



ÁHRIF HÆKKUNAR SJÁVAR Á FRÁVEITUKERFI

Grétar Mar Hreggviðsson

Lokaverkefni í byggingartæknifræði BSc

2010

Höfundur/höfundar: **Grétar Mar Hreggviðsson**

Kennitala: **190374-3199**

Leiðbeinandi: **Brynjólfur Björnsson**

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering

Formáli

Tilurð þessa verkefnis má rekja til þess að höfundur var búinn að veltast í óvissu fram á 6. önn námsins um hvað skyldi tekið fyrir í BSc. verkefninu. Á veraldarvefsvafri varð fyrir tilviljun á vegi hans auglýsing á vef verkfræðideildar HÍ þar sem auglýstur var styrkur til meistaraverkefnis þar sem rannsaka átti áhrif úrkomuaukningar vegna hlýnandi veðurs af völdum loftslagsbreytinga á hönnun fráveitukerfa. Tekið var fram að nemandi þyrfti að hafa reynslu af forritun og grunn í tölulegri greiningu. Skipti engum togum að himnarnir opnuðust og svarið opinberaðist höfundi. Eitthvað í þessum dúr var algjörlega málið. Höfundur kom því að máli við Brynjólf Björnsson um hvort hann hefði einhverjar spennandi tillögur að lokaverkefnum, en reyndist Brynjólfur þá vera einn af leiðbeinendum með áður nefndu verkefni. Brynjólfur kom í framhaldi á fundi með Sigurði Inga hjá Orkuveitu Reykjavíkur, sem kom með nokkrar hugmyndir að verkefnum. Þar á meðal var sú sem lesandinn hefur nú í höndunum.

Ég vil þakka leiðbeinanda mínum, Brynjólfi Björnssyni fyrir ákaflega gott samstarf og fyrir að færa mér heim sanninn um að fráveitumál eru bæði spennandi og skemmtileg.

Ég vil þakka Sigurði Inga Skarphéðinssyni hjá Orkuveitu Reykjavíkur fyrir að gera mér kleift að vinna þetta verkefni innan veggja Orkuveitunnar. Fjólu Jóhannesdóttur hjá OR þakka ég hjartanlega alla aðstoðina, ég hefði verið illa settur án hennar. Einnig vil ég þakka Arndísi Ólafsdóttur kærlega fyrir að koma til vinnu í miðju fæðingarorlofi til að ýta fávísnum námsmanni úr vör, og Einari Grétarssyni þakka ég fyrir gögnin. Veitusviði þakka ég fyrir að fá að vera smá hluti af deildinni um stundarsakir.

Einnig vil ég þakka Gísla Viggóssyni, Ingunni Jónsdóttur og Eysteini Sigurðssyni hjá Siglingastofnun fyrir aðstoðina, gögnin og ótrúlega velvild.

Síðast en ekki síst vil ég þakka konunni minni og börnunum þremur fyrir að umbera mig.

Njótið heil!

Grétar Mar Hreggviðsson

Efnisyfirlit

Formáli	ii
Myndaskrá	v
Töfluskrá	vii
Ágrip	viii
1 Inngangur	1
1.1 Markmið verkefnis	2
1.2 Uppbygging verkefnis	2
2 Bakgrunnur verkefnis	3
2.1 Lítillega um loftslagsbreytingar	3
2.1.1 Örstutt um gróðurhúsaáhrif?	3
2.1.2 Aðeins um koltvíoxíð (CO ₂)	4
2.1.3 Líkleg áhrif hlýnunar á Íslandi	5
2.2 Hækkun sjávar á hundavaði	5
2.2.1 Staðan á heimsvísu	6
2.2.2 Staðan á Íslandi	6
2.3 Sjávarstaða við Ísland í sögulegu tilliti	7
2.3.1 Básendaflóðið	8
2.3.2 Síðari tíma flóð	8
2.3.3 Hæsta sjávarstaða í Reykjavík	9
2.4 Er sjávarborð raunverulega að hækka?	10
2.5 Almennt um fráveitukerfi	10
2.5.1 Skilgreiningar	11
2.5.2 Áhrif loftslagsbreytinga á fráveitukerfi	12
2.5.3 Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi	12
2.5.4 Áhrif hækkunar sjávar á afrennsli og grunnvatn	12
2.5.5 Afleiðingar flóða	12
2.5.6 Almennt um hermun lagnakerfa	13
2.5.7 Hönnunarforsendur Orkuveitu Reykjavíkur	14
3 Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi	15
3.1 Forsendur rannsókna	15
3.2 Lýsing á svæðinu	15
3.3 Grunnskilgreiningar	16
3.3.1 Sjávarhæðir	16
3.3.2 Skilgreining úrkomu	16
3.3.3 Afrenslissvæði	17
3.3.4 Afrenslisstuðlar	18

3.4	Framkvæmd	19
4	Niðurstöður	21
4.1	Samanburður við hönnunarforsendur OR	21
4.1.1	Kerfið án tillits til sjávarhæðar	22
4.1.2	Kerfið reiknað við meðalsjávarhæð	24
4.2	Niðurstöður hermílikans gagnvart sjávarborðshækkun	26
4.3	Samanburður sjávarhæða úr hermílikani og mældrar sjávarhæðar	27
4.4	Endurbætur vegna tregðu í kerfi	28
4.4.1	5 ára regn án tillits til sjávarhæðar	28
4.4.2	5 ára regn og há sjávarstaða	29
4.4.3	10 ára regn án tillits til sjávarhæðar	30
4.4.4	Hámarkssjávarhæðir eftir breytingu	30
5	Túlkun niðurstaðna	33
6	Samantekt	35
	Heimildaskrá	36
	Viðaukar	38
	Viðauki 1: Afrennslisstuðlar	38
	Viðauki 2: Chicago toppar	39
	Viðauki 3: Kort af kerfi við hámarkssjávarhæðir	40
	Viðauki 4: Hámarkssjávarhæðir fyrir öll úrkomutilvik	44
	Viðauki 5: Langsnið – sjór í lögnum	46
	Viðauki 6: Langsnið – áhrif breytinga	48
	5 ára tilfellið	48
	10 ára tilfellið	50
	Viðauki 7: Nokkrar myndir	52

Myndaskrá

Mynd 1: Mældur styrkur koltvívíoxíðs í andrúmsloftinu frá Mauna Loa stöðinni á Hawaii (Tans, 2010)	4
Mynd 2: Meðalsjávarhæð í Reykjavík 1956-2007. Tölur í kerfi Sjómælinga.	7
Mynd 3: Úr Morgunblaðinu 17. febrúar 1970	9
Mynd 4: Skematísk mynd af ferli hermílikans	13
Mynd 5: Eiðsgrandi að morgni 10. febrúar 2008 (mynd: Gunnar Sigmundsson)	15
Mynd 6: Regnskúr með 5 ára endurkomutíma og 10 mínútna varanda útfærður sem Chicago toppur.	17
Mynd 7: Skematísk mynd af skilgreiningu afrennslissvæða	17
Mynd 8: Skipting hverfis í afrennslissvæði	18
Mynd 9: Langsnið af fráveitulögn og brunni sem sýnir hvernig þrýstingur byggist upp í lögninni	21
Mynd 10: Staða lagna við regnskúr með 5 ára endurkomutíma án tillits til sjávarhæðar	22
Mynd 11: Staða kerfis við regnskúr með 10 ára endurkomutíma án tillits til sjávarhæðar	23
Mynd 12: Staða kerfis við regnskúr með 5 ára endurkomutíma og meðalsjávarhæð	24
Mynd 13: Staða kerfis við regnskúr með 10 ára endurkomutíma og meðalsjávarhæð	25
Mynd 14: Þolmörk kerfis gagnvart hækkun sjávar út frá niðurstöðum hermílikans	26
Mynd 15: Samanburður þolmarka kerfis fyrir og eftir breytingu	31
Mynd 16: Skipting afrennslissvæðis í meginsvæði	38
Mynd 17: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 1 mánaða regnskúr.	40
Mynd 18: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 1 árs regnskúr.	40
Mynd 19: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 2 ára regnskúr.	41
Mynd 20: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 3 ára regnskúr	41
Mynd 21: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 4 ára regnskúr	42
Mynd 22: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 5 ára regnskúr	42
Mynd 23: Langsnið af neðsta hluta kerfis við meðalsjávarhæð	46
Mynd 24: Langsnið af neðsta hluta kerfis við meðalstórstraumsflóð	47
Mynd 25: Langsnið við hámarkssjávarhæð 5 ára skúrar	48
Mynd 26: Langsnið fyrir breytingu - 5 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 2,41 m	49
Mynd 27: Langsnið eftir breytingu - 5 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 2,41 m	49

<i>Mynd 28: Langsnið við hámarkssjávarhæð 10 ára skúrar</i>	50
<i>Mynd 29: Langsnið fyrir breytingu - 10 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 1,78 m</i>	51
<i>Mynd 30: Langsnið eftir breytingu - 10 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 1,78 m</i>	51
<i>Mynd 31: Eiðsgrandi 9. september 2010 þegar sjávarhæð fór í um 2,7 m</i>	52
<i>Mynd 32: Reykjavíkurböfn 9. sept. 2010. Flóðið fór hæst að draslinu fremst á myndinni</i>	53
<i>Mynd 33: Reykjavíkurböfn 9. sept. 2010. Um 0,8 m vantaði upp á hafnarbakkann þegar hæst var.</i>	53
<i>Mynd 34: Ánanaust að morgni 10. feb. 2010 (mynd: Gunnar Sigmundsson)</i>	54
<i>Mynd 35: Ánanaust þann 22. mars 2007 (mynd: Gunnar Sigmundsson)</i>	54

Töfluskrá

Tafla 1: Endurkomutími hæstu sjávarstöðu í Reykjavík, skv. skýrslu Vísindanefndar, 2008	10
Tafla 2: Tafla yfir sjávarhæðir í Reykjavík	16
Tafla 3: Úrkomustyrkur regnskúra með 10 mínútna varanda skv. 1M5 forriti Vatnaverkefni HÍ	16
Tafla 4: Brunnar með hæstu vatnsstöðu m.v. 5 ára skúri án tillits til sjávarhæðar	22
Tafla 5: Brunnar með hæstu vatnsstöðu m.v. 10 ára skúr án tillits til sjávarhæðar	23
Tafla 6: Sjávarhæðir sem kerfið þolir, áður en flæðir upp úr því, við mismunandi endurkomutíma regnskúra	26
Tafla 7: Samanburður hámarkssjávarhæða skv. hermilíkani og mæligagna frá Siglingastofnun	27
Tafla 8: Hlutfall tíma yfir hámarkssjávarhæðum út frá mæligildum frá Siglingastofnun	27
Tafla 9: Hlutfall tíma yfir hámarkssjávarhæðum út frá mæligildum að teknu tilliti til landssigs 3mm/ári	28
Tafla 10: Samanburður rennslis í lögn 1708-1705 fyrir og eftir stækkun við 5 ára regn.	28
Tafla 11: Breyting á vatnshæð í brunnum, raðað eftir lækkun, án tillits til sjávarhæðar	29
Tafla 12: Breyting á vatnshæð í brunnum, raðað eftir lækkun, miðað við 5 ára regn og sjávarhæð 2,41 m.	29
Tafla 13: Samanburður rennslis í lögn 1708-1705 fyrir og eftir stækkun við 10 ára regn	30
Tafla 14: Breyting á vatnshæð í brunnum, miðað við 10 ára regn án tillits til sjávarhæðar	30
Tafla 15: Hámarkssjávarhæðir úr hermilíkani fyrir og eftir víkkun lagnar 1708-1705	31
Tafla 16: Samanburður niðurstaðna úr hermilíkani eftir breytingar á kerfi við mæligögn Siglingastofnunar	32
Tafla 17: Útreikningur á afrennslisstuðlum	38
Tafla 18: Chicago toppar fyrir þá úrkomu sem líkan er keyrt fyrir	39
Tafla 19: Ákvörðun hámarkssjávarhæða fyrir hvert regntilvik	45

Ágrip

Fjallað stuttlega um loftslagsbreytingar og hækkun sjávar af þeirra völdum, og áhrif þeirrar hækkunar á fráveitukerfi. Jafnframt er stuttleg umfjöllun um sjávarflóð á Íslandi fyrir og nú, og almenn umfjöllun um fráveitukerfi. Hermilíkan fyrir fráveitukerfi á skilgreindu lágsvæði sett upp og notað til að finna mestu sjávarhæð sem kerfið þolir fyrir tiltekin úrkomutilvik. Niðurstöður hermilíkans bornar saman við mældar sjávarhæðir frá sjávarhæðarmæli Siglingastofnunar Íslands og fundið hlutfall tímans sem sjávarhæðir eru yfir þeim mörkum sem kerfið þolir. Gerðar eru breytingar á kerfi út frá niðurstöðum hermilíkans í því augnamiði að minnka tregðu í kerfi og fundin ný hámarks sjávarhæðar gagnvart breyttu kerfi. Gerðar eru tillögur að úrbótum í samræmi við niðurstöður hermilíkans.

1 Inngangur

Það er merkileg tilviljun að þegar þegar þessi orð eru rituð stendur á sama tíma yfir í Cancún í Mexíkó ráðstefna Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar, COP16 ráðstefnan. Þar lagði Michel Jarraud framkvæmdastjóri Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar (WMO) fram skýrslu sem kemur fram að árið 2010 er orðið eitt af þremur hlýjstu árum frá upphafi mælinga og gæti orðið það hlýjasta, en það mun ráðast af hitastigi í desember, en hin árin tvö eru 1998 og 2005. Sagðist Jarraud vonast til að þessi niðurstaða myndi hafa áhrif á störf ráðstefnugesta sem fjalla eiga um samkomulag um losun gróðurhúsalofttegunda og taka á gildi 2012. Að sögn Jarraud hafa náttúrlega sveiflur áhrif á mælingar eins árs, mælingar yfir heilan áratug væru marktækari þegar verið væri að ræða leiðir til að spyrna við auknum flóðum, þurrkum og hækkun sjávar, en jafnframt kom fram að síðastliðin áratugur er sá hlýjasti frá upphafi mælinga. (Doyle og Gardner, 2010).

Það er ljóst að loftslagsbreytingar er stóra málið í dag, án efa stærsta málið sem mannkynið hefur staðið frammi fyrir. Afleiðingar loftslagsbreytinga og hnattrænnar hlýnunar er meðal annars hækkun sjávarborðs, m.a. vegna bráðnunar jökla. Breytingar á sjávarstöðu eru reyndar ekki nýtt fyrirbæri, en í jarðsögunni hefur sjávarstaða sveiflast um tugi metra. Þegar síðasta jökulskeið stóð sem hæst er sjávaryfirborð talið hafa verið um 120 metrum neðar en það er í dag. Sjávarstaða hefur tekið verulegum breytingum á Íslandi í jarðsögunni og sjást sjávarkambar víða í um 80 metra hæð á Suðurlandi. Í Öskjuhlíðinni er að finna minjar um hæstu sjávarstöðu frá ísaldarlokum. Breytingar af þessari stærðargráðu gerast vitanlega ekki á einum mannsaldri. Hins vegar þurfa breytingar á sjávarstöðu ekki að vera svo ýkja mikla til hafa áhrif á daglegt líf okkar. Hversu miklar þær „mega“ verða er meginspurningin sem reynt er að leita svara við í þessu verkefni.

Við hönnun mannvirkja í og við sjó þarf að taka tillit til margra þátta, s.s. gerðar mannvirkis, sjávarstöðu, öldustefnu og fleira. Einnig þarf að taka mið af líftíma mannvirkis, líftími hafnarmannvirkja er til að mynda yfirleitt miðaður við 40-50 ár, sem gerir það að verkum að tekið er tillit til langtímabreytinga á sjávarstöðu við hönnun þeirra. Líftími ýmissa bygginga er meiri en hafnarmannvirkja. Líftími kjallara undir hús er gjarnan áætlaður um 100 ár, en getur verið hundruðir ára fyrir stærri byggingar. Þegar líftími mannvirkja er 100 ár eða meiri þarf að taka fullt tillit til væntanlegra sjávarstöðubreytinga við hönnun þeirra.

Fráveitukerfi eru meðal þeirra mannvirkja sem hvað fyrst verða fyrir áhrifum hækkunar sjávar. Hér á Íslandi hefur það verið svolítið undir hælinn lagt hvort fráveitukerfi sem liggja út í sjó hafi verið hönnuð með tiltekna sjávarhæð í huga, hvað þá að við hönnun hafi verið tekið tillit til væntanlegra sjávarstöðubreytinga af völdum hnattrænnar hlýnunar. Það eru ekki flókin vísindi á bak við það að í lögn sem liggur út í sjó gætir sömu sjávarfalla og í fjörunni og vatnshæðin í lögninni er ávallt sú sama og sjávaryfirborðið.

Megintilgangur þessa verkefnis er að skoða áhrif hækkunar sjávar á tiltekið fráveitukerfi, skoða hvað kerfið þolir mikla hækkun miðað við tiltekna úrkomu og benda á mögulegar leiðir til úrbóta ef einhverjar eru. Jafnframt eru skoðaðar helstu spár um loftslagsbreytingar og hækkun sjávar til að leggja mat á hvort hækkun sjávar sé eitthvað sem raunverulega þurfi að hugsa um.

1.1 Markmið verkefnis

Markmið verkefnis eru eftirfarandi:

- Leggja mat á mögulegar hættur sem kunna að fylgja hækkun sjávar fyrir fráveitukerfi í Reykjavík út frá gögnum og heimildum.
- Setja upp hermilíkan af fráveitukerfi og ákvarða áhrif sjávarhæðar á kerfið.
- Kanna með hjálp hermilíkans hvort kerfið uppfylli hönnunarforsendur Orkuveitunnar.
- Finna með hjálp hermilíkans hámarkssjávarhæðir sem kerfið þolir við tiltekna úrkomu.
- Koma með ráð eða ábendingar til úrbóta

1.2 Uppbygging verkefnis

Uppbyggingin er þannig að fyrst er kafli sem nefnist *Bakgrunnur verkefnis* og er samantekt á því helsta sem talið er skipta máli; fyrst fjallað lítillega um loftslagsbreytingar, hnattræna hlýnun og hækkun sjávar og áhrif þessa á Ísland. Þá er stutt yfirreið yfir sjávarflóð á Íslandi fyrr og nú. Þá kemur almenn umfjöllun um fráveitukerfi, skilgreiningar og áhrif loftslagsbreytinga og hækkunar sjávar á fráveitukerfi, sem og afleiðingar flóða. Þá kemur almennt spjall um hermun lagnakerfa og um hönnunarforsendur Orkuveitu Reykjavíkur.

Í þriðja kafla, sem nefnist *Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi* er lýsing á verkefninu, forsendum rannsóknar og grunnskilgreiningar á sjávarhæðum, úrkomu o.fl. settar fram. Þá er lýsing á framkvæmd verkefnis.

Fjórði kafli inniheldur niðurstöður rannsóknarinnar. Í fyrsta hluta er fráveitukerfið borið saman við hönnunarforsendur OR, í öðrum hluta eru niðurstöður úr hermilíkani varðandi þol kerfisins gagnvart hækkun sjávar settar fram, í þriðja hluta eru niðurstöður úr hermilíkani bornar saman við mæligögn frá Siglingastofnun Íslands, og í fjórða hluta eru setta fram niðurstöður úr hermilíkani eftir endurbætur á fráveitukerfinu sem niðurstöður úr öðrum hluta gáfu í skyn að væru nauðsynlegar.

Fimmti kafli inniheldur túlkun niðurstaðna og möguleg ráð til úrbóta, og sjötti kaflinn er stutt samantekt.

2 Bakgrunnur verkefnis

Í þessum kafla er tekið saman það helsta sem höfundur telur skipta máli svo hægt sé að leggja mat á möguleg áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi. Þessari samantekt er á engan hátt ætlað að vera tæmandi umfjöllun um það sem að baki liggur heldur einungis að draga fram það helsta sem máli skiptir. Fyrst er rætt um loftslagsbreytingar og samband þeirra við hækkun sjávar. Þá er fjallað um hækkun sjávar, stöðuna á heimsvísu og á Íslandi og flóð fyrir og nú. Svo er bent á að ekki séu allir sammála þeim spádómum sem settir hafa verið fram og að lokum fjallað lítillega um fráveitukerfi, skilgreiningar og hönnun.

2.1 Lítillega um loftslagsbreytingar

Samantekt á nýlegum rannsóknum á loftslagsbreytingum er lýst í ástandsskýrslum Milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar (*The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) en svo nefnist vísindaráð sem stofnað var árið 1988 af Umhverfisstofnun Sameinuðu Þjóðanna (UNEP) og Alþjóðaveðurfræðistofnuninni (WMO). IPCC er ætlað að miðla upplýsingum til ríkja heims um loftslagsbreytingar og mögulegum umhverfis- og samfélagslegum áhrifum þeirra. IPCC er vísindanefnd, byggir greiningar sínar að mestu á ritrýndum vísindagreinum en stendur ekki að eigin rannsóknum. Þúsundir vísindamanna hvaðanæva úr heiminum koma að vinnu IPCC með einum eða öðrum hætti (IPCC, 2010).

Í nýjustu ástandsskýrslu IPCC, þeirri fjórðu í röðinni, sem kallast *Fourth Assessment Report (AR4)* og gefin var út árið 2007 segir m.a. að frá upphafi iðnbyltingar (um 1750) hafi hlýnað á jörðinni. Á síðustu 100 árum er hlýnun við yfirborð rúmlega 0,7°C og ýmsar breytingar tengdar hlýnun eru merkjanlegar: frostdögum hefur fækkað, heitum dögum fjölgað og hitabylgjur eru tíðari, víða má merkja verulegar breytingar á magni úrkomu, á norðlægum svæðum fellur meiri úrkoma en fyrir sem riginging en snjór, mjög víða hefur helliregn aukist, jafnvel á svæðum þar sem dregið hefur úr heildarúrkomu, tíðni flóða og þurrka hefur sums staðar aukist, hafís á norðurhveli hefur minnkað, snjóhula hefur minnkað víðast hvar og á norðurhveli færðist vorbráðnun fram um nærri tvær vikur á tímabilinu 1972 til 2000 (IPCC, 2007).

Það er niðurstaða milliríkjanefndarinnar að það sé mjög líklegt að meðalhiti jarðar hafi á síðari hluta 20. aldar verið hærri en á nokkru öðru 50 ára tímabili síðustu 500 árin og líklega sá hæsti í a.m.k. 1300 ár. Jafnframt er niðurstaða nefndarinnar að afar ólíklegt sé að hlýnun síðustu 50 ára megi útskýra án breytinga í ytri aðstæðum (þ.e. náttúrulegs breytileika), því samanlögð áhrif náttúrulegra þátta, þ.e. eldgosaoösku og breytinga á styrk sólar, hefðu líklega valdið kólnun á tímabilinu. Því telur nefndin vera ljóst að þessa hlýnun megi rekja til losunar gróðurhúsalofttegunda og að aukning gróðurhúsalofttegunda sé vegna athafna mannkyns og valdi hún megninu af þeirri hnattrænu hlýnun sem átt hefur sér stað frá því um miðja síðustu öld (Halldór Björnsson, Árný E. Sveinbjörnsdóttir, Anna K. Danielsdóttir, Árni Snorrason, Bjarni D. Sigurðsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson, 2008, bls 15).

2.1.1 Örstutt um gróðurhúsaáhrif?

Á 19. öld varð mönnum ljóst að lofthjúpurinn hækkar meðalhita jarðarinnar. Vissar lofttegundir í lofthjúpunum breyta varmageislun frá jörðinni þannig að neðri hluti lofthjúpsins og yfirborð jarðar hitna. Þessa lofttegundir eru nefndar gróðurhúsalofttegundir og áhrif þeirra gróðurhúsaáhrif. Án

gróðurhúsaáhrifana væri -18°C hiti á yfirborði jarðar og ólíklegt að líf hefði kviknað hér (Halldór Björnsson o.fl., 2008, bls 7).

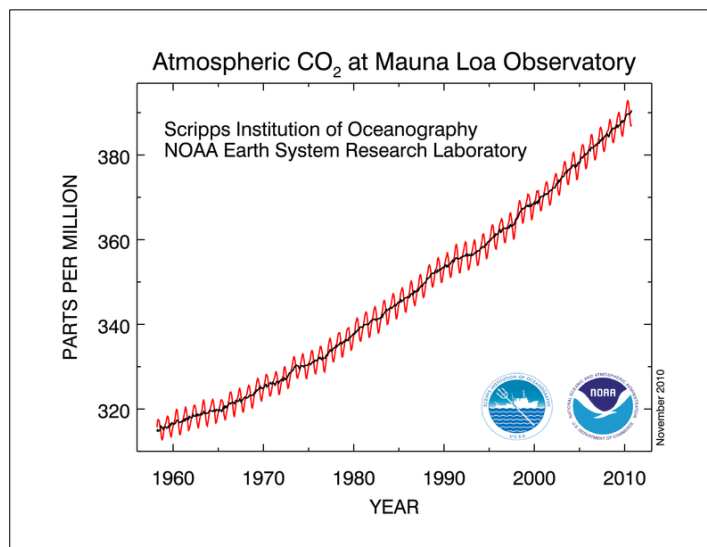
Sólskinið hitar jörðina með varmageislun. Um þriðjungur orkunnar speglast til baka í efstu lögum lofthjúpsins út í geiminn en afgangurinn verður eftir til að hita jörðina. Geislunin frá sólinni er að mestu sýnilegt ljós. Varminn frá sólinni ræður hins vegar ekki einn yfirborðshitanum á jörðinni, því jörðin geislar líka frá sér varma. Styrkur varmageislunar vex með hita, svo því heitari sem jörðin er því meira geislar hún frá sér. Hún getur hins vegar ekki geislað meira frá sér en hún fær frá sólinni svo að jafnvægi næst við hita þar sem heildarútgeislunar jarðar er jöfn þeirri varmageislun sem hún fær frá sólinni.

