



**Tareste lahe veetasemete aeGRIDade modelleerimine ja
tõenäosusstsenaariumide arvutamine ning Tallinna lahe veetasemete
tõenäosustsenaariumite hinnangu uuendamine**

Lõpparuanne

Töö täitjad: Priidik Lagemaa, Urmas Raudsepp, Ilja Maljutenko

Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituut
Akadeemia 15a, 12618 Tallinn
Tel: +372 6204302
www.msi.ttu.ee

Töö finantseeriti SA Keskkonnainvesteeringute Keskuse "Veemajandus" programmist

Muudatuste tabel

Versioon	Kuupäev	Muudatuse kirjeldus	Autor
1.0	15.11.2018	Aruande esimene versioon	Kõik täitjad
1.1	20.11.2018	Kokkuvõttesse lisatud andmed EH2000 süsteemis	P. Lagemaa

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Tareste lahe veetasemete tõenäosusstsenaariumite arvutamine	4
2.1 Metoodika	4
2.2 Modelleeritud meretasemed	10
2.3 Ekstreemsete veetasemete jaotusfunktsioonid	13
3. Uuringute ülevaade Tallinna lahe veetasemete tõenäosusstsenaariumite hinnangu uuendamiseks	18
4. Kokkuvõte	21
5. Viited	22

1. Sissejuhatus

Üleujutus on üks levinumaid looduslikke ohte, tekitades nii majanduslikku kahju, ohtu inimeste tervisele kui ka kahju kultuuripärandile ja keskkonnale. Ujutusi ei ole tihtipeale võimalik täielikult ära hoida kuid kahju minimeerimiseks on võimalik määratleda üleujutuse riskipiirkonnad ja kasutusele võtta kahju minimeerivad meetmed. Seoses 2007 aastal vastu võetud Euroopa liidu üleujutusohutude hindamise ja maandamise direktiiviga (2007/60/EC) alustati Euroopa liidu liikmesriikides riskide hindamise ja maandamise kava väljatöötamist ja elluviimist. Peale riskide maandamiskava valmimist 2015 aastal on ette nähtud üleujutusohutude riskide, kaartide ja maandamiskavade ajakohastamine iga kuue aasta tagant samaaegselt veemajanduskava ajakohastamisega.

Peale üleujutuste direktiivi ülevõtmist Eesti õigusruumi 2009 aastal valmis 2011 aastal üleujutusega seotud riskide esialgse hinnangu aruanne (Keskkonnaministeerium, 2011a) ja üleujutusega seotud riskide esialgne hinnang (Keskkonnaministeerium, 2011b), kaardistades potentsiaalsed üleujutusohuga alad Eestis. Hinnangus on välja toodud 20 olulise üleujutusohuga seotud tiheasustusalal asuvat riskipiirkonda. Tallinna piirkonna kohta teostati üleujutusohutude ulatuse hindamiseks vajalikud merevee tasemete stsenaariumid (Lagemaa et al., 2013). Seoses regulaarse üleujutusohutude kaartide ajakohastamisega on käesoleva töö üheks eesmärgiks anda ülevaade viimase viie aasta jooksul toimunud teadusarengutest tõenäosusstsenaariumite hindamise vallas ja tekkinud uutest andmetest. Antud ülevaate valguses tuleb hinnata Tallinna linna Haabersti, Põhja-Tallinna ja Kakumäe linnaosade merepiirkondade ekstreemsete meretasemete hinnangute uuendamise vajadust.

Varasemad uuringud on välja toonud Kärkla linna kui ühe piirkonna, kus ajuveest tekitatav eeldatav kahju on suur (Kikas et al., 2008). Samas töös on hinnatud, et Kärkla maksimaalne meretase ei ületa 150-200 cm. Täpsustamaks eelnimetatud üleujutusrisiki ja hinnangut on käesoleva töö teiseks eesmärgiks hinnata Tareste lahe merevee taseme ekstreemumeid Kärkla linnaga piirneval merealal.

Töös kasutatakse modelleeritud veetasemete aastaseid maksimume, mis lähendatakse erinevate ekstreemumväärtuste jaotustega. Saadud tõenäosusjaotuse kõverate abil hinnatakse millise sagedusega võivad esineda ekstreemsed veetasemed Kärkla merepiirkonnas. Vaadeldud on ekstreemumite esinemisi, kirjeldavate tõenäosusjaotuste erinevusi ning olemasolevate andmete põhjal antud hinnangud pikaajalisele ekstreemumite esinemissagedusele Hiiumaa kirdeosa rannikumeres. Hinnangud koosnevad veetasemete tõenäosusstsenaariumitest: 0,1 % (võimalik veetase 1000 aasta jooksul); 1% (võimalik veetase 100 aasta jooksul); 2% (võimalik veetase 50 aasta jooksul); 10% (võimalik veetase 10 aasta jooksul).

2. Tareste lahe veetasemete tõenäosusstsenaariumite arvutamine

2.1 Metoodika

Üleujutuste tõenäosuse hindamiseks on Euroopa Liidu üleujutuse direktiivi ([2007/60/EÜ](#)) vastuvõtmisega reglementeeritud tegevuskava üleujutusrisiki esialgseks hindamiseks ning maandamiseks, kuid ühtset metoodikat pole Euroopa üleujutusdirektiiviga ([2007/60/EÜ](#)) ega

veeseadusega ([Vees](#)) seni määratletud. Veeseaduses määratletakse vaid, et üleujutusrisi tuleb määrata olemasolevate andmete põhjal kasutades uuringu tulemusi, mis näitaks kuidas kliimamuutus mõjutab üleujutuste esinemisi.

Erinevate meetodikate uurimiseks ja kaardistamiseks käivitati Euroopa Liidu projekt FloodFreq (European Procedures for Flood Frequency Estimation) COST (European Cooperation in Science and Technology) Action ES0901 ([FloodFreq, 2013](#)), mille põhieesmärgiks oli võrrelda ja hinnata üle-euroopaliselt kasutatavaid meetodeid üleujutuste sageduste hindamiseks erinevates kliimaatilistes ja geograafilistes tingimustes. Meetodikate erinevus seisneb peamiselt kasutatavas jaotusfunktsioonis. Üheks enim kasutatavaks jaotuseks on GEV (Generalized Extreme Value) jaotus (nt Hosking and Wallis, 1997), kuid kasutatakse ka EV1 ehk Gumbeli (Gumbel, 1954), GPA (Generalized Pareto) (Willems et al., 2007), 3-parameetiline LogNormal LN3, jne jaotusi. Aruandes jõutakse järeldusele et sõltuvalt geograafilistest ja kliimaatilistest tingimustest on mõistlik sobivaim jaotus alati eraldi valida. FloodFreq lõppraportis on näidatud, et kolmeparameetrilistest jaotustest annab GEV meetod parima aastaste tõenäosushinnangu üleujutustele vaadeldud Euroopa riikides (Dalglish et al. [2012](#)). Projekti tulemustes tõdetakse, et vajadus on meetodikate järele, mis arvestavad aegridade mittestatsionaarsust muutuvates kliimatingimustes. Mittestatsionaarseid juhte ning neile vastavaid kliimamuutuste mõju kasutavates tõenäosusjaotustes on uuritud Šraj et al. ([2014](#)) töös. Töös on näidatud, et nii trendide lisamine keskmisele kui ka jaotuse hajuvusele muudab oluliselt ekstreemumite kordusintervalle.

Käesolevas töös on hinnatud tormise sesooni (juulist järgmise aasta juulini) maksimume kasutades üldistatud ekstreem väärtuse jaotust (edaspidi GEV, Generalized Extreme Value, Hosking and Wallis, 1997), EV1 ehk Gumbeli jaotust (Gumbel, 1954) ja Weibulli jaotust. Nende jaotuste põhjalikud matemaatilised kirjeldused on toodud nt Soomere et al (2018) töös.

GEV tõenäosuse jaotusfunktsioon, mis annab tõenäosuse hinnangu juhuslikust suurusest x väiksema suuruse esinemiseks, on eksponentfunktsioon ([exp\(\)](#)) kujul:

$$F_{GEV}(x; shp, scl, loc) = \exp[- (1 + shp * ((x - loc) / scl)^{-1/shp})] \quad [1]$$

Ning sellele vastav tõenäosustiheduse funktsioon vastab kujule

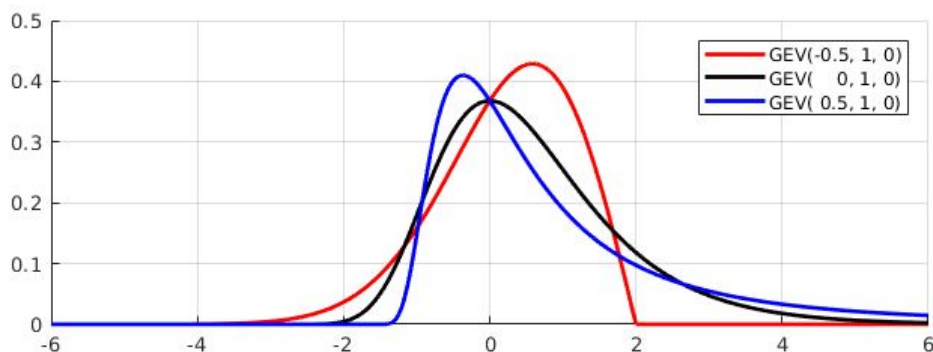
$$f_{GEV}(x; shp, scl, loc) = 1/scl * (1+shp*(x-loc))^{(-1/shp -1)} * \exp[- (1 + shp * ((x - loc) / scl)^{-1/shp})] , \quad [2]$$

kus shp on kuju, loc on matemaatilise ootuse (keskmine) ja scl on hajuvuse parameetrid.

