2. nóvember 2012

Þann 2. Nóvember 2012 gekk yfir lægð með sterkri norðanátt þar sem vindhraði náði allt að 23 m/s með tæplega 40 m/s í kviðum. Það gerði ólgusjó og hann gekk á land við Sæbrautina með þeim tilheyrandi ógn fyrir umferð og gangandi vegfarendur. Á mynd 31, sem eru skjáskot úr myndbandi tekið af Kristni Jóni Eysteinessyni, má sjá hvernig vindurinn feykir öldu yfir sjónvörnina og á ökutæki á Sæbrautinni, vestan við gatnamótin við Snorrabraut. Myndbandið var tekið upp fyrri part dags þegar það tók að birta til. Þá er ágangur sjávar að lægja þar sem sjórinn er tekinn að fjara út, en flóð átti sér stað kl 08:02 að morgni og náði mest +2,3 m í hæðarkerfi Reykjavíkur (+4,1 m í hæðarkerfi Faxaflóahafna). Annað myndband tekið af Erni Marinó Arnarsyni (<https://www.youtube.com/watch?v=aG3J6PH5S2s&t=9s>) var tekið nálægt hádegi af 4. Hæð



Mynd 32 Mat á meðalággjöf (hægri) og mestu ággjöf stakrar öldu (vinstri) yfir varnargarðana við Sæbraut dagana 1.-3. nóvember 2012. Atburðurinn nær hámarki í morgunflóðinu kl 07:00, síðan fellur ággjöfin niður þegar það tekur að fjara út.



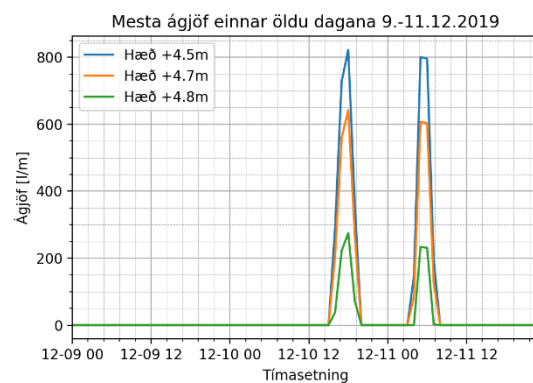
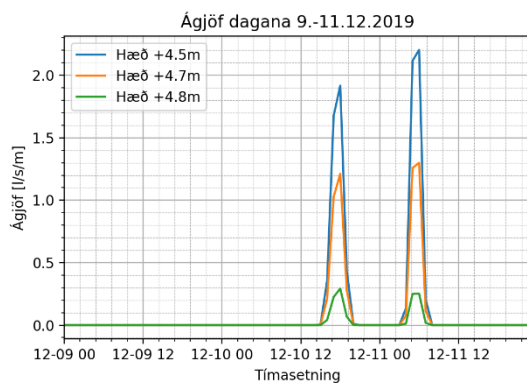
við Skúlagötu 30. Hann útilokar ekki að aðstæður hefðu verið verri þegar hann kom til vinnu um morguninn, allt fullt af grjóti og sjór gekk yfir bílinn.

Við mat á ágjöf yfir sjónvörn á þessum degi reynist atburðurinn ná hámarki um kl 08:00 að morgni 2. nóv. líkt og sjá má á mynd 32. Þá er mesta meðalálgjöfin rétt rúmir 2 l/s/m og mesta ágjöf stakrar öldu er allt að 655 l/m. Þessar niðurstöður eru fengnar með þeim aðferðum sem fjallað er um í kafla 5.2 auk þess að taka tillit til áhrifa vinds á ölduna. Samkvæmt ágjafaleiðavísinum EurOtop 2018 þá gildir í hvassviðri sem þessu að raunveruleg ágjöf geti verið allt að fjórfalt meiri en sú sem reiknilegar aðferðir segja til um.

