



Vík í Mýrdal- Sjávarflóð Mat á sjóvörnum og hættu á sjávarflóðum



Bryndís Tryggvadóttir
Sigurður Sigurðarson
Fannar Gíslason
Útgáfa A - Ágúst 2020



Útgáfa	Dagsetning	Endurskoðun	Útgefið af	Útgefið til
Útgáfa A	17.8.2020		BT, SS, FG	
Upplýsingar um skýrslu				
Verkkaupi:				
Verkefni:	Vík í Mýrdal - Sjávarflóð- Mat á sjónörnum og hættu á sjávarflóðum			
Verkefnisnúmer.:				
Aðgengi:	<input checked="" type="checkbox"/> Ópið	<input type="checkbox"/> Dreifing háð samþykki verkkaupa	<input type="checkbox"/> Lokað	
Höfundar:	Bryndís Tryggvadóttir Sigurður Sigurðarson og Fannar Gíslason			
Tilvísun:				
Forsíðumynd	Fjörukamburinn í Vík 22. febrúar 2020, tekið af Þóri Níels Kjartanssýni			



Helstu niðurstöður

Suðrströnd Íslands er eitt útsettasta strandsvæði heims. Í aftökum ná grunnbrot öldu út á meira en 20 m dýpi. Upp við ströndina eru öldur dýpisháðar og því spila allir þættir, sem hafa áhrif á sjávarhæð, mikilvægt hlutverk fyrir það hve há alda nær upp að ströndinni. Því hærri sem sjávarstaðan er, því hærri alda kemur upp að ströndinni og því meiri er hættan á sjávarflóðum. Auk stjarnfræðilegra sjávarfalla hafa ýmsir veðurfarslegir þættir áhrif. Þar er átt við áhlaðanda vegna lægri loftþrýstings, vindáhlaðandi þegar vindur blæs upp að strönd og að lokum ölduáhlaðandi innan brimgarðs. Samspil og samlíkur þessara þátta, sem að hluta til eru háðir og að hluta til óháðir, er nokkuð flókið að meta. Hér verður beitt nýlegum líkindafræðilegum aðferðum við mat á flóðahættu.

Sandströndin framan við Vík er langt frá því að vera stöðugt fyrirbæri, enda á hún sér ekki langa sögu. Talið er að hún hafi byrjað að myndast í Kötluhlaupum á 17. öld. Við upphaf 20. aldar var ströndin mjög rýr en í framhaldi af Kötlugosinu 1918 gekk ströndin fram í um 50 ár, að meðaltali um 10 m á ári. Eftir 1970 byrjar ströndin að hopa og er rofið af sömu stærðargráðu og uppbyggingin áður eða um 8 til 10 m á ári. Árið 1994 var skilgreind varnarlína fyrir byggðina í Vík, rof strandarinnar skildi ekki ná inn fyrir þá línu, og byggður á henni flóðvarnargarður. Upp úr aldamótum þegar rof strandarinnar fór að nálgast varnarlínuna var hafinn undirbúningur að rofvarnum. Í fyrstu var ætlunin að byggja sjóvarnir langs eftir ströndinni en með auknum skilningi á sandflutningum var ákveðið að verja ströndina með sandföngurum þvert á ströndina. Árið 2011 var fyrsti sandfangarinn byggður við Víkurá og sá næsti framan við iðnaðarhverfið austast í þorpinu árið 2017. Nokkur ár liðu áður en sandur fór að safnast vestan við fyrri sandfangarann en síðan hefur þar byggst upp mikil og breið fjara. Enn ber ekki mikið á uppbyggingu strandarinnar vestan við seinni sandfangarann, en grunnbrot öldu benda til þess að þar sé aðgrunnt og því ætti ströndin þar að fara að ganga fram.

Síðastliðinn vetur mátti sjá ummerki um landrof á svæðinu milli sandfangaranna og þá flæddi ítrekað yfir flóðvarnargarðinn sem byggður var árið 1994, mest í febrúar 2020 þegar flæddi inn á starfstöð Vegagerðarinnar og fleiri fyrirtækja á svæðinu. Þá er skemmst að minnast flóða og landbrots í desember 2015 áður en seinni sandfangarinn var byggður.

Til að meta endurkomutíma sjávarflóða er myndað stórt gagnasafn aftakaatburða sem byggist á fjörtíu ára sögulegri tímaröð spágagna evrópsku veðurstofunnar (ECMWF) um öldu- og veðurfar af hafsvæðinu utan við Vík. Gögnin voru notuð bæði fyrir greiningu sjávarhæðar á tímabilinu og sem inntak í hermilíkan sem færir öldugögn af hafi, upp að ströndinni framan við Vík. Líkanið gefur möguleika á að meta endurkomutíma sögulegra flóðaatburða með þeim hætti að yfirfæra þá yfir í reiknaða ágjöf yfir flóðvarnargarðinn í Vík.

Í skýrslunni er fjallað um æskilega hæð tvenns konar varnarmannvirkja. Annars vegar flóðvarnargarðs svipaður þeim sem fyrir er og hins vegar sjóvarnargarðs við veg sem liggur eftir fjörunni. Tilgangur þess fyrrnefnda, flóðvarnargarðsins, er að koma í veg fyrir að mikið flæði inn á landið innan við garðinn þannig að tjón eða óþægindi hljóti af. Þar miðast kröfur um hæð garðs við meðalágjöf yfir ákveðin tíma. Tilgangur þess síðarnefnda, sjóvarnargarðs við veg, er að takmarka ágjöf inn á veginn þannig að umferð stafi ekki hætta af. Í því tilfelli eru settar kröfur um að ágjöf stakrar öldu fari ekki yfir ákveðin mörk.

Aðferðafræðinni með stóra gagnasafnið er síðan beitt til að leggja mat á það hve mikið þarf að hækka flóð- og sjóvarnargarðana þannig að ágjöf yfir þá verði innan ákveðinna viðmiðunarmarka.

Til að ágjöf yfir flóðvarnargarð í árlegum flóðaatburði verði innan við 5 l/s/m þarf að hækka flóðvarnargarðinn um 0,5 m í +7,6 m hæð SH2020. Sú hækkun kemur ekki í veg fyrir ágjöf yfir garðinn en dregur verulega úr ágjöfinni og því óryggi sem því fylgir að sjór gangi á land.



Fyrir veg sem liggur meðfram ströndinni og varinn er af sjóvarnargarði þá eru gerðar þær kröfur að mesta ágjöf stakrar öldu fari ekki yfir 2000 l/m í veðri sem að jafnaði kemur ekki tíðar en á um 50 til 100 ára fresti. Til að uppfylla þessa kröfu þarf hæð sjóvarnarinnar að vera í um +9,0 m SH2020.



Efnisyfirlit

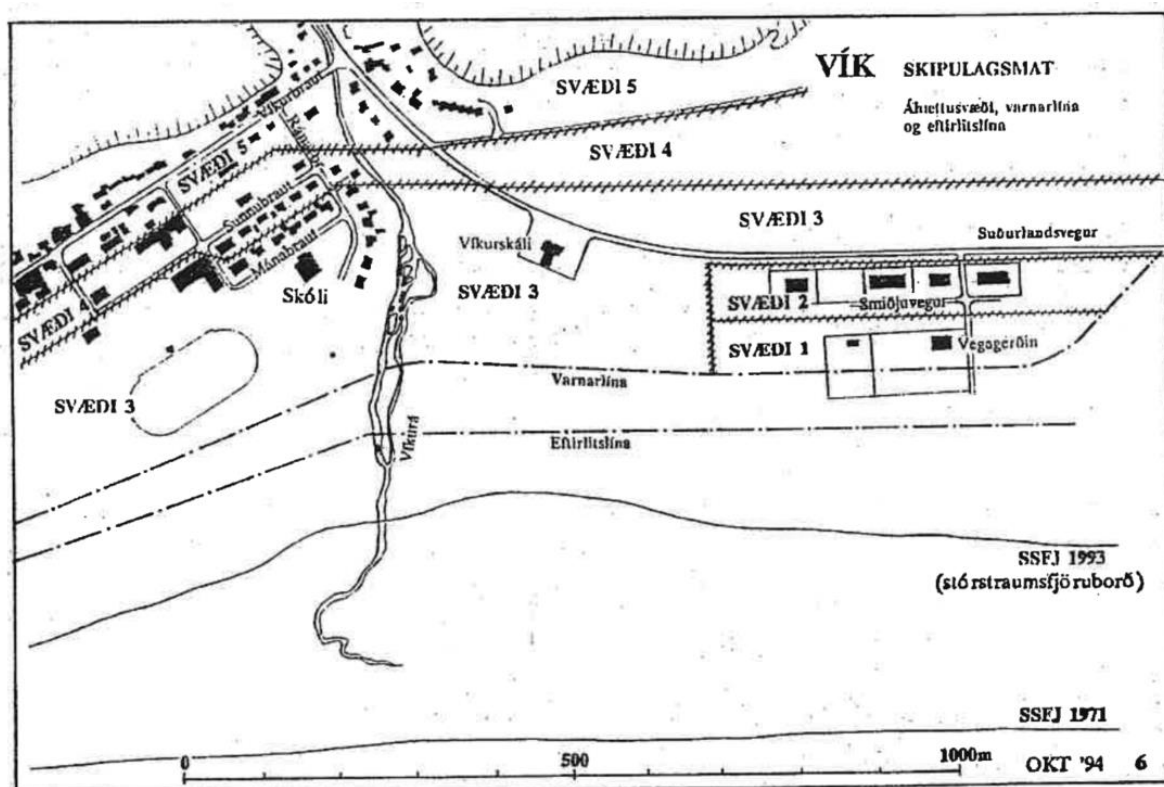
Helstu niðurstöður.....	i
Efnisyfirlit.....	iii
1 Inngangur	1
2 Hæðarkerfi og sjávarföll	4
3 Sjávarhæð.....	5
3.1 Loftþrýstingsáhlaðandi.....	5
3.2 Vindáhlaðandi.....	6
3.3 Ölduáhlaðandi.....	7
3.4 Hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar.....	7
4 Hermun aftaka atburða	9
4.1 Afmörkun óháðra aftaka atburða.....	10
4.2 Hermun byggt samlíkum.....	11
4.3 Safn aftaka atburða flutt upp að ströndinni.....	14
4.4 Samanburður kenniöldu í punktum P1, P2, P3 og P4	15
4.5 Endurkomutími sjávarhæðar og öldu upp við ströndina.....	16
5 Mat á upprensli og ágjöf yfir flóðvarnargarðinn í Vík.....	19
5.1 Hæð 2% upprenslis.....	19
5.2 Meðalágjöf og mesta ágjöf yfir flóðvarnargarðinn.....	20
5.3 Viðmiðunarkröfur fyrir ágjöf samkvæmt EurOtop 2018.....	22
6 Reiknuð ágjöf og upprensli í þekktum atburðum.....	24
6.1 Veturinn 2019-2020	24
6.2 Desember 2015.....	25
6.3 Janúar 1990.....	26
6.4 Áhrifaþættir í þekktum flóðaatburðum.....	26
7 Æskileg hæð flóðvarnargarðs og sjóvarnar við veg.....	28
7.1 Flóðvarnargarður	28
7.2 Sjóvarnargarður við veg.....	29
8 Tilvitnanir.....	31





1 Inngangur

Vík í Mýrdal er staðsett á suðurströnd Íslands sem er eitt útsettasta strandsvæði í heiminum. Sandströndin framan við Vík er hvorki stöðug né á hún sér langa sögu. Talið er að fjaran hafi byrjað að myndast í Kötluhlaupum á 17. öld. Við upphaf 20. aldar var fjaran mjög rýr og jafnframt átti sér stað töluvert rof. Eftir Kötlugosið 1918 gekk fjaran fram í um 50 ár, að meðaltali um eina 10 m á ári. Fjaran er breiðust um 1970 en eftir það byrjar rof af svipaðri stærðargráðu og uppbyggingin var áður, eða um 8 til 10 m rof á ári. Árið 1994 voru með aðferðum strandsvæðastjórnunar skilgreindar varnar- og eftirlitslínur framan við byggðina í Vík, Mynd 1. Gert var ráð fyrir að bygging varanlegra varna hæfist þegar rofið næði eftirlitslínunni. Fyrsti áfangi strandvarna við Vík var bygging flóðvarnargarðs á varnarlínunni árið 1994, Mynd 2, sjá samantekt Sigurðar og fl. 2018, *Vík í Mýrdal, sjávarrof og aðgerðir til að verjast því*.



Mynd 1 Skilgreining á varnarlínunni, eftirlitslínunni og áhættusvæðum úr skýrslu Fjarhitunar fyrir Vita- og hafnamálastofnun, Skipulag ríkisins og Viðlagatryggingu Íslands frá 1994. Síðar var varnarlínun færð utar framan við áhættusvæði 1, iðnaðarsvæðið austast í byggðinni.

Fylgst var með rofinu og þegar kom fram yfir aldamótin var það farið að nálgast eftirlitslínuna verulega og að hluta til komið inn fyrir hana. Til að sporna gegn landrofinu hafa tveir sandfangar verið byggðir við Vík. Sá fyrri um 300 m langur sandfangari þvert á ströndina var byggður við ósa Víkurár árið 2011. Síðari sandfangarinn um 220 m langur einnig þvert á strönd var byggður tæplega 800 m austar árið 2017.

Framan við Vík eru öldudrifnir sandflutningar til austurs sem valda rofi strandarinnar. Sandflutningur til vesturs safnast saman austan við Reynisfjall. Því virka sandfangarar á Vík í Mýrdal þannig að þeir eiga að safna sandi vestan við sig, þ.e. að hindra sandflutning til austurs, en stöðva ekki rof austan við sig.



Mynd 2 Flóðvarnargarður neðan við byggðina í Vík byggður sumarið 1995. Þarna er enn langt frá fjörुकambi að flóðavörn. Úr Sjónvarnarskýrslu Vita- og hafnamálastofnunar frá 1995.

