



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2014:6

PITKÄN AIKAVÄLIN TULVARISKIT
JA ALIMMAT SUOSITELTAVAT
RAKENTAMISKORKEUDET
SUOMEN RANNIKOLLA

KIMMO KAHMA
HILKKA PELLIKKA
KATRI LEINONEN
ULPU LEIJALA
MILLA JOHANSSON

RAPORTTEJA

RAPPORTER

REPORTS

No 2014:6

**Pitkän aikavälin tulvariskit ja alimmat
suositeltavat rakentamiskorkeudet
Suomen rannikolla**

Kimmo Kahma

Hilkka Pellikka

Katri Leinonen

Ulpu Leijala

Milla Johansson

Ilmatieteen laitos

Meteorologiska Institutet

Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2014

ISBN 978-951-697-833-1 (nid.)

ISBN 978-951-697-834-8 (pdf)

ISSN 0782-6079

Unigrafia

Helsinki 2014



Julkaisija	Ilmatieteen laitos PL 503 (Erik Palménin aukio 1) 00101 Helsinki	Pvm Kesäkuu 2014
Tekijä(t)	Kimmo Kahma, Hilikka Pellikka, Katri Leinonen, Ulpu Leijala, Milla Johansson	Projektin nimi Meriveden noususkenaariot
Nimeke	Pitkän aikavälin tulvariskit ja alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet Suomen rannikolla	
Tiivistelmä	<p>Tässä raportissa määritetään harvoin odotettavissa olevien meritulvien korkeudet ja niiden pohjalta annetaan uudet suositukset alimmista rakentamiskorkeuksista Suomen rannikolla. Päivitetyissä suosituksissa on otettu huomioon uusin tieto valtamerten pinnannoususta ja sen alueellisesta vaikutuksesta Itämeren vedenkorkeuteen, maankohoamisesta, tuuliolosuhteiden muutoksista sekä vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihteluista.</p> <p>Alimpien suositeltavien rakentamiskorkeuksien lähtökohtana on merivedenkorkeus, joka nykytiedon valossa saavutetaan korkeintaan kerran uusien rakennusten käyttöiän aikana (noin 200 vuotta). Valtamerten pinnannousun ennusteissa on kuitenkin suuria epävarmuuksia, eikä vuotta 2100 pitemmälle ulottuvia, kaikki tekijät huomioon ottavia ennusteita ole toistaiseksi mahdollista tehdä. Sen vuoksi suositusten perustaksi on otettu vedenkorkeus, joka saavutetaan vuonna 2100 ylittymistäajuudella 1/250 tapausta vuodessa.</p> <p>Uudet suositukset alimmista rakentamiskorkeuksista ovat pääosin samalla tasolla maanpinnan suhteen kuin aikaisemmat, vuonna 1998 annetut suositukset. Sekaannusten välttämiseksi aikaisemmat suositukset on pidetty mahdollisuuksien mukaan ennallaan. Uusien suositusten lukuarvot ovat kuitenkin aikaisempia suosituksia korkeammat, koska ne on annettu N2000-korkeusjärjestelmässä, jonka nollapiste on maan suhteen matalammalla kuin aiemmin käytetyn N60-järjestelmän nollapiste. Uusissa suosituksissa ei ole mukana aaltoiluvaraa, joka on aina määritettävä tapauskohtaisesti.</p>	
Julkaisijayksikkö Merentutkimus (MER)		
Luokitus (UDK) 551.461, 551.466, 551.468	Asiasanat tulvariskit, meritulvat, alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet, Itämeri, merenpinnan nousu	
ISSN ja avainnimeke 0782-6079 Raportteja – Rapporter – Reports		
ISBN ISBN 978-951-697-833-1 (nid.) ISBN 978-951-697-834-8 (pdf)	Kieli suomi	Sivumäärä 48



Utgivare	Meteorologiska institutet PB 503 (Erik Palméns plats 1) 00101 Helsinki	Datum	Juni 2014
Auktor(er)	Kimmo Kahma, Hilikka Pellikka, Katri Leinonen Ulpu Leijala, Milla Johansson	Projektets namn	Scenarier för havsvattenstånd
Titel			
Långtids översvämningsrisker och lägsta rekommenderade byggnadshöjder vid finska kusten			
Sammandrag			
<p>I denna rapport ges rekommendationer för de lägsta byggnadshöjderna vid finska kusten, vilka har bestämts på basen av höjden för sällsynta översvämningar. I de uppdaterade rekommendationerna beaktas den senaste informationen om höjningen av vattennivån i världshaven samt dess regionala följder. Även landhöjningen, förändringar i vindklimatet och korttidsväxlingar i vattenståndet tas i beaktande.</p> <p>De lägsta rekommenderade byggnadshöjderna grundar sig på det havsvattenstånd som enligt nuvarande kunskap uppnås högst en gång under livstiden på nya byggnader (ca 200 år). På grund av de stora osäkerheterna associerade med förutspåendet av vattennivån av världshaven, är det för tillfället inte möjligt att göra prognoser som omfattar alla faktorer till längre än år 2100. Av denna orsak grundar sig rekommendationerna på det vattenstånd som uppnås år 2100 med en överskridningsfrekvens på en gång per 250 år.</p> <p>De nya rekommendationerna för de lägsta byggnadshöjderna är i stort sätt på samma nivå i förhållandet till jordens yta som de tidigare rekommendationerna, vilka gavs 1998. För klarhetens skull har de föregående rekommendationerna lämnats oförändrade då det varit möjligt. De numeriska värdena för de nya rekommendationerna är ändå större, eftersom de är givna i höjdsystemet N2000, vars nollpunkt är lägre i förhållandet till jordytan än det tidigare använda höjdsystemet N60. De nya rekommendationerna beaktar inte vågornas kontribution, som alltid måste bestämmas från fall till fall.</p>			
Publikationsenhet Havsforskning (MER)			
Klassificering (UDK) 551.461, 551.466, 551.468		Nyckelord översvämningsrisker, havsöversvämningar, lägsta rekommenderade byggnadshöjder, Östersjön, havsnivåhöjning	
ISSN och serietitel 0782-6079 Rapportteja – Rapporter – Reports			
ISBN ISBN 978-951-697-833-1 (häft.) ISBN 978-951-697-834-8 (pdf)	Språk finska	Sidantal 48	



Published by	Finnish Meteorological Institute P.O. Box 503 (Erik Palménin aukio 1), FIN-00101 Helsinki, Finland	Date	June 2014
Author(s)	Kimmo Kahma, Hilikka Pellikka, Katri Leinonen, Ulpu Leijala, Milla Johansson	Name of project	Sea level scenarios
Title			
Long-term flooding risks and recommendations for minimum building elevations on the Finnish coast			

Abstract

In this report, we present estimates for rarely occurring flood heights and give new recommendations for minimum building elevations on the Finnish coast. The updated recommendations take into account the latest knowledge of the global sea level rise and its local impact on the sea level in the Baltic Sea. The postglacial land uplift, changes in wind conditions, and short-term variations in the sea level are also included in the estimates.

The new minimum recommended building elevations are based on the sea level that will be exceeded at most once during the lifetime of new buildings (ca. 200 years). However, there are large uncertainties in the global sea level rise scenarios, and at the moment it is not possible to make sufficiently reliable scenarios extending beyond the year 2100. For this reason, the recommendations are based on the sea level in 2100 with an exceedance frequency of one event per 250 years.

The new recommendations are mainly at the same level relative to the Earth's surface as the previous recommendations given in 1998. Whenever possible, the previous recommendations have been kept unchanged to avoid confusion. However, the numerical values of the recommendations have increased compared to those from 1998, because the new recommendations are given in the N2000 height system, in which the zero level is lower than the zero of the N60 height system used previously.

Unlike the previous recommendations, the updated recommendations do not include the additional height needed to compensate for wave action. This must be determined separately for each location.

Publishing unit		
Marine Research (MER)		
Classification (UDC)	Keywords	
551.461, 551.466, 551.468	flooding risks, sea floods, minimum recommended building elevations, Baltic Sea, sea level rise	
ISSN and series title		
0782-6079 Raportteja – Rapporteri – Reports		
ISBN	Language	Pages
ISBN 978-951-697-833-1 (paperback)	Finnish	48
ISBN 978-951-697-834-8 (pdf)		

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Merivedenkorkeuden korkeusjärjestelmät	8
3	Lyhytaikaiset vedenkorkeusvaihtelut	9
4	Maankohoaminen	12
5	Valtamerten pinnannousu	13
6	Itämeren pinnankorkeuden keskimääräinen muutos	16
7	Yhteisvaikutus	18
8	Aallokko	21
9	Alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet	25
	Kirjallisuusluettelo	28
	Liite 1. Vedenkorkeuden kuukausimaksimien ylittymistäajuusjakaumat	30
	Liite 2. Ylittymistodennäköisyydestä ja toistumisajasta	37
	Liite 3. Yhdistetyt vedenkorkeusjakaumat vuosille 2050 ja 2100	41
	Liite 4. Mareografien sijainnit	48

1 Johdanto

Tässä Ilmatieteen laitoksen raportissa päivitetään vuonna 1998 tehty selvitys alimmista suositeltavista rakennuskorkeuksista Pohjanlahden, Saaristomeren ja Suomenlahden rannikoilla (Kahma ym. 1998). Valtamerten pinnannoususta ja vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihteluista on saatu viime selvityksen jälkeen runsaasti uutta tietoa, joten selvityksen päivitystarve on ilmeinen.

Meren rannikolla tulvavaara poikkeaa monin tavoin sisävesistä. Toisin kuin sisävesillä, Itämeren rannalla rakennusten tulvariskiinkin vaikuttavat sekä sääilmiöistä riippuvat lyhytaikaiset vedenkorkeusvaihtelut että vuosikymmenien ja vuosisatojen kuluessa tapahtuvat muutokset: maankohoaminen, valtamerten pinnannousun vaikutus Itämereen sekä Itämeren vesimäärän pitkäaikaiset muutokset. Rakennusten käyttöiän aikana pitkäaikaiset muutokset ovat merkittäviä.

Selvityksessä lasketaan pitkäaikaisten vedenkorkeusmuutosten ja lyhytaikaisten vaihteluiden yhteisvaikutus. Kutakin tekijää tarkastellaan ensin erikseen. Lyhytaikaisten, korkeintaan joitakin kuukausia kestävien vedenkorkeusvaihteluiden jakauma määritetään mareografeilla eli vedenkorkeuden mittausasemilla tehdyistä vedenkorkeushavainnoista niin sanotun teoreettisen keskiveden suhteen (luku 3). Tällöin maankohoamisen ja valtamerten pinnankorkeuden muutoksen vaikutus ei ole mukana jakaumissa. Nämä jakaumat vastaavat sisävesissä havaittuja vedenkorkeuden vaihteluja.

Pitkäaikaisissa muutoksissa tarkastellaan kahta ajankohtaa, vuosia 2050 ja 2100. Aikaisemmassa selvityksessä (Kahma ym. 1998) tarkastelu ulottui vuoteen 2200 saakka, mutta uudemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että merenpinnan nousun ennustaminen niin kauas tulevaisuuteen on hyvin epävarmaa. Tämä johtuu ennen kaikkea mannerjäätiköiden käyttäytymisen epävarmuudesta, joka on myös vuoteen 2100 saakka ulottuvien ennusteiden suurin epävarmuustekijä. Viime vuosina mannerjäätiköillä tehtyjen tarkempien havaintojen myötä on selvinnyt, että mannerjäätiköiden liikkeeseen vaikuttaa monta sellaista tekijää, joita ei vielä riittävän hyvin ymmärretä (luku 5).

Kun yhdistetään vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihteluiden jakaumat ja keskivedenkorkeuden jakaumat, saadaan laskettua vuosille 2050 ja 2100 tiettyjä ylittymistäajuuksia vastaavat vedenkorkeudet N2000-korkeusjärjestelmässä (luku 7). Laskelmat on tehty kaikille Suomen mareografeille, joita on 13 paikkakunnalla Suomen rannikolla. Tuloksia voidaan kuitenkin soveltaa koko rannikolle, kun paikan etäisyys lähimpiin mareografeihin tunnetaan. Lisäksi laskelmat on interpoloitu tulvariskialueille. Tulvariskialueiden laskelmat ovat saatavilla karttamuodossa Suomen ympäristökeskuksen tulvakarttapalvelusta (<http://tulvakartat.ymparisto.fi>).

Yhteiskuntasuunnittelun tarve ulottuu pidemmälle tulevaisuuteen kuin vuoteen 2100, mutta vuoden 2100 yli ulottuvat meriveden noususkenaariot ovat hyvin epävarmoja. Tämän takia rakentamiskorkeussuositusten perustaksi on otettu vedenkorkeus, jonka ylittymistäajuus vuonna 2100 on 1/250 tapausta vuodessa (luku 9). Näitä suosituksia noudatettaessa lähi-vuosina rakennettavien tavanomaisten rakennusten tulvaturvallisuus on asiantuntija-arvion perusteella riittävällä tasolla ainakin ensi vuosisadan puoleenväliin saakka. Koska vedenkorkeuden käyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä saadaan jatkuvasti uutta tutkimustietoa, on suosituksia syytä päivittää ajoittain ja käyttää tulevissa rakentamistarpeissa ajantasaista tietoa.

2 Merivedenkorkeuden korkeusjärjestelmät

Korkeusjärjestelmät kertovat kohteen korkeuden kullekin korkeusjärjestelmälle määritellystä nollatasosta katsoen. Korkeusjärjestelmiä on uusittava ajoittain, koska jääkauden jälkeinen maannousu muuttaa Suomessa maanpinnan korkeutta ja korkeussuhteita.

Suomessa on tällä hetkellä käytössä neljä valtakunnallista geodeettista korkeusjärjestelmää. Näistä vanhimpien (NN, N43 ja N60) nollataso on sidottu Helsingin keskivedenpintaan. NN-järjestelmän nollakohtaksi otettiin 1900-luvun alussa Helsingin Katajanokan laiturissa sijainneen vedenkorkeusasteikon nollakohta. N60-järjestelmän nollataso on lähellä keskivedenpintaa Helsingissä vuonna 1960. Neljäs, vuonna 2007 julkaistu valtakunnallinen korkeusjärjestelmä N2000 sidottiin yhteiseen eurooppalaiseen korkeusjärjestelmään. Tämän korkeusjärjestelmän nollataso on Amsterdamin nollataso, NAP (*Normaal Amsterdamse Peil*).

Meriveden korkeutta mitataan kunkin mareografin oman referenssitason suhteen, joka on geodeettisten korkeusjärjestelmien suhteen kiinteä laskennallinen korkeustaso noin kaksi metriä vuoden 1921 keskiveden alapuolella. Mareografin mahdollinen liikkuminen referenssitasonsa suhteen selvitetään vuosittaisilla vaaituksilla läheiseen kiintopisteeseen. Vaaituksella mitataan näiden pisteiden välistä korkeuseroa. Kolmen vuoden välein mareografin ja sen kiintopisteen vakaus varmistetaan vaaitsemalla ne toisiinsa paikallisiin kalliokiintopisteisiin. Kiintopisteiden korkeudet on puolestaan sidottu geodeettisiin korkeusjärjestelmiin.

Suomessa meriveden keskimääräinen korkeus on maankohoamisen vuoksi laskenut geodeettisten korkeusjärjestelmien suhteen. Sen vuoksi on otettu käyttöön ns. teoreettinen keskivesi, käytännön tarpeita varten tehty ennuste vedenkorkeuden pitkäaikaisesta odotusarvosta. Teoreettista keskivettä arvioitaessa otetaan huomioon maan kohoaminen, valtameren pinnan nousu sekä pitkäaikaiset muutokset Itämeren vesimäärässä. Näiden tekijöiden takia teoreettinen keskivesi ei ole vakio kuten edellä mainitut geodeettiset korkeusjärjestelmät, vaan muuttuu vuosittain. Ilmatieteen laitos vahvistaa teoreettisen keskiveden korkeuden vuosittain.

Perinteisesti teoreettinen keskivesi on määritelty lineaarisesti useampia vuosia peräkkäin, eikä menneiden vuosien ennusteita teoreettiselle keskivedelle jälkikäteen muuteta. Mahdollisia virheitä korjataan tulevien vuosien ennusteissa kääntämällä harkitusti lineaarisen arvion kulmakerrointa oikeansuuntaiseksi.

Tutkimuskäyttöön ei riitä lineaarisen arvion antama tarkkuus. Tämän takia tutkimustyötä varten on otettu käyttöön ns. tarkennettu teoreettinen keskivesi, joka on 15 vuoden liukuva keskiarvo keskivedenkorkeutta muuttavien tekijöiden yhteisvaikutuksesta. On huomioitava, että tarkennetun teoreettisen keskiveden arvio vastaa aina senhetkistä parasta tietoa, jolloin se voi muuttua myös takautuvasti tutkimuksen kehittyessä. Tarkennetun teoreettisen keskiveden avulla voidaan vertailla vedenkorkeuden lyhytaikaista vaihtelua eri vuosina, tosin monissa tilanteissa myös teoreettisen keskiveden tarkkuus riittää lyhytaikaisvertailuiden tekemiseen.

3 Lyhytaikaiset vedenkorkeusvaihtelut

Itämeren rannikolla vedenkorkeuden nopeat muutokset aiheutuvat ennen kaikkea kovista tuulista ja ilmanpaine-eroista sekä Itämeren vedenpinnan edestakaisesta ominaisheilahtelusta, seichestä. Vuoroveden vaikutus Itämerellä on pieni verrattuna tuulen ja ilmanpaineen aiheuttamiin vaihteluihin. Viikkojen ja kuukausien mittaisia vaihteluita aiheuttaa se, että Itämeri on vain kapeiden ja matalien Tanskan salmien kautta yhteydessä Pohjanmereen. Sopivan suuntaiset tuulet salmien alueella voivat pitää Itämeren pintaa useita viikkoja valtameren pintaa korkeammalla.

Vedenkorkeushavaintoja on tehty Suomen rannikolla jo pitkään. Pisimpään mittauksia on tehty Hangossa, jossa vedenkorkeusasteikolta luettuja havaintoja on 1850-luvulta alkaen ja jossa vuonna 1887 aloitti toimintansa Suomen ensimmäinen mareografi. Laajempi mareografiverkosto Suomen rannikolle on perustettu pääasiassa 1920-luvulla.

Korkeimmat vedenkorkeudet ajoittuvat yleensä vuodenvaihteeseen, jolloin Itämeren kokonaisvesimäärä on usein korkealla ja kovia tuulia esiintyy. Korkeat vedenkorkeudet ovat kuitenkin mahdollisia kaikkina vuodenaikoina. Suurimmat vedenkorkeudet havaitaan Suomenlahden ja Perämeren pohjukoiissa. Vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihtelua keskivedenkorkeuden suhteen kuvaa taulukko 1, jossa on esitetty vedenkorkeusvaihtelun todennäköisyysjakaumat teoreettisen keskiveden suhteen kullakin mareografilla. Taulukko perustuu koko käytettävissä olevan vedenkorkeusaineiston tuntihavaintoihin.

Tietyn vedenkorkeustason ylittymisriskin kuvaamiseen käytetään seuraavia toisiinsa läheisesti liittyviä käsitteitä (liite 2):

- *Ylittymistodennäköisyys* on todennäköisyys sille, ylittyykö tietty vedenkorkeusarvo tarkasteltavalla aikavälillä vai ei, mutta ei ota kantaa ylittymisten lukumäärään.
- *Ylittymistaajuudella* tarkoitetaan sitä, kuinka usein tietty vedenkorkeusarvo keskimäärin ylitetään tarkasteltavalla aikavälillä. Ykkönen ja sitä suuremmat ylittymistaajuuden arvot kertovat siis ylittymistapahtumien keskimääräisen lukumäärän tarkasteltavalla aikavälillä.

Harvinaisissa tapauksissa ylittymistodennäköisyys yhtyy ylittymistaajuuteen – esimerkiksi ylittymistaajuus 1/250 (kerran 250 vuodessa) vastaa ylittymistodennäköisyyttä 0,4 %. Sen sijaan tapauksissa, joissa tarkasteltavalla aikavälillä on odotettavissa useita tietyn vedenkorkeustason ylittymisiä, ylittymistodennäköisyys lähestyy ykköstä. Tässä raportissa käytetään ylittymistaajuutta, koska se kertoo paitsi ylittymisen todennäköisyyden, myös sen kuinka usein ylittyminen keskimäärin tapahtuu silloin kun vedenkorkeusarvo saattaa ylittyä useita kertoja.

