

Salaojakastelu tuulivoimalla



HELSINGIN YLIOPISTO - HELSINGFORS UNIVERSITET - UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-Metsätieteellinen tdk.		Laitos — Institution — Department Maa- ja kotitalousteknologian laitos	
Tekijä — Författare — Author Tiusanen Markku Johannes			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Salaojakastelu tuulivoimalla			
Oppiaine — Läroämne — Subject Maatalousteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Pro Gradu		Aika — Datum — Month and year Marraskuu 2002	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 64
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Vedenpumpppaamisen historiasta tunnetaan paljon tuulivoimalla toimineita laitteita, mutta menetelmä on viime aikoina ollut aliarvostettu. Salaojakastelu on maan altakastelumenetelmä, jota on tutkittu runsaasti säätosalojituksen yleistyttyä. Menetelmällä voidaan nostaa satotasoa, tasata sadon laatua sekä parantaa pellon ravinnetaloutta ja vähentää ravinteiden huuhtoutumista. Salaojakastelu os-toenergialla on kustannustehokasta vain juures- ja perunaviljelyksillä – ei viljan viljelyssä. Juuri sala-ojakastelu on hyvä sovelluskohde kiirettömään vedenpumpppaamiseen tuulivoimalla.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää liikuteltava pientuulivoimala, jonka käyttö on taloudel-lisesti kannattavaa. Kehitetyn Savonius-roottoriin perustuvan prototyypin odotettavissa olevat ve-dentuottomäärät selvitettiin mittauksilla, joissa mitattiin veden tuottoa tuulen nopeuden suhteen ja yhdistettiin tuottotulokset eri tuulen nopeuksien esiintymistodennäköisyyksiin eri puolella Suomea. Laitetta ei saatu toimimaan odotetulla teholla.</p> <p>Menetelmän menestyksekkäs soveltaminen käytäntöön asettaa reunaehdoja. Pellon kaltevuuden on oltava alle 1-2 % ja maan on oltava hiekka- tai hietamaata. Hieno hieta on salaojakastelulle ihan-teel-linen maalaji. Maan vettä läpäisemättömän kerroksen tulee olla 3-8 m:n syvyydessä. Ojavälin on ol-tava maalajista riippuen luokkaa 10-15 m. Tuulen paikallisen keskiarvon on oltava yli 4 m/s ja kaste-luvettä on oltava saatavana alle 8 m:n nostokorkeudella.</p> <p>Tutkimuksessa yritettiin selvittää, mikä aiheuttaa kehitetyn prototyypin alhaisen hyötysuhteen muihin tutkimuksiin verrattuna. Roottori käyttäytyy kierrosnopeuden suhteen kuten odotettu, eli roottorin vääntömomentti kasvaa, kun pumpppu säädetään raskaammalle, eikä pumpun iskutilavuuden säätö siksi ratkaisevasti vaikuta pumpppaustehoon. Pumpun kitkat eivät nouse pumpppausnopeuden kasva-essa niin paljoa, että alhainen tehokkuus selittyisi sillä. Ongelma saattaa johtua Savonius-roottorin virtausteknisestä muotoilusta.</p> <p>Salaojakasteluun rakennettava sähköpumpppaamo maksaa 8 ha:n lohkolle 7.100 €. Pumpppaamon ja sähkönkulutuksen hehtaarikustannus on 15 vuoden poistoilla 140 €/ha/v. Tässä kehitetyn 1030 €:n tuuliroottorin korollinen vuosikustannus on 112 €/v. Tuulisuudesta ja veden nostokorkeudesta riip-puen hehtaarikustannukseksi muodostuu noin 30-70 €/ha/v. Tuulivoima-salaojakastelu on kannatta-va jopa viljanviljelyssä joillain kasteluveden nostokorkeuksilla. Perunaviljelmillä menetelmä on säh-kömootorilla tapahtuvaa pumpppaamista edullisempaa kaikilla kasteluveden imukorkeuksilla.</p> <p>Projekti jatkuu tämän tutkielman jälkeen roottorilaitteen tuotekehitysprojektina ainakin vuoden 2003 maaliskuulle. Tutkimusta ovat rahoittaneet Salaojituksen tutkimusyhdistys ry. sekä PrizzTech Oy:n koordinoimassa hankkeessa KWH, Uponor, Ulvilan kunta ja Kolmeks Oy.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Säätosalojitus, salaojakastelu, säätökastelu, tuulivoima, Savonius-roottori			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maa- ja kotitalousteknologian laitoksen kirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
1.1	TAUSTA	5
1.2	TUTKIMUKSEN TAVOITE JA VAIHEET	5
1.3	KÄYTETTÄVIÄ TERMEJÄ JA SYMBOLEJA	6
	TEORIAOSA	8
2	TUULIVOIMA	8
2.1	TUULEN NOPEUS JA TEHO	8
2.2	TUULIVOIMALAN HYÖTYSUHDE	9
2.3	ROOTTORITYYPPEJÄ	10
2.4	SAVONIUS-ROOTTORIN PERIAATE JA KEHITYS	12
2.5	VEDENPUMPPAUSTULOKSIA SAVONIUS-ROOTTOREILLA	15
2.6	TUULISUUS SUOMESSA	17
3	SALAOJAKASTELU	20
3.1	SALAOJAKASTELUN PERIAATE	20
3.2	SALAOJAKASTELUN HYÖDYT	22
3.3	SALAOJAKASTELUN KUSTANNUKSET	23
3.4	SADETUSKASTELUN KUSTANNUKSET	24
4	PROTOTYYPIN SUUNNITTELUPARAMETRIT	26
4.1	VEDEN PUMPPAAMINEN TUULIVOIMALLA	26
4.2	SADANNAN VAJE JA TUULISUUS SUOMESSA	28
4.3	ROOTTORILAITTEEN MITOITUS	30
4.4	ROOTTORILAITTEEN KUSTANNUKSET	31

KOKEELLINEN OSA	33
5 KOEJÄRJESTELYT	33
5.1 ESIKOE	33
5.2 MITTAUSJÄRJESTELYT JA INSTRUMENTOINTI	35
5.3 TUULEN KORKEUSPROFILI	38
6 KOKEIDEN TULOKSET	41
6.1 KOKEIDEN ERI VAIHEIDEN PÄÄPIIRTEET	41
6.2 PUMPPAUSTEHO	44
6.3 HUKKATEHO	45
6.4 LAITTEEN HYÖTYSUHDE	47
7 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	49
7.1 TULOSTEN ARVIOINTI JA LUOTETTAVUUS	49
7.2 ROOTTORILAITTEEN KEHITTÄMINEN TULOSTEN POHJALTA	50
7.3 ROOTTORILAITTEEN KASTELUKYKY PERUNANVILJELYKSILLÄ	51
7.4 MENETELMÄN TALOUDELLINEN KANATTAVUUS	52
7.5 MENETELMÄN EDELLYTYKSISTÄ SUOMEN ULKOPUOLELLA	53
7.6 MENETELMÄN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN	54
8 KÄYTÄNNÖN ESIMERKKI TUTKIMUSTILALTA	55
9 TIIVISTELMÄ	58
LÄHDEKIRJALLISUUS	60
LIITTEET	63

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Tuulivoimaa on käytetty viljelysmaan kasteluun jo ennen ajanlaskumme alkua (Fraenkel 1986). Lähempänä omaa aikaamme Suomessa käytetyt kastelumenetelmät ovat kuitenkin painottuneet suurta painetta edellyttäviin sadetusmenetelmiin ja kastelu tuulivoimalla on pitkälti unohdettu. Tuulivoimalla ei nosteta vettä juuri muuten kuin Yhdysvalloissa talouskäyttöön hyvin vanhoilla laitteilla sekä laitumilla karjan juomavedeksi.

Salaojakastelu on maan altakastelumenetelmä, joka voidaan toteuttaa jopa ilman energiaa padotuskasteluna. Padotuskastelu esiintyy menetelmänä jo vuoden 1947 laitoksessa Maamiehen käsikirjasta: ”Milloin on mahdollista johtaa vettä salaojiin ojaston yläpäästä tai on tarkoituksena vain estää vesiä virtaamasta pois salaojista, on käytettävä betonisia salaojasulkuja. Sulkua voidaan käyttää myös, milloin ei tahdota laskea vettä johonkin ojastoon. Tällainen pohjavesipadotus voidaan toteuttaa ilman kovin suuria kustannuksia suhteellisen viettävilläkin (1.0 %) mailla” (Keso 1947). Menetelmää on tutkittu runsaasti säätösalojituksen yleistyttyä, ja tulokset ovat hyviä. Menetelmällä voidaan nostaa satotasoa, tasata sadon laatua sekä parantaa pellon ravinnetaloutta ja vähentää ravinteiden huuhtoutumista (KM 1994, Paasonen-Kivekäs 1998, Haataja 2000).

Tutkimusten mukaan salaojakastelu on kuitenkin siinä määrin kallista, ettei menetelmän kokonaiskustannuksia saada selkeistä eduista huolimatta kateuksi viljakasvien tuotonlisäyksellä. Perunan, porkkanan ja sokerijuurikkaan tapauksessa menetelmä on kuitenkin erittäin kustannustehokas (Haataja 2000).

Salaojakasteluveden pumppaaminen tuulivoimalla on ilmaisen energian ansiosta edullista mutta tuuliolosuhteista riippuen epävarmaa. Siten menetelmällä ei välttämättä ole satoa pelastavaa vaikutusta, mutta tavallisina kasvukausina menetelmällä voidaan nostaa satotasoa huomattavasti. Myös viljan viljelyssä menetelmä saattaa olla kustannustehokas siinä, missä sähkö- tai polttomootorilla tapahtuva kastelu ei sitä ole.

