

TARTU ÜLIKOOL  
Füüsika-keemiateaduskond  
Keskkonnanfüüsika instituut

ERKO JAKOBSON

**ATMOSFÄÄRI VEEAURUSISALDUSE PARAMETRISEERIMINE  
LÄÄNEMERE REGIOONIS**

Magistritöö  
keskkonnanfüüsika erialal

Juhendaja: dots. Hanno Ohvril

Tartu 2004

## SISUKORD

1.	Sissejuhatus .....	3
2.	Kasutatud andmebaasid .....	5
3.	Õhuniiskuse karakteristikuid .....	8
4.	Sondeerimisandmete määramatus .....	9
5.	Olemasolevad lähendusvalemid sadestatava vee arvutamiseks .....	15
6.	Antud töös uuritavad parametrizeerimismeetodid .....	18
6.1.	Sadestatava vee arvutamine maapealse veeauru osarõhu $e_0$ andmetel .....	18
6.2.	Sadestatava vee arvutamine lähedalasuva meteojaama andmete põhjal .....	19
6.3.	Sadestatava vee päevase väärtuse arvutamine öise mõõtmistulemuse põhjal .....	23
6.4.	Vaadeldavate parametrizeerimismeetodite omavaheline võrdlus.....	24
7.	Keskmiised sadestatava vee väärtused .....	27
7.1.	Kuukeskmise sadestatav vesi .....	27
7.2.	Sesoonikeskmise sadestatav vesi .....	28
7.3.	Aastakeskmise sadestatav vesi .....	28
8.	Sadestatava vee sõltuvus jaama laiuskraadist.....	30
9.	Sadestatav vesi Tõraveres.....	35
10.	Kokkuvõte .....	38
11.	Kasutatud kirjandus .....	40
12.	Summary.....	42
CV.....		43
13.	Lisad .....	45

## 1. SISSEJUHATUS

*Sadestatav vesi* ehk *veeldatav veeaur*  $W$  on veehulk, mille võib saada vertikaalses atmosfäärisambas sisalduva kogu veeauru kondenseerimisel, ühikuteks  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  või  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Arvuliselt vastab sellele veekihi paksus millimeetrites või sentimeetrites. Lihtsuse huvides kasutatakse tavaliselt just viimaseid ühikuid.

Atmosfääri planetaarne veevaru on  $13.1\cdot 10^{15}$  kg (Peixoto, 1992). Kattes sellega ühtlase kihina kogu Maa, saame keskmiseks sadestatavaks veeks  $W = 25$  mm.

Eestis on sadestatava vee  $W$  minimaalsed väärtused ligikaudu 1 mm (külmad talveilmad), maksimaalne väärtus – 42.8 mm on mõõdetud Tallinnas 30. juulil aastal 1993. Üle maailma oleme leidnud maksimaalse mõõdetud sadestatava vee väärtuse Calcuttas ( $22.65^\circ$  N,  $88.45^\circ$  E), seal mõõdeti 16. juulil 2003. aastal sadestatava vee väärtuseks 94.9 mm.

Sadestatav vesi on tähtsamaid atmosfäärisamba seisundit kirjeldavaid parameetreid. Teadusuuringutes on see parameeter sisendsuuruseks vee ringkäigu (hüdroloogilise tsükli) kirjeldamisel, atmosfääri optilise paksuse analüüsis, aluspinna satelliidikujutiste korrigeerimisel. Geograafilise Positsioneerimise Süsteemi (GPS) kasutamisel põhjustab veeaur satelliidisignaali hilinemist.

Sadestatava vee leidmiseks on levinumad järgnevad võimalused.

- Spektroskoopiline meetod – lainepikkustel, kus toimub neeldumine veeaurus, mõõdetakse Päikese otsekiirguse maapealset intensiivsust; meetod on rakendatav vaid pilvevaba päikeseketta korral.
- Satelliidimõõtmised – GPS-signaalide hilinemine (Borbas, 1998); ilmselgelt perspektiivne, kuid esialgu väga kallis meetod.
- Aeroloogilised sondeerimised raadiosondidega – ülemaailmselt kõige levinum meetod. Läänemere valgalal on üle 20 regulaarselt töötavat aeroloogiajaama, neist Eestis ainult üks – Tallinna lähedal Harkus. Andmed usaldatavad 1980ndatest aastatest.
- Parametriseerimismeetod – sadestatava vee ligikaudne arvutamine aluspinnalähedaste meteoparameetrite kaudu; teadusuuringutes, eriti mudelarvutustes, väga levinud meetod.

Käesolevas töös on tuginetud aeroloogiliste sondeerimiste andmetele nende parema kättesaadavuse ja suhteliselt pikkade aegridade tõttu. Lähteandmetena on kasutatud 17 Läänemere valgalal oleva meteojaama andmebaase aastate 1989–2002 kohta. Töö eesmärgiks on leida optimaalsed parameetrid ja lähendusvalemid sadestatava vee arvutamiseks maapealsete meteoandmete kaudu. Sellisel ülesandepüstitusel oli kaks motiivi:

- õhu aerosoolse optilise paksuse määramine Päikese otsekiirguse mõõtmistest,
- Eesti veekogude satelliidiinfo korrektsioon.

Magistritöö valmis TÜ keskkonnafüüsika instituudis, kus lähedasele teemale oli pühendatud ka autori bakalaureusetöö.

## 2. KASUTATUD ANDMEBAASID

Töös kasutatavad sondeerimisandmed on mõõdetud 17-s Läänemere valgala paiknevas aeroloogiajaamas (Tabel 1, Lisa 1). Põhjapoolseimaks jaamaks on Sodankylä, lõunapoolseimaks Wroclaw, idapoolseimaks Voejkovo ja läänepoolseimaks Schleswig. Merepinnast asuvad kõige kõrgemal Sodankylä, Göteborg ja Jyväskylä, kõige merepinnalähedasemad jaamad on Greifswald, Leba ja Sundswall.

**Tabel 1.** Töös kasutatavate meteojaamade koordinaadid.

jaam	WMO kood	laius	pikkus	kõrgus
Copenhagen	6181	55.76	12.53	42 m
Greifswald	10184	54.10	13.40	6 m
Göteborg	2527	57.66	12.50	164 m
Jokioinen	2963	60.81	23.50	103 m
Jyväskylä	2935	62.40	25.68	145 m
Leba	12120	54.75	17.53	6 m
Legionowo	12374	52.40	20.96	96 m
Lindenberg	10393	52.21	14.11	115 m
Lulea	2185	65.55	22.13	34 m
Riga	26422	56.96	24.05	26 m
Schleswig	10035	54.53	9.55	48 m
Sodankylä	2836	67.36	26.65	179 m
Sundsvall	2365	62.53	17.45	6 m
Tallinn	26038	59.38	24.58	34 m
Visby	2591	57.65	18.35	47 m
Voejkovo	26063	59.95	30.70	78 m
Wroclaw	12425	51.78	16.88	122 m

Sondeerimistulemused on koondatud ühtsesse andmebaasi ja kättesaadavad Wyomingi Ülikooli koduleheküljelt (Wyoming, 2003), tänu sellele ei olnud vaja tegeleda erinevatest andmebaasidest sondeerimisandmete kogumisega. Andmete vertikaalne lahtus on hõre, vaid 15–40 nivood ühe sondeerimise kohta, sondeerimised ulatuvad kuni 10 km. Andmete Internetist allalaadimisel ning esmasel töötlemisel on kasutatud O. Okulovi kirjutatud spetsiaalseid programme.

Sonde lennutatakse kuni neli korda ööpäevas, 00UTC, 06UTC, 12UTC ja 18UTC, enamasti siiski vaid 00UTC ja 12UTC. Antud töös kasutasime kell 00UTC ja 12UTC mõõdetud sondeerimisandmeid. Kohalik keskmine aeg on uuritavas piirkonnas 1–2 tundi UTC ajast varasem (kõige läänepoolsemas jaamas Schleswigis on kohalik keskmine aeg UTC ajast 38 minutit varasem, kõige idapoolsemas jaamas Voejkovos 2 tundi ja 3 minutit varasem.

Alates 01.01.1997 Riias ning alates 01.11.2001 Tallinnas sooritatakse vaid öiseid sondeerimisi. Alates aastast 1997 pole Jyväskylä andmed enam Wyomingi Ülikooli koduleheküljelt (Wyoming, 2003) kättesaadavad.

Raadiosond mõõdab meile vajalikest andmetest igal nivool õhurõhku  $P$  (mb), õhutemperatuuri  $t$  (°C) ning suhtelist õhuniiskust  $RH$  (%). Andmebaasides on arvatud igal nivool ka sondi kõrgus merepinnast ja kastepunkt  $t_d$  (°C). Mõõteseria kokkuvõttes on esitatud sadestatav vesi  $W$  (mm), seda väärtust kasutamegi antud töös.

Sondi esimene mõõtmine sooritatakse maapinnal, sealt saime maapealse õhutemperatuuri  $t$  ning kastepunkti  $t_d$ . Kastepunktile vastava küllastunud veeaururõhu  $e_0$  arvutasime Magnuse tüüpi valemiga (Gueymard, 1993):

$$e_0(\text{mb}) = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.567 \cdot T_d - 2066.92805}{T_d - 33.45}} \quad (2.1)$$

Siin ja edaspidi tähistavad  $T$  ja  $T_d$  vastavaid temperatuure Kelvini skaalas.

Küllastunud veeaururõhk sõltub sellest, kas auru küllastust leitakse vee või jää kohal. Vastavalt Martti Heinonenile (Heinonen, 2004) tekib suurem erinevus madalamatel temperatuuridel kui  $-20$  °C, seda kuni ca 10 %. Seega maksimaalne viga, mis antud erinevust arvestamata jättes võib tulla, on 0.3 mm (temperatuurile  $-20$  °C vastav küllastunud veeaururõhk on  $e_0 = 1.3$  mb, millele vastab sadestatav vesi  $W = 3$  mm). Samuti esineb veeaur atmosfääris sageli alajahtunud kujul, mistõttu tegelik eksimus on enamasti veelgi väiksem. Seetõttu jätame ka meie antud töös, tuginedes ka Maailma Meteoroloogia Organisatsiooni (WMO) soovitusel (WMO, 1988) antud erinevuse arvestamata.

Sadestatava vee ekstremaalsed väärtused uuritavates jaamades aastatel 1989–2002 koos vastavate kuupäevadega on toodud tabelis 2. Maksimaalseks sadestatava vee koguseks on Läänemere regioonis üksiksondeerimisel mõõdetud 44.6 mm, seda oodatavalt ühes lõunapoolsematest jaamadest Lebas. Minimaalsed sadestatava vee väärtused on ligikaudu 1 mm. Maksimaalsed sadestatava vee väärtused esinesid enamasti juulis ja augustis, minimaalsed detsembrist kuni veebruarini.

**Tabel 2.** Maksimaalsed ja minimaalsed sadestatava vee  $W$  väärtused kell 00 UTC, 1989–2002.

jaam	miinimum		maksimum	
	kuupäev	$W$ (mm)	kuupäev	$W$ (mm)
<b>Copenhagen</b>	31.01.1993	1.53	13.08.2002	42.5
<b>Greifswald</b>	17.12.1997	1.01	08.08.1999	41.9
<b>Göteborg</b>	21.02.1996	1.24	27.08.1997	40.4
<b>Jokioinen</b>	03.02.2001	0.89	16.07.2001	40.4
<b>Jyvaskylä</b>	12.02.1994	1.02	25.07.1993	36.8
<b>Leba</b>	17.12.1997	0.96	04.08.2001	44.6
<b>Legionowo</b>	18.12.1997	1.45	07.07.1999	43.9
<b>Lindenberg</b>	31.01.1993	1.79	17.07.2002	44.3
<b>Lulea</b>	28.01.1999	0.81	16.07.1999	41.8
<b>Riga</b>	31.01.1999	1.86	02.07.1990	41.3
<b>Schleswig</b>	15.02.1994	0.88	07.08.1991	42.7
<b>Sodankylä</b>	01.01.2002	0.90	28.06.2000	39.2
<b>Sundsvall</b>	26.01.2002	1.17	22.07.1992	41.6
<b>Tallinn</b>	12.02.1996	1.15	30.07.1993	<b>42.8</b>
<b>Visby</b>	14.02.1994	1.92	20.07.2002	41.6
<b>Voejkovo</b>	25.12.2001	1.21	08.07.1990	44.0
<b>Wroclaw</b>	12.12.1998	1.75	28.07.1998	44.2

### 3. ÕHUNIISKUSE KARAKTERISTIKUID

Gaasina saab vesi esineda ainult teatud kontsentratsioonini, mis sõltub temperatuurist. Vastavat piirkontsentratsiooni nimetatakse küllastunud auruks. Praktikas kasutatakse küllastunud veeauru kontsentratsiooni arvutamiseks mitmesuguseid empiirilisi lähendusvalemeid, mis erinevad üksteisest arvutustäpsuse, kehtivuspiirkonna ja lihtsuse poolest. Praktikas on kasutatavamad nn. Magnuse tüüpi valemid, näiteks Gueymardi (1993) poolt esitatud kujul

$$e_s = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.567 \cdot T - 2066.92805}{T - 33.45}}, \quad (3.1)$$

siin  $e_s$  ühikuks on mb. Antud Gueymard' artiklis on lisaks Magnuse tüüpi valemile esitatud veel 25 erineva arvutustäpsuse, kehtivuspiirkonna ja arvutuslihtsusega küllastunud veeaururõhu arvutamise valemit.

Loetleme õhus sisalduvat veeauru iseloomustavaid suurusid (Aruksaar *et al.*, 1964):

- $e_s$  – küllastunud veeauru rõhk,
- $e$  – veeauru osarõhk,
- $\rho_a$  – veeauru tihedus ehk õhu absoluutne niiskus – veeauru mass õhu ühikruumalas,
- $w$  – segusuhe – veeauru mass ühe massiühiku kuiva õhu kohta,
- $q$  – eriniiskus ehk veeauru kontsentratsioon – veeauru mass massiühiku niiske õhu kohta,
- $RH$  – suhteline niiskus – veeauru hulga suhe küllastunud veeauru hulka antud temperatuuril ja rõhul,
- $T_d$  – kastepunkt – temperatuur, milleni peab veeauru jahutama et saabuks küllastunud olek.

Kui veeaur ei ole küllastunud olekus, siis võib teda hõreduse tõttu käsitleda kui ideaalset gaasi. Ideaalse gaasi olekuvõrrand veeauru kohta:

$$e = \rho_a \cdot R_{\text{aur}} \cdot T, \quad (3.2)$$

siin veeauru gaasikonstant  $R_{\text{aur}}$  avaldub universaalse gaasikonstandi  $R^*$  ja veeauru moolimassi  $\mu_{\text{aur}}$  kaudu järgnevalt:

$$R_{\text{aur}} = \frac{R^*}{\mu_{\text{aur}}} = \frac{8.310}{18.02} = 461.51 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right). \quad (3.3)$$

#### 4. SONDEERIMISANDMETE MÄÄRAMATUS

Sondeerimisandmete määramatuste teadmine on usaldusväärsete tulemuste hindamisel väga oluline. Antud töös kasutatavad andmebaasid on saadud põhiliselt Soome firma Vaisala raadiosondide RS 80 ja RS 90 sondeerimistulemustest. Olulisim erinevus nende kahe sondi mudeli vahel on niiskussensoris. Sondi RS 90 niiskussensor koosneb erinevalt RS 80-st kahest sensorist, millest ühega sooritatakse mõõtmist, teist aga soojendatakse, ning siis mõne aja pärast vahetatakse ülesanded. See protseduur on oluline näiteks pilvede kohal niiskuse mõõtmiseks – ilma soojendamata võib niiskusandur ära jääda ning näidata ka pärast pilve läbimist mõnda aega 100 % õhuniiskust (Vaisala RS 80, 2004, Vaisala RS 90, 2004, Vaisala, 2004).

Antud töös kasutame sadestatava vee  $W$  määramatuse hindamiseks raadiosondi RS 90 spetsifikatsioonis esitatud mõõdetavate parameetrite täpsushinnanguid (Vaisala RS 90, 2004), kuna selle sensorite kohta on esitatud ka laiendatud määramatused (usaldusnivool 95 %).

Definitsiooni kohaselt on sadestatava vee  $W$  arvutusvalem

$$W = \int \rho_{\text{aur}}(h) \cdot \delta h. \quad (4.1)$$

Kuna tegemist on diskreetsete mõõtmistega, siis asendame integreerimise summeerimisega:

$$W = \sum_{i=1}^{n-1} \rho_{\text{aur}}(h_i) \cdot \Delta h_i. \quad (4.2)$$

Järgnevalt paneme kirja sadestatava vee  $W$  arvutamiseks vajalikke valemeid.

Vaadeldes veeauru atmosfääris ideaalse gaasina, saame veeauru tiheduse  $\rho_{\text{aur}}$  arvutamise valemiks

$$\rho_{\text{aur}}(h_i) = \frac{1}{R_{\text{aur}}} \frac{e_s(T_i) \cdot RH_i}{T_i}, \quad (4.3)$$

siin indeks  $i$  märgib  $i$ -ndal nivool sooritatud mõõtmist ning veeauru gaasikonstant

$$R_{\text{aur}} = 462 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}. \quad (4.4)$$

Küllastunud veeauru rõhu  $e_s$  arvutamiseks etteantud temperatuuril kasutame Magnuse tüüpi valemit (3.1):

$$e_s(T_i) = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.567 \cdot T_i - 2066.92805}{T_i - 33.45}} \quad (4.5)$$

Atmosfääri staatika võrrandist saame avaldada sondi kahe mõõtmise kõrguste vahe  $\Delta h$  vastavate rõhkude vahena  $\Delta p$ :

$$\Delta h_i = \frac{p(h_{i+1}) - p(h_i)}{\rho_i \cdot g} \quad (4.6)$$

Õhu tihedus  $\rho$  on avaldatav ideaalse gaasi olekuvõrrandist:

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_{k\ddot{o}} \cdot T_i \cdot (1 + 0.6 \cdot q_i)} \quad (4.7)$$

siin kuiva õhu gaasikonstant  $R_{k\ddot{o}}$

$$R_{k\ddot{o}} = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (4.8)$$

ja niiske õhu eriniiskus  $q$

$$q_i = 1.61 \cdot \frac{e_s(T_i) \cdot RH_i}{p_i} \quad (4.9)$$

Hindame senini esitatud esitatud suuruste määramatuseid.

