

**YHTEENVETO:** Tässä artikkelissa käsitellään lumen vesiarvoja ja tuulen nopeuksia tilastollisesti. Päähuomio on kiinnitetty tuloksien esittämiseen. Käytettyjen tilastollisten menetelmien osalta on viitattu kirjallisuuteen. Mittaustulosten vuosimaksimeille on etsitty teoreettisia todennäköisyysjakautumia. Gumbel I jakautuman avulla on laskettu ennustearvoja. Artikkelit on tiivistelmä tutkimuksessa /10/ esitetystä kuormavaikutuksen tilastollisesta tarkastelusta.

#### JOHDANTO

Perinteisellä suunnittelulla rakenteiden varmuus määritetään deterministisesti, jolloin suunnitteluparametrit on valittu kiinteiksi luvuiksi. Koska luonnolliset ilmiöt ja prosessit sisältävät satunnaisuutta, ei deterministinen suunnittelu luo riittävää teoreettista pohjaa rakenteen varmuuden määrittämiseksi.

Todennäköisyysteorian avulla pystytään rakenne ja sen toiminta kuvaamaan matemaattisella mallilla, jolloin eri muuttujien satunnaisuus voidaan sisällyttää rakenneanalyysiin. Todellisuudessa ei kuitenkaan kaikkien muuttujien matemaattisia malleja pystytä määrittämään, mutta tämä ei sulje pois todennäköisyysteorian soveltuvuutta rakenteen varmuuden tutkimiseksi.

Rakenteiden luotettavuuden tarkasteluissa murtumistodennäköisyyksien laskeminen perustuu kuorma- ja kapasiteettiparametrien jakautumiin. Jos rajatilalle pystytään formuloimaan matemaattinen lauseke, saadaan kuorma- ja kapasiteettiparametrien jakautumista tai yhteisjakautumista rajatilan jakautuma ja rakenteen luotettavuus. Jos mitoitusparametreistä voidaan arvioida kustannusfunktio, voidaan todennäköisyysteorian lisäksi optimointimenelmiä käyttää kustannusten minimointiin.

Jäljempänä esitetään lumen vesiarvolle ja tuulen nopeudelle tilastoarvoja, soveliaita teoreettisia jakautumia ja Gumbel I jakautumalla laskettuja ennustearvoja. Kuormatutkimuksen tarkoituksena oli määrittää todennäköisyysteoreettisia tunnuslukuja rakenteiden luotettavuuden tarkastelua varten. Ennustearvoja voitaneen käyttää myös jo käytössä olevien suunnitteluarvojen kritisointiin.

## TÄRKEIMMÄT TODENNÄKÖISYYSJAKAUTUMAT LUMELLE JA TUULELLE

### Normaalijakautuma

Todennäköisyysteorian keskeisen raja-arvolauseen /1/ mukaan usean satunnaismuuttujan muodostaman lineaarifunktion jakautuma lähestyy normaalijakautumaa muuttujien jakautumisesta riippumatta, kun muuttujien lukumäärä kasvaa. Usean vaikutuksen yhteisvaikutus on siis normaalijakautunut, mistä syystä se onkin hyvin soveltuva rakenteen luotettavuutta määrittäessä. Huonona puolena on "häntien" ulottuminen äärettömyyteen, mikä ei useinkaan vastaa todellisuutta.

Normaalijakautuman tiheysfunktio on

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < x < +\infty, \quad (1)$$

missä jakautuman parametrit ovat keskiarvo  $\mu$  ja keskihajonta  $\sigma$ .

### Logaritminen normaalijakautuma

Satunnaismuuttuja  $X$  on logaritmisesti normaalijakautunut /1/, jos  $\ln X$  on normaalijakautunut. Tällöin tiheysfunktio on

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad 0 < x < \infty, \quad (2)$$

missä  $\lambda = E(\ln X)$  ja  $\xi = \sqrt{\text{Var}(\ln X)}$  ovat muuttujan  $\ln X$  keskiarvo ja keskihajonta.

Logaritmisesti normaalijakautunut muuttuja on positiivinen ja alhaalta päin rajoitettu. Nämä ominaisuudet ovat tärkeitä monille suureille kuten esimerkiksi aineen lujuudelle, jolla on tietty alaraja.

Parametrit  $\lambda$  ja  $\xi$  voidaan lausua keskiarvon  $\mu$  ja -hajonnan  $\sigma$  avulla seuraavasti

$$\xi = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)} \quad (3)$$

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right). \quad (4)$$

### Ekstreemijakautumat

Ekstreemien arvojen todennäköisyysteoreettisten tarkastelujen /2/, /3/, tehtävänä on analysoida havaittuja ääriarvoja ja ennustaa niitä lisää tie-

tyn todennäköisyyden tarkkuudella. Kyseisten tarkastelujen päämääränä on tutkia seuraavia asioita:

- 1) Onko havaituilla ekstreemiarvoilla tai niistä muodostetuilla standardimuuttujilla säännöllistä matemaattista käyttäytymistä, kuten esimerkiksi lineaarisuutta. Tällöin on usein helpompaa laatia tapahtumalle matemaattinen malli.
- 2) Pysyykö havaittu ekstreemiarvo matemaattisen mallin virherajojen sisäpuolella eli onko muuttujalla malliin nähden järkevä arvo. Jos laadittu matemaattinen malli on sopiva, sillä voidaan laskea ennustearvoja.

Edellä on tarkasteltu muuttujaa  $X$ , joka on oletettu tunnetuksi jakautumansa kautta. Näitä jakautumia voidaan pitää alkuperäisjakautumina. Muodostamalla useita alkuperäisjakautumien mukaisia joukkoja ja keräämällä näistä joukoista ekstreemiarvot saadaan pienimpien tai suurimpien arvojen jakautumia. Rajoituksina ekstreemiarvojen jakautumia muodostettaessa ovat alkuperäisjakautumien parametrien muuttumattomuus esimerkiksi ajan funktiona ja alkuperäisjoukkojen riippumattomuus toisistaan.