1.2 Tutkimuksen tavoite ja vaiheet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää liikuteltava ja helppokäyttöinen pientuulivoimala, joka on niin edullinen, että sen käyttö perunanviljelyssä on taloudellisesti kannattavaa. Peruna valittiin kasteltavaksi kasviksi siksi, että sen vedentarve on yleisesti viljeltävistä peltokasveistamme suurin. Kirjallisuuden pohjalta kehitettiin roottorilaite, jonka suorituskykyä kokeiltiin odotettavissa olevien vedentuottomäärien selvittämiseksi tunnetuilla tuulen keskinopeuksilla, jotta voitaisiin laskea laitteen vuosikustannukset hehtaaria kohti.

Tutkimushanke alkoi kirjallisuusselvityksenä jo vuonna 1997 kahvipöytäkeskustelun innoittamana. Vuosina 1998-1999 rakennettiin Kokemäenjoen ran-

taan noin 12 metriä korkea Savonius-roottori yksityisenä, Euroopan maatalouden ohjaus- ja tukirahaston (EMOTR) osarahoitteisena hankkeena. Suuri roottori osoittautui monella tapaa huonoksi ratkaisuksi, ja erityisesti laitteen tuotteistaminen olisi ollut vaikeaa. Salaojituksen tutkimusyhdystys ry. rahoitti tutkimuksen jatkon kesällä 2000, jolloin rakennettiin pienempi ja siirrettävä malli roottorista. Prototyypillä suoritettiin alustavia kokeita, jotka toimivat tämän tutkimuksen esikokeina.

Jo nämä esikokeet osoittivat, ettei prototyypin suorituskyky vastannut kirjallisuusselvityksen pohjalta asetettuja tavoitteita, edellytti tutkimus uuden hankkeen aloittamista ja porilaisen teknologian kehittämiskeskus PrizzTech Oy:n energiatoimisto käynnisti vuoden 2001 alusta kehittämishankkeen ja järjesti rahoituksen. Vuosina 2001 ja 2002 rakennettiin kaikkiaan 3 uutta prototyyppiä ja kokeiltiin jopa 7:ää rakenteeltaan ja säätömekanismeiltaan erilaista roottoriosaa. Samalla kun tulostenkäsittelyvaiheeseen saakka edenneitä mittauskoeajoja erilaisilla pumppuratkaisuilla kertyi kaikkiaan yli 80, kerättiin lisää lähteitä tulosten vertailua varten ja prototyyppien suorituskyky parani pienin askelin. Näitä kaikkia kokeita ei käsitellä, vaan keskitytään viimeisiin, syyskuussa 2002 tehtyihin mittauksiin.

Tutkimuksen kokeet on tehty järjestelmäkokeina, eikä järjestelmän yksittäisiä osia ole lähdetty koestamaan erikseen. Sekä tuuliroottoreista että vesipumpuista on olemassa paljon tutkimuksia, joita ei siis lähdetty toistamaan. Kokeet on tehty pellon reunassa joen rannalla samanlaisissa olosuhteissa, kuin laitetta käytettäisiin kasteltaessa peltoa, kuten esimerkkitapauksessa myös tehtiin.

Kokeiden edetessä vanhat prototyypit kytkettiin salaojaverkostoon ja noin 2,5 hehtaarin peruna-alaa kasteltiin hyvin tuloksin koko kesän 2002. Laitteiden vedentuotolle ei kuitenkaan järjestetty minkäänlaista seurantaa eikä sato-tason arviokaan ole kattava. Siksi tämä osa hanketta on jätetty kokeiden varsinaisten tulosten ulkopuolelle tutkielman loppuun esimerkkitapaukseksi.

1.3 Käytettäviä termejä ja symboleja

Joidenkin termien sisältöä on syytä painottaa tai rajata. Tuulivoimaloista puhuttaessa *roottori* on tuulen voimasta pyörivä kappale, *tuulivoimala* puolestaan toimiva kokonaisuus. Kokeellisessa osassa käytetään paljon termiä *roottorilaitte* jolla takoitetaan samaa, erotukseksi sähköntuotannon tarkoitetuista voimaloista. Roottorin tai roottorilaitteen tehokkuudesta eli hyötysuhteesta puhuttaessa sanoja *kokonaisyhyötysuhde* eli *pumppaushyötysuhde* ja *tuulimekaanisesta hyötysuhde*, jotka määritellään hyötysuhdetta käsittelevässä kappaleessa. Salaojakasteluun liittyvät termit eritellään myös tarkemmin aihealueen yhteydessä.

Tuulen *nopeusprofiili* tai *korkeusprofiili* ilmoittaa, miten tuulen nopeudet eri korkeuksilla suhteutuvat toisiinsa. Tuulen *keskinopeus* on keskiarvo jonain aikana mitatuista tuulen nopeuksista, yleensä vuosikeskiarvo. Tuulen *tehollinen keskinopeus* on näiden yksittäisten tuulten kuutiopainotettu keskiarvo. *Hukkateho* on se osa roottorin tuottamaa tehoa, jota ei saada muutettua vedentuotoksi.

Kaavoissa ja kuvaajissa käytetään seuraavia symboleja:

A	Pinta-ala, Roottorin sieppauspinta-ala [m ²]
α	Maanpinnan karkeusvakio
E_k	Liike-energia [J]
E_p	Potentiaalienergia [J]
f	Taajuus, pulssitaajuus [Hz]
g	Gravitaatiokiihtyvyys (9,81 m/s ²)
h	Korkeus, tuulen mittakorkeus, veden nostokorkeus [m]
J	Hitausmomentti [kgm ²]
m/t	Massavirta [kg/s]
η, c_p	Hyötysuhde
ω	Kulmanopeus [rad/s]
P	Teho [W]
ρ	Ilman tiheys (1,2 kg/m ³)
t	Aika [s]
u	Tuulen nopeus [m/s]
v	Roottorin kehänopeus [m/s]

TEORIAOSA

2 TUULIVOIMA

2.1 Tuulen nopeus ja teho

Ilmaan pätevät klassisen mekaniikan lait, eli ilmakappaleen liike-energia on $\frac{1}{2}mu^2$. Tuuliroottorin tapauksessa ilman massa lasketaan roottorin sieppauspinta-alan läpi kulkevan ilman määrän mukaan siten, että ilmakappaleen massa $m = \rho uA$, kun ρ on ilman tiheys [kg/m^3], u on tuulen nopeus [m/s], t on aika [s] ja A on sieppauspinta-ala [m^2].

Sijoittamalla ilman massan kaava liike-energian kaavaan, saadaan johdetuksi kaava tuulen liike-energialle, ja kun tämä jaetaan ajalla t , saadaan tuulen teho.

$$P_{\text{teoreettinen}} = \frac{1}{2}\rho Au^3 \quad \text{Kaava 1}$$

Tuulen teho riippuu tuulen nopeuden kolmannesta potenssista. Tuulen nopeuden esimerkiksi kaksinkertaistuksessa nousee teho täten kahdeksankertaiseksi. Tästä seuraa, että pienetkin muutokset tuulen nopeudessa aikaansaavat ratkaisevia muutoksia tuulen tehossa. Koska *kuutioiden keskiarvo* on aina enemmän kuin *keskiarvon kuutio*, on tuulen nopeuksien jakauma tunnettava niin ajan kuin mittauspaikankin funktiona. Maanpinnan karkeudesta, ympäröivästä kasvullisuudesta ja topografiasta riippuen tuulen teho voi vaihdella moninkertaisesti. Mittauspisteen korkeus ja maanpinnan karkeus (kasvullisuus ym.) vaikuttavat tuulen nopeuteen kaavan 2 mukaisesti.

$$u_1/u_2 = (h_1/h_2)^\alpha \quad \text{Kaava 2}$$

Kaavan u_1 ja u_2 ovat tuulen nopeudet [m/s] ja h_1 sekä h_2 korkeudet [m], joilla nämä tuulen nopeudet on mitattu. Kerroin α on maanpinnan karkeuskerroin, joka vaihtelee pääosin välillä 0,10 – 0,25. Mittauspisteen nostaminen 10 metristä 50 metrin korkeuteen kasvattaa siis tuulen nopeutta 20 % - 50 %. Edelleen on muistettava, että tuulen *teho* kasvaa nopeuden kolmannessa potenssissa, eli tehonlisäys olisi 70 % - 240 %.

Mm. U.S. Department of Energy käyttää laskelmissaan karkeusvakion arviota $\alpha = 1/7 \approx 0,14$ joka pätee hyvin tasaisille, matalan kasvullisuuden peittämille aloille. Viljelysmaille, kuten maissiviljelmille, suositellaan vakiota 1/5 (0,2). Tämän tutkimuksen kokeellisessa osassa osoitetaan hieman yllättävästi kuitenkin, että noin kolmimetrisen joentörmän reunalla vakio nousee niinkin korkeaksi kuin $\alpha \approx 1/3$. Tällöin voidaan sanoa, ettei metrin korkeudella tuule tehollisessa mielessä lainkaan vaikka 4 m:n korkeudella tuulisi 10 m/s.