Sondi poolt mõõdetavad suurused on õhurõhk  $p$ , temperatuur  $T$  ja relatiivne niiskus  $RH$ . Nende suuruste määramatused 95 % usaldusnivool on järgmised (Vaisala RS 90, 2003):

$$\begin{aligned} U(p) &= 1.5 \text{ mb}, \\ U(T) &= 0.5 \text{ K}, \\ U(RH) &= 5 \%. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Anname ette vajalikud konstandid, arvestades, et enamus sadestatavast veest asub atmosfääri madalamates kihtides:

$$\begin{aligned}
T &= 273 \text{ K}, \\
\rho_{\delta} &= 1.3 \text{ kg/m}^3, \\
RH &= 100 \%, \\
P &= 1000 \text{ mb}, \\
e_s &= 20 \text{ hPa}, \\
\Delta P &= 50 \text{ hPa}.
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Küllastunud veeauru rõhu  $e_s$  määramatus on

$$\begin{aligned}
U(e_s) &= \frac{\partial}{\partial T} \left( 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.567 \cdot T - 2066.928}{T - 33.45}} \right) \cdot U(T), \\
U(e_s) &= 2 \cdot 0.5 = 1 \text{ (mb)}.
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Eriniiskuse  $q$  määramatus on

$$\begin{aligned}
U(q) &= 1.61 \cdot \sqrt{\left( \frac{U(e_s) \cdot RH}{p} \right)^2 + \left( \frac{U(RH) \cdot e_s}{p} \right)^2 + \left( \frac{U(p) \cdot e_s \cdot RH}{p^2} \right)^2}, \\
U(q) &= 1.61 \cdot \sqrt{0.001^2 + 0.001^2 + 0.00003^2} = 0.0023.
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Õhu tiheduse  $\rho$  määramatus on

$$\begin{aligned}
U(\rho) &= \frac{1}{R_{kõ}} \sqrt{\left( \frac{U(p)}{T \cdot (1 + 0.6 \cdot q)} \right)^2 + \left( \frac{U(T) \cdot p}{T \cdot (1 + 0.6 \cdot q)} \right)^2 + \left( \frac{0.6 \cdot U(q) \cdot p}{T \cdot (1 + 0.6 \cdot q)^2} \right)^2}, \\
U(\rho) &= \frac{1}{287} \cdot \sqrt{0.005^2 + 0.658^2 + 0.634^2} = 0.0032 \text{ (kg/m}^3\text{)}.
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Veeauru tiheduse  $\rho_a$  suhteline määramatus on

$$\begin{aligned}
\frac{U(\rho_a)}{\rho_a} &= \sqrt{\left( \frac{U(e_s)}{e_s} \right)^2 + \left( \frac{U(RH)}{e_s} \right)^2 + \left( \frac{U(T)}{T} \right)^2}, \\
\frac{U(\rho_a)}{\rho_a} &= \sqrt{0.05^2 + 0.05^2 + 0.002^2} = 0.071.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Sondi kahe mõõtmise kõrguste vahe  $\Delta h$  suhteline määramatus on

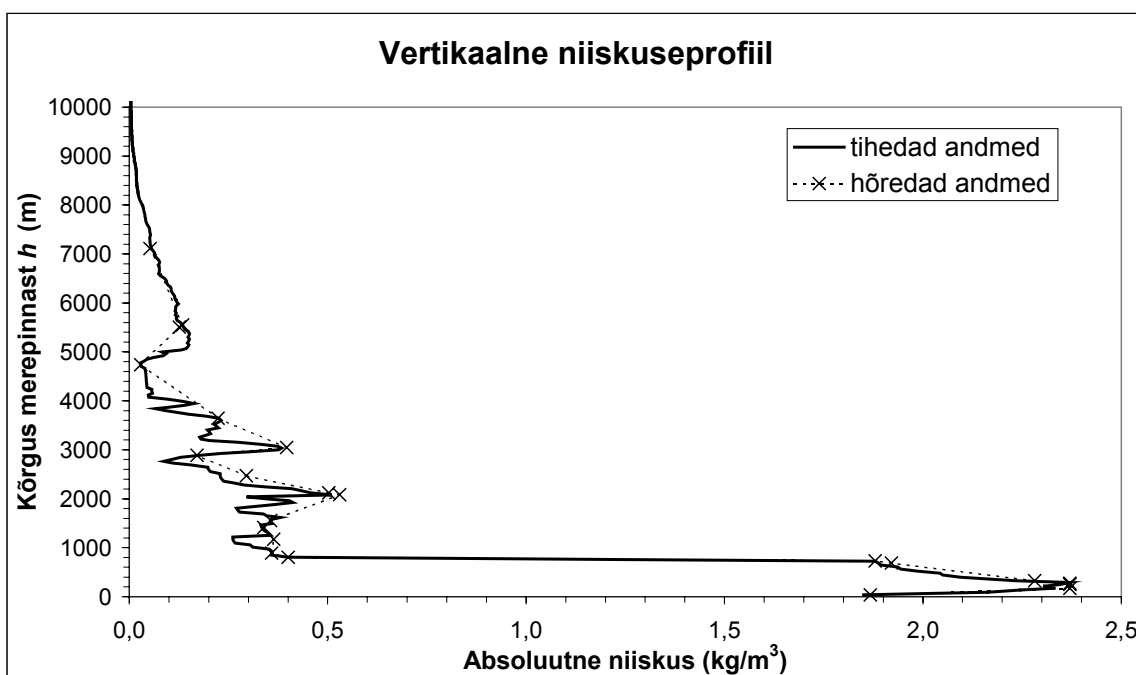
$$\begin{aligned}
\frac{U(\Delta h)}{\Delta h} &= \sqrt{\left( \frac{U(p)}{p} \right)^2 + \left( \frac{U(\rho)}{\rho} \right)^2}, \\
\frac{U(\Delta h)}{\Delta h} &= \sqrt{0.03^2 + 0.003^2} = 0.03.
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Sadestatava vee  $W$  mõõtmise suhteline B-tüüpi (mõõteseadmete ebatäpsusest tingitud) määramatus on lähtuvalt eelnevast

$$\frac{U_B(W)}{W} = \sqrt{\left(\frac{U(\rho_{\text{aur}})}{\rho_{\text{aur}}}\right)^2 + \left(\frac{U(\Delta h)}{\Delta h}\right)^2}, \quad (4.17)$$

$$\frac{U_B(W)}{W} = \sqrt{0.071^2 + 0.03^2} = 0.077.$$

Leiame nüüd sadestatava vee  $W$  määramatuse, mis tekib, lugedes õhu absoluutse niiskuse kahe mõõtmisnivoo vahel konstantseks (selle eelduse teeme üleminekul valemilt (4.1) valemile (4.2)). Näide tihedate ja hõredate sondeerimisandmete vertikaalsest profiilist on toodud joonisel 1. Võtsime Tallinna meteojaama tihedatest sondeerimisandmetest (ca 500 nivood, andmed saadud Rigel Kivilt) valimiks 70 päeva andmed aastast 1999 ja leidsime valemi (4.2) abil sadestatava vee  $W$  (lisa 2). Saadud tulemusi võrdlesime Wyomingi Ülikooli kodulehel olevatest hõredatest (ca 20 nivood) sondeerimisandmetest arvatatud  $W$ -ga.

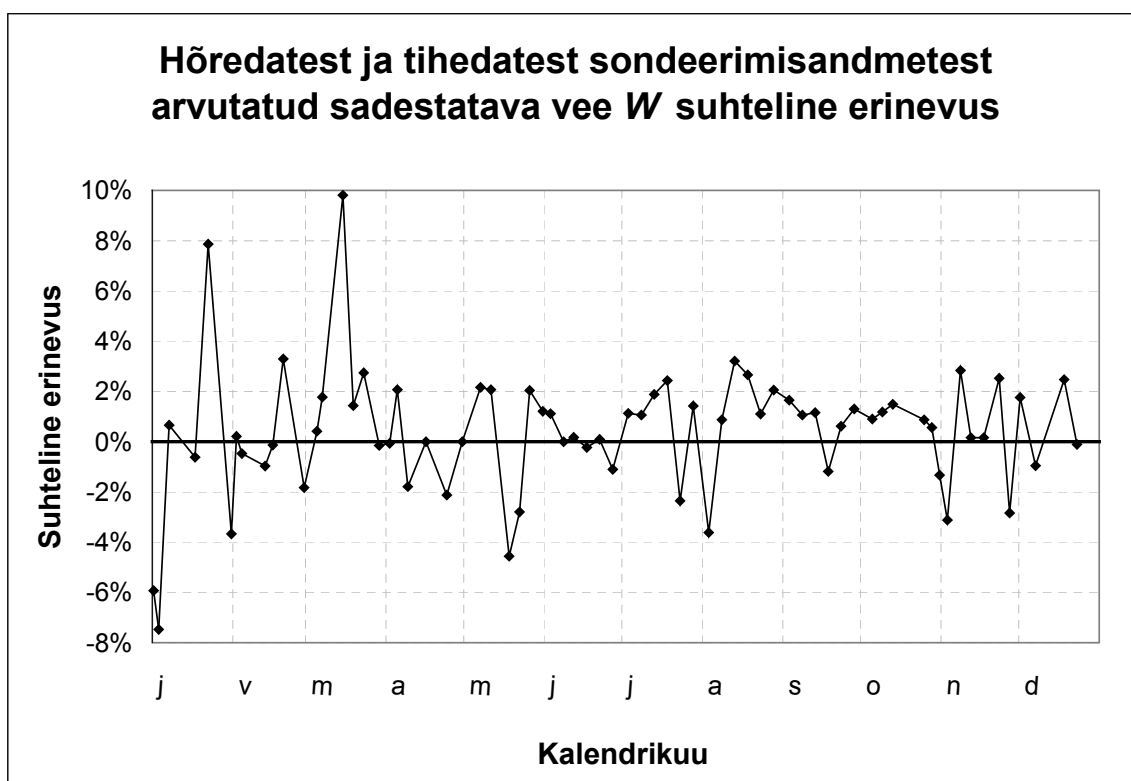


**Joonis 1.** Vertikaalne niiskusprofiil Tallinnas mõõdetud 15. 03. 1999. aastal kell 00UTC. Hõredaid nivooisid 22, tihedaid 602. Hõredate nivooide kaudu arvutades saime sadestatava vee  $W$  väärtuseks 2.91 mm, tihedate nivooide kaudu aga 2.65 mm.

Sadestatava vee arvutamise suhtelise erinevuse leidmiseks kasutasime valemit

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{W_{\text{hõre}} - W_{\text{tihe}}}{W_{\text{tihe}}} \quad (4.18)$$

Tihedate ja hõredate niiskusandmete omavahelise võrdlemise tulemused on näha joonisel 2. Suhteline erinevus ei ületanud 10 % (absoluutne erinevus ei ületanud 0.9 mm). Suurimad suhtelised erinevused tulid välja jaanuaris ja märtsis, see on seletatav talviste väikeste sadestatava vee väärtustega, mis võimendavad suhtelisi erinevusi.



**Joonis 2.** 1999. aastal kell 00UTC Tallinnas sooritatud hõredate (ca 20 nivood) ja tihedate (ca 500 nivood) sondeerimisandmete järgi arvatud sadestatava vee  $W$  suhteline erinevus, 70 sondeeringut.

Sadestatava vee suhtelise erinevuse standardhälbeks saime  $s_e = 2.6 \%$ . Eeldusel, et suhteliste erinevuste jaotus allub normaaljaotusele, saame hõredate sondeerimisandmete kasutamisest

tulenevaks laiendatud määramatuseks 95 % usaldusnivool  $\frac{U_A(W)}{W} = 5.2 \%$ .

Sadestatava vee  $W$  suhteliseks liitstandardmääramatuseks  $\frac{U_C(W)}{W}$  saame

$$\frac{U_C(W)}{W} = \sqrt{\left(\frac{U_A(W)}{W}\right)^2 + \left(\frac{U_B(W)}{W}\right)^2}, \quad (4.19)$$

$$\frac{U_C(W)}{W} = \sqrt{0.052^2 + 0.077^2} = 0.093.$$

Seega oleme saanud, et raadiosondi RS 90 hõredatest sondeerimisandmetest arvutatava sadestatava vee  $W$  suhteline määramatus usaldusnivool 95 % on 9.3 % saadud mõõtetulemusest. Suvise keskmise sadestatava vee väärtuse  $W = 20$  mm määramatus usaldusnivool 95 % on seega 1.9 mm.

## 5. OLEMASOLEVAD LÄHENDUSVALEMID SADESTATAVA VEE ARVUTAMISEKS

Sadestatav vesi  $W$  omab head statistilist korrelatsiooni mitmete maapealsete meteoparameetritega, nagu veeaururõhk  $e_0$ , kastepunkt  $T_d$ , õhu temperatuur  $T$  jne. Nende kaudu on hakatud otsima sobivaid lähendusvalemite kujusid  $W$  kaudseks arvutamiseks.

Humphreys pakkus 1912. aastal järgmist lineaarset sõltuvust (Okulov *et al.*, 2002):

$$W = k \cdot e_0, \quad (5.1)$$

siin ja edaspidi on  $W$  ja  $e_0$  ühikuteks vastavalt mm ja mbar. Humphreys leidis, et konstandi  $k$  väärtuseks on selge ilma korral 1.5.

Talvekuudel, kui õhutemperatuur on madal ja tõenäoline on inversioon atmosfääris, hindas valem (5.1) sadestatava vee hulka tegelikust väiksemaks. Selle vea kõrvaldamiseks pakuti välja erinevaid lahendusi.

Sivkov pakkus aastal 1949 välja valemi järgmisel kujul (Okulov *et al.*, 2002):

$$W = k \cdot (e_0)^{2/3}, \quad (5.2)$$

Sivkov esitas selgete ilmade puhuks konstandi väärtuseks  $k = 3.1$ .

Reitan esitas oma artiklis (1963) sadestatava vee arvutamise valemi kastepunkti  $T_d$  kaudu järgmiselt:

$$W_{\text{ReitanA}} = \exp(k \cdot T_d + b). \quad (5.3)$$

Samas artiklis esitas Reitan (1963) ka alternatiivse valemi, mis sõltub veeaururõhust ja temperatuurist maapinnal:

$$W_{\text{ReitanB}} = k \cdot \frac{e_0}{T}, \quad (5.4)$$

Reitan leidis konstandi  $k$  väärtuse USA kohta, Leckner (1978) leidis  $k$  väärtuse standardatmosfääri juhu jaoks:

$$k_{\text{USA}} = 483,$$

$$k_{\text{standardatmosfäär}} = 498.$$

Moskva Ülikooli teadur Evnevich pakkus 1967. aastal välja lisada valemile (5.1) vabaliige  $b$ :

$$W = k \cdot e_0 + b. \quad (5.5)$$

Abakumova *et al.* (1983) on oma raamatus esitanud 25 endise NL linna kohta Evnevichi tüüpi valemi konstandid nii suveks kui talveks.

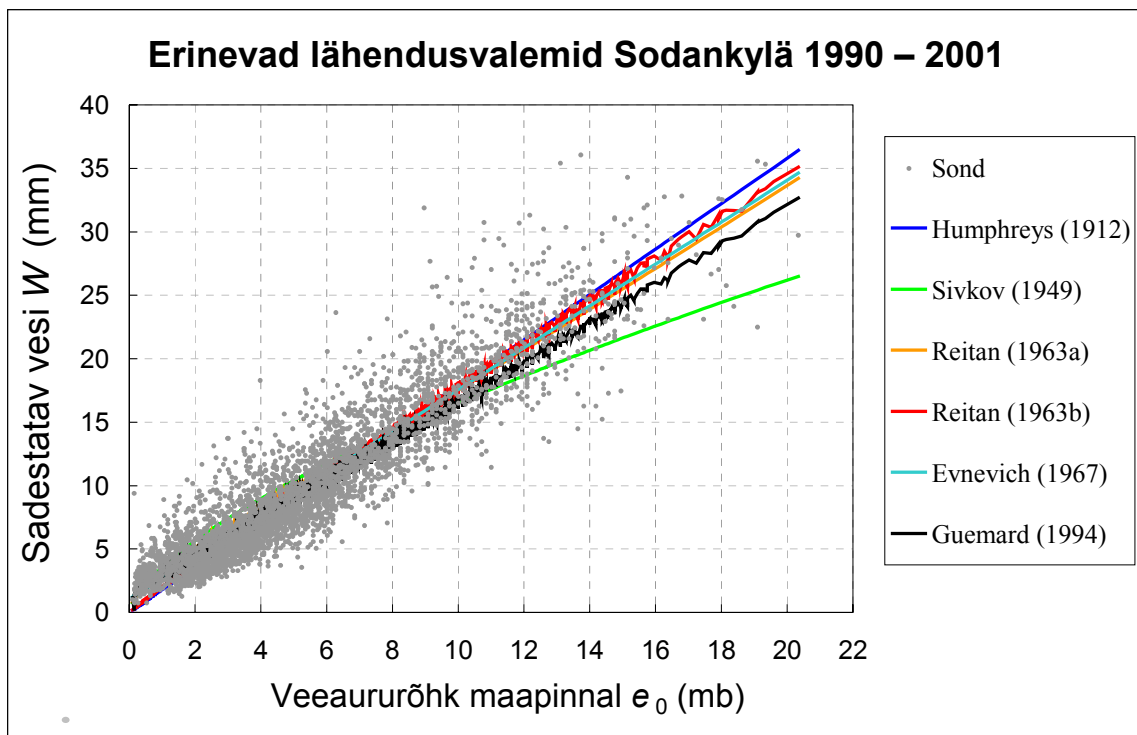
Gueymard on tuletanud oma artiklis (1994) järgmise maapealsest veeaururõhust ja temperatuurist sõltuva valemi:

$$\rho_v(z)/\rho_v(0) = \exp(-z/H_v), \quad (5.6)$$

$$H_v = 0.4976 + 1.5265 \cdot \theta + \exp(13.6897 \cdot \theta - 14.9188 \cdot \theta^3), \quad (5.7)$$

siin  $\theta = T / 273.15$  ja  $T$  on õhu temperatuur maapinnal. Juhul kui  $T < 270$  K, siis näiv veeauru skaalakõrgus  $H_v$  kasvab kiiresti, arvestades seega madalamate temperatuuride juures sageli esinevat temperatuuri inversiooni.