Ekstreemijakautuman muodostaminen alkuperäisjakautumasta lähtien on usein erittäin hankalaa. Usein tiedetään vain ekstreemiarvot, jolloin alkuperäisjakautumaa ei välttämättä tunneta. Voidaan kuitenkin osoittaa, että  $n:n$  saadessa suuria arvoja, ekstreemijakautumat lähestyvät asympotoottisia ekstreemijakautumia, joita on kolmea eri lajia.

Suurimman arvon I lajin asympotoottiseksi jakautumaksi eli Gumbelin I jakautumaksi on johdettu ns. kaksoisexponentiaalinen jakautuma /2/

$$F_{nn}(x) = \exp[-\exp^{-y}] \quad (5)$$

$$f_{nn}(x) = a_n \exp(-y - e^{-y}) \quad (6)$$

missä  $y = a_n(x - u_n)$ .

Kaavoissa parametrit  $a_n$  ja  $u_n$  riippuvat havaintojen lukumäärästä  $n$ . Termi  $u_n$  on karakteristinen ekstreemi. Termi  $a_n$  on ekstreeminen intensiteettifunktio.

## LUMIKUORMITUS

### Tilastoaineisto

Lumikuorman tilastoaineistona on käytetty Hydrologisen toimiston maan pinnalla suorittamia lumen vesi-arvon mittauksia /7/. Vesi-arvolla tarkoitetaan veden määrää [mm], jolloin se tarkoittaa myös lumen massaa [ $\text{kg/m}^3$ ]. Mittaustulokset on koottu toimiston kuukausijulkaisuista vuosil-

ta 1959 - 1981. Vesiarvomittaukset ovat alueellisia arvoja, jolloin mit-  
tauksia on suoritettu useista paikoista sekä aukealta että metsäiseltä  
alueelta viiden päivän välein. Näin ollen mittaustulokset ovat yksit-  
täisten mittausten keskiarvoja alueittain. Aluejako on esitetty kartas-  
sa 1.

Lähes jokaisen vuoden maksimivesiarvo esiintyy helmi-, maaliskuu tai huh-  
tikuun aikana. Taulukossa 1 on esitetty alueittain vesiarvojen vuosihui-  
put sekä vesiarvojen helmi-, maaliskuu- ja huhtikuun keskiarvot. Koko vuo-  
den maksimivesiarvot vaihtelevat 95:stä 190:een ja keskihajonnat 26:sta  
55:een. Runsaslumisia alueita ovat Itä- ja Pohjois-Suomi, vähälumisia  
taas rannikkoalueet ja Etelä-Suomi, joskin poikkeustapauksissa myös Etelä-  
Suomessa voi olla runsas lumipeite.

Taulukko 1. Vuosien 1959 - 1981 vuosittaiset lumen maksimivesiarvot ja  
kuukausittaiset maksimivesiarvojen keskiarvo sekä vastaavat  
hajonnat. Laadut [mm].

Alue	Koko vuosi		Helmikuu		Maaliskuu		Huhtikuu	
	X	$\sigma$	$X_K$	$\sigma$	$X_K$	$\sigma$	$X_K$	$\sigma$
1	166	41	130	40	157	41	164	42
2	145	39	118	31	138	38	141	43
3	147	39	119	33	141	40	143	42
4	125	37	103	30	120	36	120	43
5	125	39	101	30	119	36	119	43
6	122	38	100	31	119	38	116	44
7	120	55	99	50	115	55	105	56
8	123	39	99	34	117	39	114	44
9	108	43	87	37	104	42	98	47
10	107	39	87	33	102	40	101	42
11	95	37	78	32	93	37	86	42
12	113	31	92	27	109	31	104	40
13	124	34	103	28	118	32	119	38
14	178	35	139	35	165	33	177	35
15	163	36	127	30	154	34	162	35
16	165	33	132	31	156	32	165	34
17	190	35	150	34	177	31	189	34
18	137	27	162	28	180	35	180	35
19	188	33	137	27	156	31	168	33
20	178	34	139	27	162	29	178	35
21	150	26	120	24	137	25	149	26

Vuoden vesiarvomaksimi saavutetaan maalisi- tai huhtikuussa, mutta paikallisia eroja löytyy. Itä- ja Pohjois-Suomessa vesiarvomaksimi on pääosin maaliskuun lopussa tai huhtikuussa, kun taas rannikkoalueilla ja Etelä-Suomessa huiput esiintyvät jo helmikuun lopussa tai maaliskuussa.

Tilastoarvoisa huomataan, että alueilla, missä vesiarvomaksimit ovat suuria, keskihajonta on melko pieni verrattuna alueisiin, joissa vesiarvomaksimit ovat pieniä ja keskihajonta suuri.

Taulukossa 2 on lumikuormien alueellinen ero ilmaistu vuosien 1959 - 1981 vuotuisten huippuvesiarvojen keskiarvoilla ja -hajonnoilla. Ryhmään I kuuluu alueita Itä- ja Pohjois-Suomesta sekä Oulun läänistä, ryhmään II alueita Etelä-Suomesta ja ryhmään III Pohjanmaan rannikkoalueita. Perinteisesti lumisia alueita ovat Itä- ja Pohjois-Suomen alueet, joissa vuotuisten vesiarvomaksimien keskihajonta on pieni. Vähälumisia alueita ovat Etelä-Suomen alueet, joissa kyseiset keskihajonnat ovat suuria. Edellä mainituista alueista erottuu lisäksi rannikkoalueet, joissa vesiarvomaksimit ovat pieniä ja samoin keskihajonnat suhteellisen pieniä.

Taulukko 2. Lumen vesiarvojen alueellisia eroja.  
Laadut [mm].

Alue	Ryhmä I		Ryhmä II		Ryhmä III	
	$X_K$	$\sigma$	$X_K$	$\sigma$	$X_K$	$\sigma$
1	166	41				
2	145	39				
14	178	35				
16	165	33				
17	190	35				
19	188	33				
5			125	39		
7			120	55		
9			108	43		
10					107	39
11					95	37
12					113	31

#### Jakautuman tarkastelu

Lumikuorman jakautuman tutkimisessa on käytetty edellä selostettuja lumen vuotuisia maksimivesiarvoja, jotka on mitattu maassa. Todellisuudessa itse rakenteeseen vaikuttavat kuormat ovat poikkeavia maassa mitatuista. Tutkimusten /5/ ja /8/ mukaan katolla vaikuttava lumikuorma on noin 80 % maassa olevasta. Lisäksi rakennuksen laatu, kattomuoto sekä

tuuliolosuhteet vaikuttavat lumikuormaan, jolloin kuormitukselle on mahdollista suorittaa tilastollista tarkastelua. Riittävänä tilastoaineistona voidaan kuitenkin pitää maassa mitattuja arvoja, jolloin jakautuma määrätään lumen perusarvolle. Lopullinen lumikuorma rakenteelle saadaan deterministisessä mitoituksessa vähennys- ja muotokertoimilla.