(AWEA 1998, Gipe 1993)

2.2 Tuulivoimalan hyötysuhde

Tuuliroottorin hyötysuhteella tarkoitetaan yleensä tuulen kineettisen tehon ja roottorilta saatavan mekaanisen tehon suhdetta $\eta = P_{\text{hyöty}} / P_{\text{teoreettinen}}$ (hyötysuhdetta merkitään myös myös C_p , *coefficient of power*). Hyötysuhteet ovat alhaisia, sillä tuulen liike-energian muuntaminen mekaaniseksi on vaikeaa. Hyötysuhteeltaan 100 %:n roottori olisi laite, joka pysäyttäisi roottoriin osuvan ilmamassan kokonaan. Tuuliroottoreiden hyötysuhteet ovat yleensä luokkaa 10 – 40 %, itserakennettujen pienroottoreiden joskus vielä tätäkin pienempiä. Alhaiset hyötysuhteet johtuvat mm. roottoreiden optimaaluideiden kapeudesta ja tuulen pyörteisyydestä, sillä teoreettiset laskelmat olettavat virtauksen laminaariksi ja tasaiseksi. Saksalaisen Albert Betzin laskemaa teoreettista maksimia 59,3 % kutsutaan *Betzin vakioksi*, joka perustuu ilmamassan jarruttamiseen sopivasi siten, että roottorin läpi kulkenut ilmamassa pääsee pois sisääntulevan virtauksen tieltä. (Gipe 1993)

Tuuliroottorin hyötysuhde ilmoitetaan usein maksimiarvona, joka romahtaa, kun roottori joutuu toimimaan optimaalisen tuulen nopeuden ulkopuolella (Kuva 3 sivulla 10). Nyrkkisääntönä esitetään, että laskettaessa roottorin tehoa *valitulla optimituulella* käytetään esitettyä kolmannen potenssin kaavaa. Kun taas laskettaaan roottorin tehoa *jollain muulla tuulen nopeudella*, voidaan tuulen lisääntymisen laskea vaikuttavan tehoon vain lineaarisesti tai toisessa potenssissa, sillä roottorin hyötysuhde laskee kun tuulen nopeus etääntyy kyseisen roottorin optimipisteestä. (Gipe 1993)

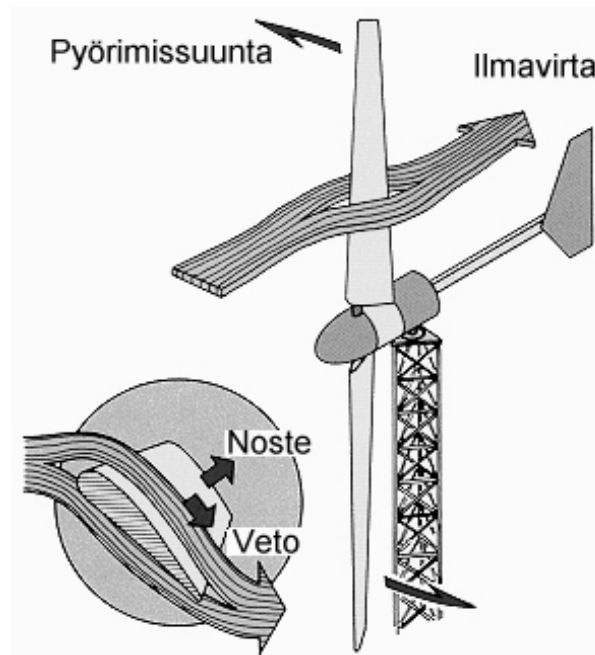
Hyötysuhde on roottorin paremmuuden mittariksi monella tapaa ongelmallinen. Yhden ja saman tuulivoimalan hyötysuhde voidaan esittää monella eri tavalla kuitenkin siten, ettei laitteen teho muutu miksiäkään. Ensimmäinen ongelma on *korkeus*, jolta mitatun tuulen nopeuden suhteen hyötysuhde ilmoitetaan. Tätä voidaan korjata mittaamalla tuuli profiilina koko roottorin alalta. Toinen ongelma on *tuulen keskiarvoistuminen*, jota tarkatkin mittarit väkisin aiheuttavat. Kun roottorille ilmoitetaan jokin tuulitunnelin tasaisessa virtauksessa mitattu hyötysuhde, saadaan tälle monien kymmenien prosenttien eroja kun siirrytään ulkoilman epätasaiseen tuuleen, ja on vaikeaa sanoa reagoiko roottori tuulenpuuskiin niiden nopeuksien vai tehollisten arvojen mukaan. On myös mahdollista, että roottorin hitauden seurauksena mittari havaitsee muutoksia, joihin roottori ei pysty reagoimaan. Kolmas ongelma on rajata, *mitä kaikkea roottorin tehoksi lasketaan*. Kun esimerkiksi roottori on aina laake-roitava, on ristiriitaisia käsityksiä siitä, kuuluuko laakereiden tehohäviö roottorin tuottamaan tehoon vai ei.

Tässä tutkimuksessa käsitellään järjestelmän *kokonaishyötysuhdetta*, eli mitataan tuulen nopeusprofiili koko roottorin alalta ja suhteutetaan se laitteen pumppaaman veden määrään. Siten kaikki kitkat ja häviöt voimansiirrossa ja pumppuissa ovat pois laitteen pumppaustehosta ja alentavat laitteen laskennallista hyötysuhdetta. Kokeellisessa osassa tehdään karkea pyörimisen hidastumiskoe kitkojen ja virtausvastusten vaikutuksen arvioimiseksi.

2.3 Roottorityyppejä

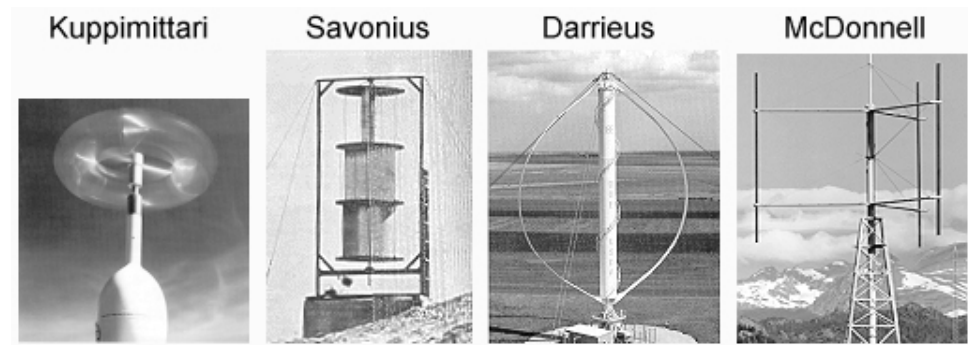
Tuuliroottorit voidaan luokitella pääosin kahdella eri tavalla. Aerodynamiikan perusteella roottorit jaetaan *nosteeseen* (lift) ja *vetoon* (drag) perustuviin laitteisiin. Orientaation perusteella roottorit ovat joko pystysuoria eli *vertikaalisia* (vertical axis) tai vaakasuoria eli *horisontaalisia* (horizontal axis).

Nostetta hyödyntävät roottorit perustuvat lentokoneen siiven tavalla muotoiltuihin, aerodynaamisiin siipiin. Ilmavirrassa siiven pintojen välille muodostuu paine-ero. Vetoon perustuva siipi on suurempi ja leveämpi ja sen toiminta perustuu siihen, että tuuli painaa vasten kappaleen pintaa ja vetää sitä mukaansa. Käytännössä jokainen roottori reagoi jonkinlaiseen yhdistelmään nostetta ja vetoa (Kuva 1). (Gipe 1993)



Kuva 1. Noste ja veto siiven pinnoilla (Eggleston 1998).

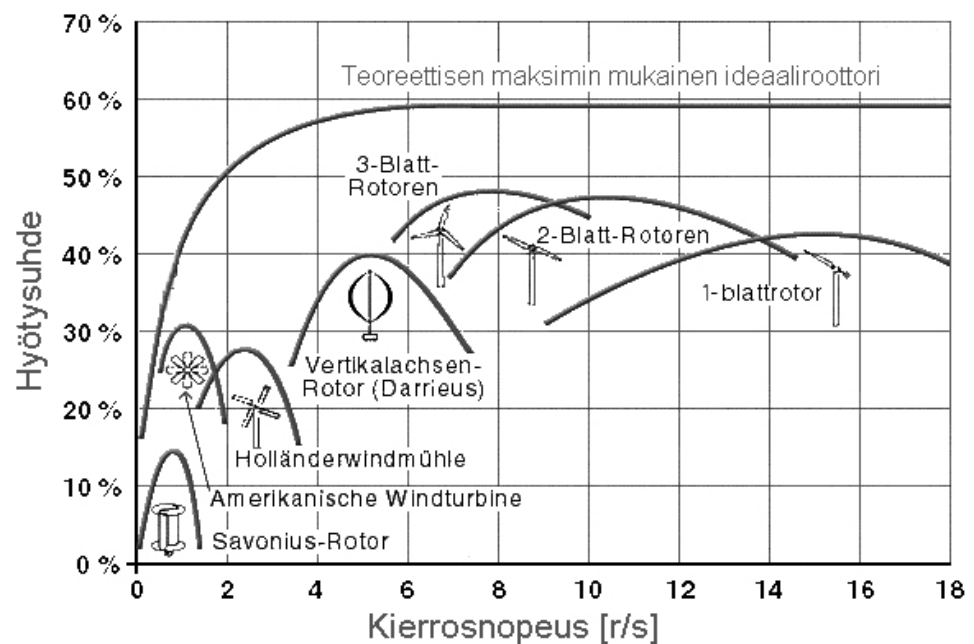
Vaakasuora potkuri (Kuva 1) on suurelle yleisölle tuttu laite. Sen sijaan vertikaaliset ovat melko tuntemattomia. Tuulen nopeuden mittaamiseen käytettävä kuppimittari (Kuva 2) on hyvä esimerkki vertikaalisesta, vetoon perustuvasta roottorista. Nosteeseen perustuvista vertikaalisista roottoreista tunnetuin on *Darrieus*-roottori, jonka ns. munavatkainmallin lisäksi mm. McDonnell Gyromill on valmistanut suorasiipistä versiota. *Darrieus*-roottorit eivät ole itsekäynnistyviä, vaan vaativat liikkeellepanomootorin. *Savonius*-roottori (jatkossa myös *S*-roottori) on suomalainen patentti 1920-luvulta. *S*-roottori yhdistää vedon ja nosteen vaikutuksia siipien välissä olevan läpisyöttöraon ansiosta. *S*-roottorin hyötysuhde mutta myös kierrosnopeus ovat alhaiset, joten roottorimallin sanotaan sopivan hyvin korkeaa vääntömomenttia vaativiin tehtäviin (Fraenkel 1986, Gipe 1993, Eggleston 1998). *Savonius*-roottoria esitellään tarkemmin kappaleessa 2.4.