7.1.2 Aftakaveður 10.-11. desember 2019

Dagana 10.-11. desember 2019 gekk djúp lægð yfir allt landið þar sem mældur loftþrýstingur við gömlu höfnina í Reykjavík fór niður í allt að 965 hpa. Sterk norð-norðvestan átt knúði krappar vindöldur, en mældur vindur náði yfir 20 m/s með allt að 33 m/s í kvíðum. Á þessum dögum var ekki stórstreymt, en sjávarhæð náði mest í +2,37 m í hæðakerfi Reykjavíkur í kvöldflóðinu 10. desember kl. 17:30 og +2,15 m í morgunflóðinu 11. desember kl. 05:45. Hvassviðrið varði í rúman sólahring þar sem vindur mældist yfir 15m/s í rúma 20 klukkutíma. Landsvæði við sjóvarnir víðsvegar um Reykjavík báru ummerki um ágang sjávar eftir að lægðin gekk yfir. Hreinsa þurfti mikið magn af grjóti, þara og tilheyrandi bæði af göngustígum sem og umferðargötum sem liggja meðfram sjónvörnum borgarinnar, þar á meðal voru fjölförnu göturnar Sæbraut og Eiðsgrandi.

Við mat á ágjöf yfir þessa daga greinast tveir toppar þar sem ágjöf nær yfir mörk fyrir atburði með 10 ára endurkomutíma. Ágjöf yfir sjónvörnina við Sæbraut náði hámarki í kvöldflóðinu 10. des og svo náðist annar toppur í morgunflóðinu þann 11. des. Fyrri daginn var mesta ágjöf tæpir 2 l/s/m og rúmir 800 l/m en seinni daginn náði ágjöfin mest um 2,2 l/s/m og tæp 800 l/m. Við mat á ágjöf er tekið tillit til þeirra áhrifa sem hvassviðri spilar í magn ágjafar en við slíkar aðstæður getur ágjöf verið allt að fjórfalt meiri en hún væri ef ekki væri svo vindasamt.



Mynd 33 Mat á meðalálgjöf (hægri) og mestu ágjöf stakrar öldu (vinstri) yfir varnargarðana við Sæbraut dagana 9.-11. desember 2019. Atburðurinn nær hámarki annarsvegar í kvöldflóðinu þann 10. des og morgunflóðinu þann 11. des.



8 Samantekt

Í skýrslu þessari er fjallað um ágjöf yfir sjóvarnir á landsvæði Reykjavíkur við Sæbraut. Tilgangurinn er að meta nauðsynlega hækkun sjóvarna eða þykkingu grjótkápu með bermu þannig að kröfur um ágjöf yfir þær séu uppfylltar.

Sem möguleg hækkun og breyting á sjóvörnum við Sæbraut er bæði skoðaður hefðbundinn tveggja grjótlaga sjóvarnargarður og garður með þykkari grjótvörn, þar sem grjótbermu hefur verið bætt framan á sjóvörnina. Hefðbundinn sjóvarnargarður er byggður úr tveimur lögum af brimvarnargrjóti auk síulaga þar undir.

Ágjafarreikningar hafa verið gerðir fyrir um 20 stöðvar með 100 m millibili sem skiptast niður á 7 áhrifasvæði á hafsvæðinu við Sæbraut sem miðast við reiknipunkta S1 til S7 fyrir öldu á grunnslóð. Ágjafarreikningar leiða í ljós að á tveim köflum sjóvarnarinnar reynist ágjöf hærrí en valin viðmiðunarmörk um ágjöf, þ.e við stöðvar 700 til 900 og stöðvar 1800 til 1900. Auk þessa rétt skriður ágjöfin yfir viðmiðunarmörk stöð 100.

Þeir kaflar sjóvarnarinnar þar sem ágjöf nær yfir mörk eru jafnframt þeir hluta sjóvarnarinnar sem liggja hvað lægst í landi, þ.e. um 400 m kafla þar sem Snorrabraut og Sæbraut mætast og svo um 200-300 m kafla þar sem Kringlumýrabraut og Sæbraut mætast. Niðurstöður ágjafarreikninga gefa til kynna að hækka þurfi sjóvörnina við Sæbraut á þessum tveim köflum um minnst 0,2 – 0,6 m svo fyrirfram gefnar kröfur um ágjöf verði uppfylltar ef sjóvörnin heldur sínu hefðbundna tveggja grjótlaga formi. Án þykkingar eða bermu þyrfti að hækka sjóvörnina í +5,0 m í stöðvum 700 til 900, í +5,4 m í stöðvum 1800 til 1900 og í +4,7 m í stöð 100.