Joonisel 3 on visualiseeritud eeltoodud valemid Sodankylä 1990–2001 sondeerimisandmete näitel. Veeaururõhk  $e_0$ , kastepunkti temperatuur  $T_d$  ja õhu temperatuur  $T$  on võetud Sodankylä jaama tabelist, valemite oleme kasutanud Sodankylä jaama jaoks vähimruutude meetodil leitud konstantide väärtuseid (Jakobson, 2002).



**Joonis 3.** Sadestatava veeauru  $W$  modelleerimine erinevate valemitega Sodankylä jaoks. Punktid vastavad sondeerimistulemustele 1990 – 2001 (Jakobson, 2002).

Näeme, et erinevad lähendusvalemid sadestatavale veele käituvad üldiselt sarnaselt. Erandiks on Sivkovi valem, mis hindab sadestatavat vett kõrgemalt väikeste  $\epsilon_0$  väärtuste korral ja madalamalt suurte  $\epsilon_0$  väärtuste korral.

## 6. ANTUD TÖÖS UURITAVAD PARAMETRISEERIMISMEETODID

Tallinna sondeerimisandmete järgi on leitud (Okulov *et. al.*, 2001), et sadestatava vee väärtused korreleeruvad kõige paremini maapealse veeauru osarõhuga  $e_0$  kujul

$$W = k \cdot e_0 + b, \quad (6.1)$$

mis annab lihtsa võimaluse  $W$  arvutamiseks maapealsete niiskusandmete kaudu.

Sadestatava vee  $W$  määramiseks mingis geograafilises punktis uurime täiendavalt veel kahte alternatiivset parametrizeerimisvalemit. Esimesel on sisendväärtusteks sadestatava vee väärtus  $W_x$  mõnes lähedases meteojaamas (valem 6.2) ning teisel 12 tundi tagasi samas jaamas mõõdetud sadestatava vee väärtus  $W_{00}$  (valem 6.3):

$$W_y = k \cdot W_x + b \quad (W \text{ prognoos lähedalasuva jaama } x \text{ järgi}), \quad (6.2)$$

$$W_{12} = k \cdot W_{00} + b \quad (W \text{ prognoos sama jaama eelmise vaatluse järgi}). \quad (6.3)$$

Seega analüüsime Läänemere piirkonna aeroloogiajaamade korral sadestatava vee  $W$  määramiseks kolme meetodit.

### 6.1. Sadestatava vee arvutamine maapealse veeauru osarõhu $e_0$ andmetel

Sadestatava vee arvutamiseks maapealse veeauru osarõhu andmetel kasutasime korrelatiivset valemit (6.1). Uuritavatele jaamadele vastavad koefitsiendid  $k$  ja  $b$  leidsime vähimruutude meetodil, vaatluse all olid ainult kell 00UTC sooritatud mõõtmised. Mudeli headuse hindamiseks leidsime tema jääkstandardhälbed  $s_e$  (Kiviste, 1999):

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum (\hat{W}_i - W_i)^2}, \quad (6.4)$$

kus  $\hat{W}_i$  on mudeli prognoos ja  $W_i$  sondeerimisel saadud sadestatav vesi. Saadud tulemused on esitatud tabelis 3. Kõige väiksemad jääkstandardhälbed üle aasta on Sodankylä, Jokioiseni ning Jyväskylä jaamas, kõige suuremad Copenhageni, Greifswaldi, Leba, Schleswigi ning Tallinna jaamas. Jääkstandardhälvete sesoonsed väärtused olid kõikides sesoonides kõige väiksemad Sodankyläs. Seda võib seletada sellega, et vaadeldavatest jaamadest kõige põhjapoolseimas on suhteliselt vähem sadestatavat vett. Teise põhjendusena võib oletada, et Sodankyläs on valdavalt suhteliselt ühesuguste niiskuse stratifikatsioonidega õhumassid. Jääkstandardhälvete sesoonsed väärtused olid enamasti suurimad Copenhagenis, ainult sügisel oli see Greifswaldis veel suurem. Seda põhjustab arvatavasti see, et Copenhageni ilmastikku

mõjutavad erinevad õhumassid, millel on erinevad niiskuse stratifikatsioonid. Sellest võibki tuleneda, et sarnaste maapealsete tingimuste korral võivad esineda suhteliselt erinevad sadestatava vee väärtused.

Vaadeldava parametriserimisvalemi (6.1) tõusukoefitsiendiga  $k$  saab iseloomustada keskmist niiskusprofiili. Kui  $k$  on väike, siis paikneb suhteliselt rohkem sadestatavast veest maapinna lähedal, kui aga suur, siis kõrgemal. Seda mõttekäiku kinnitavad ka Okulovi (2003) ja Jakobsoni (2002) tööd, milles pilvitute ilmde kohta leitud tõusuparameeter  $k$  oli pilviste ilmde omadest suhteliselt väiksem (pilvedes on suhteline õhuniiskus 100 %, mis tõstab sadestatava vee väärtusi võrreldes sellega, mis oleks ilma pilvedeta sama maapealse veeaururõhu korral). Tabelist 3 on näha, et läbi aasta on suured  $k$  väärtused Wroclawi ja Lindenbergi jaamades. Suhteliselt väikesed  $k$  väärtused esinevad just talvel, seda Riga, Lulea ja Sodankylä jaamades.

**Tabel 3.** Sadestatava vee  $W$  maapealse veeauru osarõhu  $e_0$  kaudu arvutamise parametriserimisvalemi aastased ja sesoonsed koefitsiendid ning nende jääkstandardhälve.

Jaam $y$	Tõus $k$ (mm/mb)					Nihe $b$ (mm)					Jääkstd. hälve $s_e$ (mm)				
	aasta	kevad	suvi	sügis	talv	aasta	kevad	suvi	sügis	talv	aasta	kevad	suvi	sügis	talv
<b>Copenhag.</b>	1.57	1.78	1.66	1.73	1.95	-0.5	-2.1	-1.7	-2.1	-2.5	3.9	3.4	4.5	3.7	3.4
<b>Göteborg</b>	1.58	1.60	1.90	1.69	1.61	-0.5	-0.6	-5.1	-1.2	-0.3	3.4	3.0	3.8	3.5	3.0
<b>Greifswald</b>	1.65	1.85	1.82	1.66	1.85	-0.3	-2.3	-3.3	-0.2	-1.1	3.8	3.1	4.3	4.0	3.3
<b>Jokioinen</b>	1.66	1.87	1.84	1.70	1.51	0.0	-1.0	-2.5	-0.3	0.8	2.9	2.6	3.4	3.0	2.3
<b>Jyväskylä</b>	1.69	1.71	1.84	1.72	1.43	0.5	0.3	-1.4	0.3	1.5	2.8	2.5	3.3	2.9	2.1
<b>Leba</b>	1.64	1.91	1.81	1.78	1.80	-0.2	-2.4	-3.2	-1.1	-0.6	3.8	3.3	4.5	3.7	3.0
<b>Legionowo</b>	1.71	1.79	1.88	1.79	1.80	0.1	-0.8	-2.7	-0.3	0.1	3.5	2.7	4.2	3.7	2.9
<b>Lindenberg</b>	1.79	1.79	1.89	1.77	1.89	-1.0	-1.4	-2.4	-0.8	-1.1	3.5	2.9	4.0	3.8	3.0
<b>Lulea</b>	1.55	1.71	1.67	1.61	1.35	1.0	0.1	-0.6	0.5	2.0	2.9	2.5	3.8	2.7	2.1
<b>Riga</b>	1.64	1.70	1.58	1.61	1.32	0.9	0.1	1.8	1.6	2.3	3.6	2.8	4.4	3.9	2.6
<b>Schleswig</b>	1.64	1.84	1.73	1.65	1.93	-0.8	-2.5	-2.5	-0.7	-2.2	3.8	3.2	4.4	3.9	3.2
<b>Sodankylä</b>	1.66	1.68	1.78	1.69	1.38	1.3	1.0	0.0	1.2	2.3	2.7	2.4	3.3	2.6	1.9
<b>Sundsvall</b>	1.65	1.90	1.71	1.50	1.51	1.1	-0.7	0.4	2.4	1.7	3.4	2.7	4.2	3.9	2.4
<b>Tallinn</b>	1.63	1.89	1.66	1.64	1.58	0.9	-0.5	0.3	0.7	1.2	3.7	3.3	4.5	3.7	2.7
<b>Visby</b>	1.62	1.89	1.56	1.74	1.63	-0.9	-2.7	-0.5	-1.7	-1.0	3.4	2.9	4.4	3.2	2.7
<b>Voejkovo</b>	1.68	1.86	1.72	1.45	1.43	1.1	0.0	0.9	2.6	1.9	3.3	2.6	3.9	3.8	2.4
<b>Wroclaw</b>	1.82	1.88	1.99	1.84	1.91	-0.1	-1.2	-2.5	-0.1	-0.1	3.4	2.7	3.8	3.7	2.9

## 6.2. Sadestatava vee arvutamine lähedalasuva meteojaama andmete põhjal

Sadestatava vee arvutamine lähedalasuva meteojaama andmete põhjal võib olla vajalik selleks, et leida sadestatava vee väärtusi punktides, millistest ei saadeta raadiosonde, samuti on see sobilik aegridades lünkade täitmiseks.

Sadestatava vee arvutamiseks lähedalasuva meteojaama andmete põhjal kasutasime korrelatiivset valemit (6.2). Uuritavatele jaamadele vastavad koefitsiendid  $k$  ja  $b$  leidsime vähimruutude meetodil (Tabel 4), samuti leidsime parameetritele vastavad jääkstandardhälbed  $s_e$  (Tabel 5).

Kahe jaama andmete võrdlemiseks ühendasime nad üheks andmebaasiks, kusjuures jätsime alles ainult nende kuupäevade mõõtmised, mille puhul olid mõlemas jaamas sooritatud samaaegsed mõõtmised (Lisa 3). Andmete homogeniseerimiseks uurime ainult neid mõõtmisi, mis on sooritatud kell 00UTC.

Analüüsisime iga jaama jaoks kahe talle lähima jaama kell 00UTC mõõdetud sadestatava vee väärtuseid (Tabel 4, Tabel 5). Võrreldes üle aasta leitud jääkstandardhälvet, on näha, et enamasti on lähema jaama kaudu arvutades väiksem standardhälve kui kaugema jaamaga. Eranditeks on Greifswaldi, Jokioiseni, Schleswigi, Sundswalli ning Voejkovo jaamad, millel kaugema jaama järgi arvutamine andis paremaid tulemusi. Antud erandid on hästi põhjendatavad geograafilise eripäraga – neil on lähem jaam eraldatud merega, kaugem aga mitte.

Kõige väiksemad jääkstandardhälbe väärtused esinevad ootuspäraselt talvel ja suurimad suvel. Kõige väiksema jääkstandardhälbe annab talvel Jyväskylä sadestatava vee arvutamine Jokioiseni jaamas samal ajal mõõdetud sadestatava vee kaudu, sel juhul on jääkstandardhälve  $s_e$  kõigest 1.6 mm. Suvel arvutades on seal  $s_e$  juba 3.8 mm.

**Tabel 4.** Sadestatava vee  $W_y$  lähedases meteojaamas mõõdetud sadestatava vee  $W_x$  kaudu arvutamise parametrizeerimisvalemi  $W_y = k W_x + b$  aastased ja sesoonsed koefitsiendid.

Jaam x	Jaam y	dist (km)	Tõus $k$ (mm/mb)					Nihe $b$ (mm)				
			aasta	kevad	suvi	sügis	talv	aasta	kevad	suvi	sügis	talv
Greifswald	Copenhagen	195	0.91	0.77	0.70	0.75	0.70	2.6	1.9	4.9	3.0	2.8
Göteborg	Copenhagen	212	0.80	0.88	0.84	0.77	0.88	2.0	2.4	4.5	4.7	1.9
Copenhagen	Greifswald	195	0.91	0.85	0.74	0.81	0.85	2.6	1.7	5.4	3.0	1.6
Lindenberg	Greifswald	217	0.91	0.91	0.77	0.83	0.79	1.8	2.5	6.6	3.8	2.5
Copenhagen	Göteborg	212	0.90	0.72	0.75	0.71	0.69	2.5	2.6	3.9	3.1	2.4
Visby	Göteborg	350	0.82	0.59	0.57	0.59	0.76	2.7	4.8	7.6	5.7	2.3
Tallinn	Jokioinen	172	0.97	0.86	0.74	0.93	0.95	1.9	2.1	5.2	1.9	1.1
Jyväskylä	Jokioinen	210	0.89	0.77	0.75	0.75	0.75	0.6	1.4	2.9	2.4	1.4
Jokioinen	Jyväskylä	210	0.90	0.78	0.76	0.82	0.80	1.8	1.4	4.3	1.2	0.8
Tallinn	Jyväskylä	337	0.92	0.56	0.51	0.64	0.65	3.5	2.8	7.7	2.5	1.4
Greifswald	Leba	275	0.84	0.78	0.64	0.77	0.70	3.0	2.4	7.6	3.3	2.5
Visby	Leba	325	0.76	0.84	0.69	0.76	0.81	2.1	3.8	8.4	5.3	3.0
Wroclaw	Legionowo	284	0.81	0.82	0.72	0.81	0.77	3.5	2.0	6.7	2.5	1.6
Leba	Legionowo	345	0.74	0.81	0.61	0.75	0.67	3.8	3.3	10.3	3.8	2.6
Wroclaw	Lindenberg	194	0.90	0.87	0.79	0.88	0.88	1.6	1.6	4.9	2.2	1.5
Greifswald	Lindenberg	217	0.86	0.85	0.76	0.86	0.76	2.0	2.3	6.3	2.5	2.1
Sodankylä	Lulea	282	0.81	0.78	0.77	0.86	0.86	1.5	2.2	5.4	2.4	1.5
Jyväskylä	Lulea	390	0.79	0.55	0.55	0.59	0.56	2.7	3.4	7.4	3.7	2.7
Tallinn	Riga	269	0.08	0.70	0.61	0.74	0.68	2.0	4.5	10.1	4.9	3.2
Visby	Riga	350	0.68	0.70	0.47	0.66	0.57	3.4	4.6	14.4	5.5	3.7
Copenhagen	Schleswig	234	0.79	0.71	0.62	0.73	0.80	2.7	3.3	7.3	3.8	2.0
Greifswald	Schleswig	252	0.88	0.75	0.65	0.79	0.78	2.5	4.1	8.0	4.0	2.9
Lulea	Sodankylä	282	0.93	0.76	0.63	0.79	0.68	1.7	1.8	5.7	1.6	1.5
Jyväskylä	Sodankylä	553	0.80	0.53	0.43	0.52	0.50	3.4	3.3	9.1	4.1	2.5
Jokioinen	Sundsvall	373	0.77	0.73	0.62	0.81	0.70	2.6	3.6	9.1	3.8	2.8
Lulea	Sundsvall	408	0.78	0.58	0.58	0.70	0.63	1.5	4.2	9.5	4.1	2.8
Jokioinen	Tallinn	172	0.81	0.88	0.86	0.89	0.90	1.4	1.8	4.7	3.4	1.7
Riga	Tallinn	269	0.84	0.71	0.66	0.72	0.78	3.4	2.5	6.4	3.3	1.7
Leba	Visby	325	0.87	0.64	0.58	0.65	0.59	3.6	2.6	7.7	3.8	2.8
Riga	Visby	350	0.87	0.59	0.49	0.63	0.63	3.0	3.6	8.9	5.0	3.4
Tallinn	Voejkovo	350	0.79	0.75	0.62	0.84	0.70	2.6	4.6	10.9	4.0	3.2
Jyväskylä	Voejkovo	380	0.71	0.65	0.53	0.75	0.65	1.8	4.1	11.3	3.2	2.5
Lindenberg	Wroclaw	194	0.90	0.87	0.72	0.86	0.78	1.7	1.9	7.0	2.1	1.9
Legionowo	Wroclaw	284	0.89	0.75	0.60	0.77	0.75	1.3	3.9	9.7	4.2	3.0

**Tabel 5.** Sadestatava vee  $W_y$  lähedases meteojaamas mõõdetud sadestatava vee  $W_x$  kaudu ( $W_y = k W_x + b$ ) arvutamise jääkstandardhälbed  $s_e$ .