Maassa suoritetuissa mittauksissa saattaa mittaustapa aiheuttaa virheen lumikuorman ennustearvoon. Lähteessä /5/ on verrattu kahden mittauspaikan vesi-arvoja. Pisteiden etäisyys oli 50 km ja ero vesi-arvoissa 30 %, joka johtuu osaksi mittausvirheistä. Tärkein syy eroon on kuitenkin mittauspaikkojen keskinäisessä erossa. Mittaustulokseen vaikuttaa maaston muoto, pintakasvillisuus ja aukean laajuus. Näin ollen jakautumia ja ennustearvoja määritettäessä olisi havaintoarvot laskettava useasta mittauksesta eri puolelta mittauspaikkaa. Lisäksi pienten alueiden paikalliset erikoisolosuhteet olisi kompensoitava laskemalla keskiarvot hiukan suuremmalle alueelle.

Suomessa esiintyville lumikuormille on todettu tutkimuksesta riippuen normaali-, log-normaali- tai Gumbelin I -jakautuman soveltuvan havaituille vuotuisille maksimivesiarvoille /5/, /4/.

Tässä tutkimuksessa valittiin kyseiset jakautumat tarkasteltaviksi. Gumbel I -jakautuman parametrit laskettiin havaintoarvoista pienimmän neliosumman menetelmällä. Redusoidusta muuttujasta laskettavat suureet  $E(S)$  ja  $\sigma_S$  riippuvat havaintoarvojen lukumäärästä. Lähteessä /2/ on taulukoituna näitä suureita, joita tässä käytettiin. Normaali- ja log-normaali-jakautumat määritettiin keskiarvon ja -hajonnan avulla. Testausmenetelmänä on käytetty todennäköisyyspaperia ja K-S-testiä. Jakautumien ja testausmenetelmien matemaattista taustaa on käsitelty tarkemmin tehdyssä tutkimuksessa ja lähteissä /1/, /2/.

Todennäköisyyspapereista huomattiin jakautumittain seuraavaa:

- normaalijakautuma soveltuu melko hyvin havaintoarvoihin, jotka ovat pienimmästä suurempaan lähellä lineaarista suoraa. Tarkimmin normaalijakautuma soveltuu pieniin ja keskimääräisiin arvoihin, suurten arvojen ollessa melko kaukana suorasta. Lumikuorman ennustearvoja ajatellen normaalijakautuma antaa epävarmalla puolella olevia arvoja.
- log-normaalijakautuma soveltuu myös melko hyvin havaintoarvoihin. Pienillä arvoilla havaintoarvot ovat kaukana suorasta, joten jakautuma soveltuu huonosti tällä alueella, mutta tarkentuu kuitenkin keskimääräisillä ja suurilla arvoilla. Juuri tämä ominaisuus tekee log-normaalijakautumasta käyttökelpoisen, koska kuormaparametreissa suuret arvot ovat vaarallisia. Ennustearvoja ajatellen log-normaalijakautuma antaa hyviä havaintoaineistoon pohjautuvia arvoja.
- Gumbel I -jakautuma soveltuu erittäin hyvin tilastoaineistoon. Gumbelin jakautumaa voidaan pitää tarkkana sekä pienillä että suurilla ar-

voilla. Lisäksi suuret arvot ovat varmalla puolella, mikä on tärkeää ennustearvojen kannalta.

Kaikki kolme jakautumaa soveltuvat lumikuorman havaintoarvoihin; parhaiten kuitenkin Gumbel I -jakautuma. Samaan tulokseen on päädytty myös lähteessä /5/. Lähteessä /4/ on normaalijakautuman todettu parhaiten soveltuvan havaintoaineistoon.

K-S-testin avulla on pyritty määrittämään normaali-, log-normaali- ja Gumbel I -jakautuman suhteellista paremmuutta numeerisesti. Tuloksista havaittiin, että mikäli merkitsevyytasoksi asetetaan 20 % niin kaikki jakautumat ovat hyväksyttäviä. Jos tarkastellaan sekä pieniä että suuria arvoja, normaali- ja Gumbel I -jakautuma ovat yhtä hyviä, log-normaali-jakautuman ollessa huonoin, koska sen virhetermi  $D_n$  on suurin pienillä arvoilla. Mutta tarkastelemalla suurien arvojen virhetermien  $D_n$  summia todennäköisyysvälillä 0,5 - 0,957, log-normaali- ja Gumbel I -jakautuma ovat erittäin tarkkoja ja soveltuvat siten ennustearvojen laskemiseen.

Kuormavaikutuksen satunnaismuuttujan teoreettiselta jakautumalta vaaditaan tarkkuutta keskisuurten arvojen lisäksi suurien arvojen kohdalla. Näin ollen edellä suoritettujen jakautumatestien perusteella Gumbel I -jakautuma soveltuu parhaiten Suomen lumikuormiin.