Fyrstu árin eftir byggingu fyrri sandfangarans safnaðist takmarkað magn sands fyrir í fjörunni ofansjávar milli garðsins og Reynisfjalls. Hins vegar var stutt í grynningar eins og sjá mátti á brjótandi öldum þar fyrir framan. Eftir það fór ströndin að hlaðast upp og sumarið 2017 var komið það mikið efni inn á svæðið milli fyrri sandfangarans og Reynisfjalls að næstum var hægt að ganga á þurru út að garðsenda vestan við sandfangarann.

Eins og búist var við þá hélt rofið áfram austan garðsins þó að tímabundið gæti þar hlaðist upp sandur eftir langvarandi suðaustan áttir. Í desember 2015 gerði mikið flóð og stóðst fjörुकamburinn vestan sandfangarans fyllilega stórvíðrisáhlaupið og sannaði að hægt er að verja þorpið fyrir ágangi sjávar. Austan sandfangarans að húsi Vegagerðarinnar gekk hins vegar mikið á. Sjór gekk yfir graslendið sem byggst hafði upp á síðustu áratugum. Rofið í grjóðurþekjuna austan sandfangarans mældist mest um 37 m.

Í framhaldi af þessum atburði var seinni sandfangarinn byggður árið 2017. Eins og með þann fyrri hefur orðið bið á því að sandur safnist fyrir á svæðið milli sandfangaranna tveggja. Hins vegar virðist vera tiltölulega grunnt fyrir framan svæðið milli þeirra eins og kemur fram á myndum af öldubrotum sem eru skýr merki um að sandsöfnun á sér stað á svæðinu.

Þrátt fyrir tilkomu sandfangaranna mátti eftir veturinn 2019 til 2020 sjá ummerki um landrof milli sandfangaranna. Um veturinn flæddi yfir flóðvarnargarðinn frá 1994 og inná vinnusvæði starfstöðvar Vegagerðarinnar og annarra fyrirtækja á svæðinu. Tilkynningar bárust að ítrekað hafi flætt yfir flóðvarnargarðinn dagana 15. og 22. febrúar á þessu ári. Sömuleiðis er það ofarlega í minni manna að það hafi einnig flætt yfir garðinn dagana 7. og 30. desember 2015.

Með þessar forsendur í huga var ákveðið að leggja mat á ágæti flóðvarnargarðsins og hve líklegt og mikið það gefi yfir hann á gefnu tímabili. Samhliða því var lagt mat á hve mikið þyrfti að hækka garðinn til að takmarka ágjöf yfir hann. Niðurstöður á mati á nauðsynlegri hæð á varnargarði við Vík í Mýrdal nýtist einnig fyrir veghönnun á fyrirhuguðum nýjum þjóðvegi 1 á svæðinu. En mikilvægt er að fjölfarinn vegur líkt og þjóðvegur 1 sé vel varinn fyrir ágangi sjávar og því nauðsynlegt að æskileg sjóvörn sé til staðar við veginn.



Mynd 3 Ströndin framán við Vík 14. mars 2015. Um miðjan daginn mældist hæð kenniöldu á Surtseyjardufli um 10 m og þá ná öldubrotin austan Reynisfjalls út á tæplega 20 m dýpi. (Ljósmynd Þórir Niels Kjartansson)



2 Hæðarkerfi og sjávarföll

Í flestum bæjarfélögum landsins hafa í gegnum tíðina verið notuð fleiri en eitt hæðarkerfi þar sem þau gegna mismunandi tilgangi. Í bæjarfélögum við sjó voru yfirleitt til bæði bæjarkerfi og hafnar- eða sjókerfi, þar sem „núllið“ í bæjarkerfum átti yfirleitt að miðast við meðalsjávarhæð en í hafnar- eða sjókerfum var „núllið“ sett í um 0,1 til 0,2 m neðan við meðalstórstraumsfjöruborð. Kerfin voru yfirleitt staðbundin og þá byggði ákvörðun þeirra á misgóðum upplýsingum um sjávarföll.

Í stað bæjarkerfa er nú víðast hvar notað eitt samhæft hæðarkerfi ISH2004 sem ákvarðað er af Landmælingum Íslands og miðast við meðalsjávarhæð. Hafnar- eða sjókerfin geta hins vegar ekki verið samhæfð fyrir allt landið þar sem þau taka mið af sjávarföllum sem eru mismunandi eftir landshlutum.

Í Vík hafa verið notuð nokkuð mörg hæðarkerfi, sum eru kennd við bæjarfélagið, önnur við gamla landshæðarkerfið og enn önnur við sjóinn. Fram til þessa hefur ákvörðun á sjókerfunum ekki byggt á nægjanlega góðum upplýsingum og þau ekki verið rétt ákvörðuð miðað við að „núllið“ eigi að vera rétt neðan við meðalstórstraumsfjöruborð. Í sambandi við þá vinnu sem hér er gerð grein fyrir hefur verið skilgreint nýtt sjóhæðarkerfi, kallað SH2020. Það byggir á stjarnfræðilegum sjávarfallastuðlum fyrir hnitið 63°N 19°V sem fengnir eru úr alþjóðlegum grunni yfir stjarnfræðilega sjávarfalla stuðla sem er hluti af MIKE21 hugbúnaðarsvítunni.

Tafla 1 gefur hæð hæðarpunktsins 11402, bolti í klöpp vestan kirkju, og sjávarföllin í Vík í tveimur hæðarkerfum, ISH2004 sem miðast við meðalsjávarhæð og SH2020 sem miðast við sjávarföllin.

Tafla 1 Hæðarkerfi og sjávarföll í Vík í Mýrdal

		Sjávarföll ákvörðuð með stjarnfræðilegum stuðlum	ISH2004 hæðarkerfi	SH2020 hæðarkerfi
Hæðarpunktur 11402			+34,643	+36,067
Meðalstórstraumsflóð	MSTFL	MSH+(M2+S2+K2)	+1,276	+2,700
Meðalsmástraumsflóð	MSMFL	MSH+(M2-S2)	+0,513	+1,937
Meðalsjávarhæð	MSH	MSH	0,000	+1,424
Meðalsmástraumsfjara	MSMFJ	MSH-(M2-S2)	-0,513	+0,911
Meðalstórstraumsfjara	MSRFJ	MSH-(M2+S2+K2)	-1,276	+0,148
Sjókortanúll		MSH-(M2+S2+N2+O1)	-1,424	0,000



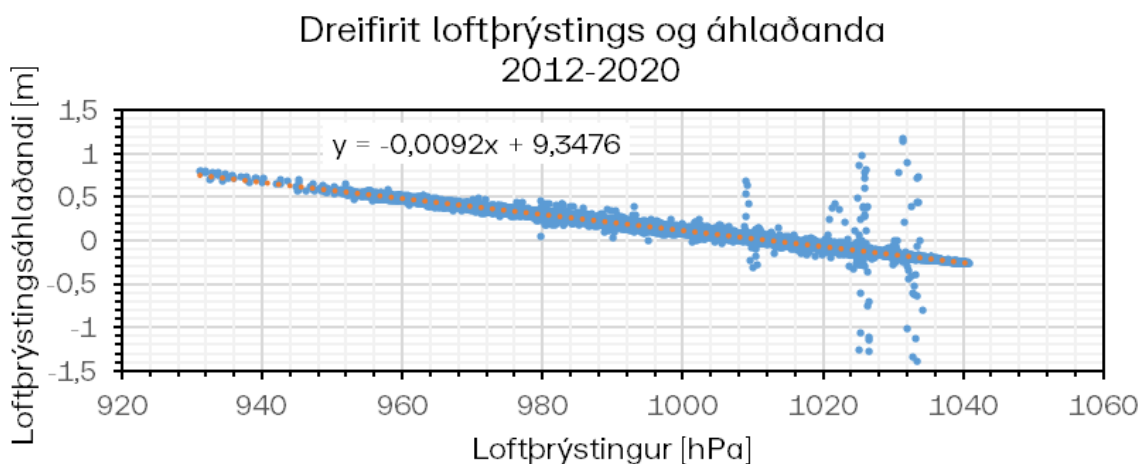
3 Sjávarhæð

Sjávarhæð á hverjum tíma er samspil ýmissa þátta. Stærst vega stjarnfræðileg sjávarföll sem stafa af aðdráttarafl tungls, sólar og reikistjarna. Sjávarföllin ráðast af gangi himintunglanna og eru því fyrir fram þekkt og gefin út í sjávarfallatöflum. Á degi hverjum fara tvær sjávarfallabylgjur umhverfis landið og þegar aðdráttarafl tungls og sólar leggjast saman er stórstreymt en smástreymt þegar tungl og sól toga þvert á hvort annað. Mat á hæð stjarnfræðilegra sjávarfalla er gefið í kaflanum hér á undan, tafla 1.

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, lítið þar sem er aðdjúpt en meira 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 grunnbrotin.

3.1 Loftþrýstingsáhlaðandi

Mat á loftþrýstingsáhlaðanda byggist á líkingu um hækkingu sjávarhæðar vegna breytinga á loftþrýstingi, loftþrýstingsáhlaðandi er ákveðinn stuðull margfaldaður 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.



Mynd 4 Dreifirit loftþrýstings ECMWF gagna og áhlaðanda úr sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar árin 2012 – 2020

Loftþrýstingsáhlaðandi nær hins vegar sjaldnast að verða stöðugt ástand. Lægðir hreyfast yfir haffletinum og með þeim eins konar „bólá“ á haffletinum undir miðju lægðarinnar. Takmörk eru á því hve hratt „bólán“ getur myndast og hvað gerist þegar lægðin gengur á land eða fer af landi út á sjó. Því er fyrrnefndur stuðull yfirleitt lægri en 1,0. Ólafur og Páll (1991) unnu úr sjávarfallamælingum í Reykjavík og ákvörðuðu stuðullinn þar 0,84. Engar sjávarfallamælingar eru til frá Vík og ekki hefur verið gerð greining á þessum stuðli við suðurströndina.



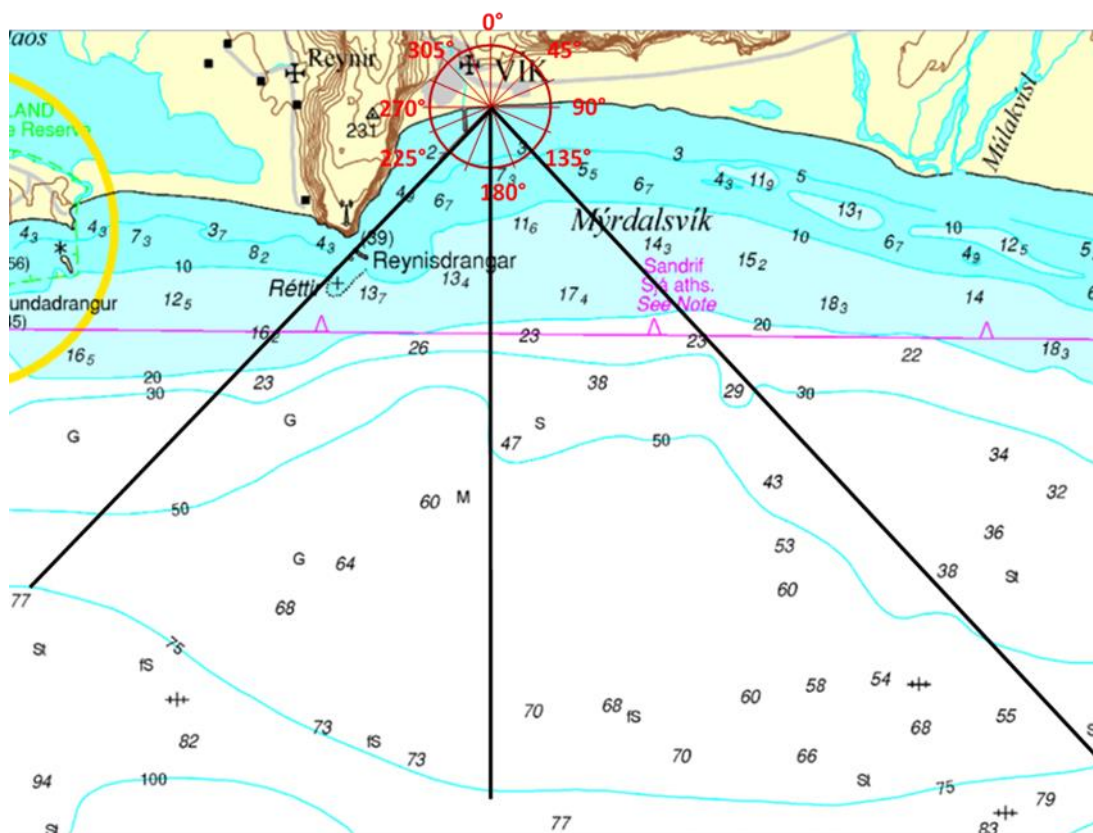
Hér er því farin sú leið að bera saman reiknaðan áhlaðanda í sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar við loftþrýstingsgögn frá ECMWF. Niðurstöðuna má sjá á **Error! Reference source not found.** sem gefur 0,92 cm hækkun sjávarborðs fyrir fall á loftþrýstingi um 1 hPa frá meðalloftþrýstingi 1012,9 hPa. Þetta er heldur hærra stuðull en Ólafur og Páll fundu fyrir Reykjavík og því líklega á öruggu hliðinni fyrir þá greiningu sem þessi skýrsla miðar að.

3.2 Vindáhlaðandi

Vindáhlaðandi sjávar var áætlaður út frá jöfnu Bretschneider hér fyrir neðan þar sem U er vindhraði, h er dýpi sjávar og L er lengd dýpis.

