

LOODUSVARADE INSTITUUDI AVALDISED
PUBLICATIONS
OF THE NATURAL RESOURCES RESEARCH INSTITUTE
OF ESTONIA

N^o 7

METEOROLOOGIA, KLIMATOLOGIA JA HÜDROLOGIA SEKTSIOONI TÖÖ Nr. 4
SECTION OF METEOROLOGY, CLIMATOLOGY AND HYDROLOGY. PAPER No. 4

AARNE KÄRSNA

**TUULE-ENERGIA JAOTUSEST
EESTIS**

WITH ENGLISH SUMMARY :
DISTRIBUTION OF WIND POWER IN ESTONIA

TALLINN, 1940

LOODUSVARADE INSTITUUDI AVALDISED
PUBLICATIONS
OF THE NATURAL RESOURCES RESEARCH INSTITUTE
OF ESTONIA

№ 7

AARNE KÄRSNA

**TUULE-ENERGIA JAOTUSEST
EESTIS**

WITH ENGLISH SUMMARY:
DISTRIBUTION OF WIND POWER IN ESTONIA

TALLINN, 1940

Natsionaliseeritud „Vaba Maa“ trükk. Tallinn, 1940.

SISUKORD.

	Lk.
1. Tähtsamad sümbolid	6
2. Sissejuhatus	7
I. Seos tuulemootorilt saadava tööhulga Q ja tuulekiiruse v vahel	9—13
1. Tuulemootori maksimaalse võimsuse W_{max} olenevus tuulekiirusest v .	
2. W_{max} ja v vahelise seose tuletamine tiibtuuliku jaoks.	
3. Seos tööhulga Q ja tuulekiiruse v vahel.	
II. Tööhulga määramine tuulevaatluste andmetest	13—16
1. Arvutamise kohandamine vaatlusjaamade andmetele.	
Meteoroloogilistes vaatlusjaamades tehakse vaatlusi 3 korda ööpäevas, ja sellekohaselt on tööhulgaühik valitud nii, et tööhulk Q avaldub ainult vaatlustähtaegadel määratud tuulekiiruste kaudu valemiga (25).	
2. Tööhulga määramine juhul, kui mootor alustab käiku tuulekiiruse v_0 juures.	
3. Üleminek töös esitatud ühikutelt tehnilistele ühikutele.	
Selleks tuleb valemi (25) või (27) abil arvutatud tööhulga väärtusi korrutada võrdeteguriga μ vastavalt valemist (27a) või (27b). Sama tegurit tuleb kasutada ka töös valmisarvatud iga vaatlusjaama aastase või suvise ja talvise poolaasta tööhulkade Q või $Q(v_0)$, mis antud tabelis 18, ümberarvutamiseks kilovatt-tundidesse.	
4. Tööhulga Q lihtsustatud arvutamine tuulekiiruse sagedusjaotuse abil.	
III. Vaatlusmaterjali kõlblikkuse analüüs	16—23
1. Töös kasutatud vaatlusjaamad.	
2. Vaatlusmaterjali kõlblikkuse uurimise meetodist.	
Et selgitada, kas 3 vaatlust ööpäevas on küllaldane tuuleenergia määramiseks, on tuulekiiruste sagedusarve Tartus võrreldud igatunnistest vaatlustest saadud sagedusarvudega ja lahkuminekute hindamiseks kasutatud tõenäosusteoorias näidatud norme.	

3. Analüüsi üldtulemused.

Arvutus näitab, et vaadeldaval 10-el aastal on erinevus igatunniste ja 3 korda ööpäevas tehtud vaatluste vahel täiesti juhusliku vea piirides, ja seetõttu ei teki süstemaatilist viga tuule-energia arvutamisel.

4. Vaatlustähtaegade valiku võrdlus juhusliku valikuga.

Ilmneb, et vaatlustähtaegadel (kell 07, 13 ja 21) saadud andmed on tõelisele olukorrale ligemal kui juhusliku valiku alusel saadavad andmed ja nad vastavad umbes 5 vaatlusele ööpäevas, mis saadud juhuslikul valikul.

5. Analüüsi eritulemused.

Edasi on uuritud vaatlusmaterjali kasutamiskõlblikkust eraldi aastate, kuude ja üksikute tuulekiiruste järgi ja leitud, et ka neil erijuhtudel ei teki süstemaatilisi vigu.

IV. Tööhulga esitamine aastases perioodis 23—26

Võrreldes tuulekiiruste sagedusi üksikutel kuudel selgub, et lahkuminekud naaberkuude vahel jäävad enamvähem juhusliku vea piiridesse ja seepärast võib materjali kuude kaupa grupeerida. Joonisest 2 selgub, et on küllaldane, kui aasta jagada kaheks poolaastaks — suviseks ja talviseks.

V. Tööhulkade andmed 26—33

1. Tuulekiiruste sagedusandmed.

Tabelis 10 on antud kõigi jaamade kõigi tuulekiiruste sagedused 10 aasta kohta.

2. Näide tööhulkade arvutamiseks.

3. Tööhulkade andmed.

Andmed on koondatud tabelisse 12 ja nad annavad iga vaatlusjaama kohta talvise (T) ja suvise (S) poolaasta ning kogu aasta (A) tööhulga Q . Edasi on antud veel tööhulgad $Q(3,5)$, $Q(5,5)$ ja $Q(7,5)$, mille saame, kui tuulemootori alustas käiku vastavalt tuulekiiruse 3,5, 5,5 või 7,5 sekundmeetri juures. Kõik andmed on tasandamata.

4. Tööhulkade territoriaalne jaotus.

Ülevaate saamiseks on tööhulkade andmed antud kaardil (joon. 3). Andmed vajavad aga tasandamist, sest kooskõla vaatlusjaamade vahel pole küllaldane.

VI. Tööhulga olenevus keskmisest tuulekiirusest . . . 33—37

Tabelis 10 antud sagedused sisaldavad juhuslikke vaatlusvigu ja sama kandub üle ka tabeli 12 andmetele. Tasandamiseks saab kasutada empiirilist valemit, mis seob tööhulga Q keskmise tuulekiirusega v [valem (35)]. Valem on tuletatud tabeli 12 andmetel, kuna Q ja v vahel on seos, mis nähtub joonisest 4. Valemi abil arvutatud tööhulgad Q_t on antud tabelis 13.

VII. Tööhulga keskmine viga

1. Näide tööhulga keskmise vea arvutamiseks.
2. Tööhulkade keskmised vead.

Tabelis 15 on antud nim. vead 9 vaatlusjaama kohta. Need vead määravad ulatuse, mis määral võib tabeli 12 andmeid tasandada.

VIII. Tasandatud tööhulkade andmed

1. Tasandamismeetodist.

Tasandatud tööhulkade Q_p saamiseks on võetud kaalu-
tud keskmine Q ja Q_f andmetest (tab. 13).

2. Sõrve, Tahkuna ja Vaindlo andmete korrigeerimine.

Tööhulga keskmise vea analüüs näitab, et nim. 3 jaama andmed sisaldavad varemates aastates süstemaatilisi vigu. Tasandatud tööhulkade arvutamisel on need aastad välja jäetud. Lõplikud andmed on tabelis 18.

3. Tasandatud tööhulkade Q_p territoriaalne jaotus.

Pilt ühtub üldjoontes eeltooduga (V ptk. p. 4) ja on selgitavalt näidatud joonisel 5.

**IX. Tööhulkade $Q(v_0)$ redutseerimine vastavalt tasan-
datud tööhulkadele Q_p **

1. Redutseerimismeetodist.

Tabeli 12 andmeist selgub, et $Q(v_0)$ väärtused on olenevad Q väärtustest, nagu see ilmekalt selgub jooniselt 6. Seos on väga täpne ja see võimaldab $Q(v_0)$ väärtusi arvutada ka tasandatud Q väärtuste Q_p jaoks. Andmed on tabelis 18.

2. $Q(v_0)$ väärtuste leidmine iga v_0 jaoks.

Tabelis 18 on $Q(v_0)$ väärtused antud kolme v_0 eriväärtuse jaoks. Teiste v_0 väärtuste jaoks tuleb tabeli 18 andmeid inter- või ekstrapoleerida, mis selgitatud vastavates näidetes.

X. Lisatabelid

Mitmete eriarvutuste läbiviimiseks on antud kaks lisatabelit. Tabel 19 annab kõigi vaatlusjaamade tuulekiiruste sagedused protsentides suve ja talve kohta eraldi. Tabel 20 annab tuulte sagedused protsentides, mis ületavad mingi antud kiiruse.

XI. Arvutusnäiteid

1. Tööhulkade määramine tehnilistes ühikutes.
2. Tööhulkade arvutamine mootori meelevaldse koormamisviisi puhul.

TÄHTSAMAD SÜMBOLID.

- v — tuule kiirus
 v_0 — tuule kiirus, mille juures mootor alustab töötamist
 $Q(v_0)$ — tööhulk, mida annab tuulemootor, kui ta alustab töötamist v_0 juures
 Q — tööhulk, mida annab tuulemootor, kui ta töötab iga (ka väikseima) tuulekiiruse juures
 Q_t — tööhulk Q , tasandatud keskmise tuulekiiruse abil
 Q_r — tasandatud tööhulk suurustest Q ja Q_t .
 μ — tegur, millega Q väärtusi korrutades saame tööhulga kilovatt-tundides
 T — talvine poolaasta (okt. kuni märts)
 S — suvine poolaasta (apr. kuni sept.)
 A — kogu aasta
 kWh — kilovatt-tund.

SISSEJUHATUS.

Käesolev töö esitab võrdlusandmeid (suhtarve) tuule-energia kohta Eesti maa-alal ühes energia aastase jaotusega. Kuigi tegelikus vajatakse absoluutandmeid, on need mõeldavad ainult mingi konkreetse tuulemootori jaoks. Kui on antud tuulemootori tehnilised andmed, siis on tuule-energiast saadavat tööhulka kerge ümber arvutada ka tehnilistesse ühikutesse (kilovatt-tund). Ümberarvutamist selgitab sellekohane näide töö lõpposas (ptk. XI).

Töös esitatud andmed, mis rakendamiskõlblikul kujul on antud tabelis 18, näitavad 16 vaatluskohas tuule-energiast saadavat keskmist tööhulka Q erilistes ühikutes (vt. ptk. II, 3) nii kogu aasta kui ka eraldi suvise ja talvise poolaasta kohta. Tööhulk on arvatud eeldusel, et igas vaatluskohas on täpselt ühesugused tuulemootorid ja et nad töötavad maksimaalse kasulikkusega, s. t. iga esineva tuule puhul on mootor koormatud selliselt, et saavutatav võimsus on maksimaalne.

Kui tuulemootor sisetakistuse tõttu (näit. mootoriga ühendatud veepumba hõõrumine) alustab käiku mingi tuulekiirusega v_0 , siis on sel korral saadav tööhulk $Q(v_0)$ väiksem kui Q . Tabelis 18 on antud $Q(v_0)$ väärtused kolme v_0 eriväärtuse (3,5, 5,5 ja 7,5 m/sek.) jaoks, kust tarbe korral interpoleerimise abil võib leida $Q(v_0)$ väärtuse iga v_0 jaoks.

Kui antud tuulemootori kohta on teada tuule kiirus v_0 (sekundmeetrites), mille juures ta liikuma hakkab, ja mootori maksimaalne võimsus W (vattides) mingi muu tuulekiiruse v (sekundmeetrites) puhul, siis on tabeli 18 andmeist võimalik kergesti arvutada kas aasta või suvise ja talvise poolaasta tööhulk kilovatt-tundides. Selleks tuleb tabelis 18 antud tööhulga väärtusi $Q(v_0)$ korrutada teguriga

$$\frac{0,008 W}{v^3 - v_0^3}$$

Kui tuulemootori sisehõõrumine on praktiliselt null, s. t. kui ta käib ka väga nõrga tuule puhul, siis on $v_0 = 0$ ja tabelist 18 võetakv Q väärtus [mitte enam $Q(v_0)$] tuleb korrutada teguriga

$$\frac{0,008 W}{\sqrt{3}}$$

et saada tööhulk Q kilovatt-tundides.

Arvutus jääb sama lihtsaks ka juhul, kui antud tuulemootori jaoks on olemas tuule tugevuse ülemmäär, millest tugevama tuule puhul mootor seisma pannakse. Sel juhul tuleb leida uus Q väärtus (vt. ptk. V p. 2), millest üleminek kilovatt-tundidele jääb endiseks.

Tuulemootori kasutamist maksimaalse võimsusega on eeldatud seepärast, et sel juhul on saadav tööhulk olenev tuule tugevusest. See on vajalikuks eeltingimuseks arvutuste läbiviimiseks. Kui tuulemootorit kasutatakse mingi juhusliku võimsusega, siis pole saadav tööhulk määratav tuule tugevuse kaudu ja võib esineda igasuguses suuruses allpool maksimaalset suurust. On loomulik, et sel juhul puudub igasugune alus üksikute vaatluskohtade võrdlemiseks, sest erisugusel koormamisel võib ühe ning sama mootoriga nõrgemate tuultega kohas saavutada isegi suuremat tööhulka kui tugevamate tuultega kohas. Ebaotstarbekal koormamisel esineb tunduv energia kaotamine just tugevamate tuulte puhul. Kuna tegelikkuses on tuulemootorite koormamine kindlasti juhusliku iseloomuga, seda olenevalt sooritatavast ülesandest, siis tuleb arvata, et tegelikul tuule-energia rakendamisel aastased tööhulgad üksikutel vaatluskohtadel on väiksema erinevusega kui näitavad seda töös arvutatud andmed. Tasandamise täpset määra pole võimalik hinnata, sest puuduvad andmed tuulemootorite koormamistingimuste kohta.

Ülevaate saamiseks töö sisust on alljärgnevas esitatud selgitav sisukord, kus on lühidalt seletatud iga peatüki sisu, kui pealkiri ise seda küllalt tabavalt ei tee. See võimaldab lugejal välja valida neid peatükke, mis teda huvitavad. Andmed on esitatud selliselt, et lugeja, keda ei huvita töötulemuste arvutamise käik või vastavad põhjendused, võib siiski kasutada töö tulemusi. Selleks on vaja peale sissejuhatause tutvuda vaid viimase peatükiga (ptk. XI), milles antud näited ja selgitused võimaldavad arvutada iga tuulemootori jaoks suvise, talvise või kogu aasta tööhulga kilovatt-tundides.

I. SEOS TUULEMOTORILT SAADAVA TÖÖHULGA Q JA TUULEKIIRUSE v VAHEL.

1. Tuulemootori maksimaalse võimsuse W_{max} olenevus tuulekiirusest v . Tuulemootorilt saadav töö Q oleneb mootori liikuva osa liikumistee pikkusest s ja tuule rõhumise komponendist F liikuvale osale liikumissuunas järgmiselt:

$$(1) \quad Q = csF,$$

kus c on võrdetegur suuruste Q , s ja F valitud ühikute jaoks.

Määrates siit mootori võimsuse W leiame

$$(2) \quad W = \frac{Q}{t} = cVF,$$

kus t on aeg ja V mootori liikuva osa liikumiskiirus, s. t.

$$V = \frac{s}{t}.$$

Nõudes sellist V väärtust, mille juures W on maksimaalne, näitab arvutus, et sel juhul V on olenev tuulekiirusest v , ja nimelt lineaarselt. Seega on

$$(3) \quad V = kv,$$

kus k on võrdetegur.

Saadus tähendab, et koormust tuleb suurendada nii, et tugevama tuule korral mootor sama palju kiiremini ringi käiks. Nii peab siis 12-m/sek. tuule korral mootor 2 korda ja 18-m/sek. tuule korral 3 korda kiiremini ringi käima kui 6-m/sek. tuule puhul. Kiirem või aeglasem käik, mis oleneb vastavalt väiksemast või suuremast koormamisest, on võimsusele ja seega ka teatava aja jooksul saadavale tööhulgale kahjulik.

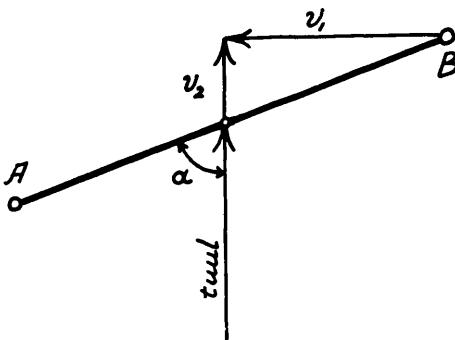
Maksimaalse võimsuse korral, nagu näitavad vastavad arvutused, muutub võimsus võrdeliselt tuulekiiruse kolmanda astmega, s. t.

$$(4) \quad W_{max} = \gamma v^3,$$

kus γ on võrdetegur, olenedes mootori ehitusviisist ja suurusest.

Kuna tuulemootorite tüüpe on palju, siis ei saa siinkohal anda nende kõigi jaoks vastavaid arvutusi. See pole ka oluline, sest hüdrodünaamika käsiraamatuist võivad asjast huvitatud kõike vajalikku leida. Seose (4) selgitamiseks vaatleme siinkohal selle määramist kõige sagedamini esineva tuulemootoritüübi, nn. tiibtuuliku jaoks.

2. W_{max} ja v vahelise seose tuletamine tiibtuuliku jaoks. Tuulemootori, mille pöörlemistelg on asetatud tuule suunas, tiib moodustab tuule suunaga nurga, mille märgime α -ga (joon. 1, tiib otsast



Joon. 1. Tuuliku tiib otsast vaadatuna.

v_1 — tiiva liikumiskiirus;
 v_2 — tiiva taganemise kiirus
 tuule eest.

vaadatuna). Olgu tuule suunaga ristiliikuva tiiva kiirus v_1 . Tiiva kallakpinna tõttu taganeb ta pöörlemisel tuule eest kiirusega v_2 , mis on määratav v_1 ja α kaudu järgmiselt:

$$(5) \quad v_2 = v_1 \cot \alpha.$$

Tuulekiiruse v korral on rõhumine tiivale AB (märgime selle F_1) määratav tuntud valemiga:

$$(6) \quad F_1 = \mu (v - v_1 \cot \alpha)^2,$$

kus μ on võrdetegur. Selle rõhumise komponent F tiiva liikumise suunas on

$$(7) \quad F = F_1 \cot \alpha.$$

Asetades siia F_1 väärtuse valemist (6) saame

$$(8) \quad F = \mu \cot \alpha (v - v_1 \cot \alpha)^2.$$

Määrates viimase seose kaudu võimsuse W leiame

$$(9) \quad W = \mu v_1 \cot \alpha (v - v_1 \cot \alpha)^2,$$

sest $W = Fv_1$.

