



Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð



Sigurður Sigurðarson

Apríl 2018

Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð

Útgáfa	Dagsetning	Endurskoðun	Útgefið af	Útgefið til
Útgáfa A	2018.04.16		SS	Vegagerðin
Drög C	2017.10.24		SS	Vegagerðin
Drög B	2017.10.02		SS	Vegagerðin
Drög A	2017.09.01		SS	Vegagerðin
Upplýsingar um skýrslu				
Verkkaupi:	Vegagerðin			
Verkefni:	Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð			
Verkefnisnúmer.:	ÖS1750-034/Lágsvæði, viðmiðunarreglur fyrir landhæð			
Aðgengi:	<input checked="" type="checkbox"/> Opið	<input type="checkbox"/> Dreifing háð samþykki verkkaupa	<input type="checkbox"/> Lokað	
Höfundur:	Sigurður Sigurðarson			
Tilvísun:	Sigurður Sigurðarson, 2018. Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð - Útgáfa A. Vegagerðin.			
Forsíðumynd	Sjávarflóð í Húsavíkurböfn 16. nóvember 1982. Ljósmyndari óþekktur			

Helstu niðurstöður

Í skýrslu þessari eru teknar saman aðgengilegar upplýsingar um sjávarhæðir og innbyrðis afstöðu lands og sjávar og þær notaðar til að setja fram viðmiðunarreglur til ákvörðunar á lágmarkslandhæð á byggðum svæðum upp við ströndina. Viðmiðunarreglurnar miðast við að landhæð sé jöfn eða hærri en ákveðin hámarkssjávarstaða þegar líftíma hverfis eða mannvirkis er náð. Hér er sjávarstaða skilgreind sem meðalhæð sjávar yfir eina til 10 mínútur og því ekki tekið tillit til öldu. Þar sem öldu gætir þurfa því að koma til flóðavarnir til að hindra ágjöf sjávar á land.

Stærsti þáttur sjávarfalla víðast hvar á landinu er stjarnfræðileg sjávarföll. Þau hafa verið ákvörðuð og meðalstórstraumsflóðhæð þekkt hringinn í kringum landið. Samt sem áður er einungis ein tímaröð sjávarborðsmælinga hér á landi sem uppfyllir skilyrði fyrir langtíma líkindafræðilegri úrvinnslu. Það eru mælingar úr gömlu höfninni í Reykjavík. Mismunandi aðferðir gefa sjávarhæð með 100 ára endurkomutíma í Reykjavík á bilinu +5,1 til +5,2 m miðað við núverandi afstöðu lands og sjávar. Jafnframt hefur sjávarhæð með 1000 ára endurkomutíma verið ákvörðuð um 12 cm hærri. Svipuð niðurstaða fékkst með reiknilíkani þar sem ein dýpsta lægð síðustu aldar var látin ganga yfir á hæsta stjarnfræðilegu flóði, en reiknislegur endurkomutími slíks atburðar eru af stærðargráðunni 1000 ár.

Annars staðar á landinu þar sem ekki er til líkindafræðileg úrvinnsla sjávarborðsmælinga þá tekur ákvörðun á lágmarkslandhæð mið af meðalstórstraumsflóðhæð að viðbættum áhlaðanda vegna loftþrýstings, vinds og öldu.

Ofan á þetta bætist við hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar í því hlutfalli sem sett er fram í drögum að skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2017 ásamt landhæðabreytingum vegna jarðskorpuhreyfinga. Þar sem veruleg óvissa er á mati á sjávarstöðuhækkun vegna hnattrænnar hlýnunar, óvissa varðandi varmaþenslu og bráðnunar á Grænlandsjökli og Suðurskautslandinu, er hér lagt til að miðað verði við hæsta viðmið, sem gerir ráð fyrir 1,0 m hnattrænni hækkun sjávarstöðu.

Til að taka enn frekar tillit til óvissu um sjávarstöðuhækkun m.a. vegna hnattrænnar hlýnunar, þá er lagt til að lágmarks gólfhæð húsa á lágsvæðum verði 0,3 m hærri en lágmarks landhæð.

Lagt er til að viðmiðunarreglur þessar verði uppfærðar reglulega eftir því sem þekkingu fleygir fram.

Skoðuð eru tvö dæmi þar sem stuðst er við nýjustu upplýsingar um breytingar á afstöðu lands og sjávar, og gefa þau svipaðar niðurstöður á lágmarkslandhæð og áður hafa verið ákvarðaðar. Þannig gefa niðurstöðurnar ekki tilefni til mikilla stefnubreytinga við ákvörðun á lágmarkslandhæð. Hins vegar þurfa sveitarfélög að vera vakandi yfir því að sjóvarnir verði hækkaðar í takt við hækkandi sjávarstöðu.

Úrvinnsla sjávarborðsmælinga frá höfnum landsins sýnir að fyrir utan Reykjavík er ástand þessara mælinga mjög bágborið. Í dag ber enginn opinber aðili ábyrgð á sjávarborðsmælingum en slíkt er nauðsynlegt ef fylgjast á með afstöðubreytingum lands og sjávar. Gerð hefur verið tillaga að mælineti sjávarborðsmæla í samráði við Veðurstofuna og Landmælingar.

Við skoðun á sögulegum gögnum um flóðhæðir er mikilvægt að gera greinarmun á flóðfari á landi og sjávarstöðu. Þar sem alda gefur yfir sjávarkamba og dælir sjó á land verður flóðhæð á landi oft hærri en hæð sjávarins. Flóðfar eru oft sjáanleg á veggjum húsa, þau eru stundum metin af ljósmyndum og þá má oft meta upprensli á flötu landi. Með því að hækka sjóvarnir má minnka ágjöf öldu á land og draga úr hættu á flóðum og að sama skapi dregur úr flóðahættu með hækkun lands á lágsvæðum.

GPS mælingar á lóðréttum hæðarbreytingum vegna jarðskorpuhreyfinga hringinn í kringum landið sýna bæði landsig og landris. Nýjustu rannsóknir benda til þess að sjávarstöðuhækkun í hafinu umhverfis

Ísland geti orðið minni en hækkun á heimsvísu. Í drögum að skýrslu vísindanefndar 2017 er gerð grein fyrir svæðisbundnum breytingum. Þær eru víða um 30% af hnattrænni hækkun en minnst suðaustan lands, um eða innan við 20%. Samanlagðar lóðréttar jarðskorpuhreyfingar og hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar gefa að líklegustu sjávarstöðubreytingar við Ísland á 21. öldinni. Miðað við hnattræna hækkun sem svarar til 100 cm þá verður hækkun sjávarborðs miðað við land mest um 40 til 60 cm á sunnanverðum Reykjaneskaga, við Suðvesturland að Norðvesturlandi og á austanverðum Tröllaskaga. Aftur á móti verður hækkun lands miðað við sjávarborð á suðausturlandi um 70 til 180 cm.

Með hækkandi sjávarstöðu eykst tíðni og umfang flóða. Miðað við tíðnigreiningu flóðhæða í Reykjavík þá má gera ráð fyrir að flóð sem við núverandi afstöðu lands og sjávar hefur um 100 til 200 ára endurkomutíma, hafi um 2 ára endurkomutíma þegar sjávarhæð hefur hækkað um 30 cm. Til að minnka hættu á flóðatjóni þarf því að hækka sjóvarnir í takt við hækkandi sjávarstöðu.

Viðmiðunarreglurnar hafa verið kynntar fulltrúum Skipulagsstofnunar, Viðlagatryggingar og Veðurstofunnar. Ekki voru gerðar athugasemdir og samþykkt að miða við þá aðferðafræði sem þar er lögð fram við skipulag á lágsvæðum.

Skýrsla þessi er unnin fyrir styrk frá Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar. Höfundur skýrslunnar ber ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar

Efnisyfirlit

Helstu niðurstöður.....	3
Efnisyfirlit.....	5
1. Inngangur.....	6
2. Hæðarkerfi.....	7
3. Þættir sem hafa áhrif á sjávarhæð.....	8
4. Stjarnfræðileg sjávarföll.....	10
5. Sjávarborðsmælingar.....	12
Hvað er sjávarborð	12
Tilgangur sjávarborðsmælinga	12
Samfelldar sjávarborðsmælingar.....	13
Tillaga að nýju kerfi sjávarborðsmæla	14
6. Líkindafræðileg úrvinnsla sjávarfallamælinga	15
6.1. Reykjavík – gamla höfnin	15
6.2. Patreksfjörður	17
7. Hæðarbreytingar vegna jarðskorpuhreyfinga	18
8. Afstöðubreyting lands og sjávar vegna hnattrænnar hlýnunar	21
9. Líklegustu sjávarstöðubreytingar við Ísland á 21. öldinni.....	23
10. Áhlaðandi vegna vinds og loftþrýstings.....	24
11. Staðbundin sjávarborðshækkun vegna vind- og ölduáhlaðanda	26
12. Núverandi viðmiðanir við ákvörðun á lægstu gólf- eða landhæð á lágsvæðum	27
13. Greining á aftakasjávarhæð í nokkrum höfnum	29
13.1. Húsavíkurhöfn – endurskoðun á hönnunarsjávarhæð	29
13.2. Flóðaveðrið á Austurlandi 29. til 30. desember 2015	30
13.3. Siglufjörður – ákvörðun á lágmarksgólfkóta.....	30
14. Hætta af sjávarflóðum og sjávarrofi	33
15. Nýjar viðmiðanir fyrir landhæð á lágsvæðum	35
Viðauki 1 – Samband mismunandi hæðarkerfa.....	37

1. Inngangur

Vegagerðin er umsagnaraðili um aðalskipulag og deiliskipulag lágsvæða þar sem hætta er á sjávarflóðum. Í samvinnuverkefni Vita- og hafnamálastofnunar, Skipulags ríkisins og Viðlagatrygginga á árunum 1992 til 1995 voru settar fram tillögur að viðmiðunarreglum fyrir landhæð á lágsvæðum sem stuðst hefur verið við í umsögnum fram að þessu^{1 2}. En þar sem þessar viðmiðunarreglur náðu ekki til alls landsins þá hefur Vegagerðin lítið til að miða við á svæðum sem ekki voru tekin fyrir í fyrra verkefni og einnig hafa spár um hækkandi sjávarstöðu tekið breytingum á tímabilinu.

Hætta af sjávarflóðum hefur verið mikið í umræðunni síðustu misserin og skemmst er að minnst sjávarflóða á Austurlandi í lok ársins 2015. Þá hefur verið mikið fjallað um mögulegar sjávarstöðubreytingar vegna hnattrænnar hlýnunar. Því er nauðsynlegt að fyrir liggi upplýsingar og úrvinnsla gagna til að geta tekið skynsamlega á þeim málum.

Í skýrslu þessari eru teknar saman aðgengilegar upplýsingar um sjávarhæðir og innbyrðis afstöðu lands og sjávar og þær notaðar til að setja fram viðmiðunarreglur til ákvörðunar á lágmarkslandhæð á byggðum svæðum upp við ströndina. Nýjar upplýsingar, mælingar og úrvinnsla, eru hins vegar sífellt að koma fram. Því má gera ráð fyrir að þær viðmiðanir sem hér eru settar fram taki breytingum.

Skýrslan er þannig uppbyggð að í kafla 2 er fjallað um mismunandi hæðarkerfi sem land- og sjávarhæðir eru gefnar upp í. Í köflum 3 og 4 er fyrst fjallað almennt um breytilegar sjávarhæðir en síðan eru sjávarföllin skilgreind hringinn í kringum landið. Sjávarföllin eru skilgreind á grundvelli sjávarborðsmælinga sem fjallað er um í kafla 5 og um líkindafræðilega úrvinnslu slíkra mælinga er fjallað í kafla 6. En til lengri tíma litið er afstaða lands og sjávar ekki föst. Í kafla 7 er fjallað um hæðarbreytingar vegna jarðskorpuhreyfinga og vegna hnattrænnar hlýnunar í kafla 8. Vísindanefnd um loftslagsbreytingar hefur dregið saman niðurstöður þessara þátta sem gefnar eru kafla 9. Í köflum 10 og 11 er fjallað um áhlaðanda vegna vinds, loftþrýstings og öldu. Núverandi viðmiðanir við ákvörðun á lægstu gólf- eða landhæð á lágsvæðum eru gefnar í kafla 12. Í kafla 13 eru gefin dæmi um greiningu á aftaka sjávarhæð og ákvörðun á lágmarkslandhæð og í kafla 14 er fjallað um tjónahættu af sjávarflóðum og sjávarrofi. Að lokum eru í kafla 15 settar fram tillögur að nýjum viðmiðunum fyrir landhæð á lágsvæðum hringinn í kringum landi.

Skýrsla þessi er unnin fyrir styrk frá Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar. Aðstoð við efnisöflun veitti Gísli Viggósson sem um áratuga skeið kom að ýmsum þeim þáttum sem fjallað er um skýrslunni hjá Hafnamálastofnun ríkisins, Vita- og hafnamálastofnun og síðast Siglingastofnun.

¹ Lágsvæði – 1. Áfangi. Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum. Fjarhitun vann fyrir Skipulag ríkisins. Desember 1992.

² Lágsvæði – 2. Áfangi. Skipulags- og byggingarráðstafanir og sjóvarnir. Fjarhitun vann fyrir Vita- og hafnamálastofnun, Skipulag ríkisins og Viðlagatryggingu Íslands, ágúst 1995.

2. Hæðarkerfi

Í gegnum tíðina hafa í flestum sveitarfélögum verið notkuð a.m.k. tvö hæðarkerfi, það er annars vegar bæjarkerfi (BK) og hins vegar hafnarkerfi eða hæðarkerfi Sjósmælinga (SK). Bæjarkerfin voru oft miðuð við meðalsjárvarhæð en það var ekki algilt. Oft voru þau ákvörðuð á grundvelli mjög takmarkaðra gagna áður en nokkrar mælingar á sjávarföllum höfðu farið fram. Bæjarkerfin voru yfirleitt staðbundin og einungis notuð í hverju einstöku bæjarfélagi.

Hafnarkerfin og hæðarkerfi Sjósmælinga miðast við það sem kallað er sjókortanúll þ.e. tiltölulega lága sjávarstöðu sem sjaldgæft er að sjávarborð fari niður fyrir. Flest þessara kerfa byggja á sjávarborðsmælingum sem Hafnamálastofnun ríkisins stóð að á seinnihluta áttunda áratugar síðustu aldar³. Mælt var á hverjum stað í nokkra mánuði og með samanburði við lengri mælingu frá Reykjavík var hægt að ákvarða sjávarföllin. Úrvinnsla mælinganna var gerð í samvinnu við Gunnar Þorbergsson á Orkustofnun. Mælingarnar voru leiðréttar fyrir loftþrýstingi og fjórir helstu sjávarfallapættir greindir auk meðalsjárvarhæðar. Meðalstórstraums og smástraums flóð og fjara voru síðan reiknuð út frá meðalsjárvarhæð og sjávarfallapáttum. Vegna hlutfallslegra meiri veðurfarsþátta fyrir norður og austurlandi er sjókortanúllið hækkað um 5 cm á svæðinu frá Horni austur um land til Hornafjarðar.