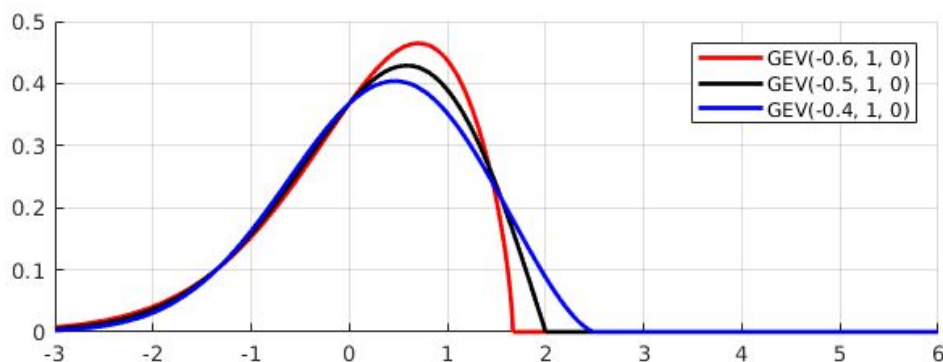
Joonisel 1 on toodud GEV tõenäosustihedus funktsiooni erinevad kujud kasutades erinevaid kuju ja hajuvus parameetreid. Joonisel 1a on kujutatud GEV jaotuse tõenäosustiheduse funktsioonid kolme erineva kuju parameetri jaoks, mille matemaatiline ootus/keskmine ($=0$) ja jaotuse hajuvus ($=1$) on kõigil sama. Need on iseloomulikud kaheparameetrilised erijuhud. GEV jaotuse tundlikkus negatiivsetele kujuparameetritele on näidatud joonisel 1b. Mida väiksem on kuju parameeter, seda kaugemal keskvaärtusest asub tõenäosustiheduse maksimum ning seda väiksemaid ekstreemväärtusi annab GEV positiivne “saba”. Kuju parameetri lähenedes nullile läheb ka suurima tõenäosusega hinnang keskvaärtusele ning suurenevad tõenäosused tundmatu suuruse keskvaärtusest suurtematele ekstreemumitele. Erinevate hajuvus parameetrite korral (joonis 1c) korral paiknevad suurima

tõenäosusega väärtused erinevatel kohtadel. Suurtemate hajuvus parameetri väärtuste korral, kui kuju parameeter on negatiivne, lubab GEV jaotus suuremaid ekstreemume ning väiksema hajuvuse korral on väärtused rohkem koondunud keskväärtuse ümber.

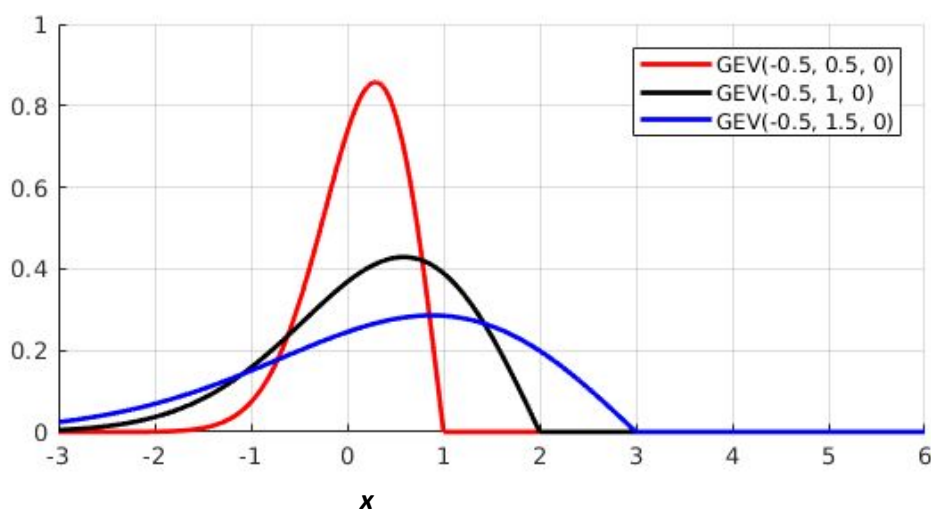
a)



b)



c)



Joonis 1. $f_{GEV}(x, shp, scl, loc)$ töenäosustiheduse funktsiooni erijuhud erineva kujuparameetri märgi korral (a), tundlikkus erinevatele kuju parameetritele (b) ja tundlikkus erinevate hajuvus väärtuste korral (c).

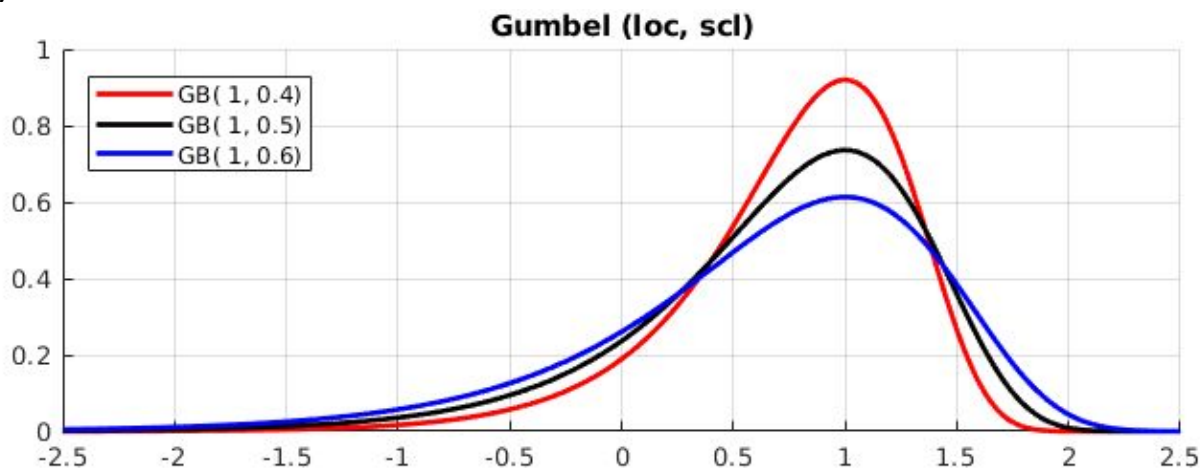
GEV jaotuse erijuhud on kaheparameetrilised Gumbel'i ja Weibull'i jaotused.

Parameetri $shp \rightarrow 0$ korral läheneb GEV Gumbel'i jaotusele ning jaotus sõltub loc ja scl parameetritest.

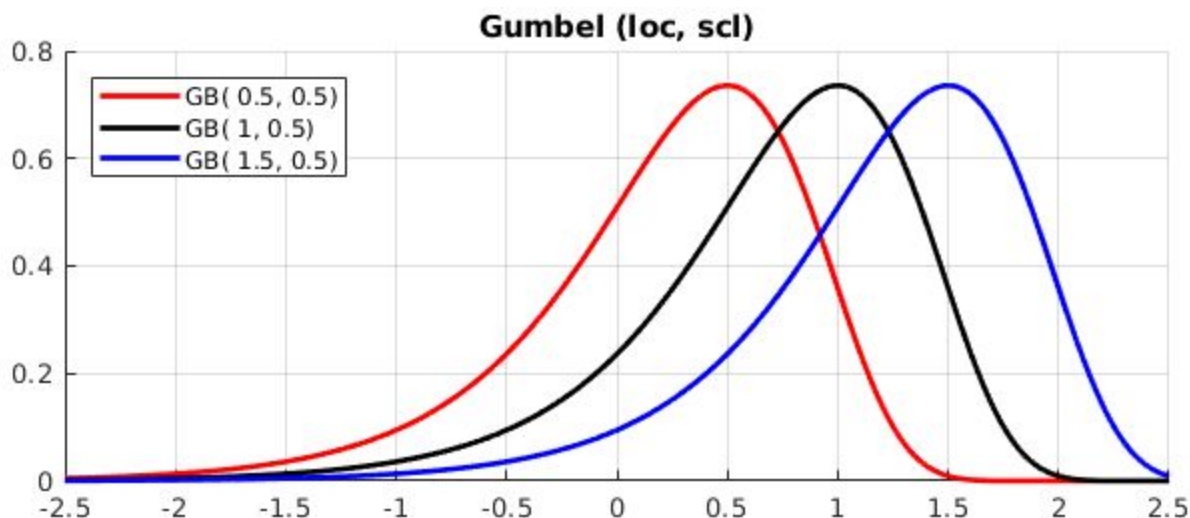
$$f_{GB}(x; loc, scl) = \exp[-\exp[-(x - loc) / scl]] \quad [3]$$

Gumbeli töenäosustiheduse erinevad kujud ja tundlikkus erinevate parameetrite kohta on toodud joonisel 2. Suurima töenäosustiheduse annab jaotus keskvaartuse loc ümber, mille muutmisel nihkub jaotus oma kuju muutmata. Hajuvusparameetri scl muudab jaotuse sabasid lubades jaotusesse suuremaid ekstreemume suuremate väärtuste korral.

a)



b)



Joonis 2. Gumbel'i jaotuse tõenäosustiheduse funktsioonid $f_{GB}(x; loc, scl)$ erineva hajuvuse parameetri (scl) ja keskmiste (loc) korral.