Jakautuman matemaattisiksi lausekkeiksi saadaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Alue 1: } F_L &= \exp(-\exp(-0,02637(X-145,96))) \\
 \text{Alue 14: } F_L &= \exp(-\exp(-0,03089(X-160,90))) \\
 \text{Alue 7: } F_L &= \exp(-\exp(-0,01965(X-93,12))) \\
 \text{Alue 8: } F_L &= \exp(-\exp(-0,02772(X-103,34)))
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

#### Ennustearvojen määrittäminen

Gumbelin mukaan vesijakautuman ollessa eksponentiaalista tyyppiä, voidaan jakautuman parametrit määrittää vuosimaksimiarvoille. Hydrologiset suureet ovatkin jakautumaltaan eksponentiaalisia, joten parametrit voidaan määrittää vuosihuipuista /2/, /5/. Kun jakautuman parametrit  $a$  ja  $u$  tunnetaan, saadaan toistumisajan  $T(X)$  ja kumulatiivisen todennäköisyyden  $P(X)$  yhteyden avulla  $T(X)$ :n kuluttua saavutettava ennustearvo  $X$ . Todennäköisyyden  $P(X)$  ja toistumisajan  $T(X)$  välillä on yhteys (8).

$$T(X) = \frac{1}{1-P(X)} .
 \tag{8}$$

Tutkimuksessa valittiin  $T(X)$ :lle ajat 30, 50, 150 ja 200 v, joille ennustearvot laskettiin. Varmuusrajat laskettiin kaikille havaintoarvoille tietokoneohjelmalla. Varmuusrajat on määritetty siten, että havaintoarvo

jää rajojen sisäpuolelle todennäköisyydellä 0,638 /2/. Lähteessä /2/ on esitetty seikkaperäisesti varmuusrajojen konstruointiteoria.

Havaintoarvojen jäädessä varmuusrajojen sisäpuolelle voidaan lineaarista suoraa jatkaa ennustearvojen laskemiseksi. Laskentatuloksista kävi ilmi, että havaintoarvot pysyttelevät varmuusrajojen sisäpuolella lähes poikkeuksetta. Ainoastaan pienissä lumikuormissa on pieniä rajan ylityksiä. Keskiuurien ja suurten kuormien kohdalla jakautuma onkin jo erittäin tarkka, mikä ilmeni jo aikaisemmin. Tuloksiin nojautuen voidaan Gumbel I -jakautumaa käyttää lumen vesiarvojen ennustearvojen laskemiseen.

Ennustearvot ovat lasketut 30, 50, 150 ja 200 vuoden toistumisajoille ja ne on laskettu tietokoneohjelmalla kaikille 21 alueelle. Tulokset ovat taulukossa 3. Ennustearvoille on laadittu myös varmuusrajat, jotka on kirjoitettu ylä- ja alapuolelle vastaten ylä- ja alarajaa.

Tutkimuksessa käytettiin myös tasajakoista asteikkoa toistumisajalle ja vesiarvolle. Eri ennusteaikoja vastaavat lumen vesiarvot kasvavat lyhyellä ennustejalla voimakkaasti ja kasvu pienenee pitkällä ennustejaksoilla.

Havaintoarvojen keskihajonnalla on voimakas vaikutus ennustearvoon. Taulukkoon 4 on koottu toisistaan keskihajonnan ja -arvon suhteen poikkeavia ennustearvoja. Kuten tuloksista huomataan suuri hajonta kasvattaa ennustearvoja laajentaen samalla ennusterajoja. Suuri keskihajonta ja pieni havaintoarvojen keskiarvo voi antaa saman ennustearvon kuin pienempi hajonta ja suurempi keskiarvo. Tästä syystä alueelliset erot ennustearvoissa pienenevät Etelä-Suomen havaintoarvojen suuresta keskihajonnasta johtuen.

Kuten jakautumatestien yhteydessä todettiin Gumbel I -jakautuma näyttäisi ennustavan varmalla puolella olevia arvoja. Näin ollen riittävän suuri lumikuorman perusarvo saadaan 30 tai 50 vuoden arvoista. Valittaessa ennustearvoa suunnitteluarvoksi tulisi vanhat suunnitteluarvot ottaa huomioon, jolloin 30 v:n ennustearvo näyttäisi sopivan karakteriseksi arvoksi.

Kartassa 1 on esitetty maassa mitatut lumen 30 vuoden ennustearvot. Itä-Suomen, Kuusamon ja Lapin läänin alueella vesiarvot vaihtelevat 252...283 mm:n Keski-Suomen ennustearvojen ollessa 222...250 mm:n välillä. Rannikkoalueilla on hivenen pienempiä vesiarvoja, jotka vaihtelevat välillä 193...195 mm. Poikkeuksen muodostaa Etelä-Suomi, jossa - johtuen suurista havaintoarvojen keskihajonnoista - saadaan suuria ennustearvoja, jotka vaihtelevat 222...265 mm:iin.

Lumikuorman arvo rakennuksien katoilla saadaan kertomalla maassa mitatut arvot 0,8:lla.



Taulukko 3. Lumen vesiarvon ennustearvot virherajoineen.

Alue	S	$X_K$	$X_{30}$	$X_{50}$	$X_{150}$	$X_{200}$
1	41	166	226.384	235.4	254.653	259.678
			274.312	293.942	335.863	346.804
			322.239	352.483	417.073	433.93
2	39	145	202.439	211.014	229.329	234.109
			248.028	266.7	306.577	316.984
			293.618	322.386	383.825	399.86
3	39	147	204.439	213.014	231.329	236.109
			250.028	268.7	308.577	318.984
			295.618	324.386	385.825	401.86
4	37	125	179.493	187.629	205.004	209.539
			222.745	240.459	278.291	288.165
			265.997	293.29	351.578	366.791
5	39	125	182.439	191.014	209.329	214.109
			228.028	246.7	286.577	296.984
			273.618	302.387	363.825	379.86
6	38	122	177.966	186.322	204.167	208.824
			222.387	240.58	279.434	289.575
			266.807	294.838	354.702	370.326
7	55	120	201.003	213.097	238.925	245.666
			265.296	291.629	347.865	362.542
			329.589	370.16	456.805	479.418
8	39	123	180.439	189.014	207.329	212.109
			226.028	244.7	284.577	294.984
			271.618	300.387	361.825	377.86
9	43	108	171.33	180.785	200.978	206.248
			221.595	242.183	286.149	297.624
			271.861	303.58	371.32	389.
10	39	107	164.439	173.014	191.329	196.109
			210.028	228.7	268.577	278.984
			255.618	284.387	345.825	361.86
11	37	95	149.493	157.629	175.004	179.539
			192.745	210.459	248.291	258.165
			235.997	263.29	321.578	336.791
12	31	113	158.656	165.473	180.031	183.83
			194.894	209.736	241.433	249.706
			231.132	254.	302.836	315.581
13	34	124	174.075	181.551	197.517	201.685
			213.82	230.098	264.862	273.935
			253.564	278.645	332.207	346.186
14	35	178	229.548	237.244	253.68	257.969
			270.461	287.218	323.005	332.345
			311.375	337.193	392.33	406.721