Eðli sínu samkvæmt þá eru hafnarkerfin staðbundin en ekki samfelld fyrir allt landið. Þar sem sjávarföll á stórstreymi eru rúmur metri þá er „núll“ í hafnarkerfi rúmlega hálfum metra neðan við meðalsjárvarborð. En þar sem stórstreymið er um 4 m þá er „núll“ í hafnarkerfi um 2 m neðan við meðalsjárvarborð.

Í stað bæjarkerfa er nú víða farið að nota Landshæðakerfi Íslands ISH2004, eitt sameiginlegt hæðarkerfi fyrir allt landið sem ákvarðað er af Landmælingum Íslands. Í grunninn miðast kerfið við meðalsjárvarborð í Reykjavík í ágúst 2004. Kerfið var tengt sjávarborðsmælingum í nokkrum höfnum til viðmiðunar. Samband landshæðakerfis, ISH2004, við hafnar- og bæjarkerfi er gefið Tafla 15 í Viðauka I. Landshæðakerfið hefur ekki enn verið tengt við öll hafnar- eða bæjarkerfi.

Þessi samantekt um mismunandi hæðarkerfi, sem víða eru allt að þrjú í gangi samtímis, sýnir nauðsyn þess að skýrt sé tekið fram í hvaða hæðarkerfi er miðað þegar fjallað er um lágmarkshæð lands á lágsvæðum.

³ Hafnamálastofnun ríkisins, 1980. Sjávarhæðir

3. Þættir sem hafa áhrif á sjávarhæð

Sjávarhæð á hverjum einstökum stað er samspil nokkurra þátta. Víðast hvar við Ísland er stjarnfræðilegi sjávarþátturinn stærstur. Munur á flóði og fjöru á meðalstórstreymi er breytilegur frá því að vera rétt rúmur meter á norðausturlandi í það að vera um 4 m á Faxaflóa og Breiðafirði, samanber Tafla 1 hér að neðan. Aðrir þættir sem hafa áhrif á sjávarhæð eru loftþrýstingsáhlaðandi, vindáhlaðandi og ölduáhlaðandi.

Áhrif loftþrýstings á sjávarborð eru þannig að lækki loftþrýstingur þá hækkar yfirborð sjávar. Áður fyrr var oftast reiknað með að sjávarborð hækkaði um 1 sentimeter fyrir hækkun loftþrýstings um 1 hektópaskal (hPa). Með greiningu á sjávarborðsmælingum úr Reykjavíkurhöfn sýndu Ólafur og Páll⁴, 1991, fram á að sjávarborð hækkar sem svarar til 0,84 sentimeter fyrir lækkun loftþrýstings um 1 hektópaskal. Þessi stuðull er þó ekki alls staðar sá sami og var ákvarðaður sem 0,69 á athugunarstað á austurströnd Honshu eyju í Japan⁵. Hér er ekki gert ráð fyrir miklum breytileika á loftþrýstingsáhlaðanda hringinn í kringum Ísland, þó að það byggji ekki á miklum athugunum. Við ákvörðun á hönnunarsjávarstöðu með 1 árs til 100 ára endurkomutíma hefur hækkun sjávarborðs vegna loftþrýstings verið metin um 0,5 til 0,7 m.

Vindáhlaðandi er töluvert breytilegur allt frá því að vera óverulegur upp í það að ná örfáum tugum sentimetra. Hann er þó svipaður fyrir hvert afmarkað hafsvæði, svo sem fyrir ákveðna vík eða fjörð. Hluttur vindáhlaðanda í hönnunarsjávarstöðu fyrir hafnir á Íslandi hefur víða verið metinn á bilinu 0,1 til 0,3 m.

Við ákveðnar aðstæður getur vindáhlaðandi hins vegar orðið mun hærri. Þetta á við á stöðum þar sem er mjög aðgrunnt og grynningar ná langt út frá ströndinni, t.d. við í norðanverðum Faxaflóa, í Borgarnesi og á Mýrunum. Eftirfarand er byggt á samantekt Gísla Viggóssonar⁶. Í skýrslu um Vesturlandsveg yfir Borgarfjarðarbrú frá 1974 sem Vegagerðin lét gera er greint frá mælingum á flóðmörkum stærstu flóða á nokkrum stöðum í Borgarnesi og nágrenni⁷. Tvö flóðaveður voru skoðuð. Annað olli flóðum við Stykkishólmsveg hjá Borg þann 24. október 1973. Flóðhæð mældist +5,25 m í hæðarkerfi Sjómælinga, um 1,22 m ofan við stjarnfræðilegt flóð og var talið eitt allra mesta sjávarflóð sem menn minnst á þessum stað. Hitt flóðið er kennt við rannsóknarskipið Pourquoi-Pas? sem fórst þann 16. september 1936. Flóðfar þess flóðs var mælt við bæinn Bóndhól skammt ofan við Borgarnes og reyndist vera +5,98 m. Ekki er ljóst hvort þessari flóðhæð var náð á árdegis- eða síðdegisflóði, en loftþrýstingur þennan dag var nærri meðallagi, aðeins neðan við meðallag um morguninn en ofan við meðallag um kvöldið. Flóðið hefur því verið um 2 m herra en stjarnfræðilegt flóð án þess að loftþrýstingur hafi hækkað sjávarstöðuna. Fyrir byggingu Borgarfjarðarbrúar voru aðstæður við Bóndhól frekar óvenjulegar hér á landi sökum þess grynningar ná langt út á mótí vestan vindinum og þá getur Hvítá hafa lagt sitt af mörkum.

Ölduáhlaðandi vegna grunnbrota er mjög breytilegur, hann getur orðið mjög hár á svæðum sem liggja innan við brimgarðinn en er enginn þar sem ekki brimar fyrir framan. Ölduáhlaðandi er yfirleitt sveiflukenndur. Sveiflan á uppruna sinn í ólögum, þar sem nokkrar háar öldur fara saman og síðan lágur á milli, en hún getur magnast ef tíðni hennar er nálægt eigintíðni afmarkaðra strand- eða

⁴ Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 1991. *Úrvinnsla sjávarfallagagna: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurhöfn*. Síðar gefið út af Jarðvísindastofnun Háskólans 2006.

⁵ Yanagishima, S. og Katoh, K., 1991. Field Observation on Wave Set-up near the Shoreline. Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engineering, Vol. 1, ASCE, New York, N.Y.

⁶ Gísli Viggósson, 2017. Hæstu flóð í Borgarnesi, á Seltjarnarnesi, á Grundarfirði og í Reykjavík. Minnisblað

⁷ Verkfræðipjónusta Dr. Gunnars Sigurðssonar, 1974. Vesturlandsvegur yfir Borgarfjörð. Hæð og þyngd grjótvannar. Unnið fyrir Vegagerð ríkisins.

hafnarsvæða. Í höfnum landsins eru þessar sveiflur víða kallaðar sog. Sveiflutími þeirra getur verið frá um hálfri mínútu upp í nokkrar mínútur allt eftir stærð hafnarsvæðanna. Ölduáhlaðanda gætir þar sem brimar fyrir framan hafnarmynni, svo sem í Grindavík, Sandgerði, Bolungarvík, Ólafsfirði og Landeyjahöfn og víðar. Á mjög útsettum stöðum á sunnan og vestanverðu Reykjanesi getur ölduáhlaðandi numið allt að 2 m. Áður en brimvarnargarðarnir í Grindavík voru byggðir var ölduáhlaðandi með 1 árs til 100 ára endurkomutíma metin um 1,1 til 1,5 m.

Básendaflóðið árið 1799 er gott dæmi um ölduáhlaðanda. Þá brotnuðu kaupmannshúsin á Básendum í miklu aftaka veðri og skemmdir urðu víða suðvestan lands. Heimildir geta um mjög háa sjávarstöðu á þeim stöðum þar sem skemmdir urðu. Þessi háa sjávarstaða fellur hins vegar ekki að langtímadreifingu mældrar sjávarhæðar í Reykjavíkurhöfn.

Nýlega var Básendaflóðið skoðað með aðferðafræði strandverkfræðinnar, skýrsla Gísla, Jónasar og Sigurðar⁸. Þar kemur fram að skemmdir verða á stöðum sem eru útsettir fyrir öldu og sérstaklega þar sem svo háttar til að ölduáhlaðandi verður mikill. Við gömlu höfnina í Reykjavík og í Kvosinni eru hins vegar hvorki heimildir um mjög háa sjávarstöðu né skemmdir. Það er vegna þess að þar gætir ekki ölduáhlaðanda. Byggt á niðurstöðum Gísla, Jónasar og Sigurðar er því mjög ólíklegt að flóð á við Básendaflóðið geti náð sömu hæð í Kvosinni og þar sem verulegs ölduáhlaðanda gætir. Því gefur það ótrúverðuga niðurstöðu að flytja áætlaða sjávarstöðu frá Básendum yfir á Kvosina eins og gert er í skýrslu Eflu verkfræðistofu⁹ og tekin er upp á forsiðu Fréttablaðsins þann 19. nóvember 2015¹⁰.

⁸ Gísli Viggósson, Jónas Elíasson og Sigurður Sigurðarson, 2017. Ákvörðun á flóðhæð í Básendaflóðinu. Áfangaskýrsla. Drög 30. mars 2016.

⁹ Anna Heiður Eydísardóttir, 2015. Flóðavarnir fyrir Kvosina. Efla verkfræðistofa.

¹⁰ <http://www.visir.is/paper/fbl/151119.pdf>

4. Stjarnfræðileg sjávarföll

Sjómælingar Íslands hafa síðan 1954 gefið út töflur yfir sjávarföll í Reykjavík og flóðbið annarra staða við Ísland¹¹. Í upphafi byggðust útreikningar taflanna á mælingum á sjávarföllum í Reykjavíkurbíó árið 1951. Nú grundvallast útreikningur töflunnar fyrir Reykjavík á greiningu sjávarfallanna árin 1956 til 1989 í harmoniska stuðla og meðalhæð sjávar. Auk töflunnar fyrir Reykjavík birta Sjómælingar töflur fyrir Ísafjörð, Siglufjörð, Djúpavog og Þorlákshöfn. Þær byggja á athugunum sem gerðar voru á árunum 1972 til 1973 fyrir Ísafjörð, 1976 fyrir Siglufjörð, 1977 til 1980 fyrir Djúpavog og árið 2009 fyrir Þorlákshöfn.

Stjarnfræðilegur þáttur sjávarfalla hringinn í kringum Ísland er breytilegur, hann er hæstur í Faxaflóa og Breiðafirði en lægstur á norðausturlandi. Tafla 1 sem byggir á Sjávarfallatöflum frá Sjómælingum Íslands sýnir sjávarföll á stórstreymi og smástreymi í hafnar- eða hæðarkerfi Sjómælinga Íslands sem miðað er við sjókortanúll á hverjum stað.

Stjarnfræðileg sjávarföll ráðast af afstöðu himintungla þar sem tungl og sól hafa langmest áhrif. Greining Ólafs og Páls¹² á sjávarföllum í Reykjavík sýnir að nokkrar reglulegar sveiflur ráða sjávarföllum, þær stystu með 12 og 24 tíma lotu en sú lengsta sem yfirleitt er notuð er með 18,6 ára lotu

Eins og fram kemur í Tafla 1 þá er meðalstórstraumsflóðhæð í Reykjavík +4,0 m. Samkvæmt Sjávarfallatöflum Sjómælinga er hæsta stjarnfræðilega flóðhæð í Reykjavík +4,62 m. Jónas og Sveinn¹³ hafa reiknað hæstu stjarnfræðilegu flóðhæð með mismunandi endurkomutíma, hæst +4,68 m fyrir 10.000 ára endurkomutíma.

¹¹ Sjávarfallatöflur 2017. Sjómælingar Íslands.

¹² Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 1991. Úrvinnsla sjávarfallagagna: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurbíó. Síðar gefið út af Jarðvísindastofnun Háskólans 2006.

¹³ Jónas Elíasson og Sveinn Valdimarsson, 1993. *Flóðhæðir í Reykjavíkurbíó*. Verkfræðistofnun Háskóla Íslands.

Tafla 1 Stjarnfræðileg sjávarföll miðuð við sjókortanúll úr sjávarfallatöflum Sjómælinga Íslands í hæðarkerfi viðkomandi hafnar¹⁴

Staður	Meðalstór-straumsflóð	Meðalsmá-straumsflóð	Meðalsmá-straumsfjara	Meðalstór-straumsfjara
Vestmannaeyjar	+2,7	+2,0	+0,9	+0,2
Grindavík	+3,3	+2,5	+1,0	+0,2
Sandgerði	+3,7	+2,8	+1,2	+0,2
Keflavík	+3,9	+2,9	+1,3	+0,2
Hafnarfjörður	+4,0	+3,0	+1,3	+0,2
Reykjavík	+4,0	+3,0	+1,3	+0,2
Grundartangi	+4,1	+3,1	+1,4	+0,3
Akranes	+4,0	+3,0	+1,3	+0,2
Borgarnes	+4,0	+2,9	+1,2	+0,2
Rif	+3,9	+3,0	+1,3	+0,2
Ólafsvík	+3,9	+2,9	+1,3	+0,2
Grundarfjörður	+4,1	+3,1	+1,3	+0,2
Stykkishólmur	+4,4	+3,3	+1,5	+0,3
Reykhólar	+4,4	+3,3	+1,2	+0,3
Flatey	+4,2	+3,1	+1,3	+0,2
Brjánslækur	+4,5	+3,4	+1,4	+0,4
Patreksfjörður	+3,2	+2,3	+1,0	+0,2
Tálknafjörður	+3,2	+2,3	+1,0	+0,2
Bíldudalur	+3,0	+2,2	+0,9	+0,1
Þingeyri	+2,9	+2,1	+0,9	+0,1
Flateyri	+2,4	+1,8	+0,8	+0,1
Súgandafjörður	+2,4	+1,7	+0,8	+0,1
Bolungarvík	+2,2	+1,6	+0,7	+0,1
Ísafjörður	+2,2	+1,6	+0,7	+0,1
Súðavík	+2,2	+1,6	+0,7	+0,1
Hólmavík	+1,5	+1,1	+0,5	+0,1
Hrútafjörður	+1,6	+1,2	+0,5	+0,1
Hvammstangi	+1,5	+1,1	+0,4	+0,1
Skagaströnd	+1,5	+1,1	+0,4	+0,1
Sauðárkrókur	+1,3	+1,0	+0,4	+0,1
Siglufjörður	+1,3	+1,0	+0,4	+0,1
Ólafsfjörður	+1,3	+1,0	+0,4	+0,1
Akureyri	+1,4	+1,0	+0,5	+0,1
Grimsey	+1,3	+1,0	+0,4	+0,1
Húsavík	+1,3	+1,0	+0,4	+0,1
Kópasker	+1,2	+1,0	+0,4	+0,1
Raufarhöfn	+1,4	+1,0	+0,4	+0,1
Þórshöfn	+1,4	+1,2	+0,5	+0,1
Vopnafjörður	+1,5	+1,1	+0,5	+0,2
Borgarfjörður-eystri	+1,6	+1,3	+0,6	+0,3
Seyðisfjörður	+1,7	+1,2	+0,6	+0,3
Norðfjörður	+1,5	+1,1	+0,4	+0,1
Eskifjörður	+1,9	+1,4	+0,7	+0,3
Fáskrúðsfjörður	+1,8	+1,3	+0,6	+0,2
Stöðvarfjörður	+1,8	+1,0	+0,6	+0,2
Djúpivogur	+2,2	+1,6	+0,8	+0,3
Höfn í Hornafirði, höfnin*	+1,2	+0,9	+0,4	+0,2

* Ný úrvinnsla sjávarborðsmælinga úr höfninni í Höfn í Hornafirði sýnir breytt útslag sjávarfalla¹⁵.