Meie ülesandeks on leida selline v_1 väärtus, mille puhul W on maksimaalne. Diferentseerides W avalduse v_1 suhtes ja võrdsustades selle nulliga, leiame

$$(10) \quad \frac{dW}{dv_1} = \mu \cot \alpha (v^2 - 4vv_1 \cot \alpha + 3v_1^2 \cot^2 \alpha) = 0.$$

Lahendades võrrandi

$$(11) \quad 3v_1^2 \cot^2 \alpha - 4vv_1 \cot \alpha + v^2 = 0$$

v_1 suhtes, leiame

$$(12) \quad v_1 = \frac{2v \cot \alpha \pm v \cot \alpha}{3 \cot^2 \alpha}.$$

Esimene lahend

$$(13) \quad v_1 = \frac{2v \cot \alpha + v \cot \alpha}{3 \cot^2 \alpha} = \frac{v}{\cot \alpha}$$

annab võimsuse W miinimumseisu, sest valemi (8) järgi on

$$(14) \quad F = \mu \cot \alpha \left(v - \frac{v}{\cot \alpha} \cdot \cot \alpha \right) = 0$$

ja seega $W = 0$. Nähtus tekib siis, kui rootor saab hõõrumisvabalt nii kiiresti pöörelda, et tuul ei saa tiivale enam rõhumist avaldada, sest kui $F = 0$, siis valemi (7) järgi on ka $F_1 = 0$. Valemi (5) järgi on

$$(15) \quad v_2 = \frac{v}{\cot \alpha} \cdot \cot \alpha = v,$$

mis näitab, et tiiva taganemine tuule suunas toimub tuule kiirusega.

Teine W miinimumseis on loomulikult siis, kui $v_1 = 0$, s. t. kui rootor ei liigu, sest liikumiseta pole ka tööd.

Teine võrrandi (11) lahend, nimelt

$$(16) \quad v_1 = \frac{2v \cot \alpha - v \cot \alpha}{3 \cot^2 \alpha} = \frac{v}{3 \cot \alpha},$$

annab W maksimumseisu. Sel puhul on valemi (5) järgi tiiva taganemiskiirus tuule eest

$$(17) \quad v_2 = \frac{v}{3 \cot \alpha} \cdot \cot \alpha = \frac{v}{3}.$$

Asetades leitud v_1 väärtuse valemisse (9) saame

$$(18) \quad W_{max} = \mu \cdot \frac{v}{3 \cot \alpha} \cdot \cot \alpha \left(v - \frac{v}{3 \cot \alpha} \cdot \cot \alpha \right)^2 = \frac{4}{27} \mu v^3.$$

Märkides

$$\frac{4}{27} \mu = \gamma$$

saamegi avalduse, mis antud valemis (4).

Nagu valemist (18) nähtub, ei olene maksimaalne W väärtus α suurusest, välja arvatud juhtum, kui $\alpha = 0$ (tiib asetseb tuule suunaga rööbiti) ja kui $\alpha = 90^\circ$ (tiib asetseb tuule suunaga risti). Esimesel juhul ($\alpha = 0$) on $\cot \alpha = \infty$ ja valemi (16) järgi $v_1 = 0$, millega ka $W = 0$. Teisel juhul ($\alpha = 90^\circ$) on $\cot \alpha = 0$ ja valemi (7) järgi $F = 0$, mistõttu jälle $W = 0$. Iga muu α puhul 0 ja 90° vahel ei ole α suurus mõõduandev, mis on ka arusaadav, sest α ei saa muuta tööd, ta on vaid ülekande mõjustajaks. Kui α on väike, siis pöörleb rootor aeglaselt, kuid teda võib koormata tugevasti. Mida enam α ligineb 90° -le, seda kiiremini pöörleb rootor, kuid seda nõrgemini võib teda koormata. Üldine tööhulk jääb aga samaks ja α valik oleneb ülesandest, mille tuulemootor peab sooritama.

Kui tiiva pikkus on küllalt tunduv, s. t. kui ta punktid liiguvad pöörlemisel mitmesuguse kiirusega, siis tuleb tiiva iga koha jaoks α väärtus erisugune valida, et oleks täidetud nõue

$$v_1 = \frac{v}{3 \cot \alpha}.$$

Kuna v_1 on võrdeline vastava koha kaugusega r pöörlemisel, siis on

$$(19) \quad v_1 = k_1 r,$$

kus k_1 on võrdetegur, ja valemi (16) järgi on

$$(20) \quad \cot \alpha = \frac{v}{3 k_1 r} = \frac{C}{r},$$

kusjuures

$$C = \frac{v}{3 k_1} = \text{konst.}$$

Selliselt valitud α puhul on tiiva igas punktis täidetud nõue, et selle punkti kaudu saavutatav W on maksimaalne. Praktiliselt ei saa kindlasti α väärtust nii laiades piirides muuta, sest esinevad hõõrumistegurid rootori teljel pole α suhtes konstantsed.

Kogu edaspidine arvutus põhineb eeldusel, et rootor on konstreeritud eeltähendatud viisil, valem (20), ja teda koormatakse valemis (16) antud tingimuse kohaselt. Sel juhul on, nagu varem leidsime,

$$W_{max} = \gamma v^3.$$

3. Seos tööhulga Q ja tuulekiiruse v vahel. Kui tahame arvutada tööd mingi ajavahemiku vältel, siis osutub see lihtsaks, kui $v = \text{konst.}$ See soodustus aga puudub, sest tuulekiirus v oleneb ajast t . Seepärast märgime

$$v = f(t).$$

Tööelement dQ vastava ajaelemendi dt jooksul on teatavasti

$$(21) \quad dQ = Wdt = \gamma v^3 dt$$

ja tööhulk Q ajavahemiku t jooksul on

$$(22) \quad Q = \gamma \int_0^t v^3 dt.$$

Kuna funktsiooni $v = f(t)$ jaoks on praktiliselt võimatu analüütilist kuju leida, siis tuleb Q leidmiseks kõnesse vaid numbriline või graafiline integreerimine. Graafilist integreerimist oleks võimalik läbi viia vastavalt anemogrammilt, kuid Eestis on vaid kaks vaatlusjaama (Tartu, Tallinn), kus tuule tugevus on pidevalt registreeritud anemograafi abil. Teistel jaamadel on vaid numbrilised andmed, ja seepärast saab ülesande lahendamiseks kasutada vaid numbrilist integreerimist.

II. TÖÖHULGA MÄÄRAMINE TUULEVAATLUSTE ANDMETEST.

1. Arvutamise kohandamine vaatlusjaamade andmetele. Vaatlusjaamades, mis kuuluvad Tartu Ülikooli Meteoroloogia-observatooriumi II järgu meteojaamade võrku, toimetatakse vaatlusi 3 korda päevas, kell 07, 13 ja 21. Kuna vahepealsete kellaaegade kohta andmed puuduvad, siis tuleb tuule tugevust lugeda konstantseks igale vaatlusele kuuluva ajavahemiku vältel, mis keskmiselt on 8 tundi. See võimaldab võetud ülesannet tunduvalt lihtsustada.

Märgime tuule kiirused üksteisele järgnevatel vaatlustel $v_1, v_2, v_3 \dots$. Vastavalt sellele on esimese 8 tunni jooksul tuule kiirus v_1 ja selle aja jooksul saavutatav töö valemi (22) järgi

$$(23) \quad Q_1 = \gamma v_1^3 \int_0^t dt = \gamma v_1^3 t.$$

Oletame, et valemis (4) on γ nii valitud, et juhul, kui v on antud sekundmeetrites, siis W saame kilovattides. Kui tahame Q_1 saada kilovatt-tundides, siis tuleb valemis (23) t asemele kirjutada $t = 8$.

Järgmise 8 tunni jooksul saadav töö on analoogiliselt:

$$Q_2 = \gamma v_2^3 t.$$

Nii edasi leiame, et n vaatluse vältel saavutatav töö on

$$(24) \quad Q = \gamma t (v_1^3 + v_2^3 + \dots + v_n^3).$$

Kuna meie eesmärgiks on saada vaid võrdlusandmeid, sest konkreetset tööhulgas on vaid konkreetse tuulemootori jaoks, siis valime valemis (24) suuruse γ nii, et

$$\gamma t = 1$$

(s. t. $\gamma = 1/8$, kui t on antud tundides)
ja n vaatlusele langeva aja vältel saadav töö on

$$(25) \quad Q = v_1^3 + v_2^3 + \dots + v_n^3.$$

2. Tööhulga määramine juhul, kui mootor alustab käiku tuulekiiruse v_0 juures. Kui tuulemootor algab liikumist alles mingi tuulekiiruse v_0 juures, siis langevad valemis (25) ära kõik need liikmed, kus $v_i < v_0$ (mootor seisab). Kuid ka järelejäänud liikmetest määratav tööhulk on väiksem nende summast (seda tähistame Q^*), sest osa energiat kulub mootori sisetakistuse ületamiseks. Kui oletada, et selleks vajalik töö ei olene tuule kiirusest, siis on see iga vaatlusvahemiku jaoks, kus $v_i > v_0$, järgmine:

$$(26) \quad Q_0 = v_0^3.$$

Kui vaatlusi, mille puhul $v_i > v_0$, on m , siis vastava m vaatlusvahemiku jaoks (loomulikult peab olema $m \leq n$) on mootori sisetakistusele kuuluv töö mv_0^3 ja mootorilt saadav kasulik töö $Q(v_0)$ tuulekiirusest v_0 alates

$$(27) \quad Q(v_0) = Q^* - mv_0^3.$$

Samuti tuleb välja jätta kõik need vaatlusjuhud, kus tuule kiirus ületab mingi ülemmäära, mille puhul tuulemootoril ei lasta töötada.

3. Üleminek töös esitatud ühikutelt tehnilistele ühikutele. Edasi on oluline teada, kuidas tuleb valemis (25) või (27) antud tööühikutelt üle minna tehnilistele ühikutele (kilovatt-tund). Selle saame lihtsalt järgmise kalkulatsiooni alusel.

Kui ühel vaatlusel oli tuule kiirus v , siis sellele vaatlusele langeva ajavahemiku vältel, milleks on 8 tundi, saadav töö on valemi (25) järgi

$$Q = v^3,$$

kus v on mõõdetud sekundmeetrites.

Olgu vaadeldava tuulemootori maksimaalne võimsus sama tuulekiiruse v puhul W vatti. 8 tunni vältel saadav töö R tehnilistes ühikutes on seega

$$R = 8W \text{ vatt-tundi}$$

ehk

$$R = 0,008W \text{ kilovatt-tundi.}$$

Üleminekuks suuruselt Q suuruselt R vajame võrdetegurit μ . millega Q tuleb korrutada, et saada R . Seega

$$\mu v^3 = 0,008 W$$

ehk

$$(27a) \quad \mu = \frac{0,008 W}{v^3}.$$

Kui tuulemootor alustab sisetakistuse tõttu käiku tuulekiiruse v_0 juures, siis on kasulik töö ühele vaatlusele langeva ajavahemiku vältel tuulekiiruse v puhul

$$Q(v_0) = v^3 - v_0^3.$$

Sama töö tehnilistes ühikutes on endiselt

$$R = 0,008 W \text{ kilovatt-tundi,}$$

kus W on tuulemootori maksimaalne võimsus tuulekiiruse v juures.

Analoogiliselt eelmisele saame võrdeteguriks

$$(27b) \quad \mu = \frac{0,008 W}{v^3 - v_0^3}.$$

Seega on vaja iga antud tuulemootori jaoks teada kolm suurust: tuulekiirus v_0 , mille juures mootor käima hakkab, ja mootori maksimaalne võimsus W mingi tuulekiiruse v puhul.

4. Tööhulga Q lihtsustatud arvutamine tuule kiiruse sagedusjaotuse abil. Nagu valemitest (25) ja (27) nähtub, on Q või $Q(v_0)$ arvutamine sisuliselt lihtne. Esimesel juhul tuleb vaid vaatlustäht-aegadel määratud tuulekiiruste v_i kuuparvud summeerida, teisel juhul tuleb teha sedasama ainult nende v_i väärtustega, kus $v_i > v_0$. ja saadusest lahutada mv_0^3 .

Tehniliselt on see toiming siiski tülikas, sest näiteks 10 aasta andmete puhul tuleb ühe jaama jaoks määrata juba üle 10 000 kuuparvu. Samuti osutub tülikaks ka vastavate vaatluste väljasortimine, kus $v_i > v_0$, eriti veel siis, kui seda on vaja teha mitme v_0 väärtuse jaoks. Kui suurus $Q(v_0)$ mingi v_0 väärtuse jaoks on juba arvatud, siis pole vaatlusmaterjali puudumisel seda võimalik kontrollida ega ka soovi korral määrata uute v_0 väärtuste jaoks. Tuulemootorid alustavad käiku väga mitmesuguste v_0 väärtuste juures, ja kõigi jaoks pole ikkagi võimalik $Q(v_0)$ väärtusi valmis arvutada. Seepärast tuleb nii Q kui ka $Q(v_0)$ arvutamiseks valida sobivam tee. See ongi võimalik üsna lihtsalt tuule kiiruse sagedusjaotuse abil.

Valemi (25) rakendamisel on kohe selge, et Q väärtus ei olene suuruste v_i järjekorrast. Seepärast võime v_i väärtused võtta ka

mõnes teises järjestuses. Eriti sobiv on neid järjestada suuruse järgi, kusjuures on võimalik neid, mis esinevad mitmekordselt, kokku võtta ühise kordaja abil üheks liikmeks. Sel juhul tuleb ainult iga erineva v väärtuse jaoks leida vastav kuuparv ning see korrutada sagedusega, millega see v esineb. Üksteisest erinevaid v väärtusi ei saa palju olla; kui tuuled on näiteks mõõdetud 1 m/sek. täpsusega, siis on neid vaid paarikümne ümber. Paarikümne arvu jaoks on aga kuuparvude leidmine päris lihtne. Raskuspunkt kogu töös langeb siin vajalikkude sagedusarvude leidmisele, milleks on vaja koostada vastavad sagedusjaotused.

III. VAATLUSMATERJALI KÕLBLIKKUSE ANALÜÜS.

1. Töös kasutatud vaatlusjaamad. Vaatlusandmetena tuule kiiruste kohta on käesolevas töös kasutatud Tartu Ülikooli Meteoroloogia-observatooriumi vaatlusjaamade võrgu andmeid 10 aasta, 1926—1935, kohta. Kuna II järgu meteojaamad toimetavad vaatlusi 3 korda ööpäevas ja kuna tuule kiirusel on teatavasti mittekonstantne ööpäevane käik, siis võib tekkida kahtlus, kas ööpäevas 3 korda toimetatud vaatlused määravad vajaliku täpsusega ööpäevase tuule-energia hulga. Selle lahendamiseks tuli kasutada Tartu I järgu meteojaama andmeid, kus anemograafi abil on määratud keskmised tuulekiirused iga tunni kohta. Kuna ümber- töötatud igatunnised andmed algavad Tartus 1926. aastaga, siis ei saadud kasutada varasemaid aastaid. Hilisemad aastad on esialgu kõrvale jäetud, sest arvutustöö oleks paisunud liiga suureks, kuid nende aastate andmeid võib kergesti siduda senistega. Näiteks 1940. aasta lõppemisel võib resultaate täiendada 5 aasta andmetega, samuti võib ka hiljem toimida.

Vaatluse alla võetud jaamad nimetatud 10 aasta jooksul on järgmised:

1. Jõgeva	58° 46'	26° 24'
2. Jäneda	59° 15'	25° 43'
3. Kuusiku	58° 58'	24° 44'
4. Narva-Jõesuu	59° 28'	28° 02'
5. Olustvere	58° 33'	25° 34'
6. Pakri	59° 23'	24° 02'
7. Pärnu	58° 23'	24° 30'
8. Sõrve	57° 55'	22° 03'
9. Tahkuna	59° 06'	22° 35'
10. Tallinn	59° 26'	24° 48'

11. Tartu	58° 23'	26° 43'
12. Tooma	58° 52'	26° 17'
13. Vaindlo	59° 49'	26° 22'
14. Vasknarva	59° 00'	27° 44'
15. Vilsandi	58° 23'	21° 49'
16. Võru	57° 50'	27° 01'

Iga jaama nimele on taha märgitud jaama asukoha geograafiline laius ja pikkus.

2. Vaatlusmaterjali kõlblikkuse uurimise meetodist. Enne antud vaatlusjaamade tuulekiiruste sagedusarvude esitamisele asumist lahendame eelnimetatud probleemi: mis määral saab ööpäevas 3 korda tehtud vaatlusi võtta igatunniste vaatlustena. Küsimus on lahendatud Tartu meteojaama suhtes, kuid resultate võib ilma pikemata laiendada ka teistele jaamadele, sest ööpäevane käik, mis võib tekitada eksitavaid lahkuminekuid, pole üksikute jaamade vahel oluliselt lahkuminev.

Kuna kõigis II järgu meteojaamades on vaatlusi toimetatud kell 07, 13 ja 21 kohaliku aja järgi, siis on Tartu meteojaamas võetud samade kellaaegade vaatlused ja neid võrreldud igatunniste vaatlustega.

Tuule-energia arvutamisel on olulised vaid sagedusarvud iga tuulekiiruse kohta. Seepärast tuleb meil võrrelda sagedusarve, mis saame ööpäevas 3 korda tehtud vaatlustest ja igatunnistest vaatlustest. Seejuures on igatunnistest vaatlustest saadud sagedusarve vaadeldud kui täpseid, s. t. on oletatud, et tuulekiiruse sagedusjaotus jääks edasi samaks ka siis, kui määraksime kiirusi veelgi lühemate ajavahemikkude järel kui üks tund, näiteks iga 10 minuti järel või koguni iga minuti järel. Seega on igatunnistest andmetest saadud relatiivseid sagedusi igas tuulekiiruse klassis vaadeldud kui sinna kiiruseklassi langeva tuule esinemistõenäosust. Selle tõenäosuse alusel on oodata igas kiiruseklassis teatava vaatluste arvu juures tõenäolisemat sagedusarvu, mida võrdleme tegeliku sagedusarvuga. Lahkuminekid nende kahe sagedusarvu vahel on täiesti loomulikud, kuid need lahkuminekid, kui nad pole tingitud süstemaatilistest sagedusjaotuste erinevusest, vaid on juhuslikku laadi, peavad alluma tõenäosusteoorias tuntud nn. juhuslikkuse seadusele. Õeldu tähendab järgmist. Mingis tuulekiiruse klassis igatunniste vaatluste alusel arvutatud tõenäosus määrab kolm korda ööpäevas tehtud vaatlustele teatava aja jooksul (näit. üks kuu) sagedusarvuks

m_{24} (indeks 24 tähendab, et sagedusarv baseerub ööpäevas 24 korda tehtud vaatlustele). Tegelik sagedusarv ööpäevas 3 korda tehtud vaatluste järgi on m_3 . Lahkumine kahe sagedusarvu vahel on $\Delta = m_3 - m_{24}$. Järgmise sama pika ajavahemiku kohta saame analoogiliselt uue lahkuminekku jne. Kui need lahkuminekud Δ , millede üldarv olgu n , on juhuslikud, siis on tõenäosusteooria järgi

$$(28) \quad L = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{m_{24}}} = 1.$$

Suurust L nimetatakse *L e x i s e* teguriks; kui $L > 1$ on, siis on Δ -ad suuremad kui nad juhuslikel põhjusil olla tohiks ja ööpäevas 3 korda tehtud vaatlused on sisuliselt erinevad igatunnistest. Sel juhul ei saa esimestele vaatlustele tuginevaid resultate üldmaks-vaiks lugeda, sest nad omavad süstemaatilist viga.