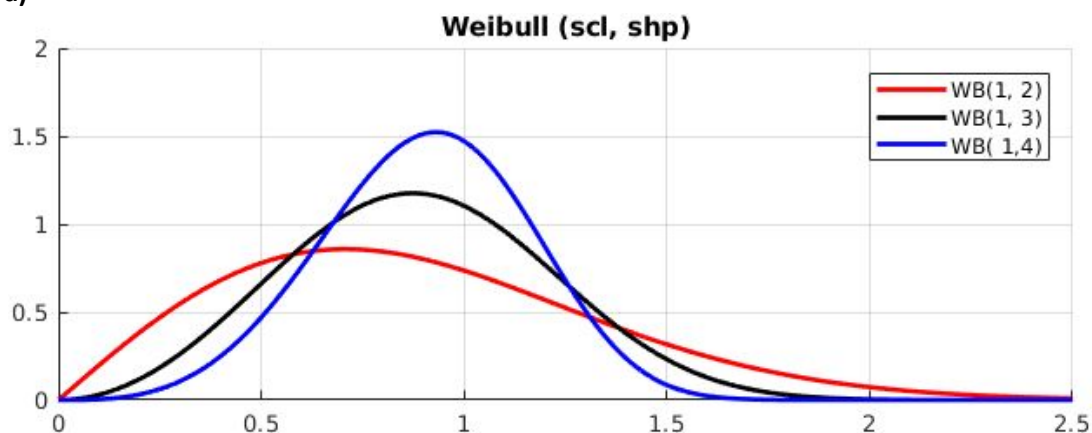
GEV parameetri $scl=1$, keskväärtuse vasakpoolse saba ($x'=-x$) ja $shp < 0$ korral on tegu Weibull jaotusega ning jaotus sõltub loc ja shp parameetritest. Weibulli jaotus on määratud tundmatu suuruse x nullist suurematele väärtustele ning selle tõenäosustihedus vastab kujule

$$f_{WB}(x; scl, shp) = shp/scl * (x/scl)^{(shp-1)} * \exp[-(x/scl)^{shp}] \quad [4]$$

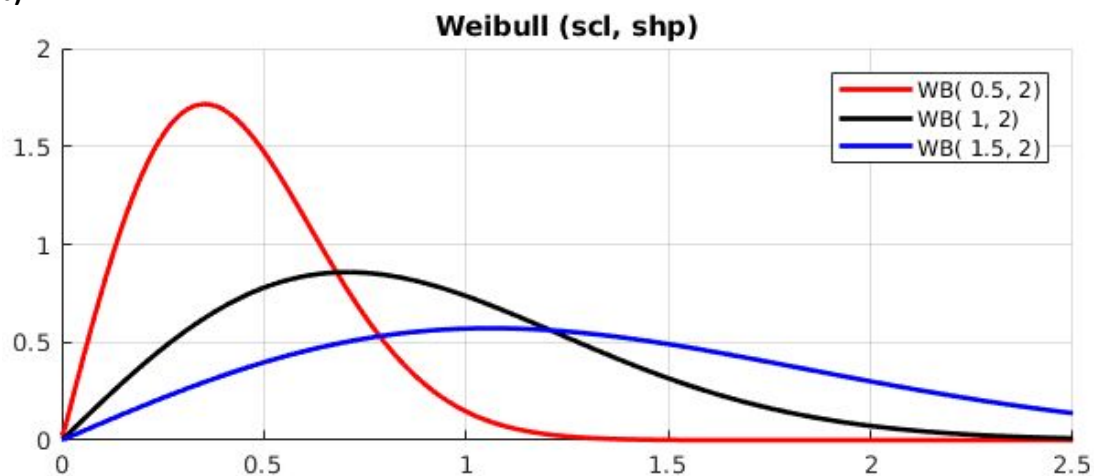
Weibulli tõenäosustiheduse erinevad kujud ja tundlikkus erinevate parameetrite kohta on toodud joonisel 3. Nii maksimaalne tõenäosus kui ka ekstreemsete väärtuste tõenäosus sõltub mõlemast parameetrist.

Mittestatsionaarsete protsesside arvestamiseks saab Šraj et al. (2014) töö näitel varieerida GEV jaotuse keskväärtusi ja hajuvust vastavalt leitud trendidega või korreleerida mõne välise protsessiga. Saab näidata, et muutes GEV jaotuse loc parameetrit jaotuse kuju ei muutu (joonis 2b), seega pikaajalised veetaseme trendid nihutavad keskväärtust.

a)



b)



Joonis 3. Weibull'i tõenäosustiheduse jaotused erinevate kuju- (**shp**) **a)** ja hajuvus (**scl**) **b)** parameetrite kohta.

Kordusintervalli **T** etteantud veetasemele **sle** saab määrata kasutades tõenäosusjaotuse funktsiooni

$$T(sle) = 1 / (1 - F(sle)). \quad [5]$$

Tõenäosusejaotuste lähendamiseks veetasemete ekstreemumitele on kasutatud Matlab'i statistilist tarkvara paketti, mis kasutab maksimaalse tõenäosusliku hinnangu (maximum likelihood estimation) meetodit tõenäosusjaotuse parameetrite leidmiseks ([viide](#)).

Jaotuse parameetrite leidmiseks on kasutatud funktsioone

GEV: [P PC] = **gevfit** (m_sle, p)

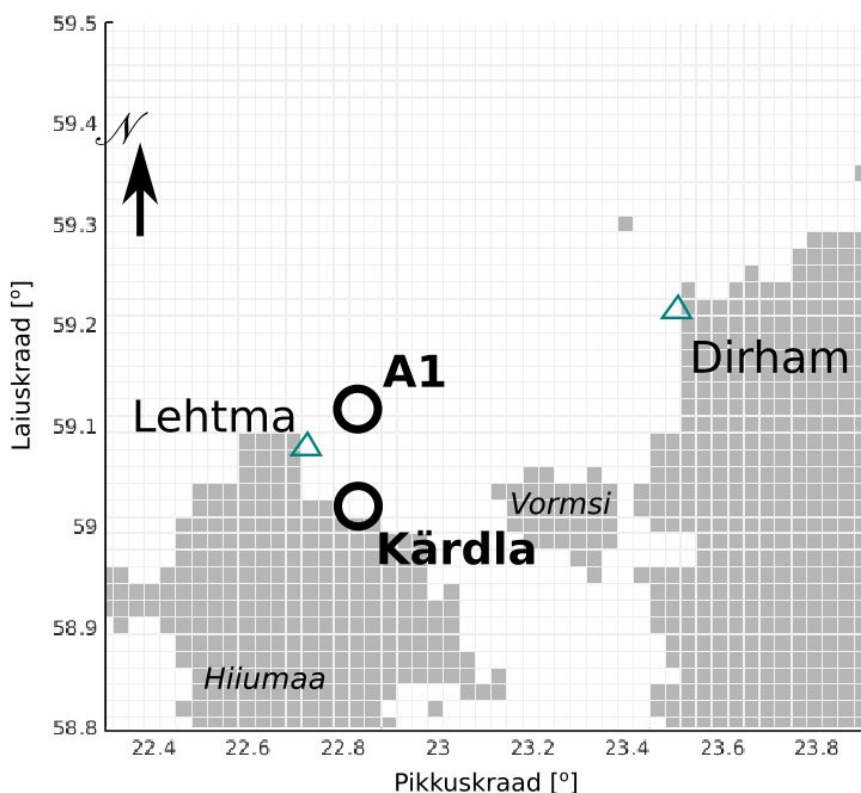
GB : [P PC] = **evfit** (m_sle, p)

WB: [P PC] = **wblfit**(m_sle, p)

P on lähendatud parameetrite vektor ning ning PC sisaldab (1-p)*100 % usaldusnivoole vastavad ülem- ja alamjaotuste parameetreid. Vastavad kordusintervallid on leitud pöördfunktsioonidega **gevinv**, **evinv**, **wblinv**.

2.2 Modelleeritud meretasemed

Meretasemete ruumiliseks modelleerimiseks kasutati kolmemõõtmelist hüdrodünaamilist tsirkulatsioonimudelit GETM (Burchard & Bolding 2002), millega modelleeriti veetasemed kogu Läänemere ulatuses ajaperioodil 1966-2005 a. Mudel katab kogu Läänemerd 1-meremiilist lahutusega ning saab oma veetaseme rajatingimused Taani väinades vaatlusandemetest. Atmosfääri mõjud on saadud pikaajalisest Baltan65+ järelanalüüsist, mis põhinevad EMCWF ERA-40 andmestikul (Luhamaa et al. 2011). Ka jõgede sissevoolud on pärit pikaajalisest hüdroloogia mudeli simulatsioonist E-HYPE (Donnely et al. 2015). Tuule pinge on parametrizeeritud kasutades Kondo (1975) poolt väljatöötatud atmosfääri piirikihi momendi-ülekande koefitsiente, mille korral sõltub veepinna kareduskoefitsent tuule kiirusest. Mudeli üksikasjalikumad seadistused ning valideerimine meretasemete, soolsuse ja temperatuuri kohta on toodud artiklis Maljutenko & Raudsepp (2014).



Joonis 4. Töös vaadeldav uurimispiirkond. Mustad ringid märgivad veetaseme väljavõtteid ekstreemumite hinnanguteks.