¹⁴ Sjávarfallatöflur 2017. Sjómælingar Íslands.

¹⁵ Guðjón Scheving Tryggvason, 2016. Sjávarborðsrannsóknir. Úrvinnsla sjávarborðsmælinga frá Hornafirði, Grindavík og Landeyjahöfn. Útgáfa A. Rannsóknarverkefni Vegagerðinar.

5. Sjávarborðsmælingar

Á Íslandi er einungis til ein tímaröð fyrir sjávarborðsmælingar sem kallast getur langtímatímaröð. Það er mæliröðin frá gömlu höfninni í Reykjavík, en hún er nær óslitin frá 1956. Mælirinn er í umsjón Sjómælinga Íslands en rekstur hans hefur síðan 1994 verið kostaðar af Faxaflóahöfnum.

Á seinni hluta áttunda áratugar tuttugustu aldar var gert átak í sjávarborðsmælingum umhverfis landið. Að þessu átaki stóð Hafnamálastofnun ríkisins í samvinnu við Orkustofnun. Tilgangur þessa átaks vara að skilgreina hæðarkerfi fyrir hafnir og siglingar. Á hverjum stað var mælt í stuttan tíma, yfirleitt 2 til 3 mánuði. Mælingarnar voru síðan samkeyrðar við langtímamælingu í Reykjavíkurhöfn og sjávarföllin á viðkomandi stað ákvörðuð.

Í tengslum við uppbyggingu upplýsingakerfis um Veður og sjólag sem Vita- og hafnamálastofnun og síðar Siglingastofnun stóðu að, voru í nokkrum höfnum landsins settir upp sjávarborðsmælar ásamt veðurmælistöðvum í samvinnu við hafnaryfirvöld á hverjum stað. Rekstur mælanna var síðan færður á ábyrgð hafnanna. Tilgangur þeirra mælinga var aðallega upplýsingagjöf til notenda hafnanna um sjávarhæð á hverjum tíma, en einnig var litið til þess að mæla hægfara sjávarstöðubreytingar. Ábyrgðin á rekstri þessara mæla var síðan yfirfærð á viðkomandi höfn.

Hvað er sjávarborð

Á ensku er sjávarborð kallað „still water level“. Þar er vísað til þess að sjávarborð sé hæð sjáar þar sem öldu gætir ekki. Yfirleitt er einhver ölduhreyfing þar sem sjávarborð er mælt og þarf því að miðla mælingar yfir einhvern ákveðinn tíma. Þessi tími er oftast á bilinu 1 mínúta til 10 mínútur. Þannig er sjávarborð hvorki hæð sjávar á öldutoppi né í öldudal, aldan ekki hluti af sjávarborði og þarf því að sían hana frá í mælingum eða úrvinnslu.

Við sjávarborðsmælingar voru áður fyrr yfirleitt notaðir síritandi mælar með floti sem komið var fyrir í röri við hafnarkant. Rörið var oft hálflokað, stundum með litlum götum, þannig að áhrifa öldu gætti sem minnst í mælingunum. Götin áttu það til að stíflast með tímanum sem truflaði mælingar ef ekki var fylgst nægjanlega vel með. Þá var úrvinnslan gerð með aflestri af pappír þannig að þar gafst tækifæri að miðla út áhrifum öldunnar.

Þeir sjávarborðsmælar sem notaðir eru í dag eru allir þrýstimælar. Þeim er oftast komið fyrir í grönnu röri, sem er opið að neðan og fest við hafnarkant. Þeir mæla heildarþrýsting á nema, sem er summa af þrýstingi vegna sjávarins ofan við skynjarann og loftþrýstingi á mælistað, en áhrifum loftþrýstings er eytt. Þrýstimælarnir mæla sjávarhæð á sekúndu fresti, en skráð sjávarborðsmæling er meðaltal mælinga í eina mínútu. Mælingar eru skráðar á 10 mínútna fresti. Þar sem sveiflutími alda innan hafna er oftast innan við 15 sekúndur þá jafnast ölduáhrifin að mestu leiti út og koma ekki fram í mælingunni. Hins vegar eru oft sog og lengri sveiflur í höfnum og koma slíkar sveiflur fram í mælingunum.

Tilgangur sjávarborðsmælinga

Tilgangur sjávarborðsmælinga getur verið mismunandi. Þannig þurfa hafnir landsins, sem í dag kosta sjávarborðsmælingarnar, upplýsingar um tímasetningar á flóði og fjöru og tiltölulega grófar upplýsingar um sjávarhæð. Hafnirnar hafa hins vegar litla þörf fyrir nákvæmar upplýsingar um breytingar á afstöðu lands og sjávar vegna landsigs, landriss eða hækunar sjávarborðs vegna hnattrænnar hlýnunar. Þá hefur komið í ljós að hafnirnar hafa heldur ekki áhuga á kvörðun mælanna og grípa ekki inn í fyrr en augljós bilun hefur orðið. Kvarðanir á sjávarborðsmælum eru því allt of fátíðar. Mælir getur verið kominn í rek (drift) eða komnar fram fleiri bilanir, t.d. stíflur í festuröri og öndunarröri, án þess að nokkuð sé gert, jafnvel árum saman.

Á síðari árum hefur áhugi á að fylgjast mun nánar með afstöðubreytingum lands og sjávar aukist mjög mikið. Þetta á t.d. við um hækkun sjávar vegna hnattrænnar hlýnunar. Það er nauðsynlegt fyrir sveitarfélög og skipulagsyfirköld að hafa hugmynd um það í hvað stefnir í þeim efnum. Nú eru taldar líkur á því að hækkun sjávar vegna hnattrænnar hlýnunar verði ekki jöfn yfir jörðina heldur að hún verði minni hér við land en víðst hvar annars staðar.

Breytingar á hæð jarðskorpunnar eru óvída meiri en á Íslandi. Á Reykjanesi er land t.d. að síga og það getur haft áhrif á nauðsynlega hæð byggingarlands við ströndina. Við sunnanverðan Vatnajökul er land hins vegar að rísa og það getur haft áhrif á dýpi til siglinga inn Hornafjarðarós. Því er mikilvægt að fylgst sé með þessum afstöðubreytingum lands og sjávar.

Samfelldar sjávarborðsmælingar

Samfelldar mælingar á sjávarföllum fara fram í nokkrum höfnum og hafa staðið yfir í mislangan tíma. Átak í úrvinnslu sjávarborðsmælinga hefur leitt í ljós að gæðum mælinga yfirleitt mjög ábótavant eins og kemur fram í Tafla 2, bæði vegna tæknilegra vandamála, bilana og vegna vöntunar á kvörðunum. Mælarnir eru í umsjón viðkomandi hafna og kostaðar af þeim. Til skamms tíma voru engar samfelldar sjávarfallamælingar á Austfjörðum, allt frá Húsavík austur um til Hornafjarðar. Nú hefur verið bætt úr því en nýlega var settur upp mælir við Mjóeyrarhöfn á vegum Fjarðabyggðahafna.

Tafla 2 Sjávarborðsmælingar við Ísland. Upplýsingar um rafrænar mælingar.

Staður	Upphaf mælinga	Gæði mælinga	Fjöldi ára hæf til úrvinnslu	Unnið úr mælingum	Þjónustuaðili	Ástand skynjara 12 2016
Vestmannaeyjar	Amk frá 2011	?	>=6	Nei	MogT	
Landeyjahöfn	2010	Góð að hluta	7	Já		Laus
Þorlákshöfn	1994	?	23	Nei	MogT	?
Grindavík	1994	Slæm	23	Já	MogT	ok
Sandgerði	1998	Slæm	19	Nei	MogT	Stíflaður
Njarðvík	1998-2009	?	?	Nei		Hætt
Hafnarfjörður	1994	?	23	Nei	Vista	?
Reykjavík – gamla höfnin	1956	Góð	60	Já	MogT	ok-?
Reykjavík - Skarfagarður	2013	?	4	Nei	MogT	ok
Grundartangi	Líklega frá 1994	?	23	Nei	MogT	?
Akranes	Amk frá 2007	?	>=10	Nei	MogT	?
Ólafsvík	1997	Góð að hluta	20	Já	MogT	?
Stykkishólmur	2007-2011		5	Nei	Vista	
Búðardalur	2001-2011		5	Nei	Vista	
Patreksfjörður	1994	Góð að hluta	16-17 ár	Já		Hætt
Ísafjörður	Eitthvað til	?	?	Nei	Vista	?
Skagaströnd	2003	Ekki góð	14	Já	MogT	?
Dalvík	1994-2008	?	?	Nei		Hætt
Húsavík	1997	?	20	Nei	MogT	?
Höfn í Hornafirði – Hvanney	1994	Slæm	23	Já	MogT	ok
Höfn í Hornafirði - höfnin	2012	Óviss	5	Já	MogT	Óviss

Tillaga að nýju kerfi sjávarborðsmæla

Í dag ber enginn opinber aðili á Íslandi ábyrgð á sjávarborðsmælingum, það hefur enginn það hlutverk að standa fyrir og sjá um slíkar mælingar. Til þess að færa sjávarborðsmælingar til betra horfs þarf ríkið að fela opinberum aðila ábyrgð á sjávarborðsmælingum og áætla til þess fjármagn.

Í samráði við Veðurstofu Íslands og Landmælingar Íslands hefur Vegagerðin gert tillögu að kerfi sjávarborðsmæla umhverfis landið, sem hefur þann tilgang að fylgjast með afstöðu lands og sjávar til lengri tíma. Slíkt mælinet þarf að byggjast á um 15 til 18 sjávarborðsmælum. Síðar verður gerð tillaga að staðsetningu mæla í samráði við þá aðila sem málið varðar.

Eftirlit og úrvinnslu mælinga frá flóðmælum þarf að auka mikið frá því sem nú er og kvarða þarf hvern mæli reglulega.

6. Líkindafræðileg úrvinnsla sjávarfallamælinga

Við tíðnigreiningu á sjávarföllum þarf að taka tillit til þess að áhlaðandapættirnir eru háðir innbyrðis, þ.e. að samfara lágum loftþrýstingi fer yfirleitt mikill vindhraði og há alda þegar vindur blæs af hafi. Hins vegar er ekki talið að það sé mikil fylgni milli stjarnfræðilegra þátta sjávarfalla og áhlaðandapáttanna.

Mælingar á sjávarborði í náttúrinni innihalda alla þætti sem hafa áhrif á sjávarhæð, þ.e. stjarnfræðileg sjávarföll og áhlaðanda vegna loftþrýstings, vinds og öldu. Hér verður gerð grein fyrir líkindafræðilegri úrvinnslu sjávarfallamælinga á tveimur stöðum á landinu, Reykjavík og Patreksfirði.

6.1. Reykjavík – gamla höfnin

Lengsta tímaröð sjávarborðsmælinga á Íslandi er tímaröðin úr gömlu höfninni í Reykjavík. Í gegnum árin hafa ýmsir aðilar unnið líkindafræðilega úrvinnslu úr mælingunum.

Ein fyrsta líkindafræðilega úrvinnslan á sjávarborðsmælingum í Reykjavík er frá 1974¹⁶. Með Gumbel úrvinnslu á hæstu mældri flóðhæð hvers árs frá 1956 til 1974 spáði Gísli Viggósson, þá verkfræðingur hjá Hafnamálastofnun ríkisins, fyrir um tíðni hæstu flóða í Reykjavík. Niðurstaða hans var að flóð með 10 ára endurkomutíma væri um +4,86 m í hafnarkerfi og flóð með 100 ára endurkomutíma um +5,17 m.

Ólafur og Páll unnu úr sjávarborðsmælinum í Reykjavíkurhöfn fyrir árin 1956 til 1989 og ákvörðuðu sjávarhæð á öllum fjörum og flóðum, þ.e. fundið var lágmarksgildi hvefrrar fjöru og hámarksgildi hvers flóðs. Byggt á þessari úrvinnslu sýnir Tafla 3 fjölda lægstu fjara og hæstu flóða sem að jafnaði koma á hverju ári.

Tafla 3 Fjöldi lægstu fjara og hæstu flóða á ári að jafnaði.¹⁷

Fjarar lægri en:		Flóð hærri en:	
-0,7 m	einu sinni á 14 árum	+4,9 m	einu sinni á 30 árum
-0,6 m	einu sinni á 3,5 árum	+4,8 m	einu sinni á 5 árum
-0,5 m	einu sinni á 2,5 árum	+4,7 m	einu sinni á 2 árum
-0,4 m	einu sinni á ári	+4,6 m	tvisvar á ári
-0,3 m	þrisvar sinnum á ári	+4,5 m	sjö sinnum á ári
-0,2 m	sjö sinnum á ári	+4,4 m	17 sinnum á ári
-0,1 m	13 sinnum á ári	+4,3 m	33 sinnum á ári
0,0 m	22 sinnum á ári		

Jónas og Sveinn¹⁸ unnu síðan með helmingi lengri tíma röð og fengu að flóð með 10 ára endurkomutíma væri +4,93 m og 100 ára flóðið væri +5,08 m hvor tveggja í hafnarkerfi, sem uppfært til núverandi sjávarstöðu er um +5,14 m.

Vegagerðin hefur unnið með gagnasafn sem spannar 60 ár, frá 1956 til 2016¹⁹. Frá árunum 1956 til 1994 voru klukkutímagildi lesin af blöðum úr síritandi flóðmæli. Frá árinu 1994 eru mælingarnar

¹⁶ Verkfræðipjónusta Dr. Gunnars Sigurðssonar, 1974. Vesturlandsvegur yfir Borgarfjörð. Hæð og þyngd grjótvannar. Unnið fyrir Vegagerð ríkisins.

¹⁷ Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 1992. Um tíðni lægstu fjara og hæstu flóða í Reykjavíkurhöfn. Minnisblað dagsett 22. september 1992.

¹⁸ Jónas Elíasson og Sveinn Valdimarsson, 1993. *Flóðhæðir í Reykjavíkurhöfn*. Verkfræðistofnun Háskóla Íslands.