Vedenkorkeuden maksimi-arvot ovat kasvaneet 1900-luvun aikana merkittävästi Suomen rannikolla (Johansson ym. 2001, Johansson 2014). Kasvu on sitä suurempaa, mitä harvinaisemmista vedenkorkeuksista on kysymys. Tällöin korkeiden arvojen ylittymistaajuusjakauma levenee vuosikymmenten kuluessa. Keskipettä lähellä olevien vedenkorkeuksien jakaumassa ei ole havaittavissa merkittävää muutosta ajan suhteen.

Tässä työssä on käytetty harvinaisten arvojen jakaumia laskettaessa vain viimeisten 30 vuoden (1982–2011) kuukausimaksimeja, jolloin vuosikymmenten aikana tapahtunut maksimivedenkorkeuden kasvu voidaan jättää huomiotta. Maksimi-arvoista poistettiin maankohoamisen ja valtameren pinnannousun vaikutus laskemalla ne tarkennetun teoreettisen keskiveden suhteen. Näin voidaan tarkastella pelkästään lyhytaikaisten vedenkorkeusvaihteluiden aiheuttamien maksimien jakaumaa. Jakaumat on ekstrapoloitu havaittuja harvinaisempiin tapauksiin sovittamalla eksponentiaalinen jakauma mareografikohtaisesti suurimpiin havaintoihin.

Liitteessä 1 on esitetty vedenkorkeuden kuukausimaksimien ylittymistaajuusjakaumat korkeusjärjestelmässä N2000. Kun jakaumat esitetään N2000-järjestelmässä, ne muuttuvat vuosittain, koska teoreettisen keskiveden ja N2000-järjestelmän välinen korkeusero muuttuu. Liitteessä esitetyt ylittymistaajuusjakaumat edustavat vuotta 2011, jolloin niissä on huomioitu vuoden 2011 tarkennetun teoreettisen keskiveden taso, eli maankohoamisen ja valtameren pinnannousun senhetkinen tilanne. Taulukkoon 2 on kerätty ylittymistaajuusjakaumista vedenkorkeuden arvot vuodelle 2011 eräillä ylittymistaajuuksilla.

Taulukko 1: Vedenkorkeuden vuosittainen todennäköisyysjakauma. Havaintoasemat: 1 Kemi/Ajos, 2 Oulu, 3 Raahe, 4 Pietarsaari, 5 Vaasa, 6 Kaskinen, 7 Mäntyluoto, 8 Rauma, 9 Turku, 10 Föglö, 11 Hanko, 12 Helsinki, 13 Hamina. Taulukossa annettu vuosi on havaintotoiminnan alkamisvuosi ko. mareografiasemalla. MHW = vuosimaksimien keskiarvo, MLW = vuosiminimien keskiarvo. Taulukko perustuu vuosien 1887–2012 tuntihavaintoihin. Korkeusjärjestelmä on teoreettinen keskivesi ja yksikkö cm.

Asema	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Vuosi	1922	1922	1922	1922	1922	1926	1925	1933	1922	1923	1887	1904	1928
MAX	201	183	162	139	144	148	132	123	130	102	132	151	197
MHW	122	117	103	89	82	80	76	79	81	65	74	90	116
%													
0.1	117	112	104	93	85	83	79	80	80	72	78	89	111
0.2	106	102	97	86	79	77	74	74	74	67	72	81	100
0.3	100	96	91	82	75	73	70	71	70	64	69	77	93
0.4	95	92	87	79	73	70	68	69	68	62	66	74	89
0.5	92	88	84	76	70	68	65	67	66	60	64	72	85
1.0	81	77	74	67	63	61	58	59	58	54	57	63	75
2.0	69	66	64	58	55	53	50	52	51	47	50	55	64
3.0	62	59	57	52	49	48	45	47	46	43	45	49	57
4.0	56	54	53	48	45	44	42	43	42	39	42	45	52
5.0	52	50	49	45	42	41	39	40	39	37	39	42	49
10.0	38	36	36	34	32	31	30	29	30	30	28	32	36
15.0	30	28	29	27	26	25	23	24	24	23	24	25	29
20.0	23	22	23	22	21	20	19	20	19	18	19	20	23
25.0	18	17	18	17	17	16	15	16	15	15	15	16	18
30.0	13	13	14	14	13	13	12	12	12	12	12	13	14
40.0	6	6	7	7	7	7	6	7	6	6	6	6	7
50.0	-1	0	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
60.0	-7	-6	-5	-4	-4	-4	-5	-4	-4	-3	-4	-5	-5
70.0	-14	-13	-12	-10	-10	-10	-10	-9	-9	-9	-9	-10	-11
75.0	-18	-16	-15	-14	-13	-13	-13	-12	-12	-12	-12	-14	-14
80.0	-22	-20	-19	-18	-17	-16	-16	-15	-16	-15	-15	-17	-18
85.0	-27	-25	-24	-22	-21	-21	-21	-19	-20	-19	-19	-21	-23
90.0	-33	-31	-30	-28	-26	-26	-25	-24	-25	-23	-24	-26	-28
95.0	-42	-40	-39	-36	-34	-33	-32	-31	-32	-30	-31	-34	-37
96.0	-45	-43	-41	-38	-36	-35	-35	-33	-34	-32	-33	-36	-40
97.0	-49	-46	-44	-41	-39	-38	-37	-36	-37	-34	-36	-39	-43
98.0	-53	-51	-49	-45	-43	-41	-41	-40	-40	-38	-39	-44	-48
99.0	-61	-58	-56	-51	-49	-47	-47	-45	-47	-44	-45	-50	-55
99.5	-70	-65	-63	-57	-53	-52	-52	-50	-52	-49	-51	-56	-62
99.6	-73	-68	-65	-58	-54	-54	-53	-52	-53	-50	-52	-57	-64
99.7	-77	-71	-69	-61	-56	-55	-54	-53	-55	-52	-54	-59	-67
99.8	-82	-76	-73	-64	-59	-57	-56	-55	-57	-54	-56	-62	-71
99.9	-91	-85	-82	-70	-64	-61	-59	-58	-61	-57	-59	-66	-78
MLW	-80	-83	-80	-69	-63	-57	-53	-50	-49	-43	-49	-63	-78
MIN	-125	-131	-129	-113	-100	-91	-80	-77	-74	-71	-79	-93	-115

Taulukko 2: Vedenkorkeuden kuukausimaksimijakaumat eri mareografeilla N2000-järjestelmässä ylittymistäajuuksilla 1/5, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100, 1/250 ja 1/1000 tapausta/vuosi. Keskiveden muutoksen vuoksi näitä ylittymistäajuuksia vastaavat vedenkorkeudet N2000-järjestelmässä muuttuvat vuosittain; taulukon luvut koskevat vuotta 2011. Jakauma perustuu vuosien 1982–2011 kuukausittaisiin vedenkorkeuden maksimiarvoihin. MHW = vuosimaksimien keskiarvo.

Mareografi	Vedenkorkeus (cm) N2000-järjestelmässä							
	MHW	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100	1/250	1/1000
Kemi	146	165	184	202	227	246	271	308
Oulu	146	165	179	194	212	227	245	274
Raaha	126	142	154	165	179	190	205	228
Pietarsaari	111	130	140	151	164	174	188	208
Vaasa	101	124	137	151	168	181	199	225
Kaskinen	103	122	134	146	162	174	190	214
Mäntyluoto	99	117	128	139	154	165	180	202
Rauma	102	120	129	139	151	160	173	191
Turku	104	122	131	141	153	162	174	192
Föglö	84	103	110	116	124	131	139	152
Hanko	100	119	131	142	156	168	182	205
Helsinki	121	143	154	166	181	193	208	231
Hamina	148	173	189	205	227	243	264	296

4 Maankohoaminen

Suomessa maa kohoaa, koska maankuori palautuu edelleen viime jääkauden aikaisen mannerjäätikön puristuksesta. Jääkauden jälkeinen maankohoaminen on ollut pitkäaikaisten vedenkorkeusmuutosten tarkkuutta ajatellen hyvin tasaista ja sen voidaan olettaa jatkuvan samalla nopeudella tässä raportissa tarkastellulla aikavälillä. Valtamerten pinnannousu on sen sijaan kiihtynyt, ja vuoden 2000 jälkeen epälineaarisuus on maankohoamista laskettaessa otettava huomioon. Johansson ym. (2014) ovat tästä syystä rajanneet maankohoamisen määrittämisessä käytettävän vedenkorkeusaineiston vuoteen 2000.

Maankohoamisen nopeus eri mareografeilla on esitetty taulukossa 3. Mareografin referenssitason suhteen mitatuista vedenkorkeuksista on vähennetty valtamerten pinnannousun ja tuulisuuden vaikutuksesta tapahtuneet Itämeren pitkäaikaiset vedenkorkeusmuutokset (Johansson ym. 2014). Jäljelle jäävä trendi tulkitaan maankohoamiseksi.

Taulukon 3 virhearviot vastaavat kahta keskihajontaa, toisin sanoen ne ovat 95 %:n luottamusrajoja, joita tässä työssä käytetään myös valtamerten noususkenaarioiden luottamusrajoina.

Mareografi	mm/vuosi
Kemi	9,66 ± 0,75
Oulu	9,30 ± 0,74
Raahe	9,66 ± 0,73
Pietarsaari	9,74 ± 0,71
Vaasa	9,85 ± 0,69
Kaskinen	9,36 ± 0,71
Mäntyluoto	8,49 ± 0,70
Rauma	7,67 ± 0,71
Turku	6,33 ± 0,70
Föglö	6,48 ± 0,68
Hanko	5,00 ± 0,68
Helsinki	4,37 ± 0,69
Hamina	4,05 ± 0,75

Taulukko 3: Maankohoaminen eri mareografiasemilla (Johansson ym. 2014).

Maankohoamisluvut on esitetty kahdella desimaalilla, vaikka niiden voidaan virherajojen perusteella todeta olevan paljon epätarkempia. Tämä on tarpeen, koska maankohoamisesta edelleen laskettaessa virheiden kasautumisen vaikutuksesta syntyisi helposti liian suuria virheitä. Myös mareografienvälisten erojen virherajat ovat huomattavasti pienempiä kuin taulukossa olevat absoluuttiset virherajat.

5 Valtamerten pinnannousu

Ilmaston lämpenemisen aiheuttama valtamerien pinnannousu vaikuttaa pitkällä aikavälillä myös Itämeren vedenkorkeuteen. Keskimäärin valtamerien pinta on noussut 1900-luvun alusta 19 ± 2 cm (Church ym. 2013). Viime aikoina nousuvauhti on ollut nopeampaa, noin 3 mm vuodessa. Ennusteet tulevasta noususta ovat vielä varsin epävarmoja, pääasiassa siksi, että mannerjäätiköiden käyttäytymistä lämpenevässä ilmastossa ei toistaiseksi tunneta riittävän hyvin.

Merenpinnan nousun ennustamiseen käytetyt mallit voidaan jakaa kahteen luokkaan. Fysikaaliset mallit pyrkivät kuvaamaan erikseen kunkin merenpinnan nousuun vaikuttavan tekijän: valtamerien lämpenemisen aiheuttaman meriveden lämpölaajenemisen sekä mannerjäätiköiden ja pienempien jäätiköiden sulamisen. Ongelmana tässä lähestymistavassa on etenkin mannerjäätiköiden mallintaminen. Viime vuosina on tarkempien havaintojen myötä paljastunut, että mannerjäätiköiden virtaukseen vaikuttaa monta sellaista tekijää, jota mallit eivät vielä kykene ottamaan huomioon. Tämän vuoksi fysikaalisiin mallituloksiin perustuvat ennusteet ovat epätäydellisiä ja saattavat aliarvioida merenpinnan tulevaa nousua.

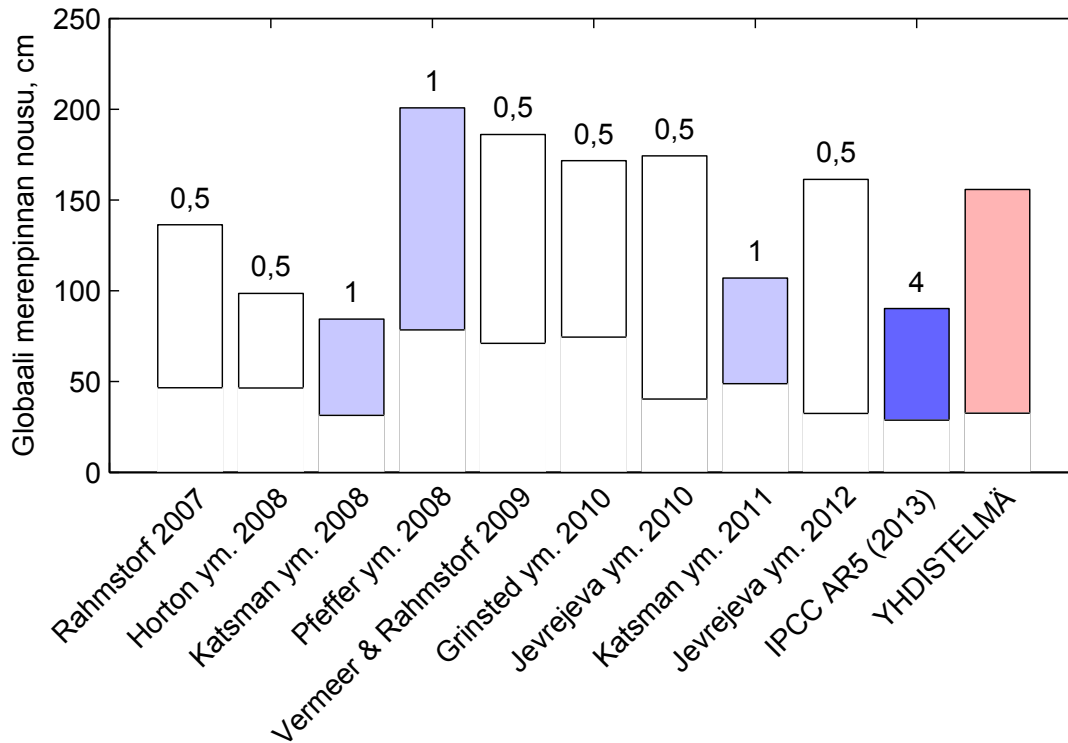
Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n ennusteet perustuvat fysikaalisiin malleihin, joiden ennusteita on mannerjäätiköiden osalta täydennetty asiantuntija-arvioihin perustuvilla laskelmilla.

Toinen lähestymistapa ovat havaintoihin perustuvat semiempiiriset mallit. Ne käyttävät hyväksi historiallista havaintoaineistoa merenpinnan nousun ja maapallon keskilämpötilan välisestä yhteydestä. Yhdistämällä tämä aineisto keskilämpötilan malliennusteisiin voidaan ennustaa merenpinnan nousu. Näin voidaan kiertää fysikaalisten mallien puutteet, mutta ongelmana lähestymistavassa on se, että historiallinen yhteys lämpötilan ja merenpinnan tason välillä ei välttämättä päde tulevaisuudessa.

Epävarmuudet mannerjäätiköiden mallintamisessa liittyvät erityisesti meren, jäätikön ja ilmakehän vuorovaikutuksiin mannerjäätiköiden meressä kelluvilla reuna-alueilla. Vaikka kelluvan jään sulaminen ei vaikuta merkittävästi merenpinnan tasoon, kelluvan jään lohkeilu nopeuttaa ylempänä maan päällä olevan jäätikön valumista mereen. Suurin kysymysmerkki on Etelämantereen mannerjäätikön läntinen osa, Länsi-Antarktiksien mannerjäätikkö, jonka pohja on valtaosin merenpinnan alapuolella. Tämä tarkoittaa sitä, että jos jäätikön sulaminen ja lohkeilu pääsee käyntiin ja jäätikkö ohenee, voi syntyä itseään ruokkiva kierre, jossa meri tunkeutuu jäätikön alle ja yhä enemmän jäätä nousee kellumaan. Tällaisen hajoamiskiirteen todennäköisyyttä ja nopeutta ei toistaiseksi osata arvioida.

Tässä raportissa tehtyjen laskelmien pohjaksi on laadittu valtamerten pinnannousun skenaario, joka perustuu viimeisimpiin tieteellisessä kirjallisuudessa julkaistuihin ennusteisiin. Mukana on kaikkiaan kymmenen eri menetelmällä laadittua ennustetta (kuva 1), joista on tehty asiantuntija-arvioon perustuva yhdistelmä (todennäköisyysjakauma). Laskentamenetelmä on kuvattu tarkemmin artikkelissa Johansson ym. (2014), ja sitä on päivitetty tähän raporttiin korvaamalla IPCC:n neljännen arviointiraportin (2007) tulokset viidennen arviointiraportin ennusteella (Church ym. 2013). IPCC:n arviointiraporttien ennusteet perustuvat laajaan malliaineistoon ja edustavat aikansa parasta tieteellistä tietoa, minkä vuoksi viidennen arviointiraportin ennustetta on painotettu muita enemmän todennäköisyysjakauman laskennassa. Semiempiirisiä ennusteita on puolestaan painotettu vähemmän niiden suuren määrän ja menetelmään sisältyvien epävarmuuksien takia.

Lopputuloksena yhdistelmästä saadaan valtamerten pinnan nousu 33–156 cm:llä vuosina 2000–2100 (5–95 %:n luottamusväli). Tulos on suurempi kuin IPCC:n esittämä yläraja 97 cm vuoteen 2100 mennessä, sillä semiempiirisellä menetelmällä tehdyt arviot ovat pääsääntöisesti tätä korkeampia. IPCC:n arviota korkeampia ennusteita on otettu mukaan skenaario-
parveen, koska Länsi-Antarktiksien mannerjäätikön hajoaminen saattaa nostaa merenpintaa IPCC:n ennustetta korkeammalle. Hajoamisen todennäköisyyttä ei vielä pystytä arvioimaan, mutta sen aiheuttama lisänousu olisi luultavasti korkeintaan joitakin kymmeniä senttejä (Church ym. 2013).



Kuva 1: Valtamerien pinnannousun ennusteet, joita on käytetty keskivedenkorkeuden todennäköisyysjakauman laskemisessa. Jotta ennusteet olisivat vertailukelpoisia, ne on normitettu samalle aikavälille (2000–2100) olettamalla tasaisesti kiihtyvää aikakehitystä. Sinisellä on piirretty fysikaalisiin malleihin ja asiantuntija-arvioon perustuvat ennusteet, valkoisella semiempiirisiin malleihin perustuvat ennusteet. Ennusteiden yhdistämisessä on sovellettu asiantuntija-arvioon perustuvia painokertoimia (numerot palkkien yläpuolella), jotka kuvaavat ennusteen taustalla olevan mallijoukon laajuutta ja luotettavuutta. Menetelmä on kuvattu tarkemmin artikkelissa Johansson ym. (2014).

Koska yhdyskuntasuunnittelun aikajänne ulottuu pidemmälle kuin vuoteen 2100, on alimpien suositeltavien rakentamiskorkeuksien määrittämisen pohjaksi tarkasteltu myös vuoteen 2200 ulottuvia, tieteellisessä kirjallisuudessa julkaistuja merenpinnan nousuennusteita. Mannerjäätiköihin liittyvät epävarmuudet kasvavat vuoden 2100 jälkeen niin suuriksi, että ennusteiden luotettavuus on alhainen. Tarkastelu antaa kuitenkin vertailukohtaa rakentamiskorkeussuosituksen valintakriteereille.

IPCC:n viidennen arviointiraportin lisäksi mukaan on otettu neljä muuta semiempiirisiin malleihin tai asiantuntija-arvioon perustuvaa ennustetta (Katsman ym. 2011, Jevrejeva ym. 2012, Schaeffer ym. 2012, Zecca & Chiari 2012). Ennusteet yhdistettiin samalla menetelmällä kuin vuoteen 2100 ulottuvat skenaariot, ja lopputulokseksi saatiin 50–350 cm:n globaali merenpinnan nousu vuoteen 2200 mennessä. Vertailun vuoksi IPCC:n ennusteen yläraja on noin kaksi metriä vuoteen 2200 mennessä, mutta raportissa todetaan, että ennuste on todennäköisesti mannerjäätiköiden osalta aliarvioitu (Church ym. 2013).