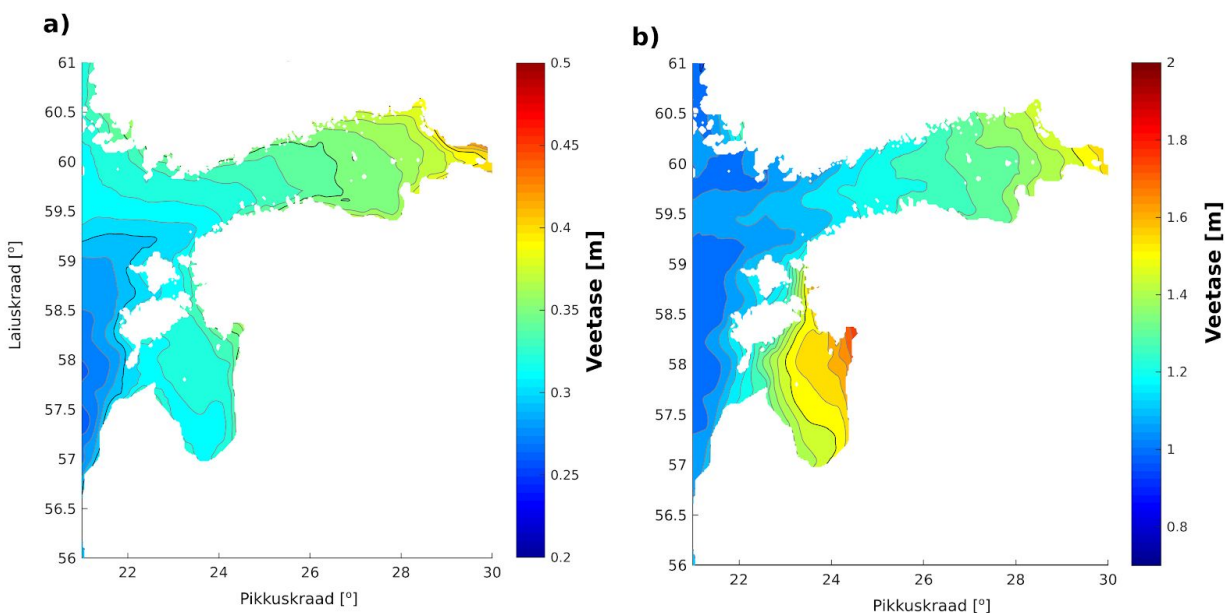
Pikaajaliste veetasemete ekstreemumite hindamiseks on kasutatud modelleeritud veetasemeid. Mudeli veetasemeid on võrreldud mõõtmistega kolmes vaatlusjaamas - Landsortis, Dirhamis ja Narva-Jõesuus. Landsorti jaamas, mille veetasemed peegeldavad kogu Läänemere keskmist veetaset, on mudeli korrelatsioon 0.94 ja keskmistatud ruutkeskmise hälve 7.5 cm. Võrdlus Dirhami (asukoht näidatud

Joonisel 4) ja Narva-Jõesuuga näitas korrelatsiooni vastavalt 0.94 ja 0.96 ning keskmistatud ruutkeskmise hälve vastavalt 8.8 ja 8.2 cm.

GETM mudeli meretase on Dirhami pikaajalisi mõõtmisi kasutades teisendatud BK77 kõrgussüsteemi.

Joonisel 5 on toodud pikaajalise simulatsiooni keskmise veetaseme ja maksimaalse kõrvalekalde jaotused Eesti rannikumere kohta. Keskmine veetase omab lääne suunalist positiivset gradienti ulatudes Soome lahe idaosas 0.45 meetrini. Soome lahe lääneosas jääb keskmine veetase 0.30 m piirile. Maksimaalsed veetasemete ruumiline jaotus sarnaneb keskmise veetaseme omale omades ida suunalist positiivset gradienti. Oluliseimaks erinevuseks on see, et suurimad ekstreemalsed veetaseme kõrvalekalded on Liivi lahe kirdeosas, kus ekstreemumid ulatuvad 2 m.

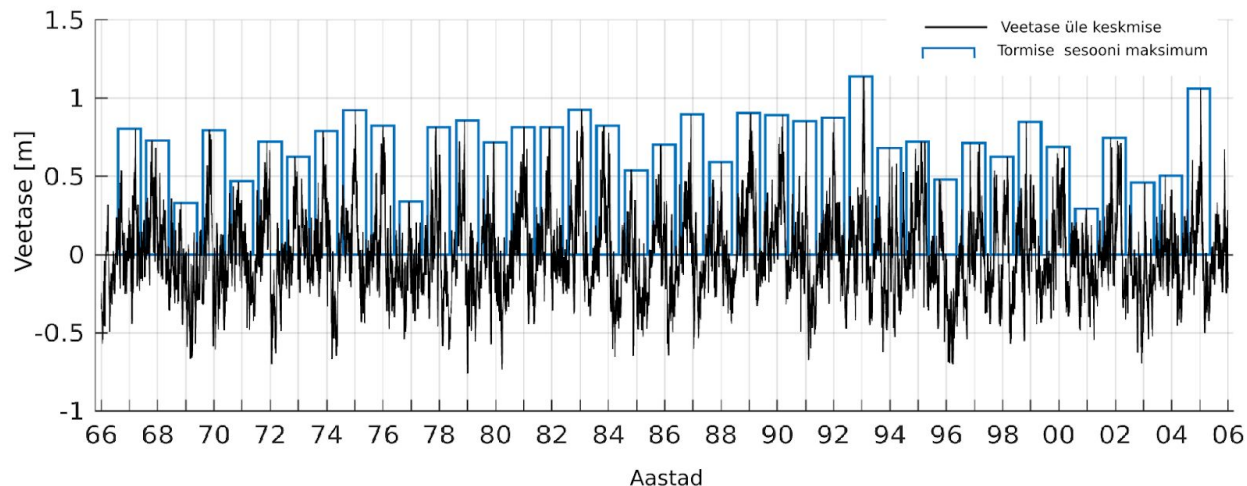
Vaadeldavas piirkonnas Hiiumaa kirderannikul on keskmine veetase vahemikus 0.30 ... 0.32 m. Ekstreemsed veetaseme kõrvalekalded keskmisest veetasemest Hiiumaa kirderannikul jäävad vahemikku 1.1 m ... 1.2 m.



Joonis 5. Pikaajaline keskmine veetase Eesti rannikumeres a) arvutatud GETM mudeliga perioodi 1966-2005 kohta ja b) maksimaalsed veetasemed pikaajalise keskmise taseme suhtes

Modelleeritud perioodil 1966-2005 on ekstraheeritud perioodi keskmisele veetasemele taandatud päeva keskmised veetasemed ning leitud maksimaalsed veetasemed “tormiste perioodide” jaoks (Joonis 6, Tabel 2). Tormine periood on määratud 1 aastase perioodiga alates 1. juulist kuni järgmise aasta 30. juunini. Selliselt määratud maksimaalsed veetasemed kirjeldavad hästi veetaseme ekstreemume, kuna sügis-talvine periood jääb perioodi keskele. Nii ei satu ekstreemumid samast kõrgvee hooajast erinevatesse aastatesse, mis võib mõnevõrra ülehinnata ekstreemumite keskväärtusi (Soomere et al.,

2018). Vastavad aritmeetilised keskmised kalendriaasta maksimumidele on 0.76 m ja tormise perioodi maksimumidele on 0.73 m.



Joonis 6. Veetasemete aegrida ning tormise sesooni ekstreemumid Kärđla rannikumeres.

Vaatlusperioodil esineb kaks juhust kui veetase on ületanud 1 m. Selleks olid juhtumid 1993 (1.14 m) ja 2005 (1.06 m) jaanuaris. Vastavalt kolmas (1975.01) ja neljas (1983.01) ekstreemne juht ulatusid 0.92 m nivooni.

Tabel 2. Tormise perioodi algusele vastavad aastad ja vastava perioodi maksimaalsed veetasemed Kärđla jaamas (Joonis 4.).

	Storm Season (jul ... jun+)					1966	1967	1968	1969
	Max sealevel					0.80	0.73	0.33	0.80
1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
0.47	0.72	0.62	0.79	0.92	0.82	0.34	0.81	0.86	0.72
1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
0.82	0.81	0.93	0.82	0.54	0.70	0.90	0.59	0.90	0.89
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
0.85	0.87	1.14	0.68	0.72	0.48	0.71	0.62	0.85	0.69
2000	2001	2002	2003	2004					
0.29	0.75	0.46	0.51	1.06					

2.3 Ekstreemsete veetasemete jaotusfunktsioonid

Aastased maksimaalsed veetasemed on lähendatud kolme erineva tõenäosusjaotus funktsiooniga vastavalt kirjeldatud metoodikale. Leitud kuju (Shape), skaala (Scale) ja koha (Location) parameetrid on toodud Tabelis 3.

Tabel 3. Lähendatud jaotuste parameetrid erinevate aegridade ja kohtade jaoks. Sulgudes toodud parameetrid lähenduste 95% usaldusvahemike jaoks ning publitseeritud vahemikud.