¹⁹ Guðjón Scheving Tryggvason, 2017. Sjávarborðsrannsóknir. Sjávarborðsmælingar frá Reykjavík, Ólafsvík, Skagaströnd og Patrekshöfn. Útgáfa A. Rannsóknarverkefni Vegagerðinar.

skráðar rafrænt, meðaltal 60 mælinga með sekúndu millibili, skráðar með 10 mínútna millibili. Með líkindafræðilegri úrvinnslu hafa gögnin verið nálgðuð með mismunandi dreifingum og mismunandi þröskuldsgildi notuð.

Beitt er svokallaðri ACER-aðferð (Average Conditional Exceedance Rate) við mat á endurkomutíma aftaka flóða sem er sama aðferð og notuð er í Noregi samanber skýrsluna *Sea Level Change for Norway Past and Present Observations and Projections to 2100*²⁰. Fjallað er um aðferðina í greinunum *Estimation of extreme value from sampled series*²¹ og *Statistics of Extreme Sea Levels for Locations along the Norwegian Coast*²². ACER-aðferðin er talin skila trúverðugari niðurstöðum, sérstaklega ef tímaraðirnar eru styttri en 20 ár. Aðferðin hefur það fram yfir algengar aðferðir til mat á endurkomutímum að hún tekur tillit til þess að atburðir geti verið háðir og að hún „fittar“ dreifinguna betur við gagnasöfnin en aðrar algengar aðferðir.

ACER-aðferðin var hér notuð til að meta endurkomutíma bæði fyrir lengra gagnasafnið frá 1959-2015 með mælingu á klukkutíma fresti og styttra sem er gagnasafn frá 1996 til 2015 með mælingu á 10 mínútna fresti. Hæsta mælingin í fyrra gagnasafninu með klukkustundar gildum er +5,01 m en sú hæsta í seinna gagnasafninu með 10 mínútna gildum +5,03 m. Niðurstöður úr ACER-aðferðinni fyrir endurkomutíma frá 10 árum upp í 1000 ár eru gefnar í Tafla 4. ACER-aðferðin gefur töluvert lægri gildi en log-normal dreifingin, sérstaklega fyrir hæstu endurkomutímum.

Tafla 4 Líkindafræðileg úrvinnsla sjávarfallamælinga í Reykjavíkurbænum fyrir tímabilið 1956-2016 með ACER-aðferð²³. Sjávarhæðir eru gefnar í hafnarkerfi.

Endurkomutími [ár]	1956-2015, klukkustundar gildi		1996-2015, 10 mínútna gildi	
	Sjávarstaða, SK	Staðalfrávik	Sjávarstaða, SK	Staðalfrávik
10	+4,86	0,04	+4.92	0.05
50	+4,96	0,04	+5.03	0.05
100	+5,00	0,04	+5.08	0.05
200	+5,04	0,05	+5.12	0.05
500	+5,09	0,05	+5.17	0.06
1000	+5,12	0,05	+5.20	0.06

Niðurstaða þessarar úrvinnslu er að fyrir lengri tímaröðina er flóð með 100 ára endurkomutíma +5,00 m en +5,08 m fyrir tímaröðina frá 1996. Í úrvinnslunni hefur ekki verið leiðrétt fyrir sjávarstöðubreytingum á mælitímabilinu. Ef það er gert þá hækka gildin og meira fyrir lengra tímabilið. Miðað við hækkingu sjávarborðs um 2,8 mm ári þá mundi lengri tímaröðin hækka um 84 mm og sú styttri um 28 mm. Þannig fengjust flóð með 100 ára endurkomutíma uppfærð til núverandi sjávarstöðu +5,08 m fyrir lengri röðina og +5,11 m fyrir þá styttri.

²⁰ M.J.R. Simpson et. al. (2015). *Sea Level Change for Norway. Past and Present Observations and Projections to 2100*. Norwegian Centre for Climate Services. Norway.

²¹ Næss, A og Gaidai, O. (2009). *Estimation of extreme value from sampled series. Structural Safety, 31, 325-334, doi: 10.1016/j.strusafe.2008.06.021.*

²² Skjong, M., Næss, A. and Næss, O. E. B (2013). *Statistics of extreme sea levels for locations along the Norwegian coast. Journal of Coastal Research, 29-5, 1029-1048, doi: 10.2112/jcoastres-d-12-00208.1*

²³ Kjartan Elíasson og Sigurður Sigurðarson, 2016. Minnisblað – Sjávarföll við Reykjavík. Vegagerðin.

Matthías, Tandri og Halldór²⁴, 2017, beittu mismunandi aðferðum við greiningu á tímaröðinni frá Reykjavík, hámarkaaðferð, þröskuldsaðferð og aðferð samlíka. Fyrri tvær aðferðirnar gefa 100 ára flóðið um +5,10 m, en sú síðasta +5,15 m [5,09 – 5,22].

Þannig má segja að allar þessar aðferðir gefa svipaðar niðurstöður fyrir flóðhæð í Reykjavík með 100 ára endurkomutíma á bilinu eða +5,10 til +5,20 m miðað við núverandi afstöðu lands og sjávar.

6.2. Patreksfjörður

Unnið hefur verið úr sjávarborðsmælingum á Patreksfirði fyrir tímabilið 1995 til 2002 með ACER-aðferðinni²⁵. Mælingarnar eru rafrænar og gerðar á 10 mínútna fresti.

Tafla 5 Líkindafræðileg úrvinnsla sjávarfallamælinga á Patreksfirði fyrir tímabilið 1995-2011 með ACER aðferð. Sjávarhæðir eru gefnar í hafnarkerfi Patrekshafnar.

Endurkomutími	Sjávarhæð	staðalfrávik
10	+4.1	0.24
50	+4.25	0.28
100	+4.31	0.29
200	+4.37	0.31
500	+4.45	0.33
1000	+4.51	0.34

Það skal tekið fram að mælitímabilið er nokkuð stutt og endurspeglast nákvæmnin í tiltölulega háu staðalfrávik. Samanborið við Reykjavík þar sem staðalfrávik var um 4 til 6 sentimetrar þá er það um 24 til 34 sentimetrar fyrir úrvinnsluna á Patreksfirði.

Matthías, Tandri og Halldór²⁴ unnu líka úr tímaröðinni fyrir Patreksfjörð. Niðurstaða þeirra með þröskuldsaðferðinni var að flóð með 100 ára endurkomutíma væri +4,5 m og með aðferð samlíkna +4,25 m. Þannig gefa ACER aðferðin og aðferð samlíkna svipaðar niðurstöður.

Samkvæmt Tafla 1 er meðalstórstraumsflóð á Patreksfirði +3,2 m í hafnarkerfi, þannig að samkvæmt líkindafræðilegu úrvinnslunni þá er 100 ára flóðið um 1,1 m hærra en meðalstórstraumsflóð, sem er sambærilegt við Reykjavík.

²⁴ Matthías Ásgeir Jónsson, Tandri Gauksson og Halldór Björnsson, 2017. Öfgagreining á flóðhæðum í Reykjavík og Patreksfirði: Prófun á þröskuldsaðferð og samlíkum. Veðurstof Íslands, VI 201-003.

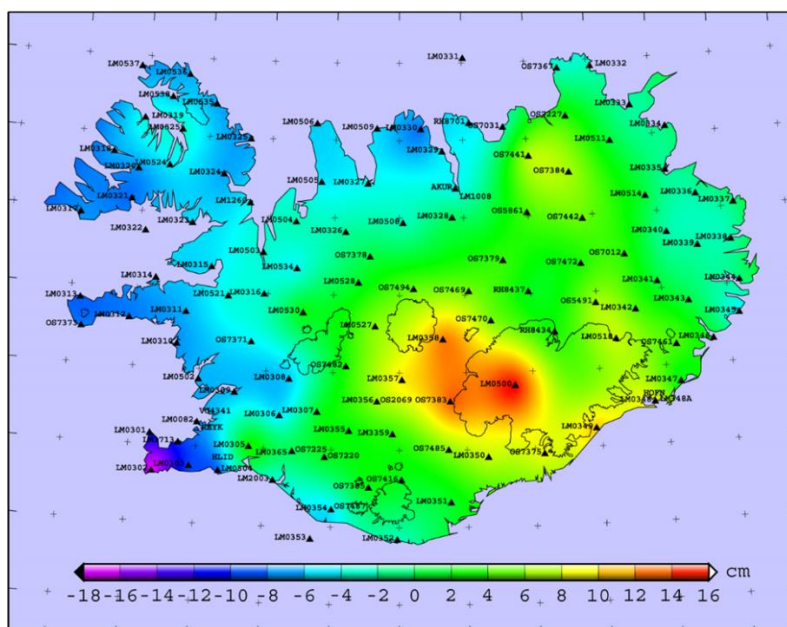
²⁵ Kjartan Elíasson, 2017. Minnisblað – Úrvinnsla úr sjávarfallagögnum frá Patreksfirði.

7. Hæðarbreytingar vegna jarðskorpuhreyfinga

Lóðréttar jarðskorpuhreyfingar eiga sér stað um allt land, sums staðar sígur land, annars staðar rís land. Þessar hreyfingar eru mældar með GPS mælingum, bæði með endurteknum mælingum á grunnstöðvaneti sem Landmælingar standa fyrir og með samfelldum GPS mælingum sem nokkrir rannsókn- og vöktunaraðilar standa að.

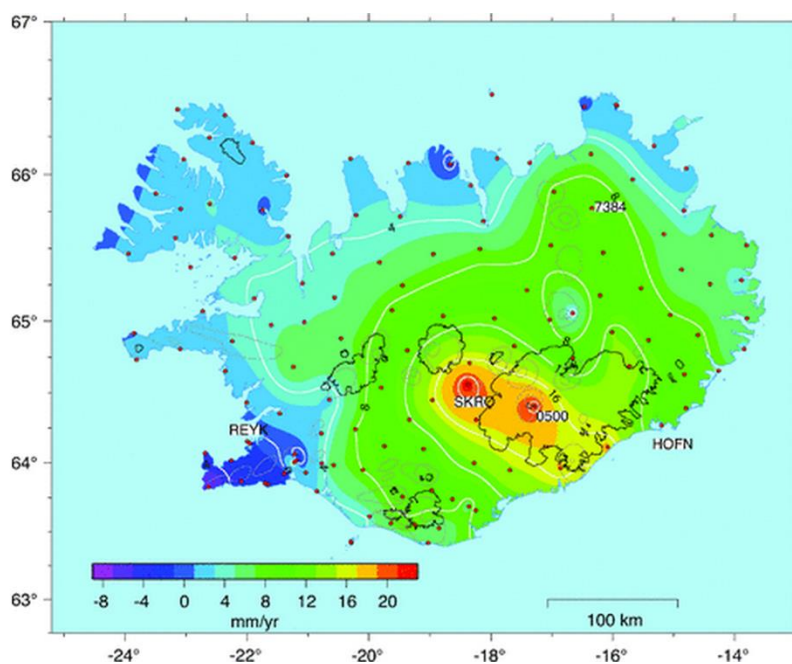
Mynd 1 sýnir breytingar í hæð á 11 ára tímabili frá 1993 til 2004 byggt á GPS mælingum grunnstöðvanetsins. Þar kemur fram að land við ströndina er að rísa mest á suðausturlandi í nágrenni við Vatnajökul frá Ingólfshöfða til Hafnar um allt að 14 cm. Land sígur hins vegar vestanlands, mest yst á Reykjanesi um 12 cm. Samkvæmt þessum mælingum hefur heildarsig í Reykjavík á tímabilinu verið 27 mm sem svarar til um 2,5 mm/ári.

Mynd 2 er unnin úr sömu gögnum en tekin hafa verið út áhrif stærri jarðskjálfta á tímabilinu. Myndin sýnir hraða breytinga í mm/ári. Þar kemur fram að landris við ströndina sunnan Vatnajökuls er mest rúmir 16 mm/ári og landsig yst á Reykjanesi um 8 mm/ári.



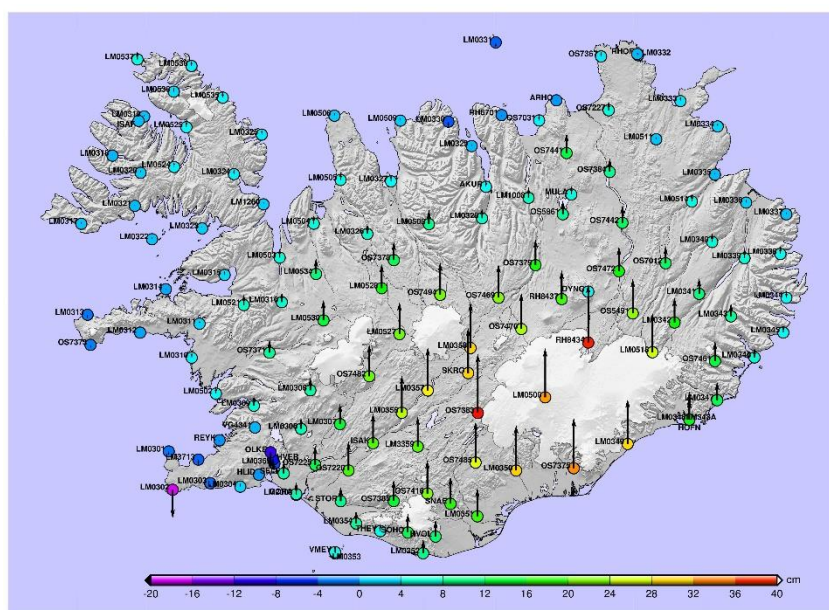
Mynd 1 Breytingar í hæð á milli ISN93 OG ISN2004 mælinganna á grunnstöðvanetinu. Breytingar í cm yfir 11 ára tímabil²⁶

²⁶ Guðmundur Þór Valsson, Þórarinn Sigurðsson, Christof Völksen, Markus Rennen; (2007) ISNET2004 Niðurstöður úr endurmælingum Grunnstöðvanets Íslands, Landmælingar Íslands



Mynd 2 Hraði hæðarbreytinga á milli ISN93 og ISN2004 mælinganna á grunnstöðvanetinu. Hraði breytinga gefinn í mm/ári, jafnbreytilínur teiknaðar með 4 mm/ári millibili²⁷

Endurmæling á grunnstöðvanetinu fór fram árið 2016 og þegar þetta er skrifað stendur úrvinnsla yfir. Mynd 3 sýnir breytingu á hæð milli mælinganna 2004 og 2016. Samkvæmt Landmælingum hefur rishraðinn næst Vatnajökli aukist frá síðustu endurmælingu en er svipaður annars starðar²⁸.



Mynd 3 Breyting á landhæð í grunnstöðvanetinu milli mælinga 2004 og 2016, kort frá Landmælingum. Breytingar í cm yfir 12 ára tímabil.

²⁷ Árnadóttir, T., Lund, B., Jiang, W., Geirsson, H., Björnsson, H., Einarsson, P., & Sigurdsson, T. (2009). Glacial rebound and plate spreading: results from the first countrywide GPS observations in Iceland. *Geophysical Journal International*, 177(2), 691-716.