Varmageislun jarðarinnar er ekki sýnilegt ljós heldur innrautt ljós. Gróðurhúsalofttegundirnar í andrúmsloftinu hleypa ekki í gegnum sig innrauðu ljósi og gleypa því í sig varmageislunina frá jörðinni. Þær geisla svo hluta hennar áfram út í geim, en hinn hlutinn endurkastast niður að yfirborði jarðarinnar. Þessi endurgeislun frá lofthjúpnum niður til yfirborðsins hitar yfirborðið sem þá aftur geislar meiri varma. Þar með er komin ákveðin hringrás; gróðurhúsalofttegundirnar gleypa líka hina auknu varmageislun sem er svo endurkastað niður að yfirborði sem hitnar enn frekar. Magn gróðurhúsalofttegundanna í lofthjúpnum ræður því við hvaða hitastig jafnvægi næst. Á jörðinni næst jafnvægi þegar gróðurhúsaáhrif hafa hækkað hitan um 33°C . Til samanburðar má nefna að gróðurhúsaáhrif hækka yfirborðshita á Venusi um 450° , en á Venusi eru gríðarsterk gróðurhúsaáhrif.

Loftegundum sem valda gróðurhúsaáhrifum hefur verið skipt í tvo flokka; náttúrulegar lofttegundir, sem eru helstar koltvíoxíð (CO_2), metan (CH_4) og tvínituroxíð (N_2O), og manngerðar, sem eru meðal annars vetnisflúorkolefni (HFC) og klórflúorkolefni (CFC). Af þessum efnum er mest af koltvíoxíði. (Halldór Björnsson, 2006)

2.1.2 Aðeins um koltvíoxíð (CO_2)

Samfelldar mælingar á styrk koltvíoxíð í lofthjúpnum hófust 1958 á Mauna Loa í Kyrrahafinu, en þá var vitað að koltvíoxíð væri mikilvirk gróðurhúsalofttegund og þótti ástæða til að fylgjast með styrk



Mynd 1: Mældur styrkur koltvíoxíðs í andrúmsloftinu frá Mauna Loa stöðinni á Hawaii (Tans, 2010)

þess í lofthjúpnum. Strax á fyrstu árum mælinganna kom í ljós að styrkur koltvíoxíðs í lofthjúpnum jókst ár frá ári (Halldór Björnsson o.fl., 2008, bls 7). Við upphaf mælinganna var styrkur koltvíoxíðs um 315 ppm en nú árið 2010 hefur styrkurinn vaxið í um 389 ppm. Mynd 1 sýnir graf yfir mældan styrk CO_2 í andrúmsloftinu, rauða línan sýnir árstíðabundnar sveiflur en svarta línan er leiðrétt m.t.t. sveiflna (Tans, 2010).

Jafnframt því að mælingar hafi frá upphafi sýnt stöðugan vöxt koltvíoxíðs í andrúmsloftinu sýna rannsóknir á 3,2 km löngum borkjarna úr jökli Suðurskautslandsins að magn þess sé meira nú en það hefur verið síðustu 800.000 árin (Wolff, 2010).

2.1.3 Líkleg áhrif hlýnunar á Íslandi

Í kjölfar útgáfu 4. úttektar IPCC árið 2007 skipaði Umhverfissráðherra íslenska vísindanefnd um loftslagsbreytingar sem skilaði skýrslu árið 2008 um líkleg áhrif hnattrænna loftslagsbreytinga á Íslandi (Halldór Björnsson o.fl., 2008). Helstu niðurstöður hennar eru að hlýnun á Íslandi síðan samfelldar mælingar hófust snemma á 19. öld nemur rúmlega 0,7°C á öld, og er það sambærilegt við þá hnattræna hlýnun sem varð á tímabilinu. Ummerki þessarar hlýnunar eru greinileg í náttúru landsins: Allir jöklar sem ekki eru framhlaupsjöklar hafa hropað, framleiðni gróðurs hefur aukist, sjófugli við Ísland hefur fækkað, hlýnun hefur valdið greinilegum breytingum í stofnstærð og úrbreiðslu nokkurra fiskistofna svo eitthvað sé nefnt. Jafnframt hefur sjávarýfirborð í Reykjavík hækkað, líkt og nánar er vikið að í kafla 2.2.2 „Staðan á Íslandi“ (Halldór Björnsson o.fl., 2008, kafli 2).

Líklegast er að hlýnun við Ísland verði um 1°C fram undir miðja þessa öld, miðað við núverandi meðalhita, en 1,4-2,4 gráður í lok hennar. Ef fullt tillit er tekið til óvissu liggur þó hlýnunin á bilinu 0 til 3,6°C. Jafnframt má gera ráð fyrir að úrkoma aukist um 2-3% fyrir hverja gráðu sem hlýnar, auk þess sem líklegt er að ákefð úrkomu aukist og dögum án úrkomu fækki (Halldór Björnsson o.fl., 2008, kafli 5).

Nokkuð landsig er á suðvesturhluta landsins, mest á Reykjanesskaga eða um 8 mm/ári. Líklegt er talið að landsig á Íslandi muni halda áfram á sömu svæðum á næstu áratugum. Fyrir Reykjavík er niðurstaðan sú að varlegt mat á landsigi liggur á bilinu 2-4 mm/ári. Í skýrslu vísindanefndarinnar segir:

Á þeim svæðum á landinu þar sem landris eða landsig er óverulegt mun yfirborð sjávar að meðaltali hækka í takt við hnattræna hækkun. Augjóslega verður yfirborðshækkunin mest á þeim svæðum þar sem landsig leggst við hnattræna hækkun. Þetta á sérstaklega við um suðvestanvert landið.

...

Með hliðsjón af óvissumörkum bæði á hlýnun og sjávarborðshækkun þarf að lágmarki að gera ráð fyrir um hálfmætra hækkun sjávarýfirborðs og meiri þar sem landsigs gættir.

(Halldór Björnsson o.fl., 2008, bls 97).

Samkvæmt niðurstöðum IPCC verður hnattræn sjávarýfirborðshækkun líklega á bilinu 0,2 til 0,6 m á næstu öld. Hækkun sjávarstöðu getur því orðið verulegt vandamál, sérstaklega þar sem land er að síga. Þetta á m.a. við um lágsvæði á höfuðborgarsvæðinu og á Reykjanesskaganum þar sem landsig hefur verið nokkurt (Halldór Björnsson o.fl., 2008, kafli 4).

2.2 Hækkun sjávar á hundavaði

Afleiðing af hækkun sjávarborðs er aukin ágangur sjávar á land, en áhrif sjávarstöðubreytinga ráðast mest því hve mikil hætta er að sjávarflóði á viðkomandi stað. Þegar talað er um hnattræna hækkun sjávar þá er sú sjávarstaða miðuð við staðalaðstæður og segir því ekki alla söguna um hver endanleg hækkun muni verða. Ýmsir þættir hafa hér áhrif, sérstaklega þegar þeir fara saman, sem geta leitt til

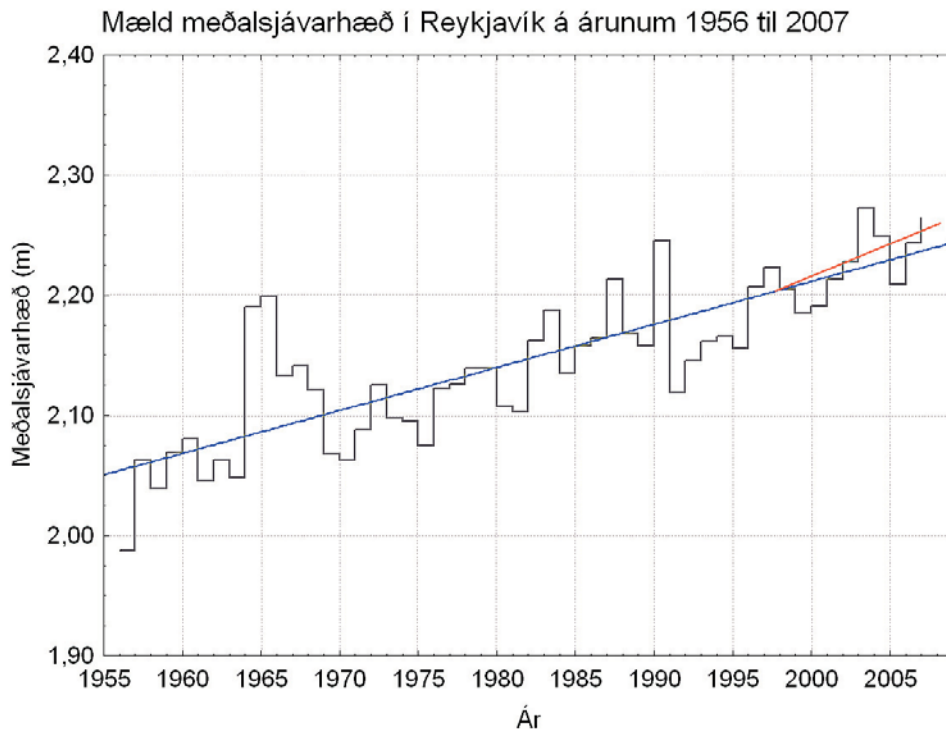
verulega hærri sjávarstöðu frá einum stað til annars. Fyrst skal nefna áhrif sjávarfalla, þ.e. áhrif aðdráttarafls tungls á sjávarhæð. Í öðru lagi loftþrýstingur, en lágur loftþrýstingur hækkar sjávarstöðu líkt og nánar er vikið að í kafla 3.3.1 "Sjávarhæðir." Að auki fylgir lægðum svokallaður vindáhlaðandi og ölduáhlaðandi sem getur hækkað sjávarstöðuna enn meira. Einnig skipta staðhættir miklu máli, hvaða hindrunum flóðaldan mætir þegar hún kemur upp landgrunnið, þ.e. lögun grunnsvæðisins, hvort sker séu til að draga úr mætti hennar, eða hvort grynki skyndilega eða þrengist til hliðanna þannig að yfirborð bylgjunnar lyftist, svokölluð grunnbrot (Trausti Valsson, 2005).

2.2.1 Staðan á heimsvísu

Samkvæmt IPCC er hnattræn hækkun sjávarborðs frá því um 1870 u.þ.b. 20 cm. Frá 1961 til 2003 hækkaði yfirborð sjávar að meðaltali um 1,8 mm á ári. Mælingar með gervihnöttum sýna að á árunum 1993-2008 hækkaði sjávarborð um 3,4 mm/ári, sem var nokkru meira en eldri spár IPCC höfðu gert ráð fyrir. Samkvæmt 4. útgáfu úttektar IPCC frá 2007 er líkleg hnattræn hækkun sjávarborðs til ársins 2100 á bilinu 0,20-0,60 m, en hækkunin stafar bæði af hlýnun heimshafana og bráðnun jökla. Um 70-75% af áætlaðri hækkun er vegna varmaþenslu, en mælingar sýna merkjanlega hlýnun sjávar á tímabilinu 1961 til 2003 og að varmáinnihald heimshafana hefur aukist. (Halldór Björnsson o.fl., 2008, bls 14)

2.2.2 Staðan á Íslandi

Mælingar á sjávarborði í Reykjavík hafa farið fram á vegum Sjómælinga Íslands frá árinu 1951. Siglingastofnun Íslands hefur unnið úr öllum gögnum fyrir tímabilið 1956 til 2007, og eru niðurstöður þessara athugana að sjávarborð fór hækkanði um 3,6 mm árlega á tímabilinu 1956 til 2007, en frá árinu 1997 til 2007 hækkaði sjávarborð um 5,5 mm á ári (Halldór Björnsson og fl., 2008.) Mynd 2 sýnir meðalsjávarhæð í Reykjavík árin 1956-2007. Búið er að fjarlægja áhrif sjávarfalla og loftþrýstings en ekki áhrif landsigs eða hitabreytinga. Tvær línur eru dregnar gegnum myndina, annars vegar fyrir árin 1956 til 2007 (halli þeirrar línu er 3,6 mm á ári), og hins vegar fyrir árin 1997 til 2007 (halli þeirrar línu er 5,5 mm á ári) (Halldór Björnsson o.fl., 2008, bls 39-40)



Mynd 2: Meðalsjávarhæð í Reykjavík 1956-2007. Tölur í kerfi Sjómælinga.

Meðalsjávarborð í Reykjavík sveiflast verulega frá ári til árs en að teknu tilliti til landsigs fylgir sjávarborðshækkun í Reykjavík til lengri tíma litið meðaltalshækkun heimshafanna.

Í skýrslu frá árinu 1992 sem nefnist „Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum“ (Skipulag Ríkisins, 1992) og Skipulag Ríkisins lét vinna var fjallað nokkuð um gróðurhúsaáhrif og hækkun sjávarborðs af þeim sökum. Lagt var til að tekið yrði tillit til þess við ákvörðun um hæðir á lóðum og lágmarks gólfkótum. Var þar miðað við þágildandi spá IPCC, að besta mat væri 0,66 metra hækkun, og að viðbættum öryggisstuðli og landsigi 0,15 metrum var sjávarborðshækkun til ársins 2100 skilgreind sem 0,81 metri yfir þáverandi sjávarhæð (Skipulag Ríkisins, 1992, 29). Skýrsla þessi er fyrsta heildastæða úttektin á þessum málum hér á landi og í skýrslunni er sett fram nauðsyn þess að tekið sé tillit til hækkunar sjávar vegna loftslagsbreytinga í skipulagsgerð, en í skýrslunni er farið fram á við sveitarfélög að þau taki þessi tilmæli inn í gerð sinna aðalskipulaga.

Árið 2008 var innleidd á Íslandi svokölluð „Flóðatilskipun“ Evrópusambandsins (Evróputilskipun 2007/60/EC). Hún leggur þær skyldur á herðar stjórnvalda að vatnsflóð og hlaup séu kortlögð og að fyrir liggja mat á flóðahættu. Tilskipunin tekur m.a. til sjávarflóða og skal frumáætlun flóðahættumats liggja fyrir 22. desember 2011.

2.3 Sjávarstaða við Ísland í sögulegu tilliti

Á Íslandi nálgast flestar lægðir landið úr suðvestri, og sú staðreynd, í viðbót við að nær engir skerjagarðar eru fyrir utan suðurströndina, þýðir að sjávarflóðahætta á Íslandi er langmest á því svæði, þ.e. ca. frá Akranesi og austur til Víkur í Mýrdal (Trausti Valsson, 2005). Af og til í gegnum söguna hafa orðið mikil sjávarflóð við Íslandsstrendur. Af því leiðir að þegar huga skal að hækkun sjávar og áhrifum þess er nauðsynlegt að skoða lítillaga söguna, enda tengjast áhrif

sjávarstöðubreytinga mest því hve mikil hætta er að sjávarflóðum á viðkomandi stað.

2.3.1 Básendaflóðið

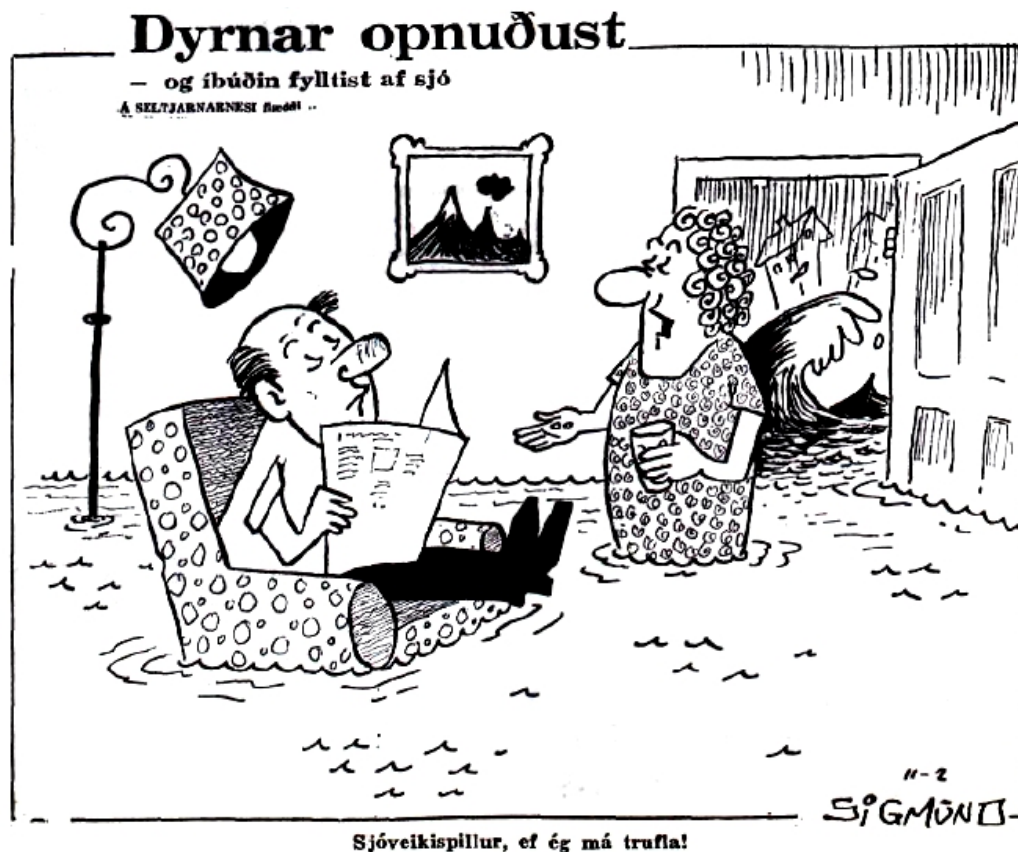
Eitt mesta sjávarflóð sem orðið hefur við Íslandsstrendur varð aðfaranótt 9. janúar 1799. Það hefur verið nefnt Básendaflóðið, kennt við Básenda á Reykjanesi. Básendar er gamall verslunar- og útróðrastaður, nokkuð sunnan Sandgerðis, þekktur frá fornu fari en lagðist í eyði við flóðið enda hreif það með sér flest húsin á svæðinu og eyðilagði landinguna sem og alla báta sem þar voru í naustum (Árni Hjartarson, 2010). Þetta var stórstraumsflóð samfara lágum loftþrýstingi og aftakaveðri af hafi og gekk sjór að minnsta kosti fjórum álfum (um 0,23 m) hærra á Básendum í flóðinu en í mestu stórstraumsflóðum, og gekk 164 faðma (274 metra m.v. þriggja álfna faðm) upp fyrir verslunarstaðinn (Lýður Björnsson, 2006)

Tjón varð mun víðar en á Básendum en heimildir eru um tjón allt frá Þjórsárósum til Barðastrandar. Í Staðarsveit á Snæfellsnesi gekk sjór allt að 1.500 föðum (um 2800 m) lengra á land en venja var við stórstreymi og Búðakaupstað tók af að mestu (Lýður Björnsson, 2006 bls. 6) Á Seltjarnarnesi spillti flóðið mörgum jörðum og eyðilagði yfir 20 hús (Árni Hjartarson, 2010).

Flóðinu olli mjög kröpp og djúp lægð, en talið er að loftþrýstingur í lægðarmiðju hafi numið um 930 mbr, jafnvel 920 mbr, ásamt því að stórstreymt var (Lýður Björnsson, 2006, bls. 10). eru þetta mestu hamfarir sem orðið hafa vegna sjávarfalla við Ísland á sögulegum tíma.

2.3.2 Síðari tíma flóð

Af og til hafa orðið mikil flóð í Reykjavík síðan Básendaflóðið reið yfir yfir og verða þau jafnan þegar saman fara krappar lægðir og há sjávarstaða. Eitt versta veðrið hefur verið nefnt *Pourquoi-Pas? veðrið* eftir franska hafrannsóknarskipinu Pourquoi-Pas? sem fórst undan Mýrum þegar veðrið gekk yfir þann 16. september 1936. Í þessu veðri gekk sjórinn yfir eiðið við Eiðsgrandan svo Seltjarnarnesið varð sem eyja í hafinu. Í febrúarbyrjun 1970 gekk mikið óveður yfir landið og samfara lágum loftþrýstingi og stórstreymi varð þann 7. febrúar mikið tjón vegna flóða í Reykjavík. Morgunblaðið frá 8. febrúar 1970 segir frá því að miklar skemmdir hafi orðið í Reykjavík og nágrenni, sjór flætt inn í hús og fært götur á kaf. M.a. segir á baksíðu Morgunblaðsins að „Eiðsgrandi og Ánanaust voru eins og stórgrýtisurð yfir að líta“ og „Skúlagatan eins og tjörn yfir að líta“. Kjallaraíbuð á Marbakka á Seltjarnarnesi fylltist svo að segja af sjó, og af því tilefni birtist í Mbl. þann 17. febrúar eftirfarandi mynd:



Mynd 3: Úr Morgunblaðinu 17. febrúar 1970

Í veðri sem stundum hefur verið nefnt „flóðaveðrið“ og gekk yfir 9. janúar 1990, gekk sjór á land við suðvestur ströndina og gríðarlegt tjón varð m.a. á Eyrarbakka, Stokkseyri og í Grindavík. Á forsíðu Morgunblaðsins þann 10. janúar segir; „Stormflóð veldur stórtjóni“ og „á Eyrarbakka og Stokkseyri fór sjórinn yfir og braut sjóvarnargarða og flæddi um þorpin. Talið er að eignatjón nemi tugum milljóna á hvorum stað.“ Á baksíðu sama blaðs segir að meðalölduhæð við Surtsey og Garðskaga hafi mælst 14 metrar og hæstu öldur allt að 20 metrum.

2.3.3 Hæsta sjávarstaða í Reykjavík

Sjávarhæð í Reykjavík virðist hafa farið upp fyrir 4,9 metra 8-10 sinnum á undangengnum 100 árum. 31. janúar 1990 fór flóðhæð upp í 4,89 metra og 2. janúar 1991 mældist 4,97 metra flóð. Þann 10 febrúar 1997 mældist hæsta sjávarstaða í Reykjavíkurböfn frá upphafi mælinga, eða 5.09 metrar. Í Morgunblaðinu þann 11. febrúar segir að flætt hafi upp um niðurföll í húsi við Skeljagrandu og lekið hafi inn í hús við Granaskjól og hafi slökkviliðið verið kallað til aðstoðar á báðum stöðum. Hins vegar varð úrkoma minni en búist hafði verið við og lítill vindur þannig að hvergi varð teljandi tjón af völdum flóða (Morgunblaðið, 11. feb. 1997.) Í þessu samhengi má nefna að dekk Reykjavíkurbafnar er í 5,35 metra hæð. Áðurnefndar tölur eru í kerfi Sjómælinga Íslands.

Eftirfarandi töflu er að finna í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar:

Endurkomutími hæstu sjávarstöðu í Reykjavík				
	Nú	2°C	3°C	4°C
5 ár	4,81	5,19	5,29	5,40
10 ár	4,90	5,27	5,38	5,48
25 ár	5,00	5,38	5,48	5,59
50 ár	5,08	5,46	5,56	5,67
100 ár	5,16	5,54	5,64	5,75

Tafla 1: Endurkomutími hæstu sjávarstöðu í Reykjavík, skv. skýrslu Vísindanefndar, 2008

Hér er hæsta sjávarborð í Reykjavík nú og við 2°, 3° og 4°C hlýnun til loka aldarinnar (miðað við hnattrænar hitabreytingar sbr. töflu 1.4 í IPCC, 2007.) Ef gert er ráð fyrir óbreyttu landsigi í Reykjavík má bæta 0,2-0,4 m við tölurnar (Halldór Björnsson o.fl, 2008, bls 96). Út frá ofangreindri töflu má sjá að hlýni á jörðinni um 2°C á öldinni þá jafngildir 5 ára flóðið í lok aldarinnar u.þ.b. 100 ára flóði í dag.

2.4 Er sjávarborð raunverulega að hækka?

Ekki eru allir á eitt sáttir um spár um loftslagsbreytingar og hækkun sjávar. Nils-Axel Mörner er sænskur vísindamaður sem hefur rannsakað m.a. sjávarstöðu og breytingar á henni í yfir 40 ár. Hann hefur mikið gagnrýnt aðferðafræði IPCC og hefur mótmælt harðlega spám þeirra (Mörner, 2004). Það sem hann gagnrýnir meðal annars er að niðurstöður IPCC byggi fyrst og fremst á líkönum en ekki mældum gögnum. Samkvæmt honum hækkaði sjávarborð um 1,1 mm frá 1850 til 1930-1940 og rannsóknir hans á snúningi jarðar staðfesti þetta; ef sjávarborð hækki aukist radíus jarðar og þá, samkvæmt einföldu eðlisfræðilögmáli um hverfitregðu, ætti að hægast á snúningi jarðar, sem hafi ekki gerst. Samkvæmt hans niðurstöðum má gera ráð fyrir hækkun sjávar sem nemur 10 cm ± 10 cm árið 2100 (Mörner, 2007).

Annar vísindamaður, Lee C. Gerhard, hefur verið mjög gagnrýnin á spár IPCC og notkun tölvulíkana við spár á loftslagsbreytingum (Gerhard, 2004). Hann heldur því fram að hlýnun jarðar sé af náttúrulega orsökum, að hinar svonefndu gróðurhúsalofttegundir hafi lítið ekkert að gera með hlýnun jarðar, að losun mannfólksins hafi hverfandi áhrif miðað við náttúrulega þætti, og að raunar sé aukið magn CO₂ í andrúmsloftinu afleiðing af hlýnun jarðar en ekki orsök. Í jarðsögunni hafi magn CO₂ oft verið meira; m.a. verið um tvöfalt meira fyrir um 60 milljón árum og hafi líklega verið 17 sinnum meira á jökulskeiði forkambríum fyrir um 500 milljón árum (Gerhard, bls 1215). Hann kallar Kyoto bókunina „ódýran plástur“ og segir aðgerðir gegn loftslagsbreytingum gagnslausar.

Það er rétt að það komi hér fram að báðir ofangreindir vísindamenn eru á lista The Daily Green (www.thedailygreen.com) yfir vísindamenn sem þegið hafa styrki frá olíuiðnaðnum (The Daily Green, 2008).

Hver hækkunin verður á endanum veit engin fyrir víst. Það hlýtur a.m.k. að vera ljóst að hækkun sjávar er mál sem þarf að skoða af fullri alvöru, og þá ekki síst varðandi hönnun og rekstur fráveitukerfa, sem eru þau mannvirki sem einna fyrst finna fyrir hækkandi sjávarborði.

2.5 Almennt um fráveitukerfi

Meginhlutverk fráveitukerfa er að flytja fráveituvatn, bæði skólp og ofanvatn, frá uppsprettu að

viðtaka þannig að heilsu almennings stafi ekki hætta af. Með viðtaka er átt við það vatnasvæði sem fráveituvatn er leitt til. Einnig er hlutverk fráveitunnar að vernda almenning gegn sjúkdómum og flóðum, vernda grunnvatn undir bæjum o.fl.