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

Dýpi sjávar og lengd dýpis byggist á dýptarmælingum Landhelgisgæslunnar en dýptarkort af hafsvæðinu sunnan við Vík í Mýrdal má sjá á Mynd 5 **Error! Reference source not found.** Svæðinu sunnan við Vík er skipt í þrjú hluta eða geira eftir því úr hvaða átt vindurinn blæs eins og sjá má á vindáttahringnum á myndinni. Þrjú þversnið af sjávarbotninum eru notuð, eitt fyrir hvern hluta, þá er vindáhlaðandi t.d. fyrir vind með stefnu 113° - 158° reiknaður með þversniði sjávarbotns í 135°. Dýpi og lengd sjávarbotns fyrir hvert þversnið má sjá í töflu 2. Ef vindátt er utan bilsins 113° - 225° er vindáhlaðandi metinn sem enginn. Mesti vindáhlaðandi sem metinn er í hermda gagnasafninu nær 27 cm vegna vinds úr suðvestanátt, en af þeim atburðum sem hafa vindáhlaðanda þá er 10% með yfir 11 cm og 2% yfir 13 cm í vindáhlaðanda.



Mynd 5 Dýptarkort af ströndinni við Vík í Mýrdal sem notað var til að meta vindáhlaðanda. Af kortavefsjá íslenskra sjókorta Landhelgisgæslunnar og Landmælinga Íslands.



Tafla 2. Lengd svæða með dýpi á bilinu 5 til 75 m, fyrir þrjá stefnugeira framan við Vík, notað við mat á vindáhlaðanda.

Vindátt:	113°-158°		158°-203°		203°-225°	
Dýpi [m]	Fjarlægð frá landi [m]	Lengd dýpis [m]	Fjarlægð frá landi [m]	Lengd dýpis [m]	Fjarlægð frá landi [m]	Lengd dýpis [m]
-75	10250	2000	7750	3750	7500	1250
-50	8250	4000	4000	1000	6250	1750
-30	4250	1000	3000	250	4500	250
-20	3250	1750	2750	1250	4250	1500
-10	1500	750	1500	750	2750	1750
-5	750	750	750	750	1000	1000

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, hæð hennar og halla strandar en með auknum halla strandar, lengri og hærri öldum verður ölduáhlaðandi meiri. Mat á ölduáhlaðanda er vandmeðfarið og ekki eru til margar heimildir að slíkt hefur verið gert við strendur Íslands, því var 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 sem var hannað af Y.Goda sjálfum. Þá er lagt fram að meta megi 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 en 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 stefna kenniöldu við 10m dýpi.

3.4 Hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar

Hækkun sjávarstöðu vegna gróðurhúsaáhrifa er óneytanleg staðreynd sem byggist á niðurstöðum rannsókna Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftlagsgreyingar (IPCC). 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 meðalhækkun sjávar á heimsvísu verði um 26-82 cm fyrir árið 2100. Útþensla vegna hlýnunar sjávar stuðlar að hækkun yfirborði sjávar en aukið vökvamagn vegna bráðnunar jökla er helsti orsakavaldur hærri 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 Veðurstofunnar um Loftlagsbreytingar og áhrif þeirra á Ísland sem byggist á skýrslu IPCC má búast við því að



hækkun sjávarstöðu við Íslandsstrendur verði um 30-40% af hækkun meðalsjávarstöðu sem svarar til 8-33 cm hækkunar. 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 hafa einnig áhrif á stöðu sjávar og má því nefna að samkvæmt skýrslu Veðurstofunnar má búast við 20-40 cm hækkun á landhæð á Suðurlandi vegna jarðskorpuhreyfinga. Jafnframt kemur fram í skýrslunni að á Suðurlandi er hlutfallsleg hækkun vegna loftslagsbreytinga um 30-32% af hnattrænni hækkun. Í heild má búast við að breytingar á sjávarstöðu við Vík til loka aldarinnar verði allt frá 25 cm lækkun í 12 cm hækkun.

Miðað við aðra þætti sem hafa áhrif á sjávarhæð eins og áhlaðanda vegna loftþrýstings og öldu, þá eru líklegar breytingar á sjávarstöðu við Vík vegna loftslagsbreytinga og jarðskorpuhreyfinga frekar litlar.

Fyrir flóðvarnargarð sem byggður er til nokkurra áratuga og hægt er að breyta hönnunarforsendum í eðlilegu viðhaldi, þá er auðvelt að takast á við óvissu um framtíðarþróun meðalsjávarhæðar. Fyrir nýjan veg við ströndina og jarðgöng sem byggð eru til lengri tíma þarf hins vegar að gæta fyllsta öryggis.



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 frá svæðinu. Notast var við spágögn með einnar klukkustundar tímaskrefi frá evrópsku veðurstofunni ECMWF frá árunum 1979 til 2020 í hnit 63,0°N 19,0°V, sem er á hafsvæðinu sunnan við Vík í Mýrdal, sjá Mynd 6. Spágögnin innihalda vindhraða, vindstefnu, hæð kenniöldu, sveiflutíma og stefnu kenniöldu auk loftþrýstings við sjávaryfirborð, en hann var notaður til að meta áhlaðanda vegna loftþrýstings. Að auki var notast við tímaröð fyrir stjarnfræðileg sjávarföll við suðurströnd Íslands sem reiknuð er út frá stjarnfræðilegum stuðlum í MIKE frá DHI.



Mynd 6 Úthafsspápunktur evrópsku veðurstofunnar ECMWF 63,0°N 19,0°V fyrir veður- og haffræðileg gögn sýndur með rauðgulri stjörnu (Tekið af kortavefsjá íslenskra sjókort Landhelgisgæslunnar og Landmælinga Íslands).

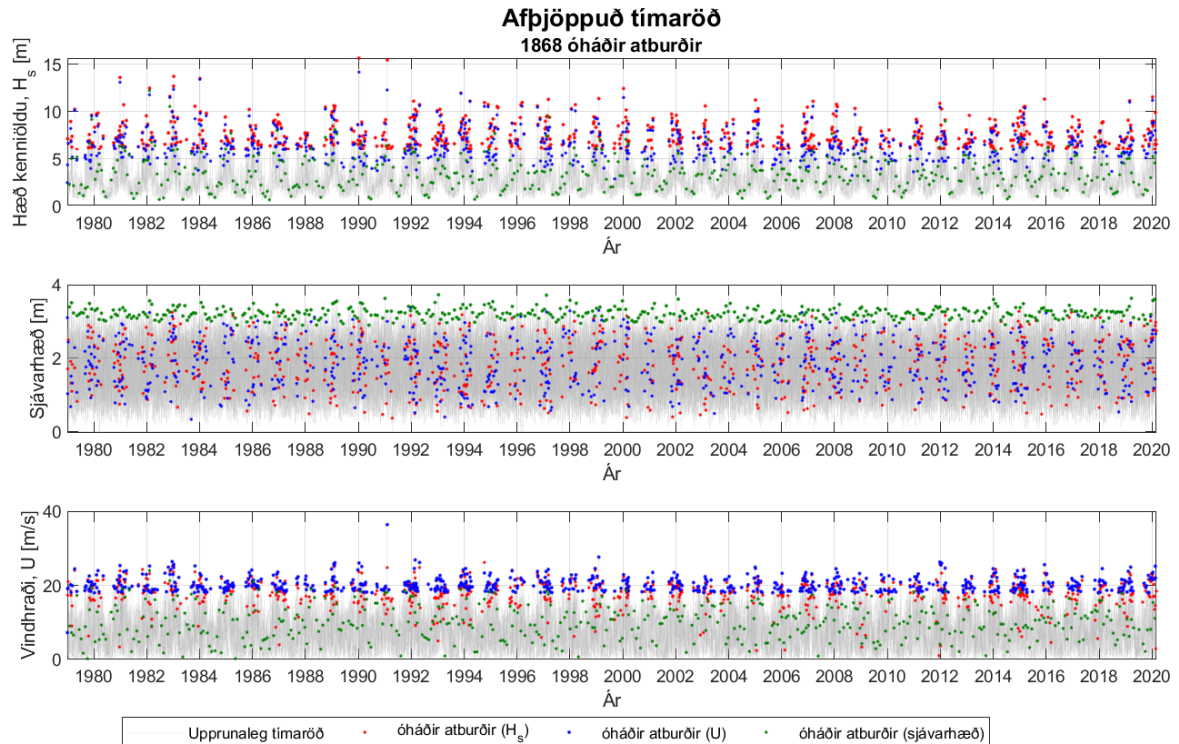
Úr tímaröðinni voru einangraðir tæplega 2000 óháðir atburðir og þeir notaðir til að útbúa gagnasafn með 350.000 óháðum atburðum þar sem í það minnsta ein af ofangreindum breytum er í hærra lagi. Gagnasafnið var útbúið með því að nota aðferðina „Multivariate extreme value modelling“ (B. Gouldby, 2014). 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 öldulíkaninu MIKE 21 SW og svokölluðu Meta Model, sem er ekki öldulíkan en hermir eftir niðurstöðum MIKE og sparar því keyrslutíma verulega. Sem hluti af næmnigreiningu voru atburðirnir færðir upp að ströndinni í 4 punkta á um 7 m dýpi sunnan við sandfangarana í Vík í Mýrdal, sjá Mynd 7. Samanburður á endurkomutíma kenniöldu í þessum fjórum punktum má sjá á Mynd 13 í kafla 4.5.



Mynd 7 Staðsetning punkta á grunnslóð, á 7 m dýpi utan við sandfangarana við Vík í Mýrdal. Tekið af Google Earth í apríl 2020.

4.1 Afmörkun óháðra aftaka atburða

Tryggja þarf að atburðirnir, sem notaðir eru úr tímaröðinni til að herma eftir, séu óháðir aftaka atburðir. Þá er átt við að ekki séu notuð tvö eða fleiri tímaskref úr sama flóðaatburðinum. Þannig eru óháðir aftaka atburðir afmarkaðir í 40 ára langri tímaröðinni með þeim hætti að fyrst eru valdir toppar á hæð kenniöldu, sjávarhæð og vindhraða sem eru yfir ákveðnum þröskuldsgildum. Úr því gagnasafni eru síðan valdir toppar út frá hæð kenniöldu og vindhraða með í það minnsta 24 klukkustunda millibili en allir toppar á sjávarhæð eru valdir. Þröskuldsgildið fyrir hæð kenniöldu á hafi er 6 m, fyrir sjávarhæð +1,5 m og 18 m/s fyrir vindhraða. Afmörkunin skilar 1868 óháðum atburðum sem notaðir eru til að herma 350.000 óháða aftakaatburði, sjá Mynd 8.

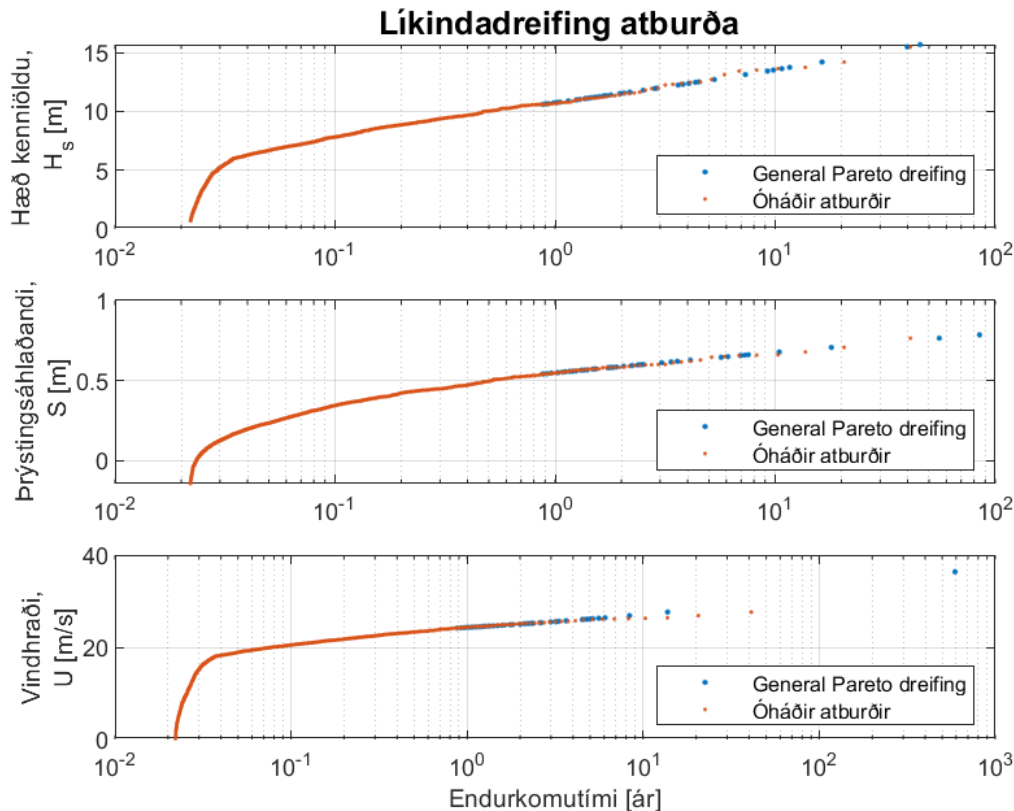


Mynd 8. Tímaröð hæð kenniöldu (efst), sjávarhæð (mið) og vindhraða (neðst). Tímaröðin er afþjöppuð í óháða atburði út frá hæð kenniöldu (rauðir), sjávarhæð (grænir) og vindhraða (bláir).

4.2 Hermun byggð 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. Hins vegar að nota hermdu gildin af þessum þrem þáttum til að herma hinar breytur út frá sambandi sínu við þá þætti sem þegar hafa verið hermdir.

Til að byrja með er General Pareto líkindadreifingin aðlöguð að afmörkuðu óháðu atburðinum, sjá Mynd 9. Líkurnar fyrir gildi 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 þrem breytum sem verið er að herma hverju sinni, s.s. i .