6 Itämeren pinnankorkeuden keskimääräinen muutos

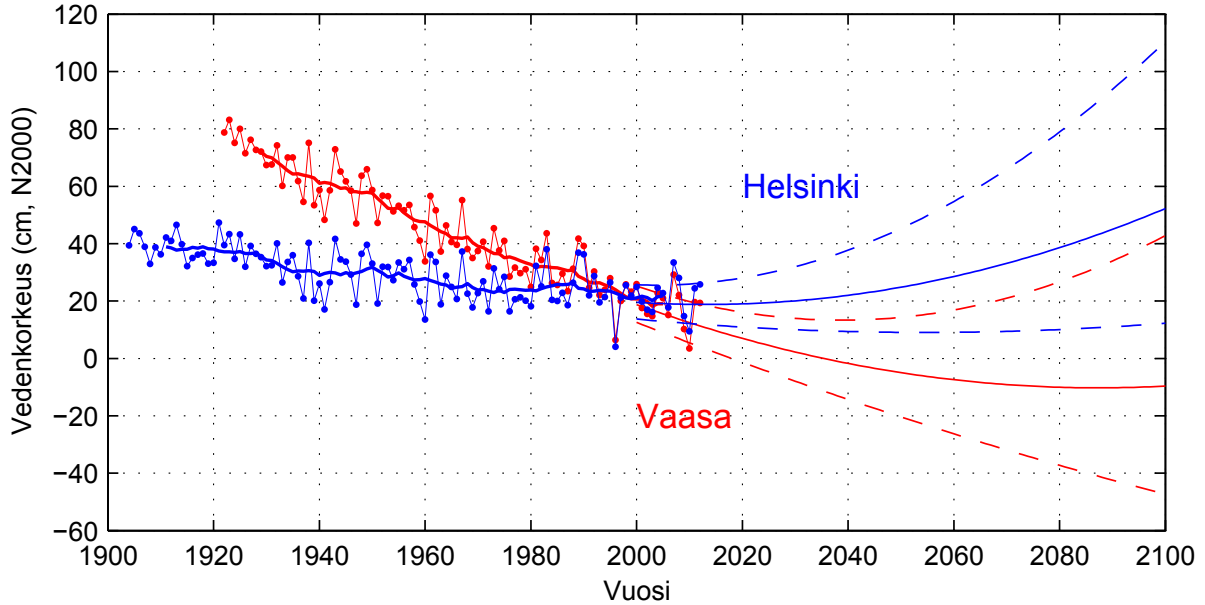
Valtamerten pinnannousussa on huomattavaa alueellista vaihtelua. Vaihtelua aiheuttavat mm. merten epätasainen lämpeneminen, merten kiertoliikkeessä tapahtuvat muutokset, maankuoren korkeusmuutokset ja jäätiköiden sulamisvesien epätasainen jakautuminen painovoimakentän muutosten seurauksena. Nämä tekijät on pyritty ottamaan huomioon laskelmissa viimeisimmän tieteellisen tiedon pohjalta. Lopputuloksena Itämeren pinnannousun arvioidaan olevan hieman (noin 20 %) vähäisempää kuin valtamerillä keskimäärin. Menetelmä on selostettu tarkemmin artikkelissa Johansson ym. (2014).

Ilmastomallit ennustavat Pohjanmeren alueelle hieman keskimääräistä voimakkaampaa merenpinnan nousua meriveden tiheyden ja sen kiertoliikkeen muutosten seurauksena (Church ym. 2013). Jäätiköiden sulamisen kokonaisvaikutus puolestaan jää Itämeren alueella mallituloslosten mukaan selvästi maailmanlaajuista keskiarvoa vähäisemmäksi. Tämä johtuu ennen kaikkea Grönlannin mannerjäätikön sulamisen aiheuttamista muutoksista Maan painovoimakenttään ja maankuoren korkeuteen. Kun jäätikkö sulaa, sen valtameriin kohdistama vetovoima heikkenee ja maa alkaa kohota sulavan jäätikön alla. Siksi merenpinnan nousu jää heikommaksi sulavan jäätikön lähellä kuin kaukana siitä.

Tuuliolosuhteet Tanskan salmien alueella vaikuttavat veden virtaukseen Itämeren ja Pohjanmeren välillä. Ilmastomallit ennustavat Tanskan salmien alueelle voimistuvia länsituulia, jotka työntävät lisää vettä Itämereen. Tuuliolosuhteiden muutoksen vuoksi merenpinnan tason arvioidaan nousevan keskimäärin noin 6–7 cm Suomen rannikolla vuosisadan loppuun mennessä (Johansson ym. 2014).

Kun laskuun otetaan mukaan myös maankohoaminen, saadaan lopputuloksena arvio keskimääräisen merenpinnan tason muutoksesta Suomen rannikolla vuoteen 2100 mennessä. Tulokset kaikille mareografipaikkakunnille on esitetty taulukossa 4. Lisäksi kuvassa 2 on esitetty esimerkkinä Helsingin ja Vaasan ennusteet.

Taulukosta 4 nähdään, että Suomenlahdella keskivedenkorkeuden arvioidaan nousevan noin 30 cm vuosina 2000–2100. Selkämerellä maankohoaminen ja merenpinnan nousu kumoavat suunnilleen toisensa, eikä suuria muutoksia merenpinnan tasossa ole parhaan arvion mukaan odotettavissa. Perämerellä maankohoaminen todennäköisesti jatkuu merenpinnan nousua voimakkaampana ja merenpinta laskee 20–30 cm. Korkeimpien ennusteiden toteutuessa merenpinta voi kuitenkin kääntyä nousuun kaikkialla Suomen rannikolla, ja Suomenlahden pohjukassa nousu voi olla jopa yli 90 cm.



Kuva 2: Arvio keskimääräisen merenpinnan tason kehityksestä Helsingissä ja Vaasassa vuoteen 2100 mennessä. Yhtenäinen viiva on paras arvio, katkoviivat kuvaavat epävarmuusvälejä. Pisteet ovat vedenkorkeuden havaittuja vuosikeskiarvoja.

Taulukko 4: Keskimääräisen merenpinnan tason muutos vuosina 2000–2100 mareografipaikkakunnilla.

Mareografi	Keskivedenkorkeuden muutos 2000–2100 (cm)			Keskivedenkorkeus vuonna 2100 (N2000, cm)		
	Alin	Paras arvio	Korkein	Alin	Paras arvio	Korkein
Kemi	-64	-25	27	-44	-5	47
Oulu	-61	-23	29	-40	-2	50
Raahe	-64	-25	27	-44	-6	46
Pietarsaari	-65	-27	25	-46	-8	44
Vaasa	-67	-28	24	-47	-9	43
Kaskinen	-59	-19	37	-39	0	56
Mäntyluoto	-50	-11	45	-31	8	64
Rauma	-42	-2	54	-24	16	72
Turku	-29	11	67	-11	29	85
Föglö	-31	9	64	-15	24	80
Hanko	-14	26	84	4	45	102
Helsinki	-8	33	90	12	53	110
Hamina	-5	36	94	16	57	115

7 Yhteisvaikutus

Ottamalla huomioon sekä keskimääräisen merenpinnan tason skenaariot että vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihtelut saadaan määritettyä ns. yhdistetyt jakaumat. Yhdistetyt jakaumat on laskettu satunnaismuuttujien summan todennäköisyyden kaavalla, joka edellyttää, että osatekijöiden jakaumat ovat tunnettuja.

Yhdistettyjen jakaumien määrittämisessä käytetyissä keskivedenkorkeuden skenaarioissa on otettu huomioon valtameren pinnannousu ja sen epätasainen alueellinen jakautuminen, maankohoaminen sekä tuuli- ja ilmanpaineolojen muutoksen vaikutus Suomen rannikon vedenkorkeuteen (luvut 4–6). Yhdistettyjen jakaumien määrittämisessä käytetyt vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihtelut puolestaan pohjautuvat viimeisen 30 vuoden vedenkorkeuksien kuukausittaisiin maksimiarvoihin, joista edellä mainitut vedenkorkeuden pitkäaikaiseen keskiarvoon vaikuttavat tekijät on poistettu (luku 3).

Yhdistetyistä jakaumista voidaan määrittää tiettyjä ylittymistäajuuksia vastaavat vedenkorkeudet. Taulukossa 5 on esitetty mareografipaikkakunnittain määritetyt vedenkorkeudet ylittymistäajuuksilla 1/20, 1/50 ja 1/100 tapausta vuosina 2050 ja 2100. Lisäksi taulukossa 6 on esitetty mareografipaikkakunnittain määritetyt vedenkorkeudet ylittymistäajuuksilla 1/250 ja 1/1000 tapausta vuonna 2100. Mikäli olosuhteet säilyisivät muuttumattomina, se tarkoittaisi, että esimerkiksi ylittymistäajuudella 1/250 saavutettavan vedenkorkeuden toistumisaika olisi 250 vuotta. Merenrannalla olosuhteet kuitenkin muuttuvat mm. maankohoamisen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Ylittymistäajuus yhtyy harvinaisten vedenkorkeuksien tapauksissa ylittymistodennäköisyyteen (luku 3), joten taulukoiden 5 ja 6 ylittymistäajuudet voidaan ymmärtää myös ylittymistodennäköisyyksinä.

Liitteen 3 kuvissa on piirretty mareografipaikkakunnittain määritetyt yhdistetyt vedenkorkeusjakaumat vuosille 2050 ja 2100. Kuvaajista voidaan lukea tiettyä ylittymistäajuutta vastaava vedenkorkeus kyseisille vuosille annettulla ylittymistäajuusvälillä. Ylittymistäajuutta 1/250 tapausta vastaava vedenkorkeus vuonna 2100 on merkitty erikseen tähdellä yhdistettyjen jakaumien kuviin. Kuvaajista nähdään, että kuvaajissa esitetyllä ylittymistäajuusvälillä kaikilla mareografeilla tietty vedenkorkeus saavutetaan suuremmalla ylittymistäajuudella vuonna 2100 kuin vuonna 2050. Esimerkiksi Pietarsaaren yhdistettyjen vedenkorkeusjakaumien kuvaajasta havaitaan, että vedenkorkeus 160 cm saavutetaan siellä vuonna 2050 noin 0,01 (1/100) kertaa vuodessa ja vuonna 2100 noin 0,05 (1/20) kertaa vuodessa.

Yhdistettyjen jakaumien avulla voidaan edelleen laskea ylittymistäajuudet ajalle 2012–2100. Taulukossa 7 on esitetty mareografipaikkakunnittain keskimäärin 5, 2, 1 sekä 0,4 ja 0,1 kertaa tarkastelujaksolla 2012–2100 ylittävät vedenkorkeudet, jotka on laskettu vuosittaisten yhdistettyjen jakaumien summan avulla.

Taulukko 5: Vuosille 2050 ja 2100 yhdistetyistä jakaumista lasketut vedenkorkeudet ylittymistajuuksilla 1/20, 1/50 ja 1/100 tapausta/vuosi.

Ylittymistajuuus (tapausta/vuosi)	Vedenkorkeus (cm) N2000-järjestelmässä					
	1/20		1/50		1/100	
	2050	2100	2050	2100	2050	2100
Kemi	187	199	211	223	230	242
Oulu	180	198	199	217	214	231
Raahe	150	171	165	187	176	199
Pietarsaari	137	158	150	173	160	184
Vaasa	135	151	153	169	166	183
Kaskinen	133	161	150	178	162	190
Mäntyluoto	131	164	145	180	156	191
Rauma	134	173	147	188	156	198
Turku	141	188	153	202	163	213
Föglö	118	165	127	179	134	188
Hanko	147	201	162	217	173	228
Helsinki	173	228	188	245	200	257
Hamina	214	264	235	285	251	302

Kuten sisävesilläkin on asian laita, vaikka jokin vedenkorkeus lasketaan ylittyvän esimerkiksi sadan vuoden jaksolla keskimäärin kerran, se voi ylittyä useina vuosina ja jopa peräkkäin, tai toisaalta olla ylittymättä kertaakaan sadan vuoden aikana.

Rakennuskorkeussuositusten perustaksi on otettu vuonna 2100 ylittymistajuuutta 1/250 tapausta vuodessa vastaava vedenkorkeus (taulukko 6). Vertailun vuoksi on laskettu myös korkeudet, jotka keskimäärin ylittyvät kerran vuoteen 2100 mennessä (taulukko 7). Nämä korkeudet ovat kaikilla mareografeilla pienempiä kuin ylittymistajuuutta 1/250 vastaava korkeus vuonna 2100.

Ylittymistaajuus (tapausta/vuosi)	Vedenkorkeus (cm) N2000-järjestelmässä	
	1/250	1/1000
Vuosi	2100	2100
Kemi	267	304
Oulu	250	279
Raahe	214	236
Pietarsaari	198	219
Vaasa	200	227
Kaskinen	206	231
Mäntyluoto	206	229
Rauma	212	232
Turku	226	245
Föglö	200	216
Hanko	244	266
Helsinki	273	297
Hamina	323	355

Taulukko 6: Vuodelle 2100 yhdistetyistä jakaumista lasketut vedenkorkeudet ylittymistaajuuksilla 1/250 ja 1/1000 tapausta/vuosi.

Taulukko 7: Keskimäärin 5, 2, 1 sekä 0,4 ja 0,1 kertaa ylittävät vedenkorkeudet tarkastelujaksolla 2012–2100.

Ylittymistaajuus (tapausta/tarkastelujakso)	Vedenkorkeus (cm) N2000-järjestelmässä				
	5	2	1	0,4	0,1
Kemi	188	213	231	256	293
Oulu	184	202	217	236	264
Raahe	155	170	181	196	219
Pietarsaari	141	155	166	180	201
Vaasa	138	156	169	187	213
Kaskinen	139	156	168	184	209
Mäntyluoto	139	154	166	180	203
Rauma	144	159	169	183	203
Turku	155	170	181	194	214
Föglö	132	146	156	169	186
Hanko	164	181	193	209	232
Helsinki	190	208	221	237	261
Hamina	227	249	265	286	319

8 Aallokko

Suomea ympäröivällä avomerellä korkeimmat merkitsevät aallonkorkeudet vaihtelevat runsaasta kuudesta metristä runsaaseen kahdeksaan metriin (kuva 3). Merkitsevä aallonkorkeus vastaa likipitään silmin havaittua aallokon korkeutta tai aaltojen korkeimman kolmanneksen keskiarvoa. Korkeimman yksittäisen aallon korkeus on noin kaksinkertainen merkitsevään aallonkorkeuteen nähden.

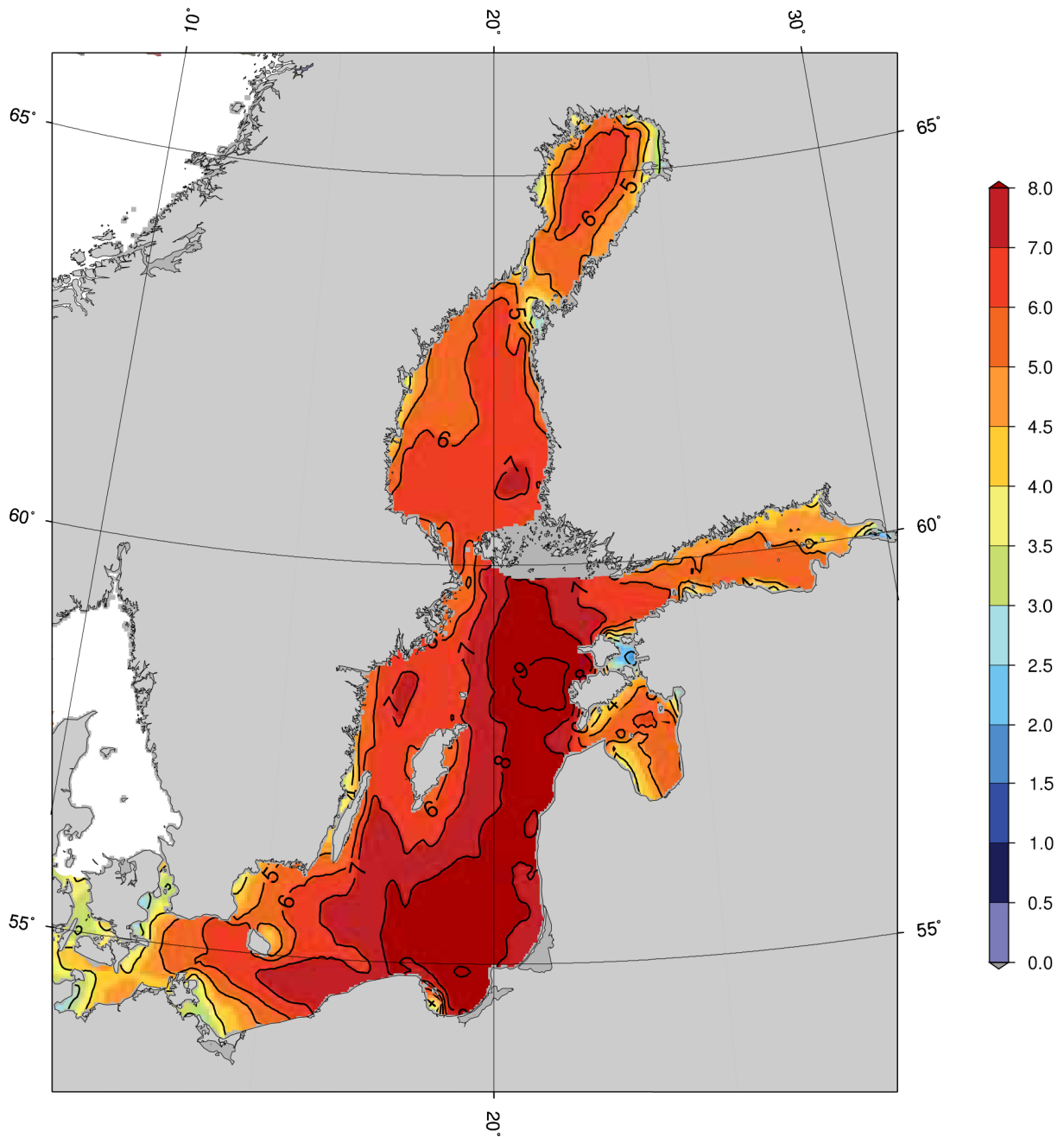
Suomen rannikko on suurimmaksi osaksi saariston tehokkaasti suojaama. Aallokon korkeuden saaristossa ja rannan läheisyydessä vaikuttavat ulkomeren aallokon korkeus, refraktio eli aaltojen taittuminen, saarten aiheuttama varjostus, veden mataluus ja rannan kasvillisuus. Jo ulkosaariston aallokko on pohjan muotojen vaikutuksesta tapahtuvan aaltojen refraktio-ilmion vuoksi useimmissa paikoissa oleellisesti pienempää kuin avomerellä.

Aallokko vaihtelee rannikon eri kohdissa erittäin paljon, kuten kuva 4 osoittaa. Tämän lisäksi rannan jyrkkyys ja rannan rakenne vaikuttavat siihen, kuinka korkealle aallokko voi nostaa vettä. Aallokon vaikutusta tarkasteltaessa on otettava huomioon, minkälaisen vahingon erityyppinen veden nousu voi rakenteille aiheuttaa. Rannalle nouseva vesi voi olla:

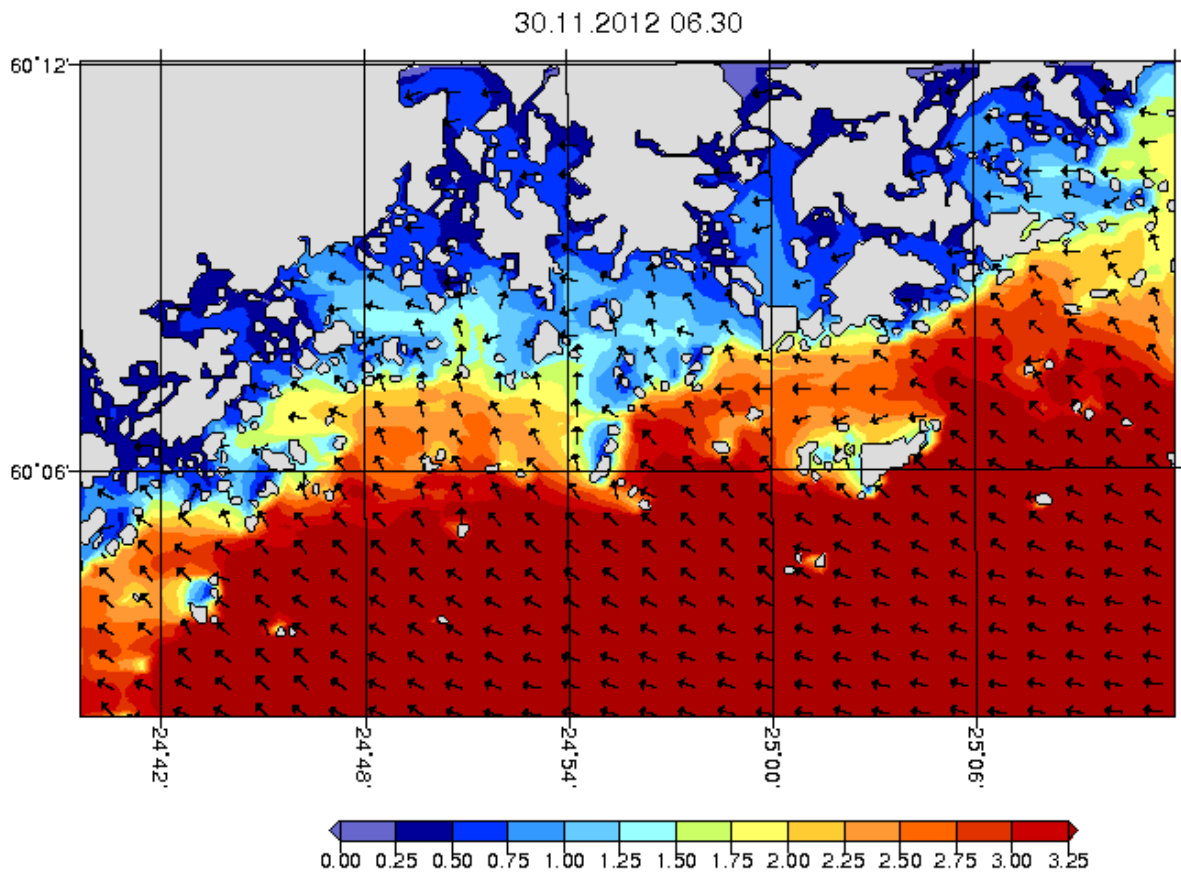
1. Suolavettä sisältäviä yksittäisiä pisaroita. Suolavesipisarot edellyttävät rakennusmateriaaleilta korroosionkestävyyttä.
2. Roiskeiksi katsottavaa vettä. Roiskekorkeudella tarkoitetaan sitä korkeutta, jonka yläpuolelle nousee vähemmän kuin 2 % roiskeveden kokonaismäärästä. Roiskeet kastelevat rakenteet ja voivat tuoda rakennukseen melko suuriakin vesimääriä. Ne eivät kuitenkaan kuormita rakenteita merkittävästi.
3. Yhtenäistä vettä, ns. ”vihreä vesi”, joka voi aiheuttaa suuriakin kuormituksia ja suurien vesimäärien tulvimista.