Fráveitukerfum má skipta í tvo flokka; **einföld kerfi** (blandkerfi), þar sem skólþ og ofanvatn renna í sömu lögnum, og **tvöföld kerfi** (sérkerfi), þar sem skólþ og ofanvatn renna í aðskildum lögnum. Einföld kerfi voru algengasta útfærslan áður fyrr, en eru ekki notuð í nýjum hverfum í dag. Einföld kerfi eru ódýrari en tvöföld en hafa þó ýmsa galla; t.d. getur skólþblandað regnvatn flætt upp í kjöllurum, þau auka álag á skólþhreinistöðvar og skólþblandað regnvatn berst óhreinsað í viðtaka um yfirföll í miklum rigningum. Helstu kostir tvöfaldrar kerfa er að allt skólþ er hreinsað, ekkert skólþ fer óhreinsað á yfirfall og hægt er að leiða skólþ og regnvatn í sitthvorn viðtakann.

Varnir gegn flóðum í þéttbýlisstöðum vegna ranglega hannaðra eða of lítilla lagna er mikilvægt mál. Íbúarnir greiða holræsagjöld og ætlast til þess að fráveitukerfin virki án ótta við veðrabrigði. Hins vegar væri fráveitukerfi sem réði við jafnvel verstu tilfelli alltof dýrt og erfitt í rekstri. Við hönnun fráveitukerfa er því ekki hjá því komist að meta öryggi íbúanna og björgun verðmæta út frá tæknilegum og fjárhagslegum mörkum/annmörkum (Schmitt, Thomas og Ettrich, 2004)

2.5.1 Skilgreiningar

Hér á landi eru í gildi lög um fráveitur (Lög um uppbyggingu og rekstur fráveitna nr. 9/2009). Markmið þessara laga er m.a. afmarka skyldur sveitarfélaga hvað varðar fráveitumál og fráveituframkvæmdir og tryggja uppbyggingu og starfrækslu fráveitna þannig að frárennsli valdi sem minnstum óæskilegum áhrifum á umhverfið. Samkvæmt 4. grein þessara laga ber viðkomandi sveitarfélag ábyrgð á uppbyggingu fráveitna í sveitarfélaginu. Í lögum þessum eru jafnframt eftirfarandi skilgreiningar:

1. *Frárennsli*: Rennsli frá mannvirkjum, götum, lóðum, gönguleiðum eða opnum svæðum, svo sem ofanvatn og/eða skólþ og vatn frá upphitunarkerfum mannvirkja sem veitt er í **fráveitur**.

2. *Fráveita*: Leiðslukerfi og búnaður til meðhöndlunar og hreinsunar skólþs. Til fráveitu telst allt lagnakerfi sem flytur frárennsli frá heimilum, stofnunum, atvinnufyrirtækjum, götum, gönguleiðum, lóðum og opnum svæðum, svo sem tengingar við einstakar fasteignir, niðurföll, svelgir, brunnar, safnkerfi, tengiræsi, sniðræsi, stofnlagnir, yfirföll og útræsi. Til fráveitu teljast einnig öll mannvirki sem reist eru til meðhöndlunar eða flutnings á frárennsli, svo sem hreinsivirki, dælu- og hreinsistöðvar og set- og miðlunartjarnir.

...

7. *Ofanvatn*: Regnvatn og leysingarvatn sem rennur í **fráveitur** af húspökum, götum, gangstéttum og öðru þéttu yfirborði. (Lög um uppbyggingu og rekstur fráveitna nr. 9/2009)

Áður en þessi lög tóku gildi var notast við reglugerð 798/1999 um fráveitur og skólþ, og er hún nánari útfærsla lögum um hollustuhætti og mengunarvarnir nr. 7/1998. Sú reglugerð tekur fyrst og fremst á mengunarvörnum af völdum skólþs og því að koma á samræmdri meðhöndlun á skólþi frá íbúabyggð og atvinnurekstri, en tekur ekki á hönnun kerfanna sem slíkra (Reglugerð um fráveitur og skólþ nr. 798/1999.)

Einnig er í gildi evrópustaðall sem nefnist *EN 752 Drain and sewer systems outside buildings* og tekur m.a. sérstaklega á sjálfrennsli lögnum. Samkvæmt EN 752 er flóð skilgreint sem „ástand þar sem skólþ og/eða ofanvatn sleppur frá eða kemst ekki inn í fráveitukerfi og ýmist safnast fyrir á

yfirborðinu eða rennur inn í byggingar¹.” (CEN, 2008)

2.5.2 Áhrif loftslagsbreytinga á fráveitukerfi

Hönnun fráveitukerfis byggir m.a. á áætluðu afrennsli landsvæðis við tiltekna rigningu og landhæð. Þótt magn úrkomu milli ára geti verið breytilegt hefur verið litið svo á að sögulegar regnmælingar gefi nokkuð áreiðanlegt mat á úrkomu í framtíðinni og afrennsli yfir líftíma kerfisins. Af því gefnu að kerfinu hafi verið haldið vel við megi því gefa sér að kerfið uppfylli hönnunarforsendur út líftíma sinn. Rannsóknir í loftslagsfræðum gefa hins vegar tilefni til að velta fyrir sér hvort hönnunarforsendur skilgreindar út frá sögulegum gögnum eigi við í framtíðinni (Titues, Kuo, Gibbs, LaRoche, Webb og Waddell, 1987). Einsog áður hefur komið fram gera spár IPCC ráð fyrir 2-3% aukningu á úrkomu fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Svörtustu spár gera svo ráð fyrir allt að 4°C hlýnun til ársins 2100, þó líklegast mat sé talið 1,4-2,4 °C. Því gæti úrkoma aukist nokkuð á næstu áratugum sem þýðir aukið álag á fráveitukerfi. Við það bætist hækkun sjávar, sem er fylgifyrirlaus breytinga, en hækkun dregur úr virkni fráveitukerfana.

2.5.3 Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi

Við hönnun fráveitukerfa við sjávarsíðuna er að ýmsu að huga; áhrifa sjávarfalla, lítill landhalli og há grunnvatnsstaða. Hraði í sjálfrennislögnum, og þá hversu mikið lögnin getur flutt, ákvarðast að mestu af hæðarmismuni; því meiri hæðarmunur, því meiri halli á vökvalínunni (e. hydraulic head) og því meiri flutningsgeta.

Strandsvæði eru jafnan láglend og því viðkæm fyrir sjávarflóðum. Há sjávarstaðar getur minnkað hæðarmuninn (fallhæðina) í lagnakerfinu og því hægt á rennsli lagnanna. Það leiðir til að flutningsgeta kerfanna minnkar sem aftur leiðir til flóða uppúr kerfinu. Hækkun sjávar veldur jafnframt hækkun á grunnvatnsstöðu sem aftur eykur innrennsli í fráveitukerfi (Titues, Kuo, Gibbs, LaRoche, Webb og Waddell, 1987).

2.5.4 Áhrif hækkunar sjávar á afrennsli og grunnvatn

Hækkun sjávarborðs getur valdið auknu afrennsli á strandsvæðum, því við hækkun sjávar hækkar grunnvatnsstaðan, og hækkun á grunnvatnsstöðu leiðir til þess að minna af úrkomunni sígur niður í jarðveginn. Þetta orsakar jafnframt minna grunnvatnsstreymi, því vatnið sem áður seig niður í jarðveginn rennur í fráveitukerfið. Sambandið milli sjávarborðshækkunar og afrennslis er þannig háð „næmi“ afrennslisins gagnvart breytingum á grunnvatnsstöðu. Sýnt var fram á verulega fylgni þarna á milli í rannsókn sem gerð var árið 1990 í Cape Cod þjóðgarðinum í Massachusetts í Bandaríkjunum. Samkvæmt þeirri rannsókn olli 10 cm hækkun grunnvatnsstöðu 70% aukningu á afrennsli og 20% minnkun á grunnvatnsstreymi. (Nuttle og Portnoy, 1990)

2.5.5 Afleiðingar flóða

Flóð vegna bilana eða annmarka í fráveitukerfum geta valdið miklu tjóni, bæði á byggingum og öðrum verðmætum. Jafnframt getur umferð tafist eða stöðvast alveg ef flæðir yfir götur, með öllum þeim beinu og óbeinu afleiðingum sem það getur haft. Heildartjón er jafnan í beinu sambandi við stærð flóðsins, þ.e. dýpt flóðsins, vatnsmagnið sem sleppur úr eða kemst ekki niður í fráveitukerfið og lengd þess. Á svæðum þar sem tiltölulega bratt er getur jafnframt rennslisraðinn aukið enn á tjónið. (Schmitt, Thomas og Etrich, 2004)

¹ EN 752 „condition where wastewater and/or surface water escapes from or can not enter a drain or sewer system and either remains on the surface or enters buildings“ (CEN, 2008)

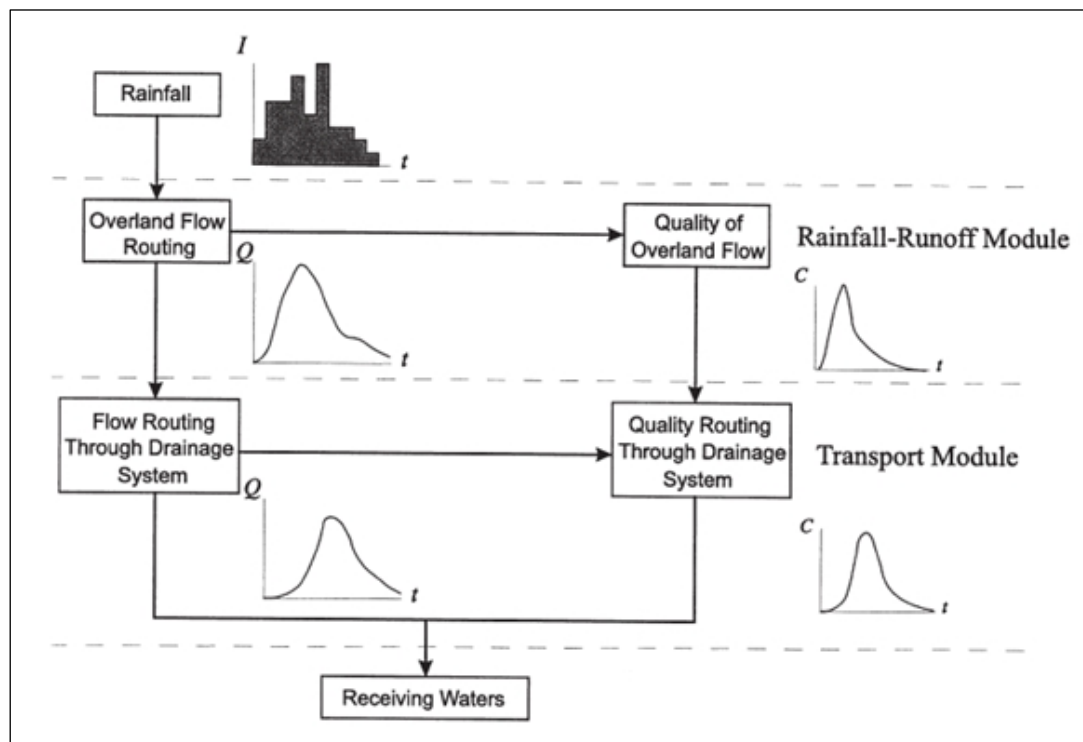
Við hönnun eða breytingar á fráveitulögnum er því nauðsynlegt að setja upp einhvers konar hermilíkan til að meta rennsli og líkur á flóðum úr kerfinu og lágmarka þær.

2.5.6 Almennt um hermun lagnakerfa

Upp úr miðjum sjöunda áratug síðustu aldar var farið að notast við tölvulíkon til að herma vatnasvæði og greina magn og eiginleika (gæði) ofanvatns. Stofnanir á vegum bandaríska sjórvalda, s.s. Umhverfisstofnunin (EPA), stóðu að gerð þessara kerfa. Síðan þá hafa mjög mörg kerfi verið þróuð, líkon sem byggja á allt frá einföldum formúlum til flókinnna straumfræðilegra útreikninga (Zoppou, 2001).

Mat á mögulegum áhrifum loftslagsbreytinga á vatnakerfi hefur verið ráðandi þáttur í vatnafræðilegum og vatnafarslegum rannsóknum síðustu tvo áratugi. Síðustu ár hefur hins vegar sú krafa orðið háværari að slíkar rannsóknir taki tillit til fleiri þátta. Því hefur aukist notkun hermilíkana sem taka ekki bara vatna- og straumfræðilega þætti inn í reikninginn, heldur líka spár um þéttbýlisþróun, landnotkun, losun gróðurhúsalofttegunda og loftslagsbreytingar (Semadeni-Davies, Hernebring, Svensson og Gustafsson, 2008).

Grunnþættir regnvatnslíkans eru i) *ricingar-afrennslis líkan* (e. rainfall-runoff module), þar sem afrennsli er skilgreint út frá úrkomu og afrennsli svæða og ii) *flutningslíkan* (e. transport module) sem reiknar úr hvernig vatnið berst eftir veitukerfinu (sem geta verið skurðir, lagnir, tjarnir o.fl.) og út í viðtaka. Tengingin milli þessara þátt er samkvæmt eftirfarandi mynd (Zoppou, 2001 bls. 200):



Mynd 4: Skematísk mynd af ferli hermilíkans

Ferillinn er í stuttu máli þannig að landsvæðinu er skipt í afrennslissvæði og hvert svæði fær ákveðinn afrennslisstuðul. Regnskúr með tiltekin úrkomustyrk eða endurkomutíma er „látin falla“ á svæðið og líkanið reiknar út vatnsmagnið sem skilar sér í fráveitukerfið. Þetta vatnsmagn er svo

notað til að herma lagnakerfið; hvernig lagnakerfið bregst við, hvort einhvers staðar flæði upp úr kerfinu o.s.frv. Þrátt fyrir mikla gagnsemi slíkra hermilíkana og hægræði sem af þeim hlýst gerir enn sem komið er Orkuveita Reykjavíkur eitt veitufyrirtækja kröfu til hönnuða að hönnun kerfa fylgi niðurstöður hermilíkans þar sem lagnakerfið er keyrt miðað við skilgreindar hönnunarforsendur.

2.5.7 Hönnunarforsendur Orkuveitu Reykjavíkur

Fyrir nokkrum árum setti Orkuveita Reykjavíkur fram leiðbeiningar um það hvernig útfæra skyldi hönnunarforsendur þær er OR setur, og er í þeim fjallað um skólþ, ofanvatn og bakvatn hitaveitu. Í þeim segir að „markmiðið með leiðbeiningunum er að taka saman á einum stað forsendur fyrir hönnunarrennsli fráveitu. Með því náist samræming vinnubragða milli hönnuða sem OR fær sér til aðstoðar við hönnun.“ (OR, 2008)

Í leiðbeiningunum segir að ofanvatnskerfi sem hönnuð eru fyrir OR skuli uppfylla eftirfarandi skilyrði, nema annað sé sérstaklega ákveðið:

- Við skúr með 5 ára endurkomutíma skal almenna reglan vera að lagnir séu ekki undir þrýstingi og hvergi í kerfinu má vatnsyfirborð (hydraulic grade line) ná yfirborði lands.
- Við skúr með 10 ára endurkomutíma má vatnsyfirborð (hydraulic grade line) hvergi ná yfirborði lands, nema að öruggt sé að flóðavatn valdi ekki tjóni og rennsli til viðtaka sé tryggt.

Á miðbæjarsvæðum eða svæðum sem búast má við umtalsverðu eignatjóni ef flæðir upp á yfirborð skal nota hærri endurkomutíma, einsog fram kemur í leiðbeiningum (OR, 2008, bls. 6)

Lágmarksvarandi sem hannað er fyrir skal ávallt vera 10 mínútur. Sé samrennslistími kerfis hærri en varandi skal skoða bæði og velja óhagstæðara tilvikið.

Kveðið er á um það í leiðbeiningunum að herma skuli öll ofanvatnskerfi og skólþkerfi í Mike Urban forritinu frá DHI, og hönnunarskúrir sem nota skal við hermun eru svokallaðir „Chicago toppar“ samkvæmt 1M5 forriti VVHÍ.

3 Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi

Í þessum kafla er fjallað um verkefnið og hvernig það var unnið, staðháttum þess hverfis sem valið var að skoða lýst og grunnskilgreiningar settar fram um sjávarhæðir, úrkomu og fleira.

3.1 Forsendur rannsóknar

Verkefnið fólst í því að skoða hver eru áhrif hækkun sjávarborðs á fráveitukerfi Reykjavíkur. Tekið er fyrir hverfið kringum Eiðsgrandann, sem er eitt þeirra svæða sem liggja hvað lægst í Reykjavík, þó finna megi punkta sem liggja lægra s.s. í Kvosinni. Allt fráveituvatn frá Kvosinni fer hins vegar um dælustöð og eru þau svæði því ekki eins viðkvæm fyrir breytingum á sjávarstöðu, þó vitanlega hafi hækkun sjávar líka áhrif á slík kerfi m.a. í formi aukins álags vegna írennslis í lagnir sökum hækkandi grunnvatnsstöðu.



Mynd 5: Eiðsgrandi að morgni 10. febrúar 2008 (mynd: Gunnar Sigmundsson)

3.2 Lýsing á svæðinu

Hverfið sem hér um ræðir markast af Eiðsgranda, Öldugranda, Granaskjóli, Frostaskjóli og Keilugranda, og er það um 15 hektarar að stærð.

Í þessu hverfi er tvöfalt fráveitukerfi, þ.e. allt skólþ er leitt um hreinsistöðina í Ánanaustum og þaðan dælt út í sjó en ofanvatn er leitt út í sjó um sjálfrennislagnir. Allar sveiflur í sjávarhæð hafa því áhrif á regnvatnskerfið, enda eru botnkótar neðstu brunna neðan sjávarmáls (meðalsjávarhæðar) og því liggur sjór í þeim hluta kerfisins stóran hluta ársins. Viðauki 5: *Sjór í lögnum - Langsnið af neðsta hluta lagnakerfis* inniheldur myndir (myndir 22. og 23.) sem sýna langsnið af neðsta hluta kerfisins

við meðalsjávarhæð og meðalstórstraumsflóð og hvernig sjórinn liggur inn eftir kerfinu.

Hverfið er mjög láglent en landhæð er víðast hvar um 5 metrum yfir sjávarmáli, lægst er hún við ofanverða Skelja- og Seilugranda um 4 m.y.s. Hvað byggðina varðar er um tiltölulega einsleitt hverfi að ræða með nokkuð skýra skiptingu milli hverfasvæða. Við göturnar næst sjónum (Öldugranda, Skeljagranda, Seilugranda, Rekagranda og Keilugranda) eru nánast eingöngu fjölbýlishús, en innar í hverfinu eru Frostaskjól og Granaskjól með þetta byggð einbýlis- og raðhúsa eingöngu.

3.3 Grunnskilgreiningar

Nema annað sé tekið fram er notast við hæðartölur í hæðarkerfi Reykjavíkur, sem liggur 1,82 metrum neðan kerfis Sjómælinga Íslands (Sjómælingar Íslands, 2006). Varðandi orðanotkun um úrkomustyrk regnskúra þá er til styttingar oft talað um *5 ára skúr* eða *10 ára skúr*. Þá er átt við regnskúr með viðeigandi endurkomutíma, þ.e. regnskúr með 5 eða 10 ára endurkomutíma svo dæmi sé tekið. Sömu venju er beitt varðandi flóð; *5 ára flóð* er sjávarhæð með 5 ára endurkomutíma.

3.3.1 Sjávarhæðir

Helstu sjávarhæðir í Reykjavík eru samkvæmt töflu 2. Tölur í kerfi Sjómælinga eru hér innan sviga og birtar til viðmiðunar.

Hæsta stjarnfræðilega flóð	2,80 m (4,62)
Meðalstórstraumsflóð	2,18 m (4,00)
Meðalsjávarhæð	0,36 m (2,18)
Meðalstórstraumsfjara	-1,62 m (0,20)
Lægsta stjarnfræðilega fjara	-2,26 m (-0,44)

Tafla 2: Tafla yfir sjávarhæðir í Reykjavík

Rétt er að hafa í huga að ofangreindar sjávarhæðir miðast við staðalloftþrýsting (1013 hPa). Þumalputtareglan er að sjávarborð hækki um 1 cm fyrir hvert 1 hPa sem loftþrýstingur sígur. Sjávarborð getur því hækkað um allt að 0,5 m í djúpum lægðum, jafnvel 0,7 m í þeim allra dýpstu. Áhlaðandi öldu getur svo orðið allt að 0,2 m ef vindátt er af hafi. Samtals má því bæta við 0,7 m ef tekið er tillit til þessara þátta (VST, 2005.)

3.3.2 Skilgreining úrkomu

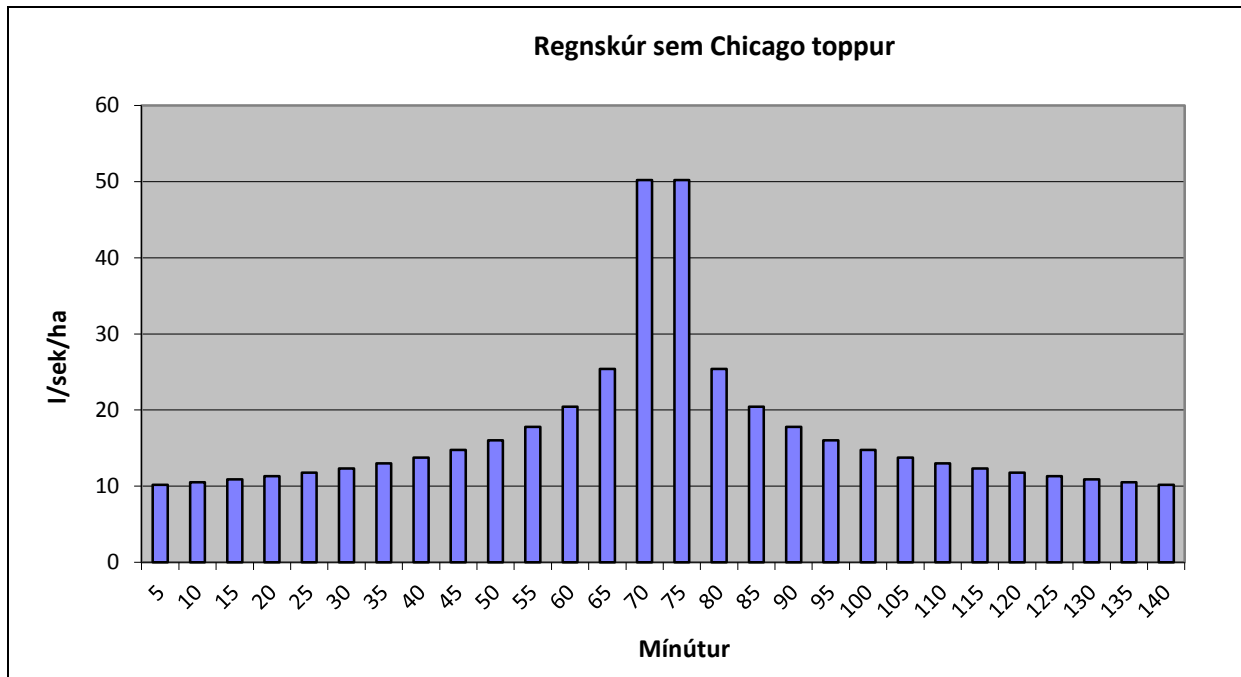
Úrkoma var skilgreind út frá 1M5 aðferðinni (Jónas Elíasson og Sigvaldi Thordarson, 1996.) 1M5 gildið fyrir þetta svæði er gefið 38-40 mm samkvæmt 1M5-korti Vatnaverkræðistofu HÍ. Notað var hærra gildið (40 mm) sem gefur úrkomustyrk skúrar með 10 mínútna varandi fyrir viðeigandi endurkomutíma samkvæmt töflu 3.

Notaðir voru svokallaðir **Chicago toppar** við útfærslu á rigningu. Í viðauka má sjá Chicago toppa fyrir alla ofangreinda endurkomutíma raðaða fyrir 10 mínútna varanda. Dæmi um Chicago topp á sjá á mynd 3 sem fengin er úr 1M5 forriti VVHÍ, en hér er um að ræða skúr með 5 ára endurkomutíma og 10 mínútna varanda. Hér er úrkomustyrkurinn sem fall af tíma, og hver súla er 5

Endurkomutími skúra	Úrkomustyrkur [l/s/ha]
1 mánuður	9,0
1 ár	34,0
2 ár	41,0
3 ár	45,1
4 ár	47,9
5 ár	50,2
10 ár	57,2
20 ár	64,1
50 ár	73,4

Tafla 3: Úrkomustyrkur regnskúra með 10 mínútna varanda skv. 1M5 forriti Vatnaverkræðistofu HÍ

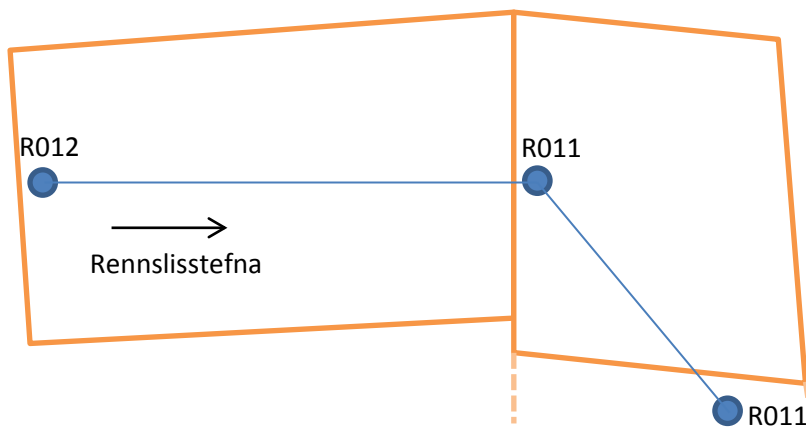
mínútur. Súluþitið er samhverft um miðjuna og því er toppurinnn tvær súlur, samtals 10 mínútur (varandinn) með úrkomustyrk viðeigandi endurkomutíma, í þessu tilviki 50,2 l/s/ha.