			Jääkstandardhälve $s_e$ (mm)				
Jaam x	Jaam y	dist (km)	aasta	kevad	suvi	sügis	talv
Greifswald	Copenhagen	195	3.8	3.0	4.4	3.9	3.3
Göteborg	Copenhagen	212	3.8	3.3	3.9	4.2	3.1
Copenhagen	Greifswald	195	4.1	3.2	4.5	4.1	3.5
Lindenberg	Greifswald	217	3.7	3.3	4.6	3.8	2.9
Copenhagen	Göteborg	212	3.6	3.0	3.7	4.0	2.7
Visby	Göteborg	350	4.2	3.8	4.9	4.5	2.9
Tallinn	Jokioinen	172	3.2	2.6	3.8	3.5	1.8
Jyväskylä	Jokioinen	210	2.9	2.2	3.8	2.9	2.0
Jokioinen	Jyväskylä	210	2.9	2.5	3.8	2.7	1.6
Tallinn	Jyväskylä	337	3.9	3.2	4.8	3.6	2.3
Greifswald	Leba	275	4.3	3.6	5.0	4.5	3.0
Visby	Leba	325	4.5	3.9	5.3	4.7	3.3
Wroclaw	Legionowo	284	4.5	3.9	5.5	4.3	2.9
Leba	Legionowo	345	5.0	4.3	5.9	4.7	3.2
Wroclaw	Lindenberg	194	3.6	2.9	4.5	3.4	2.6
Greifswald	Lindenberg	217	3.8	3.2	4.5	3.9	2.7
Sodankylä	Lulea	282	3.5	2.8	4.5	3.2	2.2
Jyväskylä	Lulea	390	4.4	3.3	4.8	3.5	2.4
Tallinn	Riga	269	4.4	3.7	4.9	4.4	2.6
Visby	Riga	350	5.0	3.9	5.6	4.8	2.9
Copenhagen	Schleswig	234	4.4	3.7	5.2	4.1	3.4
Greifswald	Schleswig	252	4.2	3.7	5.1	4.1	3.1
Lulea	Sodankylä	282	3.3	2.8	4.1	3.0	1.9
Jyväskylä	Sodankylä	553	4.1	3.3	4.9	3.9	2.3
Jokioinen	Sundsvall	373	4.5	3.4	5.4	4.1	2.6
Lulea	Sundsvall	408	4.2	3.5	5.5	4.2	2.7
Jokioinen	Tallinn	172	3.5	2.4	4.0	3.8	2.2
Riga	Tallinn	269	4.3	3.7	5.1	4.3	2.8
Leba	Visby	325	4.2	3.4	4.9	4.4	2.8
Riga	Visby	350	4.4	3.6	5.6	4.7	3.0
Tallinn	Voejkovo	350	4.6	4.0	4.9	4.3	2.7
Jyväskylä	Voejkovo	380	4.5	3.6	5.2	4.1	2.6
Lindenberg	Wroclaw	194	3.6	2.9	4.3	3.4	2.5
Legionowo	Wroclaw	284	4.2	3.7	5.0	4.2	2.9

### 6.3. Sadestatava vee päevase väärtuse arvutamine öise mõõtmistulemuse põhjal

Sadestatava vee päevase väärtuse arvutamine öiste mõõtmistulemuste põhjal on vajalik, et leida päevase sadestatava vee väärtuseid paikades, kus raadiosonde saadetakse ainult öösiti (näiteks Tallinnas ning Riias). Samuti on see üheks võimalikuks variandiks sadestatava vee aegridade päevaste lünkade täitmiseks, sest kõikides vaatluse all olevates jaamades on öiseid mõõtmisi rohkem kui päevaseid.

Sadestatava vee päevase väärtuse  $W_{12}$  arvutamine öiste mõõtmistulemuste  $W_{00}$  põhjal kasutasime korrelatiivset valemit (6.3). Uuritavatele jaamadele vastavad valemi koefitsiendid  $k$  ja  $b$  leidsime vähimruutude meetodil, samuti leidsime jääkstandardhälbed  $s_e$  (Tabel 6).

Kahe jaama andmete võrdlemiseks ühendasime nad üheks andmebaasiks, kusjuures jätsime alles ainult nende kuupäevade mõõtmised, mille puhul olid sooritatud mõõtmised nii kell 00UTC kui ka 12UTC (Lisa 4).

Võrreldes üle aasta leitud jääkstandardhälvet  $s_e$ , on näha, et kõige väiksemad varieeruvused on Sodankylä, Lulea ning Sundswalli jaamas, kõige suuremad Tallinna, Copenhageni, Göteborgi ning Schleswigi jaamas. Ka sesoonselt on kõige väiksemad  $s_e$  väärtused Sodankyläs, seda tõenäoliselt seetõttu, et tegemist on vaadeldavatest jaamadest kõige põhjapoolseimaga. Sesoonselt on suhteliselt suured  $s_e$  väärtused Tallinnas, seda ilmselt erinevate õhumasside kiire vaheldumise tõttu.

**Tabel 6.** Sadestatava vee päevase väärtuse  $W_{12}$  arvutamine öiste mõõtmistulemuste  $W_{00}$  põhjal ( $W_{12} = k W_{00} + b$ ): parametrizeerimisvalemi aastased ja sesoonsed koefitsiendid ning nende jääkstandardhälve.

Jaam	Tõus $k$ (mm/mb)					Nihe $b$ (mm)					Jääkstd. hälve $s_e$ (mm)				
	aasta	kevad	suvi	sügis	talv	aasta	kevad	suvi	sügis	talv	aasta	kevad	suvi	sügis	talv
Copenhagen	0.72	0.69	0.56	0.67	0.56	4.2	4.2	8.7	4.9	4.7	4.4	3.8	4.8	4.4	3.7
Göteborg	0.77	0.73	0.55	0.70	0.59	3.1	3.2	9.5	4.2	3.6	4.4	3.6	4.9	4.4	3.7
Greifswald	0.79	0.72	0.60	0.71	0.67	2.8	3.1	7.9	4.1	2.8	4.0	3.5	4.4	4.2	3.2
Jokioinen	0.82	0.69	0.63	0.70	0.60	2.1	2.9	7.4	3.4	2.8	4.0	3.3	4.8	3.9	2.9
Jyväskylä	0.82	0.66	0.63	0.72	0.55	2.0	3.0	6.7	3.1	2.8	3.8	3.2	4.3	3.7	2.7
Leba	0.79	0.75	0.61	0.69	0.62	2.8	2.8	8.3	4.1	3.4	4.3	3.4	5.1	4.3	3.2
Legionowo	0.81	0.74	0.69	0.74	0.64	2.4	3.0	6.3	3.6	3.2	4.2	3.7	4.9	4.1	3.3
Lindenberg	0.79	0.76	0.63	0.74	0.60	2.7	2.7	7.8	3.7	3.5	4.2	3.5	4.9	4.3	3.5
Lulea	0.83	0.70	0.68	0.79	0.66	1.7	2.3	5.4	2.2	2.1	3.6	3.0	4.4	3.7	2.5
Riga	0.81	0.84	0.62	0.65	0.59	2.8	2.2	8.2	4.9	3.8	3.8	3.2	4.5	4.0	2.8
Schleswig	0.76	0.68	0.56	0.71	0.61	3.4	4.0	8.8	4.4	3.5	4.4	3.8	4.8	4.6	3.7
Sodankylä	0.82	0.70	0.66	0.74	0.65	1.8	2.2	5.4	2.8	2.1	3.4	2.7	4.1	3.3	2.2
Sundsvall	0.79	0.69	0.63	0.71	0.69	2.4	2.9	7.0	3.3	2.6	3.7	3.1	4.4	3.6	3.0
Tallinn	0.77	0.66	0.62	0.66	0.56	3.2	3.6	7.7	4.9	4.0	4.5	3.9	5.1	4.6	3.1
Visby	0.75	0.62	0.66	0.62	0.55	2.9	3.6	5.9	4.8	3.9	4.3	3.6	5.2	4.6	3.3
Vojejkovo	0.84	0.81	0.68	0.76	0.65	1.9	1.9	6.6	3.0	2.6	3.9	3.1	4.7	3.8	2.7
Wroclaw	0.80	0.77	0.65	0.76	0.63	2.7	2.9	7.2	3.3	3.6	4.0	3.5	4.5	3.9	3.6

#### 6.4. Vaadeldavate parametrizeerimismeetodite omavaheline võrdlus

Mudelite headuse hindamiseks analüüsisime mudelite jääkstandardhälbeid  $s_e$  (valem 6.4). Antud analüüs on tehtud nii üle kogu aasta kui ka sesoonselt, kusjuures ka sesoonse jääkstandardhälbe arvutamiseks on siin kasutatud aasta peale arvatud parameetreid (Tabel 1). Selgus, et sadestatava vee arvutamiseks Läänemere regioonis sobib enamasti kõige paremini mudel, mille sisendparameetriks on maapealne veeaururõhk (17 jaamast oli see mudel parim üle kogu aasta 14, kevadel 13, suvel 14, sügisel 11 ja talvel 5). Talvesesoonil osutus enamasti kõige paremaks mudel, mille sisendparameetriks oli lähedal paikneva meteojaama sadestatav vesi, seda 12 juhul.

Analüüsimise tabelites (3, 5–7) olevaid sesoonseid jääkstandardhälbeid  $s_e$ . Erinevus seisneb selles, et tabelis 7 esitatud  $s_e$  väärtused on saadud kasutades üle aasta leitud mudeli parameetreid, samas kui tabelites (3, 5, 6) esitatud  $s_e$  väärtused on saadud kasutades vastava sesooni jaoks leitud mudeli parameetreid.

Sadestatava vee  $W$  arvutamisel maapealse veeauru osarõhu  $e_0$  kaudu (valem 6.1) on jääkstandardhälbe  $s_e$  erinevus sesooni jaoks leitud parameetrite ja üle aasta leitud parameetrite kasutamisel kõikides sesoonides väga väike, erinevus  $s_e$  väärtustes ei ületa 0.1 mm. Ka  $W$

arvutamisel sama jaama eelmise vaatluse kaudu (valem 6.3) on erinevus üle aasta leitud ning sesoonsete parameetrite kaudu arvutamisel väiksem kui 0.3 mm. Seega on otstarbekas kasutada  $W$  arvutamisel maapealse veeaururõhu  $e_0$  või sama jaama eelmise vaatluse kaudu üle aasta leitud valemi parameetreid, sest sesoonsete parameetrite kasutamine ei anna praktilist arvutustäpsuse kasvu.

Sadestatava vee  $W$  arvutamine lähijaama andmetel (valem 6.2) on jääkstandardhälbe  $s_e$  erinevus sesooni jaoks leitud parameetrite ja üle aasta leitud parameetrite kasutamisel suhteliselt suur, erinevus  $s_e$  väärtustes ulatub kuni 1.8 mm suvel Tallinnas. Igas sesoonis esineb mitu jaama, milles erinevus  $s_e$  erinevate parameetritega saadud väärtustes on suurem kui 0.5 mm. Seega, kui sadestatavat vett  $W$  arvutada lähijaama andmetel, siis on mõistlik kasutada valemi sesoonseid parameetreid.

**Tabel 7.** Jaamade sesoonsed jääkstandardhälbed  $s_e$  (mm). Tabelis on esitatud iga jaama jaoks kahe väiksema jääkstandardhälbega mudeli üle aasta arvutatud parameetrid ja jääkstandardhälbed (sesoonsed jääkstandardhälbed on leitud kasutades üle aasta arvutatud mudeli parameetreid).

Nr.	K	Jaam	Läh. jaam	Param	$k$	$b$ (mm)	Jaamade jääkstandardhälbed (mm)				
							aasta	kevad	suvi	sügis	talv
1	a	Copenhagen	Göteborg	$W_y$	0.80	2.0	3.8	3.6	5.1	4.8	3.1
	b	Copenhagen		$e_0$	1.57	-0.5	3.9	3.4	4.5	3.8	3.5
2	a	Greifswald	Lindenberg	$W_y$	0.91	1.8	3.7	3.3	4.7	3.9	3.0
	b	Greifswald		$e_0$	1.65	-0.3	3.8	3.2	4.4	4.0	3.4
3	a	Göteborg		$e_0$	1.58	-0.5	3.4	3.0	3.9	3.6	3.0
	b	Göteborg	Copenhagen	$W_y$	0.90	2.5	3.6	3.8	4.2	4.8	3.7
4	a	Jokioinen		$e_0$	1.66	0.0	2.9	2.6	3.4	3.0	2.3
	b	Jokioinen	Jyvaskylä	$W_y$	0.89	0.6	2.9	2.9	4.3	3.3	2.0
5	a	Jyvaskylä		$e_0$	1.69	0.5	2.8	2.5	3.4	2.9	2.2
	b	Jyvaskylä	Jokioinen	$W_y$	0.90	1.8	2.9	3.0	3.9	3.1	2.4
6	a	Leba		$e_0$	1.64	-0.2	3.8	3.4	4.6	3.8	3.1
	b	Leba	Greifswald	$W_y$	0.84	3.0	4.3	3.9	5.1	4.6	3.6
7	a	Legionowo		$e_0$	1.71	0.1	3.5	2.8	4.2	3.8	3.0
	b	Legionowo		$W_{00}$	0.81	2.4	4.2	3.8	5.1	4.2	3.5
8	a	Lindenberg		$e_0$	1.79	-1.0	3.5	2.9	4.0	3.8	3.1
	b	Lindenberg	Wroclaw	$W_y$	0.90	1.6	3.6	2.9	4.6	3.4	2.6
9	a	Lulea		$e_0$	1.55	1.0	2.9	2.5	3.8	2.7	2.2
	b	Lulea	Sodankylä	$W_y$	0.81	1.5	3.5	2.8	5.5	3.5	2.2
10	a	Riga		$e_0$	1.64	0.9	3.6	2.8	4.4	4.0	2.7
	b	Riga		$W_{00}$	0.81	2.8	3.8	3.2	4.8	4.1	3.0
11	a	Schleswig		$e_0$	1.64	-0.8	3.8	3.3	4.4	3.9	3.3
	b	Schleswig	Greifswald	$W_y$	0.88	2.5	4.2	3.7	5.2	4.1	3.2
12	a	Sodankylä		$e_0$	1.66	1.3	2.7	2.4	3.3	2.6	2.0
	b	Sodankylä	Lulea	$W_y$	0.93	1.7	3.3	3.2	4.8	3.6	2.8
13	a	Sundsvall		$e_0$	1.65	1.1	3.4	2.7	4.2	3.9	2.4
	b	Sundsvall		$W_{00}$	0.79	2.4	3.7	3.2	4.6	3.6	3.0
14	a	Tallinn	Jokioinen	$W_y$	0.81	1.4	3.5	2.6	5.8	5.0	2.4
	b	Tallinn		$e_0$	1.63	0.9	3.7	3.4	4.5	3.7	2.7
15	a	Visby		$e_0$	1.62	-0.9	3.4	3.0	4.4	3.3	2.7
	b	Visby	Leba	$W_y$	0.87	3.6	4.2	3.6	5.3	4.5	3.1
16	a	Voejkovo		$e_0$	1.68	1.1	3.3	2.6	3.9	3.9	2.5
	b	Voejkovo		$W_{00}$	0.84	1.9	3.9	3.1	5.0	3.8	2.9
17	a	Wroclaw		$e_0$	1.82	-0.1	3.4	2.8	3.8	3.7	3.0
	b	Wroclaw	Lindenberg	$W_y$	0.90	1.7	3.6	2.9	4.6	3.4	2.7

## 7. KESKMISED SADESTATAVA VEE VÄÄRTUSED

### 7.1. Kuukeskmise sadestatav vesi

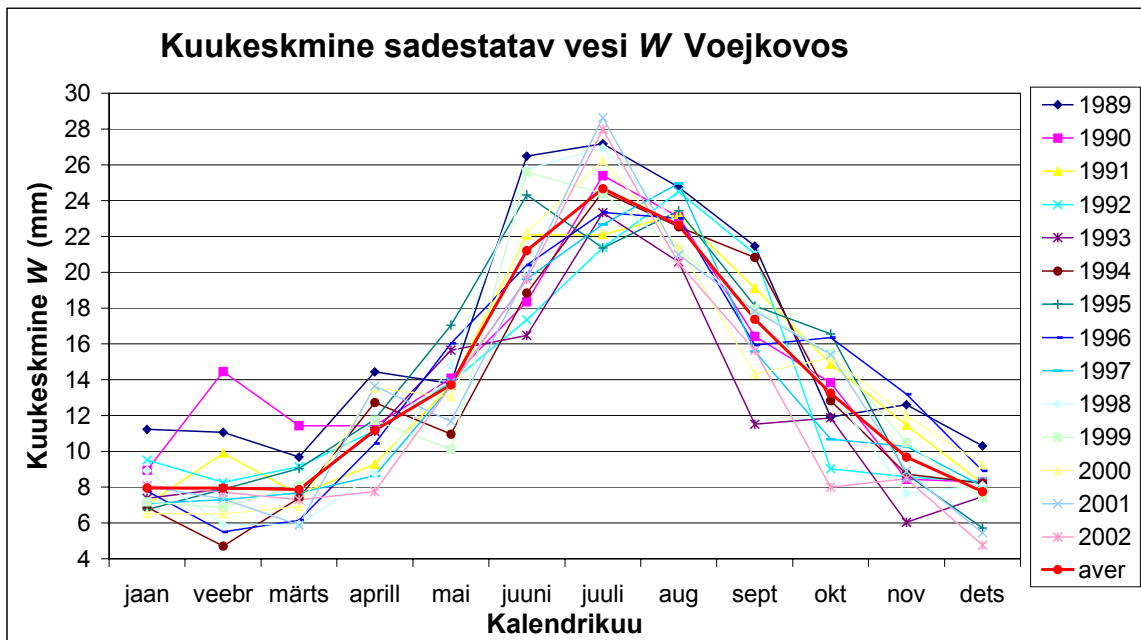
Leidsime igas jaamas kõikide kalendrikuude keskmised sadestatava vee  $W$  kell 00UTC sooritatud mõõtmiste väärtused antud kuul mõõdetud  $W$  väärtuste aritmeetilise keskmisena (Lisa 5).