Mynd 9. Líkindadreifing (rauð) og General Pareto dreifing (blá) fyrir hæð kenniöldu (efst), loftþrýstingsáhlaðanda (mið) og vindhraða (neðst) byggt á óháðum atburðir úr 40 ára tímaröðinni

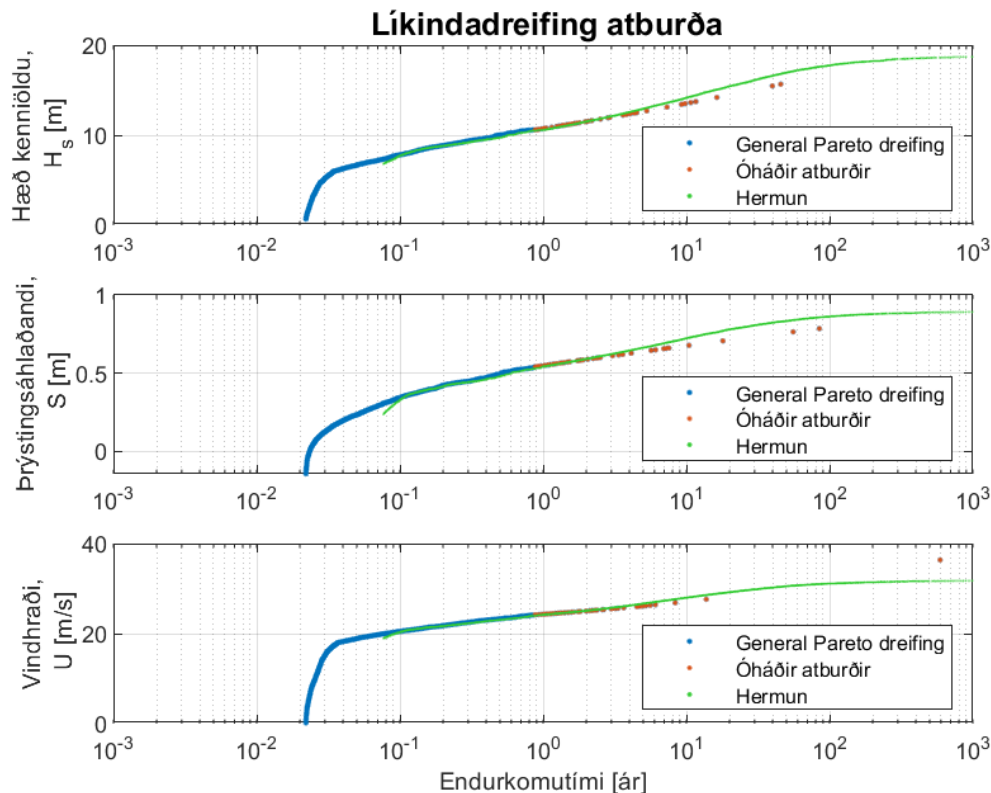
Multivariate extreme value modelling byggist á því að nota jöfnuhneppi til að líkja eftir sambandi milli hæð kenniöldu, vindhraða og loftþrýstingsáhlaðanda, sbr jöfnuna hér fyrir neðan.

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

Þar sem Y_{-i} eru Y gildin fyrir þær tvær breytur sem skal herma og Y_i er skilyrða breytan sem hermt er út frá. 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 skilyrða breytan með *most likelihood method* 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 fjöldi atburða er náð.

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.

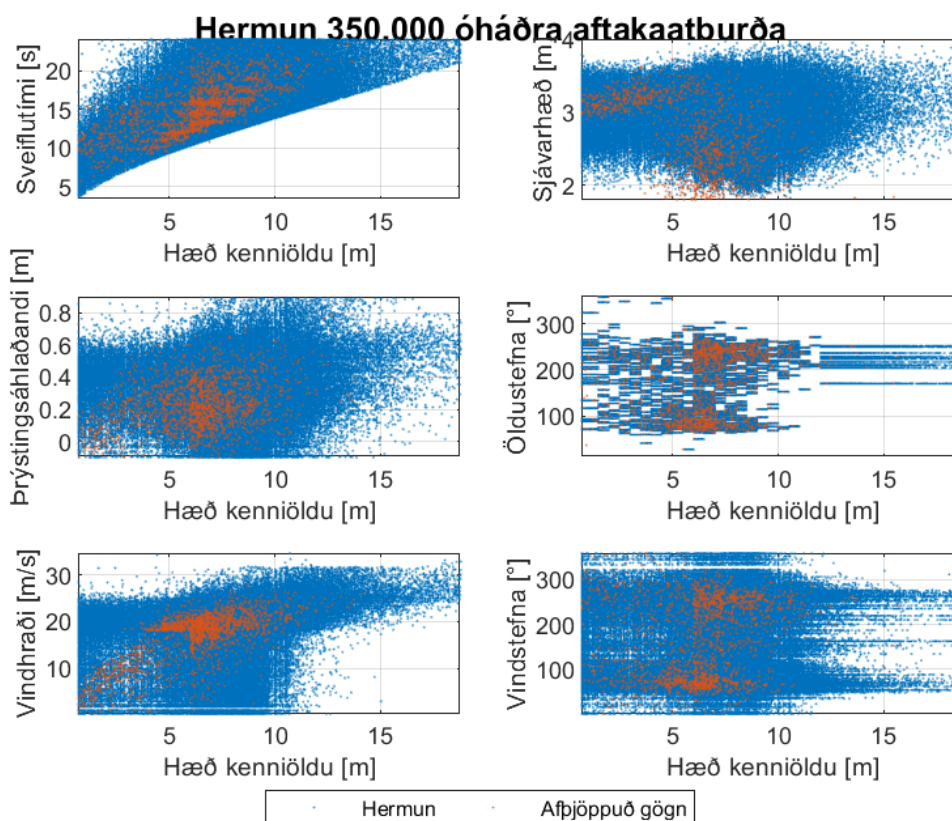
Þessi aðferð skilar þá 350.000 óháðum atburðum þar sem í það minnsta ein af breytunum inniheldur hátt gildi. Mynd 10 sýnir samanburð líkindadreifingu á þeim þrem breytum sem hermdar voru með Monte Carlo aðferðinni og óháðu atburðanna sem *Multivariate Extreme Value Modelling* er byggð á.



Mynd 10. Samanburður líkindadreifinga óháðra atburða (blár og rauður) og hermunar (grænn) fyrir hæð kenniöldu (efst), loftþrýstingsáhlaðanda (mið) og vindhraða (neðst).

Þær breytur sem eftir sitja, þ.e.a.s. öldustefna, sveiflutími kenniöldu, vindstefna 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 loftþrýstingsáhlaðanda og árstíma.

Á Mynd 11 má sjá samanburð dreifingu þeirra 1868 óháðra atburða úr 40 ára tímaröðinni (rauðir punktar) og hermun 350.000 óháðra aftaka atburða út frá þeim (bláir punktar). Hermdu atburðirnir fylgja dreifingu aftaka atburðanna úr tímaröðinni að mestu leiti auk þess sem hærri útgildi fást. Þetta gagnasafn af 350.000 hermdum aftaka atburðum var síðan flutt af hafi og inn að fjörunni utan við Vík í þeim tilgangi að nota þá við mat á upprensli og nauðsynlegri hæð sjóvarnar mannvirkja.



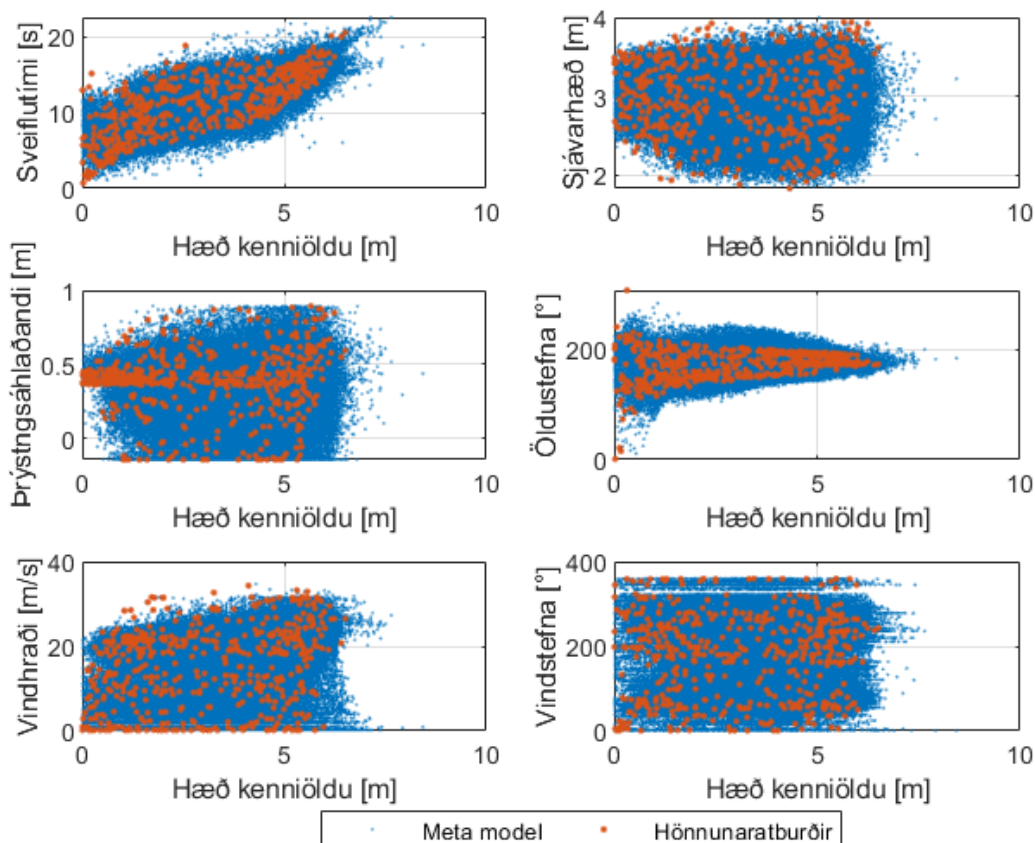
Mynd 11. Dreifing 350.000 óháðra aftaka atburða úr hermuninni (blá) borin saman við dreifingu óháðra aftaka atburða úr 40 ára tímaröðinni (rauð).

4.3 Safn aftaka atburða flutt upp að ströndinni

Til að sjá hvernig atburðirnir hegða sér við fjöruna hjá Vík í Mýrdal eru þeir færðir af hafi, úr hnitinu $63,0^{\circ}\text{N } 19,0^{\circ}\text{V}$ upp að ströndinni í punkt á 7 m dýpi sunnan við fjöruna í Vík. Vegagerðin notar öldulíkanið MIKE 21 SW til að flytja ölduatburði úr úthafspunkti á hafi og upp að ströndinni. Hér er MIKE öldulíkanið notað saman með *Meta Model* aðferð sem byggir á *Radial Basis* falli til að færa alla 350.000 aftakaatburðina að ströndinni í punkt á 7m dýpi sunnan við Vík í Mýrdal. Þessar tvær aðferðir eru notaðar saman því óraunhæft er að reikna alla 350.000 atburðina í öldulíkaninu vegna of langs reiknitíma. Þess í stað eru 500 hönnunaratburðir valdir úr hermda gagnasafninu sem eru lýsandi hvernig punktaskýið hegðar sér og þeir eru keyrðir í MIKE 21 SW. Niðurstöðurnar úr keyrslunni eru svo setta inn í *Meta Model* ásamt hönnunaratburðunum til að greina sambandið milli atburða í hnitinu $63,0^{\circ}\text{N } 19,0^{\circ}\text{V}$ og í punktinum á 7 m dýpi sunnan við Vík. Niðurstöðurnar fyrir punktinn milli sandfangarna (P3) má sjá á Mynd 12. **NError! Reference source not found.**æer eins punktaský fengust í punktinum P1, P2 og P4 . Frekari lýsing á *Meta Model* aðferðinni og *Multivariate Extreme Value Modelling* má finna í *Mat á aftaka sjávarflóðum: Innleiðing aðferða sem byggist á samlíkum útgilda* (Bryndís Tryggvadóttir, 2020). Gögnin voru færð að fjórum stöðum við fjöruna í Vík í Mýrdal, sjá Mynd 7. Staðirnir eru fyrir framan sitt hvorn sandfangarann (P2 og P4), mitt á milli sandfangarana (P3) og vestan við vestari sandfangarann (P1), allir á 7 m dýpi líkt og áður kom fram.



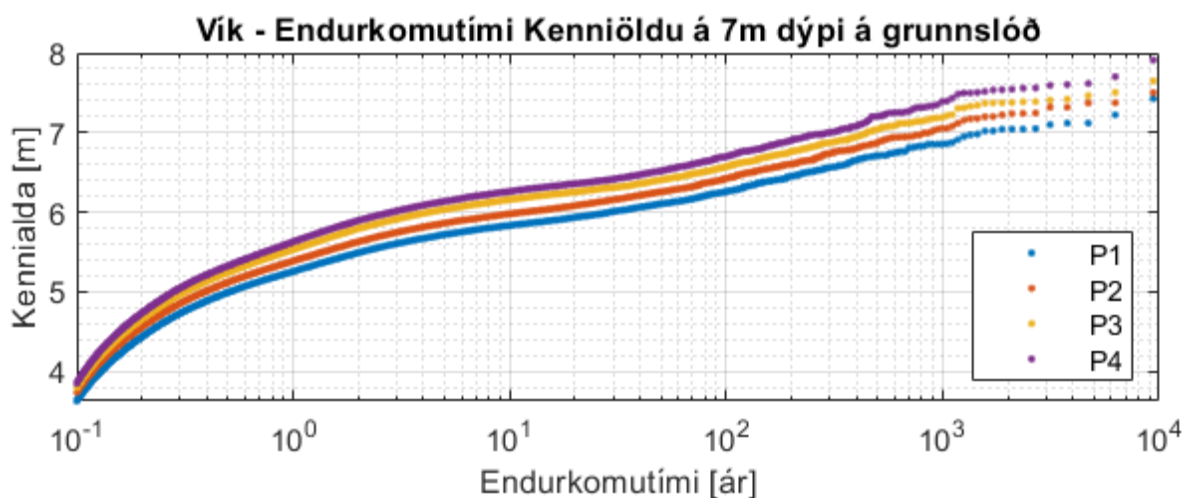
Milli sandfangara, -7m dýpi



Mynd 12 Vind- og hafffræðileg gögn í á 7m dýpi sunnan milli sandfangaranna (P3) í Vík í Mýrdal. Hönnunaratburðir (rauðir) voru fluttir inn upp að ströndinni með Mike21 SW 21 öldulíkani en allt stóra gagnasafnið (blátt) var flutt inn að ströndinni með Meta Model sem byggist á hönnunaratburðunum.