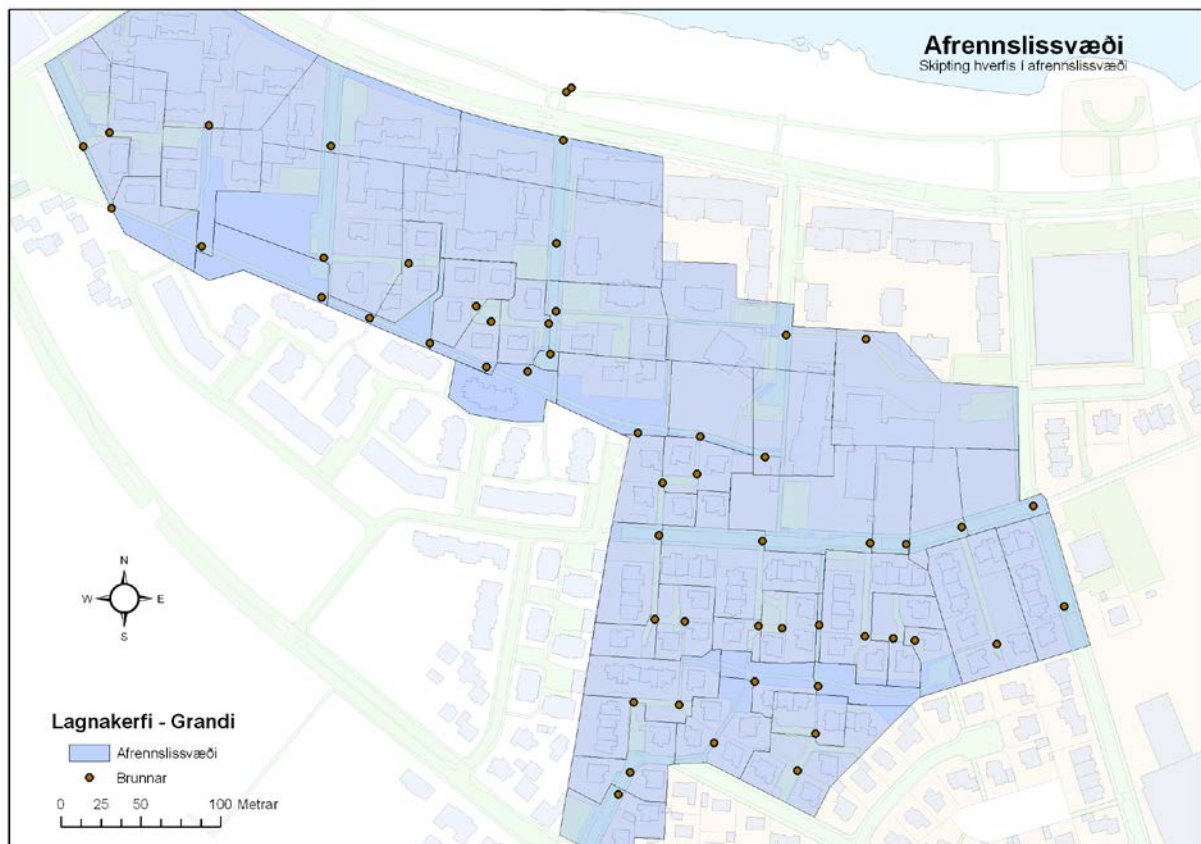
Mynd 6: Regnskúr með 5 ára endurkomutíma og 10 mínútna varanda útfærður sem Chicago toppur.

3.3.3 Afrennslissvæði

Hverfinu var skipt niður í afrennslissvæði og hvert þeirra tengist einum brunni í lagnakerfinu. Notast var við loftmyndir og upplýsingar úr landupplýsingakerfi OR til að skilgreina afrennslissvæðin og reynt eftir fremsta megni að skilgreina þau eftir landhalla og hæðarlínunum, staðsetningu niðurfalla, þver- og langhalla gatna og fleiru. Mynd 7 skýrir aðferðafræðina sem reynt var að fylgja við skilgreiningu afrennslissvæða og staðsetningu brunna innan svæðisins. Mörk afrennslissvæðisins eru látin ná niður að næsta brunni fyrir neðan, eða a.m.k. eins langt og kostur er. Með þessu er reyndar vatnsmagnið í brunnum mögulega ofreiknað, en sé þetta ekki gert svona er rennslið neðst í lögninni að öllum líkindum vanreiknað, sem er öllu verra.



Mynd 7: Skematísk mynd af skilgreiningu afrennslissvæða



Mynd 8: Skipting hverfis í afrennslissvæði

3.3.4 Afrennslisstuðlar

Afrennslisstuðull er skilgreindur sem útrennsli af afrennslissvæði í hlutfalli af augnabliksregni. Hann minnkar í réttu hlutfalli við *vætun, lægðageymslu, írennsli og svæðisgeymslu* (Jónas Elíasson og Sigvaldi Thordarson, 1996.)

Afrennslisstuðlar voru reiknaðir þannig út að skilgreind voru 3 meginsvæði innan hverfisins; einbýlis-/raðhúsa hverfi, skólahverfi og blokkarhverfi, ásamt því að skilgreina 3 flokka afrennslissvæða; þök bygginga, götur/gangstígar og græn svæði. Notaðar voru upplýsingar úr landupplýsingakerfi OR til að ákvarða flatamál afrennslissvæða í heild ásamt flatamáli húspaka og samgöngumannvirkja. Afrennslisstuðlar fyrir hvert meginsvæði voru reiknaðir samkvæmt viðauka 1. Hverju hlutsvæði innan hvers meginsvæði var svo úthlutað afrennslisstuðli.

3.4 Framkvæmd

Fyrsta skrefið var að ákveða hvaða hverfishluti skyldi tekin fyrir. Það var gert í samráði við starfsmenn OR út frá kortum og upplýsingum úr Landupplýsingakerfi OR (LUKOR) þar sem allar lagnir eru skráðar.

Þegar fyrir lá hvaða hluti kerfisins skildi tekin fyrir var næsta skref að setja upp hermilíkan fyrir lagnakerfið, en það var gert í Mike Urban forriti Orkuveitunnar. Að mati starfsmanns OR var einfaldara að teikna kerfið upp aftur heldur en flytja upplýsingar um lagnakerfið úr kerfi OR þar sem um tiltölulega lítið kerfi væri að ræða og mikil vinna fólgin í því að koma gögnum á það form sem nauðsynlegt væri. Með þessu fengist „hreinna“ og einfaldara kerfi, auk þes sem höfundur myndi með þessu móti kynnast með forritinu og lagnakerfinu nánar. Kerfið var því teiknað upp frá grunni í Mike Urban út frá staðsetningum og hæðarkótum brunna, sem fengust úr landupplýsingakerfi OR. Úr LUKOR fengust jafnframt staðsetningar og stærðir húsa, lóða og gatna/samgöngumannvirkja, sem notað var til að skilgreina afrennslissvæði og afrennslisstuðla. Allar lagnastærðir voru skilgreindar eftir upplýsingum úr LUKOR. Við þessa vinnu kom Borgarvefsjain (www.borgarvefsja.is) í góðar þarfir, en hún sækir gögn í LUKOR kerfið. Við uppsetningu á hermilíkaninu var hönnunarforsendum Orkuveitunnar fylgt í hvívetna en í þeim er m.a. að finna kafla um stillingar í Mike Urban (OR, 2008 kafli 6).

Þegar lagnakerfið hafði verið teiknað upp var næsta skref að skipta hverfinu niður í afrennslissvæði og skilgreina afrennslisstuðla. Varðandi útfærslu á því vísast í greinar 3.3.3 og 3.3.4 hér að framan.

Eins og áður segir þá tengist hvert afrennslissvæði einum brunni í kerfinu, og þegar svæðin höfðu öll verið tengd við viðeigandi brunna var hægt að byrja að gera tilraunakeyrslur og stilla líkanið af. Í Mike Urban forritinu er allt álag á lagnakerfið, s.s. rigning, sjávarhæð/vatnshæð (external water level), innrennsli í lagnir o.fl., skilgreint með svokölluðum randskilyrðum. Í byrjun var notast við eitt randskilyrði, sem var einföld rigning (kassaregn) og sjávarhæð þá sleppt. Þegar höfundur var orðinn sannfærður um að líkanið væri að vinna rétt var öðru randskilyrði bætt við inn í líkanið, sem var sjávarstaða. Prófað var að keyra með sjávarhæðinni eingöngu og hækka hana í þrepum. Allnokkrir brunnar í kerfinu eru neðan sjávarmáls (meðalsjávarhæðar) en vatnshæðin í lagnakerfinu rímaði algjörlega við sjávarhæðina. Tilraunakeyrslur með báðum randskilyrðum gáfu jafnframt góða raun.

Næsti fasi verksins fólst í því að skilgreina þá rigningu sem reikna skal kerfið fyrir. Varðandi þá útfærslu vísast í kafla 3.3.2 um skilgreiningu á úrkomu. Búnar voru til í Mike Urban regnseriur fyrir þá skúra sem keyra skyldi kerfið fyrir, settar fram sem Chicago-toppar einsog áður hefur verið vikið að. Í skilgreiningu randskilyrða hveirar keyrslu var svo vísað í viðkomandi regnseriur.

Fyrst var skoðað hvernig kerfið stæði gagnvart hönnunarforsendum Orkuveitunnar. Keyrt var bæði með og án tillits til sjávarhæðar, og jafnframt fyrir 5 og 10 ára regn, líkt og kveðið er á um í hönnunarforsendum.

Að því loknu voru fundnar úr þær hámarkssjávarhæðir sem kerfið þolir þegar regnskúrur með tiltekin endurkomutíma geisa, en þá byrjar að flæða upp á yfirborð. Þessi þáttur er hryggjarstykki verkefnisins og sá þáttur sem lengstan tíma tók í framkvæmd. Beitt var einfaldri helmingunarleit við að ákvarða kritíska sjávarhæð, byrjað við meðalsjávarhæð og hækkað í þrepum þar til flóð upp á yfirborð fékkst úr einum brunni.

Þvínæst voru hinar krítísku sjávarhæðir bornar saman við mæld gildi sjávarhæðar frá sjávarhæðarmæli við Miðbakkann í Reykjavík. Gögnin, sem voru fengin frá Siglingastofnun Íslands, eru 10 mínútna gildi og spanna u.þ.b. 13 ára tímabil, frá 1996 til 2010. Þett er um 700.000 mælingar og slíkan fjöldi færslna ræður engin töflureiknir við. Því þurfti að skrifa lítið forrit til að koma gögnunum á þægilegt form og greina þau. Reiknað var út hlutfall þess tíma af þessu þrettán ára tímabili sem sjávarhæðin hefur mælst yfir þessum hámarksgildum sem fengust úr líkaninu.

Við skoðun á úttaki líkansins kom í ljós umtalsverð tregða við tiltekin lagnaegg og var ákveðið að skoða hvaða áhrif það hefði að stækka hann. Því var þvermál þessar tilteknu lagnar aukið og líkanið keyrt aftur miðað við hönnunarforsendur og jafnframt fundin krítísk sjávarhæð eftir breytingu.

4 Niðurstöður

Niðurstaða verkefnis er fjórþætt sem hér segir:

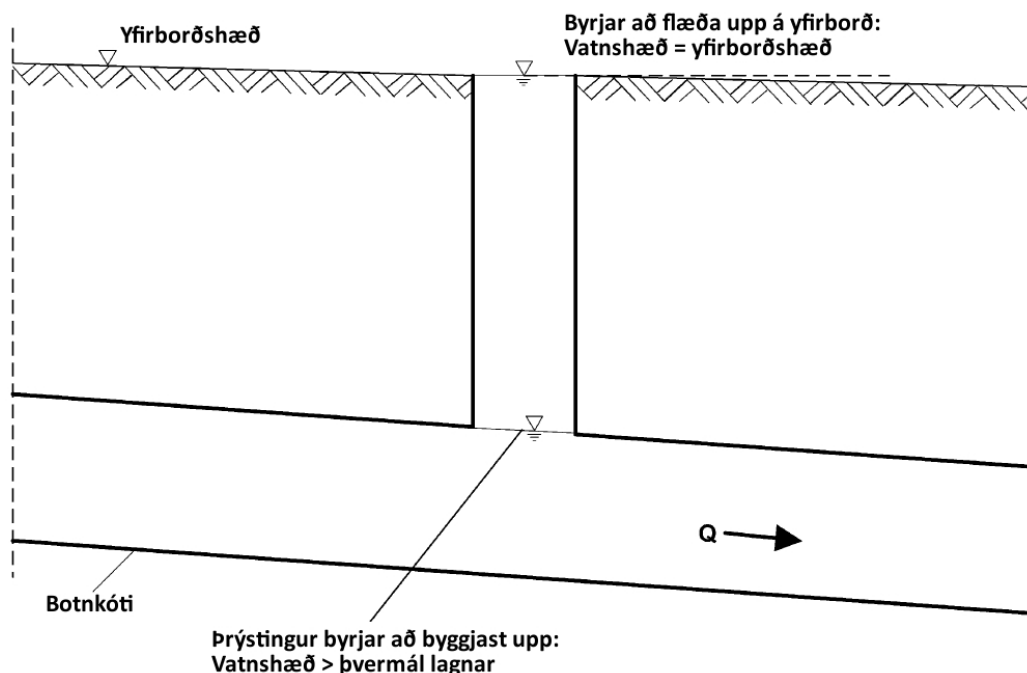
1. Samanburður við hönnunarforsendur OR
2. Niðurstöður hermilíkans gagnvart sjávarborðshækkun
3. Samanburður sjávarhæða úr hermilíkani og mældrar sjávarhæðar
4. Endurbætur vegna tregðu í kerfi

4.1 Samanburður við hönnunarforsendur OR

Í ljósi þess að kerfið er lagt löngu fyrir tíma hönnunarforsenda OR er áhugavert að skoða hvort þær séu uppfylltar. Fjallað er um hönnunarforsendurnar hér að framan, í kafla 2.5.7 *Hönnunarforsendur Orkuveitu Reykjavíkur*. Jafnframt varpar þetta ljósi á mögulega tregðu í kerfinu, en tregða í kerfinu minnkar þol kerfisins gagnvart sjávarborðshækkunum.

Fyrst er skoðað hvernig kerfið hagar sér þegar ekki er tekið tillit til sjávarhæðar við útrás, en með þessu er einfaldlega verið að skoða tregðuna í lagnakerfinu. Síðan er skoðað hvernig kerfið hagar sér við meðalsjávarhæð og sömu úrkomugildi og áður.

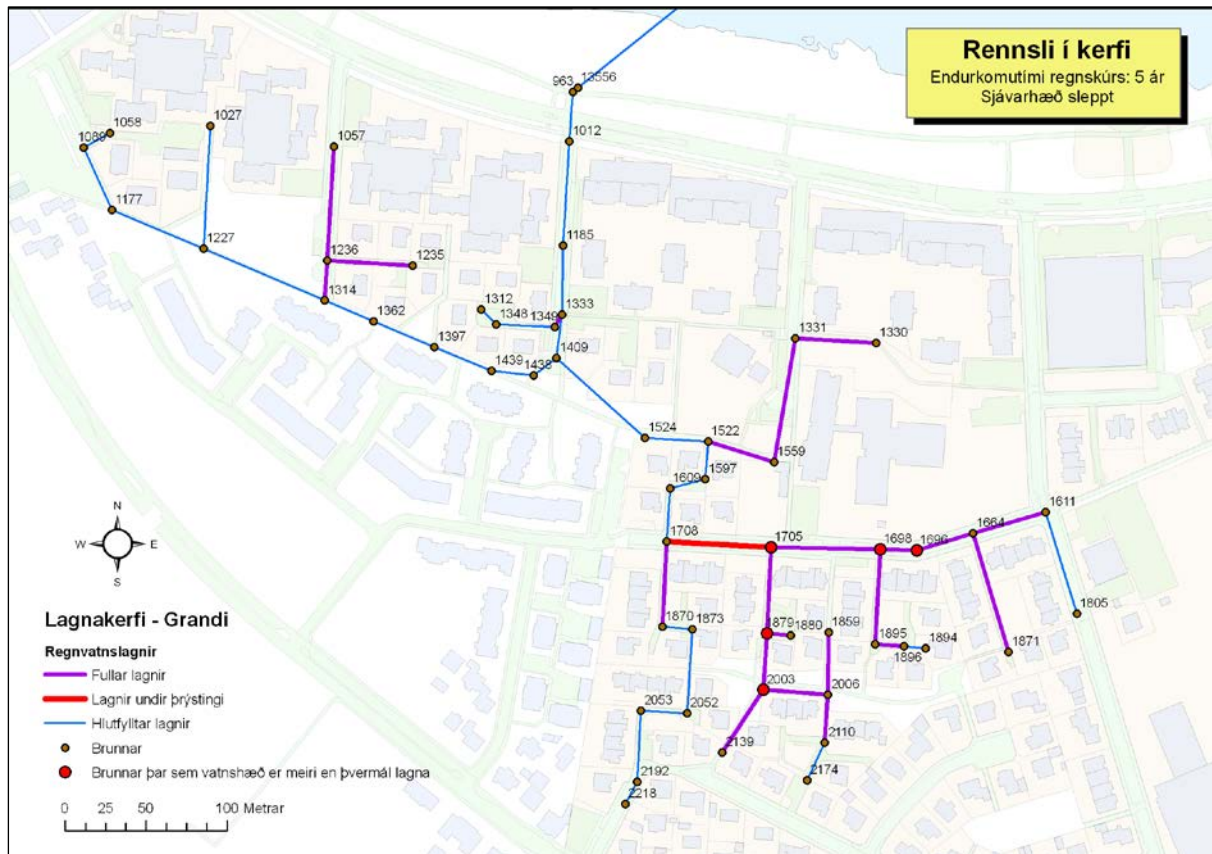
Í hönnunarforsendum er kveðið á um að við regnskúr með 5 ára endurkomutíma megi hvergi vera þrýstingur í lögnum. Þrýstingur í sjálfrennislögnum má útskýra þannig að þegar vatnshæð í lögnum hækkar það mikið að hún er orðin jöfn þvermáli lagnarinnar þá er lögnin orðin full og getur ekki flutt meira sem sjálfrennislögn. Þá byrjar að byggjast upp þrýstingur í lögninni, og eftir því sem vatnshæðin stígur hærra upp í brunnana verður þrýstingurinn meiri. Flutningsgeta lagnarinnar getur engu að síður aukist umfram það sem full lögn getur flutt, en lögnin er þá í raun farin að haga sér einsog vatnsveitulögn. Þetta má skýra með eftirfarandi mynd:



Mynd 9: Langsnið af fráveitulögn og brunni sem sýnir hvernig þrýstingur byggist upp í lögninni

4.1.1 Kerfið án tillits til sjávarhæðar

Þegar sjávarhæð er sleppt og keyrt fyrir regnskúr með 5 ára endurkomutíma er niðurstaðan sú að vatn stendur nokkuð hátt í nokkrum brunnum og allnokkra lagnir fyllast. Ein lögn í kerfinu er undir þrýstingi við þessar aðstæður (lögn milli brunna 1705 og 1708). Lagnir ofan hennar eru flestar fullar, sem orsakast af tregðu sem áður nefnd lögn veldur, en flutningsgeta þeirra er ekki fullnýtt. Einnig má sjá að allir brunnar sem stendur upp í vatn eru ofan þessarar lagnar sem orsakast af þessari tregðu. Vegna þessarar einu lagnar þá uppfyllir kerfið ekki hönnunarforsendur OR hvað 5 ára skúrinn varðar, þegar ekki er tekið tillit til sjávarhæðar.

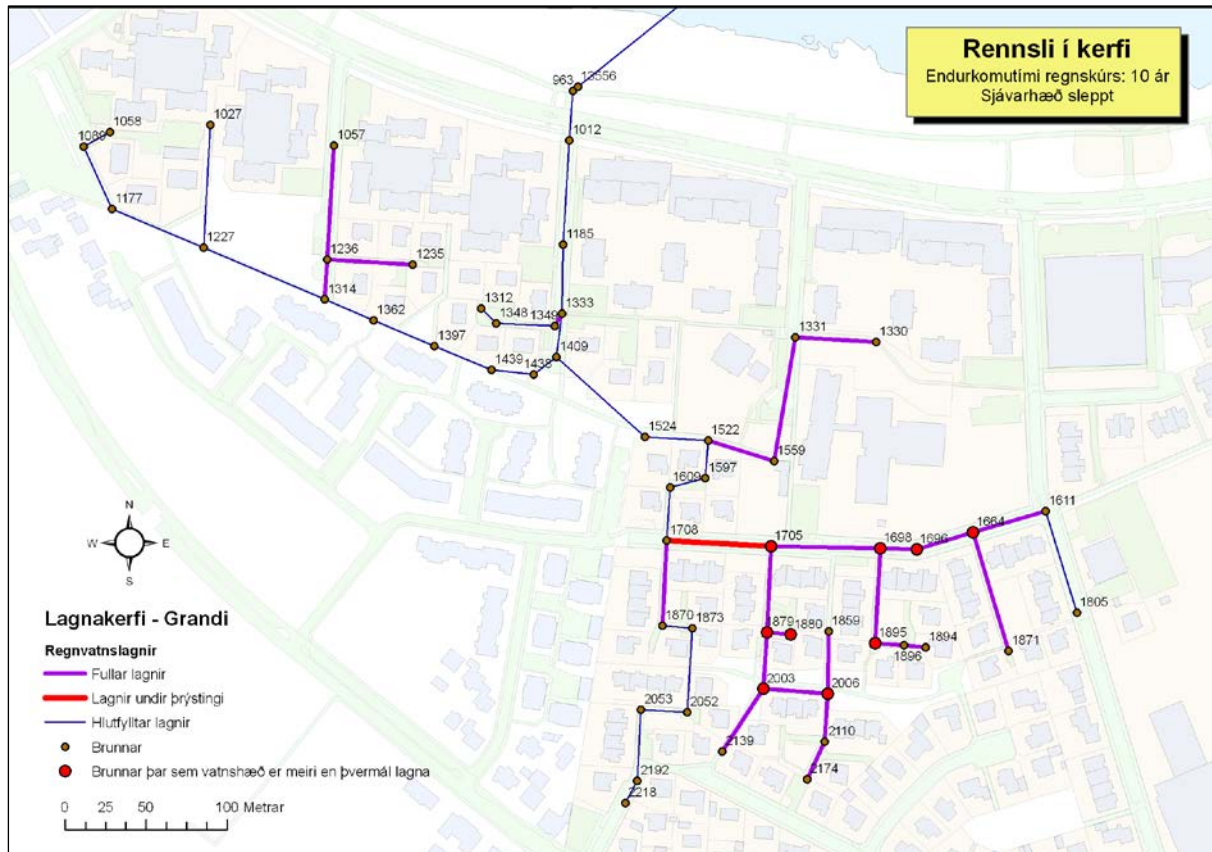


Mynd 10: Staða lagna við regnskúr með 5 ára endurkomutíma án tillits til sjávarhæðar

Brunnur	Botnkóti	Mesta vatnshæð	Hæð yfirborðs	Vatnshæð í brunni
	[m]	[m]	[m]	[m]
1705	1,49	3,04	5,33	1,55
1879	2,06	3,16	4,99	1,10
1698	3,04	3,97	5,88	0,93
2003	2,40	3,22	4,82	0,82
1696	3,39	4,08	6,07	0,69

Tafla 4: Brunnar með hæstu vatnshæð m.v. 5 ára skúri án tillits til sjávarhæðar

Þegar keyrt er fyrir regnskúr með 10 ára endurkomutíma fjölgar fullum lögnum og brunnum sem stendur upp vatn, en einungis ofan við lögn 1708-1705. Tregðan í þeirri lögn hefur því enn meiri áhrif þegar styrkur úrkomunar eykst. Engu að síður flæðir hvergi upp á yfirborð þannig að hönnunarforsendurnar eru uppfylltar hvað 10 ára skúrin varðar þegar ekki er tekið tillit til sjávarhæðar.