Tässä tutkimuksessa aaltoiluvaralla tarkoitetaan sitä korkeutta, jonne yhtenäinen vesi nousee suurimpien aaltojen vaikutuksesta, kun vertailutasona on hetkellisestä vedenkorkeudesta muutamien minuuttien aikana laskettu keskiarvo. Aaltoiluvara on siis se korkeus, joka on lisättävä vallitsevaan vedenkorkeuteen. Riskitasona on käytetty todennäköisyyttä 0,01 tapausta vuodessa, eli jos aallokkoilmasto pysyisi muuttumattomana, tapaus tapahtuisi kerran 100 vuodessa.

Aaltoiluvara on Suomen rannikolla erittäin paljon paikasta riippuva ja vaihtelee lähes nollassa yli kymmeneen metriin, sillä aaltoiluvaraan vaikuttaa paitsi aallonkorkeus myös rannan jyrkkyys ja sen muoto. Pieni aaltoiluvara saavutetaan rannalla, jonka kaltevuus on enintään 1:30.



Kuva 3: Suurin merkitsevä aallonkorkeus Itämerellä 2001–2007 WAM-aaltomallin mukaan (Tuomi ym. 2011)



Kuva 4: Avomeren aallokon vaimeneminen Helsingin edustalla WAM-aaltomallilla laskettuna. Merkittävä aallonkorkeus avomerellä on yli 5 m.



Kuva 5: Jyrkällä rannalla aaltoiluvara nousee aallon korkeuteen nähden korkeaksi. Kuva: Kimmo Tikka.

Pyyhkäisy matka	Loiva ranta, kaltevuus 1:10	Jyrkkä ranta, kaltevuus 1:3
1 km	30 cm	90 cm
2 km	40 cm	130 cm
5 km	70 cm	200 cm
10 km	100 cm	290 cm
		lisäksi pärskeet

Taulukko 8: Aaltoiluvara tasa-pohjaiselle rannalle kahdella eri kaltevuustasolla ja eripituisilla tuulen pyyhkäisy matkoilla. Tuulen nopeudeksi on taulukossa oletettu 25 m/s.

Kaltevuus 1:7 tuottaa vielä erittäin hyvän vaimennuksen. Kaltevuus 1:3 tai sitä jyrkempi aiheuttaa aallon heijastumisen, jolloin sen korkeus kasvaa merkittävästi. Tällaista rantaa kutsutaan tässä selvityksessä jyrkäksi. Jyrkkäkin ranta vaimentaa aallokkoa, jos se on tehty lohkarista, sillä lohkariden välissä tapahtuva aallokkoon liittyvä virtaus vaimentaa heijastuksia jonkin verran. Pysty tai lähes pysty ranta vaatii suurimman aaltoiluvaran, koska siinä aalto heijastuu lähes täysin (kuva 5). Heijastuminen nostaa rannassa aallonkorkeuden kaksinkertaiseksi. Aaltoiluvara on suurin sellaisessa tilanteessa, jossa vesi mataloituu suhteellisen nopeasti ja kohtaa sen jälkeen pystysuoran seinän. Rannan jyrkkyyttä arvioitaessa on tarkasteltava koko sitä matkaa, jossa aallon murtuminen tapahtuu alkaen aallonkorkeuden syvyydestä vedestä aina vallitsevan tulvan aikaiseen vesirajaan asti.

Kun rakennusten korkeustasoja määrätään, ei aaltoiluvaraa voida lisätä suoraan suurimpaan vedenkorkeuteen, koska suurin vedenkorkeus ja suurin aallokko eivät ole meren rannalla yleensä korreloituneita. Useimmissa paikoissa harvinaisen korkean vedenkorkeuden ja harvinaisen korkean aallokon esiintyminen samanaikaisesti on erittäin paljon harvinaisempaa kuin kummankaan erikseen. Tästä syystä määritellään käsite aallokon nousukorkeus, jolla tarkoitetaan sitä korkeutta, jonne yhtenäisen vesi nousee suurimpien aaltojen vaikutuksesta, kun vertailutasona on maan suhteen kiinteä korkeusjärjestelmä N2000.

Nousukorkeudessa on otettu huomioon se, että vedenkorkeus ei suurimman aallokon aikana ole korkeimmalla tasollaan, mutta ei myöskään keskiveden korkeudella, vaan todennäköisesti hieman sen yläpuolella. Aallokolta suhteellisen suojatuilla paikoilla suurin nousukorkeus saavutetaan suurimman vedenkorkeuden aikana, jolloin aallokko ei ole suurimmillaan. Nousukorkeus muuttuu maankohoamisen ja vedenkorkeuden muutoksen vaikutuksesta.

Taulukossa 8 on esitetty aaltoiluvara loivalle ja jyrkälle rannalle eripituisilla tuulen pyyhkäisy matkoilla, kun tuulen nopeuden oletetaan olevan 25 m/s. Sisäsaaristossa aaltoiluvarylle voidaan ylärajana käyttää taulukon arvoja, jolloin nousukorkeus saadaan lisäämällä aaltoiluvara taulukon 9 antamiin rakentamiskorkeuksiin. Mikäli ei olla varmoja siitä, että paikka on täysin suojassa avomeren aallokolta, tai vaihtoehtoisesti nousukorkeus taulukkoa käyttäen muodostuu epätarkoituksenmukaisen suureksi, on perusteltua tehdä erillinen nousukorkeuden selvitys tai pyytää lausuntoa Ilmatieteen laitokselta.

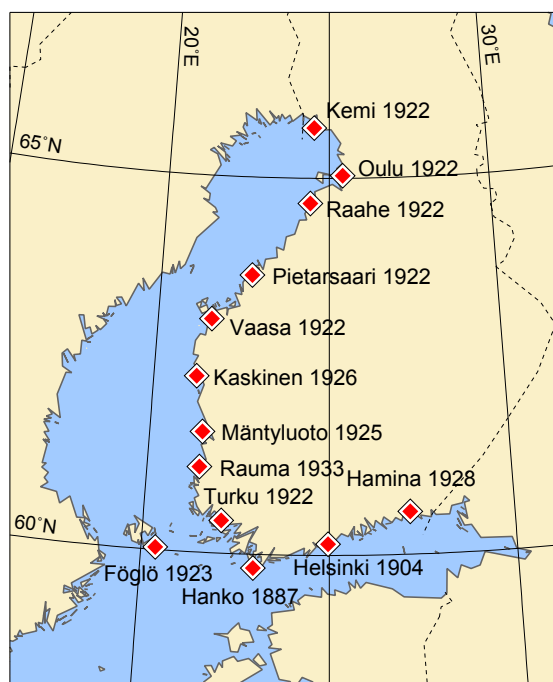
9 Alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet

Alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet on esitetty kaikille mareografipaikoille taulukossa 9. Niihin on lisättävä paikkakohtainen aaltoiluvара ja matalissa lahtien pohjukoissa tuulen aiheuttama paikallinen kallistus.

Alin suositeltava rakentamiskorkeus tarkoittaa korkeustasoa, jonka alapuolelle ei tulisi sijoittaa kastuessaan vaurioituvia rakenteita. Tarkemmin alimpien rakentamiskorkeuksien soveltamista rakentamisessa on käsitelty Suomen ympäristökeskuksen julkaisemassa oppaassa ”Tulviin varautuminen rakentamisessa – Opas alimpien rakentamiskorkeuksien määrittämiseksi ranta-alueilla” (2014). Opas sisältää myös yleistietoa merenrannikon ja sisävesien tulvista ja niiden aiheuttamista vahingoista Suomessa.

Taulukko 9: Alimmat suositeltavat rakentamiskorkeudet ilman aaltoiluvараa N2000-järjestelmässä.

Mareografi	Alin suositeltava rakentamiskorkeus ilman aaltoiluvараa (cm)
Kemi	260
Oulu	250
Raahe	230
Pietarsaari	200
Vaasa	200
Kaskinen	200
Mäntyluoto	200
Rauma	210
Turku	240
Föglö	220
Hanko	250
Helsinki	280
Hamina	320



Kuva 6: Mareografien sijainnit ja perustamisvuodet Suomen rannikolla.

Suosituksat koskevat tavanomaista rakentamista, jonka suunniteltu käyttöaika on parisataa vuotta ja jonka voidaan hyväksyä joutuvan tänä aikana kerran tulvalle alttiiksi. Lyhytikäisemmätkin rakennukset, jotka korvataan samalle paikalle rakennettavalla uudella rakennuksella, kuuluvat suositusten piiriin. Suositukset ovat sen sijaan liian matalia rakennuksille tai rakenteille, jotka eivät saa joutua merivedelle alttiiksi kertaakaan käyttöikänsä aikana. Suosituksia ei ole tarkoitettu sovellettaviksi rantasaunoille, rantakahviloille ja muille vastaaville rakennuksille, joiden sijoittaminen lähelle rantaa tuottaa huomattavaa hyötyä verrattuna mahdollisesta kastumisesta aiheutuviin vahinkoihin.

Kuvassa 6 ja liitteessä 4 on esitetty mareografien sijainnit. Mareografien välisille alueille suosituksia voidaan soveltaa pääsääntöisesti lineaarisesti interpoloimalla, kun tunnetaan etäisyys lähimpiin mareografeihin. Esimerkiksi Loviisassa, jonka etäisyys Helsinkiin on 71 km ja Haminaan 59 km, suositus olisi

$$\begin{aligned} \text{Loviisan suositus} &= \frac{\text{Helsingin suositus} \times \text{etäisyys Haminaan} + \text{Haminan suositus} \times \text{etäisyys Helsinkiin}}{\text{etäisyys Haminaan} + \text{etäisyys Helsinkiin}} \\ &= \frac{280 \text{ cm} \times 59 \text{ km} + 320 \text{ cm} \times 71 \text{ km}}{59 \text{ km} + 71 \text{ km}} = 302 \text{ cm, pyöristettynä } 300 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Pitkien matalien lahtien pohjukoissa suosituksiin on lisättävä veden kallistumasta aiheutuva lisäkorkeus. Jos tarkempia laskelmia kallistumasta ei tehdä, lisäyksenä voidaan käyttää arvoa 30 cm. Lisäksi on huomioitava paikkakohtainen aaltoiluvara (luku 8). Selvitystä aaltoiluvarasta ja suositusten interpolointia muille kuin mareografipaikkakunnille voi pyytää Ilmatieteen laitokselta.

Periaatteessa soveliaimpana alimpien rakentamiskorkeussuosituksien perustana tekijät pitävät sitä korkeutta, jonka vedenkorkeus ylittää kerran rakennusten suunnitellun käyttöikänsä (100–200 vuotta) aikana, kun kaikki ajan mukana muuttuvat tekijät otetaan huomioon. Vuonna 1998 lasketut suositukset perustuivat kerran vuoteen 2200 mennessä ylittyvään vedenkorkeuteen. Viime vuosikymmenen aikana tehdyt tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että pidemmälle kuin vuoteen 2100 ulottuvat merenpinnan nousuennusteet ovat hyvin epävarmoja. Siksi tässä raportissa on tarkasteltu pääasiassa vuoteen 2100 ulottuvia ennusteita. Tämä on lyhyempi aika kuin yhteiskuntasuunnittelun kannalta olisi tarkoituksenmukaista, minkä takia suositusten perustaksi on otettu vedenkorkeus, joka saavutetaan ylittymistäajuudella 1/250 tapausta vuonna 2100 (taulukko 6).

Vertailun vuoksi suosituksia laadittaessa on tehty karkea arvio myös vuoteen 2200 ulottuvista merenpinnan noususkenaarioista (luku 5). Näiden laskelmien luotettavuus on alhainen, mutta niiden perusteella voidaan arvioida, että nyt annetut suositukset antavat tavanomaisille rakennuksille riittävän tulvasuojan ainakin ensi vuosisadan puoleenväliin saakka. Epävarmuudet vähenevät tutkimuksen edistyessä tulevana vuosikymmeninä, joten arvioita on syytä päivittää säännöllisesti.

Nyt määritetyt vedenkorkeudet, joiden ylittymistäajuus vuoden 2100 aikana on 1/250 tapausta, ovat virherajojen puitteissa oleellisesti samalla tasolla maan pinnan suhteen kuin vuonna 1998 annetut suositukset. Tämän takia ja sekaannusten välttämiseksi uudet alimmat rakentamiskorkeussuositukset on asetettu siten, että ne poikkeavat korkeintaan noin 10 cm vuoden 1998 suosituksista. Suositusten lukuarvot ovat kuitenkin kasvaneet, koska vuoden 1998 suositukset olivat N60-korkeusjärjestelmässä ja nyt annetut N2000-järjestelmässä. Uudet suositukset on pyöristetty 10 cm:n tarkkuuteen, koska 5 cm:n tarkkuus ei ole virherajojen puitteissa perusteltu.

Vuoden 1998 rakentamiskorkeussuositukseen sisältyi lisäksi kaavamainen 30 cm:n aaltoiluvара, jollaisen käyttöä ei enää pidetä perusteltuna, koska se on monessa suojatussa paikassa tarpeettoman suuri ja aallokalle alttiissa paikassa yleensä liian pieni. Toisin sanoen suojaisissa paikoissa, joissa aaltoiluvараa ei tarvitse huomioida, suositukset eivät ole muuttuneet oleellisesti.