jatkuu

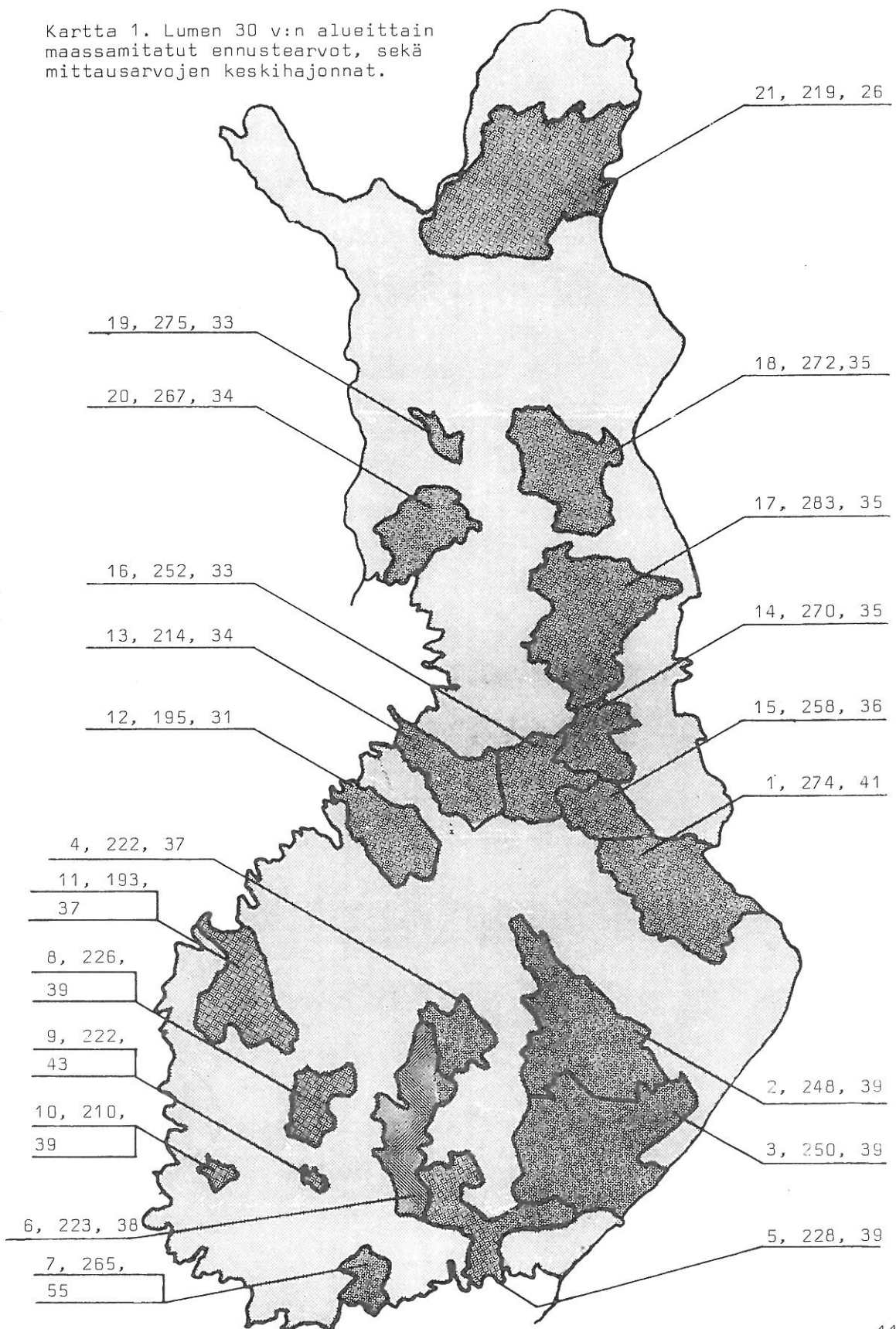
Taulukko 3. Jatkoa

Alue	S	$X_K$	$X_{30}$	$X_{50}$	$X_{150}$	$X_{200}$
15	36	163	216.02	223.936	240.842	245.254
			258.103	275.339	312.148	321.755
			300.186	326.741	383.454	398.256
16	33	165	213.602	220.858	236.355	240.4
			252.178	267.977	301.719	310.525
			290.754	315.096	367.083	380.651
17	35	190	241.548	249.244	265.68	269.969
			282.461	299.218	335.005	344.345
			323.375	348.193	404.33	418.721
18	35	180	231.548	239.244	255.68	259.969
			272.461	289.218	325.005	334.345
			313.375	339.193	394.33	408.721
19	33	188	236.602	243.858	259.355	263.4
			275.178	290.977	324.719	333.525
			313.754	338.096	390.083	403.651
20	34	178	228.075	235.551	251.517	255.685
			267.82	284.098	318.862	327.935
			307.564	332.645	386.207	400.186
21	26	150	188.293	194.01	206.219	209.406
			218.686	231.134	257.718	264.656
			249.079	268.258	309.217	319.907

Taulukko 4. Lumen vesiarvojen keskihajonnan vaikutus ennustearvoon.

Alue	$\sigma$	$X_K$	$X_{30}$	$X_{50}$	$X_{150}$	$X_{200}$
6	38	122	223	241	280	290
7	55	120	266	292	348	363
16	33	165	253	270	302	311
1	41	166	275	294	336	347
21	26	150	210	232	258	265
2	37	95	193	211	249	259

Kartta 1. Lumen 30 v:n alueittain maassamitatut ennustearvot, sekä mittausarvojen keskihajonnat.



## TUULIKUORMA

### Tilastoaineisto

Tuulikuorma on vaikutukseltaan dynaaminen. Maksimituulikuormat esiintyvät harvoin ja lyhytaikaisesti. Suunnittelukuormana käytetään kuitenkin staattista korvausvoimaa. Tarkemmissa dynaamisissa analyyseissä otetaan tuulikuorman luonne tarkemmin huomioon, jolloin kyseessä on useimmiten rakenteen värähtely.