Kuva 2. Vertikaalisia roottorityyppejä (Eggleston 1998)

Roottoria, joka pyydystää tuulen virtauksen tulosuunnasta riippumatta, kutsutaan *omnidirektionaaliseksi*. Matalat, horisontaaliset propellimallit eivät aina pysty orientoitumaan pyörteisen tuulen suunnanmuutoksiin kovin nopeasti, joten vain vertikaaliset roottorit luetaan täysin omnidirektionaalisiksi. (Gipe 1993)

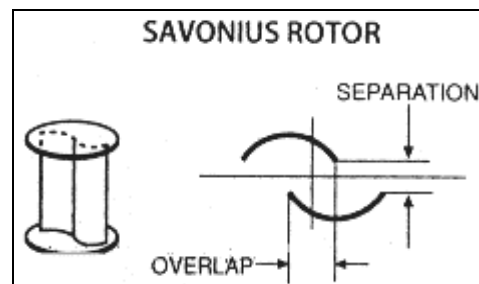
Erilaisia roottoreita vertailemalla on vaikea antaa yleispäteviä ohjeita niiden paremmuudesta. Lähes jokaiselle ratkaisulle on löydettävissä käyttökohde jonkin erityispiirteen ansiosta. Kaikista yksinkertaisimmat roottorit, kuten kuppimittari, jäävät hyötysuhteeltaan 1 – 2 %:iin. Tuulen tehon kolmannen potenssin säännön seurauksena tämä on toisinaan hyväksyttävää paikoissa, joissa tuulesta ei ole pulaa. (Gipe 1993)



Kuva 3. Eri roottorityyppien hyötysuhteita kierrosnopeuden suhteen. (Wasserstoff AG 2002)

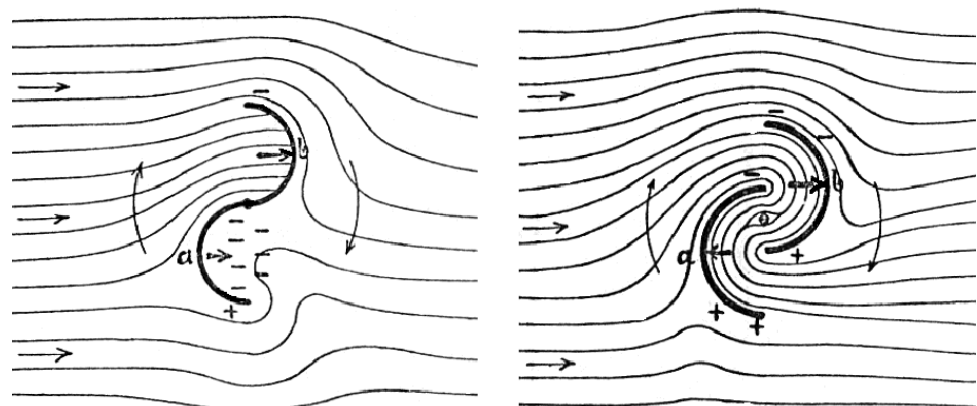
2.4 Savonius-roottorin periaate ja kehitys

Tässä luvussa esitellään tarkemmin suomalaisen keksijän Sigurd Savoniuksen vuonna 1924 patentoima Savonius-roottori, sillä monet lähteet suosittelvat roottoria veden pumppaamiseen (Savonius 1925, Fraenkel 1986, Modi ym. 1983, Gipe 1993). Se on pystysuoran akselin ympäri pyörivä, pääosin tuulen vetoon perustuva laite (Kuva 4). Roottorin pystysuorien kaarten keskellä on läpisyöttörako (*overlap*), josta ilmavirta kiertää roottorin toiselle puolelle, ja aiheuttaa “puhalluksen” vastatuuleen painautuvan kaaren taakse (Kuva 5) sekä poistaa alipaineen tämän kaaren sisältä (Savonius 1925, Ushiyama ja Nagai 1988). Roottori pystyy pyydystämään tuulen mistä suunnasta tahansa eli on omnidirektionaalinen. S-roottori ei ole hyötysuhteeltaan vaakasuorassa pyörivien potkurien veroinen, mutta on yksinkertaisuutensa ansiosta usein pienvoimialaa rakentavan valinta (Fraenkel 1986).



Kuva 4. Savonius-roottori (Gipe 1993).

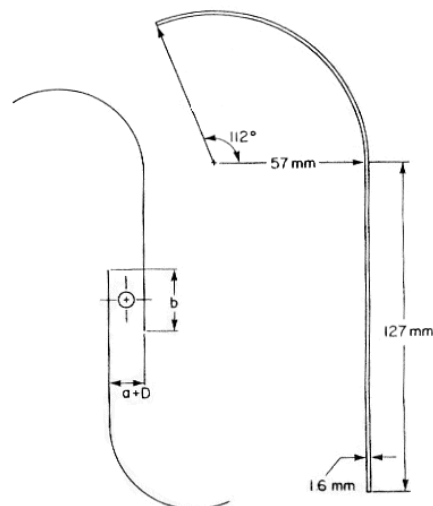
Savonius (1925) teki vedenpumppauskokeita roottorillaan ja sai aikaiseksi jopa 37 %:n pumppaushyötysuhteen kaksitoimisella mäntäpumpulla. Hän luetteli optimaalisesti muotoillun roottorin ominaisuudet: puolikaaren muotoiset siivet, 2 siipeä, läpisyöttöraon leveys $1/3 - 3/5$ roottorin halkaisijasta ja 20-30 % roottoria suuremmat päätylevyt. Savoniuksen optimistiset tulokset tyrmätään kuitenkin, ja esimerkiksi Modi ym. (1989) toteavat useaan 1970-luvun tutkimukseen viitaten, etteivät muut tutkijat ole vastaavien kokeiden perusteella voineet vahvistaa väitettyä tehokkuutta. Tuulivoimatutkimus vilkastui erityisesti 1970-luvun öljykriisin seurauksena, jolloin myös halpana mutta huonona pidettyä S-roottoria kehitettiin edelleen laajalla rintamalla (Modi 1983).



Kuva 5. Savonius-roottorin virtausperiaate (Savonius 1925).

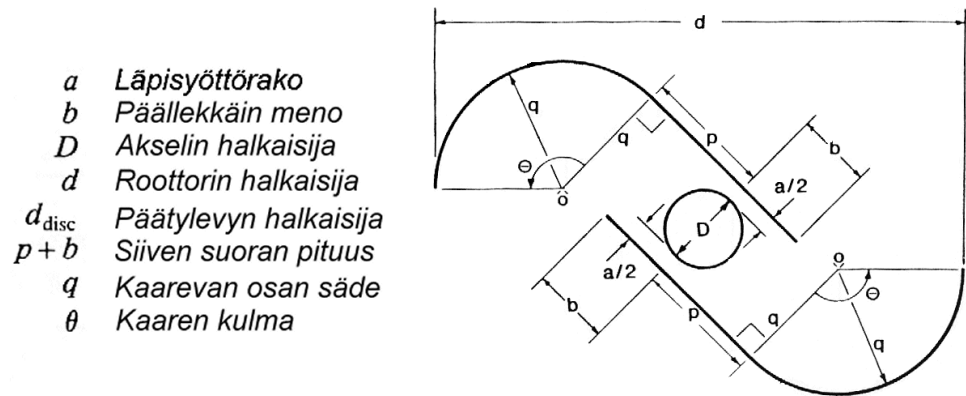
Ushiyama ja Nagai (1988) järjestivät tuulitunnelissa laajan koesarjan roottorin optimaalisen geometrian selvittämiseksi. Kokeissa muunneltiin mm. siipien läpisyöttörakoa (overlap), erotusta (separation), leveys-keruusuhdetta, päätylevyjen vaikutusta ja roottorielementtien pinoamista päällekkäin. Johtopäätöksinään he luettelevat seuraavaa: paras läpisyöttörako on 20–30 % roottorin halkaisijasta, kaartan kuljettaminen hieman keskeltä sisäkkäin parantaa hyötysuhdetta, ”lytistetty” Bach-tyyppinen kaarimalli (hieman kuten Kuva 4) on tehokkaampi ja päätylevyt parantavat tehokkuutta huomattavasti. Näillä asetuksilla he saavuttivat hyötysuhteen huipun n. 23 %, jolloin tuulen nopeus oli 6 m/s ja roottorin kehänopeus n. 85 % tuulen nopeudesta.

Modi ym. (1983) kokeilivat niinkään tuulitunnelissa erilaisia siipimalleja, ja varioi siiven muotoa uudella tavalla. Siiven ulkoreunan kaaren sädettä ja kulmaa muutettiin ja keskelle lisättiin suora ”tunneli” läpivirtausta varten. Tämä ratkaisu sopii Ushiyaman ja Nagain (1988) tulokseen sisäkkäin asetetuista kaarista. Parhaalla geometriallaan Modi ym. yltyivät 24 %:n hyötysuhteeseen tuulen nopeudella 12,2 m/s, alhaisemmillä nopeuksilla (8,9-10 m/s) hyötysuhde jäi n. 15-20 %:iin.