²⁸ Guðmundur Valsson, 2017. Munnlegar heimildir.

Samfelldar GPS hæðarmælingar fara fram víða á landinu og standa ýmsir aðilar að þeim. Veðurstofan hefur unnið úr samfelldum mæliröðum stöðva sem staðsettar eru nærri ströndinni þar sem lengstu raðirnar eru frá 1996 í Reykjavík og frá 1997 á Höfn í Hornafirði, Tafla 6. Þar koma fram árlegar landhæðabreytingar í mm.

Haraldur Ketill²⁹, 2014, vann með styttri tímaröð GPS mælinga frá Reykjavík en greining Veðurstofunnar hér að ofan eða frá 1996 til 2012. Niðurstaða hans var heldur lægri en niðurstaða Veðurstofunnar eða 1,2 mm/ári samborið við 1,49 mm/ári.

Tafla 6 Landhæðabreytingar á völdum stöðum við ströndina þar sem til eru samfelldar GPS mælingar. Neikvæðar tölur merkja landsig en jákvæðar landris. Gögn frá Veðurstofu Íslands, tafla fengin úr drögum að skýrslu vísindanefndar 2017, tafla 5-6.

Staður	Tímabil	Landhæðabreyting(mm/ári)
Reykjavík	1996–2015	-1.49 [-1.56 – -1.42]
Ísafjarðarðarbær	2009–2015	-1.82 [-2.08 – -1.56]
Siglufjörður	2008–2012	-2.32 [-2.65 – -2.00]
Grimsey	2008–2014	-4.72 [-4.97 – -4.48]
Akureyri	2001–2015	3.39 [3.31 – 3.47]
Flatey á Skjálfanda	2007–2014	-1.47 [-1.65 – -1.30]
Árholt á Tjörnesi	2002–2015	0.15 [0.07 – 0.23]
Kópasker	2007–2014	0.05 [-0.14 – 0.24]
Raufarhöfn	2001–2015	0.27 [0.22 – 0.33]
Heiðarsel á Fljótsdalshéraði	2009–2015	1.64 [1.39 – 1.88]
Höfn í Hornafirði	1997–2015	12.03 [11.96 – 12.11]
Vestmannaeyjar	2000–2012	3.18 [3.12 – 3.24]
Vogsósar í Selvogi	2000–2007	-1.04 [-1.18 – -0.91]
Nýlenda á Reykjanesi	2006–2014	-4.62 [-4.71 – -4.53]

²⁹ Haraldur Ketill Guðjónsson, 2014. Sjávarborðsbreytingar í Reykjavík. Jarðvísindadeild Háskóla Íslands 2014.

8. Afstöðubreyting lands og sjávar vegna hnattrænnar hlýnunar

Auk lóðréttra jarðskorpuhreyfinga er hnattræn hlýnun stærsti áhrifaþátturinn í breytingu á afstöðu lands og sjávar.

Gegnum árin hafa ýmsar spár verið settar fram um hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar. Í lágsvæðaskýrslunni frá 1992, 1. áfanga³⁰, var byggt á fyrstu skýrslu milliríkjanefndar um loftslagsmál, IPCC, frá 1990 og miðað við líklegasta mat á hækkun sjávarborðs til ársins 2100 og gert ráð fyrir að sjávarborð hækkaði um 0,66 m á þeim tíma. Auk þess var gert ráð fyrir að landsig til ársins 2100, auk öryggisstuðuls á landsig, næmi samtals 0,15 m. Samkvæmt þessu var gert ráð fyrir að samanlagðar breytingar á afstöðu lands og sjávar til ársins 2100 yrðu 0,81 m.

Í 2. áfanga lágsvæðaskýrslu frá 1995³¹ er heldur dregið úr. Lagt er til að miðað verði við 0,6 m sjávarborðshækkun og landsig á suðvesturhluta landsins en annas staðar þar sem ekki er „umtalsvert“ landsig verði miðað við 0,5 m.

Í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá október 2000³² var fjallað um að nauðsynlegt væri að skipulag á hafnarsvæðum og lágsvæðum tæki mið af flóðum á 100 ára tímabili eða fram til ársins 2100. Kröfur um lágmarkshæð lóða og gólfa þurfa að vera í takt við spár um hækkun heimshafanna samkvæmt „besta mati“ IPCC-skýrslunnar 1996. Bæta verður við þá lágmarkshæð, sem talin var þörf á, um 0,5 m auk 0,15 m hækkunar vegna landsigs og öryggisstuðuls, eða samtals um 0,65 m, þar sem landsig á sér stað.

Í IPCC skýrslunni frá 2007³³ voru settar fram mismunandi sviðsmyndir fyrir loftslagshlýnun. Búist var við að sjávarstöðuhækkun á heimsvísu vegna hnattrænnar hlýnunar til ársins 2100 yrði um 0,4 m fyrir 2° hækkun á hitastigi á heimsvíu, 0,5 m fyrir 4° hækkun og 0,6 m fyrir 6° hækkun.

Í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar³⁴ frá júlí 2008 var gerð grein fyrir mismunandi sviðmyndum sem settar voru fram í IPCC skýrslunni frá 2007. Þar var miðað við líkindafræðilega úrvinnslu sjávarhæða í Reykjavík sem er heldur hærri en úrvinnslan sem gerð er grein fyrir hér að ofan, þar sem 100 ára flóðhæð er í bæjarkerfi +3,34 m eða +5,16 m í hafnarkerfi. Fjallað var um landsig og var niðurstaðan fyrir Reykjavík að varlegt mat á landsigi lægi á bilinu 2-4 mm/ári en það svarar til um 0,2 til 0,4 m á 100 árum. Þá segir í skýrslunni að með hliðsjón af óvissumörkum bæði á hlýnun og sjávarborðshækkun þurfi að lágmarki að gera ráð fyrir um hálfis metra hækkun sjávarborðs og meiri þar sem landsigs gætir.

Það kom fram í síðasta kafla að úrvinnsla GPS mælinga á landsigi í Reykjavík benda til þess að sig sé heldur minna en gert er ráð fyrir í skýrslu vísindanefndar frá 2008.

Samkvæmt úrvinnslu Guðjóns Scheving á sjávarfallamælingum í Reykjavíkurböfn³⁵ er afstæð sjávarborðshækkun frá 1956 til 2016 talin 2,4 +/-0,2 mm/ári. Þetta eru u.þ.b. sömu niðurstöður og

³⁰ Lágsvæði – 1. Áfangi. Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum. Fjarhitun vann fyrir Skipulag ríkisins. Desember 1992

³¹ Lágsvæði – 2. Áfangi. Skipulags- og byggingarráðstafanir og sjóvarnir. Fjarhitun vann fyrir Vita- og hafnamálastofnun, Skipulag ríkisins og Viðlagatryggingu Íslands, ágúst 1995

³² Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Október 2000.

³³ IPCC (2007). Climate Change 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

³⁴ Halldór Björnsson, Árný E Sveinbjörnsdóttir, Anna K. Daníelsdóttir, Árni Snorrason, Bjarni D. Sigurðsson, Einar Sveinbjörnsson, o.fl. (2008). Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi: Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Reykjavík: Umhverfisráðuneytið.

³⁵ Guðjón Scheving Tryggvason, 2017. Sjávarborðsrannsóknir. Sjávarborðsmælingar frá Reykjavík, Ólafsvík, Skagaströnd og Patrekshöfn. Rannsóknarverkefni Vegagerðinnar.

Ólafur og Páll³⁶ fengu sem var $2,4 \pm 0,1$ mm/ári fyrir tímabilið 1956-89. Greining Matthíasar, Tandra og Halldórs³⁷ bendir til heldur meiri hækkunar fyrir tímabilið 1996-2013 eða $2,8 \pm 0,3$ mm/ári.

Að frádregnu landsigi, sem sem áður var áætlað um 1,2 til 1,5 mm/ári, stendur eftir að hækkun sjávarborðs vegna rúmmálsaukningar sjávar nemi um 0,9 til 1,6 mm/ári.

Nýjustu rannsóknir benda til þess að sjávarstöðuhækkun í hafinu umhverfis Ísland geti orðið minni en hækkun á heimsvísu. Í drögum að skýrslu vísindanefndar 2017³⁸ er gerð grein fyrir svæðisbundnum breytingum á sjávarstöðu þar sem tekið er tillit til aflrænna þátta og breytingar á eðlismassa aðallega vegna varmapenslu. Mat á líklegum svæðisbundnum breytileika á sjávarstöðuhækkun við stendur landsins byggir á greining á áhrifum þessara þátta. Vestanlands er hækkun sjávarstöðu rúmlega 30% af hnattrænni hækkun, norðanlands er hækkunin tæplega 30%, en eykst austur með landinu og er um 40% austast á landinu. Minnst er hækkunin suðaustan lands eða 15-20% af hnattrænni hækkun. Að meðaltali umhverfis landið er hlutfallið um 33%.

Eins og tekið er fram í skýrslu Vísindanefndar þá er óvissa á þessum tölum veruleg, varðandi varmapenslu og bráðunar á Grænlandsjökli og Suðurskautslandinu. Sé bráðun á Suðurskautslandinu vanmetin getur hækkunin orðið meiri hér á landi. Því er eðlilegt að hafa rúm mörk við túlkun á þessum niðurstöðum við ákvörðun á landhæð og uppfæra þessar viðmiðunarreglur eftir því sem þekkingu fleygir fram.

³⁶ Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 1991. Úrvinnsla sjávarfallagagn: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurbæ. Jarðvísindastofnun Háskólans.

³⁷ Matthías Ásgeir Jónsson, Tandri Gauksson og Halldór Björnsson, 2017. Öfgagreining á flóðhæðum í Reykjavík og Patreksfirði: Prófun á þröskuldsaðferð og samlíkum. Veðurstof Íslands, VI 201-003.

³⁸ Drög að skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2017.

9. Líklegustu sjávarstöðubreytingar við Ísland á 21. öldinni

Í drögum að skýrslu vísindanefndar 2017³⁹ eru teknar saman niðurstöður af annars vegar lóðréttum jarðskorpuhreyfingum og svæðisbundnum breytingu á sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar.

Tafla 7 Sjávarstöðubreytingar til loka 21. aldar eftir landshlutum að gefnum sviðsmyndum um hnattræna hækkun og að viðbættum lóðréttum landhreyfingum. Úr drögum að skýrslu Vísindanefndar 2017, tafla 5-8.

Landshluti	Landhæðar- breyting (cm)	Hækkun sem hlutfall af hnattrænni	Hnattræn hækkun 50 cm	Hnattræn hækkun 75 cm	Hnattræn hækkun 100 cm
			Staðbundin hækkun sjávarstöðu (cm)		
Suðvesturland að Norðvesturlandi	-20 til -10	30 til 34 %	25 til 37	33 til 45	40 til 54
Norðvestan lands og innarlega í fjörðum Norðanlands	10 til 30	28 til 30 %	-16 til 5	-9 til 13	-2 til 20
Austanverður Tröllaskagi að Flateyjarskaga	-30 til -10	28 til 30%	24 til 45	31 til 53	38 til 60
Sjálfandaflóa og Öxarfjörður	0 til 20	30% til 32%	-5 til 16	3 til 24	10 til 32
Melrakkaslétta að Langanesi	0 til 10	32 til 38%	6 til 19	14 til 29	22 til 38
Austurland	0 til 20	38 til 40%	-1 til 20	9 til 30	18 til 40
Suðausturland	100 til 200	20 til 28%	-190 til -86	-185 til -79	-180 til -72
Suðurland	20 til 40	30 til 32%	-25 til -4	-18 til 4	-10 til 12
Sunnan- vestanverður Reykjaneskagi	-30 til -10	32 til 34%	26 til 47	34 til 56	42 til 64

Eins og kom fram í kaflanum hér á undan er töluverð óvissa hnattræna hækkun, sérstaklega vegna óvissu um bráðnun Suðurskautslandsins. Því er lagt til að miðað sé við hnattræna hækkun sem nemur 100 cm við ákvörðun á landhæð á lágsvæðum.

Athyglisvert er að bera þessar niðurstöður saman við þær viðmiðanir sem hingað til hafa verið notaðar. Hæstu tölur fyrir staðbundna hækkun sjávarstöðu sem miðast við mestu hnattræna hækkun eru 0,54 m á Faxaflóasvæðinu, 0,60 m á austanverðum Tröllaskaga og 0,64 m á sunnan- og vestanverðum Reykjaneskaga.

Í umsögnum um skipulag á lágsvæðum við Faxaflóa hefur seinni árin verið miðað við 0,65 m sem byggir á skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2000. Þessi viðmiðun er því á öruggu hliðinni og 0,11 m hærrí en niðurstöður vísindanefndar 2017 fyrir 100 cm hnattræna hækkun sem svarar til verulegarar til ákafrar hlýnunar.

³⁹ Drög að skýrslu vísindanefndar frá 5. maí 2017.

10. Áhlaðandi vegna vinds og loftþrýstings

Á vegum Verkfræðistofnunar Háskóla Íslands var á árunum 1993 til 1996 sett upp reiknilíkan til útreikninga á sjávarföllum og sjávarfallastraumum fyrir hafsvæðið í kringum Ísland⁴⁰. Líkanið var kvarðað með tiltækum mælingum á sjávarhæð og sjávarfallastraumum hér við land og á hafinu umhverfis landið, auk mælinga frá nærliggjandi hafsvæðum og löndum. Eitt af markmiðum líkangerðarinnar var að nýta líkanið til útreikning á sjávarflóðum og í þeim tilgangi var bætt við þáttum sem líkja eftir áhrifum veðurs, vinds og loftþrýstings, á yfirborði sjávar og sjávarstraumar og sjávarstaða reiknuð út frá þeim eðlisfræðilögmálum sem þau lúta að. Skoðaðir voru tveir atburðir, annars vegar aftakaveðrið í janúar 1990 og hins vegar sjávarflóð í febrúar 1996, þegar slæmt veður gerði samfara mjög hárrí sjávarstöðu⁴¹.

Lægðin sem gekk yfir landið í janúar 1990 er með dýpri lægðum sem ganga hér yfir og því hættuleg með tilliti til sjávarflóða. Þegar lægðin gekk yfir var hins vegar ekki stórstreymt, auk þess sem lægðarmiðjan kom upp að landinu nálægt háfjörðu. Sjávarhæðin var því engan vegin eins há og hún hefði getað orðið ef öðruvísi hefði staðið á sjávarföllum. Gunnar Guðni, Kjartan og Þorbjörn könnuðu hver sjávarstaðan hefði getað orðið ef lægðin hefði gengið yfir á öðrum tíma, mjög háu stórstreymi og með ítrunum fundið út hvaða tímasetning á lægðinni gaf hæstu sjávarstöðuna á hverjum stað. Valið var að láta lægðina ganga yfir landið þann 20. febrúar 1996, en þá voru stjarnfræðileg sjávarföll með því allra mesta sem þau verða hér við land, +4,6 m í Reykjavík.