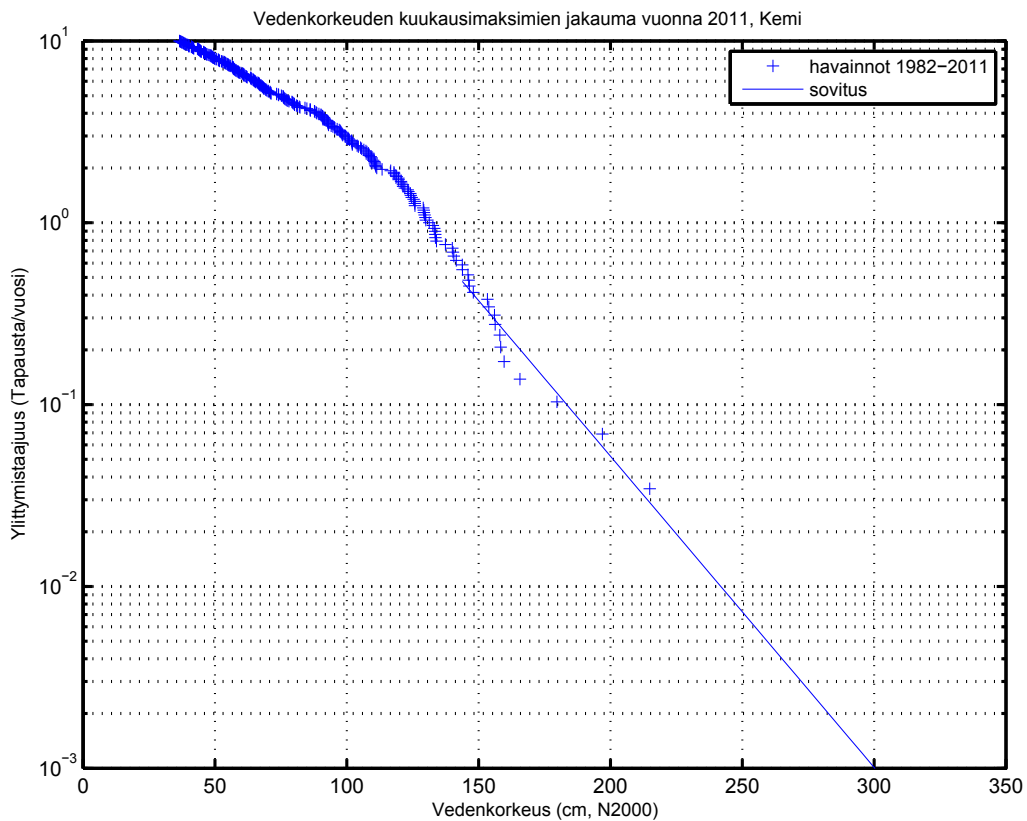
Kirjallisuusluettelo

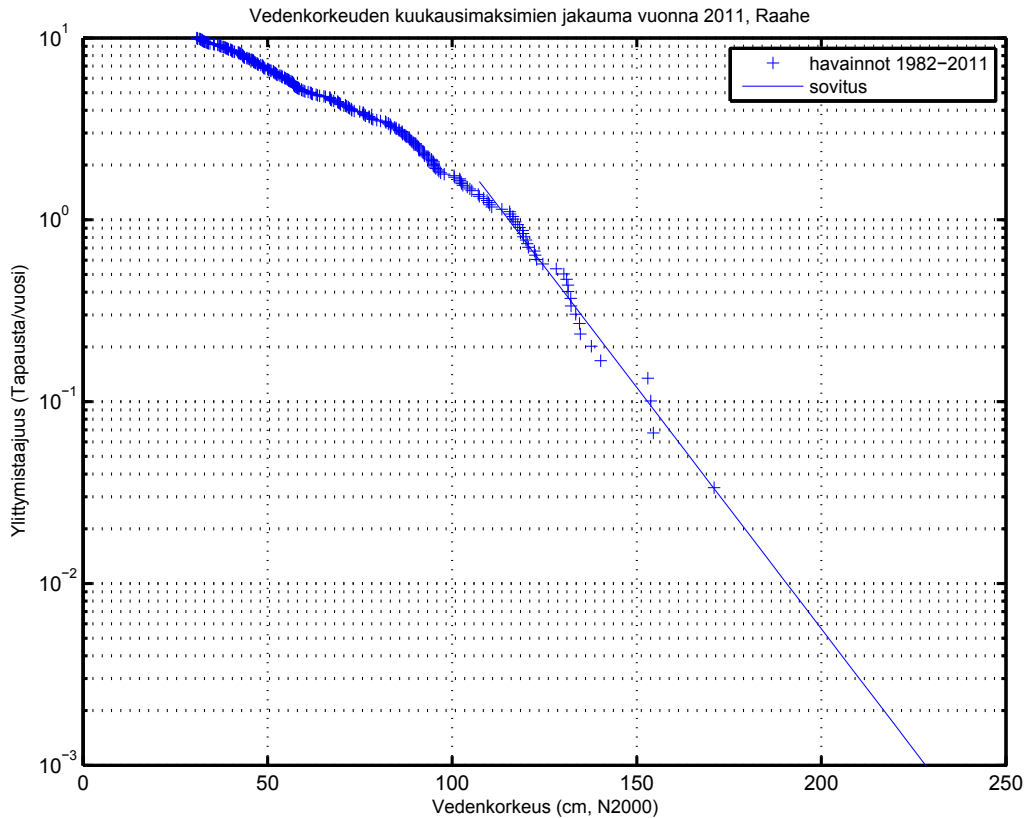
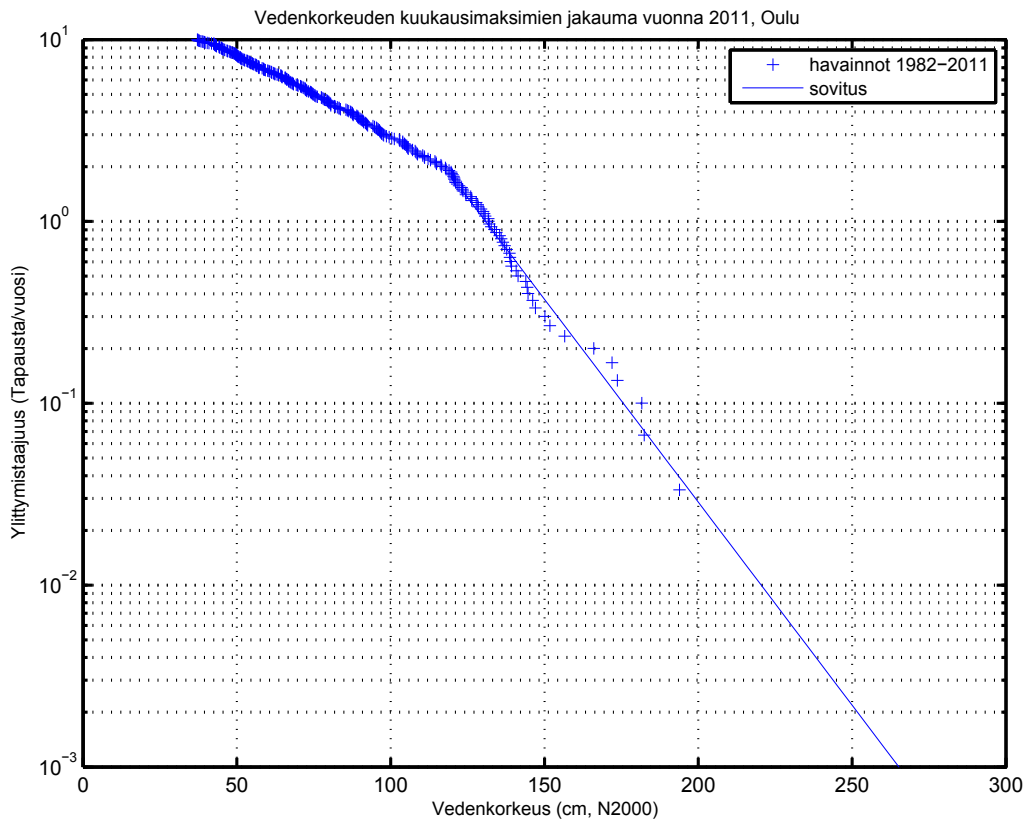
- CHURCH, J.A., P.U. CLARK, A. CAZENAVE, J.M. GREGORY, S. JEVREJEVA, A. LEVERMANN, M.A. MERRIFIELD, G.A. MILNE, R.S. NEREM, P.D. NUNN, A.J. PAYNE, W.T. PFEFFER, D. STAMMER & A.S. UNNIKRISHNAN, 2013. Sea Level Change. Teoksessa *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (toim. T.F. Stocker ym.). Cambridge University Press: Cambridge ja New York. <http://ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- GRINSTED, A., J.C. MOORE & S. JEVREJEVA, 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics* 34:461–472.
- HORTON, R., C. HERWEIJER, C. ROSENZWEIG, J. LIU, V. GORNITZ & A.C. RUANE, 2008. Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method. *Geophysical Research Letters* 35:L02715.
- JEVREJEVA, S., J.C. MOORE & A. GRINSTED, 2010. How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? *Geophysical Research Letters* 37:L07703.
- JEVREJEVA, S., J.C. MOORE & A. GRINSTED, 2012. Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change* 80:14–20.
- JOHANSSON, M., H. BOMAN, K.K. KAHMA & J. LAUNIAINEN, 2001. Trends in sea level variability in the Baltic Sea. *Boreal Environment Research* 6:159–179.
- JOHANSSON, M.M., 2014. Sea level changes on the Finnish coast and their relationship to atmospheric factors. *Finnish Meteorological Institute Contributions* 109.
- JOHANSSON, M.M., H. PELLIKKA, K.K. KAHMA & K. RUOSTEENOJA, 2014. Global sea level rise scenarios adapted to the Finnish coast. *Journal of Marine Systems* 129:35–46.
- KAHMA, K., H. PETTERSSON, H. BOMAN & A. SEINÄ, 1998. Alimmat suositeltavat rakennuskorkeudet Pohjanlahden, Saaristomeren ja Suomenlahden rannikoilla. Merentutkimuslaitos.
- KATSMAN, C.A., W. HAZELEGER, S.S. DRIJFHOUT, G.J. VAN OLDENBORGH & G.J.H. BURGERS, 2008. Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. *Climatic Change* 91:351–374.
- KATSMAN, C.A., A. STERL, J.J. BEERSMA, H.W. VAN DEN BRINK, J.A. CHURCH, W. HAZELEGER, R.E. KOPP, D. KROON, J. KWADIJK, R. LAMMERSSEN, J. LOWE, M. OPPENHEIMER, H.-P. PLAG, J. RIDLEY, H. VON STORCH, D.G. VAUGHAN, P. VELLINGA, L.L.A. VERMEERSEN, R.S.W. VAN DE WAL &

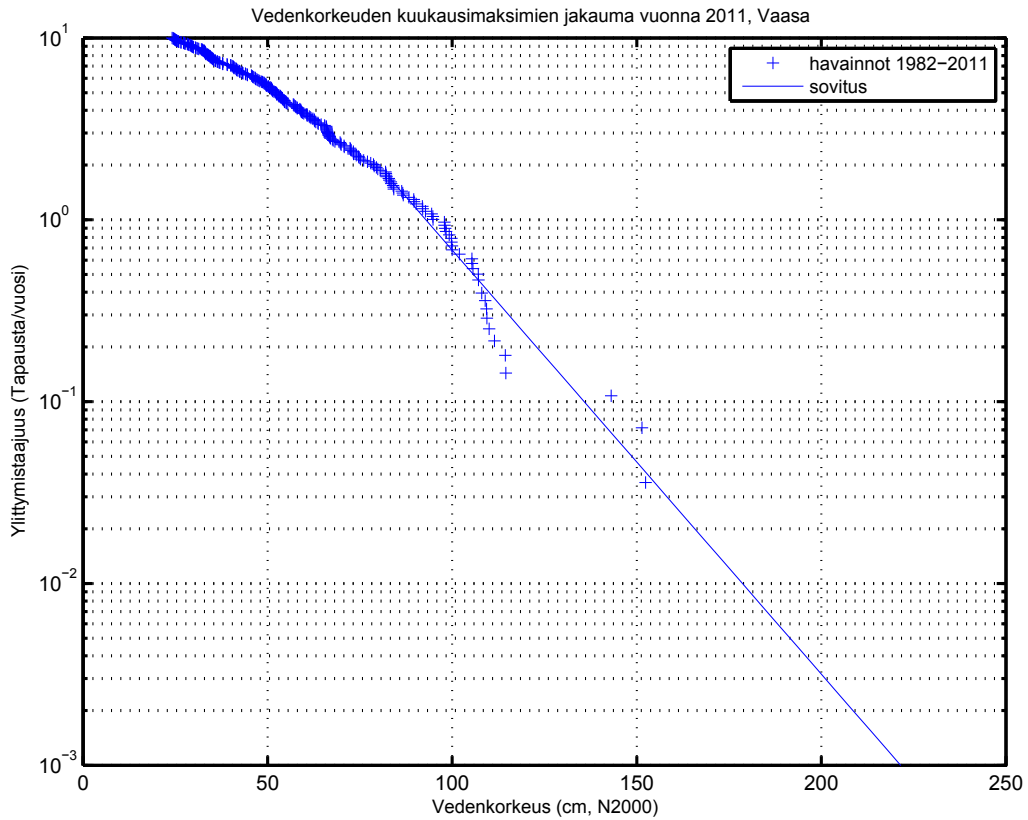
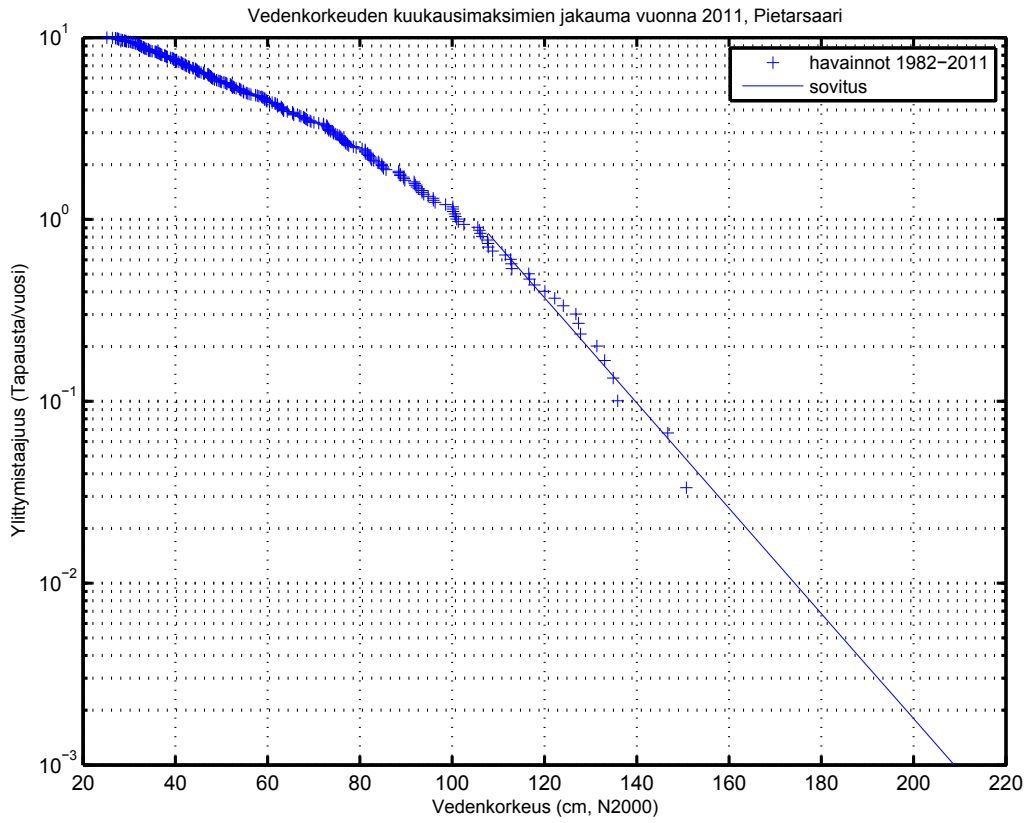
- R. WEISSE, 2011. Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta – the Netherlands as an example. *Climatic Change* 109:617–645.
- PFEFFER, W.T., J.T. HARPER & S. O'NEEL, 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea level rise. *Science* 321:1340–1343.
- RAHMSTORF, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315:368–370.
- SCHAEFFER, M., W. HARE, S. RAHMSTORF & M. VERMEER, 2012. Long-term sea-level rise implied by 1.5 °C and 2 °C warming levels. *Nature Climate Change* 2:867–870.
- TUOMI, L., K.K. KAHMA & H. PETTERSSON, 2011. Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea. *Boreal Environment Research* 16:451–472.
- VERMEER, M. & S. RAHMSTORF, 2009. Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:21527–21532.
- ZECCA, A. & L. CHIARI, 2012. Lower bounds to future sea-level rise. *Global and Planetary Change* 98–99:1–5.

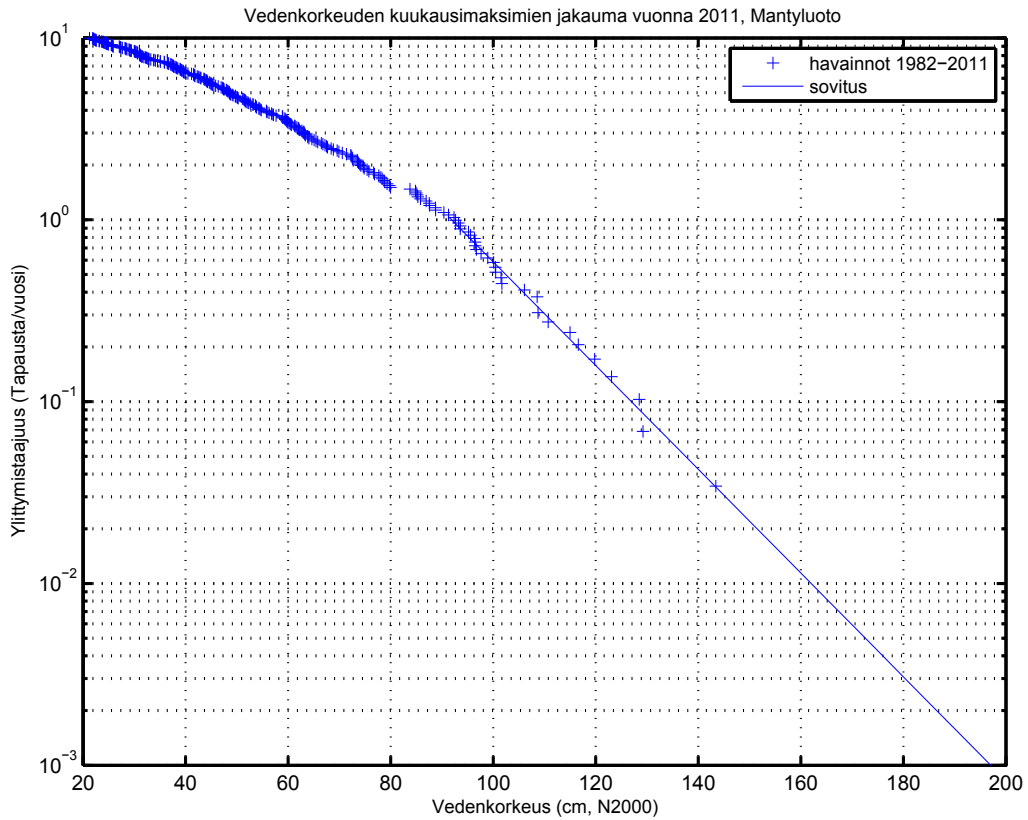
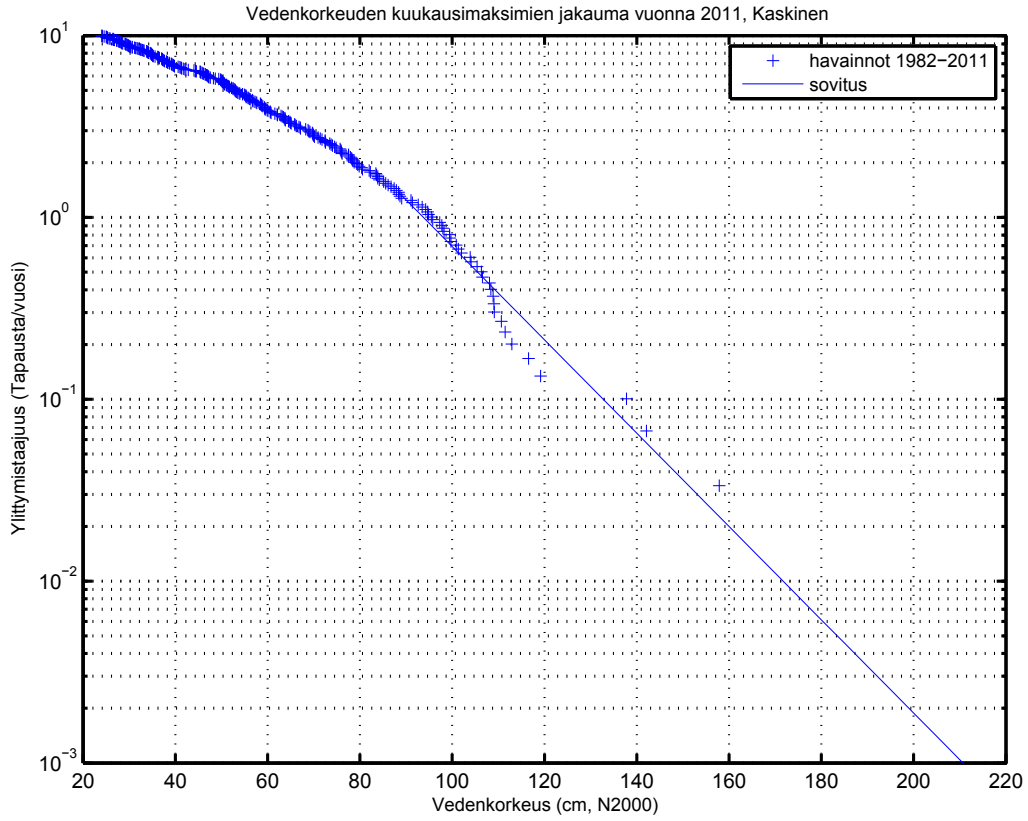
Liite 1. Vedenkorkeuden kuukausimaksimien ylittymistäajuusjakaumat

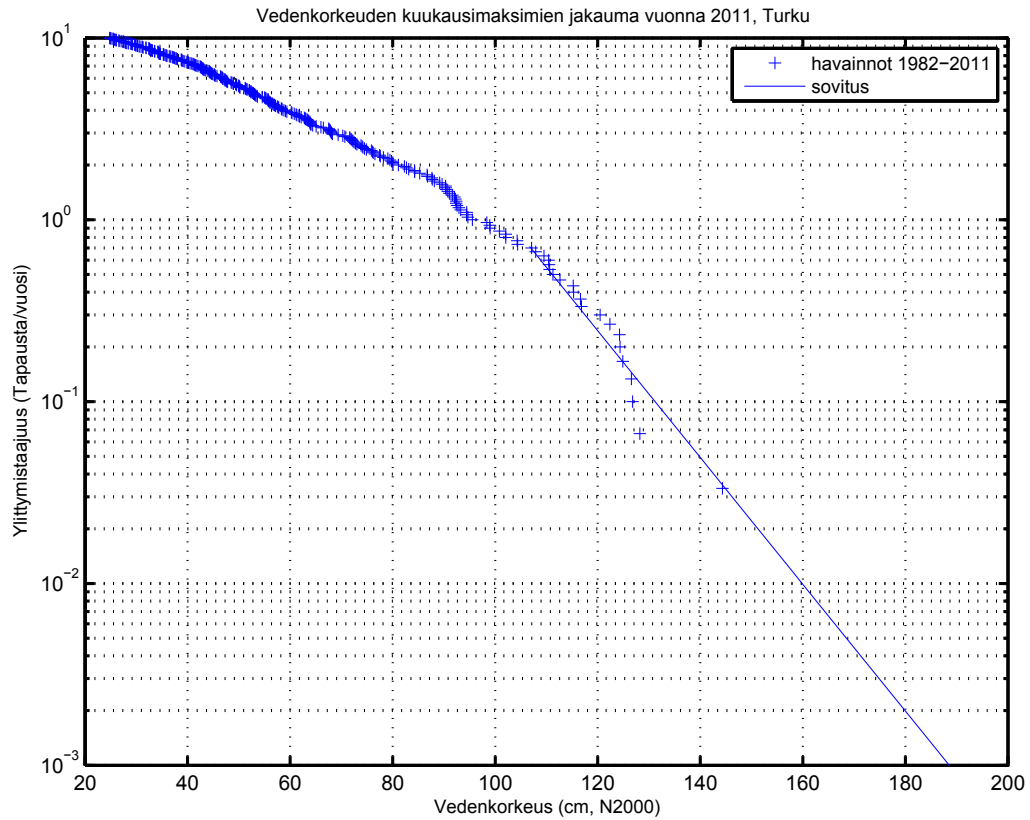
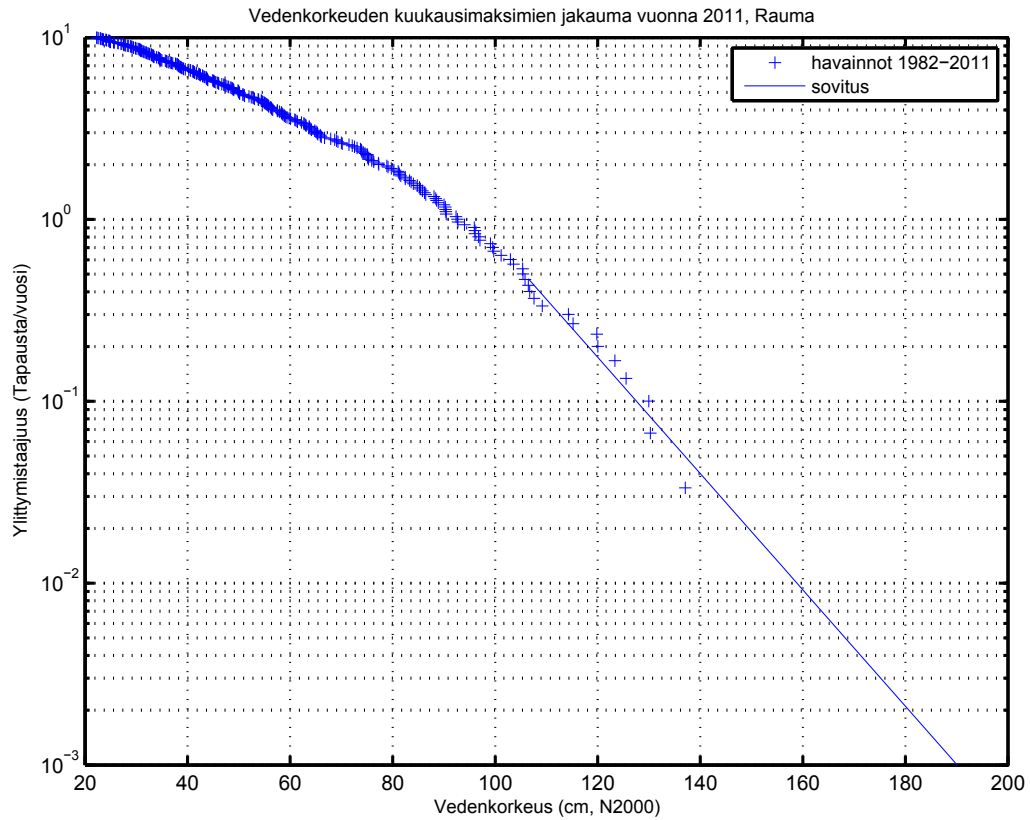
Kuukausimaksimien ylittymistäajuusjakaumat perustuvat vuosien 1982–2011 kuukausittaisiin maksimivedenkorkeusarvoihin. Koko mittausaineistoa ei ole voitu käyttää jakaumien laskemiseen, koska jakaumat ovat muuttuneet merkittävästi 1900-luvun alkupuolelta nykypäivään. Jakaumat on esitetty korkeusjärjestelmässä N2000. Kun jakaumat esitetään N2000-järjestelmässä, ne muuttuvat vuosittain, koska teoreettisen keskiveden ja N2000-järjestelmän välinen korkeusero muuttuu. Tässä esitetyt kuukausimaksimien ylittymistäajuusjakaumat edustavat vuotta 2011, jolloin niissä on huomioitu vuoden 2011 tarkennetun teoreettisen keskiveden taso, eli maankohoamisen ja valtamerten pinnannousun senhetkinen tilanne.