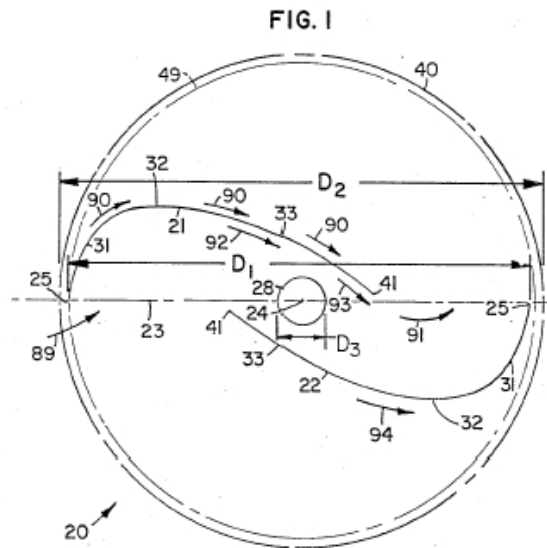
Kuva 6. Modin ym. 1983 muotoilema Savonius-roottorin siipigeometria.

Myöhemmin Modi ja Fernando (1989) jatkoivat kokeita ja laativat empiirisen mallin roottorin geometrysten parametrien vaikutuksille ja lisäsivät samalla siiven muotoon vaikuttavien parametrien lukumäärää (Kuva 7). Eri geometrioiden tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään, mutta parhaan roottorin hyötysuhdetta on vaikea tulkita, sillä kokeissa ei onnistuttu poissulkemaan tuulitunnelin ”tukkeutumista” (blockage), eli mitä suurempi roottori oli tunnelin poikkileikkaukseen nähden, sitä suuremmaksi kasvoi hyötysuhde. Joka tapauksessa roottorin tuuli-mekaaninen hyötysuhde oli yli 30 %, noin 110 %:n kehänopeussuhteella ja laakerikitkalla korjatuilla tuloksilla. Kokeissa kävi myös ilmi, että kuulalaakereiden kitka vaikutti hyötysuhteeseen alhaisilla tuulen nopeuksilla huomattavasti korkeita nopeuksia enemmän siten, että nopeuden laskiessa 6,76 m/s:sta 4,4 m/s:iin hyötysuhde laski 30 %:sta noin 23 %:iin.



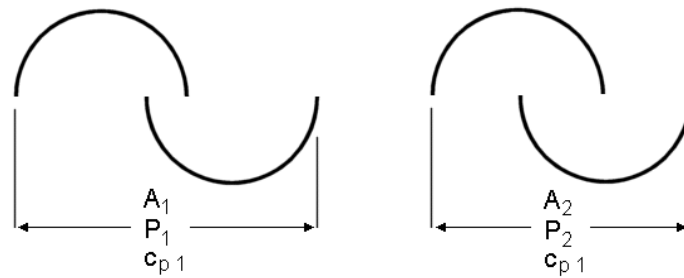
Kuva 7. Modin ja Fernandon 1989 muotoilema Savonius-roottorin siipigeometria.

Samana vuonna Benesh (1989) haki patentin kahdelle yhteenliitetylle Savonius-tyyppiselle roottorille, niiden geometrialle (Kuva 8) ja voimansiirrolle. Kaarimalli muistuttaa paljon Modin (1989) kaarimallia sillä erotuksella, että Beneshin ristiin kulkevat siipiosat ovat myös loivasti kaarevia ja kaaren ulkosyrjän muoto on 15° vino $1:0,66$ ellipsi. Parametrit ovat lähellä Modin edellämäinittuja. Patenti ei sisällä testituloksia roottorin suorituskyvystä, mutta patenti haettiin moneen maahan (mm. USA, Britannia, Japani, Australia, Ranska, Saksa).



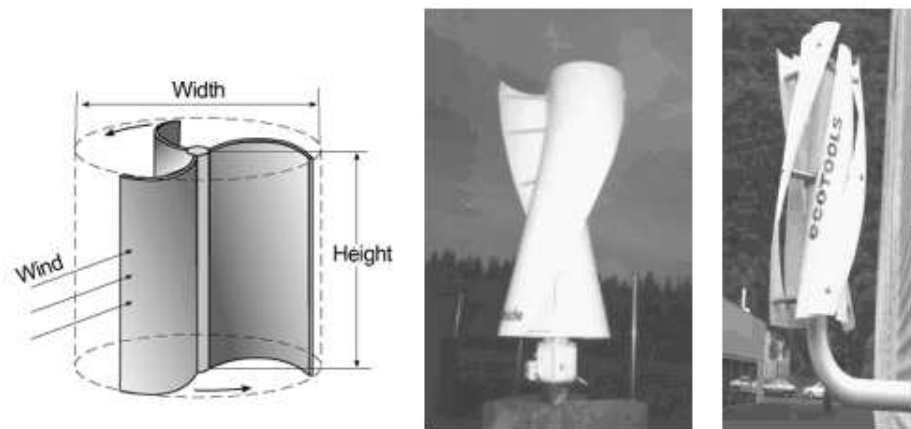
Kuva 8. US4830570 patentin mukainen Savonius-Roottorin geometria. (Benesh 1989)

Savonius-roottorin kohdalla hyötysuhteen arvoon keskittyminen ei ole niinkään mielekästä kuin muiden roottorityyppien tapauksissa. Eräässä tämän tutkimuksen vaiheessa yritettiin tavoitteisiin verrattuna alhaista hyötysuhdetta parantaa suurentamalla roottorin lämpisyöttöraon leveyttä. Tällöin huomattiin että vaikka saavutettu teho muuttui, pysyi hyötysuhde melko vakiona. Tämä johtui siitä, että kun siipiä kuljetettiin ristiin, pieneni roottorin sieppauspinta-ala samalla, ja alentunut teho jaettiin pienemmälle alalle (Kuva 9). On luonnollisesti järkevää optimoida tietyllä siipikaarella saatava teho eikä vain tuijottaa sieppausalan mukaan laskettua hyötysuhdetta.



Kuva 9. Pinta-alan, tehon ja hyötysuhteen muutos kun siipikaaria kuljetetaan ristiin.

On myös syytä mainita tässä, etteivät kaikki vertikaaliset kaaret ole Savonius-roottoreita. Esimerkiksi roottori, jossa on kahden sijaan jokin muu lukumäärä siipiä, tai jos roottorissa ei ole läpisyöttörakoa siipikaarien välissä (Kuva 10), ei se ole S-roottori. Läpisyöttöraottoman, vain vetoon perustuvan roottorin hyötysuhde ei voi ylittää 2-3 %:a. Pihtiputaalla toimiva OY Windside Production Ltd valmistaa paljon S-roottoria muistuttavia kierteisiä roottoreita, mutta siipiä on muotoiltu juuri saman valmistajan erikoiseen suoraveto-generaattoriin sopiviksi, eikä valmistaja halua kutsua tätä yhdistelmää Savonius-roottoriksi vaan Windside-roottoriksi. Roottori on myös moninkertaisesti S-roottorin hintainen (Windside 2000). Myös muita muunnelmia S-roottorista on laadittu, kuten erittäin korkeisiin tuulen nopeuksiin mutta matalaan vääntömomenttiin tarkoitettu monisiipinen Ecotools Wind-Rose, jonka kaaret eivät kulje lainkaan ristiin (Ecotools 2002).



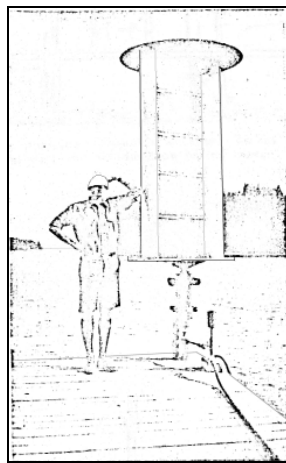
Kuva 10. Vertikaalisia roottoreita, jotka eivät ole Savonius-roottoreita (AWEA 1998, Windside 2000, Ecotools 2002).

2.5 Vedenpumppaustuloksia Savonius-roottoreilla

Yleensä, kun Savonius-roottori esitellään kirjallisuudessa, mainitaan sen olevan vanha ratkaisu, joka kuitenkin soveltuu esim. veden pumppaamiseen (mm. AWEA 1998). Modi ym. (1983) tutkikin roottorin geometriaa osana indonesialaista kasteluprojektia, ja muutkin tutkijat usein nostavat S-roottorin esille käsiteltäessä kehitysmaiden vedenpumppausroottoreita (mm. Fraenkel 1986). Kehitysmaita ja Suomen maataloutta yhdistää vedenpumppauksen ta-

pauksessa kolme kriteeriä; roottorin halpa hinta, yksinkertainen rakenne ja huoltovapaus.

Savonius-roottori ei ryntää, millä tarkoitetaan roottorin äkillistä tempaisua ylikierroksille puuskassa. Tämä johtuu siitä, että roottorin kehänopeus riippuu tuulen nopeudesta lineaarisesti ja roottorilla on massahitautta. Potkureiden kehänopeudet saattavat nousta moninkertaisiksi tuulen nopeuteen verrattuna, mutta koska Savonius-roottori perustuu ensisijaisesti vetoon eikä nosteseen, ei sen kehänopeussuhde (ulkokehän nopeus suhteessa tuulen nopeuteen) nouse juuri yli 1,3:n. Fraenkel (1986) kritisoi Savonius-roottoria vaikeasti jarrutettavaksi, mutta tämä ei ole suuri ongelma vedenpumpppauksessa, sillä päinvastoin kuin sähkögeneraattorissa, kasvaa veden pumppausvastus kierrosten noustessa. Siten S-roottori on helppo mitoittaa pumpun kanssa suoravetoiseksi, jolloin vaihteistoa ei tarvita.