Juhul, kui mingi kalendrikuu kohta oli vähem kui viie mõõtmise andmed, siis selle kuu väärtust hindasime järgmise algoritmiga:

$$W_{kuu, aasta} = \frac{W_{kuu-1, aasta} + W_{kuu+1, aasta} + W_{kuu, aasta-1} + W_{kuu, aasta+1}}{4}. \quad (7.1)$$

Näitena kuukeskmisest sadestatavast veest on toodud joonisel 4 Voejkovo 14 aasta kõik kuukeskmised väärtused ning vaadeldavate aastate kuudekeskmise väärtus. Jooniselt on näha, et Voejkovos on kõige vähem sadestatavat vett detsembrist märtsini, kus keskmine  $W$  väärtus on 8 mm. Keskmiselt suurimad sadestatava vee väärtused esinevad juulis, olles keskmiselt 25 mm.

Kuudekeskmised sadestatava vee  $W$  väärtused on toodud tabelis 9.



Joonis 4. Kuukeskmise sadestatav vesi Voejkovos 1989–2002 kell 00UTC.

## 7.2. Sesonikeskmise sadestatav vesi

Antud töös oleme aasta jaganud sesoonideks järgmiselt:

- *kevad*: märts, aprill, mai;
- *suvi*: juuni, juuli, august;
- *sügis*: september, oktoober, november;
- *talv*: detsember, jaanuar, veebruar.

Sesonikeskmise sadestatava vee leidmiseks arvutasime igas jaamas iga sesooni jaoks kõikide sesooni kuuluvate kuude kuukeskmiste  $W$  väärtuste aritmeetilise keskmise (uuritavas ajavahemikus 1989–2002 koosnes iga sesooni 42-st kalendrikuust):

$$W_{sesoon} = \frac{\sum_{aasta=1989}^{2002} \sum_{kuu \in sesoon} W_{kuu, aasta}}{42}. \quad (7.2)$$

Sadestatava vee  $W$  sesoonikeskmised väärtused jaamade kaupa on toodud tabelis 8. Väikseimad  $W$  väärtused esinevad oodatult põhjapoolseimas jaamas Sodankyläs, suurimad lõunapoolseimas jaamas Wroclawis.

## 7.3. Aastakeskmise sadestatav vesi

Aastakeskmise sadestatava vee arvutamiseks leidsime igas jaamas iga aasta kõikide kuukeskmiste aritmeetilise keskmise:

$$W_{aasta} = \frac{\sum_{kuu} W_{kuu, aasta}}{12}. \quad (7.3)$$

Juhul, kui mingis aastal on valemiga (7.1) hinnatud kuukeskmisi sadestatava vee väärtuseid rohkem kui viis, siis nendel aastatel on hinnangu liiga suure juhuslikkuse tõttu aastakeskmise sadestatava vee väärtus märkimata jäetud.

Aastatekeskmise sadestatava vee leidsime kõikide aastakeskmiste sadestatava vee väärtuste keskmisena.

Sadestatava vee  $W$  aastatekeskmised väärtused jaamade kaupa on toodud tabelis 8.

Tabel 8. Aastate- ja sesoonikeskmise sadestatav vesi vaadeldavates meteojaamades.

Jaam	Keskmise sadestatav vesi $W$ (mm)				
	Aastate-keskmise	Kevad	Suvi	Sügis	Talv
Copenhagen	14.5	12.0	20.7	15.2	10.0
Greifswald	15.5	13.2	22.3	16.1	10.3
Göteborg	13.1	10.9	19.3	13.7	8.6
Jokioinen	12.3	9.7	19.7	12.5	7.3
Jyvaskylä	11.4	9.0	18.6	11.5	6.6
Leba	15.1	12.6	22.6	16.0	9.7
Legionowo	15.6	13.6	24.0	15.9	9.2
Lindenberg	15.6	13.2	23.1	16.1	9.8
Lulea	11.1	8.3	18.7	11.0	6.3
Riga	14.6	11.7	23.2	14.9	8.5
Schleswig	15.3	12.9	21.6	16.1	10.4
Sodankylä	10.8	8.4	17.7	10.7	6.3
Sundsvall	12.6	9.6	20.6	12.7	7.2
Tallinn	14.2	11.7	21.8	14.2	9.0
Visby	13.5	10.7	20.5	14.3	8.6
Voejkovo	13.8	10.9	22.8	13.4	7.9
Wroclaw	16.2	14.1	23.8	16.7	10.3

Tabel 9. Kuukeskmised öised (00UTC) sadestatava vee  $W$  (mm) väärtused, 1989–2002.

Meteojaam	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Keskm.
Wroclaw	10.2	10.7	11.2	13.2	17.9	21.9	25.1	24.5	20.7	17.1	12.2	9.9	<b>16.2</b>
Lindenberg	9.4	9.6	10.2	12.2	17.3	20.9	24.2	24.2	20.3	15.9	12.2	10.4	<b>15.6</b>
Legionowo	9.5	9.0	9.5	13.6	17.6	22.1	25.9	24.0	19.3	16.2	12.1	9.2	<b>15.7</b>
Greifswald	10.5	10.0	10.1	12.9	16.8	19.8	23.4	23.8	20.3	15.8	12.3	10.2	<b>15.5</b>
Schleswig	10.4	10.5	10.7	12.3	15.6	19.3	22.6	23.1	20.0	16.1	12.2	10.3	<b>15.3</b>
Leba	10.1	9.3	9.4	12.2	16.1	20.2	23.7	24.1	20.2	16.2	11.8	9.8	<b>15.2</b>
Copenhagen	10.1	10.0	9.9	11.8	14.4	18.1	22.0	21.9	18.7	15.3	11.5	9.9	<b>14.5</b>
Riga	8.3	8.5	8.6	12.0	14.5	20.9	24.4	24.3	19.2	14.8	10.9	8.6	<b>14.6</b>
Visby	8.7	8.1	8.5	10.8	12.9	17.6	21.5	22.5	17.8	14.1	10.9	8.9	<b>13.5</b>
Göteborg	8.4	8.6	8.7	10.9	13.2	16.7	20.3	20.8	17.0	13.9	10.3	8.8	<b>13.1</b>
Tallinn	8.9	9.2	9.4	12.1	13.7	19.8	23.4	22.3	17.3	14.3	11.0	8.7	<b>14.2</b>
Voejkovo	9.6	9.4	9.7	12.2	15.6	19.8	23.3	23.3	19.3	15.5	11.6	9.6	<b>13.7</b>
Jokioinen	7.5	7.0	7.4	9.9	11.7	17.6	20.9	20.5	15.7	12.6	9.3	7.5	<b>12.3</b>
Jyvaskylä	6.7	6.1	7.2	8.9	11.1	16.6	19.6	19.7	14.5	11.4	8.5	6.9	<b>11.4</b>
Sundsvall	7.4	6.5	7.6	9.4	12.0	17.8	22.6	21.5	16.7	12.6	8.9	7.6	<b>12.5</b>
Lulea	6.7	5.6	6.4	7.9	10.5	16.1	20.8	19.4	14.6	10.8	7.7	6.6	<b>11.1</b>
Sodankylä	6.4	5.6	6.1	8.5	10.7	15.5	19.3	18.2	13.9	10.4	7.8	6.9	<b>10.8</b>

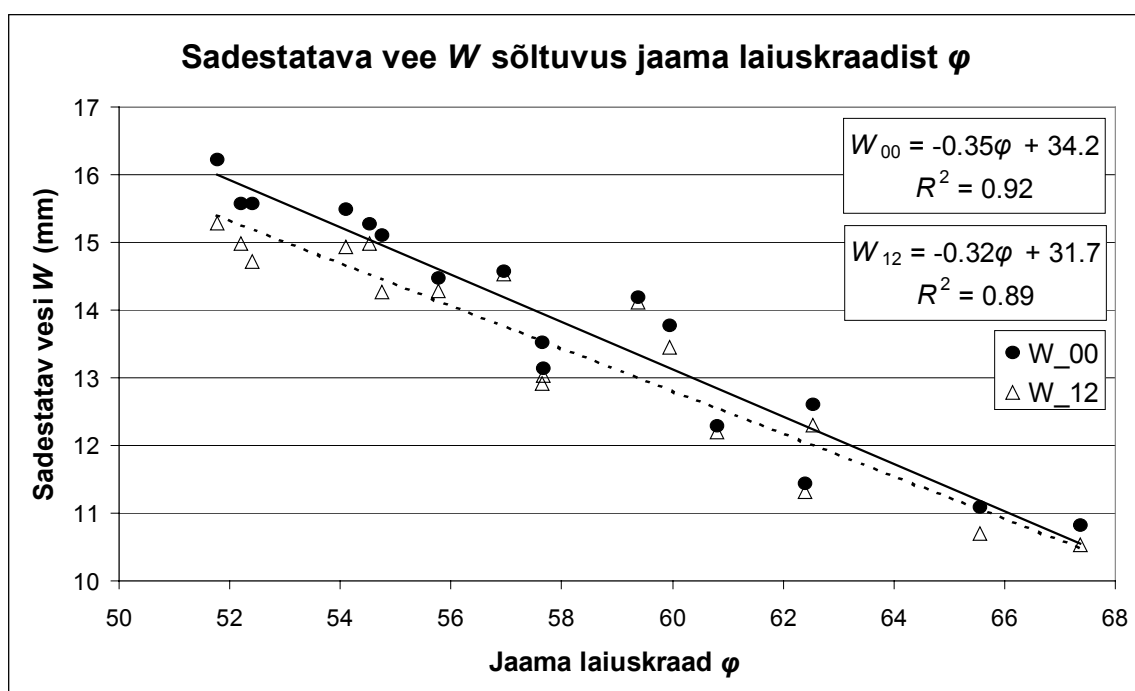
## 8. SADESTATAVA VEE SÕLTUVUS JAAMA LAIUSKRAADIST

Keskmine sadestatav vesi  $W$  omab tendentsi suurenda laiuskraadi  $\varphi$  suurenedes. Kirjeldame seda lineaarse valemiga:

$$\bar{W} = a \cdot \varphi + b. \quad (8.1)$$

Nagu on näha jooniselt 5, omavad sadestatava vee  $W$  aastatekeskmised väärtused head korrelatsiooni jaama laiuskraadiga – öistel (00UTC) mõõtmistel  $R^2 = 0.92$ , päevastel (12UTC)  $R^2 = 0.89$ .

Antud jooniselt on ka hästi näha, et eranditult igas jaamas on öine (00UTC) aastatekeskmise sadestatava vee väärtus suurem kui päevane (12UTC). Kesk-Euroopas sadestatava vee  $W$  väärtuste ööpäevast käiku uurinud Guldner ja Spänkuch (Guldner *et. al.*, 1999) on saanud  $W$  ööpäevaseks käiguks suvel 8 % ja talvel 5 %. Nende tööst tuleb välja, et kell 12UTC mõõdetud  $W$  väärtused peaksid kell 00UTC mõõdetud väärtuseid suvisel ajal ületama, talvisel ajal aga mitte.



**Joonis 5.** Läänemere regioonis asuvate 17 meteojaama aastatekeskmiste sadestatava vee väärtuste sõltuvus jaama laiuskraadist, 1989 – 2002 kell 00UTC ja kell 12UTC sooritatud mõõtmiste andmetel.

Joonistel 6 – 9 on esitatud sadestatava vee  $W$  öiste (00UTC) mõõtmiste sesoonikeskmised väärtused. Lisaks on joonistele kantud ka vaadeldava ajavahemiku (1989–2002) maksimaalne

ja minimaalne sesoonikeskmine väärtus (tähistatud püstiste riskülikutega) ning maksimaalne ja minimaalne selles sesoonis sooritatud üksikmõõtmise väärtus (tähistatud kolmnurkadega).

Suurem korrelatsioon laiuskraadiga on üleminekusesoonidel – kevadel ja sügisel. See on seletatav üleminekusesoonide suurema muutlikkusega, mis ei lase lokaalsetel eripäradel mõjule pääseda.

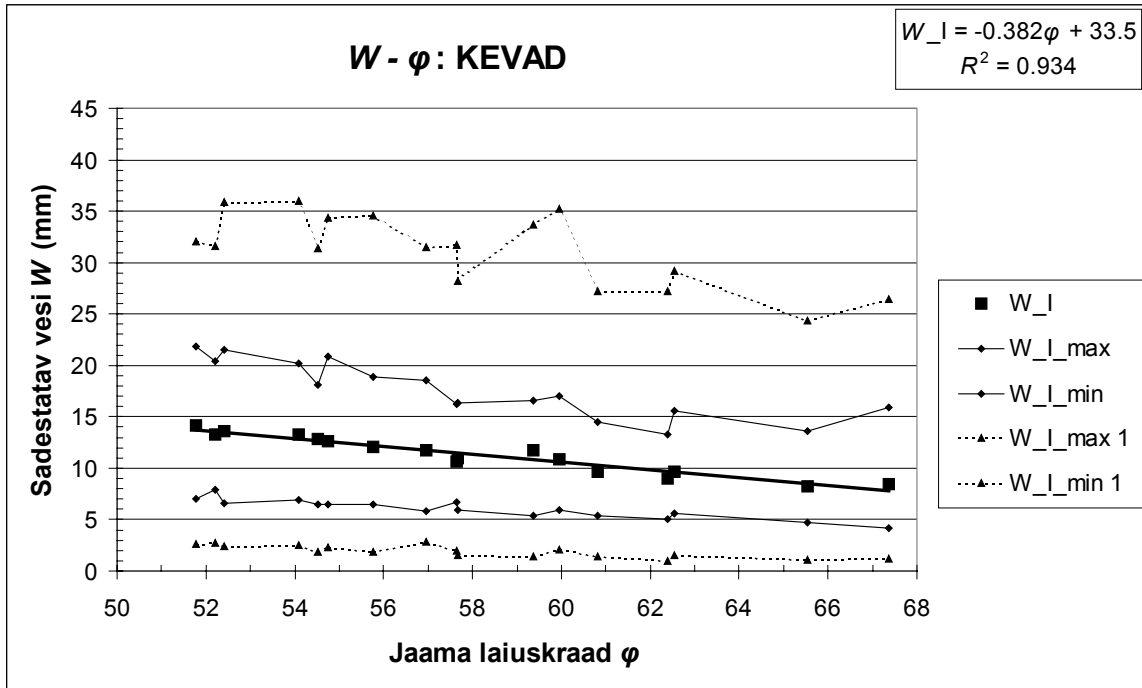
Kõige väiksem keskmise sadestatava vee trend väheneda laiuskraadi kasvades on talvel. See on seletatav talviste sadestatava vee  $W$  nullilähedaste väärtustega.

Kõige suurem keskmise sadestatava vee trend väheneda laiuskraadi kasvades on sügisel.

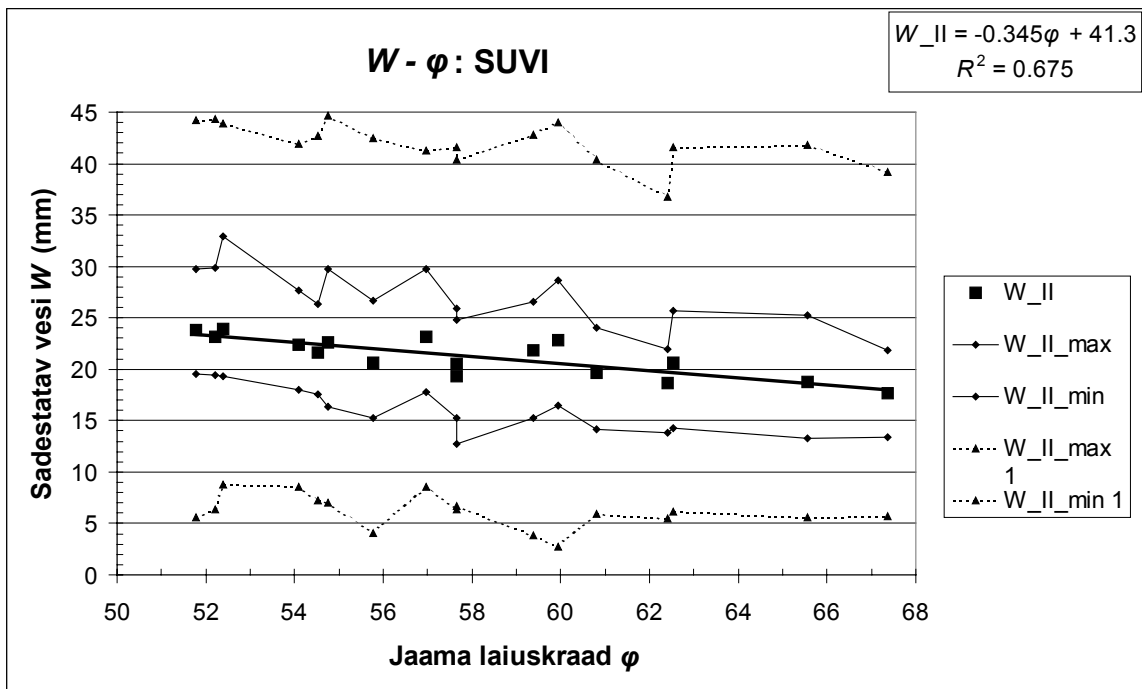
Joonisel 10 on esitatud jaamade sesoonikeskmised sadestatava vee  $W$  väärtused sõltuvalt laiuskraadist  $\varphi$ . Jooniselt on näha, et sügisesed  $W$  väärtused on kõikjal suuremad kui kevadised. Samuti on näha, et aastakeskmised ja sügisesed  $W$  väärtused langevad praktiliselt kokku.