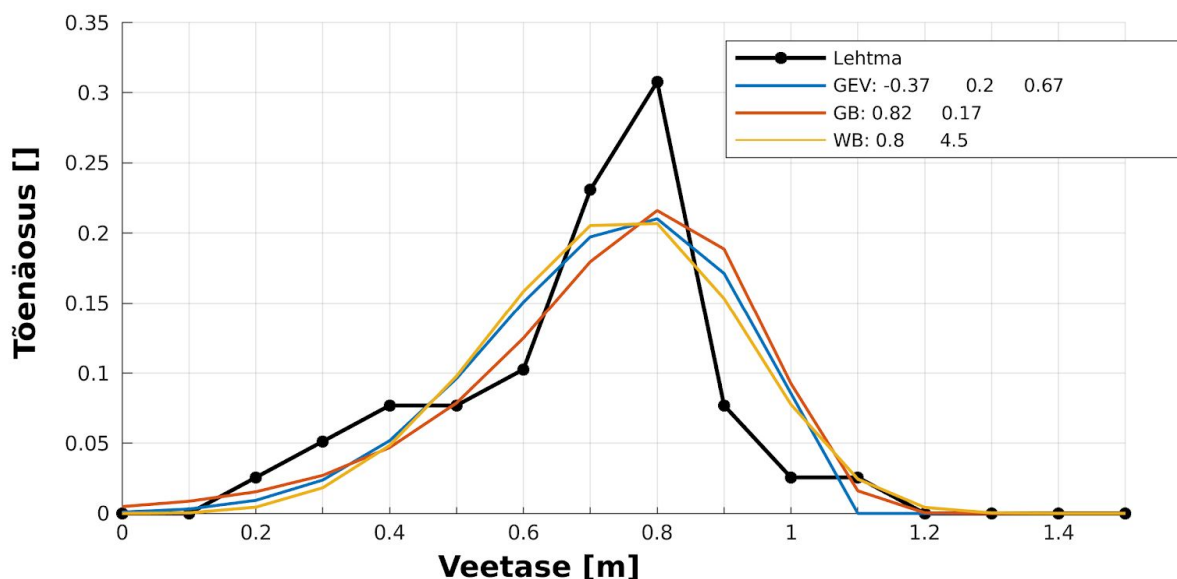
	Shape	Scale	Location
GEV			
Kärdla	-0.37 (-0.52, -0.21)	0.2 (0.16, 0.25)	0.67 (0.6, 0.73)
A1	-0.34 (-0.49, -0.18)	0.2 (0.16, 0.25)	0.66 (0.59, 0.72)
S 60	Model (-0.15 ... 0.2)	Model (0.1 ... 0.17)	Model (0.62 ... 0.7)
S Tal	Meas (-0.71 ... 0.32)	Meas (0.05 ... 0.22)	Meas (0.78 ... 0.85)
GB			
Kärdla		0.17 (0.14, 0.21)	0.82 (0.76, 0.87)
A1		0.17 (0.14, 0.22)	0.81 (0.75, 0.87)
S 60		Model (0.14 ... 0.18)	Model (0.64 ... 0.7)
S Tal		Meas (0.18 ... 0.31)	Meas (0.18 ... 0.31)
WB			
Kärdla	4.5 (3.5, 5.8)	0.80 (0.74, 0.86)	
A1	4.4 (3.5, 5.7)	0.79 (0.73, 0.85)	
S 60	Model (3.2 ... 5.4)	Model (0.81 ... 0.84)	
S Tal	Meas (3.9 ... 4.1)	Meas (0.94 ... 0.97)	

Leitud lähendus-parameetrid/momendid langevad võrdlemisi hästi kokku varasemalt saadud publitseeritud tulemustega (Soomere et al., 2018). “S 60” ja “S Tal” parameetrid on esitatud Soomere et al (2018) töös vastavalt Hiiumaa kirderanniku avaosas ja Tallinnas. “S 60” vastav jaam on A1 (asukoht näidatud Joonisel 4). Tabelist johtub et olulist erinevust Kärdla ja A1 jaama vahel ei esine.

Kõige rohkem erinevad Soomere et al (2018) tulemustega võrreldes modelleeritud GEV kuju parameetrid. Hajusus ja ootuse parameetrid langevad varasemate hinnangutega paremini kokku. Nii GB kui ka WB jaotuse puhul on hajususe parameetrid koos usaldusvahemikuga võrreldavad Soomere et al. (2018) töös leitudetega. GB ootuse parameeter on meie töös ülehinnatud, mida näitab ka GB jaotuse

maksimumi suurem nihe suuremate ekstreemumite poole. Üldjuhul need parameetrid mis varieeruvad suuremas ulatuses langevad Soomere et al. (2018) publitseeritud tulemustega halvemini kokku.

Peamised erinevused on tingitud vaadeldava perioodi pikkusest ja ulatusest, mis kätkevad endast erinevaid aastaid ja seega erinevaid maksimume. Nii on näiteks kuju parameeter tundlik tõenäosustiheduse jaotuse sabade väikestele muutustele. Loomulikult on mõnevõrra erinevad Soomere et al (2018) töös kasutatud pikkaegse mudeli lahutus, atmosfääri mõjud ning andmete ajaline lahutus.



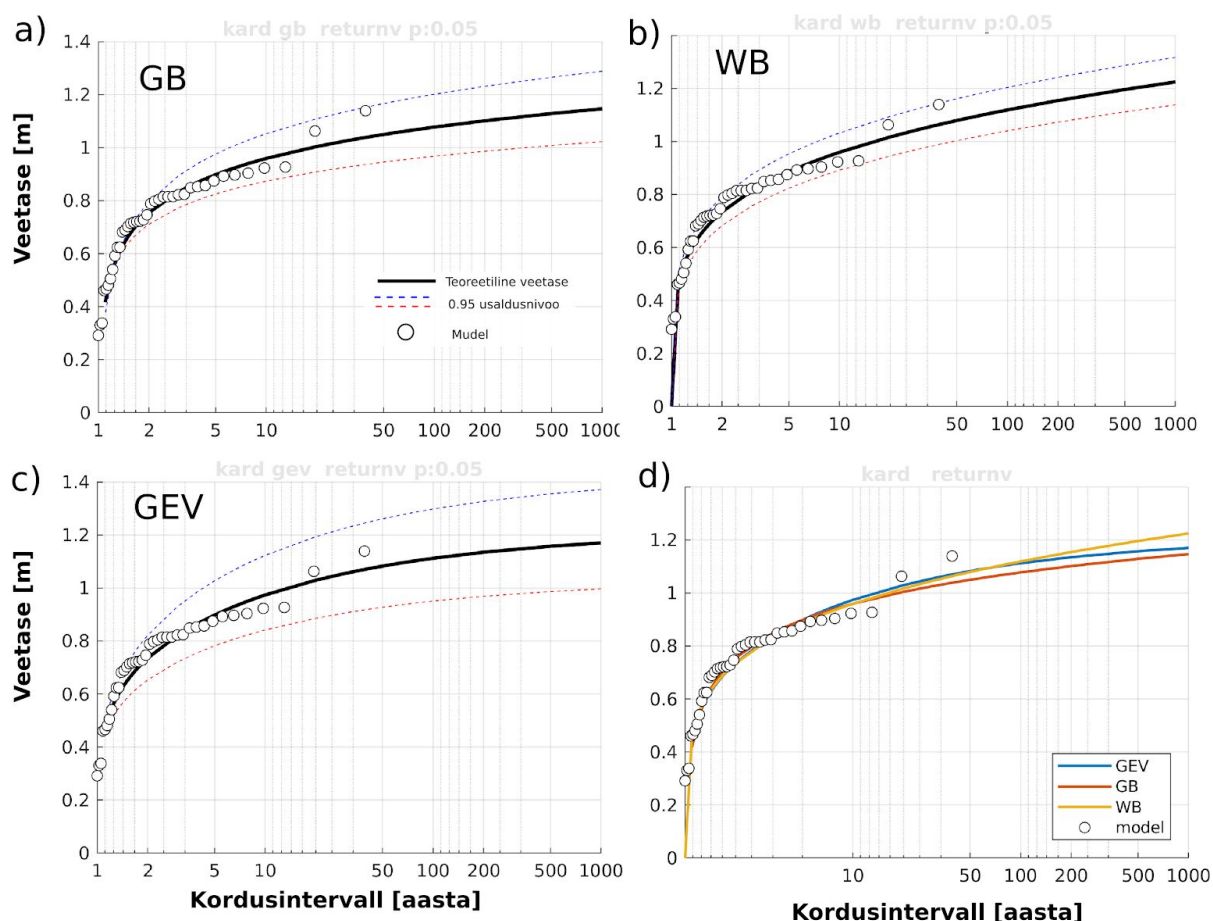
Joonis 7. Ekstreemsete veetasemete tõenäosustihedus Kärda asukohas jaotatud 10 cm vahemikele (must joon). Värviliste joontega toodud on erinevate jaotustega lähendatud vastavad tõenäosustiheduse funktsioonid.