4.4 Samanburður kenniöldu í punktum P1, P2, P3 og P4

Sem næmnigreining fyrir punktana fjögurra á 7 m dýpi framan við Vík sem hermda gagnasafnið var útbúið fyrir, var endurkomutími kenniöldu í punkturnum borinn saman. Líkt og sést á Mynd 13 þá er hæsta kennialdan fyrir framan eystri sandfangarann (P4) en lægst er kennialdan í punktinum vestast, næst Reynisfjalli (P1). Fyrir ákveðinn endurkomutíma er mesti munur milli punkta P1 og P4 um 0,5 m. Þessi munur samsvarar hins vegar aðeins til tæplega 7 cm munar á ölduáhláðanda, sem er hverfandi hækkan þegar lítið er til dýpisháðar kenniöldu. Því er óþarfi að meta ágjöf yfir sjónvörnina frá mörgum stöðum á grunnslóð innan þess svæðis sem er til athugunar. Í þessu verkefni var valið að nota niðurstöður fyrir punkt P3 sem er úti fyrir svæðinu milli sandfangaranna tveggja.



Mynd 13 Samanburður á endurkomutíma kenniöldu við 7 m dýpi í 4 skilgreindum punktum utan Víkur.

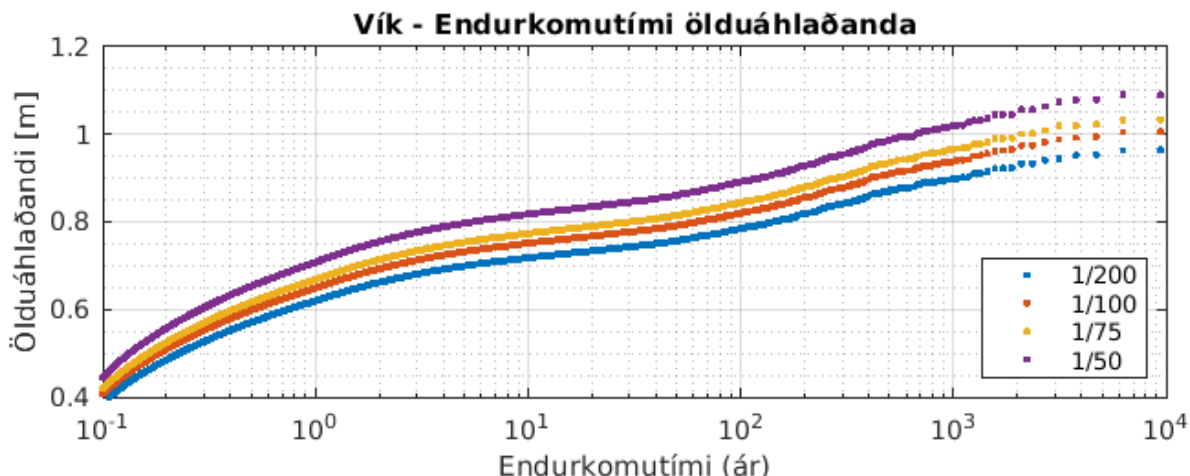
4.5 Endurkomutími sjávarhæðar og öldu upp við ströndina

Lagt var mat á ölduáhlaðanda og vindáhlaðanda hermda gagnasafnsins fyrir punkt P3 (milli sandfangaranna) með aðferðum lýst í kafla 3.

Sem hluti af næmnigreiningu var lagt mat á ölduáhlaðanda fyrir fjóra mismunandi halla á ströndinni ($1/50$, $1/75$, $1/100$ og $1/200$). Endurkomutími ölduáhlaðanda fyrir hvern halla má sjá á Mynd 14. Þar sést að með auknum halla, brattari strandfleti, verður ölduáhlaðandi meiri. Halli strandar utan við Vík er breytilegur eftir dýpi. Utan við 10m dýpi er hallinn nálægt $1/200$, við 10m dýpið er hann u.þ.b. $1/100$ og nær ströndinni fer hann nær $1/75$ til $1/50$. Notast verður við meðalhalla á ströndinni svo hallinn $1/100$ verður notaður við mat á ölduáhlaðanda við vík. Í töflu 3 má finna hæð þrýstings-, vind- og ölduáhlaðanda með 1, 10, 100 og 1000 ára endurkomutíma. Hæð þessa áhlaðanda byggist á útreikningum sem finna má í kafla 3 og hermda gagnasafninu.

Tafla 3 Þrýstings-, öldu- og vindáhlaðandi með 1, 10, 100 og 1000 ára endurkomutíma byggt á hermda gagnasafninu og $1/100$ halla strandar

Endurkomutími	Þrýstings- áhlaðandi [cm]	Ölduáhlaðandi [cm]	Vindáhlaðandi [cm]
1ár	54	65	1
10 ár	72	75	13
100 ár	86	82	20
1000 ár	89	94	25

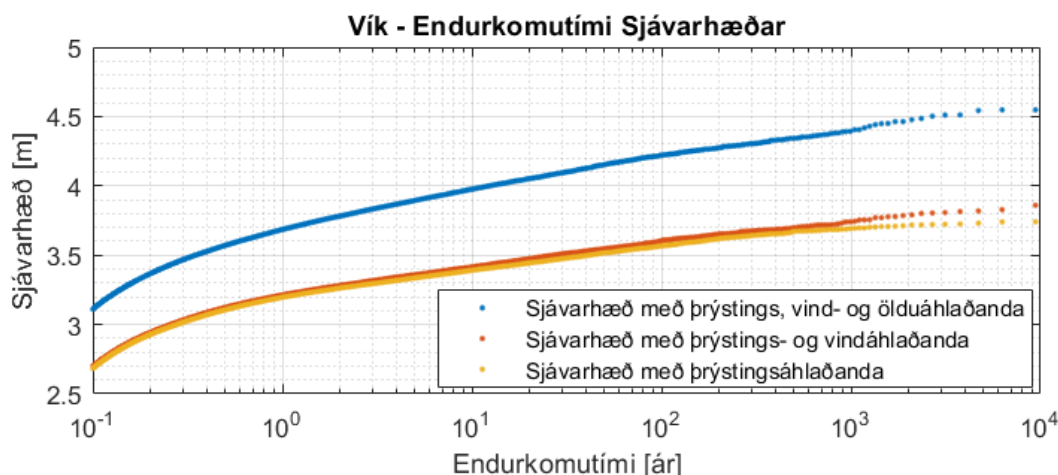


Mynd 14 Líkindadreifing ölduáhlaðanda byggt á hermda gagnasafninu og mismunandi halla strandar, 1/200, 1/100, 1/75 og 1/50

Lagt var mat á endurkomutíma sjávarhæðar sem samanstendur af stjarnfræðilegri sjávarhæð, þrýstingsáhlaðanda, vindáhlaðanda og ölduáhlaðanda líkt og er fjallað um í undirköflunum hér á undan. Niðurstöðurnar má sjá á Mynd 15 og í töflu 4 þar sem sjávarhæð er gefin upp í hæðakerfi SH2020. Þar sem vindáhlaðandi er lítilt verður lítilt munur á líkindadreifingunni með loftþrýstingsáhlaðanda einum sér eða með vindáhlaðanda. Ölduáhlaðandinn hefur hins vegar áhrif og þegar honum er bætt við veldur það um 0,5 m hækkun á sjávarhæð að staðalri.

Tafla 4 Endurkomutími sjávarhæðar með eða án áhlaðanda byggt á hermda gagnasafninu.

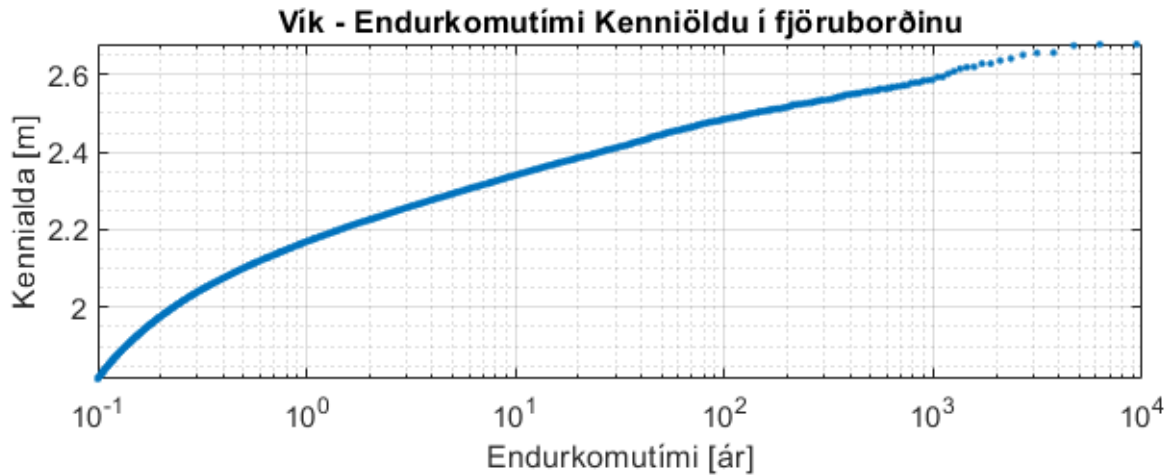
Endurkomutími [ár]	Sjávarhæð [m]		
	Með þrýstingsáhlaðanda	Með vind- og þrýstingsáhlaðanda	Með vind-, öldu og þrýstingsáhlaðanda
1	3,2	3,2	3,7
10	3,4	3,4	4,0
100	3,6	3,6	4,2
1000	3,7	3,7	4,4



Mynd 15 Líkindadreifing sjávarhæðar við Vík þar sem tekið er tillit til sjávarhæðar með mismikinn áhlaðanda, í fyrsta lagi eingöngu með þrýstingsáhlaðanda, þá með þrýstings- og vindáhlaðanda og að lokum með þrýstings-, vind- og ölduáhlaðanda.



Upp við ströndina er ölduhæð takmörkuð af sjávardýpi, það er kallað að ölduhæð sé dýpisháð. Þannig hefur það áhrif á líkindadreifingu ölduhæðar hve mikill áhlaðandi er tekinn með í reikningana. Mynd 16 sýnir líkindadreifingu kenniöldu við fjöruna í Vík fyrir sjávarhæð þar sem tekið er tillit til áhlaðanda vegna þrýstings, vinds og öldu. Þar sést að hæð kenniöldu, H_s , með 1 árs endurkomutíma er tæpir 2,2 m þar sem tekið er tillit til sjávarhæðar með ofangreindum áhlaðanda. Sambærileg tala fyrir 10 ára endurkomutíma er 2,35 m og 2,5 m fyrir 100 ára endurkomutíma.



Mynd 16 Endurkomutími dýpisháðar kenniöldu, H_s , í fjöruborði framan við Vík í Mýrdal. Byggt á sjávarhæð með vind-, öldu og þrýstingsáhlaðanda úr hermda gagnasafninu.

Með *Multivariate Extreme Value Modelling* aðferðinni hefur 40 ára sögulegri tímaröð af haf- og verðurfræðilegum gögnum verið notuð til að herma safn af 350.000 óháðum aftaka atburðum sem samsvara um 10.000 árum. Slíkt gagnasafn nýtist nú við mat á flóðatburðum og gefur möguleika að meta endurkomutíma þeirra.

Við næmnigreiningu á punktum á grunnslóð kom fram að það sé hverfandi munur á þeim 4 punktum sem voru til athugunar á 7 m dýpi sunnan við fjöruna í Vík. Því verður einungis notast við einn þeirra, punkt P3 (milli sandfangaranna) til að meta flóðhættu í Vík í Mýrdal.



5 Mat á upprennslis og ágjöf yfir flóðvarnargarðinn í Vík

Í kaflanum hér á undan er fundin líkindadreifing öldu og sjávarhæðar upp við ströndina í Vík. Fyrir sjávarhæðina er litið til stjarnfræðilegra sjávarfalla auk áhlaðanda af völdum lágs loftþrýstings, vindáhlaðanda af völdum álandsvinds og ölduáhlaðanda upp við ströndina. Á hafi er líkindadreifing öldu háð veðurkerfunum sem mynda ölduna en á grunnslóð er aldan dýpisháð. Þannig tvinnast saman sjávarhæð og ölduhæð upp við ströndina.

Í þessum kafla verður fjallað um áhrif þessa samspils öldu og sjávarhæðar upp við ströndina. Fyrst verður fjallað um upprennslisshæð, sem er sú hæð sem hver stök alda nær eftir að hafa brotnað á sjávarströnd eða sjóvarnarmannvirki. Áður fyrr var hæð sjóvarnarmannvirkja miðuð við 2% upprennslisshæð, sem þýðir að upprennslis 98% alda á ákveðnu tímabili, t.d. hálf tíma eða klukkutíma, en upprennslis 2% aldanna var jafnt eða hærra.

Síðan verður fjallað um ágjöf en það er magn sjávar sem gefur yfir náttúrulega sjávarkamb eða sjóvarnarmannvirki. Nútil dags miðast hönnun yfirleitt við að uppfylla kröfur um að ágjöf sé innan ákveðinna marka. Annars vegar er fjallað um meðalággjöf yfir ákveðið tímabil, t.d. hálfan eða heilan klukkutíma, á hvern lengdarmetra strandar eða mannvirkis á strönd. Hann mælist þá í einingunum l/s/m eða m³/s/m. Hins vegar er fjallað um mestu ággjöf, þ.e. mestu ággjöf stakrar öldu á ákveðnu tímabili á hvern lengdarmetra. Hann mælist í einingunum l/m eða m³/m.