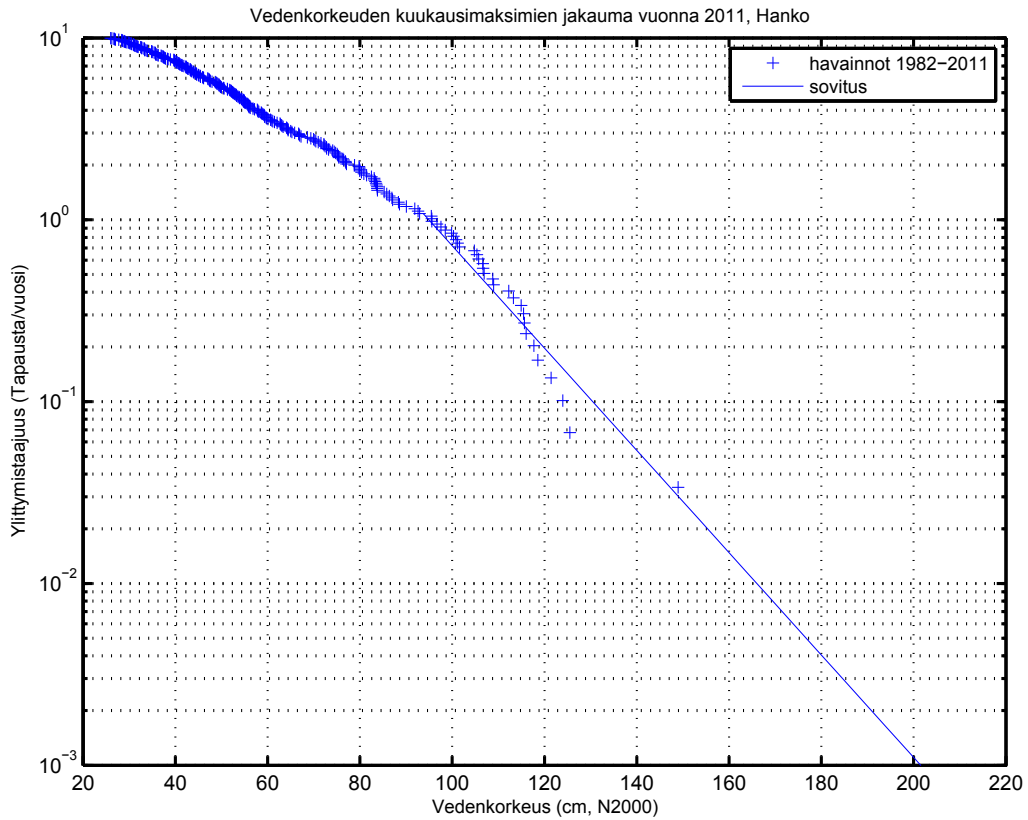
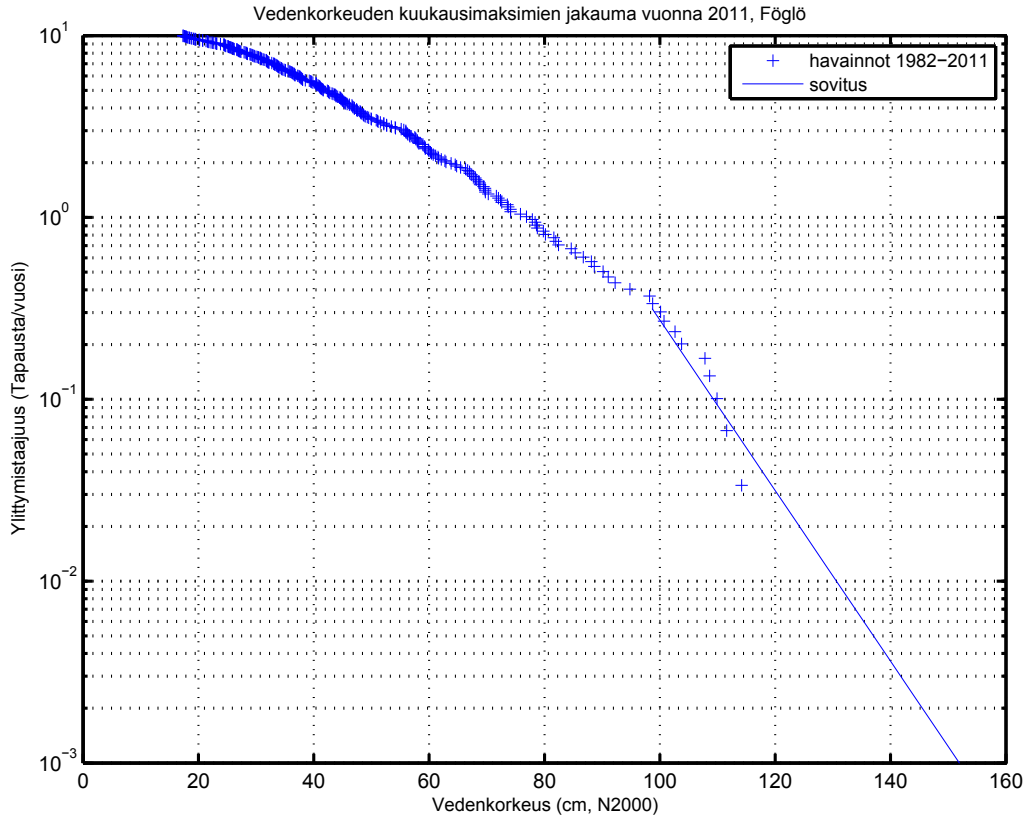


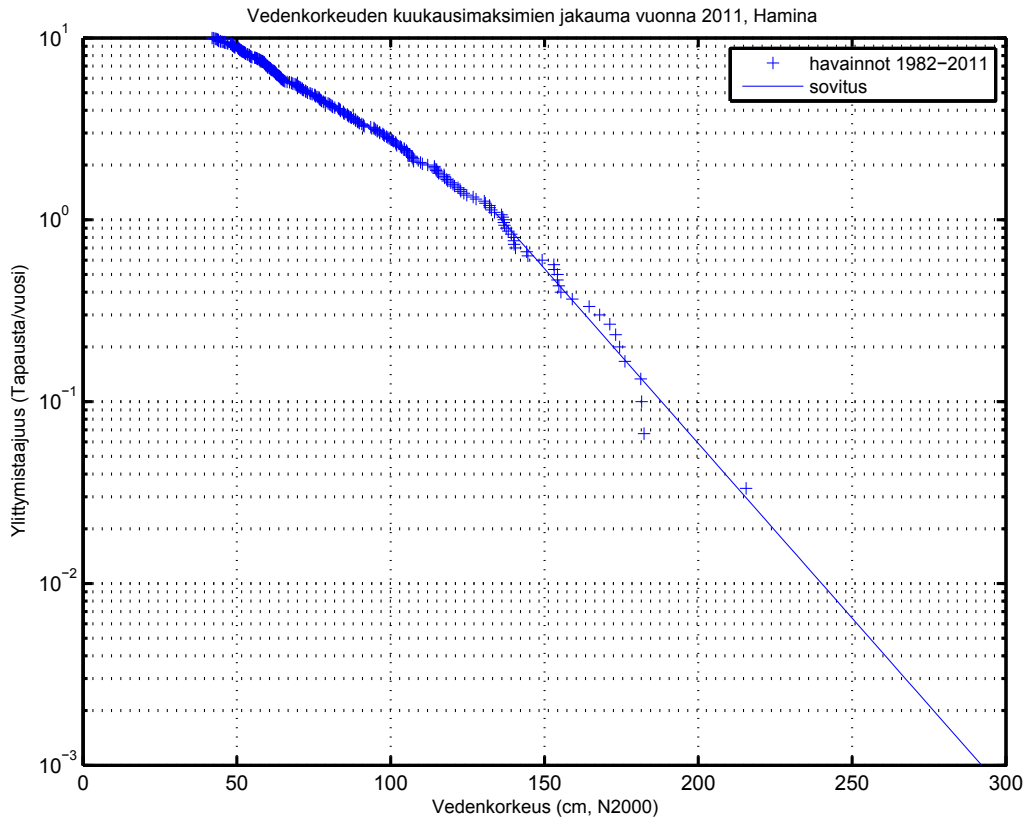
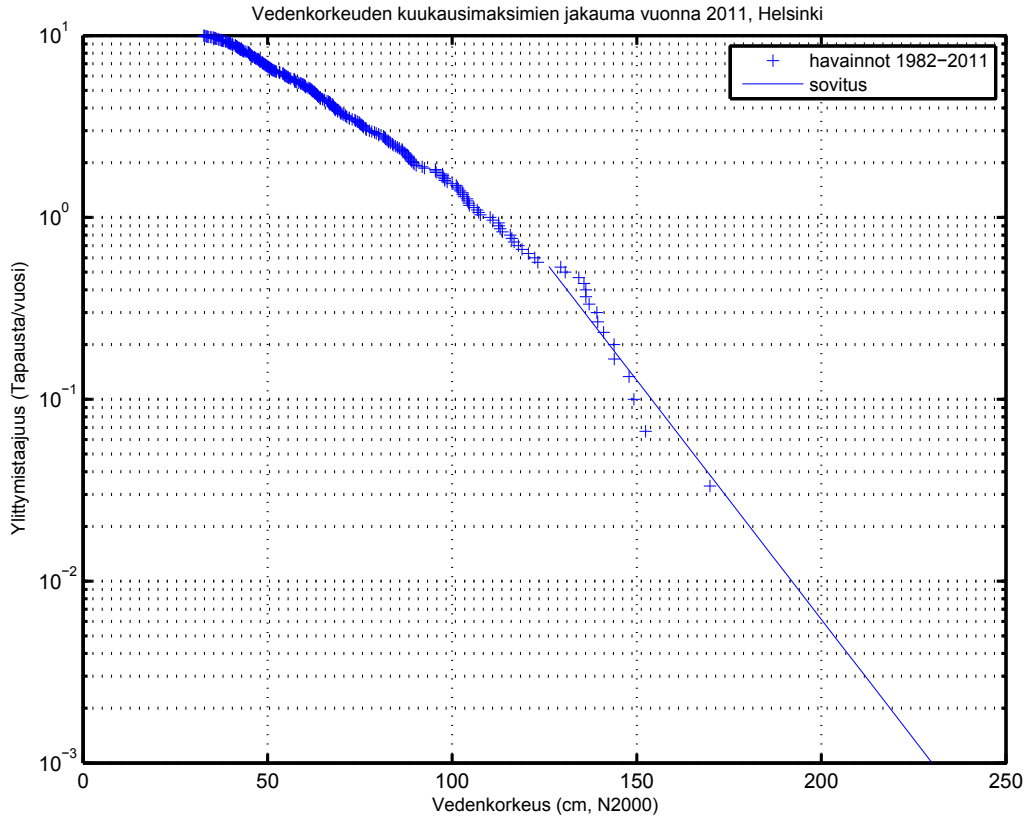












Liite 2. Ylittymistodennäköisyydestä ja toistumisajasta

Tarkastellaan vedenkorkeuden ylittymistodennäköisyyksiä, jotka muuttuvat ajan funktiona. Tiettyinä ajanhetkenä t vedenkorkeuden z ylittymiselle on olemassa todennäköisyysjakauma

$$F(z, t); \quad 0 < F(z, t) < 1, \quad F(-\infty, t) = 1, \quad F(\infty, t) = 0 \quad (1)$$

Tässä työssä laskettiin tällaiset todennäköisyysjakaumat. Ne koostuvat lyhytaikaisvaihteluiden jakaumasta sekä keskivedenkorkeuden skenaariorista epävarmuuksineen. Koska keskiveden skenaario muuttuu ajan myötä, myös jakauma riippuu ajasta.

Tarkastellaan ajanjaksoa T_0 , jossa peräkkäisiä vedenkorkeustapahtumia on N kpl. Esimerkiksi M vuoden aikajaksolla kuukausimaksimeita on $N = 12 \times M$ kappaletta. Vedenkorkeusarvon z ylittymisriskiä voidaan tarkastella useilla tavoilla.

1. Ylittymistodennäköisyys

Todennäköisyys sille, ettei vedenkorkeusarvoa z ylitetä lainkaan tarkastelujaksolla, on

$$F_0(z) = \prod_{i=1}^N (1 - F(z, t_i)) \quad (2)$$

jolloin todennäköisyys sille, että vedenkorkeusarvo z ylipäättään ylitetään, on

$$F_{tot}(z) = 1 - F_0(z) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - F(z, t_i)) \quad (3)$$

mutta $F_{tot}(z)$ ei kerro, kuinka monta kertaa ylitys tapahtuu.

2. Keskimääräinen ylittymislukumäärä

Todennäköisyys sille, että vedenkorkeusarvo z ylitetään k kertaa, saadaan binomijakaumasta. Kun $k = 0$, saadaan kaava 2. Sille että arvo z ylitetään kerran, kaksi tai kolme kertaa, todennäköisyydet ovat

$$F_1(z) = \prod_{i=1}^N (1 - F(z, t_i)) \sum_{i=1}^N \frac{F(z, t_i)}{1 - F(z, t_i)} \quad (4)$$

$$F_2(z) = \prod_{i=1}^N (1 - F(z, t_i)) \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{F(z, t_i)}{1 - F(z, t_i)} \sum_{j=i+1}^N \frac{F(z, t_j)}{1 - F(z, t_j)} \right) \quad (5)$$

$$F_3(z) = \prod_{i=1}^N (1 - F(z, t_i)) \sum_{i=1}^{N-2} \left(\frac{F(z, t_i)}{1 - F(z, t_i)} \sum_{j=i+1}^{N-1} \left(\frac{F(z, t_j)}{1 - F(z, t_j)} \sum_{h=j+1}^N \frac{F(z, t_h)}{1 - F(z, t_h)} \right) \right) \quad (6)$$

Vastaavasti voidaan laskea jokaisen mahdollisen ylittymislukumäärän $k \leq N$ todennäköisyys $F_k(z)$. Vedenkorkeuden z ylittymisten keskimääräinen lukumäärä tarkastelujaksolla on

$$k_m(z) = \sum_{k=0}^N k F_k(z) \quad (7)$$

2. Ylittymistaajuus

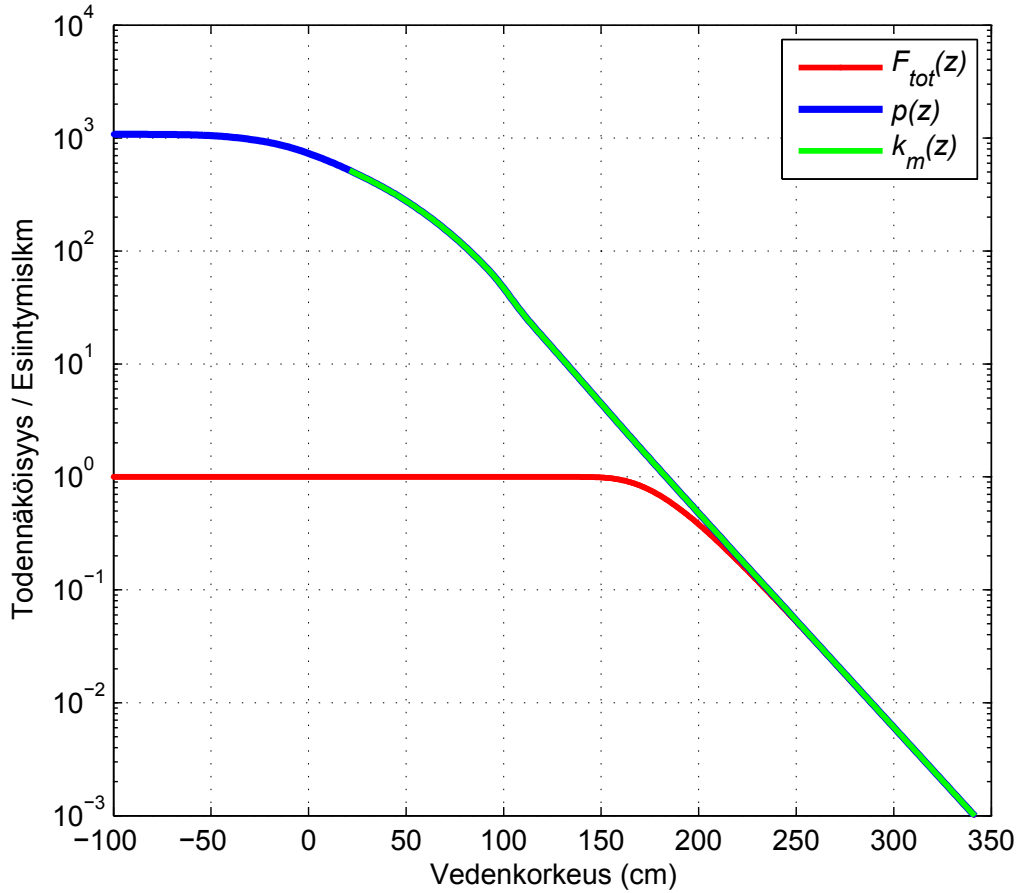
Tässä työssä vedenkorkeusarvon z ylittymistaajuus tietyllä aikajaksolla laskettiin seuraavasti:

$$p(z) = \sum_{i=1}^N F(z, t_i); \quad 0 < p(z) < N, \quad p(-\infty) = N, \quad p(\infty) = 0 \quad (8)$$

missä aikariippuvaiset todennäköisyysjakaumat $F(z, t_i)$ laskettiin yhteen tarkastelujakson yli. Kuvassa L1 tarkastellaan näin määritellyn ylittymistaajuuden $p(z)$ yhteyttä edellä esitettyihin ylittymistodennäköisyyteen ja keskimääräiseen ylittymislukumäärään.

Koko tarkasteluvälillä $p(z) = k_m(z)$, eli ylittymistaajuus $p(z)$ kuvaa vedenkorkeuden z ylittymisten lukumäärän keskiarvoa. Voidaan siis puhua esim. arvosta joka ”keskimäärin ylitetään 0,4 kertaa tarkastelujakson aikana”, kun tarkoitetaan arvoa jolle $p(z) = 0,4$.

Harvinaisille vedenkorkeuksille, joille $p(z) \ll 1$, sekä keskimääräinen ylittymislukumäärä että ylittymistaajuus yhtyvät ylittymistodennäköisyyteen.



Kuva L1. Todennäköisyys sille että vedenkorkeus z ylitetään, $F_{tot}(z)$, keskimääräinen ylittymislukumäärä $k_m(z)$ sekä ylittymistäajuus $p(z)$ laskettuna eräästä vedenkorkeusjakauma-aineistosta.