Með því að þykkja grjótvörnina með 2 til 4 m breiðri grjótbermu má hins vegar uppfylla kröfurnar með minni eða engri hækkun samkvæmt reiknuðum niðurstöðum. Með 2 m breiðri bermu þyrfti hæð sjóvarnar að vera +4,8 m í stöðvum 700 til 900, +5,3 m í stöðvum 1800 til 1900. Með 4 m breiðri bermu þarf litla sem enga hækkun, eða aðeins í stöð 1900 þar sem hæðin þyrfti að vera +5,2 m.

Við skoðun á myndböndum af flóðaatburðum við Sæbraut er það mat skýrsluhöfunda að þessir reikningar séu vanmat á aðstæðum og að það þurfi að hækka sjóvörnina meira en útreikningar og valin viðmiðunarmörk fyrir ágjöf gefa til kynna. Því er lagt til að í stöðvum 700 til 900 verði sjóvörnin annað hvort hækkuð í +5,4 m án bermu eða í +5,0 m með 3 til 4 m breiðri bermu. Jafnframt að í stöðvum 1800 til 1900 verði sjóvörnin annað hvort hækkuð í +5,6 m án bermu eða +5,4 m með 2 til 3 m breiðri bermu. Í stöð 100 nægði að hækka sjóvörnina í +5,0 m án bermu eða í +4,7 m með 2 til 3 m breiðri bermu.

Við skoðun á framkvæmdakostnaði er rétt að benda á að hér eru niðurstöður túlkaðar miðað við 100 m milli sniða. Því þarf að bæta við um 50 m til sitt hvorrar handar til að fá lengd viðgerðar, þó háð aðstæðum. Þannig er líklegt að lengd viðgerðar við stöðvar 700 til 900 verði um 300 m löng.

Niðurstöður ágjafarreikninga á hærri sjávarstöðu, þar sem stuðst er við spár um hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar annars vegar eftir 30 ár og við lok aldarinnar hins vegar, sýna að töluverðar líkur séu á að hönnunarkröfur sjóvarnarinnar eftir ofangreindar breytingar verði enn uppfylltar eftir 30 ár og mögulega lengur. Þar sem eðlilegur líftími sjóvarnarmannvirkja er um 30 til 40 ár þá gefst færi á að endurskoða forsendur og hönnun að þeim tíma liðnum.



9 Heimildir

1. Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 1991. Úrvinnsla sjávarfallagagn: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurborg. Jarðvísindastofnun Háskólans
2. Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson, Trausti Jónsson, 2018. Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018. Veðurstofa Íslands.
3. Kamphuis (2000). „*Introduction to coastal engineering and management: 2nd edition*“. World Scientific.
4. B. Gouldby, D. Wyncoll, M. Panzeri, M. Franklin, T. Hunt, D. Hames, N. Tozer, P. Hawkes, U. Dornbusch, og T. Pullen, 2017. „Multivariate extreme value modelling of sea conditions around the coast of England“. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Maritime Engineering*, 170 tbl., bls. 3–20
5. Bryndís Tryggvadóttir, 2020. *Mat á aftaka sjávarflóðum: Innleiðing aðferða sem byggist á samlíkum útgilda*. Lokaverkefni í MSc námi við Umhverfisverkfræði hjá Háskóla Íslands. Reykjavík.
6. EurOtop, 2018. *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., www.overtopping-manual.com.
7. Neural Network, <http://overtopping.ing.unibo.it/overtopping>
8. Van der Meer, J.W og Sigurður Sigurðarson, 2016. *Design and construction of berm breakwaters*. World Scientific. Advanced Series on Ocean Engineering Vol40 ISBN 978-981-4749-60-2, <http://icebreak.is/>.