Við mat á hæð upprennslis og ágjöf yfir flóðvarnargarð voru notaðar aðferðir og jöfnur úr ággjafarleiðarvísunum EurOtop 2018. Hæð 2% upprennslis og ágjöf yfir flóðvarnargarðinn var reiknað fyrir hvern atburð í hermda gagnasafninu og endurkomutími metinn.

5.1 Hæð 2% upprennslis

2% upprennslisshæð er sú hæð í fjöru eða á sjóvarnarmannvirki sem 2% af öldum ná upp í. Við mat á 2% upprennslis í fjörunni í Vík í Mýrdal var notast við jöfnur 5.1 í ággjafarleiðarvísunum EurOtop 2018. Þar sem $R_{u2\%}$ er hæðin (í metrum) sem 2% af öldum ná upp í.

$$R_{u2\%} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \cdot H_{m0}$$

og að hámarki:

$$R_{u2\%} = 1,0 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot \left(4 - \frac{1,5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right)$$

Þá er H_{m0} hæð kenniöldu neðst í fjörunni, við hæðarlínu +0,0 m í hæðarkerfi SH2020, γ_f er hrífni/gleypnistuðull fjörunnar, γ_β er stuðull sem tekur tillit til þess ef alda kemur undir horni, γ_b er svokallaður bermustuðull sem tekur til áhrifa grjótberru eða stalls framan við eða framan á sjóvarnarmannvirki og $\xi_{m-1,0}$ er brotstuðull sem byggist á halla fjörunnar, hæð kenniöldu og öldulengd á hafi ($L_{m-1,0} = g T_{m-1,0}^2 / (2\pi)$).

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{(H_{m0} / L_{m-1,0})^{1/2}}$$

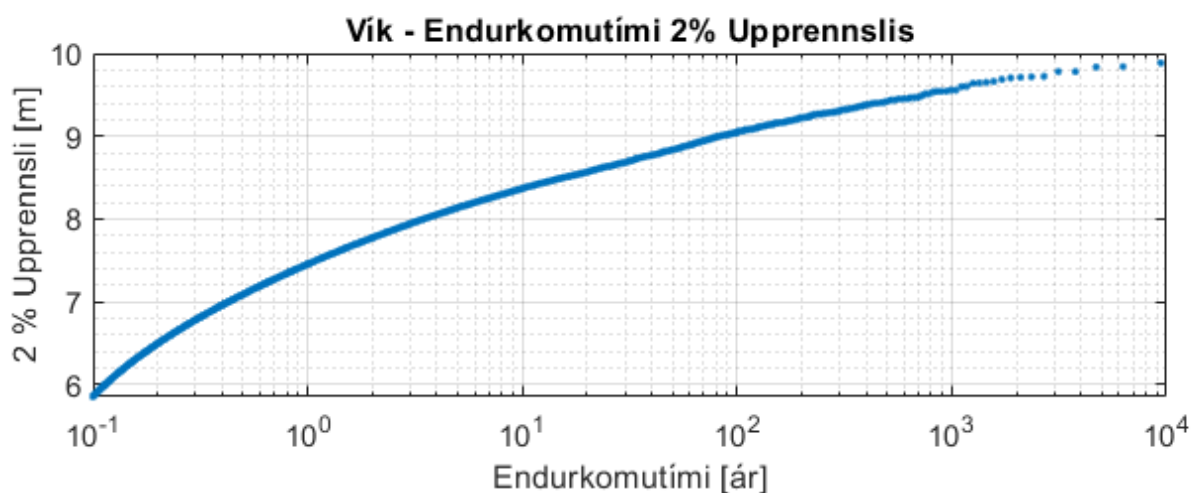
Landslagið sem sjórinn rennur yfir á þessu svæði er sandur og graslendi efst í fjörunni. Því var hrífni/gleypnistuðullinn metinn sem 0,9. Eingöngu er tekið tillit til öldu sem lendir hornrétt á ströndinni og því er gildið 1 notað fyrir γ_β , sömuleiðis er γ_b metinn sem 1 þar sem um náttúrulega strönd er að ræða án grjótberru eða stalls sem draga myndi úr upprennslis. Þá er halli strandar upp að flóðvarnargarðinum sem er í hæð +7,1 m í hæðakerfinu SH2020 talinn vera um 1:8.



Mynd 17 og tafla 5 sýna endurkomutíma 2% upprennslis við eystri sandfangarann þar sem tekið er tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð. Þar kemur fram að á hverju ári megi búast við að upprennslis náði upp í um 7,5 m hæð, í um +8,4 m að jafnaði á 10 ára fresti og í um +9,1 m með 100 ára endurkomutíma.

Tafla 5 Upprennslishæð við eystri sandfangarann og endurkomutími hennar þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð.

Endurkomutími	Upprennslis [m]
1 ár	7,5
10 ár	8,4
100 ár	9,1
1000 ár	9,6



Mynd 17 Endurkomutími 2% upprennslis við eystri sandfangarann þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð.

5.2 Meðalágjöf og mesta ágjöf yfir flóðvarnargarðinn

Ágjöf hermda gagnasafnsins var metinn með jöfnu 5.12 úr EurOtop 2018 ágjafarleiðarvísinum, rituð hér fyrir neðan. Þessi jafna er notuð til að meta ágjöf yfir frekar aflíðandi strönd. Lýsingar á breytunum í jöfnunni hér fyrir neðan má finna í kafla 5.1 hér á undan.

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.026}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1.0} \cdot \exp \left[- \left(2.5 \frac{R_c}{\xi_{m-1.0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right]$$

Mynd 18 sýnir líkindadreifingu meðalágjafar yfir flóðvarnargarðinn í Vík þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð.



Magn meðalágjafar yfir núverandi flóðvarnargarð í hæð +7,1 m í hæðarkerfi SH2020 með 1 árs, 10, 100 og 1000 ára endurkomutíma er að finna í töflu 6. Þar kemur fram að á hverju ári megi búast við meðalágjöf upp á um 10 l/s/m og að jafnaði um 130 l/s/m á 100 ára fresti.



Mynd 18 Líkindadreifing meðalágjafar [l/s/m] yfir flóðvarnargarðinn í Vík með hæðina +7,1 m SH2020 þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð.

Tafla 6 Endurkomutími meðalágjafar [l/s/m] yfir flóðvarnargarðinn í Vík með hæðina +7,1 m SH2020 þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð.

Endurkomutími	Ágjöf [l/s/m]
1ár	10
10 ár	50
100 ár	130
1000 ár	280

Mesta ágjöf einnar stakrar öldu var einnig reiknuð fyrir hvern atburð í hermda gagnasafninu þar sem var einnig notast við jöfnur í ágjafarleiðavísinum EurOtop 2018. Mesta ágjöf einnar öldu byggist á mestri mögulegri meðalágjöf (jafna 5.13 í EurOtop 2018):

$$q = \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \cdot 0.1035 \cdot \exp\left(-\left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma^*}\right)^{1.3}\right),$$

hlutfall fjölda alda á einni klukkustund og fjölda alda sem ná yfir varnargarðinn (jafna 6.3 í EurOtop 2018):

$$P_{ov} = \frac{N_{ow}}{N_w} = \exp\left(-\left(\sqrt{-\ln 0.02} \frac{R_c}{R_{u,2\%}}\right)^2\right),$$

og stuðlunum a og b (jöfnur 6.17 og 6.18 í EurOtop 2018):

$$a = \left(\frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}\right) \left(\frac{q T_m}{P_{ov}}\right),$$



$$b = 0.85 + 1500 \left(\frac{q}{qH_{m0}T_{m-1,0}} \right)^{1.3}$$

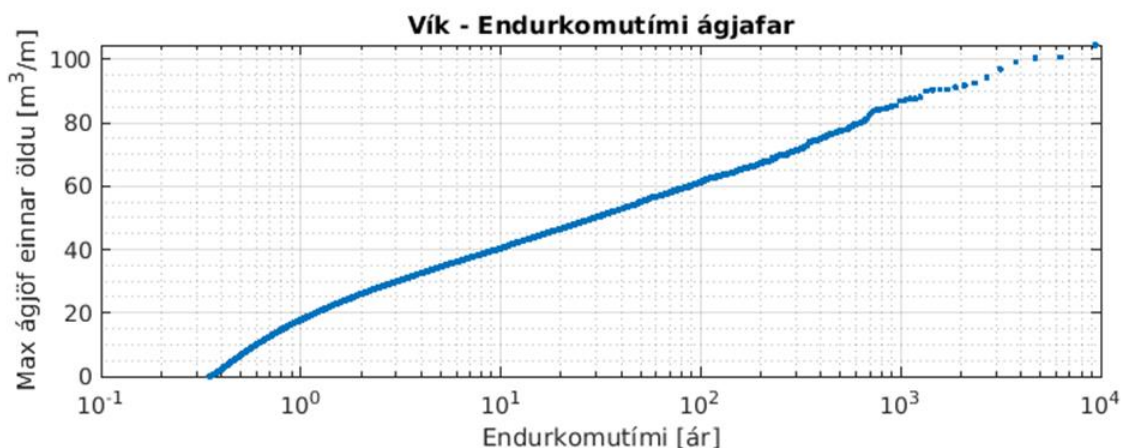
Þá má reikna mestu ágjöf einnar stakrar öldu í m^3/m eða l/m með jöfnu 4.6 í EurOtop 2018:

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

Mynd 19 sýnir líkindadreifingu mestu ágjafar einnar öldu byggt á hermda gagnasafninu. Tafla 7 sýnir mestu ágjöf með 1 árs, 10, 100 og 1000 ára endurkomutíma.

Tafla 7 Endurkomutími mestu ágjafar stakrar öldu [l/m] yfir flóðvarnar-garðinn í Vík þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð.

Endurkomutími	Ágjöf [l/m]
1 ár	18.000
10 ár	40.000
100 ár	61.000
1000 ár	87.000



Mynd 19 Líkindadreifing mestu ágjafar stakrar öldu [m^3/m] yfir flóðvarnar-garðinn í Vík þar sem tekið hefur verið tillit til allra þriggja áhrifaþátta áhlaðanda á sjávarhæð. Ath. lóðrétti kvarðinn á myndinni er m^3/m en umfjöllun um ágjöf í skýrslunni er í l/m .

5.3 Viðmiðunarkröfur fyrir ágjöf samkvæmt EurOtop 2018.

Ágjafarleiðarvísirinn EurOtop 2018 setur fram viðmiðunarkröfur fyrir ágjöf við margskonar aðstæður. Annars vegar eru settar viðmiðunarkröfur fyrir meðalágjöf og hins vegar fyrir mestu ágjöf. 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 hins vegar réttara að miða við mestu ágjöf á 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. Fyrir aðstæður sem líkastar eru aðstæðum í Vík eru settar fram viðmiðunarkröfur á bilinu 5 til 10 $l/s/m$. Það fer síðan eftir eðli afleiðinga þess að ágjöfin fari yfir þessi mörk við hvaða endurkomutíma er miðað.

Viðmiðunarkröfur fyrir akandi umferð innan við sjóvarnargarð samkvæmt EurOtop ágjafarleiðarvísinum eru gefin í töflu 8. Leifileg meðalágjöf er háð ölduhæð fyrir framan sjóvarnargarðinn. Þar sem alda framan við garðinn er hærri eru kröfur um meðalágjöf strangari en þar sem ölduhæð er lægri. Kröfur til mestu ágjafar eru hins vegar þær sömu óháð öldu framan



við sjóvarnargarð. Þetta er rökrétt þar sem það er mesta ágjöfin eða stærsta gusan sem er ákvarðandi. Þannig þarf að hanna sjóvörn við fyrirhugaðan veg við ströndina í Vík þannig að mesta ágjöf, stærstu gusur, verði ekki meira en 2000 l/m. Það skal jafnframt tekið fram að gusa af þessari stærðargráðu er töluvert stór og getur því verið hættuleg fyrir akandi umferð. Því þarf hönnun að miðast við að endurkomutími slíks atburðar verði nokkuð hár.

Samkvæmt Mynd 19 þá er endurkomutími ágjafar yfir núverandi flóðvarnargarð sem nemur 2000 l/m um 0,5 ár, þ.e. slíkur atburður á sér að jafnaði stað tvisvar á ári. Hönnunarkröfur fyrir veg sem lægi meðfram ströndinni og varinn væri með sjóvarnargarði ættu hins vegar að vera miðað við atburð með endurkomutíma um 50 eða 100 ár.

Tafla 8 Viðmiðunarkröfur fyrir meðalágjöf og mestu ágjöf fyrir akandi umferð innan við sjóvarnargarð samkvæmt EurOtop 2018.

Hæð kenniöldu, H_{m0} [m]	Meðalágjöf [l/s/m]	Mesta ágjöf [l/m]
3	<5	2000
2	10-20	2000
1	<75	2000

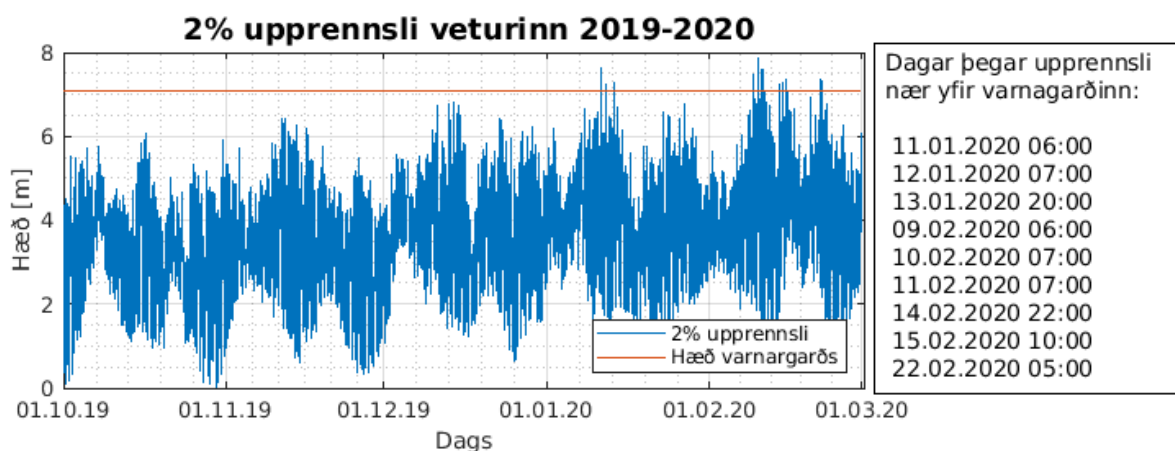


6 Reiknuð ágjöf og upprennsli í þekktum atburðum

Reiknuð var hæð 2% upprennslis og ágjöf yfir flóðvarnargarðinn fyrir þrjú tímabil, veturinn 2020, desember 2015 og janúar 1990 með sama hætti og í kaflanum á undan. En líkt og áður kom fram þá fæddi yfir varnargarðinn í janúar og febrúar 2020 og auk þess flæddi í tvígang desember 2015 og einu sinni í janúar 1990, svo vitað sé. Það eru ótal fleiri atvik á undanförunum árum en hér verður eingöngu fjallað um þessi þrjú tímabil.