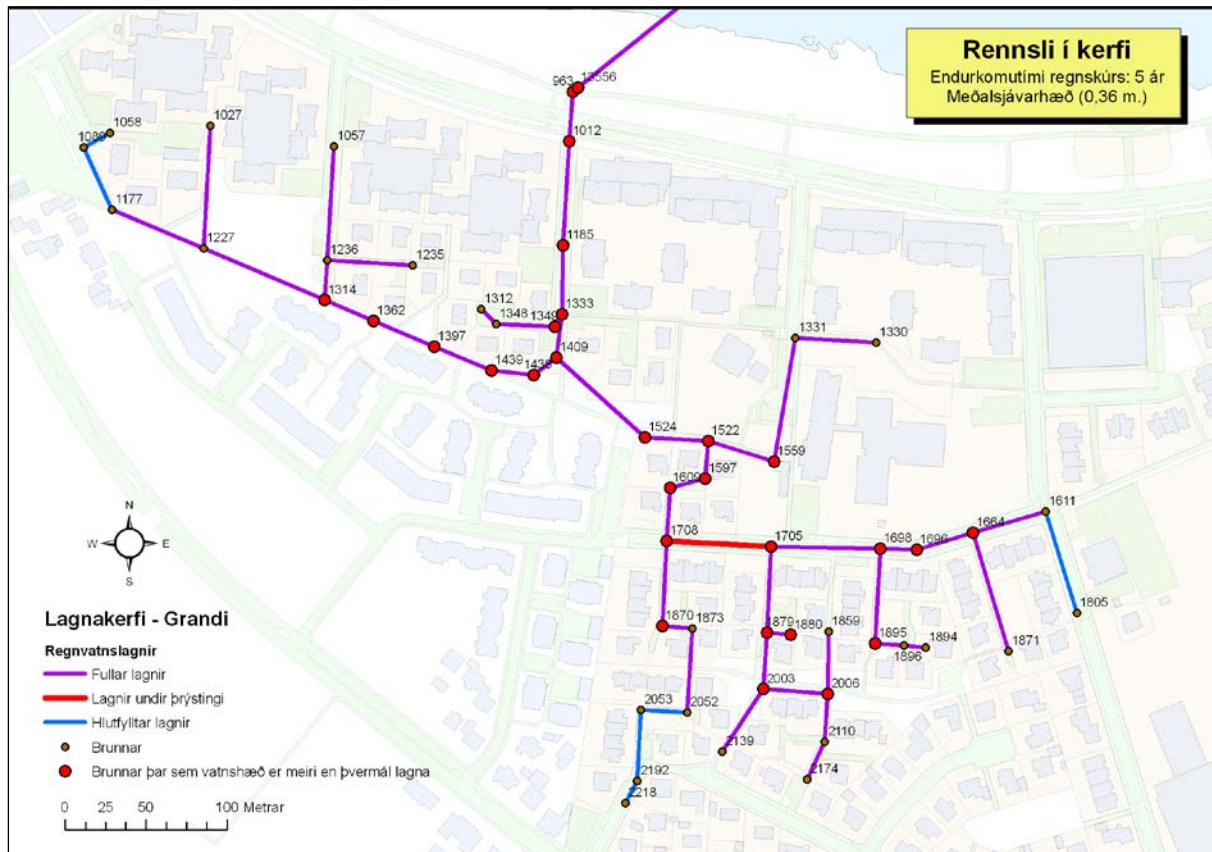
Mynd 11: Staða kerfis við regnskúr með 10 ára endurkomutíma án tillits til sjávarhæðar

Brunnur	Botnkóti	Mesta vatnshæð	Hæð yfirborðs	Vatnshæð í brunni
	[m]	[m]	[m]	[m]
1705	1,49	3,34	5,33	1,85
1879	2,06	3,48	4,99	1,42
1698	3,04	4,35	5,88	1,31
2003	2,40	3,55	4,82	1,15
1696	3,39	4,46	6,07	1,07
2006	2,80	3,57	5,06	0,77
1664	3,92	4,59	6,29	0,67
1895	3,75	4,40	5,39	0,65
1880	2,84	3,48	5,09	0,64

Tafla 5: Brunnar með hæstu vatnssstöðu m.v. 10 ára skúr án tillits til sjávarhæðar

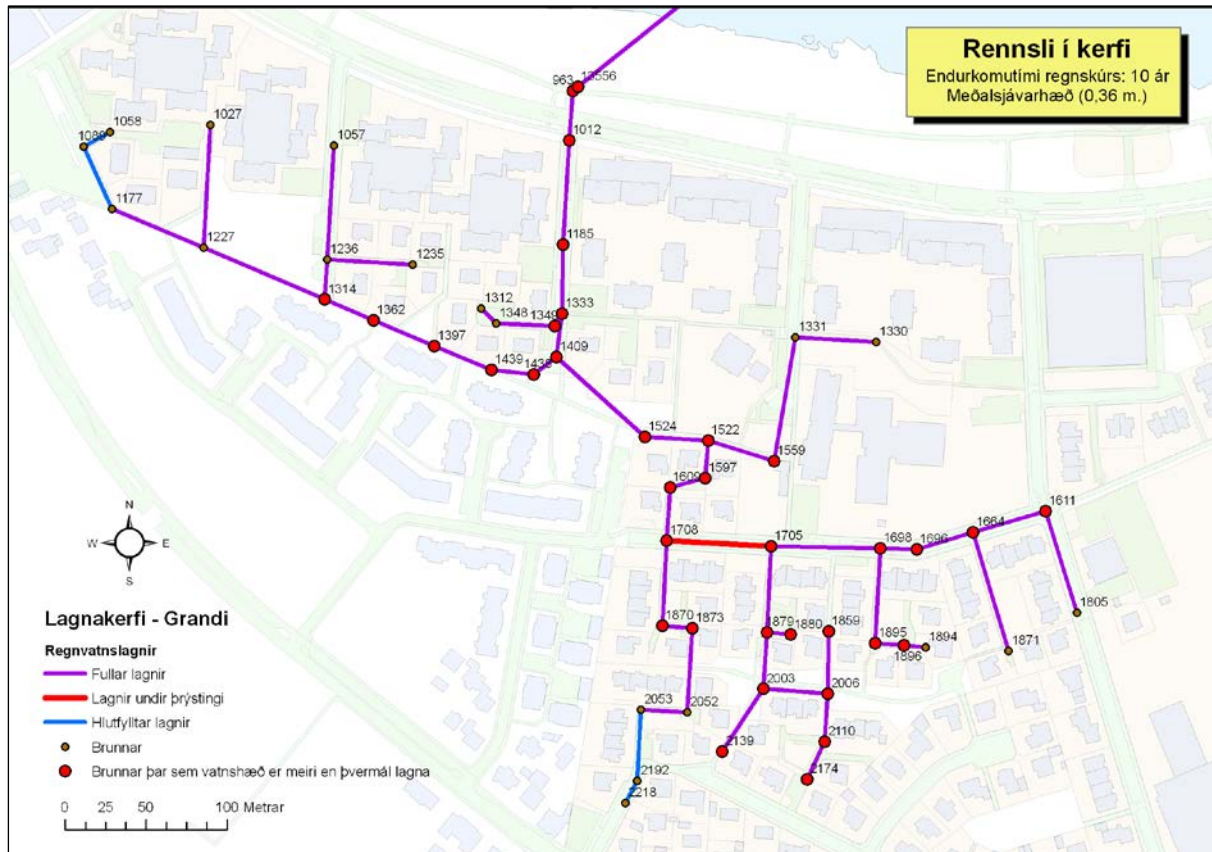
4.1.2 Kerfið reiknað við meðalsjávarhæð

Til samanburðar er rétt að skoða hvernig kerfið hagar sér þegar tekið er tillit til sjávarhæðar við útrás. Fyrir regnskúr með 5 ára endurkomutíma og við meðalsjávarhæð er staðan, líkt og fram kemur á mynd, að nánast allar lagnir eru orðnar fullar. Ástæða þessa er tregða í rennsli, annars vegar vegna þess að sjór liggur í kerfinu, einsog sjá má á mynd 22 í viðauka 5, og hins vegar vegna tregðu í áðurnefndri 1708-1705. Samkvæmt mynd 22 liggur sjór í kerfinu alveg upp að brunni 1522. Sem fyrr er hluti kerfisins undir þrýstingi, og þess vegna uppfyllir kerfið ekki hönnunarforsendur.



Mynd 12: Staða kerfis við regnskúr með 5 ára endurkomutíma og meðalsjávarhæð

Við regn með 10 ára endurkomutíma er svipuð staða uppi á teningunum, fullum lögnum og brunnum með uppi standandi vatni hefur fjölgað. Kerfið uppfyllir því hönnunarforsendur OR varðandi 10 ára regn að teknu tilliti til meðalsjávarhæðar. Raunar, líkt og sýnt er fram á í kafla 4.2, þá þolir kerfið sjávarhæð að tæpum 1,8 metrum við þessar aðstæður, sem er rúmum 1,4 metrum yfir meðalsjávarhæð.



Mynd 13: Staða kerfis við regnskúr með 10 ára endurkomutíma og meðalsjávarhæð

Niðurstaðan er því sú að kerfið uppfyllir fyllilega skilyrði hönnunarforsenda OR varðandi regnskúr með 10 ára endurkomutíma. Hins vegar er skilyrðið um engan þrýsting í lögnum við regnskúr með 5 ára endurkomutíma ekki uppfyllt. Raunar þolir lagn 1705-1708 einungis úrkomu sem nemur regnskúr með 2 ára endurkomutíma, en við það úrkomumagn fer að myndast þrýstingur í lagninni. Þetta veldur tregðu upp eftir öllu kerfinu einsog sýnt hefur verið fram á.

4.2 Niðurstöður hermílikans gagnvart sjávarborðshækkun

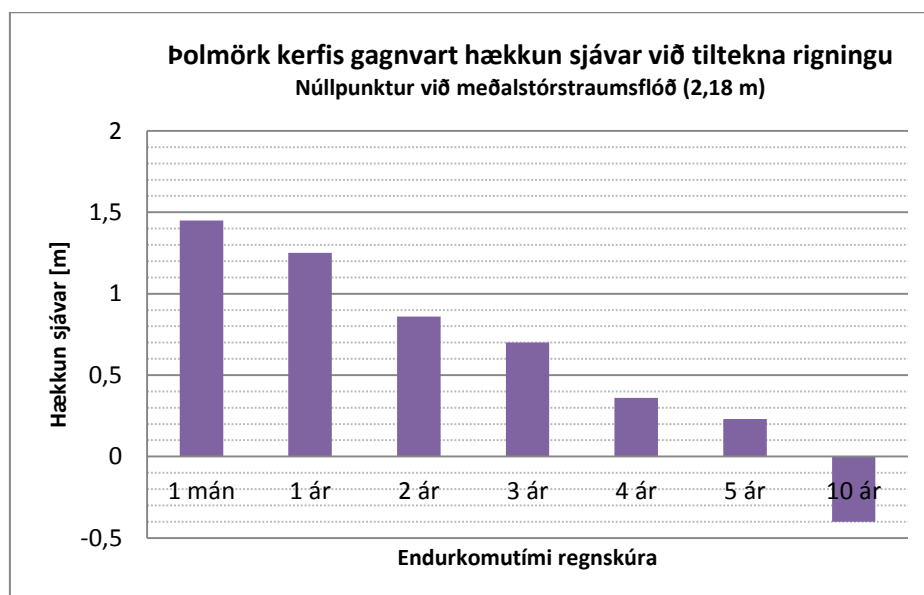
Eins og áður hefur verið vikið að var tilgangurinn hér að finna hámark sjávarhæðar sem kerfið þolir við tiltekna aðstæður, þ.e. þegar regnskúr með tiltekin endurkomutíma (úrkomustyrk) geisar samhliða ákveðinni sjávarstöðu. Niðurstöður úr hermílikani eru samkvæmt eftirfarandi töflu, tölur úr hæðarkerfi Sjósmælinga Íslands eru hér birtar til glöggvunar og viðmiðunar.

Endurkomu- tími skúrs	Sjávarhæðir	
	Hæðarkerfi Reykjavíkur	Hæðarkerfi Sjósmælinga Íslands
1 mán.	3,63	5,45
1 árs	3,43	5,25
2 ára	3,04	4,86
3 ára	2,88	4,70
4 ára	2,54	4,36
5 ára	2,41	4,23
10 ára	1,78	3,60

Tafla 6: Sjávarhæðir sem kerfið þolir, áður en flæðir upp úr því, við mismunandi endurkomutíma regnskúra

Það sem þessar tölur þýða er að við regnskúr með ofangreindan endurkomutíma má búast við flóðum upp úr kerfinu þegar sjávarhæðin fer yfir viðeigandi mörk. Í viðauka 4 má sjá aðferðafræðina sem beitt var, en notuð var einföld helmingunarleit við að ákvarða hámrökin. Í viðauka 3 er að finna myndir af kerfinu fyrir öll þessi sjö tilvik, þar sem fram koma þeir brunnar sem fyrst flæðir upp á yfirborð og þeir brunnar sem u.þ.b. er að flæða upp úr, þ.e. brunnar þar sem vatnshæðin er minna en 0,5 m frá yfirborði.

Meðalstórstraumsflóð í Reykjavík er 2,18 metrar. Séu niðurstöður úr hermílikani bornar saman við þá sjávarhæð má sjá þol kerfisins gagnvart hækkun sjávar. Þetta má setja fram myndrænt á eftirfarandi hátt:



Mynd 14: Polmörk kerfis gagnvart hækkun sjávar út frá niðurstöðum hermílikans

Samkvæmt þessu getur skúr með 5 ára endurkomutíma valdið flóðum í kerfinu við liðlega 0,2 metra hækkun á sjávarstöðu, við u.þ.b. 0,35 metra hækkun getur 4 ára skúrin farið að valda flóðum, við 0,7 metra hækkun getur 3 ára skúrin valdið flóðum o.s.frv. Samkvæmt þessu getur 10 ára skúrin nú þegar valdið flóðum í kerfinu falli það saman við meðalstórstraumsflóð. Við ofangreinda útreikninga var gengið út frá þeirri forsendu að hækkun á meðalstórstraumsflóði haldist í hendur við hækkun meðalsjávarhæðar.

4.3 Samanburður sjávarhæða úr hermilíkani og mældrar sjávarhæðar

Í þessum hluta eru sjávarhæðir sem fengust úr hermilíkani bornar saman við mæligögn úr sjávarhæðarmæli við Miðbakkann í Reykjavík, en gögnin eru fengin frá Siglingastofnun Íslands. Mæligögnin ná yfir þrettán ára tímabil; frá 1. ágúst 1996 til 10. nóvember 2010. Tilgangurinn er að skoða hve stóran hluta þessa tímabils sjávarhæðin mældist yfir þeim mörkum sem fundin voru með hjálp hermilíkansins. Niðurstöðurnar eru samkvæmt töflu 7:

Endurkomutími regnskúra	Sjávarhæð (mörk skv. hermilíkani)	Fjöldi mælinga yfir mörkum	Samtals klukkustundir yfir mörkum	Samtals sólarhringar yfir mörkum	Hlutfall tíma yfir mörkum
	[m]		[klst]	[slhr]	[%]
1 mán	3,63	0	0,0	0,0	0,00
1 ár	3,43	0	0,0	0,0	0,00
2 ár	3,04	10	1,7	0,1	0,00
3 ár	2,88	117	19,5	0,8	0,02
4 ár	2,54	3.111	518,5	21,6	0,45
5 ár	2,41	7.015	1.169,2	48,7	1,01
10 ár	1,78	71.048	11.841,3	493,4	10,23

Tafla 7: Samanburður hámarkssjávarhæða skv. hermilíkani og mæligagna frá Siglingastofnun

Þó hlutfall tímabils sé 0,0% samkvæmt ofangreindri töflu getur samt verið um umtalsverðan tíma að ræða, enda er tímabil mælinga 13 ár.

Tafla 1 á blaðsíðu 10 sýnir endurkomutíma hæstu sjávarstöðu í Reykjavík við núverandi aðstæður, og við hækkun sem hlýst af 2°C, 3°C og 4°C hnattrænni hlýnun til ársins 2100. Ef sömu forsendum er beitt hér má setja niðurstöður fram samkvæmt töflu 8:

Endurkomutími skúrs	Núverandi staða		0,38 m hækkun		0,48 m hækkun		0,59 m hækkun	
			2°C hnattræn hlýnun		3°C hnattræn hlýnun		4°C hnattræn hlýnun	
	Sjávarhæð	Hlutfall tíma	Sjávarhæð	Hlutfall tíma	Sjávarhæð	Hlutfall tíma	Sjávarhæð	Hlutfall tíma
1 mán	3,63	0,0%	3,25	0,0%	3,15	0,0%	3,04	0,0%
1 ár	3,43	0,0%	3,05	0,0%	2,95	0,0%	2,84	0,0%
2 ár	3,04	0,0%	2,66	0,2%	2,56	0,4%	2,45	0,8%
3 ár	2,88	0,0%	2,50	0,6%	2,40	1,1%	2,29	1,9%
4 ár	2,54	0,4%	2,16	3,2%	2,06	4,6%	1,95	6,5%
5 ár	2,41	1,0%	2,03	5,1%	1,93	6,9%	1,82	9,3%
10 ár	1,78	10,2%	1,40	20,7%	1,30	23,9%	1,19	27,6%

Tafla 8: Hlutfall tíma yfir hámarkssjávarhæðum út frá mæligildum frá Siglingastofnun

Af þessu má sjá að við 0,59 m hækkun hefur hlutfall þess tíma nífaldast, sem sjávarhæðin er yfir þeim mörkum þar sem 5 ára skúrin fer að valda flóðum. Þetta hlutfall hefur þrefaldast fyrir 10 ára skúrina m.v. sömu hækkun.

Samkvæmt skýrslu vísindanefndar má gera ráð fyrir 0,2-0,4 m landsigi í Reykjavík út öldina. Ef 0,3 m landsigi er bætt við sjávarhæðir í töflu 8 eykst hlutfall tíma yfir mörkum enn frekar:

Endur- komutími skúrs	Núverandi staða		0,38 m hækkun		0,48 m hækkun		0,59 m hækkun	
			2°C hnattræn hlýnun		3°C hnattræn hlýnun		4°C hnattræn hlýnun	
	Sjávarhæð	Hlutfall tíma	Sjávarhæð	Hlutfall tíma	Sjávarhæð	Hlutfall tíma	Sjávarhæð	Hlutfall tíma
1 mán	3,63	0,0%	2,95	0,0%	2,85	0,0%	2,74	0,1%
1 ár	3,43	0,0%	2,75	0,1%	2,65	0,2%	2,54	0,4%
2 ár	3,04	0,0%	2,36	1,3%	2,26	2,1%	2,15	3,3%
3 ár	2,88	0,0%	2,20	2,7%	2,10	4,0%	1,99	5,8%
4 ár	2,54	0,4%	1,86	8,4%	1,76	10,7%	1,65	13,4%
5 ár	2,41	1,0%	1,73	11,4%	1,63	14,0%	1,52	17,0%
10 ár	1,78	10,2%	1,10	30,6%	1,00	33,8%	0,89	37,2%

Tafla 9: Hlutfall tíma yfir hámarkssjávarhæðum út frá mæligildum að teknu tilliti til landssigs 3mm/ári

4.4 Endurbætur vegna tregðu í kerfi

Eins og sýnt var fram á í kafla 4.1 reyndist vera umtalsverð tregða í kerfinu við lagnalegg milli brunna 1705 og 1708 sem liggur í Frostaskjóli. Rennlið í lögninni er undir þrýstingi ($Q_{max}/Q_f > 1$), þ.e. hún er því að flytja meira en full lögn af þessari stærð getur flutt með sjálfrennsli. Þvermál þessar lagnar er 250 mm. Því var ákveðið að stækka þessa einu lögn í 400 mm og skoða áhrif þess á kerfið í heild og þol kerfisins gagnvart sjávarborðshækkun.

4.4.1 5 ára regn án tillits til sjávarhæðar

Stækkun á umræddri lögn hefur verulegar breytingar í för með sér, einsog sést ef borin eru saman rennislígildi fyrir og eftir breytingu.

Lögn 1708-1705	Þvermál	Q_f	Q_{max}	Q_{max}/Q_f	v_{max}
	[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]		[m/s]
Fyrir stækkun	0,25	0,064	0,093	1,44	1,89
Eftir stækkun	0,40	0,225	0,116	0,51	1,13

Tafla 10: Samanburður rennslis í lögn 1708-1705 fyrir og eftir stækkun við 5 ára regn.

Breyting á vatnhæð í brunnum er umtalsverð við þessa stækkun. Þegar skoðaðir eru þeir fimm brunnar sem vatn stóð hæst í við upprunalegar aðstæður fæst eftirfarandi tafla:

Brunnur	Botnkóti	Yfirborðskóti	Fyrir breytingu		Eftir breytingu		ΔH_{\max}
			H_{\max}	Hlutfallsdýpi í brunni	H_{\max}	Hlutfallsdýpi í brunni	
	[m]	[m]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]
1705	1,49	5,33	1,55	40%	0,33	9%	-1,22
1879	2,06	4,99	1,10	38%	0,20	7%	-0,90
2003	2,40	4,82	0,82	34%	0,17	7%	-0,65
1698	3,04	5,88	0,93	33%	0,32	11%	-0,61
1696	3,39	6,07	0,69	26%	0,22	8%	-0,47
---	---	---	---	---	---	---	---
1708	0,52	4,98	0,35	8%	0,39	9%	0,04

Tafla 11: Breyting á vatnshæð í brunnnum, raðað eftir lækkun, án tillits til sjávarhæðar

Vatnshæð í brunni 1705, sem er brunnurinn fyrir ofan lögnina sem tregðan var, lækkar um ríflega 1,2 metra, og í brunni 1879, sem er næsti brunnur þar fyrir ofan, lækkar um 0,90 metra. Neðst í töflunni er brunnur 1708, þar sem vatnshæð hækkar mest, en hann liggur fyrir neðan lögnina sem tregðan var. Ástæða þessarar hækkunar er aukið rennsli í lögninni.

4.4.2 5 ára regn og há sjávarstaða

Til samanburðar er rétt að skoða hverjar breytingar verða þegar há sjávarhæð er tekin inn í reikninginn. Í eftirfarandi töflu eru bornar saman vatnshæðir í nokkrum brunnnum fyrir og eftir breytingu þegar tekið er tillit til sjávarhæðar. Sú sjávarhæð sem reiknað er með er **2,41 m**, sem er sú sjávarhæð sem olli flóði upp á yfirborð **fyrir** stækkun lagnar. Í **viðauka 6** má sjá langsníð af kerfinu umhverfis lögn 1708-1705 fyrir og eftir breytingu.

Brunnur	Botnkóti	Yfirborðskóti	Fyrir breytingu		Eftir breytingu		ΔH_{\max}
			H_{\max}	Hlutfallsdýpi	H_{\max}	Hlutfallsdýpi	
	[m]	[m]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]
1705	1,49	5,33	3,16	82%	2,1	55%	-1,06
1879	2,06	4,99	2,67	91%	1,68	57%	-0,99
1880	2,84	5,09	1,89	84%	0,9	40%	-0,99
2003	2,4	4,82	2,37	98%	1,4	58%	-0,97
2139	3,1	4,88	1,67	94%	0,71	40%	-0,96
1859	3,41	5,19	1,37	77%	0,42	24%	-0,95
2006	2,8	5,06	1,98	88%	1,03	46%	-0,95
2110	3,12	4,80	1,67	99%	0,72	43%	-0,95
2174	3,5	4,79	1,29	100%	0,35	27%	-0,94
1696	3,39	6,07	1,95	73%	1,09	41%	-0,86
1698	3,04	5,88	2,22	78%	1,36	48%	-0,86
1895	3,75	5,39	1,55	95%	0,7	43%	-0,85
1896	4,02	5,45	1,28	90%	0,43	30%	-0,85
1870	1,1	4,58	2,31	66%	2,46	71%	0,15
1708	0,52	4,89	2,73	62%	2,89	66%	0,16

Tafla 12: Breyting á vatnshæð í brunnnum, raðað eftir lækkun, miðað við 5 ára regn og sjávarhæð 2,41 m.

Einsog í tilvikinu þar sem sjávarhæð er sleppt þá lækkar mest í brunni 1705, sem er ofan lagnarinnar þar sem tregðan var, eða um vel rúman metra. Jafnframt er mesta hækkun í brunni 1708, sem er neðan lagnarinnar, og skýrist það af auknu rennsli um lögnina. Sérstaka athygli vekja brunnar 2174 og 2110 (feitlettraði) en það eru þeir brunnar sem flæddi fyrst uppúr fyrir breytingu. Vatnsstaða í þeim hefur lækkað um tæpan metra.

4.4.3 10 ára regn án tillits til sjávarhæðar

Ekki var talin ástæða til að skoða gaumgæfilega tilvikið fyrir 10 ára regnið að svo stöddu, enda uppfyllir kerfið skilyrði hönnunarforsenda OR varðandi það. Hins vegar eru breytingarnar umtalsverðar

Lögn 1708-1705	b vermál	Q_f	Q_{max}	Q_{max}/Q_f	v_{max}
	[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]		[m/s]
Fyrir stækkun	0,25	0,064	0,098	1,531	2,00
Eftir stækkun	0,40	0,225	0,130	0,578	1,14

Tafla 13: Samanburður rennslis í lögn 1708-1705 fyrir og eftir stækkun við 10 ára regn

Þessi breyting hefur því þau áhrif að engar lagnir í kerfinu eru undir þrýstingi, hvorki við 5 né 10 ára regnskúrir. Samanburður vatnshæðar í brunnum fyrir og eftir breytingu er samkvæmt töflu:

Brunnur	Botnkóti	Yfirborðskóti	Fyrir breytingu		Eftir breytingu		ΔH_{max}
			H_{max}	Hlutfallsdýpi	H_{max}	Hlutfallsdýpi	
	[m]	[m]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]
1705	1,49	5,33	1,85	48%	0,36	9%	-1,49
1879	2,06	4,99	1,42	48%	0,22	8%	-1,20
2003	2,4	4,82	1,15	48%	0,19	8%	-0,96
1698	3,04	5,88	1,31	46%	0,38	13%	-0,93
1696	3,39	6,07	1,07	40%	0,25	9%	-0,82
2006	2,8	5,06	0,77	34%	0,14	6%	-0,63
1880	2,84	5,09	0,64	28%	0,08	4%	-0,56
1895	3,75	5,39	0,65	40%	0,15	9%	-0,50
---	---	---	---	---	---	---	---
1609	0,35	4,78	0,40	9%	0,52	12%	0,12

Tafla 14: Breyting á vatnshæð í brunnum, miðað við 10 ára regn án tillits til sjávarhæðar

Við breytinguna lækkar vatnsstaða í brunni 1705 rétt um einn og hálfan metra. Í **viðauka 6** má sjá langsnið af kerfinu fyrir og eftir breytingu.

4.4.4 Hámarkssjávarhæðir eftir breytingu

Eins og áður hefur komið fram, samkvæmt niðurstöðum hermilkans, er sú sjávarhæð sem veldur því að flæða fer uppá yfirborð við regnskúr með 5 ára endurkomutíma 2,41 metrar. Ákveðið var að keyra líkanið til að finna krítískar sjávarhæðir eftir vikkun lagnar 1708-1705. Niðurstaðan úr þeim

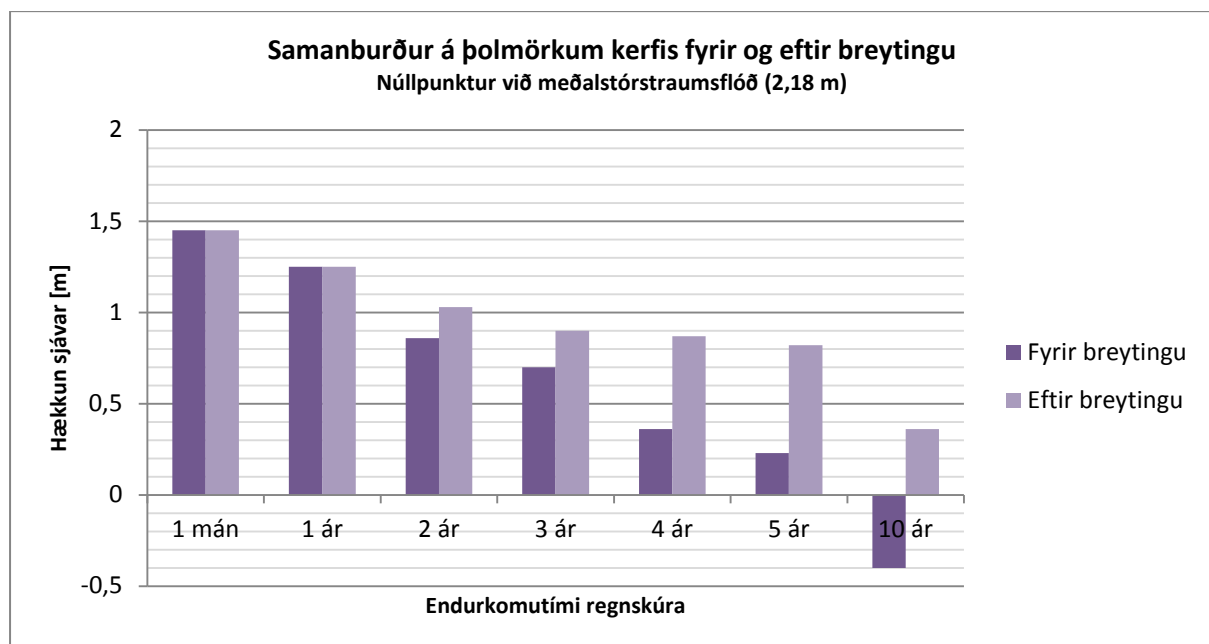
keyrslum er að við sjávarhæðina **3,0 m** byrjar að flæða upp á yfirborð, og þolir kerfið því um 0,6 metrum, eða um 25%, hærri sjávarstöðu eftir breytingu en áður miðað við 5 ára regn.