Joonisel 7. on toodud erinevad teoreetiliste jaotustega lähendatud Kärda tormise perioodi maksimaalsete veetasemete tõenäosustiheduse jaotused. Kõik tõenäosustiheduse jaotused on kallutatud ekstreemsete veetasemete suunas, mis õigustab asümmeetriliste jaotuste kasutamist. Kõige väiksem ruutkeskmine hälve, kasutades 10 cm vahemikke, on saadud GEV funktsiooni lähendusega (0.0366), kõige suurem ruutkeskmine hälve kasutades WB jaotust (0.0379). GB jaotusfunktsiooni ruutkeskmine hälve on vastavates vahemikes 0.0347. WB funktsioon ennustab suuremaid aastaseid maksimume suurema tõenäosusega kui GB funktsioon. Samas on GB funktsiooni madalam osa esindatud suurema tõenäosusega kui WB jaotus. Maksimumide keskmine (ootus) on GB jaotuse järgi umbes 5 cm kõrgem kui WB jaotuse korral. GEV-lähenduse tõenäosusjaotus ennustab ekstreemseid veetasemeid väiksema tõenäosusega kui GB ja WB tõenäosusjaotused. GEV-lähendus on madalamate ja keskmiste ekstreemumite esinemise tõenäosust hinnanud GB ja WB vahepeale.

Lähendatud tõenäosustiheduse funktsioonidele on leitud parameetrite 95% usaldusvahemikud (vastavad parameetrid Tabelis 2, sulgudes). Kõige väiksemad usalduspiirkonnad on andnud WB ja GB jaotused, samas kõige laiem usaldusvahemik on GEV jaotusel. See tähendab, et GEV ennustab võrdlemisi suurt hajuvust ümber leitud tõenäosusjaotuse.

Kordusintervallid on leitud tõenäosustiheduse funktsioonist vastavalt valemile [5].

Mudeli aegreas on tormiste sessoonide maksimaalne veetase 1.14 m. Kuna tormiseid sessoonne on 40 aastase perioodi jooksul võimalik hinnata 39 korda, on maksimaalse veetaseme esinemise tõenäosus antud aegreapõhjal $1/39$. Pikema aja kohta saab hinnangu anda kasutades lähendatud tõenäosustiheduse funktsioone.



Joonis 8. Teoreetiliste veetasemete kordusintervallid erinevate tõenäosusjaotuste korral ning nende 95% usaldusnivood a) Gumbeli jaotuse korral, b) Weibulli jaotuse korral, c) GEV tüüpi jaotuse korral ning d) kõik kolm funktsiooni koos. Weibulli ja GEV usaldusnivood on arvutatud kasutades lähendusest saadud kuju parameetrit. Kordusintervallid on kõrgussüsteemis BK77.

Joonistelt 8 on näha, et kõik lähendusfunktsioonid ülehindavad aastaseid maksimume vahemikus 0.8-0.95 m ning selgelt alahindavad kahe ekstreemalse juhtumi esinemist. 40-aasta ekstreemumitele vastavad kordusintervallid on kõige lähemale ennustanud GEV, kuid vahe teiste jaotustega (GB ja WB) on väga väike (< 5 cm). Modelleeritud maksimaalsele veetasemele 39 aasta jooksul (1.14 m) annab kõige

lähema tulemuse GEV jaotus (1.07 m). Kõige lühema kordusintervalli modelleeritud maksimaalse veetasemele (1.14 m) annab WB lähendus (150 aastat) ning kõige pikema GEV lähendus (500 aastat).

Suure varieeruvuse tingib tõik, et nii suuremate kui ka väiksemate aastaste maksimumide esinemistõenäosust ei saa kirjeldada sama jaotusfunktsiooni abil. Leitud lähendus on kompromiss vaadeldaval perioodil esinenud ekstreemumite ja tavapärase aasta maksimumide vahel.

Peale jaotusfunktsiooni lähendamist modelleeritud pikaajalistele meretasemetele koostati kordusintervallide graafikud (Joonis 8) millelt on võimalik leida käesoleva uurimustöö eesmärgiks olevad võimalikud veetasemed 10, 50, 100 ja 1000 aasta jooksul. Vastavad numbrilised väärtused on välja toodud Tabelis 3. Kordusintervallide esinemise tõenäosuseks valiti klassikaliselt kasutatav 95% usalduspiirkond, mis on näidatud Joonisel 8 koos kordusintervalli teoreetilise kõveraga.

Joonisel 8 on sinise ja punase joonega tähistatud jaotusfunktsioonide usaldusnivoo alam- ja ülempiirid mis saadud Scale ja Location, ehk hajususe ja keskväärtuse määramatusest. Erinevad kuju parameetri usaldusnivooode jaotusfunktsioonid toovad endaga kaasa funktsioonide lõikumise WB korral ning GEV jaotuse korral väga suure veetasemete hajuvuse pikema kordusintervalli korral. Seega iseloomustavad Joonisel 8 toodud usalduspiirkonnad keskväärtuse ja hajususe usaldatavust. Kujuparameetrik on GEV ja WB korral võetud vastavate teoreetilise veetaseme kujuparameetrid.

Usalduspiirkonna laius on väikseim Weibulli jaotusel ning suurim GEV jaotusfunktsioonil. GB jaotusel on usaldusintervalli laius vahepealne. Erinevatele kordusintervallidele vastavad ülem ja alam 95% usalduspiirid on toodud Tabelis 4.

Weibulli jaotus annab suuremad ekstreemumid pikema kordusintervalli jaoks kui 100 aastat. 1000 a. maksimaalne aastane veetase ulatub 1.22 m WB jaotuse järgi, 1.17 m GEV jaotuse korral ning, 1.15 m GB jaotuse korral. Paraku on need võrreldavad ekstreemumid 40 aasta maksimumidega.

Suurimaid ekstreemume andev WB jaotus annab 1000 aasta kordusintervallile vastava aasta maksimum veetaseme 1.22 m. Kui sellele liita juurde keskmine lokaalne veetase 0.31 m on tulemuseks 1.53 m. Liites juurde veel 95% usaldusnivoo on aastase perioodi ekstreemumiks 1.63 m. GEV korral on usaldusnivoo suurem nii, et vastav ekstreemne veetase võib ulatuda 1.68 m. GEV puhul on teoreetiline määramatus oluliselt suurem kui näidatud Joonisel 8, sest arvestada tuleks lisaks ka kuju parameetrist sõltuv määramatus. Arvestades kuju parameetrit on usaldusnivoo ülemine piir 1.66 m, mis keskmise juurde liitmise korral vastaks 1.97 m.

Teisest küljest on usaldusnivood üsna suured seetõttu, et teoreetiline jaotus püüab jälgida kogu maksimaalse veetaseme valimit, mis ei pruugi olla ajas homogeenne nagu näitas Lagemaa et al (2013) sarnane uuring Tallinna kohta.

Joonisel 8 eristuvad selgelt 1992 ja 2005 aasta jaanuari ekstreemumid, mis on teistest ligemale 20 cm kõrgemad. Teoreetilised kõverad alahindavad selliseid sündmusi ligemale 5 cm. GB jaotuse ülemine usaldusnivoo järgib ligikaudu esinenud maksimaalset veetaset 40 aasta jooksul. Kuivõrd tegemist on riskide hindamisega siis on tõenäosusstsenaariumiks valitud halvim võimalik st GEV jaotuse ülemine usalduspiir.

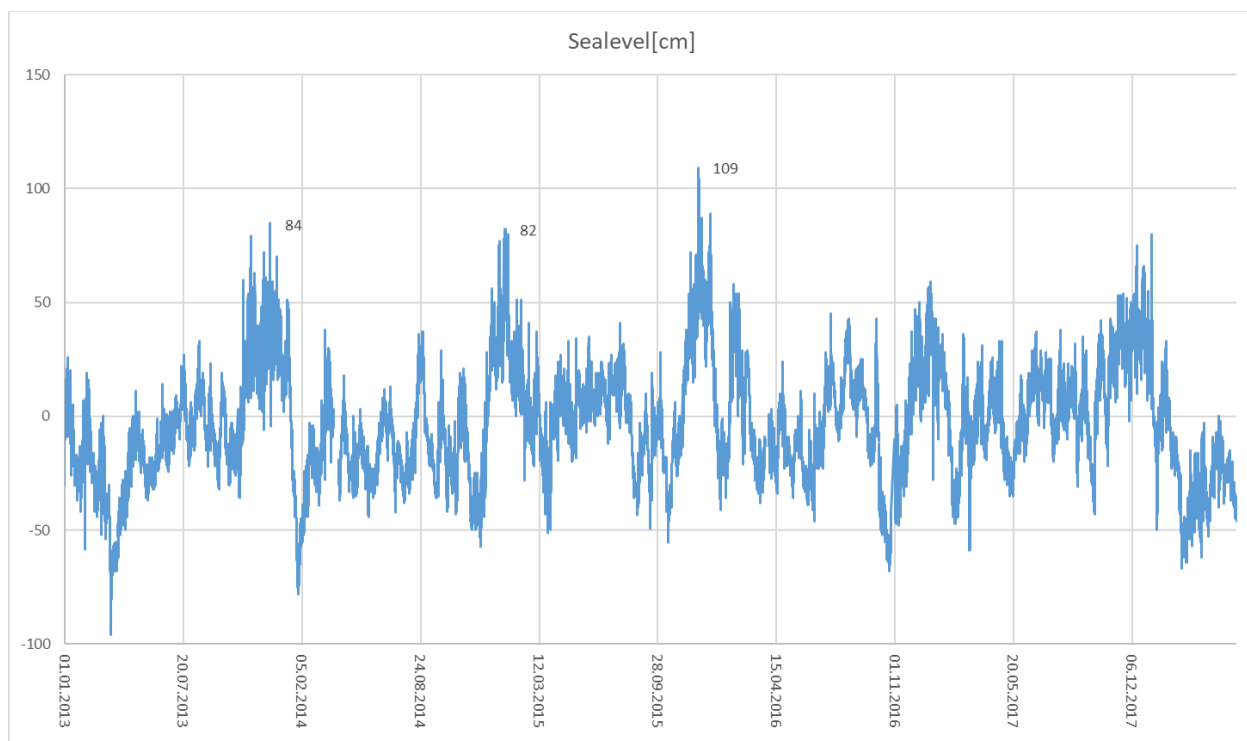
Tabel 4. Aasta maksimumid üle keskmise veetaseme (BK77)