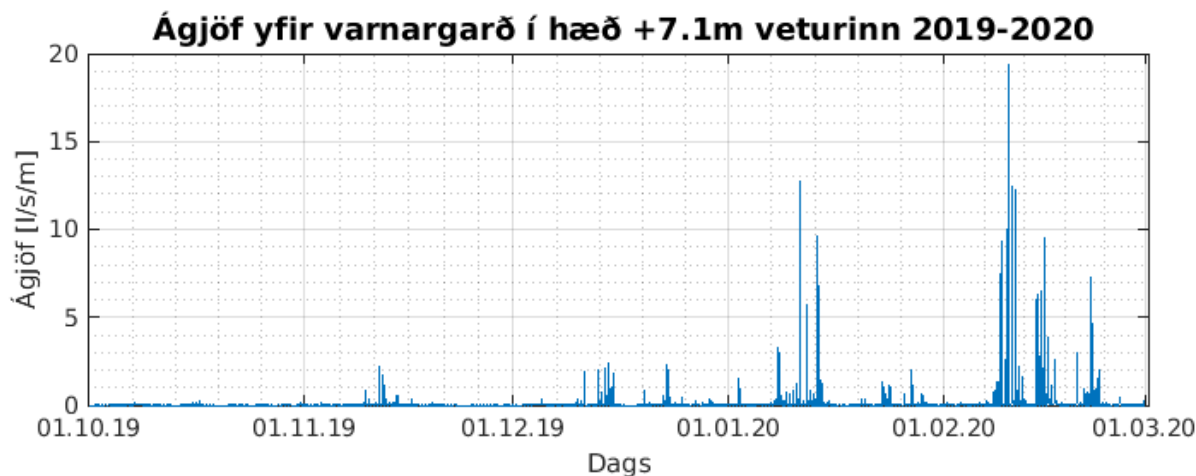
6.1 Veturinn 2019-2020

Líkt og sést á Mynd 20 þá náði reiknuð hæð 2 % upprennslis yfir +7 m hæð í alls 9 daga yfir veturinn 2019-2020. Þá náði upprennslið tæplega upp í +8 m hæð þann 10. febrúar sem er töluvert yfir hæð flóðvarnargarðsins. Skipta má þessum 9 dögum í 5 tilfelli þar sem 2% upprennsli nær yfir hæð flóðvarnargarðsins yfir samfellt tímabil.



Mynd 20 Hæð 2% upprennslis upp ströndina við eystri sandfangarann veturinn október 2019 - febrúar 2020. Hæð flóðvarnargarðs merkt með rauðri línu.

Við mat á ágjöf yfir flóðvarnargarðinn á þessu tímabili kemur í ljós að veruleg ágjöf (meira en 5 l/s per m) þá daga sem 2% upprennsli var hærra en flóðvarnargarðurinn. Mest náði ágjöfin í tæpa 20 l/s/m þann 10. febrúar sem svarar til atburðar með um það bil 5 ára endurkomutíma, sjá Mynd 21.

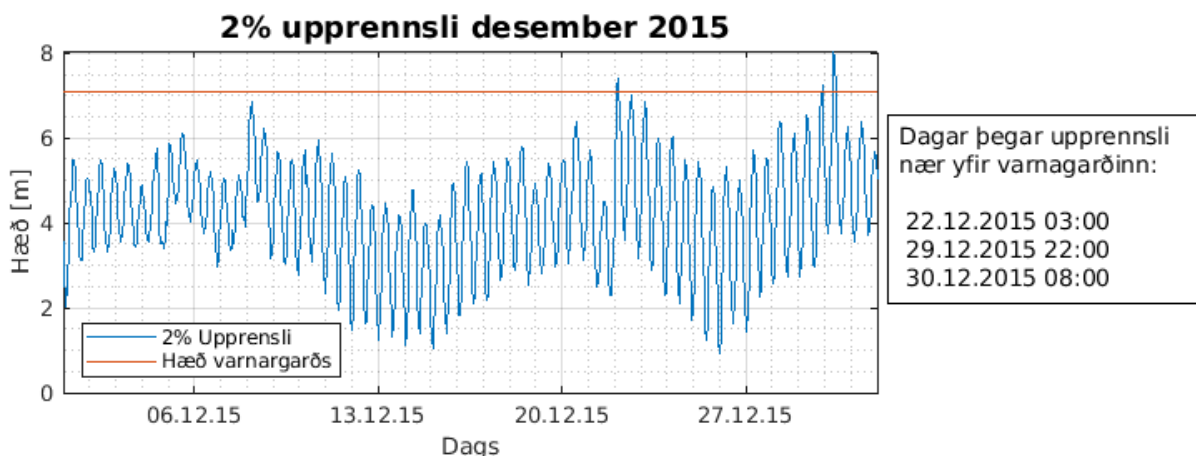


Mynd 21 Ágjöf yfir flóðvarnargarð með hæðina +7,1 m á móts við eystri sandfangarann veturinn október 2019 - febrúar 2020



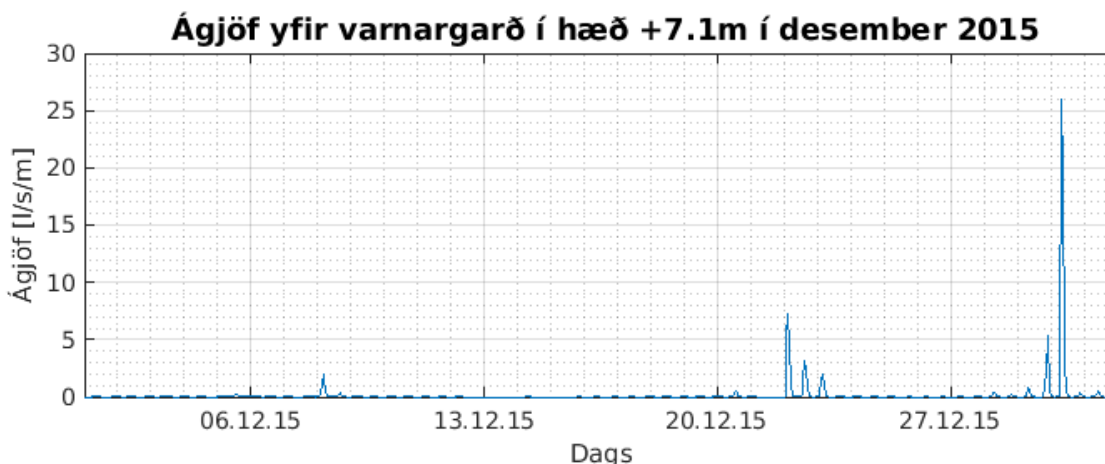
6.2 Desember 2015

Við mat á 2% upprensli í desember 2015 koma í ljós tvö atvik þar sem upprenslið náði upp í +7 m líkt og sjá má á Mynd 22. Dagarnir 29. og 30. des eru taldir sem eitt atvik því það átti sér stað á innan við 24 klukkustundum. Samkvæmt útreikningum náðu öldurnar yfir varnargarðinn 22. og 30. desember 2015 en samkvæmt heimildum heimamanna þá flæddi einnig yfir hann þann 7. desember. Atvikið má sjá á myndinni þar sem ferillinn nær rétt upp að hæðinni +7.1 m og þó það greinist ekki sem 2% upprenslis atburður þá má samt sjá á Mynd 23 að það hafi þó gefið yfir garðinn þann dag.



Mynd 22 Hæð 2% upprenslis upp ströndina við eystri sandfangarann í desember 2015. Hæð flóðvarnargarðs merkt með rauðri línu.

Ágjöf yfir flóðvarnargarðinn í desember 2015 var einnig metin samhliða 2% upprenslishæðinni. Líkt og sjá má á Mynd 23 þá gaf verulega yfir flóðvörnina (meira en 5 l/s/m) þá daga sem 2% upprenslishæð nær yfir hæð varnargarðsins. Þá hefur einnig gefið aðeins yfir varnargarðinn þegar 2% upprenslishæð nær yfir + 6,0 m.

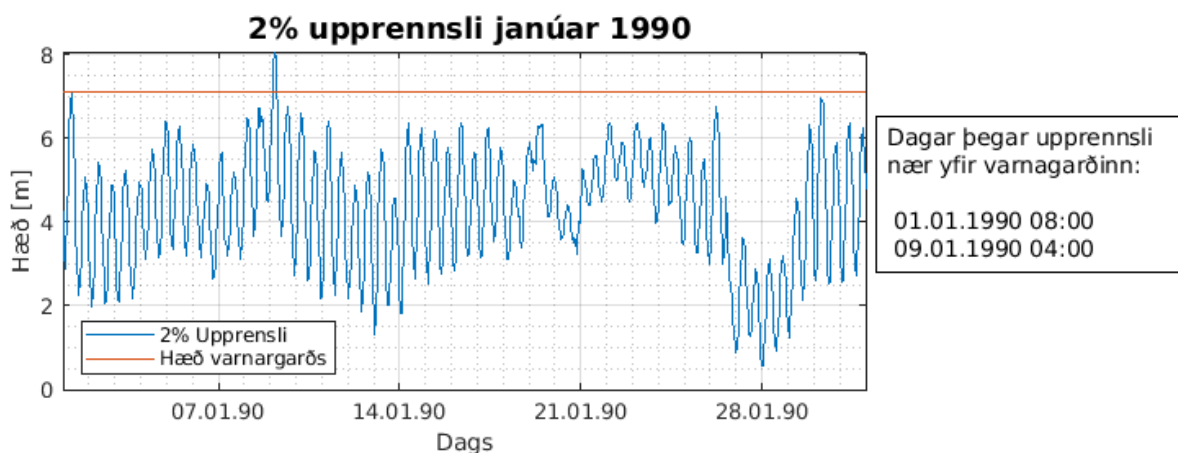


Mynd 23 Ágjöf yfir flóðvarnargarð með hæðina +7,1 m á móts við eystri sandfangarann desember 2015.

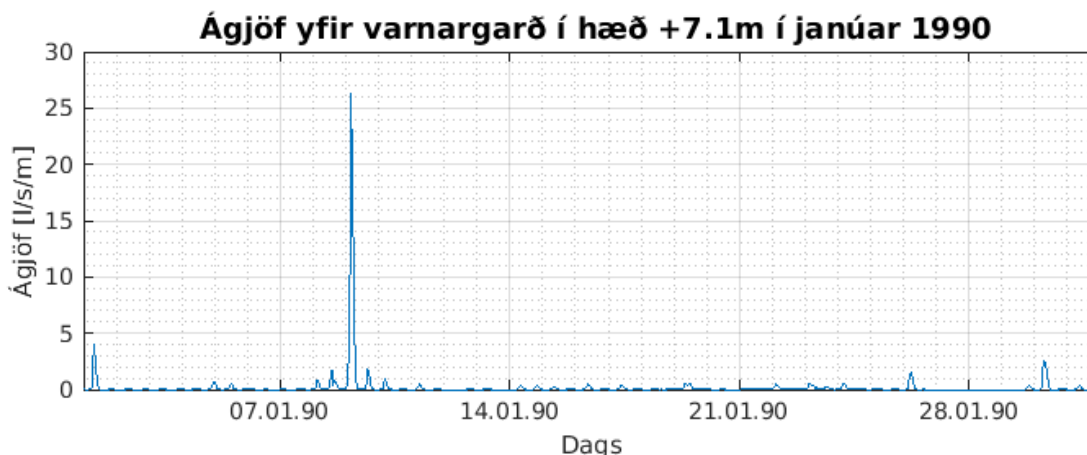


6.3 Janúar 1990

Við mat á 2% upprensli öldu fyrir janúar 1990 koma fram tveir atburðir þar sem 2% upprensli nær eða yfir flóðvarnargarðinn, Mynd 24. Þann 9. janúar nær upprenslið upp í +8 m samkvæmt núverandi aðstæðum, en ströndin var mun framar á þeim tíma og því alls óvíst að það hafi ollið flóðum upp við byggðina líkt og hefði gerst veturinn 2020 ef sama veður hefði þá skolið á. Ef aðstæður á þeim tíma hefðu verið þær sömu og nú má búast við að það hafi verið allt að 25 l/s/m ágjöf yfir varnargarðinn þann 9. janúar líkt og sjá má á Mynd 25.



Mynd 24 Hæð 2% upprenslis á móts við eystri sandfangarann í janúar 1990. Hæð flóðvarnargarðs merkt með rauðri línu.



Mynd 25 Ágjöf yfir flóðvarnargarð með hæðina +7,1 m á móts við eystri sandfangarann janúar 1990.

6.4 Áhrifaþættir í þekktum flóðaatburðum

Eins og komið hefur fram í þessum kafla þá hefur 2% upprensli náð um eða yfir +8 m hæð í minnst þrem aðskildum atburðum á síðastliðnum 30 árum. Ekki er vitað til þess hvort fleiri atvik hafa átt sér stað þar sem 2% upprensli hafi náð slíkri hæð en margt bendir til þess að líklegt er að svo sé. Atburðir af þessu tagi ættu að hafa um 100 ára endurkomutíma en niðurstöður hermda gagnasafnsins sem og athugun þekktra atburða undanfarin 30 ár bendir til þess að endurkomutími þess að 2% upprensli öldu nái í +8 m hæð sé u.þ.b. 10 ár.