Í ljósi þessa var ákveðið að keyra líkanið aftur fyrir öll skúratilfelli, sem áður hafa verið skoðuð samkvæmt kafla 4.2 *Niðurstöður hermílikans gagnvart sjávarborðshækkun*. Niðurstaða þeirra keyrslna er samkvæmt töflu 15:

Endurkomu- tími skúra	Sjávarhæð		Aukning á þoli kerfis gagnvart sjávarhækkun
	Fyrir breytingu	Eftir breytingu	
	[m]	[m]	[m]
1 mán.	3,63	3,63	0,00
1 árs	3,43	3,43	0,00
2 ára	3,04	3,21	0,17
3 ára	2,88	3,08	0,30
4 ára	2,54	3,05	0,49
5 ára	2,41	3,00	0,59
10 ára	1,78	2,54	0,76

Tafla 15: Hámarkssjávarhæðir úr hermílikani fyrir og eftir vikkun lagnar 1708-1705

Þessa niðurstöðu mætti túlka myndrænt á saman hátt og gert var á mynd 14. Þá fæst eftirfarandi mynd:



Mynd 15: Samanburður þolmarka kerfis fyrir og eftir breytingu

Til viðbótar og frekari glöggvunar var líkanið einnig keyrt fyrir regnskúr með 50 ára endurkomutíma. Fyrir vikkun lagnar flæddi alltaf uppúr kerfinu, jafnvel þó sjávarhæð væri sleppt. Fyrstu brunnar til að fyllast eru 1895 og 1896, sem staðsettir eru í götu í Frostaskjóli, nokkru ofan lagnar 1708-1705.

Eftir vikkun lagnar 1708-1705 þolir kerfið sjávarhæð sem nemur **1,20 m.** við regn með 50 ára endurkomutíma, sem er 0,84 m. yfir meðalsjávarhæð.

Ef skoðaðar eru niðurstöður úr hermilíkani um hámarkssjávarhæðir eftir breytingar á lögn 1708-1705 og hlutfall þess tíma sem sjávarhæðin er yfir þeim mörkum sem flæðir upp úr kerfinu, fæst eftirfarandi tafla:

Endurkomutími skúra	Sjávarhæð (mörk skv. hermilíkani)	Fjöldi mælinga yfir mörkum	Samtals klukkustundir yfir mörkum	Hlutfall tíma yfir mörkum
	[m]		[klst]	[%]
1 mán	3,63	0	0,00	0,00%
1 ár	3,43	0	0,00	0,00%
2 ár	3,21	2	0,33	0,00%
3 ár	3,08	8	1,33	0,00%
4 ár	3,05	10	1,67	0,00%
5 ár	3,00	15	2,50	0,00%
10 ár	2,54	3111	518,50	0,45%

Tafla 16: Samanburður niðurstaðna úr hermilíkani eftir breytingar á kerfi við mæligögn Siglingastofnunar

Það er áhugavert að bera þessa töflu saman við töflu 7 sem sýnir hlutfall þess tíma sem sjávarhæðin er yfir mörkum fyrir breytingar á lögn 1708-1705. Fyrir breytingar er sjávarhæðin um 1% tímans yfir mörkum fyrir regnskúr með 5 ára endurkomutíma en eftir breytingar er hlutfallið orðið 0,00%. Sjávarhæðin er rúmlega 10% tímans yfir mörkum gagnvart skúr með 10 ára endurkomutíma fyrir breytingar, en eftir breytingar er hlutfallið orðið 0,45%. Afleiðingar af þessari breytingu hafa því veruleg áhrif til hins betra fyrir kerfið.

5 Túlkun niðurstaðna

Rétt er að taka það fram að það er vissulega einföldun að gefa sér að lagnakerfið sem hér er til skoðunar verði í óbreyttri mynd árið 2100, enda er það ekki hugmyndin með verkefninu. Hugmyndin er að niðurstöðurnar geti átt við sambærilegt kerfi eða kerfi sem lagt er með sama sniði og þetta.

Af því sem fram kemur í kafla 2. *Bakgrunnur verkefnis* verður að teljast nokkuð ljóst að hækkun sjávarborðs á næstu áratugum er ekki bara áróður lopapeysuklæddra umhverfissinna, heldur mál sem þarf að skoða af fullri alvöru án þess að pólitík eða peningahagsmunir stjórni þar för. Líkt og áður hefur komið fram er það ekki markmið þessa verkefnis að taka afstöðu með eða á móti, eða um hver hin spáða hækkun kunni að vera, heldur einungis að benda á alvarleika málsins og nauðsyn þess að málið sé skoðað ofan í kjölinn.

Fyrsta niðurstaðan sem vert er að velta fyrir sér er að m.v. óbreytt landsig, 2-4 mm á ári mun tíðni flóða í fráveitukerfi sem þessu aukast allverulega án nokkurra breytinga á sjávarhæð. Jafnvel þó landsigið verði í lægri kantinum (2 mm/ári) þá verður meðalstórstraumsflóðið í lok aldarinnar komið yfir þau mörk sem kerfið þolir samhliða regnskúr með 5 ára endurkomutíma eingöngu vegna landsigs. Ef hins vegar landsigið verður í efri mörkunum (4 mm/ári) þá verður hæsta stjernfræðilega flóð í lok aldarinnar u.þ.b. jafnt flóði með 25 ára endurkomutíma í dag. Hæsta stjernfræðilega flóð, sem í dag er 2,80 m. (Tafla 2) mælist reglulega, það hefur mælist ríflega þrisvar á ári að meðaltali síðustu þrettán ár sbr. mæligögn frá Siglingastofnun.

Það er athyglisvert að samanburður við hönnunarforsendur OR er í raun jákvæður, í ljósi þess að stærstur hluti kerfisins er síðan um 1980, löngu fyrir tíma hönnunarforsendanna. Að sögn Sigurðar Inga Skarphéðinssonar hjá OR var það með ráðum gert á sínum tíma að yfirhanna þetta kerfi. Það hefur tekist ágætlega, eins og sést ef bornar eru saman niðurstöður hermilíkans fyrir og eftir stækkun lagnar 1708-1705. Fyrir breytingu byrjar þrýstingur að byggjast upp í kerfinu ef úrkoma fer yfir sem nemur skúr með 2 ára endurkomutíma og vatn fer að safnst fyrir ofan lagnarinnar. Lögnin veldur því tregðu í kerfinu sem orsakar það að flutningsgeta kerfisins er ekki fullnýtt ofan lagnarinnar. Eftir breytingu uppfyllir kerfið hins vegar fyllilega hönnunarforsendur, ásamt því að flutningsgeta og þol kerfisins gagnvart breytingum á sjávarhæð aukast verulega.

Téð lögn er um 65 metra löng, liggur milli brunna 1708 og 1705 og er staðsett í götu í Frostskjólí. Samkvæmt Sigurði Inga hjá OR er kostnaður við endurnýjun fráveitulagnar í götu gjarnan á bilinu 30-40 þús. pr. metra þannig að kostnaðurinn við endurnýjun þessarar lagnar gæti numið 2-3 milljónum. Það þarf ekki stórt vatnstjón til að standa á móti þeirri upphæð.

Við núverandi aðstæður er sjávarhæðin 1% tímans yfir þeim mörkum sem kerfið þolir við regnskúri með 5 ára endurkomutíma, og 10% tímans yfir þeim mörkum við skúri með 10 ára endurkomutíma. Líklegasta hlýnun á Íslandi samkvæmt skýrslu vísindanefndar er 1,4-2,4 °C á öldinni. Við þá hækkun er hlutfallið fyrir 5 ára skúrina orðið á bilinu 4-6%, og fyrir 10 ára skúrina 18-22%. Ef landsigi er bætt við gæti hlutfall tímans farið í 13-14% fyrir 5 ára skúrina og 33-34% fyrir 10 ára skúrina. Við líklegustu hækkun sjávar og meðallandsig (3 mm/ári) hefur því hlutfall tímans yfir mörkum 5 ára skúrarinnar allt að fjórtánfaldast og ríflega þrefaldast fyrir mörk 10 ára skúrarinnar.

Samkvæmt niðurstöðum í kafla 4.2 *Niðurstöður hermilíkans gagnvart sjávarborðshækkun* veldur 10 ára skúrin flóði upp úr kerfinu við sjávarhæð 1,78 m. sem er 0,4 m. undir meðalstórstraumsflóði sem

er 2,18 m. Því verða að teljast allmiklar líkur á því að flæði upp úr kerfinu á ca. 10 ára fresti, en síðast gerðist það 10. febrúar 1997 einsog áður hefur verið nefnt. Sé miðað við þá sjávarhæð sem hefur 5 ára endurkomutíma (5 ára flóð) skv. töflu 1, þá er kerfið nánast orðið yfirhlaðið við 2 ára skúr. Líkurnar á því að 5 ára flóð falli saman við regnskúri sem hefur í það minnsta 2 ára endurkomutíma, eða að 10 ára skúr falli saman við sjávarhæð sem er um 1,4 metrum yfir meðalsjávarhæð eru kannski ekki ýkja miklar, en eru vissulega til staðar. Djúpum lögðum fylgir gjarnan vatnsveður, til viðbótar við lágan loftþrýsting og áhlaðanda ef vindátt er af hafi. Af því sögðu má færa rök fyrir því að kerfið sé á jaðrinum, hvað þá ef sjávarhæð hækkar og/eða úrkoma eykst.

Í kafla 2.5.2 *Áhrif loftslagsbreytinga á fráveitukerfi* er því velt upp að hugsanlega muni hönnunarforsendur dagsins í dag ekki eiga við þegar líða tekur á öldina. Í því samhengi er áhugavert að velta fyrir sér að gangi svörtustu spár eftir; hnattræn hlýnun verði 4°C og úrkoma aukst um a.m.k. 12%. Í þeim tilvikum sem hér hafa verið til skoðunar er regnskúr með 3 ára endurkomutíma með úrkomustyrk 45 l/s/ha. Ef úrkoma eykst um 12% á öldinni mun 3 ára skúrin jafngilda skúr sem í dag hefur 5 ára endurkomutíma, 5 ára skúrin mun jafngilda 10 ára skúr og 10 ára skúrin mun jafngilda 20 ára skúr. Það er því ljóst að hönnunarforsendur OR fyrir regnvatnslagnir munu ekki eiga við árið 2100 ef þessar spár ganga eftir.

6 Samantekt

Upphaflegt markmið verkefnisins, það sem lagt var af stað með, var að skoða áhrif hækkunar sjávarborðs á fráveitukerfi (ofanvatnskerfi) í Reykjavík. Það skyldi gert með því að taka fyrir hverfið við Eiðsgrandann, setja lagnakerfið upp í hermunarforriti OR (Mike Urban) og keyra líkanið miðað við tiltekna forsendur varðandi sjávarhæð og úrkomu. Til að halda flækjustigi verkefnisins innan skynsamlegra marka skyldi einblínt á sjávarhæðir og notast við einfalt úrkomumódel, svokallaða Chicago toppa, en ekki sögulegt regn eða regnseríur. Finna skyldi háþörk sjávarhæða sem kerfið þolir, áður en byrjar að flæða upp á yfirborð, við tiltekna úrkomu. Þessi þörmörk kerfisins skyldu svo borin saman við spár um hnattræna hækkun sjávar vegna loftslagsbreytinga og reynt að meta hvernig kerfið (eða sambærilegt kerfi) væri í stakk búið til að mæta hækkandi sjávarborði.

Niðurstöður verkefnisins eru í stuttu máli að kerfið sem er til skoðunar er ekki nægjanlega vel í stakk búið til að mæta hækkunum á sjávarborði. Hækkun sjávarstöðu vegna landsigs er nægjanleg ástæða til endurbóta á kerfinu burtséð frá hinni hnattrænu hækkun. Kerfið uppfyllir ekki fyllilega hönnunarforsendur Orkuveitunnar hvað varðar þrýsting í lögnum, en skilyrðið um flóð uppá yfirborð er þó uppfyllt. Samkvæmt hermilíkani myndast allnokkur þrýstingur í kerfinu sem orsakar tregðu upp eftir kerfinu. Tregðan myndast að mestu við eina tiltekna lögn og lagðar eru til endurbætur á kerfinu sem felast í stækkun þessarar lagnar. Þessar breytingar hafa, samkvæmt hermilíkani, verulega góð áhrif á kerfið í heild og auka þol þess gagnvart sjávarboðshækkunum umtalsvert. Jafnframt eru niðurstöður hermilíkansins um háþörk sjávarhæða, bæði fyrir og eftir breytingar, borin saman við mæld gildi frá sjávarhæðamæli Siglingastofnunar og fundið hlutfall tíma sem sjávarhæðin er yfir mörkum, og lagt mat á hvert hlutfall þess tíma yrði miðað tiltekna hækkun sjávar bæði með og án tillits til landsigs. Niðurstöður þessar sýna svo ekki verður um villst jákvæð áhrif þeirra endurbóta sem lagðar eru til.

Heimildaskrá

- Árni Hjartarson (2010). *Básendar – Básendaflóð*. Sótt 19. september 2010 af <http://isor.is/efni/1-basendar-basendaflod>.
- CEN (2008) EN 752:2008 *Drain and sewer systems outside buildings*, Evrópustaðall, Evrópska Staðlaráðið CEN, Brussel, Belgía, 2008
- Doyle, A. og Gardner, T. (2010). *2010 to be among three warmest years - U.N.* sótt 2. desember 2010 <http://uk.reuters.com/article/idUKTRE6B14MI20101202>
- Wolff, E. (2010). Ice Cores: A Window into Climate History. [Viðtal] sótt 4. desember 2010 frá http://knowledge.allianz.com/en/globalissues/climate_change/global_warming_basics/ice_cores_woff_interview.html
- Evróputilskipun DIRECTIVE 2007/60/EC, *Official Journal of the European Union*, 2007 tbl. 288, bls. 27-34. Sótt 10. nóvember 2010 af <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:EN:PDF>
- Gerhard, L.C. (2004). Climate change: Conflict of observational science, theory, and politics *AAPG Bulletin* 88 árg., 9 tbl., bls. 1211–1220. The American Association of Petroleum Geologists.
- Halldór Björnsson (2006). Gróðurhúsaáhrif. Sótt 19. september af <http://www.vedur.is/loftslag/oftslagsbreytingar/grodurhusaahrif/>
- Halldór Björnsson (2009). Er loftslag að breytast? Sótt 19. september 2010 af <http://www.vedur.is/loftslag/loftslagsbreytingar/breytast>
- Halldór Björnsson, Árný E. Sveinbjörnsdóttir, Anna K. Daniélsdóttir, Árni Snorrason, Bjarni D. Sigurðsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson. (2008). *Hnatþrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Umhverfisráðuneytið*.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (ritstj.). Cambridge University Press.
- IPCC (2010). <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml> sótt 20. nóvember 2010.
- Jónas Elíasson og Sigvaldi Thordarson (1996). *Vatnafræðilegar forsendur fráveituhönnunar* Verkfræðistofnun Háskóla Íslands - Vatnaverkefni Skýrsla nr. 6-961002, Reykjavík 1996.
- Lýður Björnsson (2006). *Básendaflóðið 1799, Vefnir - Félag um 18. aldar fræði*, Sótt 13. október 2010 af <http://vefnir.is/UserFiles/File/2006/LyduBjornsson-Basendaflodid1799.pdf>
- Lög um uppbyggingu og rekstur fráveitna nr. 9/2009
- Mörner, N.A. (2004). Estimating future sea level changes from past records. *Global and Planetary*

Change, árg. 40, tbl. 1-2, janúar 2004, bls. 49-54.

Mörner, N.A. (2007). Sea-level Expert: It's Not Rising! *Executive Intelligence Review*, 22. júní 2007 [Viðtal]

Nuttle, W. K. og Portnoy, J. W. (1990). Effect of Rising Sea Level on Runoff and Groundwater Discharge to Coastal Ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 1992 tbl. 34, bls. 203-212.

OR (2008) *Leiðbeiningar um hönnunarrennsli skólps og ofanvatns*, Orkuveita Reykjavíkur, maí 2008

Reglugerð um fráveitur og skólp nr. 798/1999.

Schmitt, T.G., Thomas, M. og Ettrich, N. (2004). Analysis and modelling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology* 2004 tbl. 299, bls. 300-311.

Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., Gustafsson, L.G. (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater. *Journal of Hydrology* (2008) tbl. 350, bls. 114– 125

Sjómælingar Íslands (2006). *Sjávarföll* Sótt sótt 15. október 2010 frá <http://www.lhg.is/starfsemi/sjomaelingasvid/sjavarfoll/>

Tans, P. (2010). *Full Mauna Loa CO2 record*. Sótt 27. nóvember 2010 frá www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/ NOAA/ESRL.

The Daily Green (2008). Who's Who on Inhofe's List of 400 Global Warming Deniers. Sótt 6. desember 2010 af <http://www.thedailygreen.com/environmental-news/latest/inhofe-global-warming-deniers-scientists-46011008>

Titues, J.G., Kuo, C.Y., Gibbs, M.J., LaRoche, T.B., Webb, M.K. og Waddell, J.O. (1987). Greenhouse Effect, Sea level rise, and Coastal drainage systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*. árg. 113, tbl. 2, mars 1987.

Trausti Valsson (2005). Áhrif sjávarstöðubreytinga á skipulag við strönd, erindi flutt á ráðstefnunni *Ísland og norðurslóðir* á vegum Utanríkisráðuneytisins 25. febrúar 2005.

VST (2005). *Samantekt um hæðarsetningu við Austurhöfn* Tilvísun: MB-051117-Portus Verkfræðistofa Sigurðar Thoroddsen. Sótt 10. nóvember 2010 frá <http://mannvit.is/media/files/Vi%C3%B0auki%204.pdf>. Minnisblað.

Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models, *Environmental Modelling & Software* árg. 16, tbl., bls. 195-231, 3. apríl 2001.

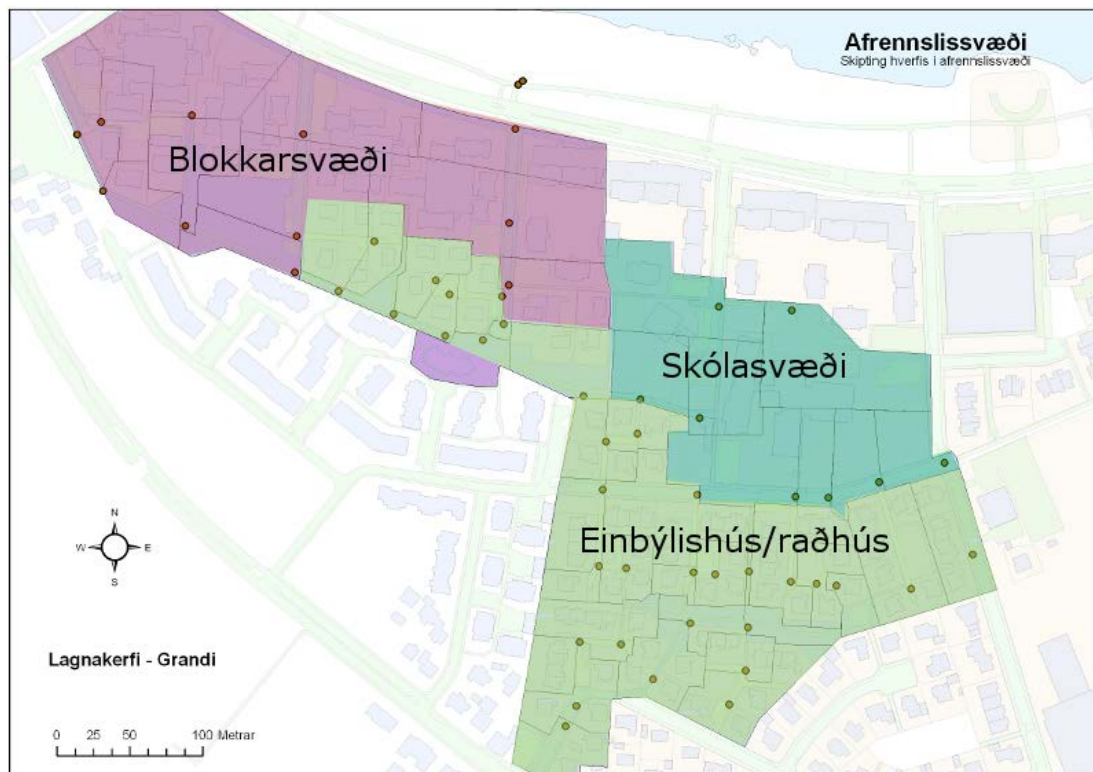
Viðaukar

Viðauki 1: Afrennslisstuðlar

Afrennslisstuðlar voru reiknaður út samkvæmt töflu 17. Skilgreindir voru stuðlar fyrir þök bygginga, götur/gangstíga og græn svæði og fundin flatarmál þeirra með hjálp landupplýsingaforrits (ArcGIS). Reiknaður afrennslisstuðull er vegið meðaltal út frá flatamáli innan hvers meginsvæðis. Afrennslisstuðlar eru í hærra lagi, sem helgast af því hversu þéttbyggt hverfið er.

Tegund svæði	Afrennslissvæði		Þök bygginga		Götur/gangstígar		Græn svæði		Reiknaður afrennslisstuðull
	[ha]	%	Afr.stuðull	0,9	Afr.stuðull	0,9	Afr.stuðull	0,3	
Einbýli/raðhús	4,53	100%	0,93	21%	1,77	39%	1,82	40%	0,66
Skólasvæði	2,74	100%	0,42	15%	1,38	50%	0,94	34%	0,69
Blokkarsvæði	4,29	100%	1,38	32%	1,06	25%	1,85	43%	0,64

Tafla 17: Útreikningur á afrennslisstuðlum



Mynd 16: Skipting afrennslissvæðis í meginsvæði

Viðauki 2: Chicago toppar

Raðaðir Chicago toppar fyrir 1M5-gildið **40mm** og **10 mínútna** varanda.