Tuulen nopeus  $V$  [m/s] muutetaan paineeksi kaavan (9) mukaisella approksimoinnilla /4/, /6/.

$$p = \mu \cdot G \cdot 0,61 V^2 \quad [\text{Pa}] , \quad (9)$$

missä  $G$  on puuska- ja  $\mu$  rakenteesta riippuva muotokerroin.

Tuulikuorman osalta suoritettiin samanlainen tutkimus kuin lumikuormalle. Tilastoaineistona käytettiin Ilmatieteen laitoksen mittaamia tuulen nopeuksia vuosilta 1959...1977 /9/. Mittaustuloksia oli käytettävänä 40:ltä havaintoasemalta. Tuulen nopeusarvot olivat 10 minuutin keskiarvoja, jotka oli tilastoitu jokaisen havaintovuoden ja kuukauden vuosi- ja kuukausimaksimina. Tilastollista tarkastelua varten valittiin 19 havaintoaseman mittaukset, jotka katsottiin riittäväksi kuvaamaan Suomen tuuliolosuhteita. Taulukossa 5 on havaintoasemien nimet, helmi-, maaliskuu- ja huhtikuun sekä koko vuoden 10 min keskiarvomittausten maksimien keskihajonnat sekä -arvot. Mittauspaikat ovat lentokenttäasemia, joissa mittaus suoritetaan 10 metrin korkeudelta.

Rannikkoalueita lukuun ottamatta nähdään tuulennopeuksien vuosimaksimien arvojen olevan suunnilleen samat eri osissa Suomea. Rannikkoalueilla on suuremmat arvot kuin sisämaassa. Keskihajonnoissa ei ole havaittavissa alueellisia eroja. Kuukausihuiput esiintyvät yleisimmin loka-tammikuun aikana. Vuosihuipun keskiarvoksi ja -hajonnaksi saadaan puuskakertoimella  $G = 1,5$ ,  $\mu = 18,40$ ,  $\sigma = 2,50$  [m/s]. Lähteessä /4/ on saatu vuosilta 1953...1974 vastaaviksi arvoiksi  $\mu = 22,20$  ja  $\sigma = 2,25$  [m/s]. Ero selittyy sillä, että lähteessä /4/ on havaintoasemia enemmän rannikkoalueilla. Kuukausimaksimien arvoksi saadaan  $\mu = 14,85$ ,  $\sigma = 2,71$  [m/s]. Lähteessä /4/ on saatu  $\mu = 17,60$  ja  $\sigma = 2,70$  [m/s].

### Jakautuman tarkastelu

Luotettavien ennustearvojen ja jakautuman muodon selvittämiseksi suoritettiin tuulennopeudelle vastaavanlainen jakautumatarkastelu kuin lumikuormalle. Todettakoon, että jos tuulennopeus esitetään kaavalla (2), ei paineen jakautuma ole sama kuin nopeuden, koska kaavan (2) mukaan

Taulukko 5. Tuulennopeudet (10 min keskiarvomittaus) [m/s].

Mittauspaikka	Vuodet		Helmikuu		Maaliskuu		Huhtikuu		Koko vuosi	
	N	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X
1 Maarianhamina	19	12.1	2.76	12.0	2.34	11.7	1.87	14.9	1.74	
2 Helsinki-Vantaa	19	10.1	1.60	10.6	1.30	10.6	1.87	13.2	1.65	
3 Pori	19	10.2	2.10	10.2	1.40	10.3	1.86	12.9	2.30	
4 Turku	19	9.5	2.14	9.7	1.76	10.1	1.58	12.1	1.10	
5 Tampere	19	9.1	1.43	9.1	1.47	8.6	1.31	11.1	1.37	
6 Utti	19	8.7	1.70	8.6	1.42	9.2	1.72	11.8	2.17	
7 Kuorevesi	14	7.8	2.17	8.3	1.38	9.0	1.62	11.4	1.82	
8 Jyväskylä	19	8.3	2.02	9.0	1.75	9.5	1.95	11.4	1.95	
9 Mikkelä	19	8.9	2.60	9.5	1.87	8.8	1.51	12.8	2.00	
10 Vaasa	19	11.1	2.37	11.5	1.31	11.0	1.94	13.7	1.56	
11 Kauhava	19	9.7	2.05	10.1	1.79	10.7	1.70	12.7	1.48	
12 Kuopio	19	9.5	1.61	10.0	1.61	10.3	1.83	11.9	1.61	
13 Joensuu	19	8.9	1.52	9.1	1.31	9.2	1.54	10.6	1.50	
14 Kruunupyy	17	10.4	2.00	10.4	1.97	10.8	1.59	12.7	1.16	
15 Kajaani	19	9.3	1.83	9.0	1.63	9.4	1.77	12.0	1.76	
16 Oulu	19	11.5	2.25	10.3	1.80	10.4	1.38	14.1	1.72	
17 Kemi	19	10.8	2.03	10.2	1.69	10.3	1.45	13.1	1.38	
18 Rovaniemi	19	11.2	2.39	10.7	1.77	11.2	1.51	13.6	1.30	
19 Ivalo	20	9.7	2.68	9.5	2.16	9.3	2.05	13.0	2.13	
Keskiarvot		9.8	2.06	9.9	1.67	10.0	1.69	12.6	1.67	

funktio p kuvaa symmetrisen jakautuman positiivisesti vinoksi.

Testattaviksi jakautumiksi valittiin normaali-, log-normaali- ja Gumbel I -jakautuma. Testit suoritettiin tuulennopeusarvoille. Testausmenetelmänä käytettiin todennäköisyyspaperia ja K-S-testiä.

Havantoasemiksi rannikkoalueista valittiin Turku ja Helsinki sekä sisämaasta Utti ja Jyväskylä. Koska tuuliolosuhteet ovat Suomessa ajallisesti ja paikallisesti, rannikkoalueita lukuunottamatta, lähes muuttumattomat, on samoja tuulennopeusarvoja useita. Näin ollen jakautumien tarkkuus on huonompi kuin lumen keskiarvojen kohdalla, jolloin havaintoarvot olivat jakautuneet tasaisemmin.