3. Analüüsi üldtulemused. Arvutuskäigu selgitamiseks vaatleme üht näidet. Võtame vaadeldavaks kiiruseklassiks 2,0 — 2,9 m/sek. (kiirused määratakse anemograafilt 0,1-m/sek. täpsusega.) Kasutame 1934. a. andmeid, kusjuures vaadeldava ajavahemiku pikkuseks võtame ühe kuu, mida aastas on 12. Seega valemis (28) on $n = 12$. Vastavad andmed ja arvutuskäik on antud järgnevas tabelis (tab. 1).

Tabel 1.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
m_{24}	15	12	24	32	24	37	42	40	38	20	19	34
m_3	15	13	25	29	27	35	33	30	36	17	20	37
Δ	0	1	1	—3	3	—2	—9	—10	—2	—3	1	3
Δ^2	0	1	1	9	9	4	81	100	4	9	1	9
$\frac{\Delta^2}{m_{24}}$	0	0,08	0,04	0,28	0,37	0,11	1,93	2,50	0,11	0,45	0,05	0,26

Igatunniste vaatlusandmete alusel määrame iga kuu kohta tõenäosused, millega vaadeldav tuul sel kuul esineb. Saadud tõenäosuste abil määrame teoreetilised sagedusarvud ööpäevas 3 korda toimetatud vaatluste jaoks. Need on antud tabeli 1 esimeses reas ja märgitud m_{24} . Ööpäevas 3 korda tehtud vaatlustest loetud tegelikud sagedusarvud on reas m_3 . Kolmandas reas on antud hälbed kahe esimese rea kohastikku asuvate arvude vahel, $\Delta = m_3 - m_{24}$. Nagu tabeli vaatlemisel selgub, on need hälbed mõnel kuul väga väikesed. Näiteks I, II, III ja XI kuul ühtuvad tegelikud sagedus-

arvud peagu teoreetilistega. Teistel kuudel, näiteks VII ja VIII, on need hälbed küllalt suured. Nii on VIII kuuks igatunniste vaatluste alusel määratud 40 juhtu, kus tuule kiirus pidi langema vahemikku 2,0 — 2,9 m/sek., kuid kell 07, 13 ja 21 tehtud vaatluste järgi langes sinna ainult 30, seega 10 võrra vähem. Nüüd tahame teada, kas need hälbed on juhuslikud ja võivad mõnel teisel aastal koguni vastu pidised olla või on siin tegemist süstemaatilise erinevusega. Vastuse leidmiseks kasutame valemit (28).

Tabeli 1 neljandas reas on antud Δ^2 väärtused ja viiendas reas $\frac{\Delta^2}{m^{24}}$ väärtused (iga Δ^2 tuleb jagada selle kuu m_{24} väärtusega). Viimaseid kokku arvutades saame nende summaks 6,18. Seega on

$$\sum \frac{\Delta^2}{m_{24}} = 6,18,$$

ja kuna $n = 12$, siis on

$$(29) \quad L = \sqrt{\frac{6,18}{12}} = 0,72.$$

Leidsime, et $L < 1$, mis tähendab, et esinenud hälbed selle aasta vältel on keskmiselt koguni väiksemad kui nad olla tohiks.

Tehes samalaadilise arvutuse kogu vaatlusmaterjali ulatuses, s. t. 10 aasta kõigi kuude ja kõigi tuulekiiruste klasside kohta (klassid on valitud iga sekundmeetri järel), leiame, et

$$\sum \frac{\Delta^2}{m_{24}} = 677$$

(saadus on ümardatud täisarvuks) ja

$$n = 1126,$$

mis annab

$$(30) \quad L = 0,78.$$

Ruumipuudusel pole esitatud vastavaid sagedusarve m_{24} ja m_3 , mida kokku on üle 2 000.

10 aastat, à 12 kuud, annavad 120 kuudeklassi. Kuna üldine klasside arv on $n = 1126$, siis langeb igale kuule keskmiselt $1126 : 120 = 9,4$ tuulekiiruse klassi. Et iga klass on laiusel üks sekundmeeter (esimene klass 0,0 — 0,9, teine 1,0 — 1,9 jne.), siis klassi piirjoon 9,4 asetseb ka tuulekiiruse 9,4 m/sek. kohal. Seega on Tartus esinevate tuulte keskmiseks ülemmääraks ühe kuu kohta 9,4 m/sek.

Kuna $L < 1$, siis õigustab see täielikult võtma igatunniste vaatluste asemele ööpäevas 3 korda tehtud vaatlused. Arvutades andmetest L vea saame selleks 0,02, millega

$$(31) \quad L = 0,78 \pm 0,02.$$

4. Vaatlustähtaegade valiku võrdlus juhusliku valikuga. Kuna L on ühest tunduvalt väiksem, siis tekib küsimus, millega seletada seda, et kooskõla on parem kui juhuslikkuse seadus seda eeldab. See selgub peagi, kui silmitseme ligemalt hälvete Δ tekkimise aluseid.

Hälbed Δ alluvad siis juhuslikkuse seadusele ($L = 1$), kui vaadeldava kiirusega tuule esinemine igas kollektiivis, milleks on ühe kuu vaatlused, toimub konstantse tõenäosusega. See nõue pole aga täidetud, sest ilmastiku muutused pole inertsivabad, nagu juhuslikkuse seadus seda nõuab. Igal järgneval vaatlusel pole kõigi tuulte esinemistõenäosused samad nagu eelmisel ja need muutuvad tihti kaunis tugevasti. Kui on vaikne ilm, siis võivad esineda kiirused näiteks 0—4 m/sek., kuid kõvade tuulte esinemiseks on tõenäosus peagu null. Kui aga valitseb tugev tuul, siis võivad esineda näiteks 8—12 m/sek. kiirusega tuuled, ja vaatluse vältel on nõrkade tuulte esinemiseks tõenäosus praktiliselt null. Olukord erineb sellest, kui tõmbaksime tuulekiiruse numbreid loosi teel. Statistiline rida, mis sellistel tingimustel tekib, kannab nime Poisson'i rida, mille kohta on teada, et $L < 1$.

Meil oli $L = 0,78$, seega ühest väiksem, kuid eeltoodut arvestades ei saa öelda, et tuulekiiruse ööpäevane käik (viimase olemasolu on klimatoloogias teada) on nii väike, et kellaegade valik sagedusarvudele mingit mõju ei avalda. See mõju võib olemas olla ja sellela oleks Poisson'i rea korral L vahest veelgi väiksem olnud, kuid see mõju on igatahes nii väike, et sellest tingitud vead ei muutu suuremaks kui nad oleksid puhtjuhusliku olukorra kehtimisel. See on isegi suureks kasuks, sest ilma ettetoodud analüüsita oleks tulnud teiste jaamade vaatluste kasutamisel niikuinii arvestada, et paremal juhul kellaegade valik nopib tuulte tugevusi juhuslikult. Nüüd aga, mil $L < 1$, võib 3 vaatlusega saadud resultaate käsitada kui resultaate, mis saadud rohkemast arvust vaatlustest, kuid mis alluvad juhuslikkuse seadusele. Vastav arvutus, mis siinkohal on jäetud esitamata, sest ta viib kaugemale tõenäosusteooria valdkonda kui käesoleva töö raamides vajalik, näitab, et juhuslikul valikul 5 vaatluse korral ööpäevas omab sagedusjaotus eespool näidatud rakendamiskõlblikkust. Juhusliku valiku all on mõistetud asjaolu, et

igal vaatlusel võib esineda mistahes tuul (kiirusenumbrid on loositel tõmmatavad), ainult selle kitsendusega, et ühe kuu jooksul iga tuul esineks selle relatiivse sagedusega, mis tal tõeliselt oli.

5. Analüüsi eritulemused. Siinkohal võib huvitada veel küsimus, kas L väärtus on konstantne ühest aastast teise, ühest kuust teise ja lõpuks ühest kiiruseklassist teise. Selle määramiseks jagame materjali esmalt üksikute aastate järgi (igas aastas on siis kõigi kuude ja kõigi kiiruste klassid), siis üksikute kuude järgi (igas kuus on siis kõigi aastate ja kõigi kiiruste klassid) ning lõpuks üksikute kiiruste järgi (igas kiiruseklassis on siis kõigi aastate ja kõigi kuude klassid).

Arvutused annavad, et vaadeldava 10 aasta kohta on L väärtused järgmised (tab. 2).

Tabel 2.

Aasta	1926	27	28	29	30	31	32	33	34	35
L	0,72	0,80	0,77	0,73	0,72	0,74	0,88	0,82	0,79	0,79

Siit näeme, et erinevused keskmisest L väärtusest $L = 0,78$ on väga väikesed. Keskmise hälve on 0,05 ja sama suur on ka igale aastale vastava L väärtuse keskmine viga. Resultaat on ka mõistetav, sest tuule kiiruse keskmine ööpäevane käik ei muutu kuigi palju ühest aastast teise.

Tuule tugevuse ööpäevane käik on aastases perioodis juba suuremal määral erinev, mispärast järgnevas vaatlеме keskmist L käiku ühest kuust teise vaadeldava 10 aasta jooksul. Vastavad L väärtused on antud tabelis 3, kusjuures on ühtlasi antud iga kuu jaoks L viga $\sigma(L)$.

Tabel 3.

Kuu	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
L	0,61	0,73	0,79	0,77	0,88	0,87	0,91	0,79	0,77	0,71	0,75	0,72
$\sigma(L)$	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08	0,07	0,10	0,06	0,08	0,04	0,07	0,07

Siin on kõikumised keskmise L väärtuse suhtes veidi suuremad, andes keskmiseks hälveks 0,08. Seegi hälve ei erine kuigi palju L väärtuste keskmistest vigadest $\sigma(L)$, kuid L väärtuste vaatlemisel näeme, et need hälbed pole korratud, vaid suvel enamasti positiivsed ja talvel negatiivsed. Soojemal poolaastal, aprillist septembrini (incl.), on $L = 0,83$ ja külmemal poolaastal, oktoobrist märtsini (incl.), on $L = 0,72$.

Tasandades L väärtuste aastast käiku veariba $\sigma(L)$ piirides saame selle järgmisena (tab. 4).

Tabel 4.

Kuu	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
L	0,68	0,71	0,75	0,82	0,87	0,90	0,88	0,84	0,78	0,73	0,70	0,68

Tabelist nähtub, et talvised vaatlused annavad tuulte sagedusi edasi täpsemalt, s. t. tõelisele olukorrale lähemalt kui suvised, sest viimastel on L väärtused suuremad. Rahuldavateks osutuvad aga kõigi kuude andmed. Väike erinevus aastaegade vahel on tingitud sellest, et kolm korda ööpäevas tehtud vaatlustest haaravad õhtune ja hommikune nõrgemaid tuuli, millega viimaste sagedus üle hinnatakse ja sellega L väärtust suurendatakse. Kuna tuuled on suvel üldiselt nõrgemad, siis sellega suurendatakse eriti suvel L väärtust.

Õeldu selgub täpsemalt järgnevas osas, kus vaadeldakse L väärtust tuule kiiruse järgi.

Huvitavam ja olulisem on tuule tugevuse ööpäevase käigu mõju L väärtustele tuule tugevuse ulatuses, sest võetud vaatlusaegadega on tehtud tuule tugevuse suhtes korrelatiivne valik, millest iga juhuslik valik peab hoiduma. Alljärgnevas tabelis (tab. 5) on antud vaatlusandmetest arvatatud L väärtused iga tuulekiiruse klassi jaoks.

Tabel 5.

Kiirus	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
L	1,11	0,69	0,61	0,74	0,66	0,68	0,73	0,83	0,82	0,81	1,02	0,69
$\sigma(L)$	0,05	0,05	0,04	0,06	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05	0,08	0,20	0,13

Tasandades L käiku veariba $\sigma(L)$ piirides saame normaalse L käigu tuule tugevuse järgi. Vastavad andmed on antud tabelis 6.

Tabel 6.

Kiirus	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
L	1,10	0,70	0,67	0,67	0,68	0,70	0,74	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83

L väärtuste suur kõikumine viimastes klassides (tab. 5) on tingitud vähesest vaatluste arvust, sest vastava tugevusega tuuli esines harva. Mõlema viimase klassi L väärtuse hälbed tasandatud väärtustest mahuvad vea piiridesse ja pole seetõttu segavad. Tabelist 6 selgub, et ainult kiiruseklass 0 (0,0 — 0,9 m/sek.) annab sageduste erinevuse igatunnistest vaatlustest veidi suurema kui juhuslikkuse seadus seda lubab, kuid meie ülesande lahendamisel ei etenda see olulist osa. Nii väikese kiirusega tuuled ei evi praktilist tähtsust, sest neilt saadav tööhulk on tähtsuseta.

Seepärast võib kokkuvõttes öelda, et ööpäevas 3 korda tehtud vaatlused suudavad rahuldavalt asendada igatunniseid vaatlusi ning määrata tuule kiirust iseloomustavaid karakteristikuid.

IV. TÖÖHULGA ESITAMINE AASTASES PERIOODIS.

Edasi tuli otsustamisele tuule-energiat iseloomustavate andmete esitamine aastases perioodis. Kuna on teada, et tuuled on suvel nõrgemad ja talvel tugevamad, siis teeb see vajalikuks anda tuule-energia hulki kas üksikute kuude viisi, aastaegade viisi või mõne muu jaotuse järgi. Selle küsimuse selgitamiseks on vaja teada tuule kiiruse sagedusi iga kuu kohta, milledest siis selgub, kas on võimalik teostada lihtsustavaid rühmitusi. Selleks kasutame veel kord Tartu kui täpsemalt töötava jaama vaatlusi. Järgnevas tabelis (tab. 7) on antud 10 aasta igatunniste andmete alusel iga kuu kohta tuulekiiruste sagedused protsentides kuni 10,9 m/sek., sest tugevamaid tuuli on praktiliselt tähtsusetu hulk.

Tabelist selgub otsekohe, et suvel on nõrgemad tuuled tugevama esindatud, kuna talvel on vastupidi. Kuna tuule-energia praktilisel kasutamisel osutub oluliseks teada tuulte sagedusi, mis ületavad

Tabel 7.

Kiirus	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0,0 — 0,9	1,3	1,4	0,8	1,4	1,3	1,5	1,9	1,7	2,1	0,9	1,6	2,3
1,0 — 1,9	7,8	11,3	8,0	11,7	12,4	14,0	17,7	16,2	11,0	7,2	11,3	11,1
2,0 — 2,9	20,6	24,9	23,7	31,9	32,3	32,7	38,8	37,0	35,5	24,5	25,1	22,9
3,0 — 3,9	18,1	18,4	20,1	22,7	23,3	21,1	20,4	21,3	21,3	22,5	22,1	20,3
4,0 — 4,9	16,9	14,0	15,8	13,4	14,5	14,3	11,0	13,0	13,3	18,6	17,0	15,5
5,0 — 5,9	14,7	11,4	14,0	8,2	8,9	8,9	5,7	5,8	9,2	12,1	10,9	11,5
6,0 — 6,9	9,4	8,2	8,1	4,6	3,8	3,8	2,6	2,6	4,1	6,3	5,7	8,0
7,0 — 7,9	6,3	5,8	5,3	2,9	1,8	2,1	1,1	1,2	2,2	3,5	4,1	5,1
8,0 — 8,9	3,3	2,7	2,6	1,9	0,8	1,1	0,7	0,7	0,9	2,2	1,4	2,0
9,0 — 9,9	1,0	0,8	0,8	0,9	0,6	0,3	0,1	0,3	0,3	1,2	0,5	0,7
10,0 — 10,9	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	—	0,1	—	0,6	0,3	0,4

teatava tugevuse, siis arvutame eelmise tabeli alusel järgneva (tab. 8), kus iga kuu kohta on antud kõigi nende tuulte sagedus, mille kiirus võrdne või suurem esimeses veerus märgitud arvust. Vastavalt sellele on esimeses reas igal kuul kõigi nende tuulte sagedus, mis on kiirusega 1,0 m/sek. või tugevamad, teises reas tuulte sagedus, mille kiirus on 2,0 m/sek. või suurem, jne. Tabelist näeme, et näiteks

4,0-m/sek. ja tugevamaid tuuli on jaanuaris 52,2 % üldarvust, juulis seevastu ainult 21,2 %. Samuti näiteks tuuli alates 6,0 m/sek. on jaanuaris 20,6 %, kuid juulis ainult 4,5 %.

Tabel 8.

Kiirus	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1,0	98,7	98,6	99,2	98,6	98,7	98,5	98,1	98,3	97,9	99,1	98,4	97,7
2,0	90,9	87,3	91,2	86,9	86,3	84,5	80,4	82,1	86,9	91,9	87,1	86,6
3,0	70,3	62,4	67,5	55,0	54,0	51,8	41,6	45,1	51,4	67,4	62,0	63,7
4,0	52,2	44,0	47,5	32,3	30,7	30,7	21,2	23,8	30,1	44,9	39,9	43,4
5,0	35,3	30,0	31,6	18,9	16,2	16,4	10,2	10,8	16,8	26,3	22,9	27,9
6,0	20,6	18,6	17,6	10,7	7,3	7,5	4,5	5,0	7,6	14,2	12,0	16,4
7,0	11,2	10,4	9,5	6,1	3,5	3,7	1,9	2,4	3,5	7,9	6,3	8,4
8,0	4,9	4,6	4,2	3,2	1,7	1,6	0,8	1,2	1,3	4,4	2,2	3,3
9,0	1,6	1,9	1,6	1,3	0,9	0,5	0,1	0,5	0,4	2,2	0,8	1,3
10,0	0,6	1,1	0,8	0,4	0,3	0,2	—	0,2	0,1	1,0	0,3	0,6
11,0	0,3	0,8	0,5	0,2	0,1	0,1	—	0,1	—	0,4	—	0,2

Tabelis esitatud arvud kehtivad vaid antud 10 aasta kohta. Kui tahame neid laiendada piiramatu ajavahemikule, siis on tege mist teatavate vigadega, millede suuruse määrab vastavate sagedus- arvude hajumine antud 10 aasta jooksul. Kuna võib karta, et erine- vused suve ja talve vahel võivad tekkida ka neist vigadest, siis tuleb arvutada viimaste suurused. Et vastav arvutustöö on võrdlemisi suur, siis jätame ta siinkohal esitamata ning anname ainult resul- taadid. Arvutus näitab, et nimetatud vead olenevad tabelis 8 antud sagedusarvude suurusest ja nimelt nii, et 0 % ja 100 % sageduse ümbruses on nad väiksemad ning suurenevad, kui sagedusarv lähe- neb 50 %-le. Vigade ligikaudseks hindamiseks on järgnevas tabelis antud nende suurus olenevalt sagedusarvust.

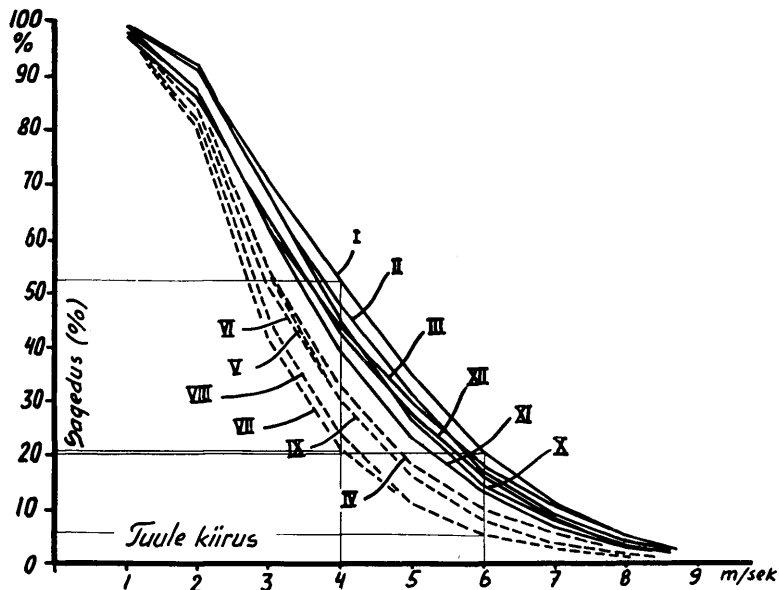
Tabel 9.