Ágjöf yfir varnargarða verða vegna samspils ýmissa þátta, svo sem hæð sjávar, ölduhæð, öldustefnu og veðurfari. Vitað er að það flæðir vart yfir varnargarði við lyngan sjó þó



sjávaryfirborð sé hátt, né flæðir yfir þrátt yfir háar öldur þegar sjávarborð liggur lágt. Því er vert að brjóta flóðaatburði niður í helstu áhrifaþættina til að sjá hvaða þáttur spilaði mest inn í hverju sinni. Í töflu 9 má sjá að atburðirnir í janúar 1990 og desember 2015 eru mjög svipaðir, þar sem sjávarstaða er svipuð og hæð kenniöldu svipuð, þá er atburðurinn í febrúar 2020 aðeins veigaminni en hinir tveir þrátt svipaða sjávarstöðu. Vindáhlaðandi átti engan þátt í sjávarstöðu í neinum af atburðunum, enda engar forsendur fyrir því.

Tafla 9 Áhrifaþættir í þekktum flóðaatburðum, upprennishæð og ágjöf

Atburður	9. jan 1990	30. Des 2015	10. feb 2020
2% upprennishæð [m]	8,1	8,1	7,9
Ágjöf yfir varnargarð [l/s/m]	26	26	19,5
Sjávarstaða/stjarnfræðileg [m]	3,6 / 2,5	3,6 / 2,4	3,5 / 2,8
Þrýstingsáhlaðandi [m]	0,4	0,6	0,5
Vindáhlaðandi [m]	0	0	0
Ölduáhlaðandi [m]	0,7	0,6	0,2
Kennialda á 7m dýpi [m]	5,6	5,6	3,2
Kennialda við fjöruborð [m]	2,1	2,1	2,0
Vindhraði [m/s]	24	23	11
Vindátt	VSV	VSV	NV



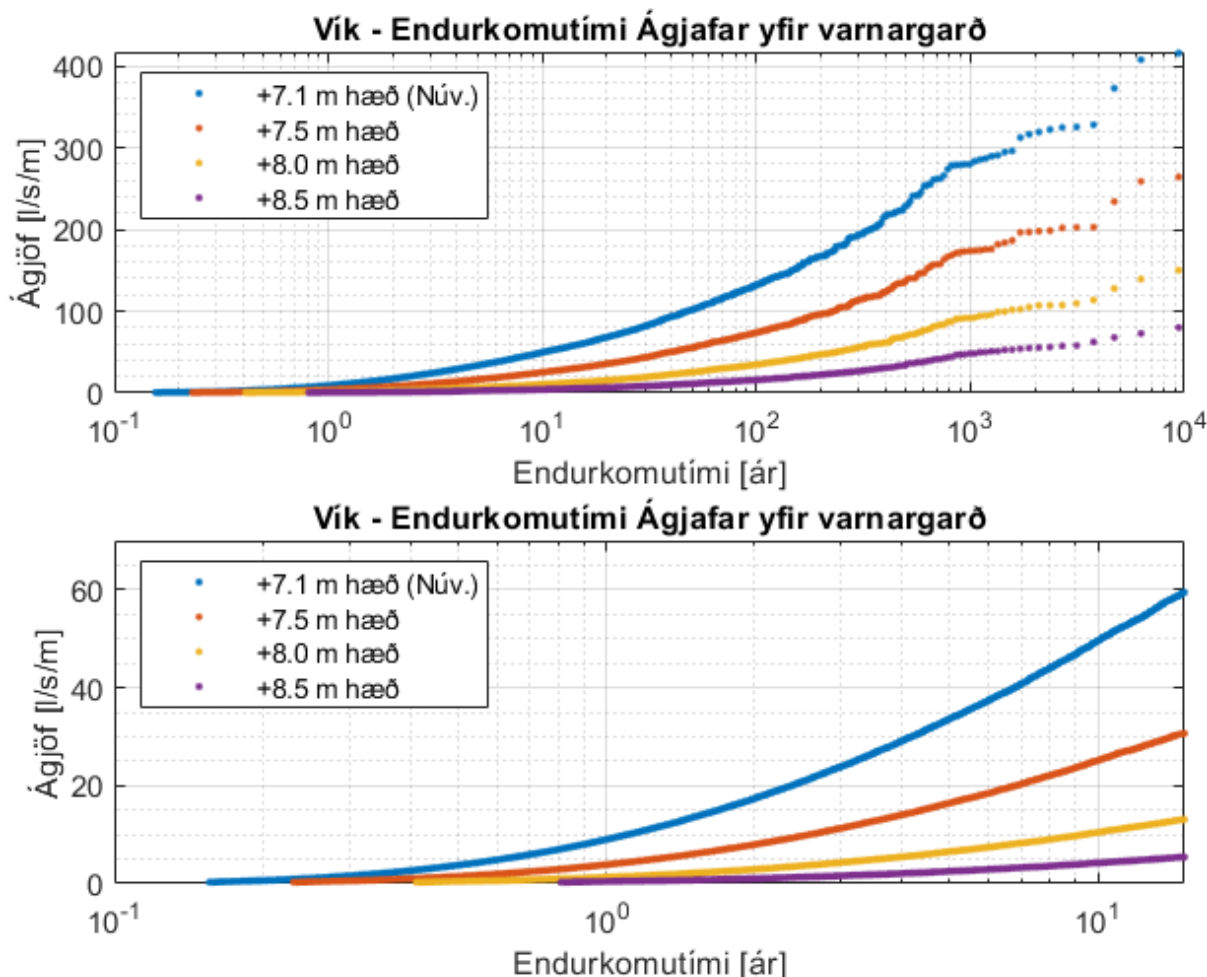
7 Æskileg hæð flóðvarnargarðs og sjóvarnar við veg

Hér verður fjallað um æskilega hæð tvenns konar varnarmannvirkja. Annars vegar er það flóðvarnargarður svipaður þeim sem fyrir er í fjörunni. Tilgangur hans er að koma í veg fyrir að mikið flæði inn á landið innan við garðinn þannig að tjón hljótist af. Ekki þarf að koma í veg fyrir að lítilsháttar flæði yfir garðinn á nokkurra ára fresti enda eru ekki viðkvæm mannvirki eða starfsemi alveg upp við garðinn. Þá afmarkar garðurinn varnarlínu gagnvart rofi. Rof fjörunnar skal ekki ná inn fyrir garðinn.

Hins vegar verður fjallað um sjóvarnargarð við veg sem liggur eftir fjörunni. Í því tilfalli þarf að takmarka ágjöf yfir sjóvarnargarðinn það mikið að umferð stafi ekki hætta af.

7.1 Flóðvarnargarður

Mynd 26 sýnir líkindadreifingu meðalágjafar yfir flóð- eða sjóvarnargarð í Vík. Þar kemur fram að árleg ágjöf yfir núverandi garð í hæðinni +7,1 m SH2020 er um 10 l/s/m. Myndin sýnir bæði ferla fyrir núverandi hæð flóðvarnargarðs ásamt hærri gördum, +7,5, +8,0 og +8,5 m. Í kaflanum hér fyrir framan er fjallað um atburði síðastliðins vetrar og talið að ágjöfin yfir garðinn hafi mest orðið um 20 l/s/m.



Mynd 26 Líkindadreifing meðalágjafar yfir flóð- eða sjóvarnargarð í Vík fyrir hæð varnar frá +7,1 m til +8,5 m SH2020. Neðri myndin sýnir stækkaða mynd af ágjöf fyrir lágan endurkomutíma.



Ekki er einhlítt hvaða kröfur eigi að gera fyrir flóðvarnargarð eins og í Vík. Þó að flætt hafi yfir garðinn s.l. vetur sem nemur um 20 l/s/m þá hlutust engar verulegar skemmdir af. Hins vegar fylgja slíkum flóðum óþægindi og ekki síst óöryggi.

Hér er lagt til að flóðvarnargarðurinn verði hækkaður þannig að árleg ágjöf verði innan við 5 l/s/m. Það svarar til þess að garðurinn verði hækkaður um sem nemur 0,5 m í +7,6 m hæð SH2020. Með þessu er ekki verið að koma í veg fyrir ágjöf yfir garðinn en að draga verulega úr henni.

7.2 Sjóvarnargarður við veg

Líkt og kemur fram í kafla 5 mælir EurOtop 2018 með því að mesta ágjöf stakrar öldu sé innan við 2000 l/m við veg meðfram strönd af öryggisástæðum. Fari ágjöfin yfir þessi mörk geti það verið hættulegt jafnvel fyrir bíl sem ekið er hægt eftir veginum, þar sem hætta er á að billinn fljóti upp. Því þarf endurkomutími slíks atburðar að vera nokkuð hár.

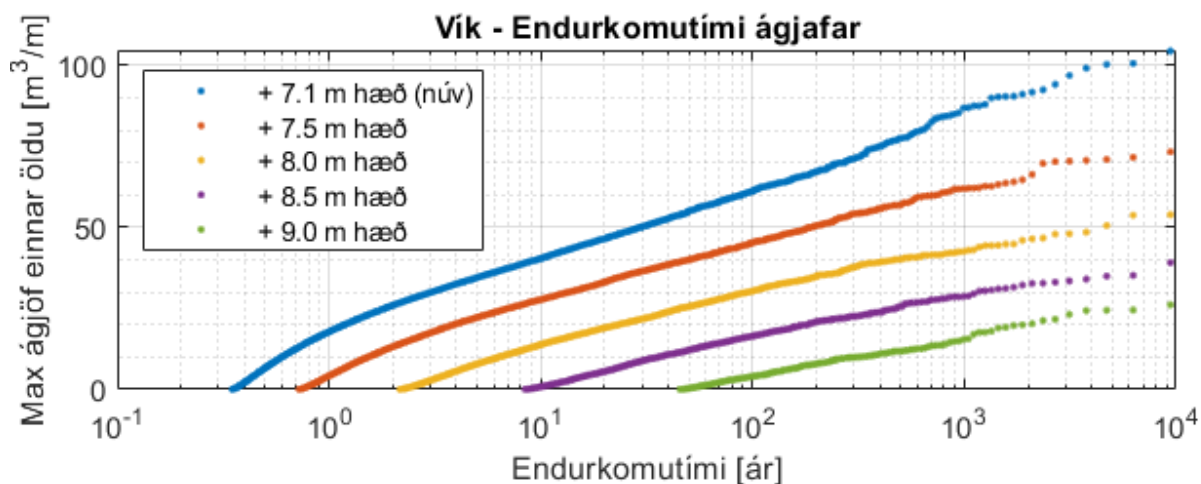
Fyrir nýjan veg sem liggur að og frá göngum í gegnum Reynisfjall eru hér settar þær kröfur til sjóvarnargarðs að ágjöf sem nemur 2000 l/m komi að jafnaði ekki tíðar en á um 50 til 100 ára fresti.

Ef að gera ætti ráð fyrir að fólk gæti gengið meðfram vegi þyrfti að gera strangari kröfur því að talið er að ágjöf sem nemur um 600 l/m geti verið hættuleg fyrir gangandi vegfarendur.

Annar kostur væri að setja upp viðvörnarkerfi og loka vegi þegar hætta er á að ágjöf fari yfir viðmiðunarmörk.

Mynd 27 sýnir líkindadreifingu ágjafar stakrar öldu fyrir hæð sjóvarnar á bilinu +7,1 m til +9,0 m SH2020. Þá gefur tafla 10 magn ágjafar stakrar öldu fyrir endurkomutíma á bilinu 1 til 1000 ár.

Þar kemur fram að til að viðmiðunarmörk séu uppfyllt með endurkomutíma um 50 til 100 ár þá þurfi hæð sjóvarnar að vera í um +9,0 m SH2020.



Mynd 27 Líkindadreifing ágjafar stakrar öldu fyrir hæð sjóvarnar á bilinu +7,1 m til +9,0 m SH2020. Ath. lóðrétti kvarðinn á myndinni er m³/m en umfjöllun um ágjöf í skýrslunni er í l/m.



Tafla 10 Endurkomutími ágjafar stakrar öldu sjóvarnargarða með hæð á bilinu +7,1 m til +9,0 m SH2020.

Endurkomutími [ár]	Ágjöf yfir varnarmannvirki/vegstæði í hæð [l/m]				
	+7,1 m	+7,5 m	+8,0 m	+8,5 m	+9,0 m
1	17.700	4.200	0	0	0
10	40.400	27.700	13.800	800	0
100	61.200	45.300	30.300	16.400	4.000
1000	87.000	62.000	43.000	28.800	15.600



8 Tilvitnanir

1. Kamphuis (2000). „*Introduction to coastal engineering and management: 2nd edition*“. World Scientific.
2. 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
3. Bryndís Tryggvadóttir (2020) *Mat á aftaka sjávarflóðum: Innleiðing aðferða sem byggist á samlíkum útgilda*. Lokaverkefni í MSc námi við Umhverfisverkfræði hjá Háskóla Íslands. Reykjavík.
4. 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.
5. Fjarhitun, Gylfi Ísaksson, 1994. Lágsvæði – 2. áfangi {2. hluti}, Vík í Mýrdal, Landeyðing, skipulagsmat og tillögur um aðgerðir. Fyrir Vita og hafnamálastofnun, Skipulag ríkisins og Viðlagatryggingu Íslands, nóvember 1994.
6. Sigurður Sigurðarson, Pétur Ingi Sveinbjörnsson og Fannar Gíslason (2018) *Vík í Mýrdal, sjávarrof og aðgerðir til að verjast því*. Kötluráðstefna, 100 ár frá upphafi gossins 12. október 1918.
7. Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 1991. Úrvinnsla sjávarfallagagn: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurböf. Jarðvísindastofnun Háskólans