Todennäköisyyspapereista huomattiin jakautumittain seuraavaa:

- normaalijakautuma soveltuu melko hyvin havaintoarvoihin. Tarkimmin jakautuma soveltuu pieniin ja keskimääräisiin arvoihin. Suurin epätarkkuus on suurissa arvoissa. Lineaarinen suora kulkee tällöin epävarmalta puolelta.
- Log-normaalijakautuma soveltuu havaintoarvoihin paremmin kuin normaalijakautuma. Suurilla arvoilla saadaan melko tarkkoja arvoja, joskin huomattavasti muista poikkeava suuri tuulennopeuden arvo jää hiukan epävarmalle puolelle.
- Gumbel I -jakautuma soveltuu erittäin hyvin tilastoaineistoon ollen tarkka pienillä ja suurilla arvoilla. Suuret arvot ovat suoran mukaan keskimääräisesti oikein, mikä on tärkeää ennustearvojen kannalta.

Kolmesta jakautumasta näyttäisi log-normaali ja Gumbel I -jakautuma soveltuvan tuulen nopeusarvojen vuosimaksimien jakautumiksi. Parhaiten soveltuu Gumbel I -jakautuma, johon on päädytty myös lähteissä /4/ ja /6/.

Jotta saataisiin numeerinen arvo jakautumien suhteelliselle paremmuudelle, suoritettiin K-S-testi. Testin avulla voidaan lisäksi tarkastella vain tiettyä jakautuman osaa

Tuloksista havaittiin merkitsevyydestä 20 % kaikkien jakautumien olevan hyväksyttäviä. Myös numeerisen testin tuloksena saatiin Gumbel I -jakautuma tarkimmaksi. Log-normaalijakautuma on tuloksien mukaan tarkempi kuin normaalijakautuma. Tarkastelemalla virhetermismumia todennäköisyysvälillä 0,5 - 0,95 korostuu Gumbel I -jakautuman paremmuus. Samoin korostuu myös log-normaalijakautuman tarkkuus suurilla arvoilla. Usein se on koko jakautuma huomioon ottaen hiukan huonompi kuin normaalijakautuma, mutta suurilla arvoilla virhesumma on pienempi.

Edellä suoritettujen tarkastelujen mukaan Gumbel I -jakautuma soveltuu parhaiten Suomen tuulennopeuden vuosimaksimien tilastolliseen tarkasteluun. Neljälle eri havaintoaseman mittauksille jakautumiksi saadaan seuraavat lausekkeet:

Taulukko 6. Tuulen ennustearvot virherajoiheen.

Alue	S	$\bar{X}_K$	$X_{30}$	$X_{50}$	$X_{150}$
1	1.74	14.9	17.3686	17.7631	18.6056
			19.6136	20.466	22.2864
			21.8586	23.1689	25.9671
2	1.65	13.2	15.541	15.915	16.7139
			17.6898	18.4781	20.2043
			19.7987	21.0412	23.6947
3	2.3	12.9	16.1632	16.6846	17.7982
			19.1306	20.2573	22.6636
			22.0981	23.8301	27.5289
4	1.1	12.1	13.6606	13.91	14.4426
			15.0799	15.6187	16.7695
			16.4991	17.3274	19.0965
5	1.37	11.1	13.0437	13.3543	14.0176
			14.8113	15.4824	16.9157
			16.5789	17.6105	19.8138
6	2.17	11.8	14.8787	15.3707	16.4214
			17.6785	18.7415	21.0117
			20.4782	22.1123	25.6021
7	1.82	11.4	13.9821	14.3948	15.276
			16.3303	17.2219	19.126
			18.6785	20.049	22.9759
8	1.95	11.4	14.1666	14.6087	15.5528
			16.6825	17.6377	19.6778
			19.1984	20.6668	23.8028
9	2.01	12.8	15.6517	16.1074	17.0806
			18.245	19.2297	21.3325
			20.8384	22.352	25.5844
10	1.56	13.7	15.9133	16.2669	17.0223
			17.926	18.6902	20.3223
			19.9387	21.1135	23.6222
11	1.48	12.7	14.7998	15.1353	15.8519
			16.7093	17.4343	18.9826
			18.6188	19.7333	22.1134
12	1.61	11.9	14.1842	14.5492	15.3287
			16.2614	17.0501	18.7345
			18.3387	19.5511	22.1403
13	1.5	10.6	12.7281	13.0682	13.7945
			14.6635	15.3983	16.9675
			16.5988	17.7283	20.1406
14	1.16	12.7	14.3458	14.6088	15.1704
			15.8424	16.4107	17.6242
			17.3391	18.2126	20.0781

jatkuu

Taulukko 6. Jatkoa

Alue	S	$X_K$	$X_{30}$	$X_{50}$	$X_{150}$
15	1.76	12.01	14.507	14.906	15.7582
			16.7778	17.64	19.4812
			19.0486	20.3739	23.2043
16	1.72	14.1	16.5403	16.9302	17.763
			18.7594	19.602	21.4015
			20.9786	22.2738	25.0399
17	1.38	13.1	15.0579	15.3708	16.0389
			16.8384	17.5144	18.9581
			18.6189	19.6581	21.8774
18	1.3	13.6	15.4444	15.7391	16.3686
			17.1217	17.7585	19.1185
			18.7888	19.7779	21.8685
19	2.12	13.01	16.032	16.5149	17.5482
			18.7801	19.8225	22.0519
			21.5283	23.1322	28.5577

Helsinki:  $F_T(x) = \exp(-\exp(-0,64036(x-12,38)))$

Jyväskylä:  $F_T(x) = \exp(-\exp(-0,5419(x-10,43)))$

Turku:  $F_T(x) = \exp(-\exp(-0,96055(x-11,57)))$

Utti:  $F_T(x) = \exp(-\exp(-0,48961(x-10,72)))$  ,

joissa parametrit  $a_N$  ja  $u_N$  on määritetty havaintoaineistosta. Lausekkeista huomataan sisämaan ja rannikkoalueiden parametreillä eroja, mikä selittyy tuuliolosuhteiden poikkeavuudesta.