4. Toistumisajasta

Toistumisajan käsite ei ole selkeästi määritelty tilanteessa, jossa todennäköisyysjakauma $F(z, t)$ muuttuu ajan funktiona. Eräänlaisena ”toistumisaikana” vedenkorkeudelle z voidaan kuitenkin käyttää sitä jaksonpituutta T , jonka aikana z keskimäärin ylittyy yhden kerran, eli $k_m(z) = p(z) = 1$.

Tarkastellaan arvoa z_1 , jolle $p(z_1, T_0) = 1/Y$ jaksolla T_0 , missä Y on jokin luonnollinen luku. Tällöin voidaan ottaa Y kpl samanlaisia jaksoja T_n , joiden aikana $F(z, t)$ muuttuu samalla tavalla kuin jakson T_0 aikana. Kaavaa 8 soveltaen on siis

$$p(z, T_{1+2+\dots+Y}) = \sum_{n=1}^Y p(z, T_n) = Y p(z, T_0) \quad (9)$$

mistä seuraa, että vedenkorkeuden z_1 ylittymistäajuus $p(z_1, T_{1+2+\dots+Y}) = 1$, eli arvon z_1 toistumisaika on jakson kokonaispituus $Y T_0 = T_0/p(z_1, T_0)$.

Tällöin voidaan sanoa, että esim. vuosina 2012–2100 keskimäärin 0,1 kertaa ylittyvän arvon ($k_m(z) = p(z) = 0,1$) toistumisaika on 890 vuotta. Tämä tarkoittaisi, että jos luonnossa esiintyisi peräkkäin kymmenen vuosien 2012–2100 kaltaista 89 vuoden ajanjaksoa, arvo z_1 ylittyisi keskimäärin yhden kerran.

Toisaalta voidaan tarkastella aikajaksoa T_0 , jossa arvon z_1 ylittymistäajuus $p(z_1, T_0) = Y$, missä luonnollinen luku $Y > 1$. Ajatellaan, että jakso voitaisiin jakaa Y samanmittaiseen osajaksoon, joiden jokaisen aikana $F(z, t)$ käyttäytyisi samoin. Tällöin olisi

$$p(z, T_0) = \sum_{n=1}^Y p(z, T_n) = Y p(z, T_n) \quad (10)$$

kun $p(z, T_n)$ ei riipu n :stä. Eli $p(z_1, T_n) = p(z_1, T_0)/Y = 1$. Jälleen arvon z_1 toistumisaika on siis $T_0/Y = T_0/p(z_1, T_0)$. Eli voidaan määritellä laskennallinen toistumisaika

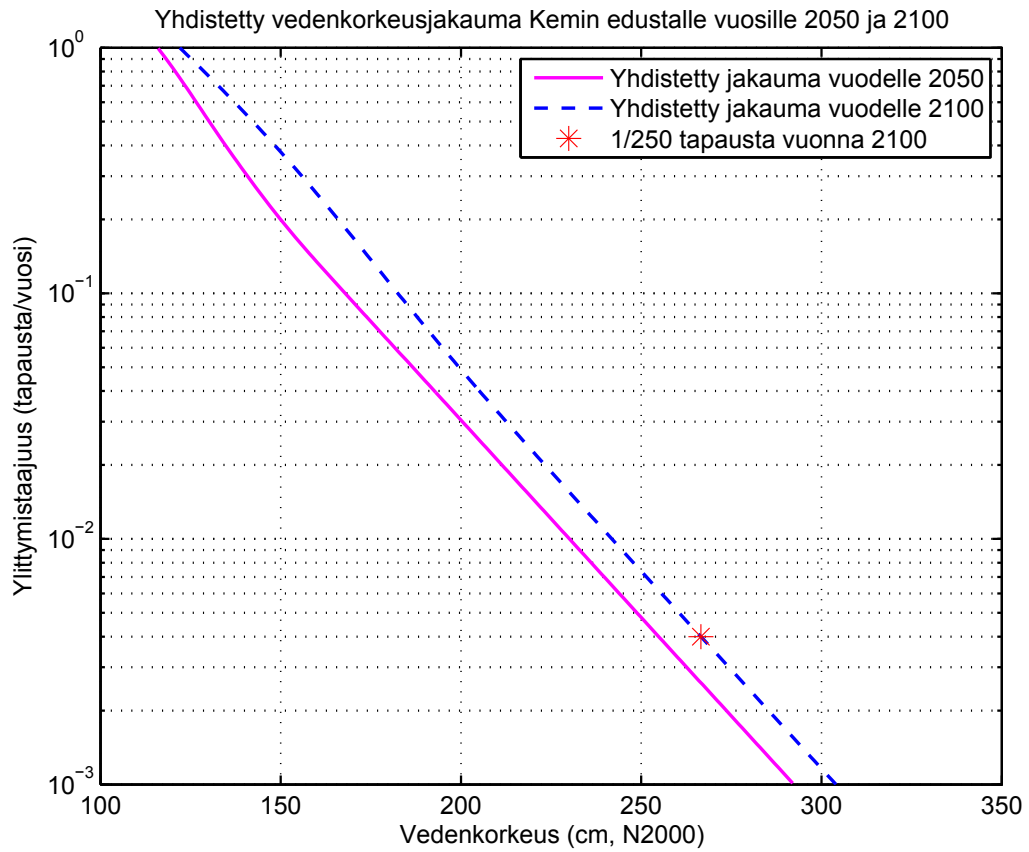
$$T_R(z) = \frac{T_0}{p(z, T_0)} \quad (11)$$

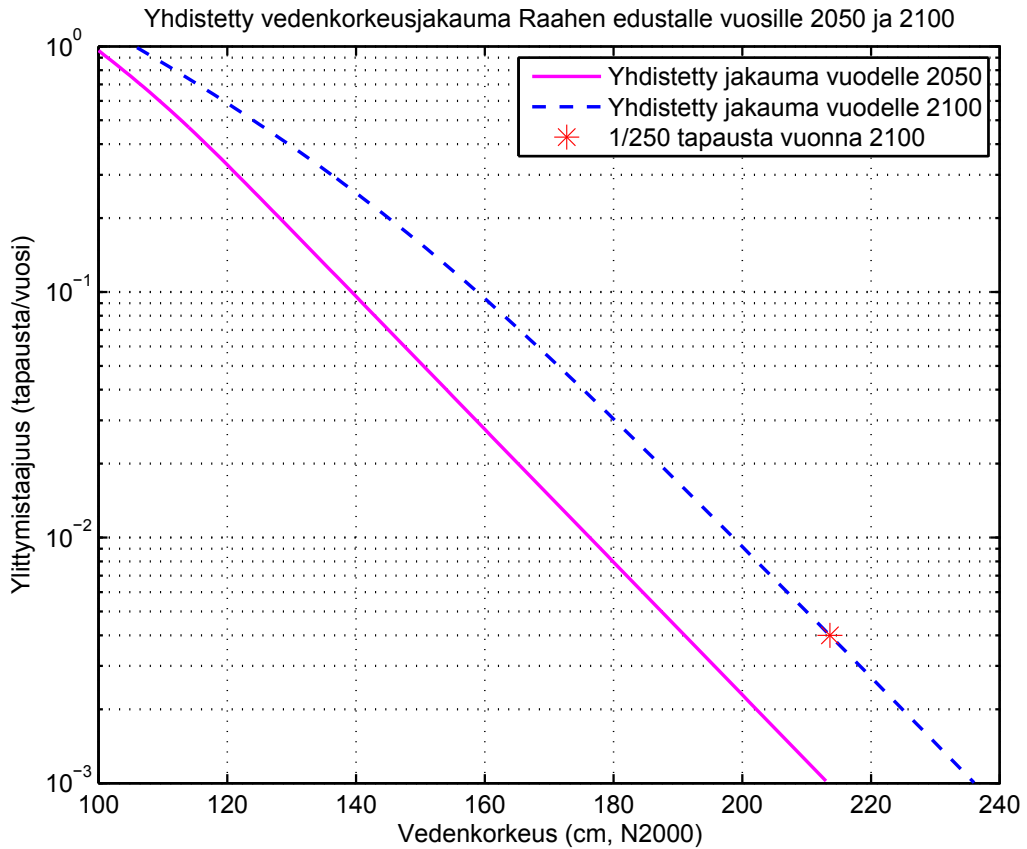
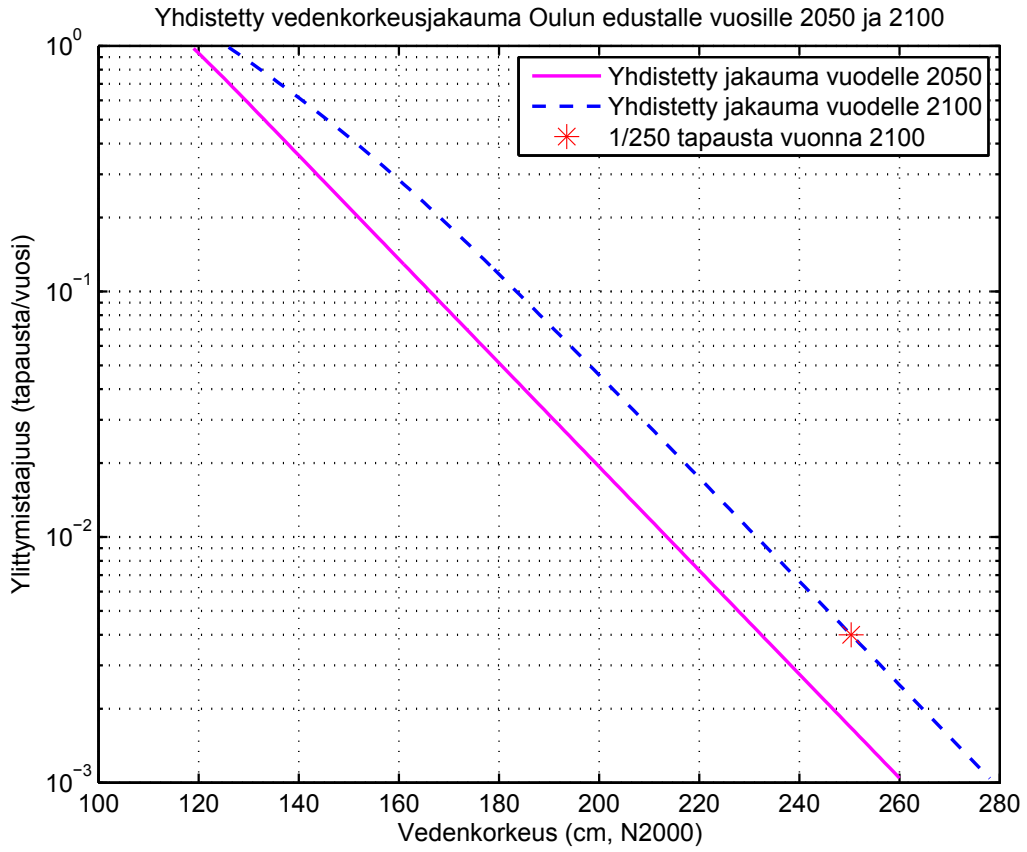
missä T_0 on tarkastelujakson pituus ja $p(z, T_0) = k_m(z, T_0)$ arvon z ylittymistäajuus tai keskimääräinen ylittymislukumäärä kyseisellä jaksolla.

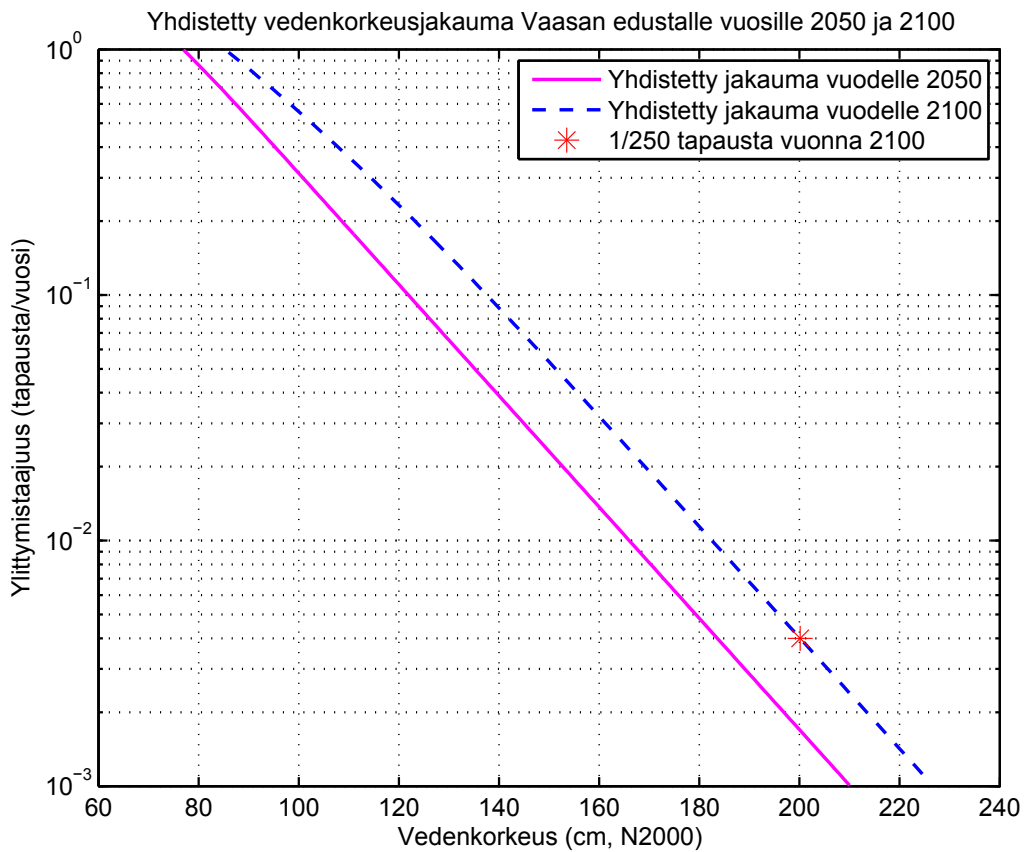
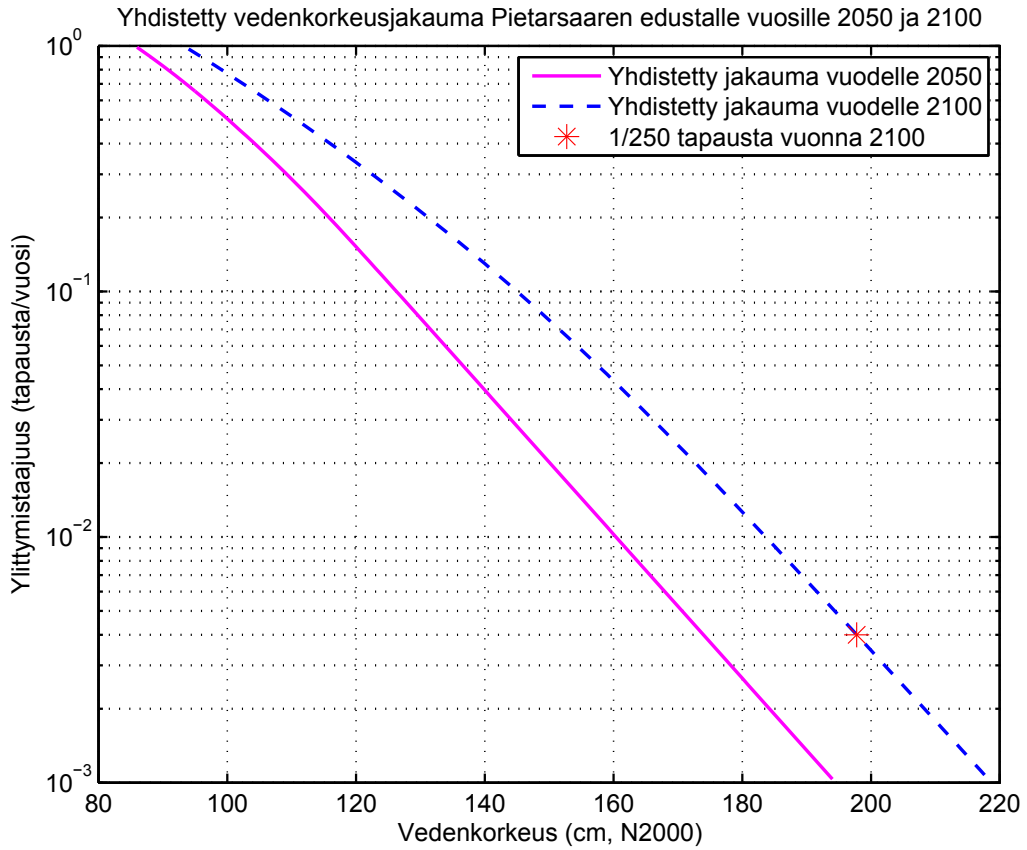
Laskennallinen toistumisaika T_R ei vastaa mitään todellista ajanjaksoa silloin kun todennäköisyysjakauma $F(z, t)$ muuttuu ajan funktiona. Kun $T_R > T_0$, on oletettavaa, ettei luonnossa esiinny sellaista T_R -pituista aikajaksoa, jonka aikana olosuhteet toistuisivat samanlaisina kuin tarkastelujaksolla T_0 . Toisaalta kun $T_R < T_0$, ei aikajaksoa T_0 yleensä voida jakaa sellaisiin lyhyempiin T_R -pituisiin osajaksoihin, joista jokainen tai yksikään olisi olosuhteiltaan ”samanlainen kuin koko jakso T_0 keskimäärin”. Toistumisajalla on siis todellista aikajaksoa vastaava merkitys ainoastaan kun $T_R = T_0$.

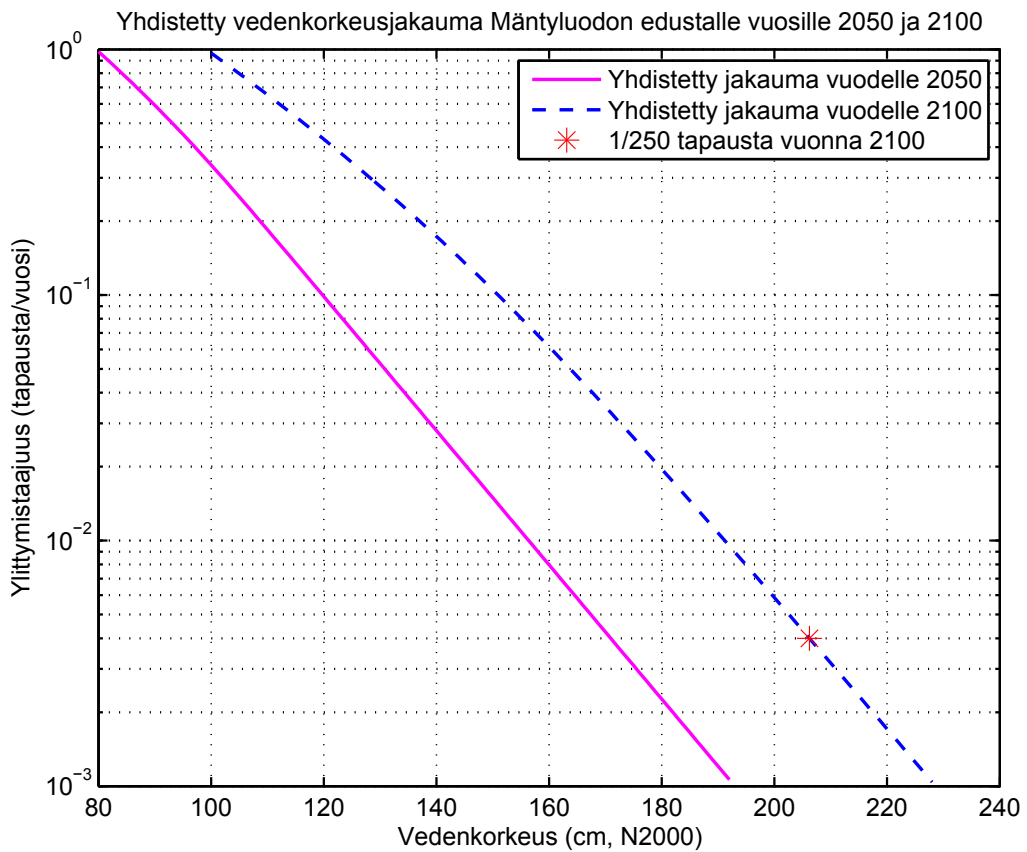
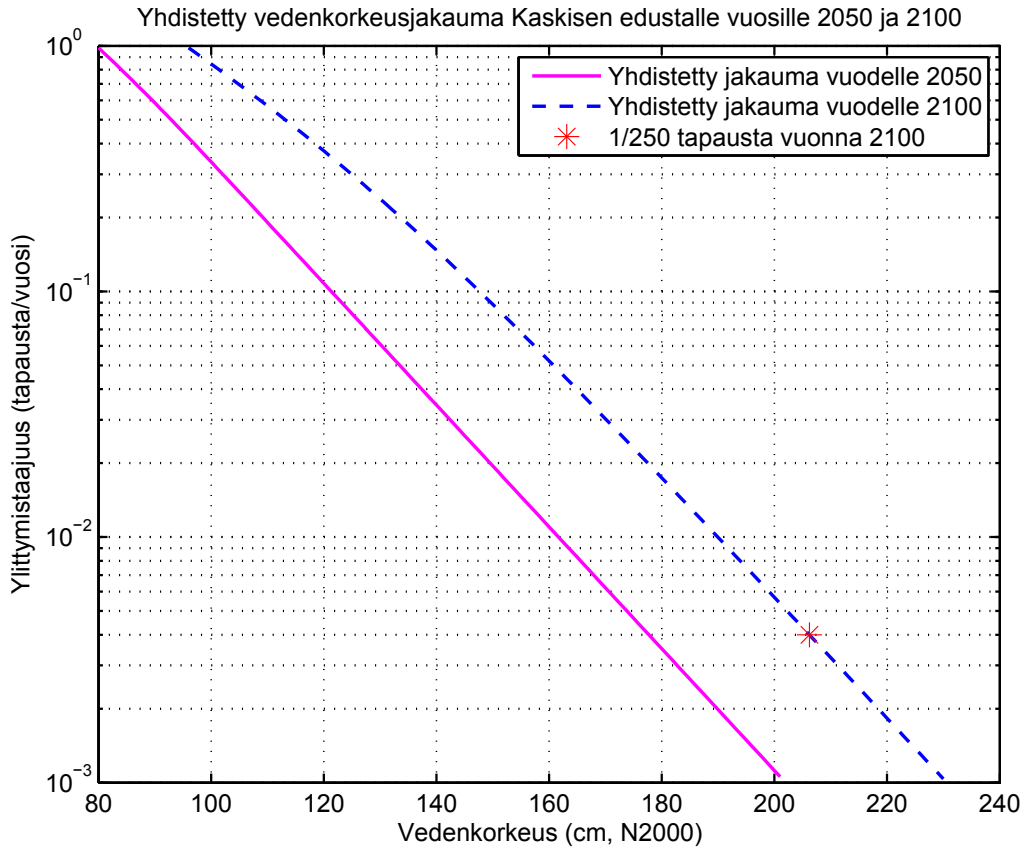
Liite 3. Yhdistetyt vedenkorkeusjakaumat vuosille 2050 ja 2100