Kuva 11. Sigurd Savonius ja roottori laiturilla (Savonius 1925).

Kuten jo aiemmin todettiin, ilmoitti Savonius (1925) huikeita, yli 30 %:n pumppaushyötysuhteita kokeistaan, joissa pumpattiin kaksitoimisella mäntäpumpulla vettä 15 metrin korkeudelle. Se, etteivät muut tutkijat ole onnistuneet toistamaan näitä kokeita saattaa hyvin selittyä Savoniuksen tuulimittarista, jota hän ei dokumentoi. Mikäli hänen mittarinsa on ollut voimakkaasti keskiarvoistava, on mittauksissa saatu pitemmän ajan lineaarinen keskiarvo, eikä mittalukema ole ottanut huomioon sitä, että roottori on saanut osakseen tehollisessa mielessä huomattavasti suuremman määrän tuulta, tuulen tehon riippuessa nopeuden kolmannesta potenssista. Seuraavassa luvussa esiteltävän Rayleigh-tuulijakauman mukaan laskettuna epätasaisen tuulen keskiarvoistaminen voi aiheuttaa laskennallisen hyötysuhteen jopa 1,7-kertaistumisen.

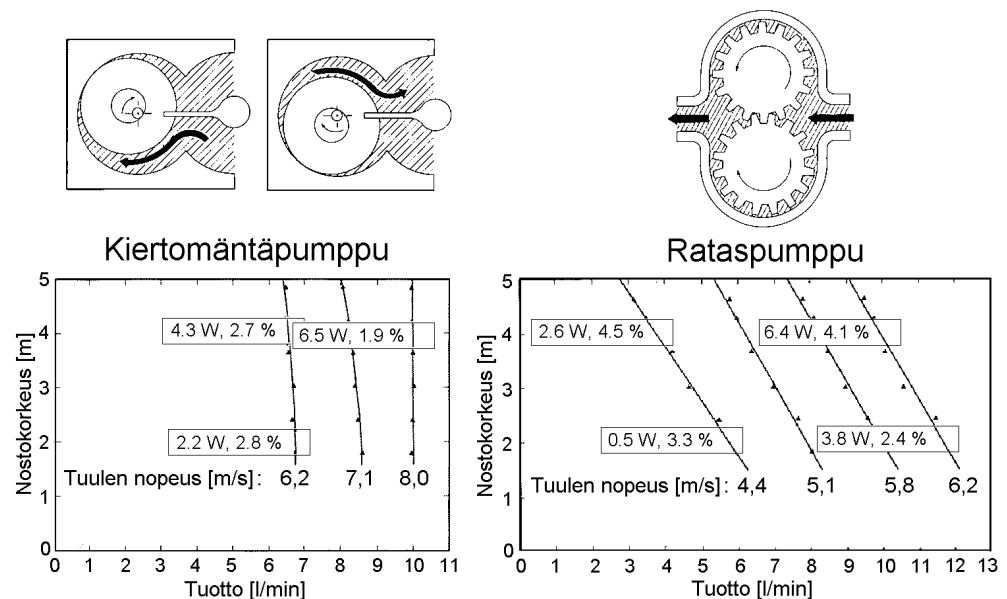
Savoniuksen (1925) lisäksi on vaikea löytää kyseisellä roottorilla tehtyjä veden pumppauskokeita. Mganilwa (2002) on rakentanut Savonius-roottorin pingotetusta purjekankaasta ja saanut tuulitunnelissa roottorilleen 8,9 %:n hyötysuhteen. Raportti ilmoittaa muutamia, tarkemmin määrittelemättömällä kalvopumpulla saatuja vedentuottotuloksia, joista on seuraavassa taulukossa (Taulukko 1) laskettu pumppaushyötysuhteet; keskimäärin noin 4 %. Tällöin vain 45 % roottorin tehosta on saatu pumppaustehoksi.

Taulukko 1. Mganilwan (2002) pumppaustuloksia tuulitunnelissa pienellä kalvopumpulla sekä niistä laskettuja kokonaishyötysuhteita.

Nostokorkeus = 1,75 m
 Roottori 0,6 x 0,9 m = 0,54 m²

Tuulen nopeus [m/s]	P _{tuuli} [W]	Tuotto [l/min]	P _{pump} [W]	Hyötysuhde %
7,00	111,13	15	4,2919	3,86 %
8,00	165,89	25	7,1531	4,31 %
8,80	220,80	30	8,5838	3,89 %
9,25	256,43	33	9,4421	3,68 %
9,60	286,65	36	10,301	3,59 %

Modi ym. (1983), joka sai jo aiemmin mainituissa kokeissaan roottorigeometrialleen jopa 24 %:n hyötysuhteen, kytki 1,2 m²:n S-roottoriinsa sekä kiertomäntä- että rataspumpun ja raportoi nostokorkeuden käyttäytymisen vedentuoton suhteen eri tuulen nopeuksilla – jälleen tuulitunnelissa (Kuva 12). Kun kuvaajista lasketaan pumppaushyötysuhteita kuten Mganilwan (2002) kokeista, saadaan tuloksiksi 1,9-4,5 %, joita Modi hieman yllättäen kuvaa sanoin ”in spite of large frictional and fluid dynamic losses [...] indeed encouraging”. Noin 10 % roottorin tehosta siis saatiin valjastetuksi vedennostoon ja alle 10 m/s tuulessa roottorilla kerrotaan olleen taipumusta pysähdellä.



Kuva 12. Modi ym. (1983) pumppaustuloksia 1,2 m² S-roottorilla sekä muutama laskettu pumppausteho ja hyötysuhde.

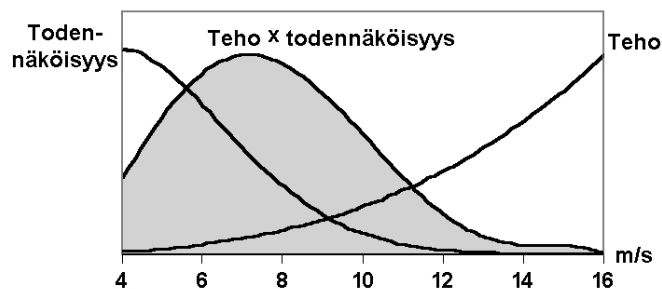
2.6 Tuulisuus Suomessa

Ohjeellisesti voidaan sanoa, että tuulivoiman hyödyntämisen voi kannattaa, jos alueellinen tuulen keskinopeus on 6 m/s tai enemmän. Vastaavasti tilanne on toivoton, jos keskinopeus on alle 4 m/s (Gipe 1993). Tämä perustuu käytännön kokemukseen siitä, että näin alhaisilla tuulen nopeuksilla on roottorin oltava järkevän tehon saavuttamiseksi kohtuuttoman suuri.

Vuorokausivaihtelu saa aikaan sekä paikallisia että laajamittaisia lämpötilaeroja. Näiden lämpötilaerojen aikaansaamat ilmanpaine-erot ovat merkittävimmät tuulta synnyttävät tekijät. Toisaalta tuulen nopeuteen tietyssä pisteessä vaikuttavat mm. aika ja pinta-ala joilla tuuli saa esteettä yltyä. Esimerkiksi suurten järvien ja merten rannat ovat siten otollisia paikkoja tuulivoiman hyödyntämiseksi. Rinteillä vuorokausirytmii aikaansaa kaksi kertaa vuorokaudessa suuntaa vaihtavia rinne-laakso-tuulia; lämmin ilmavirta nousee laaksosta ylös yöaikaan ja palaa takaisin päivän mittaan. Rinteen yli puhaltavan tuulen nopeus – vaikka hiljaisenkin – kasvaa huomasti ylärinteessä, sillä ilmassa joutuu maaston noustessa kulkemaan pitkin kapeampaa väylää kuin esteettömässä tilassa. Tuulen nopeus saattaa tällöin nousta kaksinkertaiseksi vuoren tai harjun huipulle noustaessa, mutta ilma puolestaan ohenee vuorten ylärinteillä. Joet ja rantaviivat pyrkivät kääntämään tuulta rannan suuntaiseksi. Aivan omia lukujaan tuulten käyttäytymiseen lisäävät mm. puuskat, pyörteet, pystysuuntaiset ilmavirtaukset ja sateet. (Gipe 1993)

Koska tuulen teho kasvaa tuulen nopeuden kolmannessa potenssissa, on tuulisuuden vaikutus saatavaan tehoon vielä monimutkaisempi. Tämä johtuu seuraavasta: tuulen nopeuksien *kuutioiden keskiarvo* on aina suurempi kuin *keskiarvon kuutio*. Tästä tosiasiasta seuraa, ettei tuulen keskiarvon tunteminen riitä; on tunnettava myös tuulten eri nopeuksien jakauma. Jakauman määrittelyyn on onneksi olemassa approksimaalisia taulukoita, kuten Rayleigh Wind Speed Distribution (liite 1), joka antaa esiintymistodennäköisyydet tuulen eri nopeuksille tuulen nopeuden annetulla keskiarvolla. (Gipe 1993)

Kun yhdistetään edellämainitut ilmiöt, eli tuulen tehon ja esiintymistodennäköisyyden käyttäytyminen, voidaan hahmotella tuulen eri nopeuksien merkityksellisyys käytännön hyödyntämisen kannalta. Kuva 13 osoittaa, miten tuulen teho, esiintymistodennäköisyys ja näiden tulo käyttäytyvät esimerkiksi valitulla tuulen keskinopeudella 4,5 m/s. Kuvasta nähdään, että oleellinen tuuli-alue on välillä 4-10 m/s.