Mesta sjávarhæð í Reykjavík reiknaðist +5,24 m og mesti munur á sjávarföllum og flóðaspá reiknaðist 0,82 m sem er nánast sama hækkun og fékkst þegar lægðin gekk yfir í janúar 1990. Þessi mismunur er áhlaðandi sem stafar af samvirkandi þáttum vinds og loftþrýstings. Ölduáhlaðandinn er hins vegar ekki með. Svipaður mismunur og í Reykjavík fékkst í Sandgerði og Grindavík en heldur minni í Þorlákshöfn og Eyrarbakka eða um 0,7 m. Þá fékkst heldur meiri mismundur utarlega á Snæfellsnesi og við norðanverðan Breiðafjörð, eða um 0,85 m. Minni mismunur fékkst á norðurlandi en þar ber að líta til þess að ferill janúar 1990 lægðarinnar er sennilega ekki sá versti fyrir norðurlandið.

Niðurstaða þessarar athugunar er að samanlagður áhlaðandi vinds og loftþrýstings verður ekki mikið hærri en um 0,7 m til 0,9 m við aðstæður sem koma að jafnaði með nokkurra áratuga fresti. Mismunurinn stafar líklega af mismunandi aðstæðum hvað vindáhlaðanda varðar, en þar sem er aðdjúpt verður vindáhlaðandi minni heldur en þar sem er grynna eins og t.d. í Faxaflóanum.

Eins og áður hefur komið fram þá hefur hlutur vindáhlaðandi í hönnunarsjávarhæð í höfnum hér við land oft verið metinn á bilinu 0,1 til 0,3 m fyrir mismunandi aðstæður. Þá sýndu Ólafur og Páll fram á að sjávarborð hækkaði að jafnaði sem svarar til 0,84 sentimeter fyrir lækun loftþrýstings um 1 hektopaskal og hafa áhrif loftþrýstings þannig verið metin um 0,6 til 0,7 m. Samtals hefur áhlaðandi vegna vinds og loftþrýstings í hönnunaraðstæðum því verið metinn á bilinu 0,7 til 1,0 m, sem ber nokkuð vel saman við niðurstöður þeirra Gunnars Guðna, Kjartans og Þorbjörns.

Hluti af sjávarflóðaverkefni Verkfræðistofnunar var verkefni Kjartans, Reiknilíkan fyrir vindáhlaðanda við Ísland⁴². Þar er gerður samanburður á mældum og reiknuðum vindáhlaðanda í Reykjavík í janúar

⁴⁰ Gunnar Guðni Tómasson, Ólöf Rós Káradóttir og Kjartan Gíslason, 1996. Reiknilíkan fyrir sjávarföll við Ísland. Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, október 1996.

⁴¹ Gunnar Guðni Tómasson, Kjartan Gíslason og Þorbjörn Karlsson, 1996. Reiknilíkan fyrir sjávarflóð við Ísland. Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, júlí 1996.

⁴² Kjartan Gíslason, 1995. Reiknilíkan fyrir vindáhlaðanda við Ísland. Lokaverkefni í verkfræði við Umhverfis- og byggingarverkfræðiskor Háskóla Íslands, maí 1995.

1990 veðrinu og hann metinn á bilinu 0,2 til 0,35 m. Þetta er í nokkuð góðu samræmi við mat á vindáhlaðanda þar sem tiltölulega langt er út á dýpi eins og í Faxaflóanum.

Komum þá aftur að reikningum Gunnars Guðna, Kjartans og Þorbjörns á mestu sjávarhæð í Reykjavík +5,24 m. Sú sjávarstaða fékkst með því að finna óhagstæðustu tímasetningu janúar 1990 lægðarinnar, sem er með dýpri lægðum sem hér ganga yfir, við stjarnfræðileg sjávarföll sem að jafnaði koma u.þ.b. tvisvar á ári, +4,6 m. Reiknislegur endurkomutími slíks atburðar er at stærðargráðunni 1000 ár. Þá er verið að tala um sjávarhæð með áhlaðanda vinds og loftþrýstings, en ekki öldu, við núverandi afstöðu lands og sjávar, þ.e. án breytinga vegna landsigs og hnattrænnar hlýnunar. Athyglisvert er að þessi nálgun á mestu sjávarhæð í Reykjavík er ekki langt frá niðurstöðu líkindafræðilegrar úrvinnslu sjávarborðsmælinga í Reykjavík fyrir tímabilið 1996-2015 sem gaf +5,20 m fyrir 1000 ára endurkomutíma, sjá Tafla 4.

11. Staðbundin sjávarborðshækkun vegna vind- og ölduáhlaðanda

Sjávarflóð eru yfirleitt samspil hárrar sjávarstöðu og öldu upp við ströndina. Á hárru sjávarstöðu kemst hærri alda upp að ströndinni, þar sem aldan er yfirleitt dýpisháð upp við ströndina. Há alda upp við ströndina veldur síðan ágjöf sjávar yfir náttúrulega sjávarkamba og sjóvarnarmannvirki. Þannig er flóðhæð í sjávarflóðum á lágsvæðum við ströndina yfirleitt hærri en meðalsjávarhæð á þeim tíma sem flóðið verður. Á nokkrum lágsvæðum flæðir þó inn í kjallara á mjög háum sjávarstöðum án þess að til komi ágjöf sjávar á land, en slík flóð eru þá fyrirsjáanlegri.

Það eru því samlíkur á hárru sjávarstöðu og háum öldu sem ráða mestu um flóðahættu á hverjum stað. Sem dæmi um slíkt var sjávarflóðið að morgni 24. desember 2003 við Ánanaust og Eiðisgranda í Reykjavík sem var eitt það versta á viðkomandi stöðum í áratugi. Samt sem áður var endurkomutími sjávarhæðar og allra veðurfarsþátta loftþrýstings, vinds og öldu, vel innan við 1 ár⁴³. En samlíkur þess að sjávarhæð sem kemur nokkrum sinnum á ári með ölduhæð sem einnig kemur nokkrum sinnum ári, eru það litlar að endurkomutíminn mælist í áratugum. Raunveruleg sjávarhæð er síðan samsett af mörgum þáttum sem að hluta til eru innbyrðis háðir, þ.e. veðurfarsþættirnir, og síðan stjarnfræðilegum sjávarföllum, sem eru óháð öðrum þáttum.

Yfirleitt eru samlíkur á flóðhæð og ölduhæð ákvarðaðar á frekar frumstæðan hátt. Nýlega hafa verið þróaðar aðferðir til ákvörðunar á líkum á hárru sjávar- og ölduhæð upp við ströndina þar sem komist er hjá einfölduðum aðferðum við ákvörðun á samlíkum. Það byggir á því að búin er til löng tímaröð með upplýsingum um öldu, vind og sjávarhæð djúpt utan við ströndina sem uppfyllir líkindadreifingu hvers umhverfisþáttar. Síðan er valinn ákveðin fjöldi tilvika sem talin eru líklegust til að valda flóðum og þessi tilvik síðan keyrð upp að ströndinni í reiknilíkani fyrir útbreiðslu öldu. Þannig fæst staðbundin sjávarborðshækkun sem er þá mismikil eftir strandsvæðum. Þannig má búast við að mismunandi gildi fáist fyrir strendur Seltjarnarness, að sunnanverðu, norðanverðu og yst á nesinu og síðan enn önnur niðurstaða fyrir gömlu höfnina í Reykjavík og á Sundunum.

Gert er ráð fyrir að þetta verkefni fari af stað fljótlega.

⁴³ Sigurður Sigurðarson, 2004. Álagsforsendur sjóvarna við Ánanaust, Eiðisgranda og norður- og vestur hluta lands við gömlu höfnina. Siglingastofnun, apríl 2004, unnið fyrir Gatnamálastjórnann í Reykjavík og Reykjavíkurhöfn.

12. Núverandi viðmiðanir við ákvörðun á lægstu gólf- eða landhæð á lágsvæðum

Í fyrrnefndum Lágsvæðaskýrslum frá árunum 1992 til 1995 voru settar fram tillögur um lægstu gólfhæðir á lágsvæðum. Miðað var við að viðmiðanirnar giltu í um 100 ár eða til ársins 2100. Á þeim tíma var gert ráð fyrir að sjávarborð mundi hækka og land síga. Byggt var á skýrslu IPCC frá 1990 og reiknað með 0,66 m hækkun sjávarborðs til ársins 2100 sem líklegasta mat.

Í Tafla 8 eru gefnir lágmarksgólfkótar á Eyrarbakka og Álftanesi til ársins 2100 samkvæmt Lágsvæðaskýrslu frá 1992. Reiknað var með að gólfhæðir væru um 0,5 m yfir lóðarhæðum. Gert var ráð fyrir sömu hæðum á Stokkseyri og á Eyrarbakka.

Tafla 8 Ákvörðun á lágmarksgólfkóta á Eyrarbakka og Álftanesi til ársins 2100 samkvæmt ⁴⁴.

	Eyrarbakki		Álftanes	
	Bæjarkerfi (m)	Sjó-/hafnar-kerfi (m)	Bæjarkerfi (m)	Sjó-/hafnar-kerfi (m)
Stórstraumsflóð 1992	1,87		+2,32	
Loftþrýstingshækkun 1992	0,60		0,60	
Vindáhlaðandi 1992	0,30		0,50	
Brimáhlaðandi 1992	1,20		0,40	
Samtals 1992	+3,97	+5,27	+3,82	+5,64
Sjávarborðshækkun til 2100	0,66		0,66	
Landsig til 2100/öryggisstuðull	0,15		0,15	
Samtals árið 2100	+4,78	+6,08	+4,63	+6,45
Gólfkótar frá 1992-2100:				
Nálægt strandlínu (50-100 m) eða óvörðu lágsvæði fjær strandlínu	+4,75	+6,05	+4,75	+6,6
150-200 m og meira frá strandlínu með hindrunum fyrir flóðum á yfirborði og í holræsum	+4,3 – +4,5	+5,6 - +5,8	+4,3 - +4,5	+6,1 – +6,3

Eins og kemur fram hér að ofan var í skýrslunni frá 1992 reiknað með að meðalhækkun sjávarborðs til ársins 2100 væri 0,66 m auk 0,15 m sem taka til landsigs og sem öryggisstuðull. Í Lágsvæðaskýrslunni 2. áfangi⁴⁵ frá 1995 er heldur dregið í land og mælt með að miða við 0,6 m hækkun á suðvesturhluta landsins og 0,5 m annars staðar á Íslandi, þar sem ekki er umtalsvert landsig.

Í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2000 er síðan gert ráð fyrir að bæta þurfi við lágmarkshæð, sem talin er þörf á í dag, um 0,5 m auk 0,15 m hækkunar vegna landsigs og öryggisstuðuls, eða samtals um 0,65 m, þar sem landsig á sér stað.

Í næstu skýrslu vísindanefndar frá árinu 2008 eru stuðst við þrjár sviðsmyndir IPCC fyrir 2°C, 3°C og 4°C hnattræna hlýnun sem gera ráð fyrir að sjávarborð hækki um 0,4 m, 0,5 m og 0,6 m. Jafnframt er farið yfir úrvinnslu á lóðréttum hreyfingum lands, landrasi og landsigi. Farið er yfir mismunandi úrvinnslu mælinga og niðurstaðan að varlegt mat á landsigi fyrir Reykjavík liggja á bilinu 2 til 4 mm/ári. Ef gert er ráð fyrir 4°C hnattrænni hlýnun við lok aldarinnar, má búast við að 100 ára flóðið þá fari í +5,75 m og ef gert er ráð fyrir jöfnu landsigi út öldina fari flóðhæðin í +5,95 til 6,15 m. Ef miðað er við hóflegri

⁴⁴ Lágsvæði – 1. Áfangi. Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum. Fjarhitun vann fyrir Skipulag ríkisins. Desember 1992.

⁴⁵ Lágsvæði – 2. Áfangi. Skipulags- og byggingarráðstafanir og sjóvarnir. Fjarhitun vann fyrir Vita- og hafnamálastofnun, Skipulag ríkisins og Viðlagatryggingu Íslands, ágúst 1995

forsendur, 2°C hnattræna hlýnun, verður 100 ára flóðið í Reykjavík rúmlega +5,5 m og +5,7 til +5,9 m ef tekið er tillit til landsigs. Þessar hæðartölur eru allar í hafnarkerfi.

Þannig má segja að þær viðmiðanir sem settar voru fram í Lágsvæðaskýrslunni 1992 standist vel samanburð við skýrslu vísindanefndar frá árinu 2008. Í Lágsvæðaskýrslunni var gert ráð fyrir að við lok aldarinnar yrði 100 ára flóð á Álftanesi +6,45 m. Brimáhlaðanda gætir á Álftanesi en ekki í gömlu höfninni í Reykjavík og ef hann er dreginn frá þá stendur eftir að flóðið geti náð +6,05 m í gömlu höfninni.

Í umsögnum um deiliskipulag lágsvæða, þar sem tilgreindar eru lágmarksland- og/eða gólfhæðir á lágsvæðum, hefur Vegagerðin og áður Siglingastofnun og Vita- og hafnamálastofnun stuðst við viðmiðanir byggðar á Lágsvæðaskýrslunum sem taka mið af sjóvarstöðu árið 2100.

Þegar líftími hverfa eða mannvirkja er meiri en 100 ár þarf að taka tillit til væntanlegra sjávarstöðubreytinga til lengri tíma. Við ákvörðun á gólfkóta Hörpunnar, sem er í +5,0 m í Reykjavíkurkerfinu og +6,8 í hafnarkerfi, var miðað við hækkun meðalsjávarborðs til ársins 2200 og hönnunarflóðið ákvarðað+4,8 m í Reykjavíkurkerfi og +6,6 m í hafnarkerfi.

13. Greining á aftakasjávarhæð í nokkrum höfnum

Í þessum kafla verða tekin nokkur dæmi þar sem sjávarhæð í flóðaveðrum hefur verið greind og í sumum tilfellum verið notuð til ákvörðunar á lágmarkshæð lands á flóðasvæðum.

13.1. Húsavíkurhöfn – endurskoðun á hönnunarsjávarhæð

Í minnisblaði frá janúar 2016 gerir Vegagerðin grein fyrir ákvörðun á landhæð á landfyllingum við Húsavíkurhöfn⁴⁶. Þar er fyrst greint frá því að í rannsóknum fyrir Húsavíkurhöfn sem gert var grein fyrir í skýrslu Hafnamálastofnunar ríkisins frá 1986⁴⁷ var hönnunarsjávarstaða í höfninni ákvörðuð sem BK+2,26 m (HK+2,7 m). Sú ákvörðun byggði á stórstraumsflóði, BK+0,86 m (HK+1,3 m) + hækkun vegna lágs loftþrýstings (0,5 m) + vindáhlaðanda (0,3 m) + hækkun sjávarstöðu 1% af tímanum vegna grunnbrota (0,5 m).