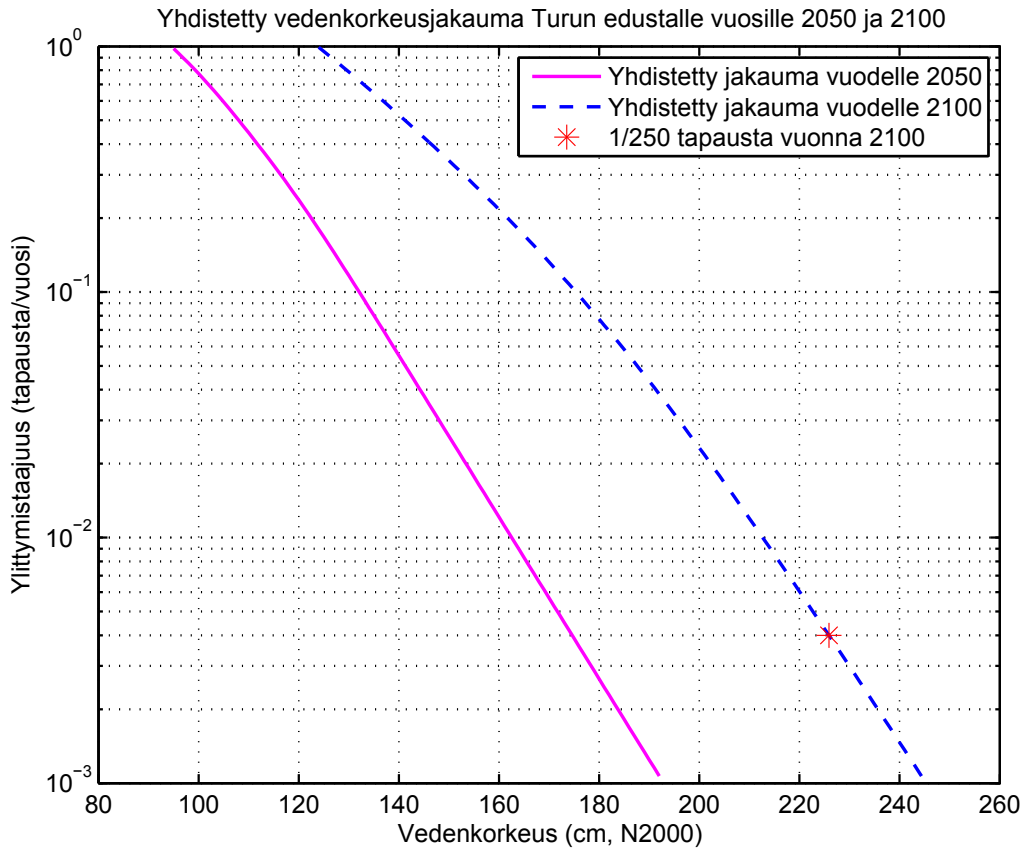
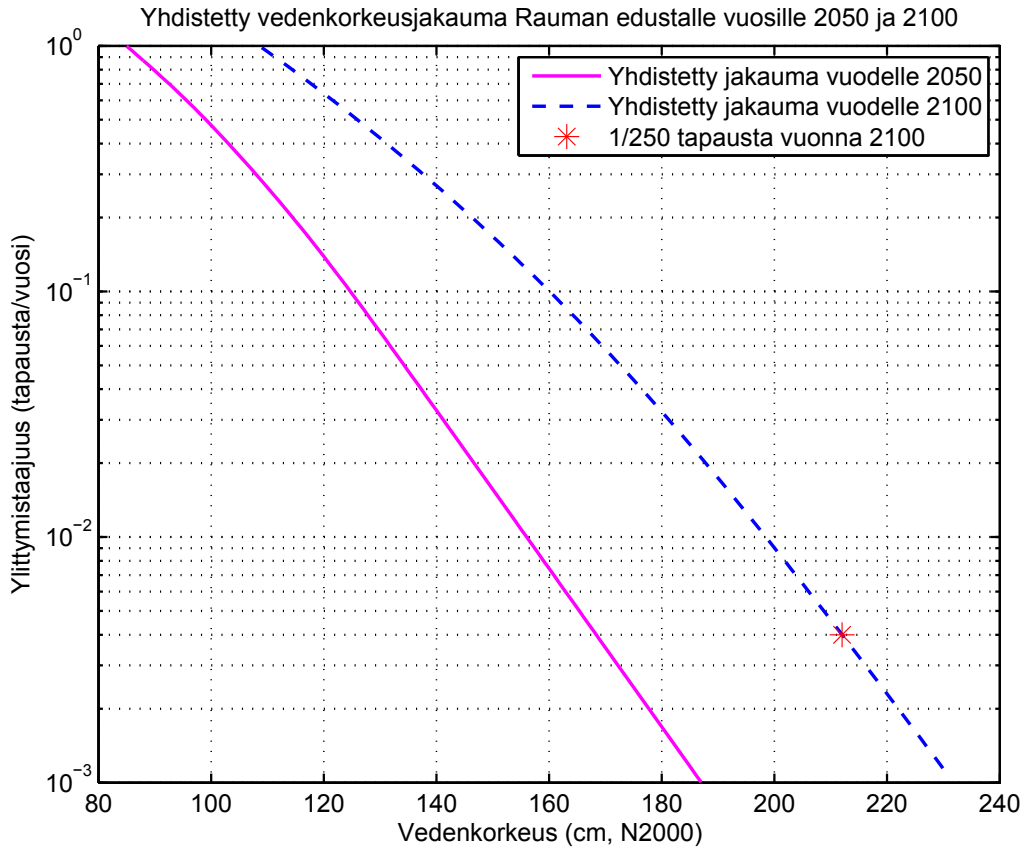
Yhdistetyillä vedenkorkeusjakaumilla kuvataan keskiveden pitkäaikaisen muutoksen ja vedenkorkeuden lyhytaikaisvaihtelun yhteisvaikutusta.

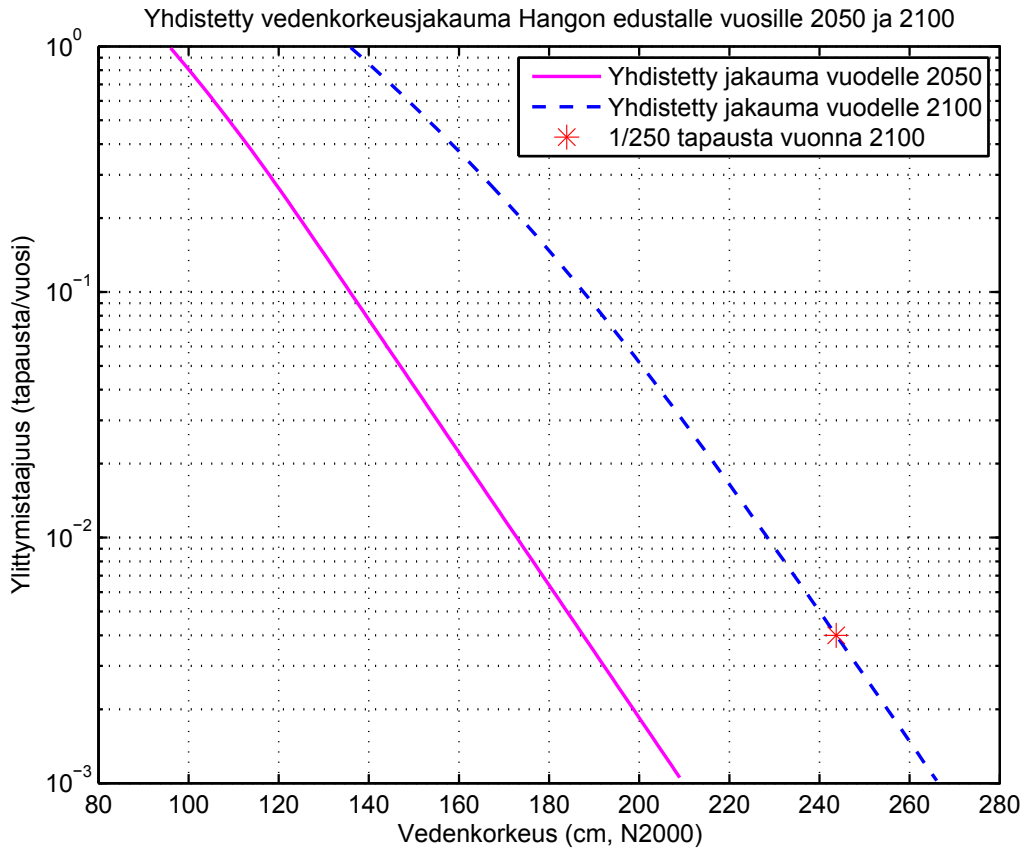
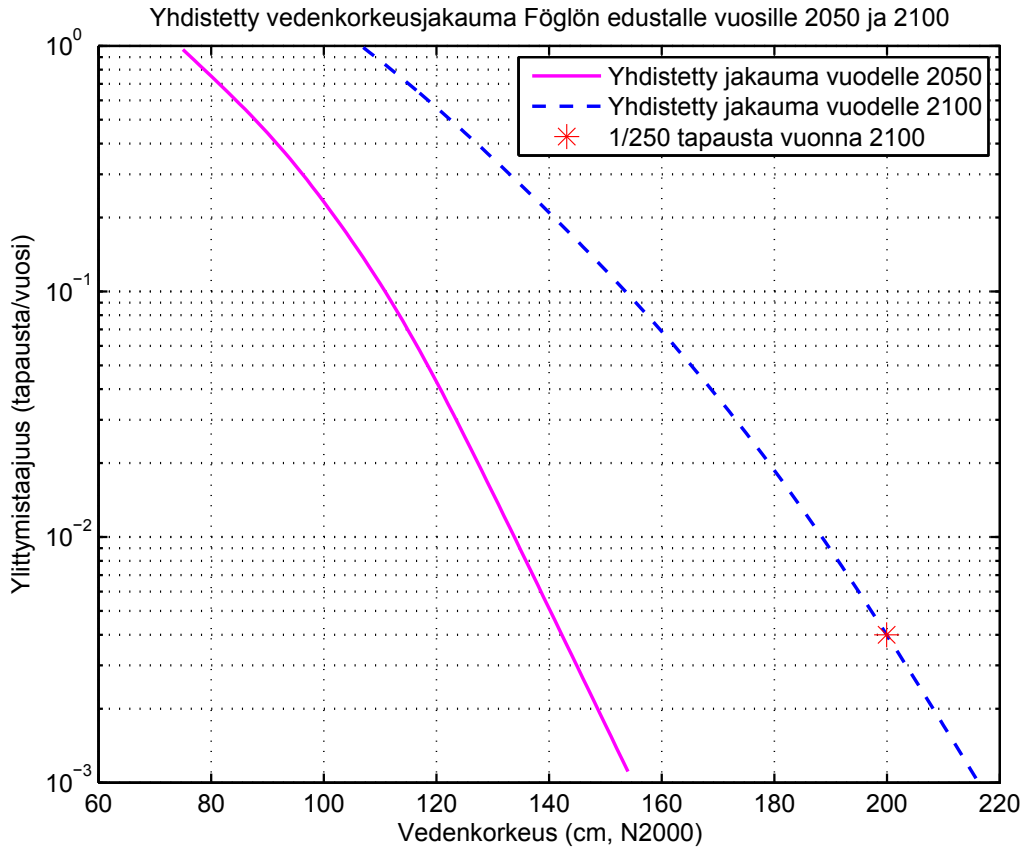


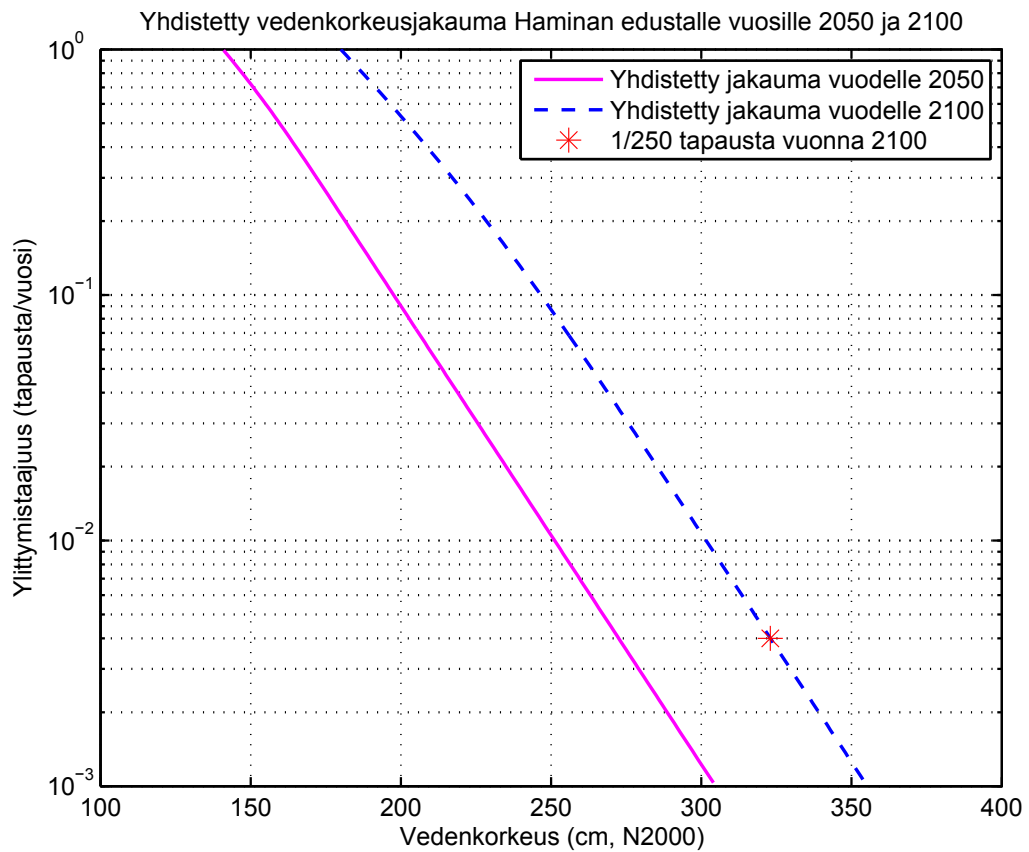
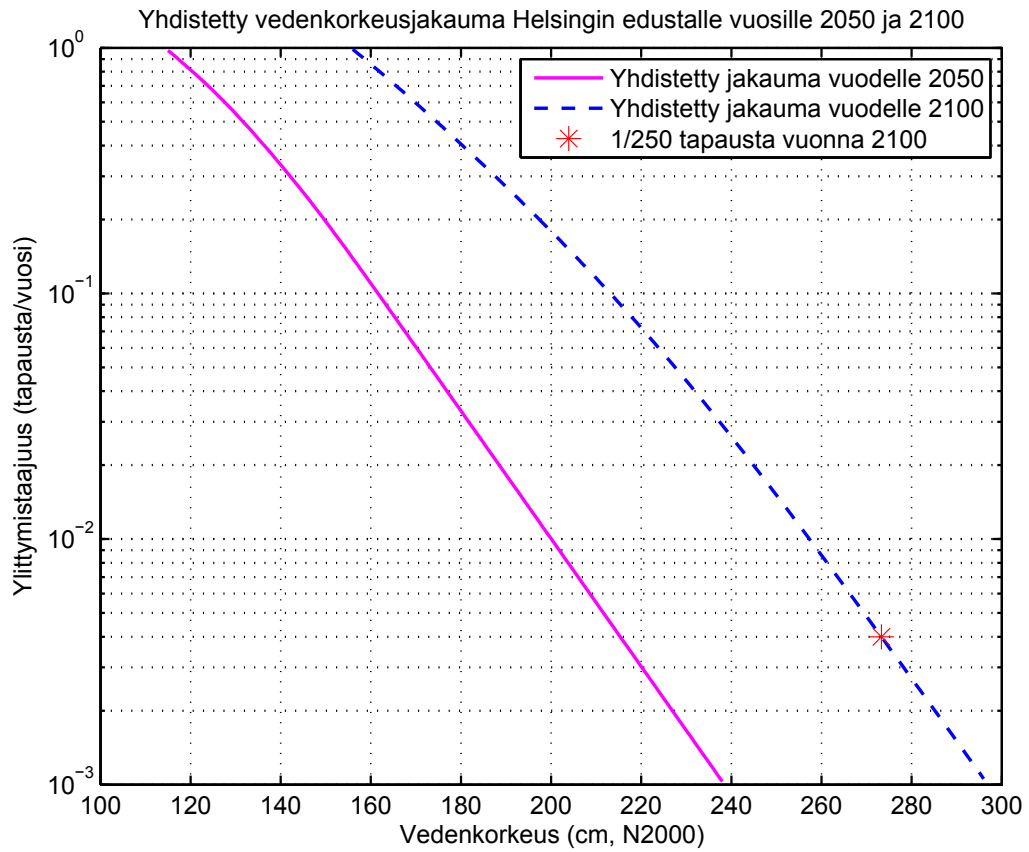












Liite 4. Mareografien sijainnit

Mareografi/paikka	Lat.	Lon.
Kemi/Ajos	65°40.402'	24°30.915'
Oulu/Toppila	65°02.419'	25°25.094'
Raahe/Lapaluoto	64°39.980'	24°24.423'
Pietarsaari/Leppäluoto	63°42.514'	22°41.375'
Vaasa/Vaskiluoto	63°04.892'	21°34.271'
Kaskinen/Ådskär	62°20.637'	21°12.890'
Mäntyluoto/Kallo	61°35.663'	21°27.806'
Rauma/Ulko-Petäjäs	61°08.012'	21°25.549'
Turku/Ruissalo	60°25.697'	22°06.032'
Föglö/Degerby	60°01.913'	20°23.089'
Hanko/Lilla Kolaviken	59°49.372'	22°58.595'
Helsinki/Kaivopuisto	60°09.218'	24°57.373'
Hamina/Pitäjänsaari	60°33.766'	27°10.752'

Mitattu GPS:llä 2011, koordinaattijärjestelmässä WGS84.

Ilmatieteen laitos
Erik Palménin aukio 1, Helsinki
tel. 029 539 1000
www.ilmatieteenlaitos.fi

ISBN 978-951-697-833-1 (NID.)
ISBN 978-951-697-834-8 (PDF)
ISSN 0782-6079

Unigrafia
Helsinki 2014