Joonisel 11 on toodud näide sesoonikeskmise sadestatava vee arvutusvalemi (8.1) kohta. Jooniselt on näha, et kasutades Tallinna jaoks hinnanguna globaalset sadestatavat vett, hindame isegi suvel seda üle. Seetõttu on Läänemere piirkonnas globaalse keskmise sadestatava vee väärtuse asemel mõistlikum kasutada valemiga (8.1) arvutatavaid sesoonikeskmisi väärtuseid. Antud valemi kasutamine konstandi asemel on vaja teada vaid uuritava piirkonna laiuskraadi.

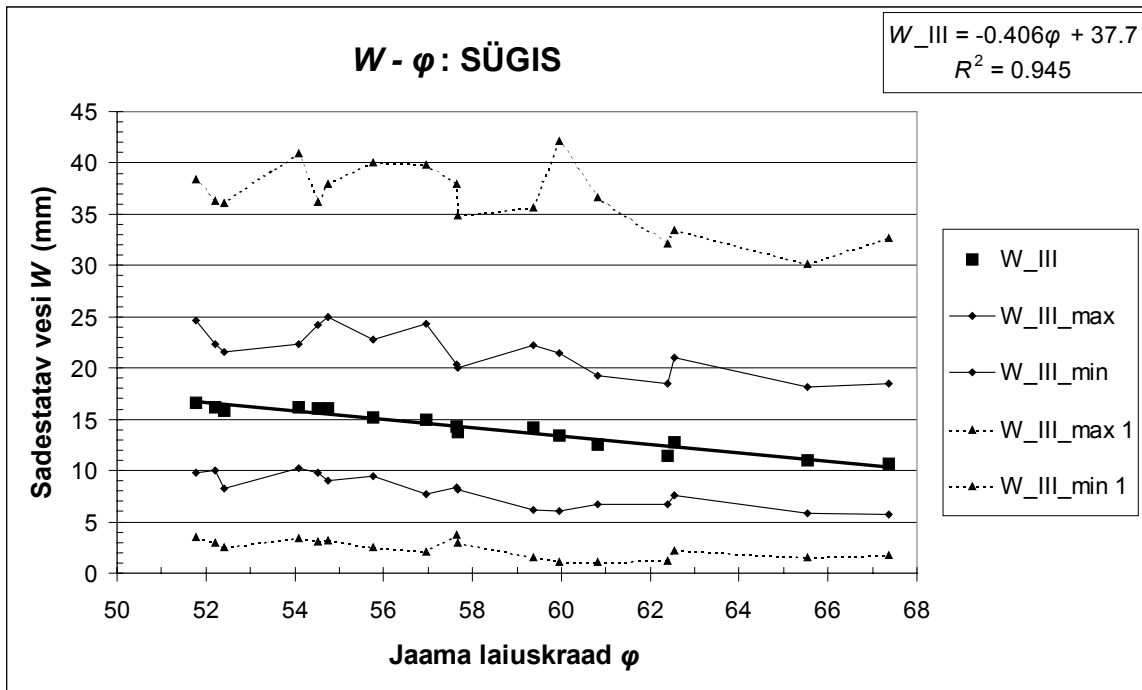
Joonisel 11 on esitatud ka lineaarne lähend maapealse veeaururõhu  $e_0$  ja sadestatava vee  $W$  vahel. Jooniselt on näha, et see hindab  $W$  väärtust veelgi paremini kui sesoonsed keskmised. Mudelarvutustes muudab lineaarse valemi kasutamise problemaatiliseks aga asjaolu, et valemi sisendandmeteks on maapealne veeauru osarõhk  $e_0$ .



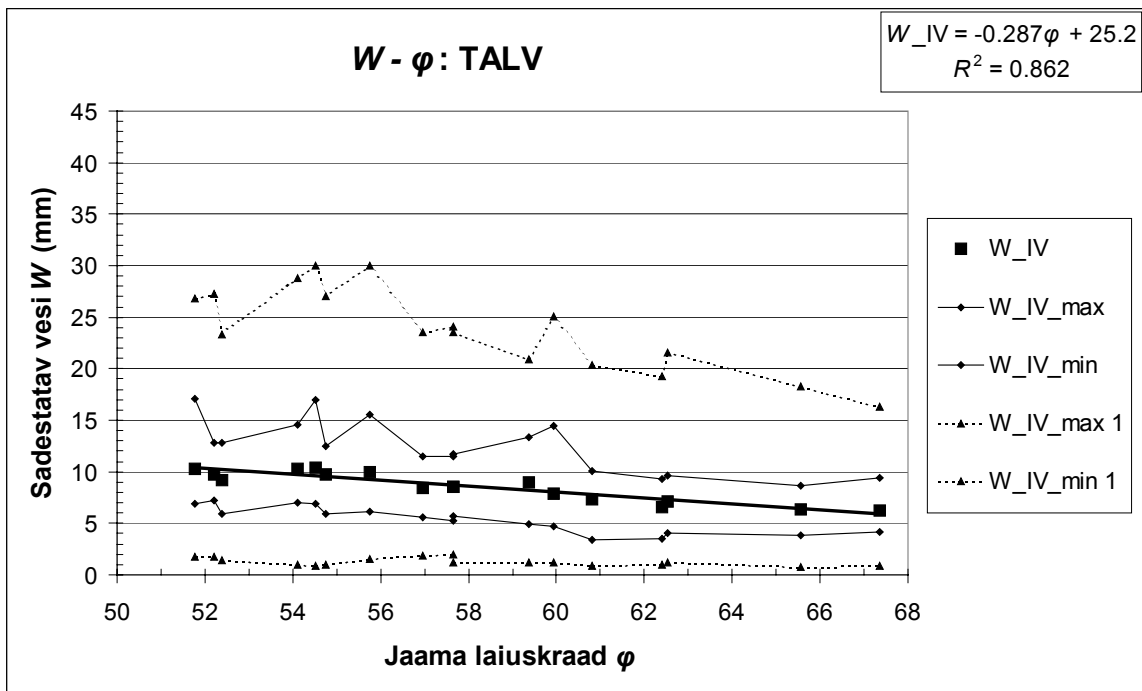
**Joonis 6.** Läänemere regioonis asuvate 17 meteojaama sesoonikeskmiste sadestatava vee väärtuste sõltuvus jaama laiuskraadist, 1989 – 2002 kell 00UTC: KEVAD.



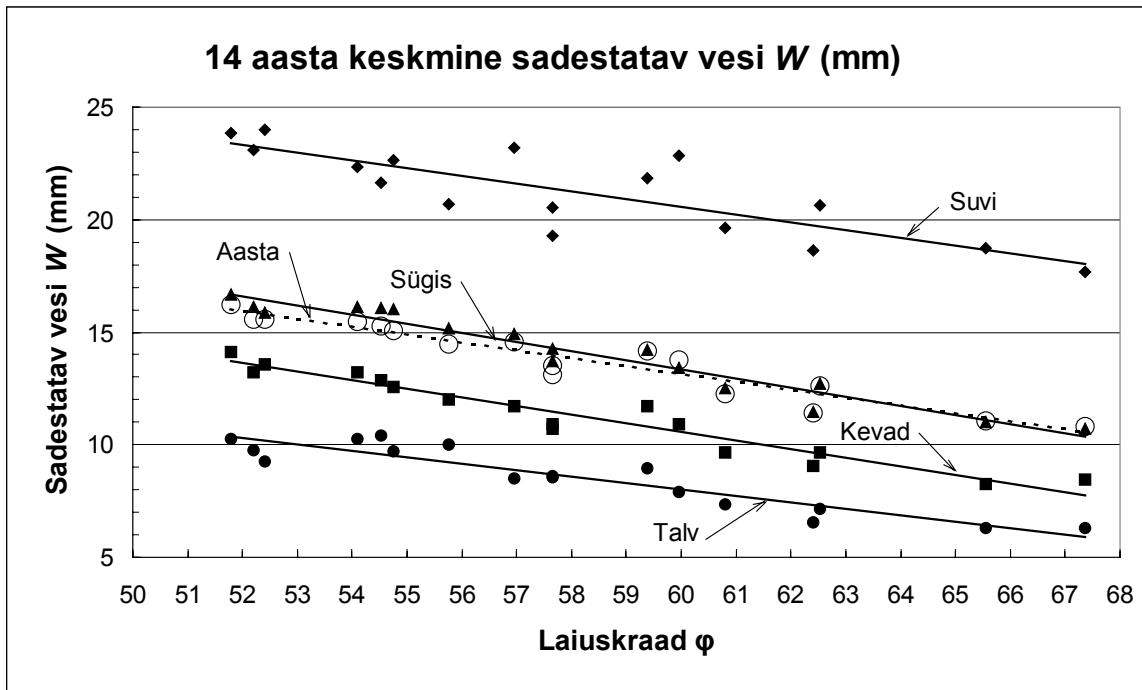
**Joonis 7.** Läänemere regioonis asuvate 17 meteojaama sesoonikeskmiste sadestatava vee väärtuste sõltuvus jaama laiuskraadist, 1989 – 2002 kell 00UTC: SUVI.



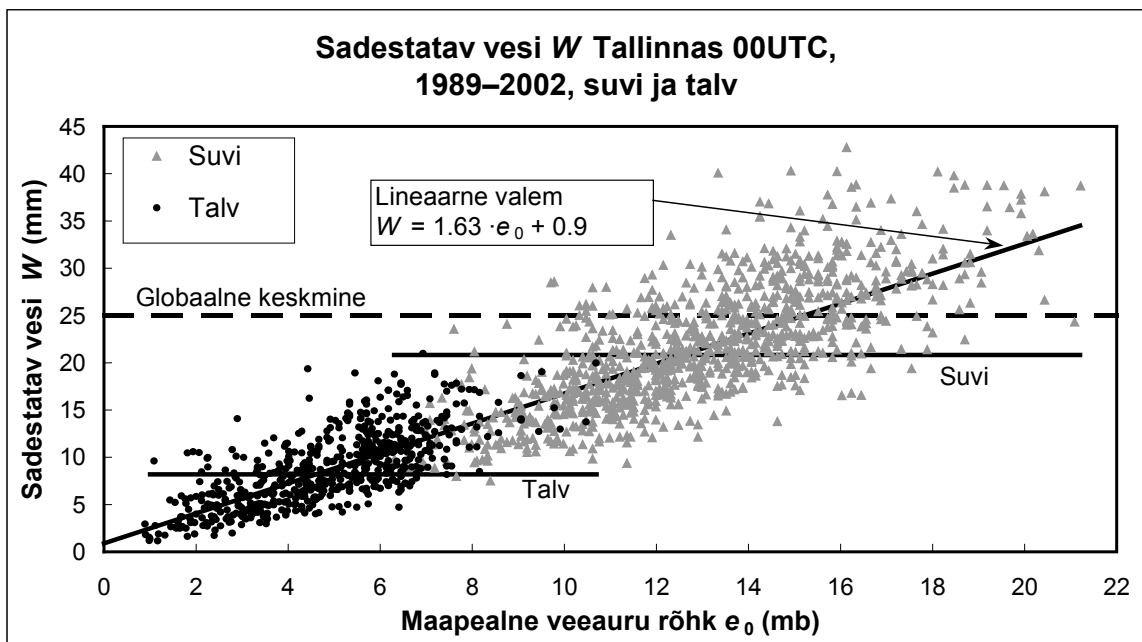
**Joonis 8.** Läänemere regioonis asuvate 17 meteojaama sesoonikeskmiste sadestatava vee väärtuste sõltuvus jaama laiuskraadist, 1989 – 2002 kell 00UTC: SÜGIS.



**Joonis 9.** Läänemere regioonis asuvate 17 meteojaama sesoonikeskmiste sadestatava vee väärtuste sõltuvus jaama laiuskraadist, 1989 – 2002 kell 00UTC: TALV.



**Joonis 10.** Läänemere regioonis asuvate 17 meteojaama aasta- ja sesoonikeskmiste sadestatava vee väärtuste sõltuvus jaama laiuskraadist, 1989–2002 kell 00UTC sooritatud mõõtmiste andmetel.



**Joonis 11.** Sadestatav vesi  $W$  Tallinnas 1989–2002 kell 00UTC, suvised ja talvised punktid. Horisontaalne punktiirjoon vastab globaalsele keskmisele  $W = 25$  mm, pidevad horisontaaljooned vastavad Tallinna jaoks valemiga (8.1) arvatud  $W$  sesoonsetele keskmiste väärtustele. Tõusev joon vastab Tallinna kõikide aastaegade jaoks vähimruutude meetodil leitud lineaarsele lähendile.

## 9. SADESTATAV VESI TÕRAVERES

Tõraveres on 2002. aasta 3. juunist alates AERONET'i (AErosol RObotic NETwork) fotomeeter, millega sooritatakse päikese ja taeva heleduse mõõtmisi. Saadud mõõtmistest arvutatakse ka sadestatav vesi  $W$ . On hinnatud, et sellel meetodil leitud sadestatava vee määramatus on 10 % (AERONET, 2004).

Mõõtmiste tulemused on kättesaadavad AERONET'i koduleheküljel (AERONET, 2004). Andmeid on kolmel tasemel:

- tase 1.0 – sorteerimata mõõtmistulemused;
- tase 1.5 – järelkalibreeritud, välja selekteeritud pilvised juhud;
- tase 2.0 – järelkalibreeritud, välja selekteeritud pilvised juhud, “käsitsi” järelkontrollitud.

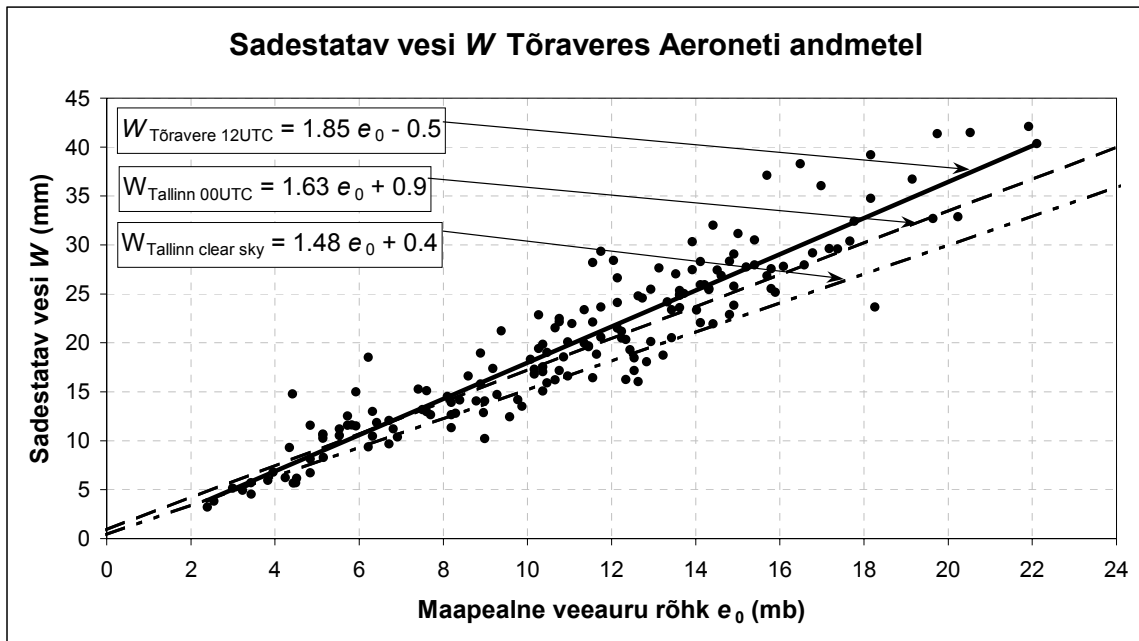
Võrreldes tasemetel 1.5 ja 2.0 esitatud sadestatava vee  $W$  väärtuseid, selgus, et neis on esitatud täpselt samad  $W$  väärtused. Muutus seisneb selles, et tasemel 2.0 on välja heidetud kõik teatud päevadel sooritatud mõõtmised.

Antud töös kasutame taseme 1.5 andmeid aastatest 2002–2003, sest taseme 2.0 andmeid on usaldusväärse analüüsi tegemiseks veel liiga vähe.

Hindasime keskpäevaseid (12UTC) sadestatava vee väärtuseid. Selleks leidsime iga päeva jaoks kõik  $W$  väärtused, mis on mõõdetud ajavahemikus 10UTC – 14UTC ning leidsime aritmeetilise keskmise (Lisa 6). Nõnda saime kahe aasta peale kokku 166 mõõtepäeva andmed.

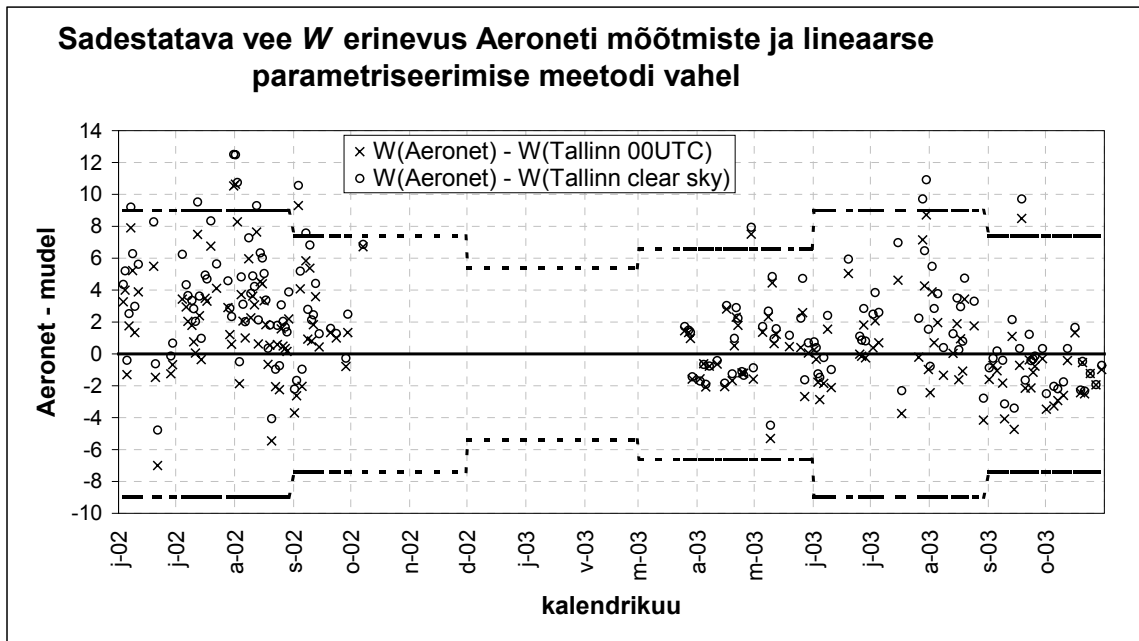
Maapealse veeauru partsiaalrõhu  $e_0$  kell 12UTC mõõdetud andmed pärinevad Tõravere meteojaama vaatlustest.