Í aftakaveðrinu og flóðinu 24. október 2008 flæddi mikið á hafnarsvæðinu. Haft var eftir Stefáni Stefánssyni hafnarverði að sjávarhæðin í fyllum hafi náð um 40 cm yfir bryggjurnar við Suðurgarð. Sé það rétt þá hefur sjávarhæðin í fyllum náð u.þ.b. kóta BK+2,26 m (HK+2,7 m). Rætt var við Stefán í janúar 2016 og segir hann að fyllur séu verstar innst í höfninni, í krikanum við viktina og innst á Suðurgarði. Þetta staðfestir að fyllurnar eru vegna söga í höfninni. Hann segir að miklar breytingar hafi orðið á fyllingum í höfninni eftir byggingu Bökugarðs. Hafnarvigtingin hafi aðeins einu sinni farið á kaf eftir byggingu garðsins, í október 2008 veðrinu, en áður kom það oft fyrir. Hæðarmæling af hafnarsvæðinu var skoðuð með Stefáni og niðurstaðan að árlegar fyllur sem ná hálfa leið upp að vigt séu í kóta um BK+1,9 m.

Gaukur Hjartarson, skipulags- og byggingarfulltrúi, segir að í stærri veðrum síðustu ára gangi sjór upp á Hafnarstéttina og komist að vigtarhúsi. Oft sé dýpið á akstursleið um Hafnarstéttina um 0,2 m. Samkvæmt landmælingu er hæð á akstursleiðinni um BK+1,7, þannig að flóðhæð er þá í um BK+1,9 m.

Góð samsvörun er því í mati Stefáns og Gauks að árleg flóð ná BK+1,9 m (HK+2,34 m).

Samkvæmt ofansögðu þá stenst fyrri ákvörðun á hönnunarsjávarhæð fyrir höfnina með nokkurra áratuga endurkomutíma nokkuð vel, BK+2,26 m (HK+2,7 m). Hluti af þeirri sjávarhæð er vegna grunnbrota sem mynda fyllur og sog í höfninni. Því gætir þessarar sjávarstöðu meira þar sem fyllur ganga óhindrað upp á land eins og við bryggjur, en síður þar sem skýlt er fyrir þeim með fyrirstöðugörðum eins og á landfyllingum. Í minnisblaði Vegagerðarinnar frá janúar 2016 er gerð tillaga að því að hönnunarsjávarhæð fyrir landfyllingar verði 0,25 m lægri, sem svarar til helmings af hækkun vegna grunnbrota, og verður því BK+2,01 m (HK+2,45 m).

Þannig er hönnunarsjávarstaðan um 1,15 m hærri en meðalstórstraumsflóð fyrir svæði þar sem áhrif söga og grunnbrota eru takmörkuð, en um 1,4 m hærri þar sem áhrif söga og grunnbrota koma að fullu fram. Ákvörðun á lágmarkslandhæð byggði síðan á hönnunarsjávarhæðinni að viðbættum áætluðum sjávarstöðubreytingum vegna hnattrænnar hlýnunar og jarðskorpuhreyfinga.

⁴⁶ Vegagerðin, 2016. Minnisblað – Húsavík – ákvörðun á landhæð.

⁴⁷ Gísli Viggósson og Sigurður Sigurðarson, 1986. Húsavíkurhöfn – Skýrsla um rannsóknir og tillögur um úrbætur. Hafnamálastofnun

13.2. Flóðaveðrið á Austurlandi 29. til 30. desember 2015

Aðfaranótt 30. desember 2015 gekk djúp og öflug lægð úr suðri inn á sunnanvert landið⁴⁸. Lægsti loftþrýstingur mældist 930,2 hPa á Kirkjubæjarklaustri kl. 5 að morgni þess 30., en um 942 hPa á Dalatanga. Frá árinu 1949 hefur loftþrýstingur þar aðeins tvisvar farið niður í 941 hPa.

Í minnisblaði Vegagerðarinnar kemur fram að mikill veðurofsi hafi fylgt lægðinni og hafði veðrið mikil áhrif um allt land. Mjög hvasst var af austri á Austfjörðum að kvöldi 29. desember þegar lægðin var enn talsvert langt suður af landinu. Hún dýpkaði hratt, og var skilgreind sem sprengilægð. Lægðin var skammt suður af Ingólfshöfða á miðnætti.

Lægðin gekk áfram til norðurs og út af landi við Skjálfanda fyrir hádegi þann 30. desember. Þegar lægðin gekk til norðurs yfir land snerist vindátt á Austfjörðum í mjög hvasa suðaustanátt, og mældist meðalvindhraði 25 m/s eða meiri á öllum strandstöðvum á Austfjörðum frá kl. 5 að morgni þess 30. desember. Þann 30. desember fór saman að loftþrýstingur á Dalatanga fór undir 950 hPa og 10 mín. meðalvindhraði yfir 28 m/s. Besta mat Veðurstofunnar á endurkomutíma veðursins á Austfjörðum er að hann hlaupi á áratugum.

Enginn sjávarborðsmælir er á Austfjörðum og því eru engar mælingar til af sjávarhæð í þessu veðri.

Á fyrri hluta ársins 2016 mældi Vegagerðin flóðborð allvíða á svæðinu frá Eskifirði suður um til Hornafjarðar. Erfitt reyndist að finna flóðborð þar sem ágjöf hafð ekki áhrif.

Á Reyðarfirði mældust flóðborð á tveimur stöðum þar sem metið var að ágjöf hefði lítil eða engin áhrif. Hæð þessara flóðfara var +1,7 m í landshæðarkerfi eða sem næst +2,8 m í hafnarkerfi. Á Eskifirði mældist flóðborð +1,9 m þar sem lítillar ágjafar gættir. Þannig er flóðhæð í veðrinu á Reyðarfirði og Eskifirði metin sem 0,9 m yfir meðalstórstraumsflóði.

13.3. Siglufjörður – ákvörðun á lágmarksgólfkóta

Hér verður gerð grein fyrir ákvörðun á lágmarksgólfkóta bygginga á nýju fyllingarsvæði yst á Þormóðseyri við Siglufjörð. Auk þess að vera á þeim stað á landinu þar sem land sígur einna mest, sjá Mynd 1 til Mynd 3, er Siglufjörður byggður á seteyri þar sem land sígur undan álagi⁴⁹.

Togarabryggjan að sunnanverðu á eyrinni var byggð á árunum 1978 til 1979. Hún var byggð með fyllingum á veikum jarðlögum. Mesta sigið hefur væntanlega komið fram á byggingartíma en einnig verður töluvert langtíma sig. Samkvæmt mælingum⁵⁰ hefur hæðarbolti á Togarabryggjunni, sem komið er fyrir í lok framkvæmda, sigið um 57 mm milli árána 1979 og 2001 eða að jafnaði um 2,6 mm ári, en frá 2001 til 2017 hefur sigið numið um 15 mm sem svarar til tæplega 1 mm á ári. Þarna er um að ræða sig miðað við fastan punkt ofar á eyrinni. Þannig er sig á nýjum fyllingasvæðum mest í byrjun, en síðan dregur úr því. Það er hins vegar athyglisvert að sigið er enn til staðar á tímabili sem er um 20 til 40 árum eftir að sett er farg á sjávarbotninn.

Landfyllingasvæðið sem hér er til umfjöllunar er að hluta til búið að fylla en að hluta til fyrirhuguð landfylling. Þar sem til stendur að byggja atvinnuhúsnæði á þessum fyllingum má búast við langtímasigi umfram það sem verður á byggingartíma. Hér verður gert ráð fyrir að land haldi áfram að síga að jafnaði um 2 mm ári eða um 200 mm á einni öld.

⁴⁸ Elín Björk Jónasdóttir, 2016. Minnisblað Veðurstofu Íslands – Veðuryfirlit 29. til 30. desember 2015.

⁴⁹ Þorsteinn Jóhannsson, 2010. Spá um hækkun sjávarborðs á Siglufirði og Ólafsfirði. Verkfræðistofa Siglufjarðar

⁵⁰ Bragi Þór Haraldsson, Verkfræðistofan Stoð ehf, maí 2017.

Samkvæmt samfelldum GPS mælingum Veðurstofunnar sígur land við Siglufjörð um 3,5 mm á ári sem svarar til 350 mm á öld. Miðað við að um 30% af sjávarstöðuhækkun vegna hnattrænnar hlýnunar komi fram á Siglufirði, eins og gert er ráð fyrir í drögum að skýrslu vísindanefndar 2017, og að sú hækkun á heimsvísu verði 750 mm á einni öld, þá verður hækkunin á Siglufirði um 225 mm. Samtals gefa þessir þrír þættir því að afstaða lands og sjávar breytist sem nemur um 775 mm á einni öld.

Sjávarföll á Siglufirði voru ákvörðuð með stuttri mælingu árið 1976 sem var síðan samkeyrð með lengri mælingu frá Reykjavík. Samkvæmt þessari ákvörðun er meðalstórstraumsflóð í BK+0,55 m (HK+1,34 m). Um miðjan desember síðastliðinn mældist flóðhæð á innanverðri eyrinni hæst +1,17 (HK+1,96 m) eða um 0,62 m yfir meðalstórstraumsflóði. Að mati heimamanna kemur slíkt flóð á um 5 ára fresti⁵¹.

Í fyrrnefndri skýrslu Þorsteins Jóhannssonar eru flóðhæðir ákvarðaðar í 4 flóðum, Tafla 9, og endurkomutími flóða reiknaður á grundvelli þessara flóða þar sem gögnin eru nálgueð með Gumbel-líkindadreifingu, Tafla 10.

Tafla 9 Flóðhæð nokkurra sjávarflóða á Siglufirði, úr skýrslu Þorsteins Jóhannssonar 2010.

Ár	Hafnarkerfi (m)	Bæjarkerfi (m)
1934	+3,1	+2,3
1992	+2,4	+1,6
2002	+2,4	+1,6
2008	+2,7	+1,9

Tafla 10 Endurkomutími sjávarflóða á Siglufirði, úr skýrslu Þorsteins Jóhannssonar 2010.

Endurkomutími (ár)	Hafnarkerfi (m)	Bæjarkerfi (m)
15	+2,42	+1,63
20	+2,55	+1,76
25	+2,63	+1,84
30	+2,69	+1,90
50	+2,85	+2,06
100	+3,05	+2,26
200	+3,23	+2,44

Við mat á þessum niðurstöðum eru nokkur atriði sem ber að hafa í huga. Í fyrsta lagi eru flóðin sem notuð eru í úrvinnslunni mjög fá. Í öðru lagi virðist sem flóðhæðin sé metin á landi, af ljósmyndum og hugsanlega af frásögnum af flóðhæð við þekkta staði þar sem síðar hefur verið hægt að mæla flóðhæðin. Þannig eiga gögnin við um flóðhæð á landi þar sem ágjafar gætir en þurfa ekki að segja til um flóðhæð á sjó. Niðurstaðan verður sú að áætluð flóðhæð hækkar nokkuð bratt með hækkandi endurkomutíma. Frá 50 til 100 ára endurkomutíma hækkar flóðhæð um 20 cm og frá 100 til 200 ára endurkomu tíma um 18 cm. Sambærilegar tölur fyrir Reykjavík eru 4 cm fyrir bæði bilin, þ.e. frá 50 til 100 ára og frá 100 til 200 ára endurkomutíma og fyrir Patreksfjörð 6 cm. Þá er 100 ára flóðið samkvæmt greiningu Þorsteins 1,75 m yfir meðalstórstraumsflóði en sambærileg tala fyrir Reykjavík er rétt rúmlega 1 m og um 1,1 m á Patreksfirði.

⁵¹ Ármann Viðar Sigurðsson, byggingarfulltrúi Fjallabyggð, 2017. Munnlegar heimildir.

Vissulega eru rök fyrir því að munur 100 ára flóðhæðar og meðalstórstraumsflóðs sé meiri á Siglufirði en í Reykjavík og Patreksfirði vegna þess að sjávarfallabylgjan er lægri. Munurinn er hins vegar óeðlilega mikill. Þá er ekki útilokað að það magnist upp bylgjur á eigintíðni fjarðarins sem valdi því að sjávarhæð verður hærri en ella. Það eru hins vegar engar mælingar til, hvorki til að styðja þá tilgátu, né til að afsanna hana. Þessi umfjöllun sýnir í hnotskurn þörfina fyrir sjávarfallamælingar, en engar slíkar mælingar eru í gangi á Siglufirði.

Byggt á þessari skoðun er það metið svo að spá Þorsteins um 100 ára flóðhæð á Siglufirði eigi ekki við sjávarhæð heldur miðist hún við flóð á landi þar sem ágjafar sjávar á land gætir. Hafa ber í huga að hægt er að hafa áhrif á ágjöf með hækkun sjóvarna og landhæð næst sjó og reyndar er búið að byggja sjóvarnir á stórum hluta eyrinnar. Á grundvelli þessarar athugunar er ákveðið að miða flóðhæð á Siglufirði með 100 ára endurkomutíma við 1,1 m yfir meðalstórstraumsflóði.

Frá því að Þorsteinn vakti athygli á flóðahættu á eyrinni á Siglufirði hefur deiliskipulag reita á eyrinni miðað við að gólfkóti nýrra bygginga verði ekki lægri en +2,7 m. Í deiliskipulagi Þormóðseyri – Athafnasvæði frá 2013 er viðmiðunin bæjarkerfi en í drögum að deiliskipulagi Tjarnargata norðan við Hafnarbryggju frá 2017 er viðmiðunin meðalsjávarhæð (m.y.s.) sem væntanlega vísar til landshæðakerfis. Mismunum milli þessara tveggja kerfa er um 0,05 m.

Byggt á fyrirliggjandi gögnum og með hliðsjón af 100 ára flóðhæð annars staðar á landinu hefur lágmarksgólfkóti bygginga á nýjum fyllingarsvæðum verið ákvarðaður, Tafla 11. Samkvæmt þessari yfirferð stenst það viðmið að lágmarksgólfkóti miðist við +2,7 m í bæjarkerfi og innan skekkjumarka í landshæðakerfi sem miðast við meðalsjávarhæð.

Tafla 11 Tillaga að lágmarks gólfkóta bygging á nýjum fyllingarsvæðum á Siglufirði. Miðað er við sjávarhæð eftir 100 ár og að hnattræn hlýnun á heimsvísu verði 0,75 m á einni öld.