Sagedus (%)	2	5	10	25	50	75	90	95	98
Viga (%)	0,5	0,8	1,1	1,5	1,8	1,5	1,1	0,8	0,5

Tabeli 9 viimases reas antud viga on samades ühikutes nagu sagedus. Näiteks on augustikuus tuuli alates 6,0 m/sek. kiirusega 5,0 % koguarvust (tab. 8) ja tabeli 9 järgi tuleb seda mõista:

$$5,0 \% \pm 0,8 \%$$

Kui tabelis 8 igale kiirusele vastavate sagedusarvude hajumine 12 kuu jooksul on võrdne veaga, mille tabel 9 määrab vastavate



Joon. 2. Tuulekiiruste summakõverad kuude järgi Tartus.

Kõvera iga punkti ordinaat annab vaatlusjuhtude sageduse protsentides kõigist vaatlustest (üks kuu), kus tuule kiirus ületab sellele punktile vastava abstsissväärtuse. Näiteks puhub jaanuaris tuuli kiirusega üle 4,0 m/sek. 52 % kogu ajast (ca 16 päeva) ja tuuli kiirusega üle 6,0 m/sek. 21 % kogu ajast (ca 7 päeva). Suvekuul (katkestatud jooned) on tuuled nõrgemad. Nii on juulis üle 4,0-m/sek. tuuli ainult 21 % (ca 7 päeva) ja üle 6,0-m/sek. tuuli 6 % (ca 2 päeva).

kiiruste keskmisele sagedusele, siis võib öelda, et kogu aasta on ühtlase iseloomuga ja erinevused kuude vahel on tingitud juhuslikest asjaoludest. On see hajumine aga veamäärast suurem (see näib juba tabeli 8 silmitsemisel nii olevat), siis on üksikud kuud omavahel erinevad ja materjal tuleb kas kuude viisi esitada või teisiti grupeerida. Grupeerimisvõimaluste selgitamiseks anname tabeli 8 nomogrammina, kus x -teljel on kiirused, millest tugevamaid tuuli on loetud, ja y -teljel nende tuulte sagedus. Iga kuu kohta saame sel viisil ühe joone (joon. 2).

Neid jooni võime grupeerida kahte rühma: suvekuud — aprillist kuni septembrini (incl.) ja talvekuud — oktoobrist kuni märtsini (incl.). Kummagi kimbu keskkohast lugedes on küll hajumised veidi suuremad kui ette näeb tabel 9, kuid seda ei vähenda ka mingisugused teised kombinatsioonid, pealegi kui peame üksikud kuud grupeerima ikkagi järjekorras. Andmeid üksikute kuude kaupa pole

aga mõtet anda, sest erinevused üksikute kuude vahel ulatuvad ainult kohati väljapoole veapiirkonda ja ei evi praktiliselt kuigi suurt tähtsust. Lisaks tuleb veel tähendada, et tabelis 9 antud veamäärad kehtivad Tartu kohta, kus on tegemist igatunniste vaatlustega. Kuna teistes jaamades on vaatlusi 8 korda hõredamalt, siis on vastavad veamäärad ca 3 korda (täpsemalt $\sqrt[3]{8}$ korda) suuremad, mistõttu suvises ja talvises grupis esinevad lahkumineked üksikute kuude vahel mahuvad juba täielikult veapiirkonda.

V. TÖÖHULKADE ANDMED.

1. Tuulekiiruste sagedusandmed. Eespool antud analüüs selgitas, et tuule-energia arvutamisel on otstarbekas eraldada igal vaatluskohal suvi ja talv, kusjuures suvekuudeks on kuud aprillist kuni septembrini (incl.) ja talvekuudeks ülejäänud. Vastavalt sellele on vaja teada kõigi vaatluskohtade mõlema poolaasta tuulekiiruse sagedusjaotused vaadeldava 10 aasta vältel. Nende koostamiseks on koostatud esmalt iga vaatluskoha kohta iga aasta iga kuu sagedusjaotused, mida ühe jaama kohta on 120. Need olid vajalikud vigade arvutamiseks, sest lahkumineked üksikute aastate või kuude sagedustes määravad vea, millega neid aastaid või kuid haarav karakteristik on kehtiv. Sel teel saadud sagedusjaotustest saadi siis kergesti liitmise teel vajalikud poolaasta-sagedusjaotused kogu 10 aasta kohta. Selgituseks veel mõni sõna tarvitatud kiirusühikute kohta.

Kõigis jaamades peale Tartu on kiirused mõõdetud Wildi tuulelipuga, mis mõõdab neid ainult 1-m/sek. täpsusega, kusjuures täpsus tugevate tuulte puhul on veelgi väiksem. Seepärast on tabelites kiiruseskaala tähistatud vaid numbritega 0, 1, 2 jne., kusjuures näiteks kiiruse 2 all tuleb ikkagi mõista kiirust 1,5 — 2,5 m/sek., hoolimata sellest, et vaatlaja mõnikord võis ka rohkem eksida. Need eksimused teataval määral siiski tasanduvad, kui pole süstemaatilist valesti hindamist. Võib aga öelda, et ka teatav süstemaatiline valesti hindamine esineb peaaegu igas vaatluskohas.

Wildi tuulelipu juures tuleb märkida, kas kiirusenäitaja-plaat asetseb skaala mingi pulga kohal või kahe pulga vahel. Sekundmeetritesse ümberarvutatult annavad pulkade vahed paaritud arvud ning täispulgad paaristuvad. Vaatlustest selgub, et mõnel vaatl ajal on kalduvus näha plaati alati mingi pulga kohal, teistel jällegi seda kahe pulga vahel. Sagedusarvude vaatlemisel selgub, et peale Tartu vaatlusjaama, kus on mehaaniline registreerimine, on veel Tallinnas

ja Olustvere plaadi asukoht erapooletult loetud. Teistel jaamadel on sagedusarvude käik hüppelise iseloomuga, ja mõnel õige tunduvalt. Kõrvalmärkusena olgu öeldud, et käesolevas töös on kõik sagedusarvud antud nii, nagu nad on loetud, s. t. tasandamata. Tasandamine on teataval määral maitseasi, seepärast on töös esitatud ainult algandmed, et juhul, kui kellelgi peaks tekkima tarvidus neid andmeid muuks otstarbeks kasutada, siis ta võib neid omal äranägemisel tasandada, et mitte olenev olla teise autori seisukohtadest.

Järgnevas tabelis (tab. 10) on antud kõigi vaatluskohtade jaoks tuulekiiruste sagedused talve ja suve kohta eraldi.

Tabel 10.

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20
Jõgeva	T	913	937	498	807	466	632	260	370	182	182	90	72	30	17	9
	S	482	277	499	809	337	468	170	218	85	100	21	16	7	—	1
Jäneda	T	656	360	390	1 200	269	770	88	428	61	181	16	41	4	2	—
	S	027	1 642	435	1 018	233	567	99	276	52	108	11	24	—	1	—
Kuusiku	T	942	1 503	548	1 054	276	584	85	251	52	108	10	30	4	15	4
	S	1 075	1 614	615	963	339	460	105	170	53	57	11	20	2	5	1
N.-Jõesuu	T	338	684	734	804	410	556	432	247	328	143	299	149	176	107	59
	S	393	1 175	777	788	377	510	289	210	270	146	211	115	127	59	43
Olustvere	T	406	1 032	1 036	952	715	416	384	189	180	43	52	30	12	14	5
	S	432	1 311	1 243	1 000	603	348	262	112	103	25	30	11	10	—	—
Pakri	T	79	239	99	616	197	880	111	707	128	756	95	743	115	421	280
	S	196	443	204	944	292	1 005	123	671	95	574	91	444	96	196	116
Pärnu	T	823	667	363	925	301	727	154	572	100	413	69	206	40	79	27
	S	883	658	421	1 071	312	784	177	484	87	329	49	169	8	49	9
Sõrve (8 aastat)	T	347	553	358	663	435	577	264	270	108	324	125	140	51	85	74
	S	408	988	465	880	402	472	168	161	61	184	61	74	10	21	37
Tahkuna (8 aastat)	T	109	548	961	339	873	240	592	47	17	353	78	112	70	32	3
	S	166	627	1 218	374	870	159	499	15	22	263	35	84	50	9	1
Tallinn	T	105	382	335	413	530	595	607	472	504	430	383	381	152	123	54
	S	134	785	424	556	660	672	626	427	347	317	243	189	71	31	8
Tartu ¹⁾	T	86	487	1 288	1 097	921	676	430	275	121	49	26	8	2	—	—
	S	130	860	1 833	1 153	727	401	192	116	50	18	10	—	—	—	—
Tooma	T	260	497	705	1 739	476	1 008	165	463	9	114	—	26	—	3	—
	S	281	750	847	1 830	416	888	144	269	11	41	—	11	—	2	—
Vaindlo	T	173	477	933	482	998	287	756	56	412	218	341	63	185	35	50
	S	463	945	1 275	493	921	185	537	48	246	87	162	24	79	4	24
Vasknarva (8 aastat)	T	315	523	261	642	347	701	450	526	267	114	125	91	12	—	—
	S	517	603	390	843	463	602	293	301	150	80	97	43	9	1	—
Vilsandi	T	219	287	814	151	988	178	950	94	602	134	484	219	213	102	31
	S	449	349	839	194	1 095	141	997	64	549	97	351	149	151	54	11
Võru	T	674	1 407	434	1 138	299	688	111	276	124	93	56	92	57	16	1
	S	886	1 617	412	1 120	258	603	73	166	93	48	29	60	32	—	—

¹⁾ Tartu kohta tähendavad tabeli ülemises reas antud kiirusenumbrid 0, 1, 2 jne. vastavalt kiirusi 0,0—0,9, 1,0—1,9, 2,0—2,9 jne. Nii tähendab veel kiirus 10 kiirusi 10,0—10,9. Edasi on kiiruse 12 all loetud kiirused 11,0—12,9 ja 14 all kiirused 13,0—14,9.

Arvud näitavad, mitmel juhul suve- või talveperioodil ($T = \text{talv}$, $S = \text{suvi}$) 10 aasta vältel on registreeritud vastava kiirusega tuult. Näiteks Jõgeval on talveperioodil 10 aasta jooksul registreeritud tuult kiirusega 3 m/sek. (s. t. 2,5 — 3,5 m/sek.) 807 vaatlustähtajal.

Tabelis on jaamad antud tähestikulises järjestuses, kusjuures Tartu andmetes on võetud ühtluse saavutamiseks teiste jaamadega samuti 3 korda ööpäevas tehtud vaatlused (kell 07, 13 ja 21).

Edaspidistes arvutustes loeme II järgu meteojaamadel igas kiiruseklassis registreeritud tuulte kiiruseks selle klassi keskohta märkivat kiirust, milleks tabeli esimeses reas on antud täisarvulised kiirused. Tartul tuleb klassi keskohtadeks lugeda 0, 1, 2 jne. asemel 0,5, 1,5, 2,5 jne. Klassidele 12 ja 14 on keskohtadeks samad arvud, mis teistelgi jaamadel.

2. Näide tööhulkade arvutamiseks. Tööhulga Q arvutamiseks iga vaatlusjaama iga poolaasta kohta tuleb valemi (25) kohaselt kõigi tähendatud aja jooksul esinenud tuulekiiruste kuuparvud summeerida või, mis on sama, iga kiiruse kuuparv korrutada sellele kiirusele vastava sagedusega ja saadud korrutised summeerida. Et arvutuskäik oleks selgem, teeme siinkohal selle näitena Jäneda meteojaama kohta (tab. 11).

Tabel 11.

JÄNEDA.

ν	ν^3	m_1 (talv)	$m_1\nu^3$	m_2 (suvi)	$m_2\nu^3$
0	0	656	0	1 027	0
1	1	1 360	1 360	1 642	1 640
2	8	390	3 120	435	3 480
3	27	1 200	32 400	1 018	27 500
4	64	269	17 200	233	14 900
5	125	770	96 300	567	70 800
6	216	88	19 000	99	21 400
7	343	428	146 600	276	94 700
8	512	61	31 200	52	26 600
9	729	181	131 900	108	78 800
10	1 000	16	16 000	11	11 000
12	1 728	41	70 800	24	41 500
14	2 744	4	11 000	—	—
17	4 913	2	9 800	1	4 900
20	8 000	—	—	—	—
			586 700		397 200

Tabelis 11 tähendavad: v — tuule kiirust ja m_1 ning m_2 selle tuule esinemissagedust 10 a. jooksul vastavalt suvel ja talvel. Arvud mv^3 veergudes on ümardatud kolmele kohale, millega vastav ümardamisviga on keskmiselt 0,1% ega avalda seega resultaatile mingit praktilise tähtsusega mõju.

Arvutus osutab, et 10 aasta jooksul on tööhulk Jänedal talvel ca 587 000 ja suvel ca 397 000 või ühel aastal on keskmiselt talvel $Q = 58\,700$ ja suvel $Q = 39\,700$.

Edasi tahame teada, kui suur on tööhulk siis, kui tuulemootor algab töötamist näit. 3,5 m/sek. pealt. Sel puhul tulevad arvesse vaid need tuuled, millede kiirus on 3,5 m/sek. või suurem. Need on kõik 4-m/sek. klassi ja suuremate kiirusklasside tuuled. Vastavaid tööhulki kokku arvutades (talvel 17 200 + 96 300 + 19 000 + ... jne.) saame talvel 549 800 ja suvel 364 600. Kogu seda tööhulka ei saa veel kasutada, sest osa kulub mootori sisetakistusele, mille ületamiseks ta vajab tuulekiirust 3,5 m/sek. Nende vaatluste arv, mil mootor käigus saab olla, on kõigi eelnimetatud klasside sageduste (m) summa (talvel 269 + 770 + 88 + ... jne.). See on talvel 1860 ja suvel 1371. Kaotamineva töö leidmiseks korrutame neid arve 3,5 kuuparvuga ($3,5^3 = 42,9$), saades talvel 79 800 ja suvel 58 800. Seega jääb kasulikuks energiaks talvel 549 800 — 79 800 = 470 000 ja suvel 364 600 — 58 800 = 305 800 ehk keskmiselt ühe aasta kohta talvel $Q = 47\,000$ ja suvel $Q = 30\,600$.

Kui mootorit näiteks 17-m/sek. ja tugevamate puhul käiku ei lasta, siis langeb vaadeldavast tööhulgast ära talvel 9 800 ja suvel 4 900 ehk ühe aasta kohta vastavalt 980 ja 490.

Eeltoodud näite kohaselt on võimalik arvutada tööhulki tuulemootori kohta, mis alustab käiku mistahes tuulekiiruse puhul. Kui tähendatud kiirusearv langeb mõne klassi sisse (näites valitud kiirus 3,5 m/sek. asetses kahe klassi lahutusjoonel), siis tuleb selles klassis temast suuremate kiiruste sageduste leidmiseks vastavalt interpoleerida, mida võib ka lineaarselt teha.

3. Tööhulkade andmed. Resultaatide hõlpsamaks kasutamiseks on arvutatud iga jaama talve ja suve jaoks peale kogu tööhulga Q veel need tööhulgad, mida saame tuulemootorilt, kui ta alustab käiku 3,5, 5,5 ja 7,5 m/sek. pealt, s. t. $Q(3,5)$, $Q(5,5)$ ja $Q(7,5)$. Kõik nimetatud andmed on antud järgmises tabelis (tab. 12).

Kui vajatakse tööhulki mõne muu algkiiruse jaoks, siis võib arvutuste vältimiseks tabelis 12 antud andmete abil seda leida interpoleerimise või vajaduse korral ka ekstrapoleerimise teel. Viimast

Tabel 12.

		Q	$Q(3,5)$	$Q(5,5)$	$Q(7,5)$
Jõgeva	<i>T</i>	102 700	90 100	69 000	46 300
	<i>S</i>	40 600	31 800	19 600	9 500
	<i>A</i>	143 300	121 900	88 600	55 800
Jäneda	<i>T</i>	58 700	47 000	30 000	14 100
	<i>S</i>	39 700	30 600	18 400	8 000
	<i>A</i>	98 400	77 600	48 400	22 100
Kuusiku	<i>T</i>	51 200	41 600	29 300	18 700
	<i>S</i>	34 500	26 000	16 300	8 900
	<i>A</i>	85 700	67 600	45 600	27 600
Narva-Jõesuu	<i>T</i>	260 500	245 100	215 600	176 800
	<i>S</i>	189 000	176 000	152 800	122 500
	<i>A</i>	449 500	421 100	368 400	299 300
Olustvere	<i>T</i>	65 100	52 800	36 700	22 800
	<i>S</i>	36 300	26 000	15 000	7 200
	<i>A</i>	101 400	78 800	51 700	30 000
Pakri	<i>T</i>	703 500	682 700	633 400	555 800
	<i>S</i>	391 400	372 600	334 200	280 200
	<i>A</i>	1 094 900	1 055 300	967 600	836 000
Pakri*	<i>T</i>	562 900	543 600	500 800	434 200
	<i>S</i>	304 000	287 800	256 700	212 900
	<i>A</i>	866 900	831 400	757 500	647 100
Pärnu	<i>T</i>	186 400	172 100	144 800	110 000
	<i>S</i>	131 900	118 000	94 100	66 800
	<i>A</i>	318 300	290 100	238 900	176 800
Sõrve	<i>T</i>	260 000	244 100	214 800	178 000
	<i>S</i>	122 600	110 200	92 300	73 600
	<i>A</i>	382 600	354 300	307 100	251 600
Tallinn	<i>T</i>	348 800	329 200	284 800	221 600
	<i>S</i>	181 900	164 600	129 900	88 300
	<i>A</i>	530 700	493 800	414 700	309 900
Tartu	<i>T</i>	66 600	51 400	31 100	14 900
	<i>S</i>	37 400	25 600	13 500	5 300
	<i>A</i>	104 000	77 000	44 600	20 200

		Q	$Q(3,5)$	$Q(5,5)$	$Q(7,5)$
Tahkuna	T	145 400	130 200	105 300	79 200
	S	97 100	83 500	64 800	46 600
	A	242 500	213 700	170 100	125 800
Tahkuna *	T	201 600	183 000	149 300	111 700
	S	140 000	122 400	95 000	66 600
	A	341 600	305 400	244 300	178 300
Tooma	T	55 200	40 200	21 300	8 300
	S	38 400	25 000	10 800	3 700
	A	93 600	65 200	32 100	12 000
Vaindlo	T	221 400	204 600	174 100	135 800
	S	106 200	93 900	75 300	55 900
	A	327 600	298 500	249 400	191 700
Vasknarva	T	116 900	100 300	68 400	33 800
	S	79 300	65 100	42 600	21 900
	A	196 200	165 400	111 000	55 700
Vilsandi	T	294 500	276 200	237 600	185 600
	S	206 500	189 600	154 300	115 100
	A	501 000	465 800	391 900	300 700
Võru	T	85 000	73 700	57 200	40 500
	S	51 600	42 000	30 000	19 900
	A	136 600	115 700	87 200	60 400

Tabelis tähendavad: T = talv, S = suvi ja A = aasta ($A = T + S$).

tuleb küll vaevalt tarvis, sest vististi ei kasutata tuulemootoreid, mis vajavad käivitamiseks tugevamat tuult kui 7,5 m/sek.