Joonisel 12 on toodud sadestatava vee  $W$  sõltuvus maapealsest veeauru partsiaalrõhust  $e_0$ . On näha, et suurte  $e_0$  väärtuste korral hindab Okulovi valem (Tallinn, clear sky) sadestatavat vett  $W$  ca 20 % alla.



**Joonis 12.** Sadestatav vesi  $W$  Tõraveres Aeroneti päevaste mõõtmiste andmetel aastatest 2002–2003. Sirge pidev joon on leitud antud mõõtepunktide jaoks vähimruutude meetodil. Katkendjoon tähistab Tallinna aeroloogiajaamas aastatel 1989–2002 sooritatud öiste (00 UTC) mõõtmiste vähimruutude meetodil leitud lähendsirget, punkt-kriipsjoon tähistab Tallinna aeroloogiajaamas aastatel 1990–2001 selgete ilmadega kell 12UTC sooritatud mõõtmiste vähimruutude meetodil leitud lähendsirget (Okulov, 2003).

Joonisel 13 on esitatud erinevused AERONET'i mõõtmiste ja kahe lineaarse parametriseerimismeetodi vahel. Katkendjooned tähistavad Tallinna jaama jaoks arvutatud parametriseerimisvalemite sesoonseid määramatusesid 95 % usaldusnivool (Tabel 3). Nagu jooniselt näha, jäävad Tallinna kell 00UTC valemiga arvutatud punktidest ainult 5 (166-st) määramatuspiirkonnast väljapoole. Seega võib väita, et on olemas kooskõla Tõravere Aeroneti mõõtmiste ja Tallinna aeroloogiliste mõõtmiste põhjal leitud parameetritega lineaarse parametriseerimismeetodi vahel. Tallinna kell 12UTC selgete ilmade valemiga arvutatud punktidest jääb määramispiirkonnast väljapoole 12 punkti.



**Joonis 13.** Sadestatava vee  $W$  erinevus AERONET'i mõõtmiste ja lineaarsete parametriseerimise mudelite vahel. Ristiga on tähistatud erinevus AERONET'i mõõtmiste ja Tallinna kell 00UTC jaoks leitud parametriseerimisvalemi tulemuste vahel, ringiga AERONET'i mõõtmiste ja Tallinna kell 12UTC selgete ilmade jaoks leitud parametriseerimisvalemi vahel. Katkendjooned tähistavad Tallinna kell 00UTC parametriseerimisvalemi sesoonseid määramatusi 95 % usaldusnivool (Tabel 6).

## 10. KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö põhineb 17 Läänemere valgalal paikneva aeroloogiajaama aastatel 1989–2002 sooritatud sadestatava vee raadiosondeeringute analüüsil. Kaart uuritavate jaamadega on toodud töö lisades (Lisa 1). Mõõtmispunktide arv vaadeldavates meteojaamades uuritaval ajaperioodil oli kokku ligi 150 000 (väikseim Riias 4 513, suurim Lindenbergis 14 323). Samuti on töös põgusalt uuritud Tõraveres paikneva AERONET'i spektroskoopiajaamas aastatel 2002–2003 sooritatud sadestatava vee mõõtmistulemusi.

Sadestatava vee  $W$  analüüsimiseks oleme antud töös teinud järgmist.

- Hindasime sondeeringute tulemustest arvatavate sadestatava vee  $W$  väärtuste määramatust.
- Analüüsisime kolme sadestatava vee parametrizeerimismeetodit – maapealse veeauru osarõhu  $e_0$  kaudu, lähedalasuva aeroloogiajaama mõõtetulemuse kaudu ning uuritava jaama eelmise vaatluse kaudu.
- Leidsime kolmele sadestatava vee  $W$  parametrizeerimismeetodile vastavad koefitsiendid jaamade kaupa, seda nii üle aasta kui ka sesoonselt.
- Leidsime vaadeldavate  $W$  parametrizeerimismeetodite jääkstandardhälbed jaamade kaupa, seda nii üle aasta kui ka sesoonselt.
- Valisime igale meteojaamale 2 parimat parametrizeerimismeetodit lähtudes nende jääkstandardhälvetest.
- Leidsime ja analüüsisime kuu-, sesooni- ja aastakeskmisi  $W$  väärtuseid.
- Analüüsisime sesooni- ja aastakeskmiste  $W$  väärtuste sõltuvust jaama laiuskraadist  $\varphi$ .
- Võrdlesime Tõraveres Aeroneti radiomeetriajaama abil mõõdetud  $W$  väärtuseid Tallinna aeroloogiajaama  $W$  väärtuste kaudu leitud parametrizeerimisvalemitega.

Töö tulemused võib lühidalt kokku võtta järgmiselt:

- Raadiosondi RS 90 sondeerimistulemustest arvatud sadestatava vee  $W$  suhteline määramatus usaldusnivool 95 % on 9.3 %.
- Läänemere regioonis annab sadestatava vee  $W$  arvutamisel kõige väiksemaid jääkstandardhälbe väärtusi enamasti mudel, mille sisendparameetriks on maapealne

veeaururõhk  $e_0$ . Erandiks on talvesesoon, mil enamasti on parim mudel, mille sisendväärtuseks on lähedal paiknevas meteojaamas mõõdetud  $W$ .

- Sadestatava vee  $W$  arvutamisel maapealse veeauru osarõhu  $e_0$  kaudu või sama jaama eelmise vaatluse kaudu võib alati kasutada üle aasta arvutatud valemiparameetreid.  $W$  arvutamisel lähedalasuva aeroloogiajaama mõõtetulemuse kaudu tuleks aga täpsuse suurendamise eesmärgil kasutada valemi sesoonseid parameetreid.
- Läänemere piirkonnas on sadestatava vee  $W$  kell 00UTC mõõdetud väärtused keskmiselt suuremad kell 12UTC mõõdetud väärtustest.
- Keskmine sadestatav vesi  $W$  omab Läänemere regioonis head korrelatsiooni jaama laiuskraadiga, seda eriti üleminekusesoonidel kevadel ( $R^2 = 0.93$ ) ja sügisel ( $R^2 = 0.95$ ).
- Sesoonikeskmised  $W$  väärtused on kõigis vaadeldud jaamades kõige suuremad suvel, kahanevas järjekorras edasi sügisel, kevadel ja talvel.
- Sadestatava vee  $W$  parametrizeerimine maapealse veeaururõhu  $e_0$  kaudu Tallinna jaoks arvutatud parametrizeerimiskoeffitsientidega ning Tõraveres AERONET'i poolt mõõdetud  $W$  väärtused langevad kokku, arvestades nende määramatuseid.

## 11. KASUTATUD KIRJANDUS

- Abakumova, G., M., Evnevitsh, T., V., Nikolskaja, N., P., *Linna mõju atmosfääri läbipaistvusele*, Moskva Ülikooli kirjastus, 1983, 8-11 (vene k.).
- Aruksaar, H., Liidema, H., Martin, I., Mürk, H., Nei, I., Põiklik, K., *Üld- ja agrometeoroloogia*, Tallinn, Eesti Raamat, 1964, 110–115.
- Borbas, E., Derivation of precipitable water from GPS data: an application to meteorology, *Phys. Chem. Earth*, 1998, **23**, 1, 87–90.
- Gueymard, C., Analysis of monthly average atmospheric precipitable water and turbidity in Canada and Northern United States, *Solar Energy*, 1994, **53**, 57–71.
- Gueymard, C., Assessment of the accuracy and computing speed of simplified saturation vapor equations using a new reference dataset, *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**, 1294–1300.
- Güldner, J., Spänkuch, D., Results of year-round remotely sensed integrated water vapor by ground-based microwave radiometry, *J. Appl. Met.*, 1999, **38**, 981–989.
- Heinonen, M., Personal communication in Finland, in MIKES humidity lab, 2004.
- Jakobson, E., bakalaureusetöö *Atmosfääri veesisalduse parametrizeerimine Sodankylä ja Jokioise andmete alusel*, Tartu, 2002, 1–34.
- Kiviste, A., *Matemaatiline statistika MS Exceli keskkonnas*, Tallinn, GT Tarkvara OÜ, 1999, 1–86.
- Leckner, B., The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface-elements of a model, *Solar Energy*, 1978, **20**, 143-150.
- Okulov, O., Ohvril, H., Kivi, R., A Simple parameterization of atmospheric precipitable water vapor on Tallinn, Estonia, *Third Study Conference on Baltex*, Meywerk, J., International Baltex Secretariat Publication No. 20, 2001, 169–170.
- Okulov, O., Ohvril, H., Kivi, R., Atmospheric precipitable water in Estonia, 1990 – 2001, *Boreal Environment Research* 7, Helsinki, 2002, 291–300.
- Okulov, O., Ph. thesis *Variability of atmospheric transparency and precipitable water in Estonia during last decades*, Tartu University Press, 2003, 31–42.

- Peixoto, J. P., Oort, A., H., *Physics of climate*, American institute of physics, New York, 1992, 165–176.
- Reitan, C., H., Surface dew point and water vapor aloft, *J. Appl. Meteor.*, 1963, **2**, 776–779.
- Vaisala, Personal communication in Finland, in Vaisala humidity lab, 2004.
- WMO, Technical Regulations, v.1, Appendix B, *General Meteorological Standards and Recommended Practices*, p. 1-Ap-B-3, 1988.
  
- AERONET, Aerosol Robotic Network, *Web site*: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, 2004
- Vaisala RS 80, RS80 Radiosondes specification, *Web site*: <http://www.vaisala.com>, 2003
- Vaisala RS 90, RS90 Radiosondes specification, *Web site*: <http://www.vaisala.com>, 2003
- Wyoming, University of Wyoming, USA. College of Engineering, Department of Atmospheric Science. *Web site*: <http://www-das.uwyo.edu/upperair/eu.html>, 2003.

## 12. SUMMARY

Water vapor, one of the most variable atmospheric substances, is an important link in the hydrological cycle and is the most important greenhouse gas. Beside this, it also has a significant influence on the accuracy of satellite monitoring information (satellite images) and to the GPS applications. Water vapor strongly modulates propagation of solar radiation.

Precipitable water vapor, or simply, precipitable water  $W$ , is the total amount of water vapor in the zenith direction, between the underlying surface and the top of atmosphere. Its unit is mass per unit area.

Analysis of about 150 000 sounding data from 17 aerological stations from the Baltic Sea region during 1989–2002 gave us the next results.

- Expanded (coverage factor  $k = 2$ ) uncertainty of precipitable water, calculated from a single radiosond RS90 low resolution profile, is 10 %.
- In the Baltic region, the best parameterization for precipitable water is usually a linear model which depends on partial water vapor pressure  $e_0$ . Only in winter should be used another model which uses in input  $W$ , measured in a nearby station.
- When the model input data is partial water vapor pressure  $e_0$  or in the same station measured previous value of  $W$  then in calculations it is enough to use annual coefficients instead of seasonal ones. When the model input parameter is a value of  $W$  measured in a nearby station, then seasonal coefficients secure better results.
- In the Baltic region the  $W$  values measured at 00UTC are on an average 3 % bigger of those measured at 12UTC, perhaps due to the decay of convective clouds or peculiarities of local circulation.
- Average precipitable water has a good correlation with the geographical latitude  $\varphi$ , especially during transitional seasons, spring ( $R^2 = 0.93$ ) and autumn ( $R^2 = 0.95$ ).
- Seasonal average value of precipitable water in every station is during autumn months (SON) in an average 20 % bigger than in spring (MAM).
- There is a close agreement between the values of  $W$  measured in Tallinn (radiosondings) and at Tõravere (AERONET sunphotometer); but the Tõravere values of  $W$  exceed the Tallinn ones in warm season (*e. g.* for  $e_0 = 15$  mb, the difference between  $W$  is 1.9 mm).

## CV

### I ÜLDANDMED

1. Ees- ja perekonnanimi: Erko Jakobson
2. Sünniaeg ja koht: 16.01.1979, Rõuge
3. Kodakondsus: Eesti
4. Perekonnaseis: Abielus
5. Aadress; tel.; *e-mail*: Tartu, Lepiku 8-4; 56 643 946; [erkok@ut.ee](mailto:erkok@ut.ee)
6. Praegune amet: TÜ magistrant keskkonnafüüsikas
7. Haridus:
  - TÜ füüsikaosakond bakalaureus, lõpetatud 2002
  - Võru Greutzwaldi Gümnaasium, lõpetatud 1997
  - Rõuge Põhikool, lõpetatud 1994
8. Keelteoskus:
  - eesti keel – emakeel
  - inglise keel – keskmine
  - vene keel – nõrk
9. Töökogemus:
  - 2001–2002 AS Alarmnet, madalpingetehnik

### II TEADUSLIK JA ARENDUSTEGEVUS

1. Peamised uurimisvaldkonnad:
  - TÜ keskkonnafüüsika instituut – sadestatav vesi atmosfääris
  - TÜ katsekoda – anemomeetrite kalibreerimine, psühromeetrite kalibreerimine
2. Publikatsioonide loetelu:
  - Poster EFS korraldatud füüsikapäevadel 2004
  - Teesid EFS aastaraamatusse 2004
  - Teesid BALTEX konverentsi kogumikku 2004

3. Saadud uurimistoetused ja stipendiumid:

- 2004 kevad Kristjan Jaagu Stipendiumid reisistipendium BALTEX'i konverentsil osalemiseks
- Riiklik õppetoetus 2002–2004
- Stipendium ETF grantidelt 4140, 5475, 5857.

4. Tunnustused:

- Kiituskiri füüsikas 1997
- Postri äramärgimine EFS korraldatud füüsikapäevadel 2004

III ERIALANE ENESETÄIENDUS

- Tuule liikumise kiiruse ning õhu niiskuse mõõtmise seadmete kalibreerimise õppepraktika Soomes MIKES-is ja VTT-s 23.02.2004 – 05.03.2004
- Tuuletunneli kasutamise õppepraktika Saksamaal Kölnis firmas Westenberg Engineering, 29.03.2004 – 31.03.2004

Allkiri:

Kuupäev:

### 13. LISAD



Lisa 1. Kasutatud meteojaamade kaart

## Tihedatest sondeeringutest sadestatava vee $W$ arvutamine

Loeme mällu tabeli:

data :=  
C:\.199\_12\_23 00UTC.xls

Defineerime kasutatavad konstandid ja muutujad:

n := last(data <1> )

Defineerime kasutatavad tabeliveerud:

p := data <1>   h := data <2>   T := 273 + data <3>   RH :=  $\frac{\text{data } \langle 4 \rangle}{100}$

$$e_s(T) := 6.188 \cdot 10^{\frac{7.567 \cdot T - 2066.92805}{T - 33.45}}$$

$$\rho(T, RH) := \frac{1}{462} \cdot \frac{e_s(T) \cdot RH}{T}$$

$$W := 100 \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - h_{i-1}) \cdot \frac{\rho(T_i, RH_i) + \rho(T_{i-1}, RH_{i-1})}{2}$$

$$W = 8.79$$

**Lisa 2.** Tihedatest sondeerimisandmetest  $W$  arvutamine (MathCad programm)



## Samapäeva võrdlus

Loeme mällu tabelid:

data1 :=

 C:\.data Riga 01 kell 00 aj.xls

data2 :=

 C:\.data Riga 01 kell 12 aj.xls

Defineerime kasutatavad konstandid ja muutujad:

$n_1 := \text{last}(\text{data1} \langle 1 \rangle)$      $n_2 := \text{last}(\text{data2} \langle 1 \rangle)$      $i := 0..11$      $j := 0..13$   
 $s_0 := 0..n_1$

Defineerime kasutatavad tabeliveerud:

$W_1 := \text{data1} \langle 6 \rangle$      $\text{aasta}_1 := \text{data1} \langle 2 \rangle$      $\text{kuu}_1 := \text{data1} \langle 3 \rangle$      $\text{p2ev}_1 := \text{data1} \langle 1 \rangle$   
 $W_2 := \text{data2} \langle 6 \rangle$      $\text{aasta}_2 := \text{data2} \langle 2 \rangle$      $\text{kuu}_2 := \text{data2} \langle 3 \rangle$      $\text{p2ev}_2 := \text{data2} \langle 1 \rangle$

```

nra(aasta) :=
  kood ← 0
  j ← 0
  while kood = 0
    if j = n2
      ss ← n2
      kood ← 1
    if aasta2_j = aasta
      ss ← j
      kood ← 1
    j ← j + 1
  return ss

aasta := 1989..2002
nraasta_aasta := nra(aasta)    nraasta2003 := n2

nr(s) :=
  nr ← 0
  j ← nraasta_aasta_1_s
  ss ← 1
  while nr = 0
    if j = n2
      ss ← 99999
      nr ← 1
    if j = nraasta_aasta_1_s+1
      ss ← 99999
      nr ← 1
    if aasta_1_s = aasta_2_j
      if kuu_1_s = kuu_2_j
        if p2ev_1_s = p2ev_2_j
          ss ← j
          nr ← 1
        a ← 3
      a ← 4
    j ← j + 1
  return ss

n_s0 := nr(s0)

W2samap(s0) :=
  9999 if n_s0 = 99999
  W2(n_s0) otherwise
  
```

**Lisa 4.** Kell 00UTC ja 12UTC mõõtmistulemuste ühendamine (MathCad programm)

## Kuukeskmise W arvutus

Loeme mällu tabeli:

PS: Tabeli esimene sheet peab olema õige jaam

data :=

 C:\..data Legionowo 01 00.xls

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	1989	1	0.4	-3.1	8.12	14
1	0	8	1989	1	-0.3	-1.9	7.67	14
2	0	23	1989	1	3	0.6	8.1	14
3	0	25	1989	1	3.6	2.4	17.64	15
4	0	28	1989	1	-1.5	-3.5	7.14	15
5	0	30	1989	1	0.4	-0.6	11.18	17
6	0	13	1989	3	3.8	0.7	8.68	14
7	0	14	1989	3	6	1.8	16.55	16

Defineerime kasutatavad konstandid ja muutujad:

$n := \text{last}(\text{data}^{(0)})$   $i := 0..11$   $j := 0..13$

Defineerime kasutatavad tabeliveerud:

$W := \text{data}^{(6)}$   $T := \text{data}^{(4)}$   $\text{aasta} := \text{data}^{(2)}$   $\text{uu} := \text{data}^{(3)}$

```

Wkakesk(k, a) :=
| nr ← 0
| Wk ← 99999
| sum ← 0
| for j ∈ 0..n
|   if k = kuuj ∧ a = aastaj
|     | nr ← nr + 1
|     | sum ← sum + Wj
|   Wk ←  $\frac{\text{sum}}{\text{nr}}$  if nr ≥ 5
| Wk

```

$W_{\text{kakesk}}(2, 1999) = 7.722$

Andmed kuupäevade kohta, mil  $W = 99999$  kustutame hiljem Excelis.