	Hafnarkerfi (m)	Bæjarkerfi (m)	Landshæðakerfi (m)
Meðalstórstraumsflóðhæð	+1,34	+0,55	0,6
100 ára flóðhæð yfir MSSFL	1,1		
Hækkun sjávarstöðu vegna hlýnunar	0,225		
Landsig á norðanverðum Tröllaskaga	0,35		
Landsig á eyrinni	0,2		
Hæð gólfs yfir hæstu sjávarstöðu	0,25		
Lágmarks gólfkóti nýrra bygginga	+3,465	+2,675	2,725

14. Hætta af sjávarflóðum og sjávarrofi

Hætta af sjávarflóðum og sjávarrofi er bakgrunnur vinnu Vegagerðarinnar við sjóvarnaáætlun sem er hluti samgönguáætlunar. Með forgangs röðun framkvæmda er lagt mat á það hvaða framkvæmdir séu mest aðkallandi til varnar sjávarflóðum og sjávarrofi. Hætta af sjávarflóðum og sjávarrofi er breytileg bæði í tíma og rúmi. Í tíma er hún breytileg vegna breytinga á afstöðu lands og sjávar, hækkandi sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar, landriss og landsigs og bæði í tíma og rúmi vegna landbrots og bygginga sjóvarna. Strandsvæði sem er í „mestri hættu“ við ákveðnar aðstæður dettur niður listann um leið og sjónvörn er byggð. Að sama skapi fer strandsvæði upp listann verði rof á náttúrulegum sjávarkambi eða sjóvarnarmánvirki.

Skoðum nú nokkur flóðaveður þar sem Viðlagatryggingar hafa þurft að greiða tjónabætur, Tafla 12.

Tafla 12 Flóðatjón sem bætt hafa verið af Viðlagatryggingu Íslands.

Ár	Dagsetning	Staðsetning	Tjónakostnaður* (M.kr.)
1990	9. janúar	Selvogshreppur, Grindavík, Þorlákshöfn, Hafnarfjörður, Stokkseyri, Gaulverjabæjarhreppur Breiðavíkurhreppur. Svalbarðseyri	597
1991	3. febrúar	Vatnsleysuströnd, Ölfushreppur, Kópavogur, Akureyri, Hólmavík, Dranganes, Breiðavíkurhr. Reykhólahreppur	28
1993	10.-11. janúar	Sjávarflóð Garður, Keflavík, Njarðvík, Dalvík, Seyðisfjörður	8
2015	29.-30. desember	Austfirðir	89

* Núvirt með byggingarvísitölu til september 2017

Flóðaveðrið 9. janúar 1990 hefur verið metið eitt allra verst flóðaveður suðvestan lands á tuttugustu öldinni. Þannig má meta endurkomutíma þess um 50 til 100 ár. Eins og kemur fram í töflunni var þá mesta flóðatjón sem bætt hefur verið af Viðlagatryggingu. Eftir flóðin hafa verið byggðir miklir sjóvarnargarðar á flestum ef ekki öllum þeim stöðum þar sem tjón varð, framan við alla byggðina á Eyrarbakka og Stokkseyri, í Selvogshreppi, og við Grindavík og Þorlákshöfn. Þannig er ekki við því að búast að verði viðlíka tjón ef samskonar veður gegni yfir við núverandi aðstæður.

Í ofsaveðrinu 3. febrúar 1991 varð mesta tjón sem orðið hefur á mannvirkjum í einu fátíðri hér á landi. Veðrið einkenndist af mikilli veðurhæð, fyrst úr suðaustri en fór síðan í suðvestan átt. Ölduhæð er langt því frá að vera álíka og í janúar 1990 veðrinu og er einna mest úti fyrir suður og suðausturlandi þegar að veðrið gengur yfir. Þó að það væri stórstreymt varð flóðatjón ekki mikið. Þó að tjón á landi hafi verið það mesta í langan tíma þá er erfitt að meta endurkomutíma veðursins sem flóðaveðurs. Suðvestan lands er hann sennilega ekki nema örfá ár, en gæti verið eitthvað lengri í Breiðafirði.

Þann 10. og 11. janúar 1993 er mjög stór straumur. Stjarnfræðileg sjárföll í Reykjavík eru +4,5 m á morgunflóði báða dagana. Alda er ekki sérstaklega há. Flóðatjón verður sennilega vegna samspils hárrar sjávarstöðu og tiltölulega algengrar ölduhæðar.

Áður hefur verið fjallað um flóðaveðrið á Austurlandi í lok desember 2015 og þar kom fram að samkvæmt besta mati Veðurstofunnar hlaupi endurkomutími veðursins á áratugum.

Hætta á sjávarflóðum er sem sagt mjög staðbundin. Hún er breytileg milli sveitarfélaga og landsvæða. Hún er breytileg í tíma, veður sem gengur yfir á einum stað á fjöru getur verið komið á annan stað á landinu á flóði. Þá breytist hættan með hækkun og styrkingu sjóvarna.

Með hækkandi sjávarstöðu eykst tíðni og umfang flóða. Miðað við tíðnigreiningu flóðhæða í Reykjavík þá má gera ráð fyrir að sjávarhæð sem við núverandi afstöðu lands og sjávar hefur um 100 til 200 ára endurkomutíma, hafi um 2 ára endurkomutíma þegar sjávarhæð hefur hækkað um 30 cm. Til að minnka hættu á flóðatjóni þarf því að hækka sjóvarnir í takt við hækkandi sjávarstöðu.

15. Nýjar viðmiðanir fyrir landhæð á lágsvæðum

Viðmiðun fyrir landhæð á lágsvæðum tekur mið af stjarnfræðilegum sjávarföllum, áhlaðanda vegna loftþrýstings, vinds og öldu, ásamt afstöðubreytingum lands og sjávar vegna lóðréttra jarðskorpuhreyfinga og hækkandi sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar.

Viðmiðunarreglurnar miðast við að landhæð sé jöfn eða hærri en ákveðin hámarkssjávarstaða þegar líftíma hverfis eða mannvirkis er náð. Hér er sjávarstaða skilgreind sem meðalhæð sjávar yfir eina til 10 mínútur og því ekki tekið tillit til öldunnar. Þar sem öldu gætir þurfa því að koma til flóðavarnir til að hindra ágjöf sjávar á land.

Lagt er til að viðmiðanir fyrir landhæð á lágsvæðum taki mið af aðstæðum á hverjum stað. Innan hvers bæjarfélags eru flestir þættir sem nefndir eru hér að ofan fastir. Tveir þeirra geta þó verið breytilegir milli svæða í sama bæjarfélagi, en það er vindáhlaðandi og ölduáhlaðandi. Því þarf að skoða þá þætti sérstaklega fyrir hvert skipulagssvæði sem er til umfjöllunar.

Þar sem ekki er til líkindafræðileg úrvinnsla sjávarborðsmælinga þá tekur ákvörðun á lágmarks landhæð mið af meðalstórstraumflóðhæð á hverjum stað, sjá Tafla 1. Ofan á þá hæð leggst síðan áhlaðandi vegna loftþrýstings, vinds og öldu miðað við 100 ára endurkomutíma. Þar sem fyrir hendi er nægjanlega löng tímaröð sjávarborðsmælinga til að byggja á líkindafræðilega úrvinnslu og ákvarða flóðhæð 100 ára flóðs, þá skal hún notuð, enda er áhlaðandi hluti sjávarborðsmælingarinnar.

Ofan á þetta bætist við hækkun sjávarstöðu vegna hnattrænnar hlýnunar í því hlutfalli sem fundið er í drögum að skýrslu vísindanefndar 2017 ásamt landhæðabreytingum vegna jarðskorpuhreyfinga, sjá Tafla 7. Þar sem veruleg óvissa er á mati á sjávarstöðuhækkun vegna hnattrænnar hlýnunar, óvissa varðandi varmapenslu og bráðnunar á Grænlandsjökli og Suðurskautslandinu, er hér lagt til að miðað verði við hæsta viðmið úr skýrslu vísindanefndar 2017, sem gerir ráð fyrir 1,0 m hnattrænni hækkun sjávarstöðu.

Í skýrslu þessari er lagt til að landhæð á lágsvæðum verði að lágmarki í sömu hæð og flóð með 100 ára endurkomutíma í lok 21. aldar. Til að taka enn frekar tillit til óvissu um sjávarstöðuhækkun m.a. vegna hnattrænnar hlýnunar, þá er lagt til að lágmarks gólfhæð húsa á lágsvæðum verði 0,3 m hærri en lágmarks landhæð. Grófrými svo sem bílakjallarar geta verið lægri en þau skulu þá varin leka upp í lágmarksgólfhæð.

Lagt er til að viðmiðunarreglur þessar verði uppfærðar reglulega eftir því sem þekkingu fleygir fram. Þá mikilvægt að koma upp neti sjávarborðsmæla þannig að viðmiðunarreglurnar miðist við raunbreytingar á afstöðu lands og sjávar.

Viðmiðunarreglurnar hafa verið kynntar fulltrúum Skipulagsstofnunar, Viðlagatryggingar og Veðurstofunnar. Ekki voru gerðar athugasemdir og samþykkt að miða við þá aðferðafræði sem þar er lögð fram við skipulag á lágsvæðum.

Hér verða gefin tvö dæmi um ákvörðun á lágmarksland- og gólfhæðum, annars vegar í Reykjavík og hins vegar á Húsavík.

Í Reykjavík þar sem til er nokkuð góðar sjávarborðsmælingar og miðast ákvörðun á lágmarks land- og gólfhæð við úrvinnslu þeirra mælinga. Samkvæmt því verður lágmarks landhæð í Reykjavík og við sunnanverðan Faxaflóa, þar sem ekki gætir ölduáhlaðanda, eins og fram kemur í Tafla 13. Ofan á þessar hæðir bætist ölduáhlaðandi þar sem hans gætir. Þessar viðmiðanir eru svipaðar, en ekki hærri en þær viðmiðanir sem Vegagerðin og forverar hennar á þessu sviði hafa stuðst við fyrir landsvæði við sunnanverðann Faxaflóa þar sem ölduáhlaðanda gætir ekki.

Tafla 13 Lágmarks land- og gólfhæðir á lágsvæðum í Reykjavík og við sunnanverðan Faxaflóa þar sem ekki gætir ölduáhlaðanda.

	Hafnarkerfi (m)	Bæjarkerfi (m)	Landshæðakerfi ISH2004 (m)
Flóðhæð með 100 ára endurkomutíma	+5,20	+3,38	+2,93
Hækkun vegna jarðskorpuhreyfinga og hnattrænnar hlýnunar	0,54	0,54	0,54
Lágmarkslandhæð á lágsvæðum þar sem ölduáhlaðanda gætir ekki	+5,74	+3,92	+3,47
Lágmarksgólfhæð á lágsvæðum þar sem ölduáhlaðanda gætir ekki	+6,04	+4,22	+3,77

Fyrir Húsavík eru ekki til sjávarborðsmælingar til ákvörðunar á flóðhæð með 100 ára endurkomutíma. Því þarf sú ákvörðun að byggja á meðalstórstraumsflóði að viðbættum áhlaðanda vegna vinds og loftþrýstings, auk áhlaðanda vegna soga fyrir lágsvæði við höfnina þar sem ekki gætir ölduáhlaðanda. Hér er gert ráð fyrir að áhlaðandi vegna vinds og loftþrýstings sé um 1,1 m. Ofan á það þarf að leggja áhlaðanda vegna soga á hafnarsvæðinu sem metin eru um 0,25 m, Tafla 14.

Tafla 14 Lágmarks land- og gólfhæðir á lágsvæðum við Húsavíkurhöfn þar sem ekki gætir ölduáhlaðanda en taka þarf tillit til soghreyfingar.

	Hafnarkerfi (m)	Bæjarkerfi (m)	Landshæðakerfi ISH2004 (m)
Meðalstórstraumsflóð	+1,30	+0,86	+0,63
Hækkun vegna áhlaðanda vinds, loftþrýstings og soga innan hafnar*	1,10	1,10	1,10
Hækkun vegna soga innan hafnar	0,25	0,25	0,25
Hækkun vegna jarðskorpuhreyfinga og hnattrænnar hlýnunar	0,32	0,32	0,32
Lágmarkslandhæð á lágsvæðum þar sem ölduáhlaðanda gætir ekki	+2,97	+2,53	+2,30
Lágmarksgólfhæð á lágsvæðum þar sem ölduáhlaðanda gætir ekki	+3,27	+2,83	+2,60

Niðurstaðan af þessum tveimur dæmum þar sem stuðst er við nýjustu upplýsingar um breytingar á afstöðu lands og sjávar, gefa svipaðar niðurstöður á lágmarkslandhæð og áður hafa verið ákvarðaðar. Þannig gefa niðurstöðurnar ekki tilefni til mikilla stefnubreytinga við ákvörðun á lágmarkslandhæð. Hins vegar þurfa sveitarfélög að vera vakandi yfir því að sjóvarnir verði hækkaðar í takt við hækkingu sjávarstöðu.

Viðauki 1 – Samband mismunandi hæðarkerfa

Tafla 15 gefur tengingu milli mismunandi hæðarkerfa fyrir nokkra staði á landinu.

Tafla 15 Samband mismunandi hæðarkerfa, upplýsingar fengnar frá Landmælingum Íslands í maí 2017.

Staður	Fastmerki	Hafnarkerfi [H]	Bæjarkerfi [B]	ISH2004 [I]	H-I	B-I
Reykjavík	3277	12,538	10,718	10,265	2,273	0,453
Þorlákshöfn	LM0723	5,581	Vantar	3,495	2,086	
Höfn ¹	VG06_Höfn			1,778		
Húsavík	LM051014	3,207	2,772	2,534	0,673	0,238
Dalvík ²	HB312	3,784	3,852	2,855	0,929	0,997
Skagaströnd	HB262	3,467	2,728	2,585	0,882	0,143
Grundarfjörður ³	HB41	6,775	4,585	4,574	2,201	0,011
Ólafsvík	HB32	6,205	3,975	4,043	2,162	-0,068
Rif	HB21	5,794	3,737	3,65	2,144	0,087
Patreksfjörður	LM2000	4,491	3,110	2,822	1,669	0,288
Þingeyri	HB121	5,237	3,812	3,546	1,691	0,266
Ísafjörður	HB172	4,136	3,062	2,804	1,332	0,258
Bolungarvík	HB152	7,827	6,467	6,553	1,274	-0,086
Akranes	FAXA	6,717	4,687	4,567	2,150	0,120
Hafnarfjörður ⁴	HB682	5,872	4,052			
Grindavík	LM0722	3,913	2,184	1,798	2,115	0,386
Njarðvík ⁴						
Breiðdalsvík ³	HB541	4,425	3,375	3,108	1,317	0,267
Djúpivogur	HB552	4,613	3,26	3,179	1,434	0,081
Tegningar með GPS						
Raufarhöfn ⁵	HB421	6,211	6,232	5,225	0,986	1,007
Vopnafjörður ⁶	HB451	3,896	2,88	2,997	0,899	-0,117
Stykkishólmur ⁷	HB51	6,662	4,648	4,372	2,29	0,276
¹ Vatnar upplýsingar frá höfninni eða VG						
² Bæjarkerfi lægra en hafnarkerfi						
³ Kannski ekki bæjarkerfi. Upplýsingar um hæð frá Siglingastofnun						
⁴ Vantar að tengja við ISH2004.						
⁵ Byggt á geóíðuhæð LM0332 og fínhallamælingu í HB421						
⁶ Byggt á geóíðuhæð LM0335 og fínhallamælingu í HB451						
⁷ Byggt á geóíðuhæð LM0314 og fínhallamælingu í HB51						