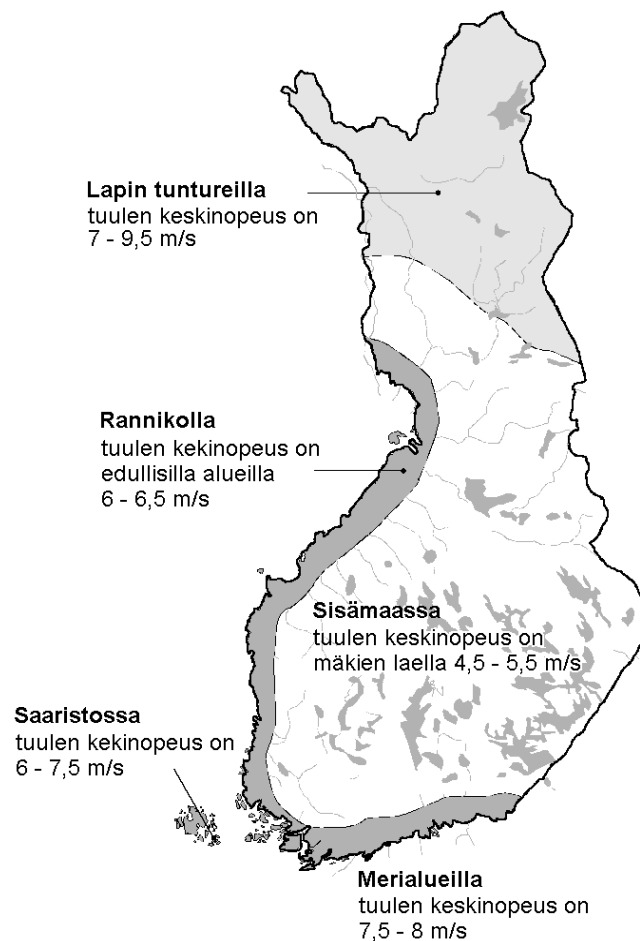
Kuva 13. Tuulen nopeuden esiintymistodennäköisyys, teho ja näiden tulo keskituulella 4,5 m/s.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. on yhdessä VTT Energian kanssa laatinut tiedotteen, joka sisältää tuulivoimaprojektin suunnitteluun liittyviä perustietoja. Tiedotteessa on Ilmatieteenlaitoksen tietoihin perustuva, ohjeellinen taulukko tuulen keskinopeudesta eri puolilla Suomea 30 metrin korkeudella (STVY 2001). Taulukko 2 sisältää nämä lukuarvot muunnettuna tuulen nopeuksiksi 3 m:n korkeudella käyttäen maanpinnan karkeusvakiota $\alpha = 1/6$ (kaava 2). Näiden parametrien valintaa perustellaan tarkemmin luvussa 4.2

Taulukko 2. Tuulen keskinopeus 3 m korkeudella eri maastotyypeillä maanpinnan karkeusvakiolla $\alpha = 1/6$.

	Sisä-Suomi	Rannikkoseutu	Ulkosaaristo
Metsäinen maasto	2,4 - 3,1	3,1 - 3,4	3,4 - 3,7
Avoin tasainen alue	3,4 - 3,7	3,7 - 4,1	4,1 - 4,4
Meren ranta	-	3,7 - 4,4	4,4 - 4,8
Saaristo	3,4 - 3,7	3,4 - 4,8	4,1 - 5,4
Suuret järvien selät	3,1 - 4,4	-	-
Korkeat mäet	3,4 - 4,8	(3,7 - 5,1)	-

Kuva 14 on niinkään Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n ja Energia-Ekonon laatima kartta tuulienergian potentiaalista Suomessa. Lähteessä ei ilmoiteta arvojen mittauskorkeutta. (STVY 2001)



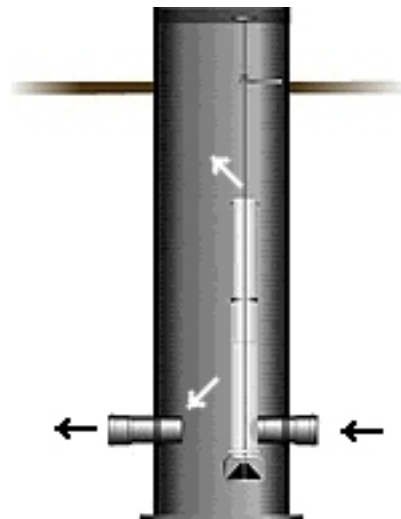
Kuva 14. Tuuliolosuhteet eri osissa Suomea (STVY 2001).

3 SALAOJAKASTELU

3.1 Salaojakastelun periaate

Salaojakastelu ja säättösalaojitus esiintyvät aina yhdessä, sillä ilman säättökaivoja salaojastoon pumpattu vesi valuisi saman tien pellostä pois. Siksi säättösalaojitus esitellään ensin. Säättösalaojituksen tarkoituksena on tasoittaa pelton vesitaloutta sekä vähentää kastelutarvetta ja pellosta tapahtuvaa veden haitallista poistovirtausta. Menetelmän periaatteena on pitää säättöjärjestelmän avulla pohjaveden taso niin ylhäällä, kuin se viljelyn kannalta on mahdollista. Runsaiden sateiden sekä sadonkorjuun ja kevättöiden alla ojasto säädetään taas toimimaan täydellä teholla. (KM 1994)

Kun kokoojajiin asennetaan säättösalaojitus suunnitelman mukaisesti ns. säättökaivoja sopivin välimatkoin, voidaan näistä kaivoista padota ja säätää pelton vedenpintaa. Veden ohivalunta kaivon ympäri estetään asentamalla sekä kaivon tulo- että lähtöputken n. 3 m:n matkalle umpiputki. Säättökaivon poistoputken suun korkeutta säätämällä saadaan säädetyksi pohjaveden korkeus pellossa, tosin tietyllä viiveellä.



Kuva 15. Säättökaivo (KWH Pipe 2002).

Maan pinnan kaltevuus määrää säättökaivojen tiheyden. Pohjaveden pinta pyritään porrastamaan kaivoilla mahdollisimman tasaiseksi samalle syvyydelle, mistä seuraa, että kaltevilla mailla kaivoja on oltava tiheässä. Mitään nyrkkisääntöä pohjaveden portaiden korkeuseroista ei ole, sillä asiaan vaikuttavat mm. maan vedenjohtokyky, viljeltävä kasvi, kustannuskysymykset jne. Säättöojitukselle on eduksi, jos pohjaveden pinta on luonnostaan korkea tai maan vettä läpäisemätön kerros on lähellä maan pintaa. Edellä mainituista kaivojen tiheyteen vaikuttavista tekijöistä riippuen jo salaojitetun lohkon muuttaminen säättösalaojitetuksi maksaa noin 160-830 €/ha (1.000-5.000 mk/ha). (KM 1994, Viljakainen ym. 1995).

Koska säättösalaojitus toimii parhaiten mailla, joiden pintakerros on helposti vettä läpäisevä, on menetelmä vaikea ja kallis savella. Savimaalla ojaston on

oltava tiheämpi ja maa reagoi säätötoimenpiteisiin hitaammin kuin vettä läpäisevillä hiekka- ja hietamailla. Tasaisilla alueilla voidaan uusissa salaojituksissa säätää yhdellä säätökaivolla keskimäärin hehtaarin alue. Silloin, kun pellon kaltevuussuhteen voi ottaa huomioon säätöojitusta varten jo suunnitteluvaiheessa, säätökaivojen tarve on pienempi kuin säätöojitusta vanhoihin salaojituksiin rakennettaessa (Peltomaa 2000).

Pellon hydrotekniset kuivatusratkaisut voidaan luokitella vaikutusmahdollisuuksiltaan seuraavasti:

Avo-ojasto	- vain kuivatukseen, voidaan tosin padottaa
Salaojasto	- vain kuivatukseen, mutta avo-ojastoa tehokkaampi
Säätösalaajasto	- kuivatusta voidaan hidastaa tai pysäyttää
Salaojakastelu	- ojastolla voidaan sekä kuivattaa että kastella
Valumaveden kierrätys	- pellostä poistuva vesi käytetään salaojakasteluun

Alun perin kuivatukseen tarkoitettujen salaojien kuivattavat peltoa myös vedenalaisina, eli vaikka ojaston juoksuaukkokin olisi veden alla, kun vain pellon pohjaveden pinta on ojan pintaa ylempänä. Kun avo-ojan vedenpinta sen sijaan esim. padotuksen seurauksena nostetaan pellon pohjavettä ylemmäksi, alkaa vesi virrata salaojastoa pitkin peltoon päin.

Sekä salaoja- että padotuskastelu perustuvat siihen, että pohjaveden pinnan korkeus maassa on suunnilleen sama kuin veden pinnan korkeus olisi avo-ojassa. Tämä pitää kuitenkin paikkansa vain osittain, sillä käytännössä pohjavedellä on liikkeissään maassa niin paljon hitautta, etteivät kaivon veden ja pohjaveden pintojen korkeudet aina täsmää. On kyse sitten kuivatuksesta tai kastelusta, on pohjaveden korkeus lähempänä tavoitetta salaojaputken läheisyydessä ja tavoitteesta kauimpana imuojien puolella välissä.