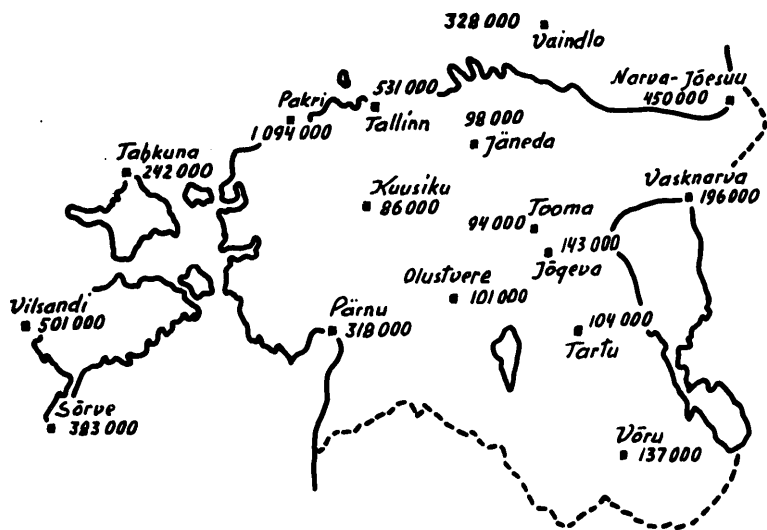
4. Tööhulkade territoriaalne jaotus. Vaadeldes tabeli 12 andmeid, peamiselt aastast üldist tööhulka Q , näeme, et erinevused üksikute jaamade vahel on küllalt suured. Ligemalt vaadeldes selgub aga energia jaotuses teatud korrapärasus. Sisemaa jaamad — Tartu, Võru, Tooma, Olustvere, Kuusiku, Jäneda ja Jõgeva — annavad üldise aastase tööhulga 90 000—140 000, enamasti 100 000 ligiduses. Lahkuminekuud jaamade vahel, mis pole kuigi suured (keskmiselt 15%), on väga hästi põhjendatavad vaatluskoha omadustega (näit. Kuusiku ja Tooma asetsevad metsarohkes ümbruses). Teise rühma moodustavad mere- ja rannikujaamad Tallinn, Vilsandi, Vaindlo, Sõrve, Pärnu ja Narva-Jõesuu, aastase tööhulgaga 300 000—500 000. Ka nende jaamade andmete erinevused on lubatavad, sest asukohad

on selleks küllalt erinevad. Vahepealse klassi moodustab Vasknarva ca 200 000 tööhulga-ühikuga. Kuigi ta kuulub sisemaa jaamade hulka, on suurem aastane tööhulk siiski põhjendatav ta asukohaga Peipsi järve ääres, kus suure veekogu tõttu tuuled on veidi tugevamad.

Teatavat raskust põhjendustes valmistavad kaks jaama: Pakri ja Tahkuna. Pakris tundub aastane tööhulk 1 000 000 liiga suurena ja Tahkunas 240 000 väiksena. Kuna Pakri asetseb kaugele merele väljaulatuval kõrgel poolsaarel ja on võrreldes Tallinnaga tugevatele meretuultele paremini kättesaadav, siis on loomulik, et seal aastane tööhulk peab olema tunduvalt suurem kui Tallinnas. Kaheldav võib olla ainult, kas ta on kaks korda suurem. Probleemi teeb aga raskemaks Tahkuna. Pakri andmete kaitsmiseks võiks väita, et Eesti loodepoolne osa asetseb merdeulatava kiiluna tugevamate tuulte rajoonis, kuid siis peaks ka Tahkuna sinna kuuluma. Tahkuna andmed aga näitavad hulga väiksemat tuule-energiat kui temaga umbes samas olukorras asuvad Vilsandi ja Sõrve. Isegi poolsisemaaajaam Pärnu on temast ees.

Siinkohal tekkis arvamus, et ühe põhjusena võib kõnesse tulla subjektiivne hindamisviga. Tahkunas on kiirusi hinnatud väiksematena ja Pakris suurematena tõelistest. Kui kõiki Pakri kiiruseandmeid vähendada 1 m/sek. võrra ja Tahkuna omi suurendada 1 m/sek. võrra, siis saame tööhulgad, mis tabelis 12 näidatud märgikesega *. Aastased tööhulgad on siis vastavalt 870 000 ja 340 000, mis enamvähem rahuldavad. Tahkuna andmed ei võigi Pakrile vastavat kõrgust võimaldada, sest jaam asetseb ca 20 m võrra madalamal ja on lõuna poolt metsaga kaetud saarest varjatud. Kuna Tahkuna vaatlusandmetes näib veel tegemist olevat süstemaatilise veaga, millest tagapool pikemalt, siis on küsimuse kohta raske rahuldavat hinnangut anda. Hilisemad aastad toovad sinna kindlasti selgust, seda enam et aja jooksul vaatlejad vahetuvad, mis kõrvaldab võimaliku subjektiivse vea.

Andmete ülevaatlikustamiseks on kogu aastased tööhulgad kujutatud kaardile (joon. 3). Kuidas toimub üleminek rannikult sisemaale, selle kohta ei saa hõreda vaatlusvõrgu tõttu vastust anda. Metsarikka piirkonna suhtes võib arvata, et 20—30 km kaugusel rannast valitsevad juba sisemaatuuled. Lagedas ümbruses ulatub mere mõju vist kaugemale. Igatahes näib, et üleminek toimub küllalt kiiresti, mistõttu tuule-energia kasutamine omab ainult rannikul erilist kõrgtaset.



Joon. 3. Aastase tööhulga Q territoriaalne jaotus.

Keskised tööhulgad: sisemaal ca 100 000, rannikul ca 300 000—500 000, Pakri rajoonis ca 1 000 000.

Kuna tabelis 12 antud arvudel on vaid relatiivne tähendus, siis võib neid soovi korral ka vähendada, näit. 1000-kordselt, et saavutada hõlpsamat käsitamist. Siinkohal on nad jäetud vähendamata lihtsalt seepärast, et nad moodustavad 3 korda ööpäevas tehtud vaatlustest saadavate tuulekiiruste kuuparvude summa, ja kui osutub vajalikuks nendega muid siinkohal näitamata jäänud operatsioone teostada, siis pole tarvis mingeid ümberarvutusi. On võimalik kasutada otsekohe neidsamu sagedusarve.

VI. TÖÖHULGA OLENEVUS KESKMISEST TUULEKIIRUSEST.

Tuule-energia hulgast on võimalik ülevaadet saada ka keskmise tuulekiiruse kaudu, sest kiiruse sagedusjaotus määrab kiiruse nulltelje suhtes nii esimese momendi, mis annab keskmise kiiruse, kui ka kolmanda momendi, mis annab vaadeldava tööhulga. Kui tuule kiiruse sagedusjaotused oleksid kõigil vaatluskohtadel sarnase kujuga, siis oleks seos keskmise tuulekiiruse ja tööhulga vahel täpne. Olenevalt sagedusjaotuse kujust, mis mitmesugustel põhjustel võib üksikute vaatluskohtade jaoks olla erinev, muutub seos keskmise tuulekiiruse ja tööhulga vahel korrelatiivseks.

Kuna II järgu jaamadel on kiirus loetud vaatlustähtajal tuulelipult, Tartus on aga selleks ühe tunni keskmine tuulekiirus, siis on arusaadav, et tugevate tuulte puhul on palju tõenäolisem, et vaatlusmomendil näiteks 20-m/sek. tugevusega tuul valitseb mõne minuti, mitte aga kogu tunni. Seepärast on Tartus tugevaid tuuli vähem võrreldes Tartu keskmise tuulekiirusega, mistõttu ka aastane tööhulk on väiksem.

Järgnevas tabelis (tab. 13) on antud kõigi vaatlusjaamade keskmised tuulekiirused (v) eraldi talve (T) ja suve (S) kohta ning teises veerus vastav poolaasta tööhulk (Q). Nimetatud andmed on kujutatud graafikul (joon. 4), kust selgub ilmne olenevus v ja Q vahel. See

Tabel 13.

		v	Q	Q_t	Δ	Δ (%)
Jõgeva	T	3,56	103 000	87 600	15 400	17,6
	S	2,37	40 600	33 000	7 600	23,1
Jäneda	T	3,12	58 700	63 700	— 5 100	— 8,0
	S	2,49	39 700	37 000	2 900	7,9
Kuusiku	T	2,62	51 200	41 700	9 500	22,8
	S	2,31	34 500	30 800	3 700	12,0
N.-Jõesuu	T	5,01	260 000	199 000	61 000	30,6
	S	4,18	189 000	129 000	60 000	50,4
Olustvere	T	3,25	65 100	70 400	— 5 300	— 7,5
	S	2,73	36 300	46 200	— 9 900	— 21,4
Pakri	T	8,27	703 000	667 000	36 000	5,4
	S	6,27	391 000	345 000	46 000	13,3
Pakri *	T	7,50	563 000	527 000	36 000	6,8
	S	5,34	304 000	232 000	72 000	31,0
Pärnu	T	4,40	186 000	146 000	40 000	27,4
	S	3,95	132 000	112 000	20 000	17,9
Sõrve	T	4,96	260 000	194 000	66 000	34,0
	S	3,54	123 000	87 000	36 000	41,3
Tallinn	T	6,57	349 000	381 000	— 32 000	— 8,4
	S	5,12	182 000	209 000	— 27 000	— 12,9
Tartu	T	4,11	66 600	124 000	— 57 400	— 46,2
	S	3,33	37 400	74 000	— 36 600	— 49,3

		v	Q	Q_t	Δ	Δ (%)
Tahkuna	T	4,37	145 000	143 000	2 000	1,4
	S	3,71	97 100	96 500	600	0,6
Tahkuna *	T	5,37	202 000	235 000	— 33 000	— 14,0
	S	4,71	140 000	171 000	— 31 000	— 18,2
Tooma	T	3,61	55 200	90 500	— 35 300	— 39,0
	S	3,17	38 400	66 700	— 28 300	— 42,4
Vaindlo	T	5,08	221 000	206 000	15 000	7,3
	S	3,54	106 000	87 000	19 000	21,8
Vasknarva	T	4,54	117 000	157 000	— 40 000	— 25,5
	S	3,69	79 300	95 800	— 16 500	— 17,2
Vilsandi	T	5,75	294 000	278 000	16 000	5,8
	S	5,08	206 000	206 000	0	0,0
Võru	T	3,20	85 000	67 500	17 500	26,0
	S	2,61	51 600	41 500	10 100	24,3

pole aga, nagu joonisest kohe näha, lineaarne, vaid kõrgemaastmeline, sest keskmise tuulekiiruse kasvamisega kasvab tööhulk palju kiiremini. Kuna tuulevaikuse korral on tööhulk null, mingi nõrga tuule puhul aga juba nullist erineva suurusega, siis peab siin tarvitama astmelist olenevust

$$Q_t = av^m,$$

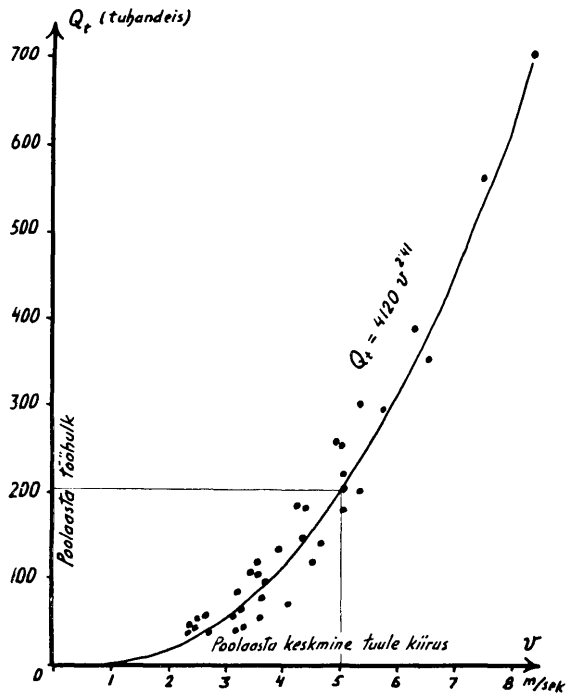
kus Q_t on poolaasta tööhulk, v tuule kiirus ning a ja m konstandid, mis vaja leida. Ülesanne on lahendatud vähimruutude meetodil nii, et relatiivsete hälvete ruutude summa on minimaalne. Hälbeid ei või võtta absoluutselt, s. t. ühe ning sama kaaluga, seda seepärast, et aastate erinevusest tingitud vead tööhulkade andmetes pole kõigi jaamade osas konstantsed, vaid olenevad, nagu järgnevas osas näeme, tööhulga suurusest, ja nimelt nii, et relatiivsed vead on enamvähem konstantsed.

Arvutus andis otsitava seose

$$(35) \quad Q_t = 4120v^{2,41},$$

mille maksvust hindav korrelatsioonitegur on $r = 0,94$.

Selle valemi järgi on arvatud tabelis 13 iga jaama jaoks poolaasta tööhulgad Q_t keskmise tuulekiiruse kaudu. Neljandas veerus on antud hälbed Δ sagedusarvudest arvatatud tööhulga Q ja teoree-



Joon. 4. Seos poolaasta tööhulga Q ja sama poolaasta keskmise tuulekiiruse v vahel.

Nii on poolaasta keskmise tuulekiiruse $v = 5$ m/sek. korral sama poolaasta tööhulk $Q = 210\,000$ tööühikut.

tilise tööhulga Q_t vahel, s. t. $\Delta = Q - Q_1$. Viiendas veerus on nende hälvete suhe Q_t -ga protsentides, Δ (%).

Tööhulkade Q keskmine relatiivne hälve tööhulkadest Q_t on tabeli 13 järgi 20,5 % või ümarguselt 20 %. Seega võib seost (35) kasutada ka teiste käesolevas töös avaldamata vaatlusjaamade poolaasta tööhulga hindamiseks, arvesse võttes vaid seda, et hinnang toimub keskmiselt 20 % täpsusega. Praktiliseks on see isegi küllaldane, sest mitmesugused vead (üksikute aastate kohalikud erinevused, vaatejate subjektiivsus, tuulelipu vead, jaama asukoha mõju jne.) ulatuvad, nagu see hiljem selgub, vähemalt 15 %-ni.

Tartu suhtes ilmneb varem nimetatud nähtus, nimelt et tugevate tuulte puudumise tõttu aastane tööhulk on väiksem kui keskmise tuulekiiruse järgi võib oletada [Δ (%) on üle 45 %]. Kahtlusalused jaamad Pakri ja Tahkuna näitavad aga selles osas head kooskõla.

Sellega langeb ära kahtlus, et Pakril on vahest ainult kõvade tuulte vastu aukartust tuntud ja neid tugevamatenä hinnatud ning Tahkunal vastupidi. Sel juhul oleks kiiruste sagedusjaotus moonutatud ja erinevus valemiga määratud andmetest kohe silma paistnud. Kui seal valestihindamised üldse esinevad, siis kõigi tuulte suhtes ühtlaselt.

Edasi selgub tabelist, et real jaamadel (Jõgeva, Kuusiku, Pärnu, Võru, eriti aga Narva-Jõesuu) on tööhulk Q tunduvalt suurem kui keskmise tuulekiiruse järgi peaks olema. Tundub, et neis jaamades on tugevate tuultega natuke liialdatud, s. t. neid on tugevamatenä hinnatud. Kuid erinevusi Q ja Q_t vahel võib ka loomulikena võtta, oletades, et tuulekiiruse sagedusjaotuse iseloom igas kohas on erinev. Kindlasti ongi see nii, kuid on kaheldav, kas sel määral, ja arvata-vasti tuleb osa hälvete suurusest kanda vaatleja subjektiivse hinnangu arvele. Tugeva tuule puhul võngub tuulelipu plaat mitme pulga piirides ja võnkumise keskkoha määramisel ca ühe minuti vältel võib seda süstemaatiliselt poole pulkade vahe võrra kõrgemaks lugeda.

VII. TÖÖHULGA KESKMINE VIGA.

1. Näide tööhulga keskmise vea arvutamiseks. Järgmisena vaatleme, mis määral üksikute aastate erinevusest tingitud hälbed avalduvad esitatud tööhulkades. Kui näiteks kahest jaamast annab üks suurema tööhulga (näit. Jänedal talv 58 700, Toomal talv 55 200), siis ei tähenda see sugugi, et samasugune vahekord ka igal üksikul aastal on olnud, ega ka seda, et sama suur tööhulk igal aastal on olnud. Mõnel vaiksamal aastal võib Jänedal talvine tööhulk olla ainult 30 000, kuid mõnel tuulterikkamal ka üle 80 000. Samuti võib mõnel aastal Toomal tööhulk olla suurem kui Jänedal, kuigi ta keskmine on väiksem. Kui jaamad asetsevad üksteise ligidal, siis korreleeruvad nende andmed paremini, kuid üksteisest kaugelasetsevatel jaamadel on korrelatsioonitegur praktiliselt null.

Keskmine, mis on saadud 10 aasta andmetest, on ainult üks selle statistilise rea karakteristik. Kui aastaid tuleb juurde või langeb ära, muutub ka see karakteristik. Keskmine viga, mida tahame määrata, näitab, kui palju 10 aasta keskmine võib keskmiselt erineda pikaajalisest keskmisest. See viga on seda suurem, mida enam üksikute aastate andmed üksteisest erinevad. Kui näiteks Jänedal võetud 10 aasta jooksul talvised tööhulgad kõiguksid 58 000 ja 59 000 vahel, siis on keskmise tööhulga ($Q = 58 700$) viga väga väike. Kui need kõiguvad

aga näiteks 20 000 ja 110 000 vahel, s. t. üksikud aastad on väga erineva iseloomuga, siis on viga suur, mis tähendab seda, et võetud 10 aastat pole veel kuigi iseloomustav, järelikult uute aastate juurdevõtmine võib pilti tunduvalt muuta.

Nimetatud vea arvutamiseks on vaja arvutada tööhulk Q iga aasta kohta eraldi, kust siis üsna lihtsalt saab määrata keskmisele tööhulgale kuuluva vea.

Järgnevas tabelis (tab. 14) on antud näitena kahe üksteisest küllalt kaugel asetseva jaama, Kuusiku ja Narva-Jõesuu iga-aastased talvised tööhulgad, kust selgub, millisel määral nad üksikutel aastatel on erinevad. Nagu tabelist näha, kõiguvad Kuusikul tööhulgad 32 000 ja 82 000 vahel ja Narva-Jõesuul 123 000 ja 504 000 vahel. Seejuures ei lange sugugi tugevate ja nõrkade tuultega aastad kokku. Näiteks oli 1926. a. Narva-Jõesuul maksimum, kuid Kuusikul on tulemuseks peagu miinimumväärus.