#### Ennustearvojen määrittäminen

Havaintoarvoille laskettiin virherajat. Havaintoarvot pysyttelevät hyvin rajojen sisäpuolella, joskin pienillä arvoilla on pieniä ylärajan ylityksiä. Keskisuurilla ja suurilla arvoilla mittausarvot pysyttelevät rajojen sisällä. Näin ollen lineaarista suoraa voidaan käyttää ennustearvojen laskemiseen.

Ennustearvot virherajoihin laskettiin 30, 50 ja 150 toistumisajoille. Tulokset ovat esitetyt talukossa 6. Tuulennopeuden 50 vuoden toistumisaikaa vastaavat arvot on todettu sopivaksi perustaksi laskettaessa tuulikuorman perusarvoa /4/, /6/. Nopeusarvot vaihtelevat välillä 15,4 - 20,5 [m/s]. Koska havaintoasemat eivät täysin kattaneet rannikkoaluetta, soveltuvat lasketut arvot siten vain sisämaassa.

Taulukossa 7 on esitetty edellä mainittujen asemien lisäksi myös useilta muilta sääasemilta tuulennopeuksien vuosimaksimien keskiarvot sekä 50



Taulukko 7. Sääsämien korkeuskorjattuja tuulen nopeuden (m/s)  
50 vuoden ennustearvoja.

Asema		h	v <sub>50</sub>	$\bar{v}_{50}$	v <sub>K</sub>	$\bar{v}_K$	Hav.vuodet
Maarianhamina	L	10	20,4	20,4	14,9	14,9	1959-1977
Utö/Korppoo		7	30,9	31,7	22,1	22,7	"
Nyhamn		11	32,5	32,3	24,5	24,3	"
Russarö/Hanko		21	28,1	26,7	21,1	20,0	"
Hki/Vantaa	L	10	18,5	18,5	13,2	13,2	"
Bågaskär/Inkoo		10	28,2	28,3	20,6	20,6	1963-1977
Hki, Katajaluoto		10	26,4	26,4	20,3	20,3	1959-1977
Hki, Malmi	L	10	18,7	18,7	13,2	13,2	"
Rankki/Kotka		19	27,4	25,7	17,1	16,0	"
Pori	L	20	20,3	19,3	13,0	12,4	"
Kuusajaskari		19	30,9	29,5	20,1	19,2	"
Turku	L	13	15,7	15,3	12,1	11,8	"
Jokioinen		30	16,3	14,6	12,5	11,2	"
Tampere	L	10	15,5	15,5	11,2	11,2	"
Hämeenlinna		14	22,6	21,9	13,8	13,3	1960-1977
Utti	L	10	18,8	18,8	11,8	11,8	1959-1977
Lappeenranta		10	15,7	15,7	10,9	10,9	"
Niinisalo		18	19,5	18,4	11,5	10,8	"
Kuorevesi	L	10	17,5	17,5	11,8	11,8	1965-1977
Jyväskylä	L	10	17,7	17,7	11,5	11,5	1959-1977
Mikkeli	L	12	19,2	18,9	13,0	12,8	"
Punkaharju		14	16,3	15,8	12,2	11,8	"
Vaasa	L	10	18,8	18,8	13,7	13,7	"
Valassaaret		10	32,9	32,9	23,4	23,4	"
Kauhava	L	10	17,5	17,5	12,7	12,7	"
Kuopio	L	10	17,2	17,2	12,2	12,2	"
Joensuu	L	10	15,5	15,5	10,7	10,7	"
Mässäkärr/P:saari		15	31,3	30,4	22,6	22,0	1964-1977
Kruunupyy	L	10	16,5	16,5	12,7	12,7	1961-1977
Ulkokalla		10	29,0	29,0	21,6	21,6	1959-1977
Kajaani	L	10	17,7	17,7	12,0	12,0	"
Hailuoto		15	22,8	22,2	15,2	14,8	"
Oulu	L	10	19,6	19,6	14,2	14,2	"
Kemi	L	15	17,0	16,3	13,3	12,8	"
Kuusamo		12	18,2	17,9	12,4	12,2	"
Rovaniemi	L	10	17,8	17,8	13,6	13,6	"
Sodankylä		22	16,2	15,0	11,3	10,4	"
Ivalo	L	9	19,7	19,9	13,0	13,1	"
Utsjoki/Kevo		16	31,6	30,1	18,9	18,0	1962-1977

L = lentoasema

vuoden toistumisaikaa vastaavat ennustearvot. Tulokset ovat korkeuskorjattuja kaavan (10) mukaan

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

$V_i$  on nopeus korkeudelle  $h_i$ .  $\alpha$  on maastosta riippuva kerroin, joka vaihtelee välillä 0,12 - 0,85. Sisämaassa olevat lisähavainnot eivät poikkea testien yhteydessä saaduista arvoista. Rannikkoalueille saadaan tuloksien mukaan melko suuria arvoja.

#### KIRJALLISUUTTA

- [1] Ang, A.H-S, Tang, W.H., Probability concepts in engineering planning and design. Volume I - Basic Principles. New York 1975. 409 s.
- [2] Gumbel, E.J., Statistics of extremes. New York 1966. 375 s.
- [3] Hannus, M., Rakenteiden luotettavuus. Helsinki 1973. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Julkaisu 8. 86 s.
- [4] Ins.tsto E. Paloheimo & M. Ollila, Suomessa esiintyvien lumi- ja tuulikuormien yhdistäminen. Helsinki 1975. Sisäasiainministeriö. 59 s.
- [5] Katajisto, R., Tutkimus kattorakenteita rasittavista lumikuormista. Helsinki 1966. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu. 62 s.
- [6] Katajisto, R., Rakenteisiin kohdistuvat tuulen nopeuspaineet. Helsinki 1967. Rakennushallitus, Tiedonanto.
- [7] Hydrologinen toimisto, Kuukausijulkaisut 1959 - 1981.
- [8] Taylor, D.A., Roof snow loads in Canada. Canadian Journal of Civil Engineering 1980:7, No. 1, 17 s.
- [9] Ilmatieteenlaitos / Imatran Voima, Tuulitilastoja Suomen sääasemilta. Julkaisematon tutkimusselostus 1978.
- [10] Mononen, T., Muotolevyn varmuus todennäköisyysteoreettisin menetelmin. Espoo 1983. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu. 169 s.