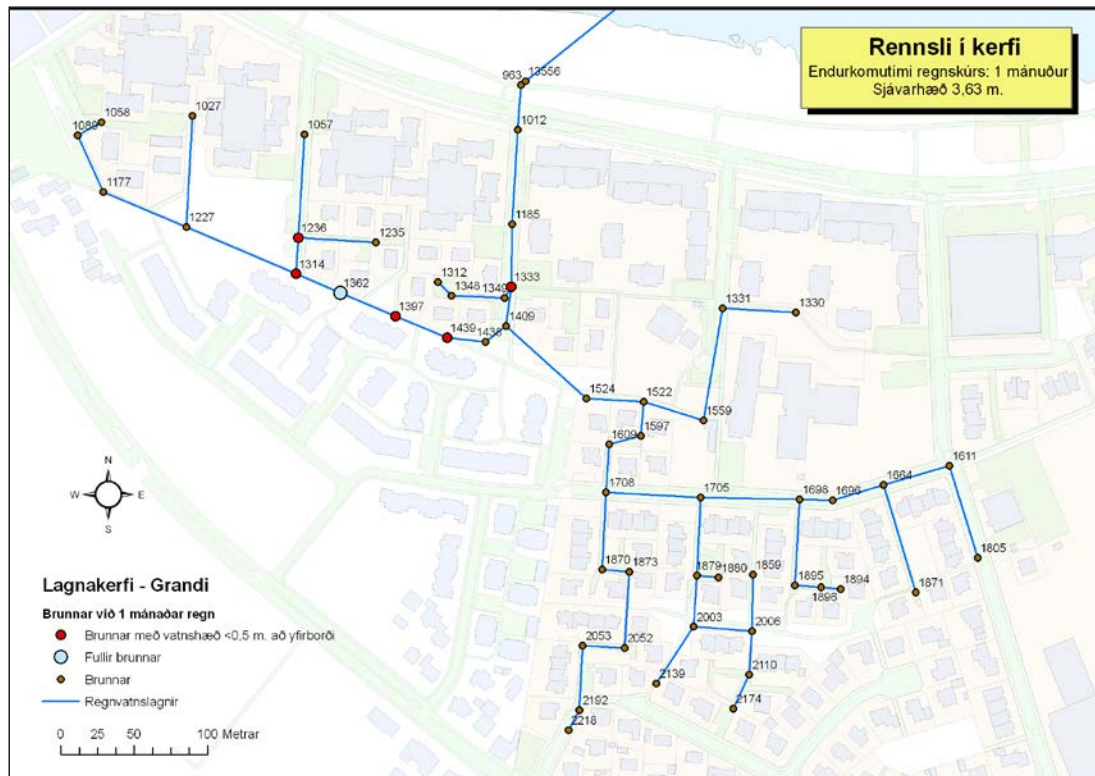
Mín	1 mán.	1 ár	2 ár	3 ár	4 ár	5 ár	10 ár	20 ár
5	1,8	6,9	8,3	9,1	9,7	10,2	11,6	13,0
10	1,9	7,1	8,6	9,4	10,0	10,5	12,0	13,4
15	1,9	7,4	8,9	9,8	10,4	10,9	12,4	13,9
20	2,0	7,7	9,2	10,1	10,8	11,3	12,9	14,4
25	2,1	8,0	9,6	10,6	11,2	11,8	13,4	15,0
30	2,2	8,4	10,1	11,1	11,8	12,3	14,0	15,8
35	2,3	8,8	10,6	11,7	12,4	13,0	14,8	16,6
40	2,5	9,3	11,2	12,4	13,2	13,8	15,7	17,6
45	2,6	10,0	12,0	13,2	14,1	14,8	16,8	18,9
50	2,9	10,9	13,1	14,4	15,3	16,0	18,3	20,5
55	3,2	12,0	14,5	16,0	17,0	17,8	20,2	22,7
60	3,7	13,8	16,7	18,4	19,5	20,4	23,3	26,1
65	4,5	17,2	20,7	22,8	24,3	25,4	28,9	32,4
70	9,0	34,0	41,0	45,1	47,9	50,2	57,2	64,1
75	9,0	34,0	41,0	45,1	47,9	50,2	57,2	64,1
80	4,5	17,2	20,7	22,8	24,3	25,4	28,9	32,4
85	3,7	13,8	16,7	18,4	19,5	20,4	23,3	26,1
90	3,2	12,0	14,5	16,0	17,0	17,8	20,2	22,7
95	2,9	10,9	13,1	14,4	15,3	16,0	18,3	20,5
100	2,6	10,0	12,0	13,2	14,1	14,8	16,8	18,9
105	2,5	9,3	11,2	12,4	13,2	13,8	15,7	17,6
110	2,3	8,8	10,6	11,7	12,4	13,0	14,8	16,6
115	2,2	8,4	10,1	11,1	11,8	12,3	14,0	15,8
120	2,1	8,0	9,6	10,6	11,2	11,8	13,4	15,0
125	2,0	7,7	9,2	10,1	10,8	11,3	12,9	14,4
130	1,9	7,4	8,9	9,8	10,4	10,9	12,4	13,9
135	1,9	7,1	8,6	9,4	10,0	10,5	12,0	13,4
140	1,8	6,9	8,3	9,1	9,7	10,2	11,6	13,0

Tafla 18: Chicago toppar fyrir þá úrkomu sem líkan er keyrt fyrir

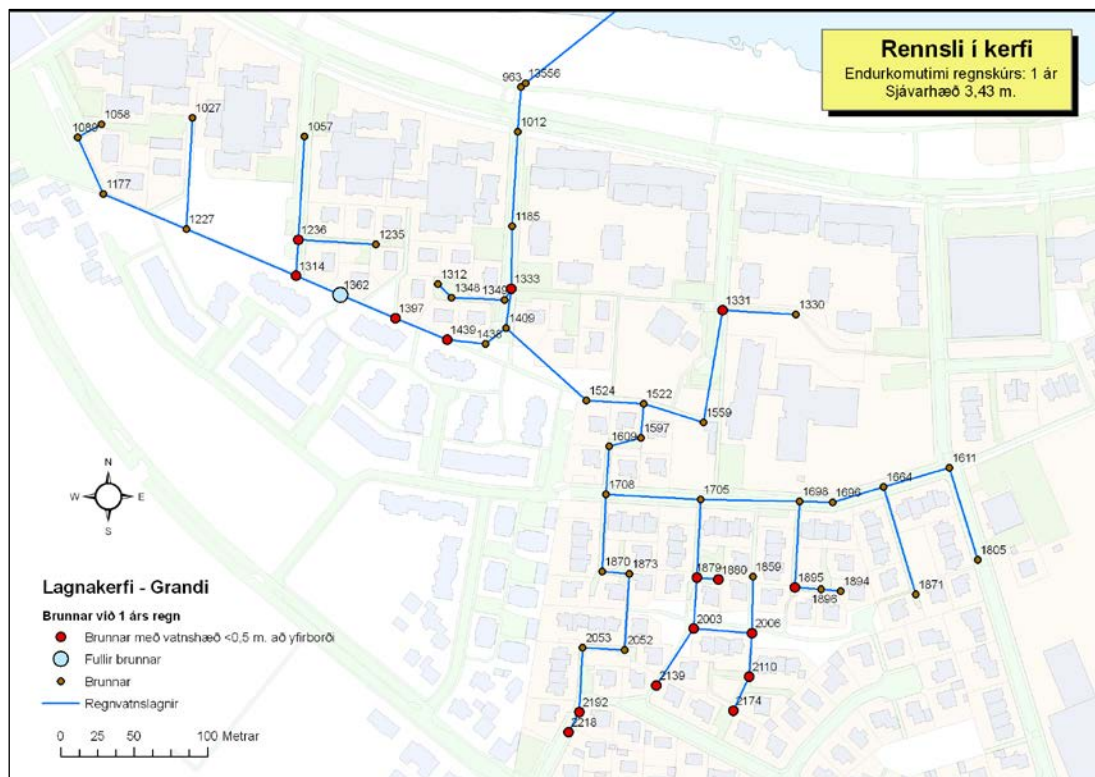
Ofangreindir Chicago toppar eru með 10 mínútna varanda, því fæst regnatburður með heildarvaranda 140 mínútur, þar sem 10 mínútur í miðjum regnatburðinum samsvara úrkomustyrk með endurkomutíma og 1M5-gildi þeirrar skúrar sem Chicago toppurinn er búinn til úr.

Þetta þýðir að skúrin er lengri en varandinn og úrkomun byggist upp og nær hámarki í miðjum Chicago toppnum þar sem úrkomustyrkurinn er jafn kassaregni með 10 mínútna varanda. Síðan minnkar úrkomustyrkurinn aftur, en Chicago toppar eru samhverfir um miðjuna. (OR, 2008)

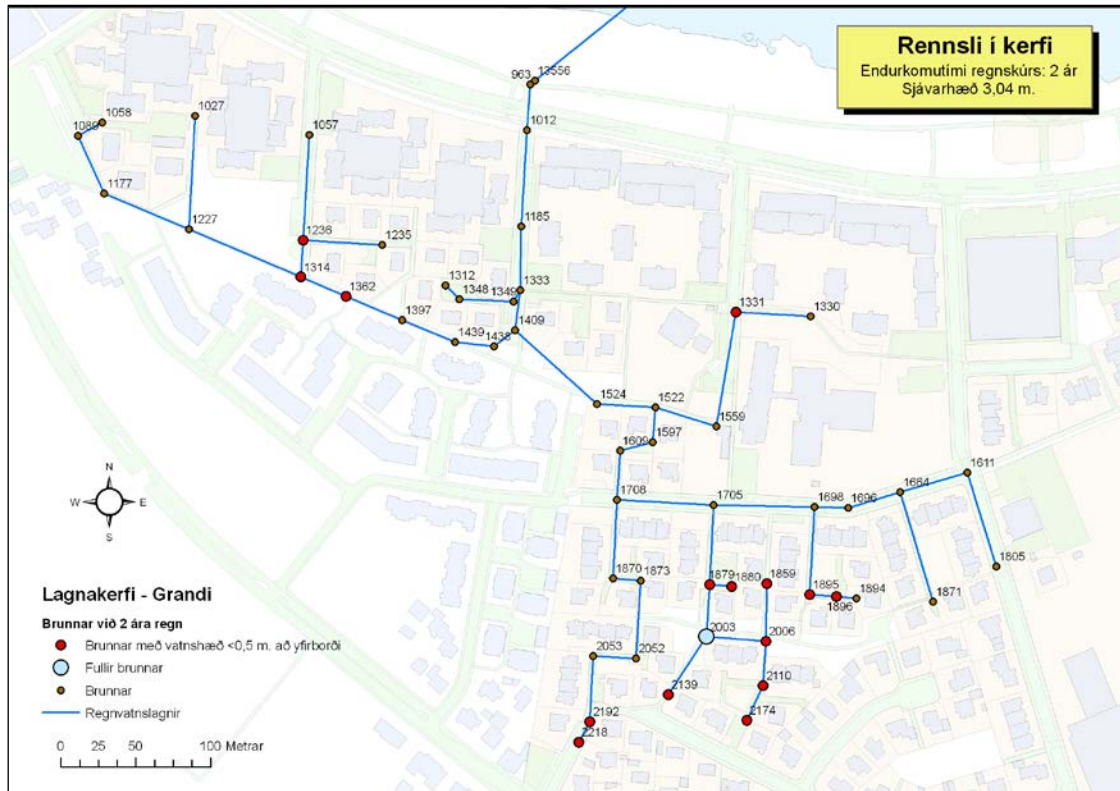
Viðauki 3: Kort af kerfi við hámarkssjávarhæðir



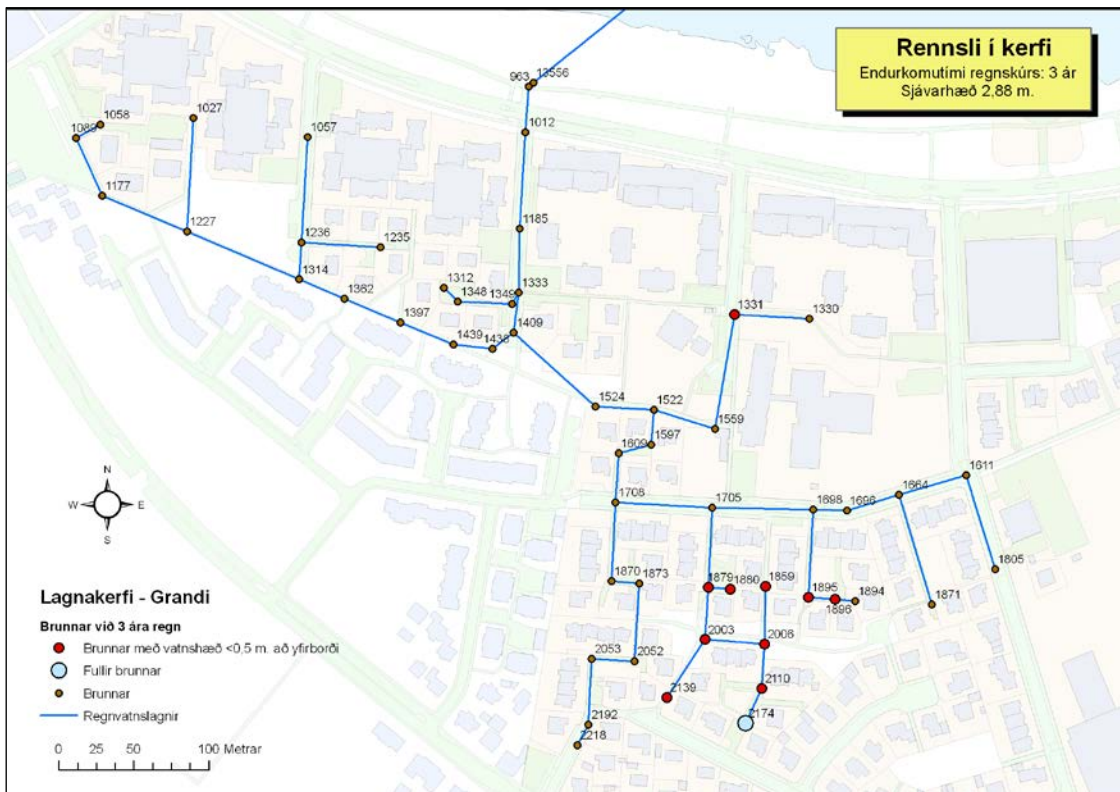
Mynd 17: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 1 mánaða regnskúr.



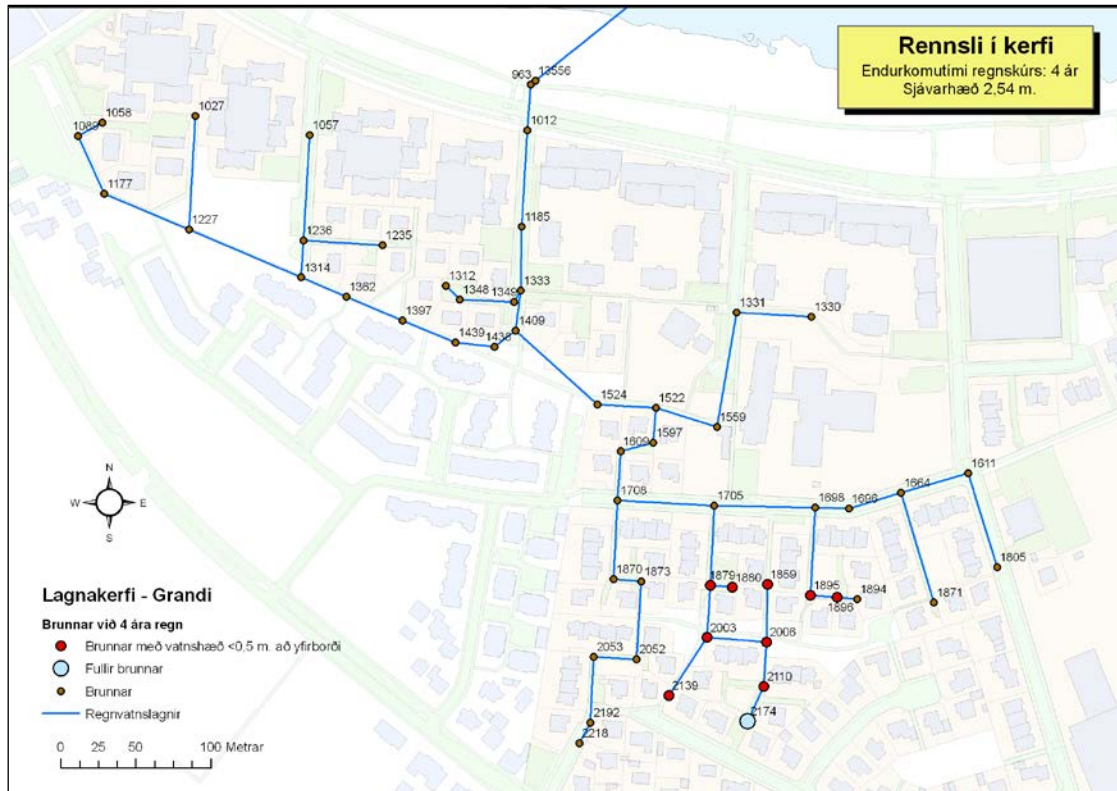
Mynd 18: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 1 árs regnskúr.



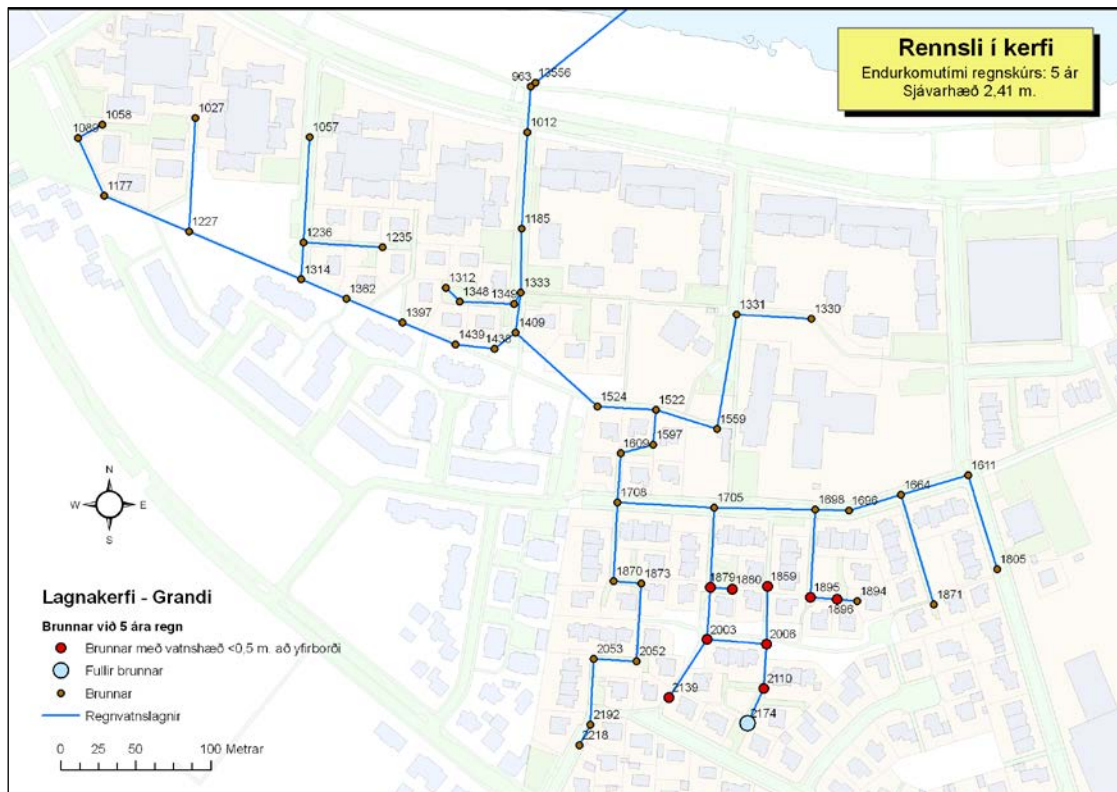
Mynd 19: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 2 ára regnskúr.



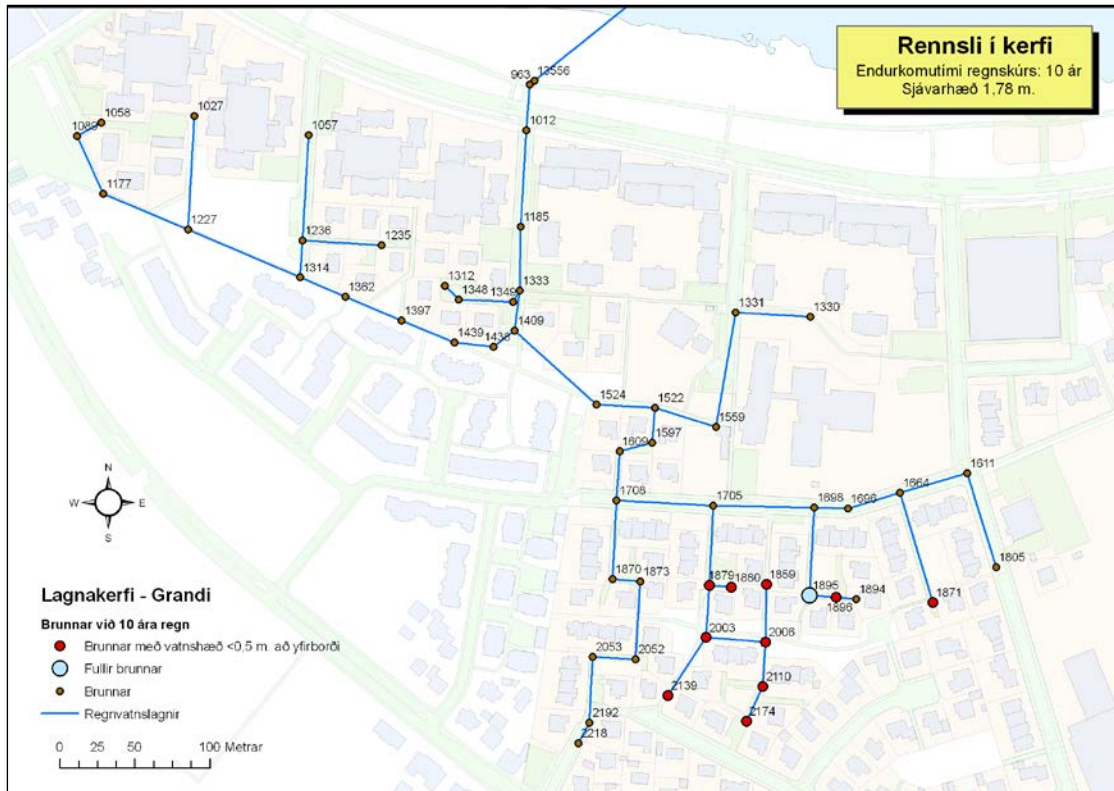
Mynd 20: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 3 ára regnskúr



Mynd 21: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 4 ára regnskúr



Mynd 22: Staða kerfis við þá sjávarhæð sem veldur flóði upp á yfirborð við 5 ára regnskúr



Viðauki 4: Hámarkssjávarhæðir fyrir öll úrkomutilvik

Eftirfarandi tafla sýnir hvernig staðið var að ákvörðun hámarkssjávarhæða fyrir þau regntilvik sem til skoðunar voru. Beitt var einfaldri helmingunarleit, byrjað við lága sjávarhæð og hækkað í skrefum. Ef flóð fengust úr fleiri en einum brunni var bakkað um helming undangengins skrefs og þannig var nálgast hámarkshæðina þar til næganlegri nákvæmni var náð.

	Valin sjávarhæð	Fjöldi brunna sem flæðir uppúr	Mesta vatnshæð	Brunnar
1 mán.	3,00	0		
	4,00	5		1439, 1397, 1362, 1314, 1236
	3,50	0		
	3,75	1	-0,13	1362
	3,63	1	0	1362
1 árs	2,00	0		
	3,00	0		
	4,00	13	-0,52	2218, 2192, 2003, 2139, 2110, 1331, 2174, 1333, 1439, 1397, 1362, 1314, 1236
	3,50	4	-0,14	2110, 2174, 1362, 1314
	3,25	0		
	3,38	0		
	3,44	1	-0,03	1362
	3,41	0		
3,43	1	-0,02	1362	
2 ára	2,00	0		
	3,00	0		
	4,00	17	-0,56	2218, 2192, 1879, 1895, 2003, 1896, 2006, 2139, 2110, 1331, 2174, 1333, 1439, 1397, 1362, 1314, 1236
	3,50	11	-0,23	2218, 1895, 2003, 1896, 2139, 2110, 1331, 1409, 2174, 1362, 1314, 1236
	3,25	5	-0,14	2003, 2139, 2110, 2174, 1362
	3,13	5	-0,1	2003, 2139, 2110, 2174, 1362
	3,06	3	-0,07	2003, 2110, 2174
	3,03	0		
	3,05	3	-0,06	2003, 2110, 2174
	3,04	0		
3 ára	2,00	0		
	3,00	3	-0,1	2003, 2110, 2174
	2,75	0		
	2,88	1	-0,03	2174

4 ára	3,00	6	-0,15	1895, 2003, 1896, 2139, 2110, 2174
	2,75	3	-0,08	2003, 2110, 2174
	2,50	0		
	2,63	5	-0,11	1895, 2003, 2139, 2110, 2174
	2,56	4	-0,09	1895, 2003, 2110, 2174
	2,53	0		
	2,54	1	0,00	2174

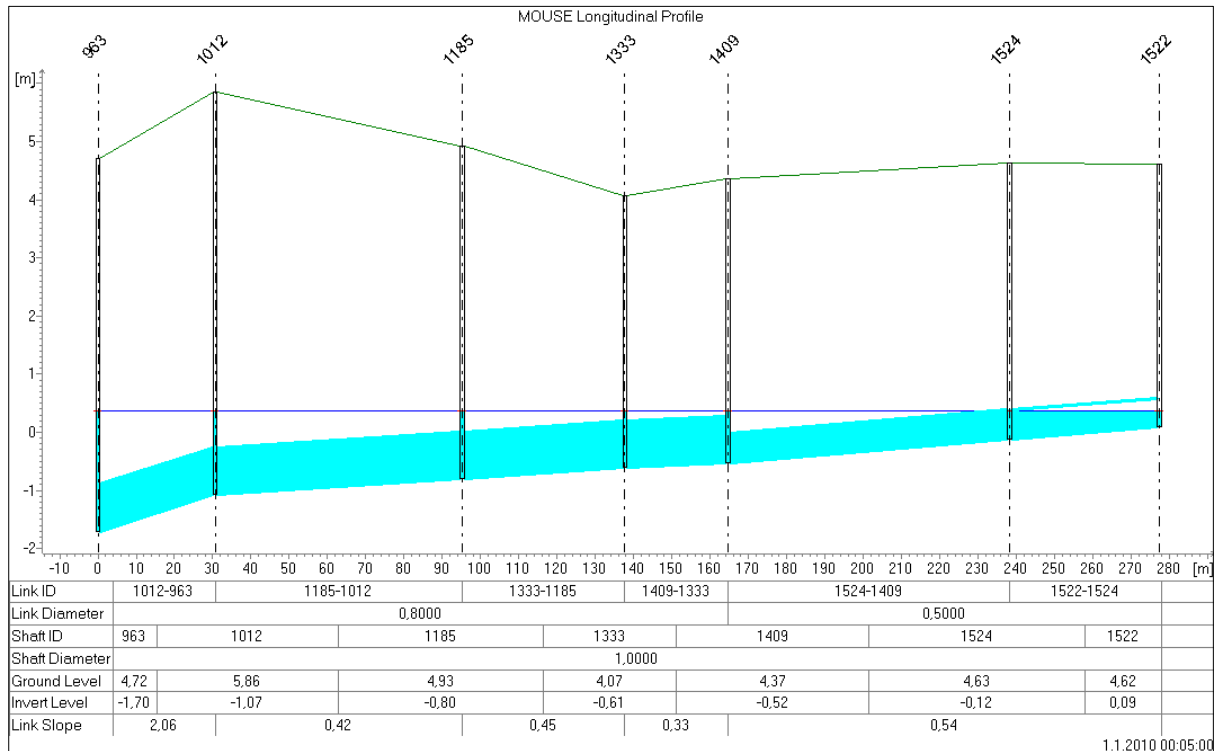
5 ára	0,36	0		
	1,00	0		
	2,00	0		
	3,00	6	-0,20	1895, 2003, 1896, 2139, 2110, 2174
	2,50	2	-0,03	2110, 2174
	2,25	0		
	2,38	0		
	2,44	2		
2,41	1	-0,01	2174	

10 ára	0,36	0		
	1,00	0		
	2,00	5	-0,09	1895, 2003, 1896, 2110, 2174
	1,50	0		
	1,75	0		
	1,88	6	-0,15	1895, 2003, 1896, 2139, 2110, 2174
	1,81	2	-0,01	1895, 2174
	1,78	1	0,00	1895

Tafla 19: Ákvörðun hámarkssjávarhæða fyrir hvert regntilvik

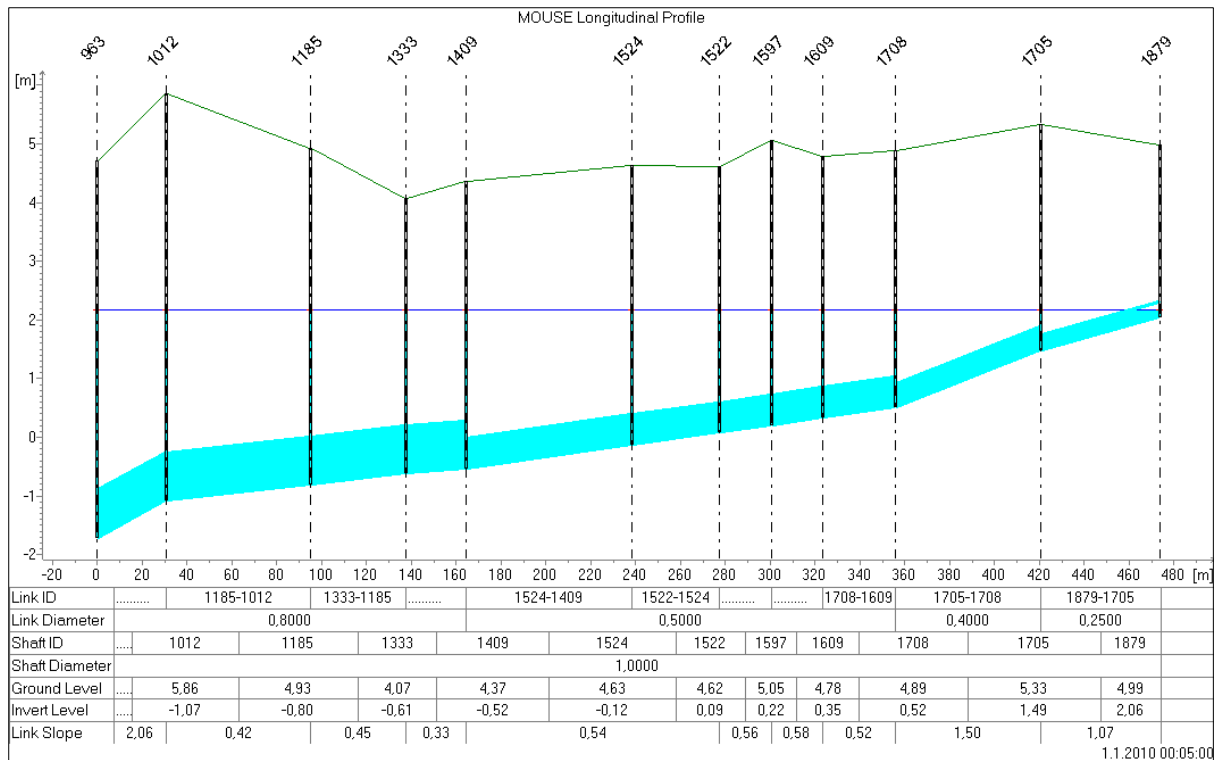
Neikvæð tala í *mesta vatnshæð* táknar að vatn flæðir upp úr brunninum. Mike Urban skilgreinir við útreikningana sýndarlaug (e. artificial basin) ofan hvers brunns sem hefur þúsundfalt stærra flatarmál en þversniðsflatarmál brunnsins ($A_{\text{basin}} = 1000 * A_{\text{brunnur}}$). Neikvæða vatnshæðin er því vatnshæðin í þessari sýndarlaug. Ef þvermál brunns er 1 m og mesta vatnshæð í brunni er -0,10 m þá er vatnsmagnið sem fer uppúr brunninum tæpir 79 m³. Ef brunnlok eru skilgreind sem „normal“ í Mike Urban, sem er sjálfgefin stilling og sú sem hönnunarforsendur OR kveða á um, þá rennur vatnið aftur ofan í brunninn þegar rennsli í lögnunum minnkar. Hins vegar ef brunnar eru skilgreindir sem „spilling nodes“ þá rennur vatnið ekki aftur ofan í fráveitukerfið.