Tabel 14.

	Kuusiku		Narva-Jõesuu	
	Q	Δ	Q	Δ
1926	33 200	— 18 000	504 000	244 000
1927	31 800	— 19 400	177 000	— 83 000
1928	35 100	— 16 100	123 000	— 137 000
1929	81 900	30 700	188 000	— 72 000
1930	57 100	5 900	226 000	— 34 000
1931	65 600	14 400	229 000	— 31 000
1932	81 400	30 200	435 000	175 000
1933	31 800	— 19 400	270 000	10 000
1934	40 500	— 10 700	249 000	— 11 000
1935	53 700	2 500	200 000	— 60 000
Keskm.	51 200		260 000	
σ	18 800		113 000	
$\sigma(Q)$	5 900		35 700	

10 aasta keskmisest, mille abil saame määrata nn. hälvete hajumis-

Veerus Δ on antud kummagi jaama jaoks iga-aastased hälbed mõõdu. Viimane on arvutatav valemiga

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}},$$

kus n on aastate arv, praegusel juhul 10. Hajumismõõdu σ abil saame

määrata keskmise tööhulga Q vea $\sigma(Q)$, mis on arvutatav valemiga

$$\sigma(Q) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

kus n on endiselt aastate arv.

Mõlemad suurused, σ ja $\sigma(Q)$, on antud eelmises tabelis. Sealt nähtub, et Kuusiku talvist tööhulka $Q = 51\,200$ võib uskuda täpsusega $\sigma(Q) = 5\,900$ või relatiivselt täpsusega $11,5\%$. Samuti Narva-Jõesuu vastav tööhulk $Q = 260\,000$ on usutav täpsusega $\sigma(Q) = 35\,700$ või relatiivselt täpsusega $13,7\%$.

Õeldu juures ei tarvitse sugugi kahelda. Kui näiteks Narva-Jõesuu andmeid oleksid vaid 9 aasta kohta, alates 1927. aastaga, siis langeks seeriast välja tuulerikas 1926. a. Sel juhul oleks 9 aasta keskmine tööhulk $Q = 233\,000$, mis on 10 aasta keskmisest $27\,000$ võrra väiksem. Jättes veel välja näiteks 1932. a. (juhul, kui selle aasta vaatlusmaterjal oleks puudulik), saame ülejäänud 8 aasta keskmiseks $Q = 208\,000$, mis erineb 10 aasta keskmisest juba $52\,000$ võrra. Kuid on ka mõeldav, et aastate juurdevõtmisel võib esineda veelgi suuremaid äärmusväärtusi.

Lisamärkusena tuleb siin nimetada, et korrelatsioon Kuusiku ja Narva-Jõesuu tööhulkade vahel tabelis 14 antud andmete järgi on null. Seega saab ainult üksteise lähedal asetsevate jaamade suhtes rääkida tuulerikastest või tuulevaesetest aastatest. Kaugema vahe-
maa puhul ei ilmne olenevust tuule tugevuses, mis on ka arusaadav, sest tsüklooniga kaasaskäivad tugevad tuuled ei esine enamasti kuigi laias piirkonnas.

2. Tööhulkade keskmised vead. Analoogiliselt näitele Kuusiku ja Narva-Jõesuu talviste tööhulkade vigade kohta tuleks samalaadilised arvutused läbi viia kõigi jaamade mõlema poolaasta kohta. Kuna see töö on kaunis suur, sest iga jaama kohta tuleb tabelis 12 antud keskmise tööhulga arvutus 10-kordselt teha, siis on see arvutustöö vähendamiseks tehtud ainult 9 valitud jaama kohta. Sealt saadavad tulemused on küllalt ülevaatlikud vigade hindamiseks. Jaamad on välja valitud nii asukoha kui ka keskmise tööhulga järgi, et pilt juhuslikult ei saaks ühekülgne. Seepärast on jaamu valitud võimalikult igast territooriumi osast ja igast tööhulga suuruse klassist.

Alljärgnev tabel (tab. 15) sisaldab tähendatud jaamade talvised (T) ja suvised (S) tööhulgad Q ning selle vea $\sigma(Q)$. Viimases veerus on antud $\sigma(Q)$ suurus protsentides.

Tabel 15.

		Q	$\sigma(Q)$	$\sigma(Q)$ protsentides
Jõgeva	T	103 000	14 000	13,6
	S	40 600	2 000	4,9
Kuusiku	T	51 200	5 900	11,5
	S	34 500	3 800	11,0
N.-Jõesuu	T	260 000	35 700	13,7
	S	189 000	28 000	14,8
Pakri	T	703 000	39 000	5,6
	S	391 000	31 000	7,9
Sõrve	T	260 000	45 000	17,4
	S	123 000	35 600	28,9
Tallinn	T	349 000	14 700	4,2
	S	182 000	9 700	5,3
Tartu	T	66 600	2 000	3,0
	S	37 400	1 700	4,5
Tahkuna	T	145 000	29 600	20,4
	S	97 100	10 900	11,3
Vaindlo	T	221 000	51 700	23,4
	S	106 000	31 600	29,8

VIII. TASANDATUD TÖÖHULKADE ANDMED.

1. Tasandamismeetodist. Vaadeldes korrelatsiooni tööhulga Q ja tema relatiivse vea vahel selgub, et see on praktiliselt null, ja me võime kasutada keskmist relatiivset viga kõigi jaamade jaoks. See on eelmise tabeli järgi 12,8 %.

Viimast arvu ei saa muidugi võtta kui täpset suurust, sest nagu tabeli 15 viimane veerg näitab, on relatiivsed vead väga tugevasti kõikuvad, muutudes 3 — 30 % piirides. Sellest hajumisest tingitud keskmise relatiivse vea viga on arvutuste järgi 1,8 %, mida arvestades tuleb öelda, et keskmine relatiivne viga on 12,8 % \pm 1,8 % või ümardatult 11—14 %. Sellega pole siis sugugi liialdus lk. 36 nimetatud väide, et vead tööhulkades võivad kindlasti ulatuda 15 %-ni, kuna peale eeltoodu jääb järele veel küllalt vaatlejast, tuulelipust ja asukoha valikust tingitud põhjusi. Seepärast pole ülekohtune, kui võtaksime usutavateks tööhulkadeks tabelis 13 arvutatud Q_i väär-

tused, mis arvatud keskmise tuulekiiruse abil. On ju matemaatilisest statistikast teada, et sagedusjaotuse kolmanda momendi (määrab tööhulga) viga on üle kahe korra suurem kui esimese momendi (määrab keskmise kiiruse) viga ja et seetõttu mõjuvad mitmesugustel põhjustel tekkivad vead sagedusarvudes Q väärtustele rohkem kui Q_t väärtustele.

Vastavalt eeltoodule tundub otstarbekohasena, kui lugeda tõenäolisemaks tööhulgaks kahe tööhulga Q ja Q_t vahel asuv suurus. Millise kaaluga aga kummagi Q väärtust arvestada, on kokkuleppeküsimus. Käesolevas töös on eelnimetatud põhimõtte järgi arvatud redutseeritud tööhulkade väärtused Q_r , kusjuures Q väärtusi on loetud kaaluvamateks kui vaatlusandmetest otseselt arvatuid. Q ja Q_t vahel asetsev Q_r väärtus on valitud nii, et ta asetseb Q -st lugedes esimesel kolmandikul. Seega on

$$Q_r = \frac{2Q + Q_t}{3},$$

millega Q on võetud kaks korda suurema kaaluga kui Q_t .

Erand on seejuures tehtud Tartu suhtes, kus varem nimetatud asjaoludel Q on ilmselt väiksem kui teistel tuule tugevuse suhtes samades tingimustes olevatel jaamadel. Kui näiteks vaatluskohas puhub ühe tunni vältel tuul keskmise kiirusega 5 m/sek., siis märgib seda nii ka Tartu anemograaf. Tuulelipu kasutamise korral, kus lippu jälgitakse ca 1 minut, võib ühel vaatlusel saada näiteks kiiruse 3 m/sek. ja teisel 7 m/sek. Keskmisele tuulekiirusele selline juhuslik valik mõju ei avalda, sest hälbed võivad olla kord ühele kord teisele poole. Küll aga mõjub see sagedusjaotuse kolmandale momendile. Tartu kohta saame kahe sellise vaatluse korral tööhulgaks

$$q = 5^3 + 5^3 = 250,$$

kuid tuulelipuga jaamale

$$q = 3^3 + 7^3 = 370.$$

Keskmine tuulekiirus oli aga mõlemal 5 m/sek. Seega on arusaadav, miks Tartul tööhulk teistega võrreldes peab väiksem olema ja vastavalt sellele on Tartu jaoks Q_r arvutamisel võetud Q_t kaks korda suurema kaaluga kui Q . Sellega muutub küll Tartul tööhulk teiste sisemaa jaamade omast pisut suuremaks, kuid ta peabki seda olema, sest anemograafi tuult registreeriv osa asetseb 33 m kõrgusel maapinnast (teistel 10 — 15 m) ja tuule kiirus kasvab teatavasti kõrgusega.

Tuleb muidugi silmas pidada, et kalkultatsioon põhjeneb autori intuiitvusel kaalutlustel, mispärast sellele võib vastu vaielda. Kuid töös on kõik vajalikud andmed olemas ja igauks võib ka omi tõeks-
pidamisi rakendada või kasutada lihtsalt sagedusarvudest määratud Q väärtusi.

2. Sõrve, Tahkuna ja Vaindlo andmete korrigeerimine. Vaadeldes tabelit 15 selgub, et mõnel jaamal (Tartu, Tallinn, Pakri) on erinevus üksikute aastate vahel väike, sest $\sigma(Q)$ püsib keskmiselt 5% ümbruses. Teistel jaamadel (Narva-Jõesuu, Sõrve, Tahkuna, Vaindlo) on see aga tunduvalt suurem, ulatudes kuni 30%. Võiks arvata, et aastad on ühes kohas olnud rahutumad kui teises, kuid andmete ligem silmitsemine sunnib teisiti järeldama. Nimelt pais-
tavad Tartu, Tallinn ja Pakri silma andmete korralikkuse poolest. Silmitsedes kõiki 10 aasta iga kuu sagedusjaotusi, milliseid andmeid töös ruumipuudusel ei saa avaldada, näeme, et need on kõigis tuule-
kiiruse klassides pidevalt arvudega täidetud. Seda ei saa aga öelda Sõrve, Tahkuna, Vaindlo ja osalt ka Narva-Jõesuu kohta, kus üksikud klassid sagedamini esinevad ja teised vahelt tühjaks osutuvad. Näib, et kiirusi on hinnatud jämedamalt kui eeskirjad nõuavad.

Edasi selgub aga, et Sõrvel, Tahkunal ja Vaindlol viimased aastad tunduvalt erinevad eelmistest, millist asjaolu teiste jaamade suhtes ei saa konstateerida. Nimelt puuduvad varematal aastatel nii Sõrves, Tahkunas kui ka Vaindlos tuuled kiirusega üle 10 m/sek. (5 palli), milline olukord on merejaama suhtes täiesti ebausutav. Muudatus algab Sõrvel ja Vaindlol 1930. aastaga, Tahkunal 1931. aastaga. Keskmise aastane tuulekiirus hüppab 1—2 m/sek. võrra ja tugevate tuulte juurdetulemisel kasvab poolaasta tööhulk, mis nime-
tatud jaamadel kõigub 30 000—50 000 vahel (madalam kui mandri-
jaamadel), 200 000—300 000-le, kuuludes seega samasse klassi nagu teistel rannikujaamadel. Üleminek on nii suure hüppega, et tekib kahtlus, kas varemates andmetes pole tegemist põhimõttelise veaga tuulelipu lugemises või andmete ümbertöötamises.

Kui nimetatud kolmel jaamal kahtlusalused aastad välja jätta ja määrata analoogiliselt tabelile 15 $\sigma(Q)$ väärtused, siis näeme, et erinevus aastate vahel on vähenenud. Andmed on esitatud järgnevas tabelis (tab. 16).

Kui eeltähendatud kolme jaama $\sigma(Q)$ väärtused protsentides asendada tabelis 15 antud suurustega, siis saame Q keskmiseks relatiivseks veaks 10,0% endise 12,8% asemel.

Tabel 16.

		Q	$\sigma(Q)$	$\sigma(Q)$ protsentides
Sõrve (6 aastat)	T	327 000	21 600	6,6
	S	153 000	33 700	22,0
Tahkuna (5 aastat)	T	208 700	11 600	5,6
	S	136 900	11 800	8,7
Vaindlo (6 aastat)	T	343 000	38 200	11,2
	S	161 000	39 400	24,4

Analoogiliselt tabelile 13 on antud järgnevas tabelis (tab. 17) Tahkuna, Sõrve ja Vaindlo jaama vastavad andmed, arvutatuna viimaste aastate andmetel. Teiste sõnadega: 10 aasta asemel on Tahkunal kasutatud 5 aastat ja Sõrvel ning Vaindlo 6 aastat. Keskmise tuulekiiruse abil määratava Q_t saamiseks on kasutatud endist seost, valem (35), sest vahekord v ja Q_t vahel jääb ka nende aastate andmete rakendamisel samaks.

Tabel 17.

		v	Q	Q_t	Δ	$\Delta(\%)$
Sõrve	T	5,38	327 000	237 000	90 000	37,8
	S	3,92	153 000	111 000	42 000	37,7
Tahkuna	T	4,95	208 700	193 000	15 700	8,1
	S	4,14	136 900	126 000	10 000	7,9
Vaindlo	T	6,26	343 000	342 000	1 000	0,3
	S	4,08	161 000	123 000	38 000	30,8

Nagu tabelite 13 ja 17 võrdlemisel näha, on keskmine tuulekiirus v kahtlaste aastate ärajätmise tõttu kasvanud Tahkunal ca 0,5 m/sek. võrra, Vaindlo 0,8 m/sek. võrra ja Sõrvel ca 0,4 m/sek. võrra. Keskmine poolaasta tööhulk Q aga kõigil kasvanud ca 50 000—80 000 võrra.

3. Tasandatud tööhulkade Q_r territoriaalne jaotus. Redutseeritud Q_r leidmiseks on kasutatud Sõrve, Tahkuna ja Vaindlo kohta vaid tabelis 17 antud andmeid, sest nende usutavus võrreldes tabelis 13 antud andmetega on palju suurem. Q ja Q_t väärtuste kooskõlastamisel on kaalude vahekord jäetud ikkagi endiseks, s. t.

$$Q_r = \frac{2Q + Q_t}{3}.$$

Selliselt arvatud Q_r väärtused on antud tabelis 18 ja neid tuleb kõigi eeltoodud kaalutluste kohaselt pidada usutavaimateks.

Kõigi teiste jaamade andmed ei näidanud nimetatud aja-vahemikus tuulekiiruse sagedusjaotuste iseloomus muutusi, mis-pärast seal pole vaja korrigeerida andmete valikut. Vaatamata korrektsioonile pole Tahkuna tööhulk ikkagi tõusnud tasemele, mida eeldab talle positsioon Vilsandi ja Pakri vahel, ning Pakri tööhulga vähendamiseks ei leidunud ka mingit põhjendatud alust. Tuleb ära oodata edaspidiste aastate andmete juurdevõtmist, millega küsimus peaks selguma.

Tabeli 18 andmed näitavad, et sisemaal on aastane tööhulk 90 000—120 000 (kui tasandada andmeid aastate erinevusest tingitud ca 10% vea piirides). Kui Tartu aastane tööhulk redutseerida tuulelipu normaalkõrgusele (12—15 m), siis võib seda hinnata ca 120 000, millega on saavutatud kooskõla teiste sisemaajaamadega.

Peipsi ääres on tuule kiirus suure veekogu tõttu kindlasti suurem, sest vee pinnal on hõõrumine väiksem (analoogiliselt merele). Vasknarva andmete järgi võib hinnata aastast tööhulka ca 200 000.

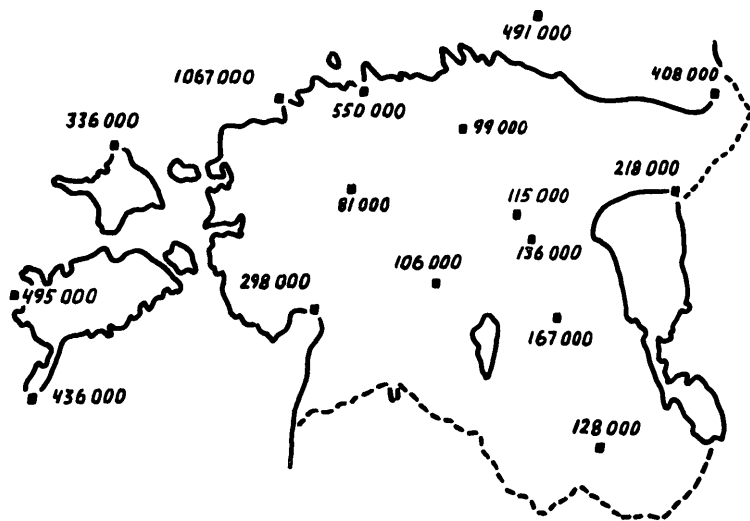
Edasi võib eraldada veel nn. siserannikut (Haapsalu—Pärnu), mis ei allu täielikult ranniku olukorrale, sest mere poolt on ta kaitstud saartega. Pärnu andmete järgi võib aastase tööhulga seal hinnata ca 300 000.

Välisrannikul (välja arvatud Pakri ümbruses olev loodepoolne Eestimaa nurk) on aastaseks tööhulgaks 400 000—500 000, kusjuures põhjaranniku ja saarte lääneranniku vahel erilisi lahku-minekuid pole, kui võtta arvesse vastavaid veamäärasid.

Erandi moodustab Pakri ümbrus, mis lageda, kõrge ja mere poole väljaulatuva osana näib tuultele igast suunast kättesaadav olevat. Aastaseks tööhulgaks on seal 1 000 000, seega ca 2 korda rohkem kui teistel rannikujaamadel.

Parema ülevaate saamiseks on aastased tööhulgad kujutatud kaardil (joon. 5).

Üleminek rannikult sisemaale pole jaamade hõreduse tõttu määratav. Selle kindlakstegemine polegi vahest praktiliselt teostatav, sest ta oleneb maastikulistest tingimustest (metsad, mäed) ja on seepärast igas kohas isesugune. Selliste looklevalt kulgevate samajoonte määramiseks tuleks üleminekualale rannikult sisemaale asetada ca 100 vaatlusjaama (eriti siis, kui soovitakse sama ka



Joon. 5. Tasandatud aastase tööhulga Q_r territoriaalne jaotus.

Näiteks on tasandatud aastane tööhulk Tallinnas 550 000, Võrus 128 000, jne.

saartel teostada), mis nõuab selle läbiviimiseks juba eri organisatsiooni.

IX. TÖÖHULKADE $Q(v_0)$ REDUTSEERIMINE VASTAVALT TASANDATUD TÖÖHULKADELE Q_r .

1. Redutseerimismeetodist. Kui nüüd nii mitmeti kalkuleeritud ja põhjendatud redutseerimise teel oleme üldisele tööhulgale Q (kui tuulemootor töötab iga tuulekiiruse juures) leidnud enamvähem

Tabel 18.