	GEV				GB				WB			
		95% usaldusnivood				95% usaldusnivood				95% usaldusnivood		
Kordusintervall	veetase	alum.		ülem.	veetase	alum.		ülem.	veetase	alum.		ülem.
[aasta]	[m]	[m]		[m]	[m]	[m]		[m]		[m]		[m]
1000	1.17	1.00	...	1.37	1.15	1.02	...	1.29	1.22	1.14	...	1.32
500	1.16	0.99	...	1.36	1.13	1.01	...	1.27	1.20	1.11	...	1.29
200	1.13	0.97	...	1.33	1.10	0.99	...	1.23	1.15	1.07	...	1.24
100	1.11	0.95	...	1.30	1.08	0.97	...	1.20	1.12	1.04	...	1.20
90	1.11	0.95	...	1.29	1.07	0.96	...	1.20	1.11	1.03	...	1.20
80	1.10	0.94	...	1.29	1.07	0.96	...	1.19	1.11	1.03	...	1.19
70	1.10	0.94	...	1.28	1.06	0.96	...	1.18	1.10	1.02	...	1.18
60	1.09	0.93	...	1.27	1.06	0.95	...	1.18	1.09	1.01	...	1.17
50	1.08	0.93	...	1.26	1.05	0.95	...	1.17	1.08	1.00	...	1.16
40	1.07	0.92	...	1.25	1.04	0.94	...	1.15	1.06	0.99	...	1.15
30	1.06	0.91	...	1.23	1.03	0.93	...	1.14	1.05	0.97	...	1.13
20	1.03	0.89	...	1.19	1.00	0.91	...	1.11	1.02	0.95	...	1.09
10	0.97	0.84	...	1.12	0.96	0.87	...	1.05	0.96	0.89	...	1.03

Kokkuvõtteks, näitab käesolevas töös kirjeldatud statistiline analüüs, et 95%-lise tõenäosusega ei ületa Tareste lahe maksimaalne veetase 1.37, 1.30, 1.26 ja 1.12 meetrit vastavalt 1000, 100, 50 ja 10 aastaste kordusintervallidega (Tabel 4). Ajaloolistel põhjustel on kõrgused esitatud kõrgussüsteemis BK77.

3. Uuringute ülevaade Tallinna lahe veetasemete tõenäosusstsenaariumite hinnangu uuendamiseks

Tallinna lahe Kakumäe, Kopli ja Paljassaare linnaosade merepiirkondade veetasemete tõenäosusstsenaariumid on varasemalt hinnatud Lagemaa et al. (2013) poolt. Statistilise hindamise tulemusel leiti, et 95%-lise tõenäosusega ei ületa maksimaalne meretase Tallinna linna Haabersti ja Põhja-Tallinna linnaosades 138 cm 10 aasta jooksul, 175 cm 50 aasta jooksul, 190 cm 100 aasta jooksul ning 241 cm 1000 aasta jooksul (kõrgussüsteem BK77) (Lagemaa et al., 2013). Töö kokkuvõttes on viidatud vajadusele hinnangut uuendada regulaarselt 6 aastase perioodiga või kohe kui on tekkinud hinnangut oluliselt mõjutavad uut informatsiooni (nt ajalooliselt maksimaalse lähedase meretaseme esinemine, lainetuse mõjude täpsem teaduslik uuring, oluliselt parenenud arvutusmodel, jms). Käesoleva peatüki eesmärk on analüüsida kas sellist uut informatsiooni on tänaseks tekkinud või mitte.



Joonis 9. Mõõdetud meretase Tallinnas alates 2013 aastast.

Joonisel 9 on toodud mõõdetud meretase Tallinnas peale eelmise hinnangu avaldamist. Ajavahemik on eriline rekordiliselt madala veetaseme tõttu (19.03.2013 registreeriti kõigi aegade madalaim veetase Tallinna sadamas) kuid kõrgete veetasemete poolest perioodis midagi väga olulist pole toimunud. Üle 80 cm on veetase tõusnud kolmel korral nendest ühel ulatus see 109 cm-ni 2015 aasta viimase kuu alguses. Täna kehtiva tõenäosusstsenaariumi kohaselt (Lagemaa et al., 2013 Joonis 10d) on 110 cm veetaseme esinemine viie aastase perioodi jooksul tavapärane. Ca 80 cm veetasemete esinemissageduseks on

stsenaariumi kohaselt ca 1.5 aastat, mis on enam-vähem sellise sagedusega ka esinenud (pigem harvemini). Kokkuvõtvalt on meretase viimastel aastatel silma paistnud pigem ekstreemselt madalate väärtustega kui kõrgetega. Seega veetaseme erakordsete sündmuste esinemise tõttu kehtiv tõenäosusstsenaarium uuendamist otseselt ei vaja.

Lagemaa et al. (2013) töös on märgitud, et Lainetusest põhjustatud veetaseme tõus tekib rannaala murdumistsoonis ei saa teoreetiliselt olla kajastatud sadama piirkonnas teostatud mõõtmistes, mistõttu ei sisaldu seda ka käesoleva tööga leitud maksimaalsete veetasemete hinnangus. Soomere et al. (2013b) hinnangul võib veetase lainetuse tõttu tõusta Kakumäe lahes 68 cm ja Kopli lahes 38 cm. Kuid nagu varasemalt arutletud ei ole teada kas maksimaalne lainetusest tingitud veetaseme tõus saab langeda kokku ekstreemselt kõrge meretasemega. Soomere et al. (2013) tulemused viitavad pigem sellele, et need kaks ekstreemumit samaaegselt ei esine, mistõttu nende otsene liitmine ei ole põhjendatud. Pigem mõjutab lainetuse ekstreemväärtuse esinemine keskpäraselt kõrgete veetasemete esinemissagedust.

Hilisemad uuringud on näidanud, et ohtlikult kõrged veetasemed ei esine praktiliselt kunagi samaaegselt ohtlikult kõrge lainetusega (Pindsoo & Soomere, 2015). Selle töö käigus on uuritud just lainetusest põhjustatud veetaseme tõusu ekstreemse avamere veetaseme korral. Tulemused viitavad, et Tiskre piirkonnas (Kakumäe laht) on lainetusest tingitud veetaseme tõus ca 0.5 m. Kopli lahe kohta konkreetset väärtust ei ole avaldatud kuid selle maksimaalne võimalik väärtus (38 cm) on madalam. Seega tuginedes Pindsoo & Soomere (2015) analüüsile on võib tekkida soov hetkel kehtivat veetasemete tõenäosusstsenaariumit Kakumäe lahe osas ühtlaselt suurendada 0.5 m võrra. Siiski, eelnimetatud uuringutes on vaadeldud lainetust ja vee tsirkulatsiooni kui kahte sõltumatut protsessi jättes välja lainetuse ja hüdrodünaamika interaktsioonid, nt Stokesi triivi. Reaalsuses see nii ei ole ning seetõttu ei saa pidada korrektseks tõenäosusstsenaariumitele sellise konstandi liitmist.

Tallinna piirkonnas ei ole lainetusest põhjustatud veetõusu olemasolevate mõõtmisandmetele tuginedes võimalik lihtsalt uurida. Siiski, Eestis on veetaseme mõõtmisi milles erinevad uuringud on leidnud lainetusest põhjustatud veetõusu komponendi. See komponenti on leitud kõige ilmekamalt Ristma veetaseme mõõtmistes (Eelsalu et al., 2013; Kikas et al., 2008). Eelsalu et al. (2014) hindab Ristna lainetusest põhjustatud veetaseme teoreetilist tõusu lausa 1 m suuruseks kuid Kikas et al. (2008) empiiriline hinnang 30-50 cm jääb veidi tagasihoidlikumaks. Igal juhul, on olemas mõõteandmed millega lainetuse veetaseme tõusu komponendi mudelit kalibreerida, mis annab lootust et tulevikus saab seda komponenti ka Tallinna piirkonna jaoks usaldusväärselt modelleerida.

Kokkuvõtvalt, kuigi vahepealsel perioodil on toimunud oluline areng lainetusest tingitud meretaseme tõusu hindamisel Eesti rannikumeres (Soomere et al., 2013) ja rakendatud meetodikaid meretaseme hindamiseks, kus on summeritud tsirkulatsiooni mudelist saadud veetase ja lainetuse mudeli laine parameetritest arvutatud veetase (Pindsoo and Soomere, 2015), pole need tulemused otseselt rakendatavad selleks, et saada integreeritult lainetusest ja tsirkulatsioonist põhjustatud ekstreemsete veetasemete statistiliselt põhjendatud hinnanguid.