Viðauki 5: Langsnið – sjór í lögnum



Mynd 23: Langsnið af neðsta hluta kerfis við meðalsjávarhæð

Á myndinni hér að ofan má sjá stöðuna á fráveitukerfinu við meðalsjávarhæð og án úrkomu. Bláa, lárétta línan er sjávarhæðin sem er í 0,36 m. Hér er liggur sjór í kerfinu, en einsog sjá má nær hann hátt í 300 m inn eftir kerfinu, inn að brunni 1522 sem liggur milli Frostaskjóls og Rekagranda, um 250 m inn í landi.



Mynd 24: Langsnið af neðsta hluta kerfis við meðalstórstraumsflóð

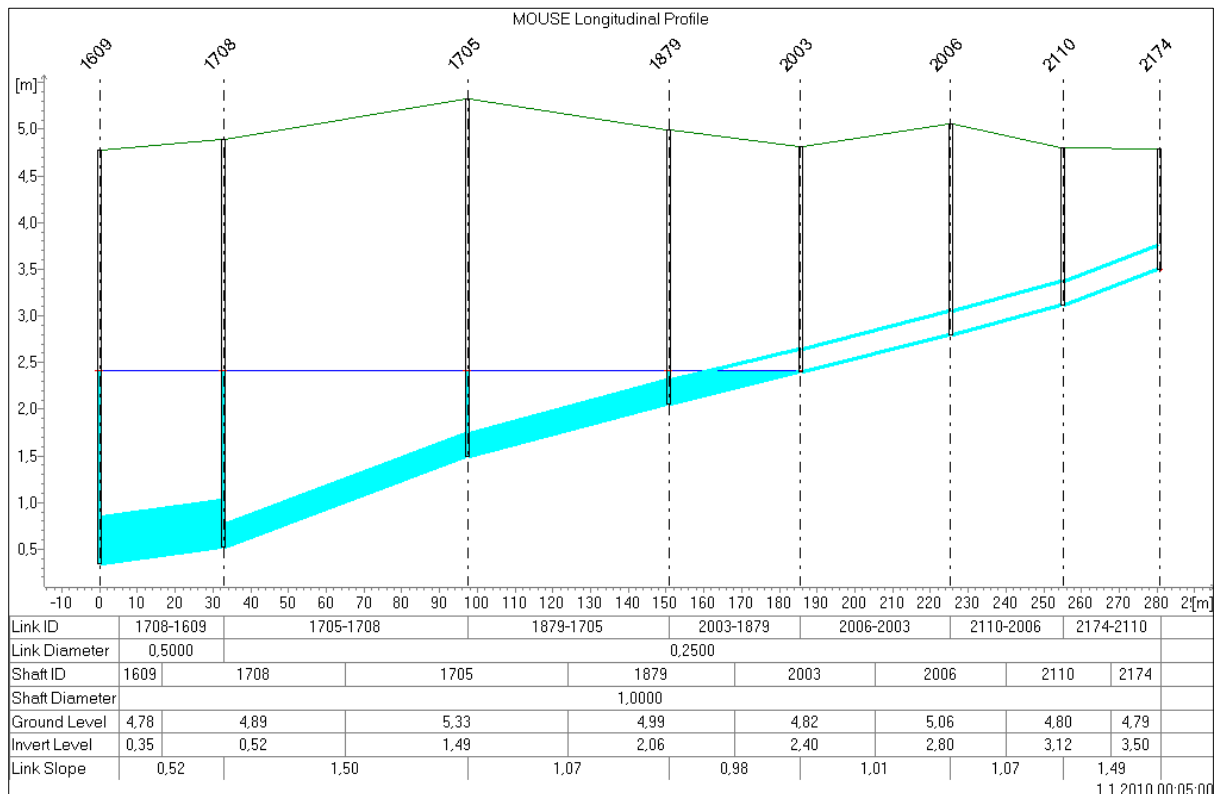
Á myndinni hér að ofan má sjá stöðuna á fráveitukerfinu við meðalstórstraumsflóð og án úrkomu. Bláa, lárétta línan er sjávarhæðin sem er í 2,18 m. Hér er liggur sjór í kerfinu, en einsog sjá má nær hann hátt í 500 m inn eftir kerfinu, inn að brunni 1879 sem liggur u.þ.b. milli Frostaskjól og Granaskjól, tæpa 400 m inn í landi.

Viðauki 6: Langsnið – áhrif breytinga

Hér eru sýnd myndrænt þau áhrif sem stækkun lagnar 1708-1705 hefur á kerfið, bæði fyrir regnskúr með 5 og 10 ára endurkomutíma. Miðað er við þær sjávarhæðir sem fengust úr hermilíkani fyrir viðkomandi tilfelli; 2,41 m fyrir 5 ára skúrina og 1,78 m fyrir 10 ára skúrina.

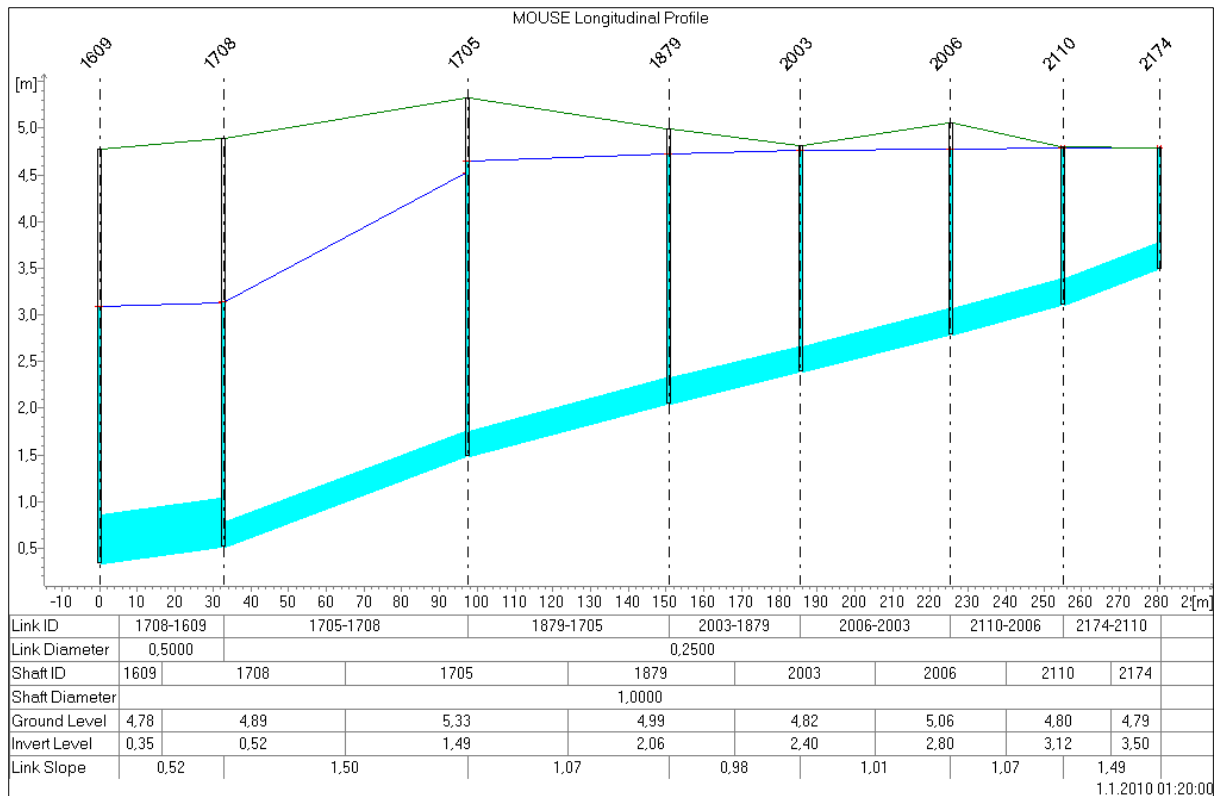
5 ára tilfellið

Hér er reiknað með sjávarhæð 2,41 m. Neðangreind mynd sýnir stöðuna í kerfinu án úrkomu, bláa línan sýnir sjávarhæðina og einsog sjá má liggur sjór í kerfinu upp að brunni 2003.

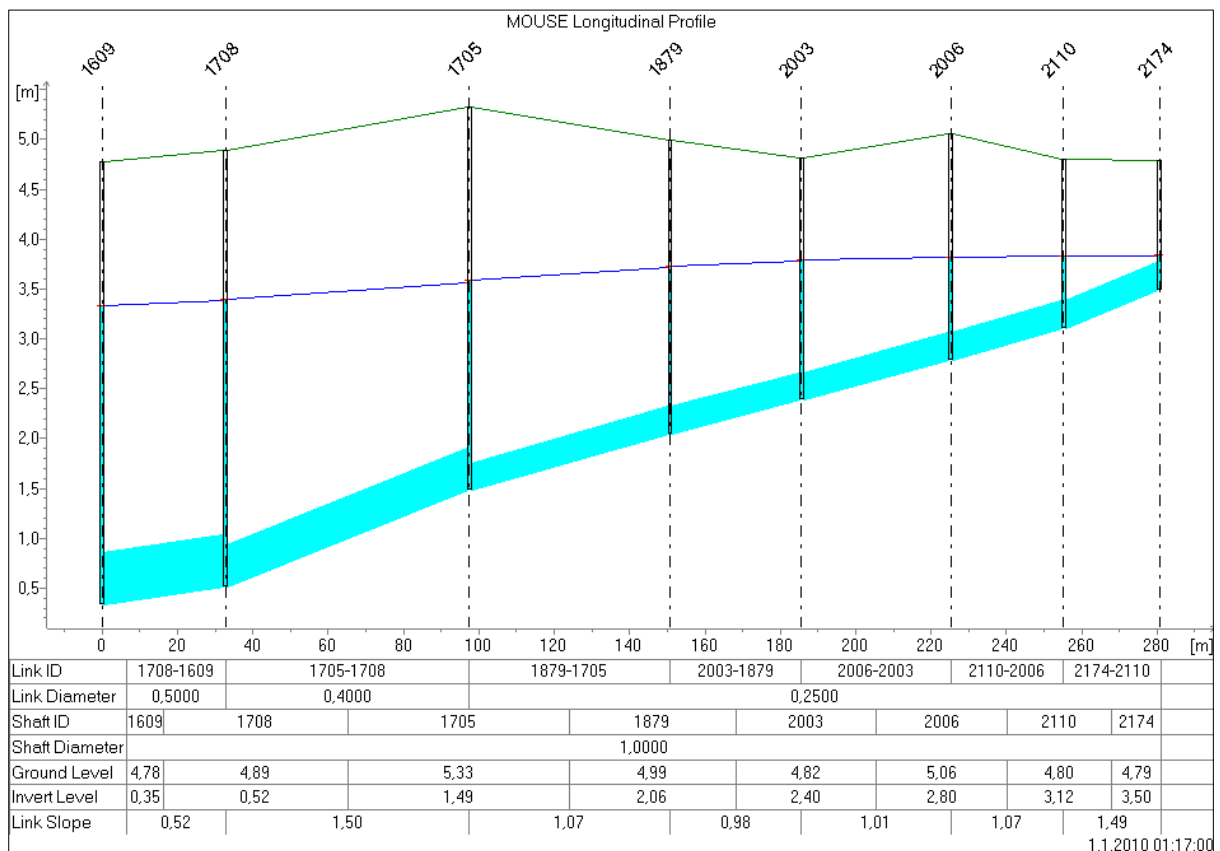


Mynd 25: Langsnið við hámarkssjávarhæð 5 ára skúrar

Myndirnar tvær (mynd 25. og 26.) á næstu síðu sýna stöðuna á kerfinu þegar rigningin er í hámarki, bæði fyrir og eftir breytingar.



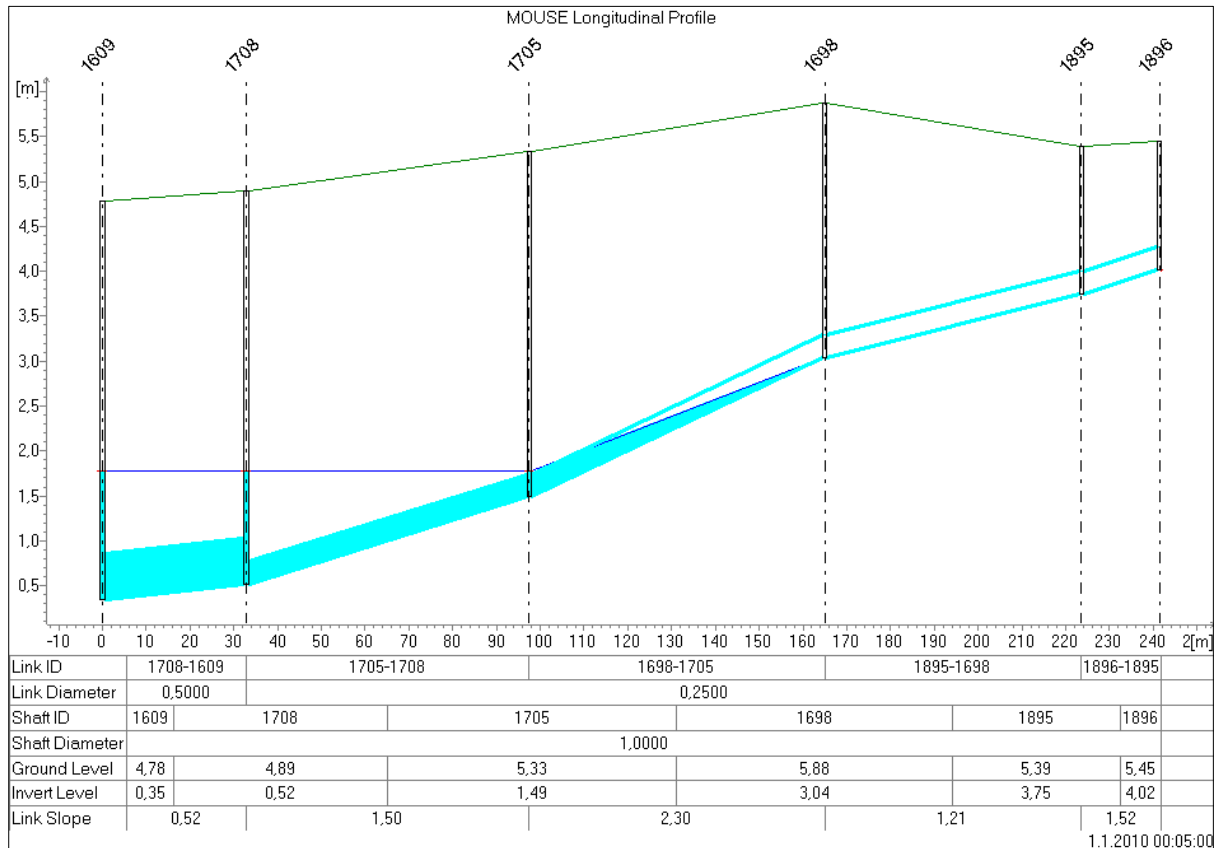
Mynd 26: Langsnið fyrir breytingu - 5 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 2,41 m



Mynd 27: Langsnið eftir breytingu - 5 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 2,41 m

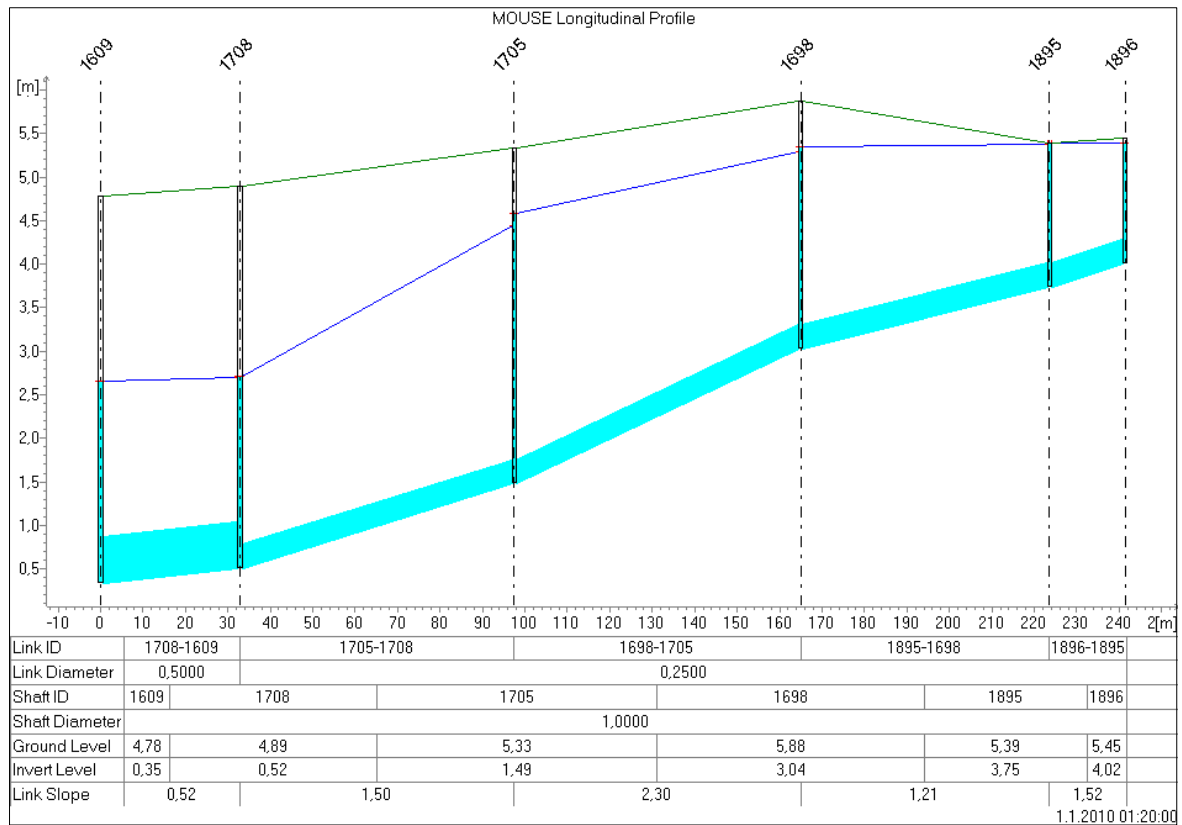
10 ára tilfellið

Hér er reiknað með sjávarhæð 1,78 m. Neðangreind mynd sýnir stöðuna í kerfinu án úrkomu, bláa línan sýnir sjávarhæðina og einsog sjá má liggur sjór í kerfinu langleiðina upp að brunni 1698.

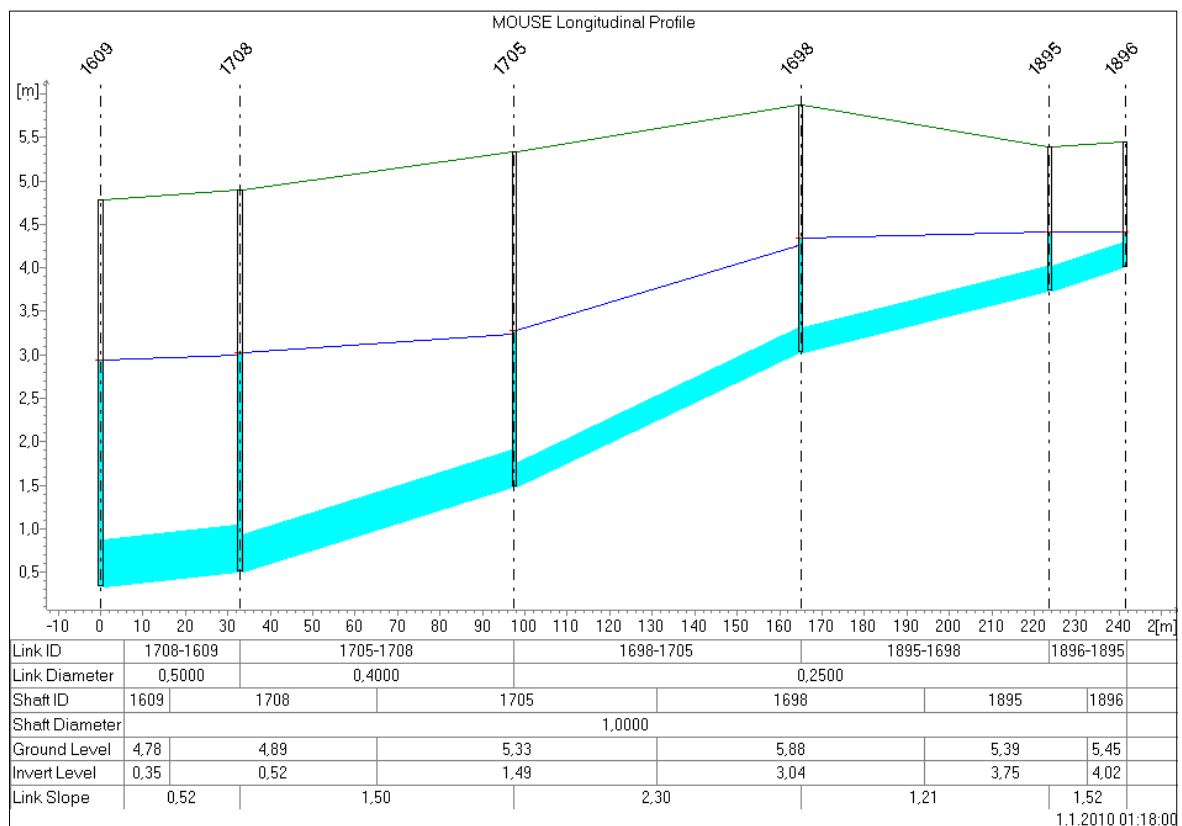


Mynd 28: Langsnið við hámarkssjávarhæð 10 ára skúrar

Myndirnar tvær (mynd 27. og 28.) á næstu síðu sýna stöðuna á kerfinu þegar rigningin er í hámarki, bæði fyrir og eftir breytingar.



Mynd 29: Langsnið fyrir breytingu - 10 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 1,78 m



Mynd 30: Langsnið eftir breytingu - 10 ára skúr í hámarki við sjávarhæð 1,78 m

Viðauki 7: Nokkrar myndir



Mynd 31: Eiðsgrandi 9. september 2010 þegar sjávarhæð fór í um 2,7 m



Mynd 32: Reykjavíkurhöfn 9. sept. 2010. Flóðið fór hæst að draslinu fremst á myndinni



Mynd 33: Reykjavíkurhöfn 9. sept. 2010. Um 0,8 m vantaði upp á hafnarbakkann þegar hæst var.



Mynd 34: Ánanaust að morgni 10. feb. 2010 (mynd: Gunnar Sigmundsson)



Mynd 35: Ánanaust þann 22. mars 2007 (mynd: Gunnar Sigmundsson)