## Lisa 5. Kuukeskmiste arvutamine (MathCad programm)

## Tõravere sadestatava veega seotud kahe andmebaasi ühendamine

Loeme mällu tabelid:

tora :=

C:\.t\ora02\data4 kell12.xls

	0	1	2	3
tora = 0	6	1	12	21.1
1	6	2	12	21.6
2	6	3	12	22.4

aero :=

C:\.M20101\_030101\_Toravere.lev15\_k2ik\_punktid.xls

	0	1	2
aero = 0	3	6	2002
1	3	6	2002
2	3	6	2002

Defineerime kasutatavad tabeliveerud:

$T_t := \text{tora} \langle 3 \rangle$      $W := \text{aero} \langle 6 \rangle$      $k_t := \text{tora} \langle 0 \rangle$      $d_t := \text{tora} \langle 1 \rangle$      $m_a := \text{aero} \langle 4 \rangle$   
 $e_t := \text{tora} \langle 4 \rangle$      $k_a := \text{aero} \langle 1 \rangle$      $d_a := \text{aero} \langle 0 \rangle$      $h_a := \text{aero} \langle 3 \rangle$      $\max_t := \text{last}(k_t)$      $\max_a := \text{last}(k_a)$   
 $\max_t = 213$      $\max_a = 1.965 \times 10^3$

t - tõrav    k - kuu  
a - aero    d - päev  
h - tund  
m - minut

```

W(ss) :=
  nr ← 0
  arv ← 0
  Wsum ← 0
  while ¬(danr = dtss ∧ kanr = ktss)
    break if nr ≥ maxa
    nr ← nr + 1
  while hanr < 11
    break if nr ≥ maxa
    nr ← nr + 1
  while hanr > 10 ∧ (hanr < 14) ∧ (danr = dtss) ∧ (kanr = ktss)
    Wsum ← Wsum + Wnr
    arv ← arv + 1
    break if nr ≥ maxa
    nr ← nr + 1
  return 99999 if arv = 0
  return  $\frac{W_{\text{sum}}}{\text{arv}}$  if arv ≠ 0
  
```

*Leiame igal keskpäeval  
oleva sadestatava vee  
leides kell 10 - 14  
mõõdetud sadestatava  
vee aritmeetilise keskmise.*

ss := 0 .. max<sub>t</sub>

W<sub>ss</sub> := W(ss)

Andmed kuupäevade kohta, mil W = 99999 kustutame hiljem Excelis.

**Lisa 6.** Tõravere andmebaaside ühendamine (MathCad programm)

# Atmosfääri veesisalduse regressioanalüüs Läänemere piirkonnas



Erko Jakobson<sup>1</sup>, Hanno Ohvri<sup>1</sup>, Oleg Okulov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eesti Ühiskondlike Teaduste Instituut  
<sup>2</sup> EMELT-i liikme ja juures

## 1. Sissejuhatus

Atmosfääri veeaurisalduse ehk sadestatava veele  $W$  (precipitable water, column water vapor content) nimetatava ühikulisel ristiõhuga vertikaalses õhusambas olevat veeauru massi ( $\text{kg m}^{-2}$  või  $\text{g cm}^{-2}$ ), mis avaldub on võrdne veeauru vedeldat kibi paljusena vastavalt nullimeetris või sentimeetris. Sadestatava vee sademine on vajalik elendväärtus erinevates atmosfääri olukordades ning muutumisei kirjeldatavas mudelis ja niimete arvutuselamisel, näiteks põllukultuuride niiskuse ja loomade arvutustes.

Sadestatava vee määratleme tavaliselt nelja meetodi:

1. aeroloogiline sondimine (näitab tavaliselt absoluutset niiskuse vertikaalse profiili)
2. atmosfäärilise optilise meetodi (näitab tavaliselt absoluutset niiskuse vertikaalset profiili)
3. GPS meetodi (määratleb radiaaltõppu kihiliselt niiskuse ja veeauru)
4. mikro laine radiomeetria (määratleb veeauru nooluliseid kiirgusi)

Kuiigi erinevate meetoditega saadud sadestatava vee väärtused ühtivad kiiresti omavahel, on tegemist väga kallide eksperimentidega, mille ajal ja geograafilise tihedus on hästi. Seepärast on järeldatavalt alustatud  $W$  määratlemiseks lihtsade meetoditega.

## 2. Kasutatavad andmebaasid

Kõikides kirjanduses on analüüsitud 17 meteoroloogilise andmebaasi aastast 1989 – 2002 (tabel 1, postri taustal). Andmed pärinevad Ühiskondlike Teaduste Instituudi (EFC) andmebaasidest. Seda andmebaasi kasutatakse kuni nelja korda päevas: 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC ja 18 UTC, enamasti siiski 00 UTC ja 12 UTC. Kõikidele andmebaasidele on määratud ajavahemik 0.5 – 2 tundi UTC ajast (võttes 00 UTC on kõige täpsem). Andmed on saadud Schlegeliga loomulikele andmetele, mis on saadud jaanuarist (02.03). Alates 01.11.1997 Riias ning 01.11.2001 Tallinnas on andmed saadud Ühiskondlike Teaduste Instituudi (EFC) andmebaasidest.

Tabel 1. Kasutatud meteoroloogilised andmebaasid.

Meteoroloogiline jaam	Jaama koordinaadid	Põhja-laius	Ida-pikkus	Kõrgus merepinna
Copenhagen	06181	55.76	12.53	-2 m
Göteborg	02827	57.66	12.50	164 m
Greifswald	10184	54.10	13.40	6 m
Jokioinen	02963	60.81	23.50	100 m
Jyväskylä	02935	62.40	25.68	148 m
Leba	12120	54.75	17.53	6 m
Legionowo	12374	52.40	18.96	96 m
Lindenberg	10393	52.21	14.11	115 m
Lulea	02185	65.55	22.13	34 m
Rīga	26422	56.96	24.05	26 m
Schleswig	10035	54.43	9.55	-8 m
Sodankylä	02836	67.36	26.65	179 m
Sundsvall	02365	62.63	17.45	6 m
Tallinn	26038	59.38	24.58	34 m
Višy	02991	57.65	18.35	-7 m
Voejkovo	26063	59.95	30.70	78 m
Wrocław	12425	51.78	16.88	122 m

## 3. Vaadeldavad parameetriserimismeetodid

Sadestatava vee korreleerub kiiresti niimete meteoroloogiliste parameetritega, nagu veeauru osarõhk, kastepunkti õhu temperatuur jne. (Okulov et al. 2002). Samas on kiiret, et kõige paremini korreleerub sadestatava vee väärtused niimete meteoroloogiliste parameetritega, mis on kõige paremini korreleeritud sadestatava vee väärtustega.

$W = k \cdot T + b$

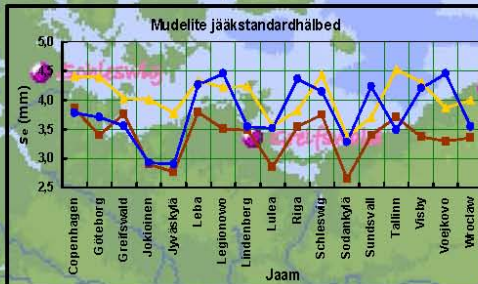
Kõikides kirjanduses on võrreldud järgmisi viit erinevat meetodit:

1. sadestatava vee  $W$  arvutamise niimete meteoroloogiliste parameetritega, mis on kõige paremini korreleeritud sadestatava vee väärtustega
2. sadestatava vee  $W$  arvutamise niimete meteoroloogiliste parameetritega, mis on kõige paremini korreleeritud sadestatava vee väärtustega
3. jaama  $W$  arvutamise niimete meteoroloogiliste parameetritega, mis on kõige paremini korreleeritud sadestatava vee väärtustega

Mudelite hindamiseks kasutatakse järgmisi kriteeriume:  $R^2$  ja  $\epsilon$ .

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2}$$

Kui  $R^2$  on mudeli prognoos ja  $W$  on sadestatava vee väärtused. Joonis 1 on esitatud iga jaama kohta arvutatud kolme vastuse all oleva mudeli jääkstandardhälbed. 14-nes jaamas on kõige parem mudel, mille jääkstandardhälbed on niimete meteoroloogiliste parameetritega, mis on kõige paremini korreleeritud sadestatava vee väärtustega.



Joonis 1. Vaadeldavate mudelite jääkstandardhälbed. Pruun – mudel 1, kollane – mudel 2, roheline – mudel 3.

Mudelite seose määratlemiseks kasutatakse järgmisi kriteeriume (tabel 2). Joonis 2 näitab iga aasta jaoks saadud mudelite parameetrid. Kuna vaadeldud mudelite jääkstandardhälbed olid algselt kiiret niimete meteoroloogiliste parameetritega, siis on nende seose määratlemiseks kasutatud 95% niimete meteoroloogiliste parameetritega. Sadestatava vee seoseid jääkstandardhälbed kirjeldab proportsionaalselt seoseste loomulike väärtused (Joonis 2).

Tabel 2. Jaamade mudelite parameetrid ja seoseid jääkstandardhälbed kahe parema Ehendmudeli jaoks.

Nr.	Jaam	Läh. jaam	Parameetrid	k	b (mm)	se (mm)	avast.	leht	suvi	talv
1a	Copenhagen	Göteborg	$W_t$	0.80	2.0	3.78	3.56	5.10	4.79	3.12
b	Copenhagen		$W_o$	1.57	-0.5	3.86	3.41	4.49	3.77	3.45
2a	Greifswald	Lindenberg	$W_t$	0.91	1.8	3.71	3.31	4.66	3.88	3.00
b	Greifswald		$W_o$	1.65	-0.3	3.76	3.20	4.35	4.00	3.37
3a	Göteborg		$W_t$	1.58	-0.5	3.39	2.99	3.87	3.55	3.00
b	Göteborg	Copenhagen	$W_t$	0.90	2.5	3.56	3.82	4.20	4.82	3.66
4a	Jokioinen		$W_t$	1.66	0.0	2.89	2.63	3.42	3.03	2.33
b	Jokioinen	Jyväskylä	$W_t$	0.89	0.6	2.92	2.87	4.28	3.30	1.97
5a	Jyväskylä		$W_t$	1.69	0.5	2.76	2.46	3.36	2.89	2.16
b	Jyväskylä	Jokioinen	$W_t$	0.90	1.8	2.90	3.01	3.92	3.13	2.44
6a	Leba		$W_t$	1.64	-0.2	3.79	3.40	4.60	3.77	3.09
b	Leba	Greifswald	$W_t$	0.84	3.0	4.27	3.87	5.13	4.61	3.64
7a	Legionowo		$W_t$	1.71	0.1	3.50	2.77	4.22	3.76	2.95
b	Legionowo		$W_o$	0.81	2.4	4.22	3.79	5.12	4.17	3.52
8a	Lindenberg		$W_t$	1.79	-1.0	3.48	2.94	3.98	3.77	3.08
b	Lindenberg	Wrocław	$W_t$	0.90	1.6	3.55	2.94	4.61	3.44	2.63
9a	Lulea		$W_t$	1.55	1.0	2.85	2.48	3.78	2.71	2.15
b	Lulea	Sodankylä	$W_t$	0.81	1.5	3.51	2.82	5.30	3.49	2.17
10a	Riga		$W_t$	1.64	0.9	3.55	2.83	4.44	3.99	2.69
b	Riga		$W_o$	0.81	2.8	3.83	3.17	4.79	4.11	3.02
11a	Schleswig		$W_t$	1.64	-0.8	3.75	3.26	4.40	3.94	3.28
b	Schleswig	Greifswald	$W_t$	0.88	2.5	4.41	4.06	5.51	4.37	3.38
12a	Sodankylä	Lulea	$W_t$	1.66	1.3	2.65	2.37	3.28	2.57	1.99
b	Sodankylä	Lulea	$W_t$	0.93	1.7	3.28	3.18	4.79	3.60	2.80
13a	Sundsvall		$W_t$	1.65	1.1	3.40	2.73	4.18	3.91	2.40
b	Sundsvall		$W_o$	0.79	2.4	3.70	3.18	4.62	3.63	3.04
14a	Tallinn	Jokioinen	$W_t$	0.81	1.4	3.48	2.62	5.82	4.97	2.39
b	Tallinn		$W_o$	1.63	0.9	3.70	3.37	4.46	3.65	2.71
15a	Višy		$W_t$	1.68	-0.9	3.37	2.98	4.42	3.26	2.68
b	Višy	Leba	$W_t$	0.87	3.6	4.21	3.62	5.25	4.47	3.10
16a	Voejkovo		$W_t$	1.68	1.1	3.30	2.63	3.86	3.87	2.45
b	Voejkovo		$W_o$	0.84	1.9	3.87	3.14	4.96	3.79	2.85
17a	Wrocław		$W_t$	1.82	-0.1	3.36	2.79	3.79	3.69	2.98
b	Wrocław	Lindenberg	$W_t$	0.90	1.7	3.55	2.92	4.61	3.40	2.74

## 4. Sadestatava vee seos jaama laiuskraadiga Läänemere piirkonnas

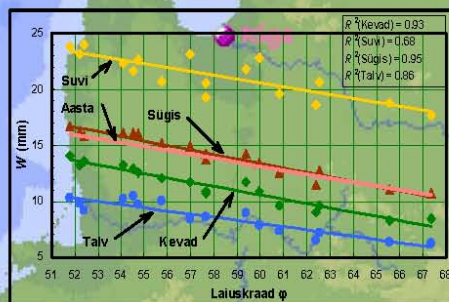
Sadestatava vee  $W$  tendentsid – suurenda lõuna suunas – uurimiseks kasutatakse  $W$  (hall 00 UTC) loomulike väärtused nelja aastaja jaoks:

- kevad (märts, aprill, mai),
- suvi (juuni, juuli, august),
- sügis (september, oktoober, november),
- talv (detsember, jaanuar, veebruar).

Lineaarne valem

$$W = k \cdot \phi + b$$

väljendab kiiret seost sadestatava vee  $W$  väärtuste sõltuvust jaama laiuskraadist  $\phi$ . Lineaarne mudel hajumise on väiksem kevadel ja sügisel ( $R^2 = 0.93$  ja  $0.95$  vastavalt), suurem suvel ja talvel ( $R^2 = 0.68$  ja  $0.86$  vastavalt). Ülemine jaamaagede levide ja sügisel väiksemat hajumist võib seletada sellega, et atmosfäär on horisontaalselt rohkem segunenud ja loomulike eripärad ei suuda suurt mõju avaldada.



Joonis 2. Aasta- ja seoskeskmine sadestatava vee  $W$  (mm) hall 00 UTC vaadeldavates meteoroloogilistes jaamades, korrelatsioon jaama laiuskraadiga.

## 5. Kokkuvõtte

Antud töö on saadud järgmiste tulemustest:

- enamasti on parimad tulemused mudel, mille seaduspärasus on niimete meteoroloogiliste parameetritega, mis on kõige paremini korreleeritud sadestatava vee väärtustega,
- iga vaadeldud 17 meteoroloogilise jaama kohta on leitud 2 Ehendamudeli loomulike seoseid jääkstandardhälvetega,
- esitatud Ehendamudeli määratlemiseks kasutatud 95% jääkstandardhälbed suvel vahemikus 6.6 mm – 11.6 mm) ja talvel 4 mm – 7.3 mm.
- Läänemere regioonis on suur korrelatsioon aasta- ja seoskeskmine sadestatava vee ning jaama laiuskraadi vahel.

## Kasutatud kirjandus

Okulov O., Ohvri H., Kivi R., Atmospheric precipitable water in Estonia, 1990–2001, Boreal Environment Research, 7, 291–300, 2002.

Lisa 7. EFS füüsikapäevade 2004 poster (vähenatud koopia)