Viimastel aastatel on tehtud samme töötamaks välja uusi meetodeid ekstreemsete veetasemete statistiliseks kirjeldamiseks. Probleem seisneb selles, et ükski teadaolev jaotus ei suuda kirjeldada kõiki Eestis mõõdetud veetasemeid. Eelsalu et al. (2014) pakkusid välja ansambelmeetodi, mis lähendab erinevaid andmeid (mudelid ja vaatlused) erinevate jaotusega (Gumbel, Weibull, GEV) ja

töötuskombinatsioonidega (kalendriaasta maksimumid, tormise perioodi maksimumid, jms). Lõpptulemus saadakse kõikide andmete, jaotuste ja töötuste kombinatsioonide (ansambli) kaalutud keskmisena. Siiski, nagu kõikide ansambelprognosidega, seisneb meetodi keerukus selles, et tuleb leida ansambli liikmete kaalud mis ei pruugi olla triviaalne ülesanne ning vajab täiendavat uurimist.

Klassikalistele jaotustele mitte alluvate tormide mõistatuse lahendamiseks on Soomere et al. (2018) hiljuti uurinud erinevate ekstreemväärtuste jaotusparameetrite muutlikkust Eesti rannajoonel kuid täielikult lahendamata jääb see ülesanne ka seekord. Ühe võimaliku lahendusena pakutakse veelkord välja ansambelmeetodit. Töös jõutakse järelduseni, et Tallinna piirkonna jaoks töötab Gumbeli jaotus suhteliselt hästi kuigi GEV kujuparameetri suured väärtused viitavad keerukamate protsesside olemasolule selles piirkonnas. Gumbeli jaotust on ka kasutatud Lagemaa et al. (2013) töös esitatud veetasemete tõenäosusstsenaariumite määramisel.

Kokkuvõtteks, on perioodil 2013 - 2018 aastatel veetasemete ekstreemväärtuste hindamise temaatikat suhteliselt intensiivselt uuritud. Progress on olnud märkimisväärne nii meetodikate kui lainetuse komponendi hindamise vallas. Kuid tulemused ei ole veel otseselt rakendatavad varem leitud veetasemete tõenäosusstsenaariumite (Lagemaa et al., 2013) oluliseks täpsustamiseks. Seega tuleb jääda varem esitatud tulemuste juurde: 95%-lise tõenäosusega ei ületa maksimaalne meretase Tallinna linna Haabersti ja Põhja-Tallinna linnaosades 138 cm 10 aasta jooksul, 175 cm 50 aasta jooksul, 190 cm 100 aasta jooksul ning 241 cm 1000 aasta jooksul (Lagemaa et al., 2013). Vastavad kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis on 1.62 m, 1.99 m, 2.14 m ja 2.65 m.

4. Kokkuvõte

Töös on leitud Hiiumaa kirderanniku (Tareste laht) maksimaalse veetaseme kordusintervallid. Selleks on kasutatud pikaajalise mudelisimulatsiooni veetasemeid Kärkla jaoks. Pikematele kordusintervallidele vastavaid veetasemeid on modelleeritud kasutades kolme erinevat tõenäosus jaotust - üldist ekstreemum väärtuse (GEV), Gumbeli (GB) ja Weibulli (WB) jaotust. Suurimad tormise perioodi maksimumid saadakse kasutades GEV jaotust. GEV jaotusel, võrreldes teistega jaotustega, on ka tunduvalt suurem usaldusnivoode ulatus, mistõttu saadakse ka kõige kõrgem veetaseme hinnang GEV jaotusest.

Analüüsi tulemused näitavad, et 95% tõenäosusega ei ületa Tareste lahe maksimaalne veetase 1000, 100, 50 ja 10 aastaste kordusintervallidega vastavalt 1.37, 1.30, 1.26 ja 1.12 meetrit BK77 kõrgussüsteemis ning vastavalt 1.62, 1.55, 1.51 ja 1.37 meetrit EH2000 kõrgussüsteemis. Antud töö tulemustes pole arvesse võetud kliimamuutustest tingitud veetasemete muutusi uurimispiirkondades.

Aastatel 2013 - 2018 on Tallinnas registreeritud kolmel korral meretase üle 80 cm sisaldades ühte 109 cm-ni ulatuvat meretaset. See on väga heas kooskõlas Lagemaa et al. (2013) varasemalt hinnatud meretasemete tõenäosusstsenaariumitega, mistõttu sama metoodikat kasutades uus arvutus olemasolevast oluliselt erinevat tulemust ei annaks.

Viimase viie aasta teadusarengute ülevaade näitab, et veetasemete ekstreemväärtuste hindamise temaatikat on suhteliselt intensiivselt uuritud. Progress on olnud märkimisväärne nii metoodikate kui lainetuse komponendi hindamise vallas. Kuid tulemused ei ole veel otseselt rakendatavad varem leitud veetasemete tõenäosusstsenaariumite (Lagemaa et al., 2013) oluliseks täpsustamiseks, mistõttu tuleb jääda varem esitatud tulemuste juurde: 95%-lise tõenäosusega ei ületa maksimaalne meretase Tallinna linna Haabersti ja Põhja-Tallinna linnaosades 138 cm 10 aasta jooksul, 175 cm 50 aasta jooksul, 190 cm 100 aasta jooksul ning 241 cm 1000 aasta jooksul. Ajaloolistel põhjustel on need numbrid esitatud BK77 kõrgussüsteemis. Vastavad kõrgused EH2000 kõrgussüsteemis on 1.62 m, 1.99 m, 2.14 m ja 2.65 m.

5. Viited

- Burchard, Hans, and Karsten Bolding. 2002. "Getm – a General Estuarine Transport Model. Scientific Documentation." Technical Report EUR 20253 En.
- Castellarin, A.; Kohnova, S.; Gaal, L.; Fleig, A.; Salinas, J.L.; Toumazis, A.; Kjeldsen, T.R.; Macdonald, N.. 2012 Review of applied-statistical methods for flood-frequency analysis in Europe. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 122pp. (ESSEM COST Action ES0901)
- Donnelly, Chantal, Jafet C.M. Andersson, and Berit Arheimer. 2015. "Using Flow Signatures and Catchment Similarities to Evaluate the E-HYPE Multi-Basin Model across Europe." Hydrological Sciences Journal 61 (2). Taylor & Francis: 255–73. doi:10.1080/02626667.2015.1027710.
- Eelsalu, M., Soomere, T., Pindsoo, K., Lagemaa, P., 2014. Ensemble approach for projections of return periods of extreme water levels in Estonian waters. Continent. Shelf Res. 91, 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.09.012>.
- FloodFreq, 2013. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment. Centre for Ecology & Hydrology on behalf of COST.
- Gumbel, E.J. 1954. Statistical theory of extreme values and some practical applications. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards. Applied Mathematics Series, 33.
- Hosking, J.R.M. ja Wallis, J.R. 1997. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. Cambridge (UK). Cambridge University Press.
- Keskkonnaministeerium. 2011a. Üleujutusohuga seotud riskide esialgse hinnangu aruanne. <http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1180240/%DCleujutusohuga+seotud+riskide+aruanne.pdf> (22.08.2013)
- Keskkonnaministeerium. 2011b. Üleujutusohuga seotud riskide esialgne hinnang. <http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1180733/%DCleujutusohuga+seotud+riskide+esialgne+hinnang.pdf> (22.08.2013)
- Kikas, T., Kull, A., Suursaar, Ü. 2008. Läänemere Läänesaarte alamvesikonna piiresse jääva ranna ajuveela piiride täpsustamine ja erinevate veeseisude kaartide ning meetmeprogrammi koostamine.
- Lagemaa, P., Raudsepp, U., Kõuts, T., Allik, A., Elken, J. 2013. Tallinna Linna Haabersti, Põhja-Tallinna ja Kakumäe Linnaosade Meretasemete Stsenaariumite Modelleerimine (Modelling of Water Level Scenarios for City of Tallinn). Research Report. Marine Systems Institute at Tallinn University of Technology, Tallinn, pp. 29.
- Luhamaa, Andres, Kaarel Kimmel, Aarne Männik, and Rein Rõõm. 2011. "High Resolution Re-Analysis for the Baltic Sea Region during 1965-2005 Period." Climate Dynamics 36 (3): 727–38. doi:10.1007/s00382-010-0842-y.
- Maljutenko, Ilja, and Urmas Raudsepp. 2014. "Validation of GETM Model Simulated Long-Term Salinity Fields in the Pathway of Saltwater Transport in Response to the Major Baltic Inflows in the Baltic

- Sea.” In 2014 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC), edited by Jerry Carroll, 23–31. Tallinn: IEEE/OES. doi:10.1109/BALTIC.2014.6887830.
- Pindsoo, K., Soomere, T., 2015. Contribution of wave set-up into the total water level in the Tallinn area. Proc. Estonian Acad. Sci. 64 (3S), 338–348. <https://doi.org/10.3176/proc.2015.3S.03>.
- Soomere, Tarmo, Maris Eelsalu, and Katri Pindsoo. 2018. “Variations in Parameters of Extreme Value Distributions of Water Level along the Eastern Baltic Sea Coast.” Estuarine, Coastal and Shelf Science 215 (July). Elsevier: 59–68. doi:10.1016/j.ecss.2018.10.010.
- Šraj, Mojca, Alberto Viglione, Juraj Parajka, and Günter Blöschl. 2016. “The Influence of Non-Stationarity in Extreme Hydrological Events on Flood Frequency Estimation.” Journal of Hydrology and Hydromechanics 64 (4): 426–37. doi:10.1515/johh-2016-0032.
- Willems, P., Guillou, A., Beirlant, J. 2007. Bias correction in hydrologic GPD based extreme value analysis by means of a slowly varying function. Journal of Hydrology, 338, 221–236.