		Q_r	$Q_r(3,5)$	$Q_r(5,5)$	$Q_r(7,5)$
Jõgeva	T	98 000	86 000	64 000	43 000
	S	38 100	26 000	15 300	7 100
	A	136 100	112 000	79 300	50 100
Jäneda	T	60 400	49 000	33 000	19 300
	S	38 800	28 000	17 000	8 200
	A	99 200	77 000	50 000	27 500
Kuusiku	T	48 000	37 000	23 000	11 900
	S	33 300	23 000	13 000	5 800
	A	81 300	60 000	36 000	17 700

		Q_r	$Q_r (3,5)$	$Q_r (5,5)$	$Q_r (7,5)$
N.-Jõesuu	T	239 000	225 000	190 000	150 000
	S	169 000	157 000	128 000	97 000
	A	408 000	382 000	318 000	247 000
Olustvere	T	66 800	54 000	37 000	23 000
	S	39 600	28 000	16 800	8 000
	A	106 400	82 000	53 800	31 000
Pakri	T	692 000	680 000	610 000	550 000
	S	375 000	360 000	316 000	266 000
	A	1 067 000	1 040 000	926 000	816 000
Pärnu	T	173 000	160 000	132 000	98 000
	S	125 000	113 000	87 000	61 000
	A	298 000	273 000	219 000	159 000
Sõrve	T	297 000	282 000	244 000	200 000
	S	139 000	125 000	97 000	70 000
	A	436 000	407 000	341 000	270 000
Tallinn	T	359 000	340 000	300 000	260 000
	S	191 000	172 000	138 000	106 000
	A	550 000	512 000	438 000	366 000
Tartu	T	105 000	90 000	70 000	47 000
	S	61 800	49 000	33 200	19 600
	A	166 800	139 000	103 200	66 600
Tahkuna	T	203 000	190 000	153 000	117 000
	S	133 000	120 000	93 000	66 000
	A	336 000	310 000	246 000	183 000
Tooma	T	67 000	54 000	37 000	23 000
	S	47 800	36 000	23 000	11 800
	A	114 800	90 000	60 000	34 800
Vaindlo	T	343 000	330 000	285 000	242 000
	S	148 000	137 000	108 000	79 000
	A	491 000	467 000	393 000	321 000
Vasknarva	T	130 000	116 000	90 000	63 000
	S	87 800	76 000	54 000	35 000
	A	217 800	192 000	144 000	98 000

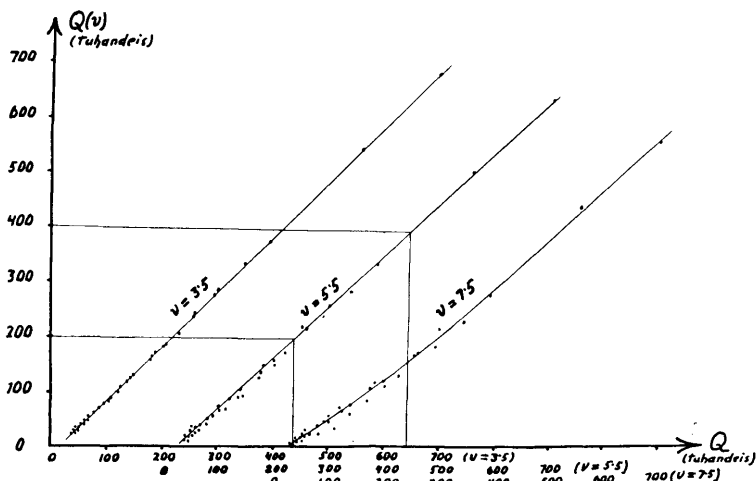
		Q_r	$Q_r(3,5)$	$Q_r(5,5)$	$Q_r(7,5)$
Vilsandi	T	289 000	275 000	232 000	191 000
	S	206 000	195 000	160 000	126 000
	A	495 000	470 000	392 000	317 000
Võru	T	79 200	67 000	47 000	29 400
	S	48 300	37 200	23 200	11 900
	A	127 500	104 200	70 200	41 300

usaldatavad väärtused Q_r (tab. 18), siis on kohe järgmiseks küsimuseks, kuidas redutseerida tööhulki, mis tuulemootor annab alates valitud 3,5-, 5,5- ja 7,5-m/sek. tuulekiirustelt, sest andmeid $Q(v_0)$ tabelis 12 ei saa enam Q_r väärtustega koos kasutada.

Kui üldise tööhulga Q redutseerimiseks oli aluseks keskmine tuulekiirus, siis siinkohal ei saa seda enam kasutada, sest seos sagedusjaotuse esimese momendi ja kolmanda momendi ühe osa vahel, mis võetud tugevamate tuulte järgi, on etteteatult halb.

Siinkohal kasutame hoopis lihtsamat võtet, nimelt vaatleme, kas tööhulk nimetatud kiirustest alates $Q(v_0)$ on olenev üldisest tööhulgast Q . Seose leidmiseks kasutame tabeli 12 andmeid, millede abil määrame korrelatsiooni Q ja $Q(v_0)$ vahel. Selle näitlikustamiseks kujutame vastavad väärtused ristkoordinaadistikus, mille x -teljel on Q väärtused ja y -teljel $Q(v)$ väärtused. Joonisel 6 on kujutatud nimetatud seos kolme erineva v_0 väärtuse ($v_0 = 3,5, 5,5$ ja $7,5$) jaoks. Kuna ühises koordinaadistikus kujutamiseks kõverad üksteise ligidal asetsevad ja seetõttu mõnes kohas raskeks osutub eraldada, mis-sugused punktid igauhele neist kuuluvad, siis on kolm koordinaadistikku üksteisest eraldatud x -telje suunas nihutamise teel. Seega jääb y -telg kõigil samaks. Nagu joonisest näha, valitseb Q ja $Q(v_0)$ vahel väga kõrge korrelatsioon, mida võib praktiliselt funktsionaalseks lugeda. Seos on parim Q ja $Q(3,5)$ vahel ja muutub veidi lödvemaks v kasvamisega. Igal juhul on seosed ülihead [korrelatsioonitegur Q ja $Q(3,5)$ vahel on $r = 0,999$] ja neid saab eduga rakendada redutseeritud $Q_r(v_0)$ väärtuste leidmiseks. Viimased on antud tabelis 18 v_0 väärtuste 3,5, 5,5 ja 7,5 jaoks.

2. $Q(v_0)$ väärtuste leidmine iga v_0 jaoks. Kui vajatakse $Q(v_0)$ väärtust mingi muu v_0 jaoks alla 7,5 m/sek., siis on lihtsamaks abinõuks tabeli 18 andmete interpoleerimine. Ülespoole 7,5 m/sek. võib ekstrapolatsiooni kasutada mõne sekundmeetri ulatuses ilma suurema veata. Näiteks vajame Narva-Jõesuu talvise tööhulga suurust alates tuulekiirusest $v_0 = 4,2$ m/sek. ja $v_0 = 8,3$ m/sek. Selleks inter-



Joon. 6. Seos Q (tööhulk, kui tuulemootor töötab iga tuulekiiruse juures) ja $Q(v)$ (tööhulk, kui tuulemootor alustab töötamist tuulekiiruse v juures) vahel kolme v eriväärtuse (3,5, 5,5 ja 7,5 m/sek.) juures.

Q -telje skaala on iga v jaoks eraldi antud ja tähistatud sama v väärtusega. Näiteks, kui tuulemootor alustab töötamist tuulekiiruse $v = 5,5$ m/sek. juures ja tema poolaasta tööhulk on 400 000, siis sama tööhulk, kui mootor töötab iga (ka väikseima) tuulekiiruse juures, on 440 000 (lugeda skaala teiselt realt). Sisetakistusele kulunud töö on seega $440\,000 - 400\,000 = 40\,000$ tööühikut.

Kui mootori tööhulk $Q(v) = 200\,000$, siis $Q = 230\,000$ ja kadu on 30 000.

poleerime $Q(4,2)$ väärtuse lineaarselt, mis praktiliseks otstarbeks on küllaldase täpsusega, väärtustest $Q(3,5)$ ja $Q(5,5)$. Kuna tabeli 18 järgi $Q(3,5) = 225\,000$ ja $Q(5,5) = 190\,000$, siis saame lineaarse interpolatsiooni valemi järgi:

$$\begin{aligned} Q(4,2) &= Q(3,5) + [Q(5,5) - Q(3,5)] \cdot \frac{4,2 - 3,5}{5,5 - 3,5} = \\ &= 225\,000 - 35\,000 \cdot \frac{0,7}{2,0} = \\ &= 225\,000 - 12\,000 = 213\,000. \end{aligned}$$

Resultaati võib ka peast arvutada. Kui v_0 kasvab 3,5-lt 5,5-le, seega 2,0 võrra, siis $Q(v_0)$ väheneb 225 000-lt 190 000-le, seega 35 000 võrra. Järelilikult väheneb $Q(v_0)$ iga 0,1 m/sek. v kasvu juures $35\,000 : 20 = 1\,750$ võrra. Kuna $v_0 = 4,2$ m/sek. on 0,7 võrra suurem kui $v_0 = 3,5$ m/sek., siis on temale vastav $Q(4,2)$ $1750 \cdot 7 = 12\,250$ võrra vähem kui $Q(3,5)$, ja sellega on $Q(4,2) = 225\,000 - 12\,000$ (ümardatud), nagu selle eespool saime.

$Q(8,3)$ leidmiseks kasutame analoogiliselt lineaarset ekstrapolatsiooni väärtuste $Q(5,5)$ ja $Q(7,5)$ abil. Vastava valemi järgi on

$$\begin{aligned} Q(8,3) &= Q(7,5) + [Q(7,5) - Q(5,5)] \cdot \frac{8,3 - 7,5}{7,5 - 5,5} = \\ &= 150\,000 - 40\,000 \cdot \frac{0,8}{2,0} = \\ &= 150\,000 - 16\,000 = 134\,000, \end{aligned}$$

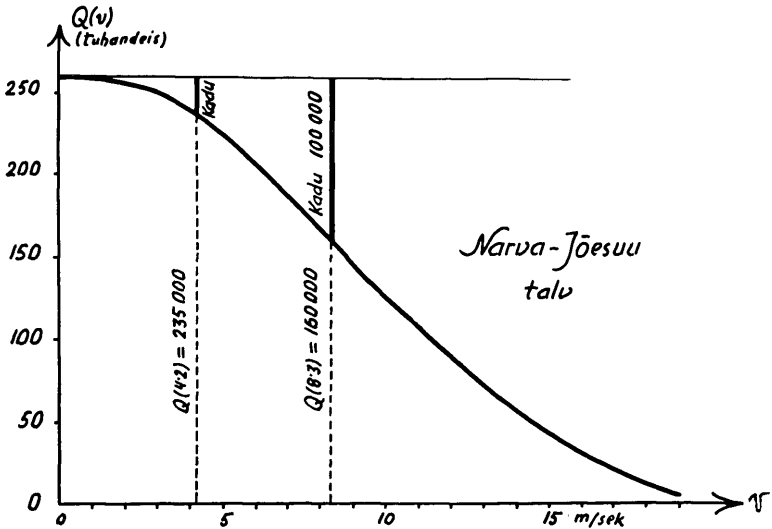
sest $Q(7,5)$ on tabeli 18 järgi 150 000.

Ka seda resultaati saame sama lihtsalt peast kalkuleerida. Kui v_0 kasvab 5,5-lt 7,5-le, seega 2,0 võrra, siis väheneb $Q(v_0)$ 190 000-lt 150 000-le, seega 40 000 võrra. Igale 0,1-m/sek. v_0 kasvule vastab $Q(v_0)$ kahanemine $40\,000 : 20 = 2\,000$ võrra. Eeldades, et samaugune kahanemine jätkub ka siis, kui $v_0 > 7,5$ m/sek., leiame, et v_0 jõudmisel väärtuseni $v_0 = 8,3$, kus ta on kasvanud 0,8 võrra lugesdes $v_0 = 7,5$ kohalt, on $Q(v_0)$ kahanenud $2\,000 \cdot 8 = 16\,000$ võrra. Seega on $Q(8,3) = 150\,000 - 16\,000 = 134\,000$, nagu selle juba varem leidsime.

Selle tõendamiseks, et igasuguste $Q(v_0)$ väärtuste arvutamiseks võib tabelis 18 antud $Q(v_0)$ väärtusi lineaarselt interpoleerida ja isegi ekstrapoleerida, on vaja näidata, et $Q(v_0)$ käik v_0 funktsioonina on küllaldaselt ladus, s. t. et ta ei omaks suuri kõverusi. Kuna tuulekiiruse sagedusjaotuste sarnasus üksikute jaamade vahel on võrdlemisi suur, siis pole vaja $Q(v_0)$ käiku uurida iga jaama kohta. Alljärgnevas joonises (joon. 7) on see antud Narva-Jõesuu kohta ja kõvera käigu iseloomu võime lugeda maksvaks ka teiste jaamade kohta. Joonisest nähtub, et lineaarne ekstrapolatsioon on isegi kuni $v_0 = 10$ m/sek. lubatav, ja selle tuulekiiruse juures peaks küll iga tuulemootor käima. Tabeli 18 andmeid võime seega kasutada praktiliselt iga tabelis mitteamatud $Q(v_0)$ arvutamiseks lineaarse inter- või ekstrapolatsiooni abil.

Kuna joonisel näidatud $Q(v_0)$ käik on arvutatud otseselt sagedusarvudest, siis sisaldab ta redutseerimata suurusi ja annab $Q(4,2)$ ja $Q(8,3)$ väärtused suuremad kui need varem leidsime, sest ka Q on Narva-Jõesuul suurem kui Q_r . Joonise 7 abil määrates on $Q(4,2) = 235\,000$ ja $Q(8,3) = 160\,000$.

Tabelit 18 tuleb kõigi töös esitatud põhjenduste järgi pidada iseloomustavaks tuule-energia jaotusele Eestis ja seega käesoleva töö eesmärgiks.



Joon. 7. $Q(v)$ (tööhulk, kui mootor alustab töötamist tuulekiiruse v juures) olenevus v -st Narva-Jõesuu talvise poolaasta kohta.

Näiteks mootor, mis alustab töötamist tuulekiiruse $v = 4,2$ m/sek. juures, annab Narva-Jõesuu talvisel poolaastal kasulikku tööd 235 000 ühikut, ja mootor, mis alustab töötamist $v = 8,3$ m/sek. juures, annab 160 000. Sisetakistusele minev kadu on esimesel juhul 25 000 ja teisel juhul 100 000 tööühikut.

X. LISATABELID.

Kuna tuulekiiruste sagedusi vajatakse tihti mitmesuguseks ots-
tarbeks, siis on kasulikum, kui need on antud relatiivselt, sest sel
juhul pole vaja teada vaatluste arvu, millest nad määratud. Loomu-
likum relatiivsete sageduste esitamine on anda sagedus protsentides
vaatluste üldarvust. Vastavalt sellele on tabeli 10 andmete järgi
arvutatud järgnevas tabelis (tab. 19) samade kiiruseklasside jaoks
sagedusarvud protsentides.

Tabel 19.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20	
Jõgeva	T	16,7	17,1	9,1	14,8	8,5	11,6	4,8	6,8	3,3	3,3	1,6	1,3	0,5	0,3	0,2
	S	27,0	23,3	9,1	14,7	6,1	8,5	3,1	4,0	1,5	1,8	0,4	0,3	0,1	—	—
Jäneda	T	12,0	24,9	7,1	21,9	4,9	14,1	1,6	7,8	1,1	3,3	0,3	0,8	0,1	—	—
	S	18,7	29,9	7,9	18,5	4,2	10,3	1,8	5,0	0,9	2,0	0,2	0,4	—	—	—
Kuusiku	T	17,2	27,5	10,0	19,3	5,6	10,7	1,6	4,6	1,0	2,0	0,2	0,5	0,0	0,3	0,1
	S	19,6	29,4	11,2	17,0	6,2	8,4	1,9	3,1	1,0	1,0	0,2	0,4	0,0	0,1	0,0
N.-Jõesuu	T	6,2	12,5	13,4	14,7	7,5	10,1	7,9	4,5	6,0	2,6	5,5	2,7	3,2	2,0	1,1
	S	7,2	21,4	14,1	14,4	6,9	9,3	5,3	3,8	4,9	2,7	3,8	2,1	2,3	1,1	0,8
Olustvere	T	7,4	18,9	19,0	17,4	13,1	7,6	7,0	3,5	3,3	0,8	1,0	0,5	0,2	0,3	0,1
	S	7,9	23,9	22,7	18,2	11,0	6,3	4,8	2,0	1,9	0,5	0,5	0,2	0,2	—	—
Pakri	T	1,4	4,4	1,8	11,3	3,6	16,1	2,0	12,9	2,3	13,8	1,7	13,6	2,1	7,7	5,1
	S	3,6	8,1	3,7	17,2	5,3	18,3	2,2	12,2	1,7	10,5	1,7	8,1	1,7	3,6	2,1

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20
Pärnu	T 15,0	12,2	6,6	16,9	5,5	13,3	2,8	10,5	1,8	7,6	1,3	3,8	0,7	1,4	0,5
	S 16,1	12,0	7,7	19,5	5,7	14,3	3,2	8,8	1,6	6,0	0,9	3,1	0,1	0,9	0,2
Sõrve	T 7,9	12,6	8,2	15,1	9,9	13,2	6,0	6,2	2,5	7,4	2,9	3,2	1,2	1,9	1,7
	S 9,3	22,5	10,6	20,0	9,2	10,7	3,8	3,7	1,4	4,2	1,4	1,7	0,2	0,5	0,8
Tahkuna	T 2,5	12,5	22,0	7,8	20,0	5,5	13,5	1,1	0,4	8,1	1,8	2,6	1,6	0,7	0,1
	S 3,8	14,3	27,7	8,5	19,8	3,6	11,4	0,3	0,5	6,0	0,8	1,9	1,1	0,2	—
Tallinn	T 1,9	7,0	6,1	7,5	9,7	10,9	11,1	8,6	9,2	7,9	7,0	7,0	2,8	2,3	1,0
	S 2,4	14,3	7,7	10,1	12,0	12,2	11,4	7,8	6,3	5,8	4,4	3,4	1,3	0,6	0,1
Tartu 1)	T 1,6	8,9	23,5	20,1	16,9	12,4	7,9	5,0	2,2	0,9	0,5	0,1	0,0	—	—
	S 2,4	15,7	33,4	21,0	13,2	7,3	3,5	2,1	1,0	0,3	0,2	—	—	—	—
Tooma	T 4,7	9,1	12,9	31,8	8,7	18,4	3,0	8,5	0,2	2,1	0,0	0,5	—	0,0	—
	S 5,1	13,6	15,4	33,3	7,6	16,2	2,6	4,9	0,2	0,7	—	0,2	—	0,0	—
Vaindlo	T 3,2	8,7	17,1	8,8	18,3	5,3	13,8	1,0	7,5	4,0	6,2	1,2	3,4	0,6	0,9
	S 8,4	17,2	23,2	9,0	16,8	3,4	9,8	0,9	4,5	1,6	2,9	0,4	1,4	0,1	0,4
Vasknarva	T 7,2	11,9	6,0	14,7	7,9	16,0	10,3	12,0	6,1	2,6	2,9	2,1	0,3	—	—
	S 11,8	13,7	8,9	19,2	10,5	13,7	6,7	6,9	3,4	1,8	2,2	1,0	0,2	—	—
Vilsandi	T 4,0	5,2	14,9	2,8	18,1	3,3	17,4	1,7	11,1	2,4	8,8	4,0	3,9	1,9	0,6
	S 8,2	6,4	15,3	3,5	19,9	2,6	18,2	1,2	10,0	1,8	6,4	2,7	2,7	1,0	0,2
Võru	T 12,3	25,7	7,9	20,8	5,5	12,6	2,0	5,0	2,3	1,7	1,0	1,7	1,0	0,3	0,0
	S 16,4	30,0	7,6	20,8	4,8	11,2	1,4	3,1	1,7	0,9	0,5	1,1	0,6	—	—

Kui tuulemootor algab töötamist mingilt kiiruselt v_0 , siis annab tabel 18 vastava tööhulga $Q(v_0)$ või võimaldab selle määramist. Seejuures on tihti huvitav teada, kui palju aega koguaegast, s. t. suve- või talveperioodist tuulemootor on neil juhtudel töös. Teiste sõnadega: kui kaua vaadeldaval poolaastal puhub tuul kiirusega, mis on suurem kui v_0 . Selle määramiseks on järgnevas tabelis (tab. 20) antud tähendatud aeg protsentides vastava poolaasta pikkusest. Suhteline aja pikkus protsentides loob hõlpsama kujutluse kui andmed tundides või päevades, ja viimaseid on soovi korral esimesest kerge ümber arvutada.

Tabel 20.

	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	11,0	13,0	15,5
Jõgeva	T 83,3	66,2	57,1	42,3	33,8	22,2	17,4	10,6	7,3	4,0	2,4	1,1	0,6
	S 73,0	49,7	40,6	25,9	19,8	11,3	8,2	4,2	2,7	0,9	0,5	0,2	0,1
Jäneda	T 88,0	63,1	56,0	34,1	29,2	15,1	13,5	5,7	4,6	1,3	1,0	0,2	0,1
	S 81,3	51,4	43,5	25,0	20,8	10,5	8,7	3,7	2,8	0,8	0,5	0,1	—
Kuusiku	T 82,8	55,3	45,3	26,0	21,0	10,3	8,7	4,1	3,1	1,1	0,9	0,4	0,4
	S 80,4	51,0	39,8	22,3	16,1	7,7	5,8	2,7	1,7	0,7	0,5	0,1	0,1
N.-Jõesuu	T 93,8	81,3	67,9	53,2	45,7	35,6	27,7	23,2	17,2	14,6	9,1	6,4	3,2
	S 92,8	71,4	57,3	42,9	36,0	26,7	21,4	17,6	12,7	10,0	6,2	4,1	1,8
Olustvere	T 92,6	73,7	54,7	37,3	24,2	16,6	9,6	6,1	2,8	2,0	1,0	0,5	0,3
	S 92,1	68,2	45,5	27,3	16,3	10,0	5,2	3,2	1,3	0,8	0,3	0,1	—
Pakri	T 98,6	94,2	92,4	81,1	77,5	61,4	59,4	46,5	44,2	30,4	28,7	15,1	13,0
	S 96,4	88,3	84,6	67,4	62,1	43,8	41,6	29,4	27,7	17,2	15,5	7,4	5,7
Pärnu	T 85,0	72,8	66,2	49,3	43,8	30,5	27,7	17,2	15,4	7,8	6,5	2,7	2,0
	S 83,9	71,9	64,2	44,7	39,0	24,7	21,5	12,7	11,1	5,1	4,2	1,1	1,0
Sõrve	T 92,1	79,5	71,3	56,2	46,3	33,1	27,1	20,9	18,4	11,0	8,1	4,9	3,7
	S 90,7	68,2	57,6	37,6	28,4	17,7	13,9	10,2	8,8	4,6	3,2	1,5	1,3

1) Tartu osas erineb kiiruseklasside jaotus teiste jaamade omast. Lugeda märkust lk. 27.

		0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	11,0	13,0	15,5
Tahkuna	T	97,5	85,0	63,0	55,2	35,2	29,7	16,2	15,1	14,7	6,6	4,8	2,2	0,6
	S	96,2	81,9	54,2	45,7	25,9	22,3	10,9	10,6	10,1	4,1	3,3	1,4	0,3
Tallinn	T	98,1	91,1	85,0	77,5	67,8	56,9	45,8	37,2	28,0	20,1	13,1	6,1	3,3
	S	97,6	83,3	75,6	65,5	52,5	41,3	29,9	22,1	15,8	10,0	5,6	2,2	0,9
Tooma	T	95,3	86,2	73,3	41,5	32,8	14,4	11,4	2,9	2,7	0,6	0,6	0,1	0,1
	S	94,9	81,3	65,9	32,6	25,0	8,8	6,2	1,3	1,1	0,4	0,4	0,2	0,1
Vaindlo	T	96,8	88,1	71,0	62,2	43,9	38,6	24,8	23,8	16,3	12,3	6,1	4,9	1,5
	S	91,6	74,4	51,2	42,2	25,4	22,0	12,2	11,3	6,8	5,2	2,3	1,9	0,5
Vasknarva	T	92,8	80,9	74,9	60,2	52,3	36,3	26,0	14,0	7,9	5,3	2,4	0,3	—
	S	88,2	74,5	65,6	46,4	35,9	22,2	15,5	8,6	5,2	3,4	1,2	0,2	—
Vilsandi	T	96,0	90,8	75,9	73,1	55,0	51,7	34,3	32,6	21,5	19,1	10,3	6,3	2,4
	S	91,8	85,4	70,1	66,6	46,7	44,1	25,9	24,7	14,7	12,9	6,5	3,8	1,1
Võru	T	87,7	62,0	54,1	33,3	27,8	15,2	13,2	8,2	5,9	4,2	3,2	1,5	0,5
	S	83,6	53,6	46,0	25,2	20,4	9,2	7,8	4,7	3,0	2,1	1,6	0,6	—
Tartu		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	13,0	
	T	98,4	89,5	66,0	45,9	29,0	16,6	8,7	3,7	1,5	0,6	0,1	—	—
	S	97,6	81,9	48,5	27,5	14,3	7,0	3,5	1,4	0,4	0,2	—	—	

Arvud tabeli ülemises reas (0,5, 1,5, 2,5 jne.) näitavad kiirust, millest tugevamate tuulte puhumisaega on arvestatud. Nii puhub näiteks Jänedal talvel kiirusest 5,5 m/sek. tugevamaid tuuli 15,1 % kogu ajast (poolaastast), mis on umbes ühe kuu kestusega. Jaamad on antud endiselt tähestikulises järjestuses, välja arvatud Tartu, mis on paigutatud tabeli lõppu, sest Tartul ei lange klasside teissuguse valiku tõttu kiiruse numbrid teistega kokku.

Kui vajatakse andmeid kiiruste jaoks, mis tabelis puuduvad, siis tuleb interpoleerida, mida võib lineaarselt teha.

Mõlema tabeli (tab. 19 ja 20) andmed on tasandamata, s. t. nii nagu nad vaatlejate poolt on märgitud, sest tasandamisviisi võib andmete kasutaja soovi korral ise valida.

XI. ARVUTUSNÄITEID.

1. Tööhulkade määramine tehnilistes ühikutes. Lõpuks olgu antud väike näide tööhulga arvutamiseks mingi tegeliku tuulemootoriga.

Alustagu tuulemootor käiku tuulekiiruse $v_0 = 4,5$ m/sek. pealt, mis tähendab, et selle kiirusega tuulest saadav energia kulub tuulemootori sisetakistusele. Oletades, et see sisetakistus jääb ka edaspidi samaks, on vaja veel teada mootori võimsust mingi muu tuulekiiruse puhul. Olgu siis näiteks tuulekiiruse $v = 8,0$ m/sek. puhul mootori võimsus 100 vatti. Kui palju tööd saab mootorilt aasta vältel näiteks Pärnus?

Ülesande lahendamiseks on vaja määrata võrdetegur töös esitatud ühikute ja tehniliste ühikute (kilovatt-tund) vahel. Valemi (27^b) järgi on see

$$\mu = \frac{0,008 W}{v^3 - v_0^3}.$$

Meie juhul on

$$W = 100 \text{ vatti}$$

ja seda võimaldav tuule kiirus on

$$v = 8,0 \text{ m/sek.}$$

Edasi on

$$v_0 = 4,5 \text{ m/sek.}$$

Asetades need suurused valemisse, saame

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{0,008 \cdot 100}{8,0^3 - 4,5^3} = \\ &= 0,00190. \end{aligned}$$

Selle teguriga tuleb korrutada tabelist 18 määratud $Q(4,5)$ väärtusi, et saada tööd kilovatt-tundides. Kuna $Q(4,5)$ väärtusi tabelis ei ole, siis tuleb need leida interpoleerimise teel $Q(3,5)$ ja $Q(5,5)$ väärtustest. Praegusel juhul (kiirus 4,5 m/sek. asetseb täpselt kiiruste 3,5 ja 5,5 vahepeal) on $Q(4,5)$ väärtuseks aritmeetiline keskmine $Q(3,5)$ ja $Q(5,5)$ väärtustest.

Pärnu jaoks on talvel $Q(4,5) = 146\,000$ ja suvel $Q(4,5) = 100\,000$ (lineaarselt interpoleeritud) ja sama töö tehnilistes ühikutes

$$\begin{aligned} \text{talvel } &146\,000 \cdot 0,00190 = 277 \text{ kWh ja} \\ \text{suvel } &100\,000 \cdot 0,00190 = 190 \text{ kWh,} \end{aligned}$$

millega aastane töö on 467 kWh.

Sama võrdeteguriga tuleb määrata tööhulgad antud tuulemootori jaoks ka teistes jaamades.

Nii on Tallinnas talvel $Q(4,5) = 320\,000$ ja suvel $Q(4,5) = 155\,000$ (tab. 18 andmetel), millega sama töö tehnilistes ühikutes on

$$\begin{aligned} \text{talvel } &320\,000 \cdot 0,00190 = 608 \text{ kWh ja} \\ \text{suvel } &155\,000 \cdot 0,00190 = 295 \text{ kWh ning} \end{aligned}$$

kogu aastal 903 kWh.

Kuusikul on talvel $Q(4,5) = 30\,000$, mis annab 57 kWh, ja suvel $Q(4,5) = 18\,000$, mis annab 34 kWh. Aastane töö on ainult 91 kWh, seega umbes 10% Tallinnas saadavast tööst.

Täiendavalt annab tabel 20, et antud tuulemootor on käigus talvepoolaastal Kuusikul 21,0%, Pärnus 43,8% ja Tallinnas 67,8%

kogu ajast ning suvepoolaastal Kuusikul 16,1 %, Pärnus 39,0 % ja Tallinnas 52,5 % kogu ajast. Eeltoodu kohaselt on arusaadav, et Kuusiku tööhulk on nii väike, sest vajaliku tugevusega tuuli puhub seal võrdlemisi harva.

2. Tööhulkade arvutamine mootori meelevaldse koormamisviisi puhul. Kõik näidatud arvutused kehtivad töö algul nimetatud eeldusel, et tuulemootorit koormatakse selliselt, et ta võimsus iga tuulekiiruse korral oleks maksimaalne. Kui seda ei tehta või kui tuulemootori ülesanne seda ei võimalda, ei saa ka tabeli 18 alusel arvutada aastast või poolaastast tööhulka. Tööhulga arvutamine on ka sel juhul võimalik, kui peale mootori käimahakkamiseks vajaliku tuulekiiruse on vaja teada veel mootori võimsus iga tuulekiiruse juures (eelmisel juhul piisas selle teadmisest ainult ühe kiiruse juures).

Tabelis 21 on antud näitena ühe tuulemootori võimsused W tuulekiiruste v puhul.

Tabel 21.

v m/sek.	3,5	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20
W vatt	0	2	17	36	64	100	140	180	310	390	450	520
t tund		240	582	123	457	80	330	55	165	32	63	22
q kWh		0,5	10,0	4,4	21,2	8,0	46,2	10,0	51,1	12,5	28,4	11,4

Tuulekiiruse $v_0 = 3,5$ m/sek. juures alustab mootor käiku, mis pärast sellele kiirusele vastav võimsus on märgitud nulliga, sest sel korral me tööd veel ei saa. Kui palju tööd saame sellise mootoriga talve-poolaastal Pärnus? Selleks on meil vaja teada, kui palju tunde puhub iga kiirusega tuul Pärnus. Tabeli 10 abil leiame vastavad arvud. Kuna seal on 10 aasta vaatlusjuhud, siis tuleb meil sealt võetud arve jagada 10-ga (saades ühe aasta vaatlusjuhud) ja saadus korrutada 8-ga (sest igale vaatlusele langeb 8 tundi). Sel teel leitud tundide arvud on antud tabeli 21 reas t . Korrutades ridade W ja t liikmed vastamisi saame tööhulga vatt-tundides ülemises reas märgitud tuule korral. Seda 1000-ga jagades saame töö kilovatt-tundides, millised arvud on antud reas q . Summeeritult annavad need talvise poolaasta tööks 203,7 kilovatt-tundi või ümarguselt 204 kWh.

Sama skeemi järgi (tab. 21) võib tabeli 10 kaasabil arvutada iga jaama jaoks soovitava tööhulga igale tuulemootorile igasuguse koormamisviisi puhul.

DISTRIBUTION OF WIND POWER IN ESTONIA.

(SUMMARY)

Depending on its load, a wind motor will give, with the wind speed of v , various amounts of energy W . With a certain load W is the maximum, for which case the relation between v and W may be expressed by the formula

$$(1) \quad W = \gamma v^3,$$

where γ is a constant for the given motor, and depends on the units in which v and W have been measured.

In the present paper the average amount of energy has been calculated, which may be obtained with a wind motor of certain power during the summer (Apr.-Sept.) or winter (Oct.-March) half-year and during the whole year. This calculation is carried out for 16 separate places, taking the data for wind velocities from the observations over a ten-year period (1926—1935). Table 14 gives the values of the energy Q in watt hours obtainable with the chosen standard motor ($\gamma = 1/8$) during the periods mentioned, (S —summer half-year, T —winter half-year, and A —whole-year) for the 16 observation points. A list of the observation points is given on p. 10.

In order to apply the data of the table to any other motor, the power W of the motor at a certain wind speed v must be known. To find out the amount of work done by the motor in kilowatt hours (kwh) during the year or during either of the half-years separately, the Q values found in Table 14 must be multiplied by the factor μ ,

$$(2) \quad \mu = \frac{0.008 W}{v^3}$$

If a wind motor due to its internal resistance (e. g. due to friction in a water-pump attached to the wind motor) starts at a wind speed of v_0 , the work obtained $Q(v_0)$ is less than Q , the amount of work corresponding to the wind speed of v_0 being lost. Moreover a number of days with a wind speed less than v_0 , are counted out entirely. In Table 14, in addition to the Q values, $Q(v_0)$ values are also given for three different v_0 values ($v = 3.5, 5.5$ and 7.5 m/sec). For the intermediate v_0 values $Q(v_0)$ may be found by interpolation. To find out the amount of work obtainable within a half- or whole-year by a wind motor starting at a wind speed v_0 , the corresponding $Q(v_0)$ value must be computed according to Table 14. Further we must know the W (watt) power of the wind motor at a certain wind speed v (m/sec). To find out the amount of work in kilowatt hours, the $Q(v_0)$ value must be multiplied by the factor μ ,

$$(3) \quad \mu = \frac{0.008 W}{v^3 - v_0^3}$$

The frequency distributions of the wind speeds being more or less similar, the values of Q for each observation point must be in relation with the average wind speed v . This relation is shown in Fig. 3, which gives the equation between Q and v as follows:

$$(4) \quad Q = 4120 v^{2.41}$$

where both Q and v have been taken for the half-year.

With this formula, from the average wind speed v , may be computed its corresponding half-year's work Q . These amounts of work have been computed in Table 15 and are marked Q_t . The same table shows the difference (Δ) between Q_t and Q as well as its relative value $\left(\frac{\Delta}{Q_t}\right)_{0/0}$.

Studying the values of Q and their deviation within ten years it appeared that in three observation points (Sörve, Tahkuna, Vaindlo) a number of years must be left out, because the observation data there were untrustworthy. Corrected data on the basis of Table 15 are given in Table 18.

As the values of Q contain uncertainties due to observational errors, and as certain considerations permit us to believe that Q_t values are more plausible, the corrected Q_r values are obtained as weighted means of Q and Q_t :

$$(5) \quad Q_r = 1/3 (2Q + Q_t)$$

Q_r values are given in Table 19, and these must be considered as the most trustworthy. With the aid of data in Table 14 the relation has been found between $Q(v_0)$ and Q by which it is possible to correct the values of $Q(v_0)$ given in Table 14. This relation is represented graphically in Fig. 5 for three special v_0 values. By the latter correlation, the corresponding values of $Q_r(v_0)$ were computed from the values of Q_r and are also given in Table 19. Thus Table 19 contains the data of Table 14 in a corrected form and is presented as a final result of the published work. To compute the amounts of work obtainable by any actual wind motor the formulas 2 or 3 must be used as usual. The Q values in both Tables have been located on the chart (Figures 4 and 5), from which it is obvious that the energy of the wind on the coast by far surpasses that of the wind inland.

Chapter III considers the question whether 3 observations in 24 hours give a clear enough characterization of the wind. For this purpose a comparative analysis was made for Tartu with observations taken every hour, and the theory of probability applied in evaluation. The result was satisfactory and therefore the data of Table 19 may be considered as characteristic of the distribution of wind energy.

LOODUSVARADE INSTITUUDI AVALDISED.

Publications of the Natural Resources Research Institute
of Estonia.

- Nr. 1. UURIMUSI METSATÖÖDE RATSIONALISEERIMISEKS.
(Untersuchungen zur Rationalisierung der Forstarbeiten.)
- Nr. 2. LOODUSVARADE INSTITUUDI SEISUKOHTI PUIDU IMMUTUSE
PROBLEEMI LAHENDAMISE ALAL EESTIS.
(The Views of the Natural Resources Research Institute on Wood
Impregnation: Estonian Shale Oil as a Wood Preservative.)
- Nr. 3. J. HÜSSE. PIIRITUSE VALMISTAMISE VÕIMALUSEST SULFIT-
PRAAKLEELISEST EESTIS.
(The Possibilities of Manufacturing Alcohol from Waste Sulphite Lye
in Estonia.)
- Nr. 4. MEREJÄÄ VAATLUSED 1938/39. a. TALVEL EESTIS.
(Sea-ice Observations Made in Estonia during the Winter 1938/39.)
- Nr. 5. TERMIINSÕIDUD EESTI VÄLISVETES 1935—1939.
(Thalassalogical Cruises Made in Estonian Waters in 1935—1939.)
- Nr. 6. A. VELNER. VEPPINNAD NARVA JÕE JA PEIPSI VESIKONNAS
1929—1938.
(Water Levels in the Drainage Basin of the Narva River and Lake
Peipsi 1929—1938.)
- Nr. 7. A. KÄRSNA. TUULE-ENERGIA JAOTUSEST EESTIS.
(Distribution of Wind Power in Estonia.)