Padotuskastelua tehokkaampiin säätötoimenpiteisiin päästään pumpun avulla tapahtuvalla salaojakastelulla, koska ojaston vedenpainetta voidaan kasvattaa riippumatta avo-ojaston vedenpinnan korkeudesta. Kuvitteellinen veden pinta ojassa voidaan nostaa useita metrejä pellon pinnan yläpuolelle, jolloin veden virtaus peltoon on nopeampaa kuin vain padottamalla – ja voihan olla, ettei ojastossa edes ole mitään padottavaa. Vettä voidaan haluttaessa pumpata joko imuojien latvoille tai säätöojaston ylimpään lohkokon.

Valumavesien kierrätyksessä varastoidaan peltoalueelta tulevat valumavedet hyödynnettäväksi uudelleen kasvien kasteluvetenä. Näin vähennetään vesistöihin huuhtoutuvien ravinteiden määrää. Kierrätys edellyttää varastoallasta, josta sinne kerätty valumavesi johdetaan kuivana kautena takaisin pellolle kasteluveteeksi. Kastelujärjestelmänä voidaan käyttää vain säätösalaajitusta tai säätökastelua. (Peltomaa 2000)

Jotta salaojakastelu olisi kannattavaa, on pellon *kaltevuuden* ja maan *vedenjohtavuuden* oltava sopivat. Pellon kaltevuus saa säätösalaajituksen toimivuuden kannalta olla maksimissaan n. 3 %. Vastaava raja-arvo salaojakastelulle on 1 % (Ewans ja Skaggs 1989). Maan hydraulisen johtavuuden K_s on salaojakastelun onnistumiseksi oltava Ewansin ja Skaggin mukaan yli 45 cm/vrk. Luku tarkoittaa ilmeisesti kyllästämättömän maan johtavuutta. Pienemmillä

K_s arvoilla maan kapillaarinen vedennostokyky ei nosta vettä juuristovyöhykkeelle niin paljoa, että salaojakastelu kannattaisi (Vakkilainen 1982).

Maalaji rajoittaa salaojakastelua, sillä maan hiukkaskoko ratkaisee veden nostokorkeuden. Hieno hiekka (hiukkasten koko 0,2-0,6 mm) ja sitä karkeammat maalajit pystyvät nostamaan vettä vain korkeintaan 30 cm. Karkea hieta (0,06-0,2 mm) ja sitä hienommat maat pystyvät nostamaan vettä yli 30 cm:stä aina 30 metrin syvyydestä asti (Korkman 1971). Toisaalta, mitä syvemmältä kapillaarit imevät vettä, sitä hitaampaa on veden virtaus. Sikäli hieno hieta on salaojakastelulle ihanteellinen maalaji, sillä se sekä nostaa vettä 100-300 cm:n syvyydeltä, jolle syvyydelle salaojat sijoittuvat, että kykenee kelpvolliseen vedenjohtavuuteen.

Maan *vettä läpäisemättömän kerroksen* tulee olla 3-8 m:n syvyydessä. Mitä lähempänä pellon pintaa tämä kerros on, sitä pienempi on salaojastoon pumpatun veden virtaus alaspäin. Kerros on yleensä syvyydellä 2-10 m (Ewans ja Skaggs 1989, KM 1994). He esittävät myös vaatimuksen kokoojaojan juoksuputken riittävälle korkeudelle, mutta heidän asettamansa raja, vähintään 1 m pellon pinnasta täyttyy lähes kaikilla Suomen salaojitetuilla pelloilla. *Ojavälin* on oltava maalajista riippuen luokkaa 10-15 m (Holma 1995), jotta pohjaveden pinnan tasaisuus olisi säättötoimenpiteiden seurauksena riittävän hyvä, eikä salaojakastelu aiheuttaisi salaojien kohdille poikkeavaa kasvustoa, ts. sadon epätasaisuutta.

3.2 Salaojakastelun hyödyt

Vesitalouden säädön ensisijaiset vaikutukset näkyvät *sadon laadussa* ja tasaisuudessa sekä pellon ja vesistön *ravinnetaloudessa*, mutta myös *satotason* nousee oikein käytetyn säätelyn seurauksena.

Vesitalouden säätö vaikuttaa lannoitteiden huuhtoutumiseen kahdella tavalla. Yhtäältä pellon kokonaisvalunta ja sitä kautta typen huuhtouma vähenevät säätöojaston ansiosta. Toisaalta kasvit pystyvät kastelun seurauksena käyttämään lannoitteet tehokkaasti hyväkseen koska kasvu ei kärsi kuivuudesta (Paasonen-Kivekäs 1998). Amerikkalaisen tutkimuksen mukaan menetelmä vähentää myös fosforin ja kasvinsuojeluaineiden huuhtoutumista (KM 1994). Kun salaojitetun perunapellon huuhtoumaksi oletetaan noin 20 kg/ha/vuosi, oletetaan salaojakastelun vähentävän typpihuuhtoumia Suomen olosuhteissa 5-30 %. Pellon kosteuden nostaminen aikaansaa denitrifikaatiota, jolloin typi haihtuu ilmaan eikä kulkeudu vesistöön (Haataja 2000). Toisaalta tietyissä sää- ja padotusolosuhteissa salaojakastelu voi lisätä valuntaa, sillä pellon kuivavara ja siten myös puskurikapasiteetti on usein rankkasateen yllättäessä kastelematonta peltoa pienempi, jolloin suuri sadevesimäärä ei voi imeytyä maahan vaan päättyy vesistöön.

Kleemola ja Teittinen (1996) ovat salaojakastelukokeissaan 1994 saaneet 1- ja 2-kertaisella putkituksella kaurasatoa 1.800 ja 3.000 kiloa (41 ja 68 %) enemmän kuin vertailualueelta (satotulos 4.300 kg). Rauno Peltomaan kertoo Käytännön Maamiehessä (KM 1994) että kevätehnan sadonlisäys voi olla vuoden sateisuudesta riippuen säätösalojituksella 30 % ja padotuskastelulla 60 %. Toisaalta, sateisena kesänä voi väärin käytetty säätö hänen mukaansa

heikentää satotasoa jopa 20 %. Ohran salaojakastelusta ei tässä ole käytettävissä kattavia koetuloksia, mutta suunta on sama kuin kauralla. Esimerkiksi Marko Nummela sai vuonna 2000 6.200 kg:n hehtaarisadon salaojakastellulta lohkolta, kun verrannelohkon sato oli 4.500 kg, joten sadonlisäys oli 1.700 kg (38 %). Pohjanveden pinnan hän nosti 55-50 cm syvyydelle (Maatilan Pirkka 2000).

Perunan kastelukokeissa Tyrnävällä on yksinkertaisen putkiston avulla saatu vuosina 1995 ja 1996 17,3-18,8 tonnin (80-90 %:n) sadonlisäyksiä ja erillisen kasteluputkiston eli 2-kertaisen putkituksen avulla jopa 20,7-21,1 tonnin (90-112 %:n) lisäyksiä verrannesatoon (18,9-23,5 t) verrattuna. Perunan vedentarpeeksi lasketaan 350-400 mm/kasvukausi (Paasonen-Kivekäs 1998 ref. Haataja 2000).

3.3 Salaojakastelun kustannukset

Tässä esitettävät kustannukset perustuvat Haatajan (2000) esittämiin kustannuksiin. Salaojakasteluverkoston perustamiskustannuksia ei käsitellä tässä tutkielmassa kovin perusteellisesti. Vuonna 1997 salaojittamattoman lohkon ojituskustannus oli kaksoisputkistoa käytettäessä (erilliset kuivatus- ja kasteluputket) noin 2300 €/ha (14.000 mk/ha) ja normaaliputkistolla 1.600-2.000 €/ha (10.000-12.000 mk/ha) (Haataja 2000). Vuonna 1999 oli yhden säätökaivon ja pohjaveden havaintoputken kustannukset tarvikkeineen ja töineen olivat keskimäärin 570 € (3.400 mk) (Peltomaa 2000).

Säätösaloituksen ja salaojakastelun käyttöönottoa on edistetty maatalouden ympäristötuen erityistukien avulla vuodesta 1995. TE-keskus myöntää tuen säätösuunnitelman ja ympäristökeskuksen puoltavan lausunnon pohjalta. Ympäristökeskus puoltaa tukea silloin, kun pellon kaltevuus ja maalaji ovat menetelmälle suotuisat sekä pelto vesistön läheisyydessä. Ympäristöohjelman kaudella 2000-2006 tehdään 5-vuotisia sopimuksia tuen enimmäismäärän ollessa 155 €/ha/v (930 mk/ha/v) (Haataja 2000, Peltomaa 2000).

Vuosina 1995-1998 viisivuotisia sopimuksia tehtiin yhteensä 14.000 hehtaarille, joista 90 % oli Pohjanmaalla ja yhteensä 8 % Varsinais-Suomen ja Satakunnan alueella (Haataja 2000). Suomessa tehtyjen laskelmien perusteella säätöojitus sopii noin 40 %:lle pelloistamme (Virtanen 1993).

Haatajan (2000) käyttämässä salaojakastelun kustannusten esimerkkitapauksessa maksoi sähköpumppaamo 8 ha:n lohkolle 7.092 € (42.549 mk) ja varastoallas 1.922 € (11.530 mk). Sähkönkulutus oli 367 €/v (2.200 mk/v) eli 46,7 €/ha/v. Pumpun kunnossapidon kustannukseksi arvioitiin 83 €/v (500 mk/v) eli noin 10 €/ha/v. Siten pumpauskaluston kustannus on 15 vuoden 5 % korkokantaa käyttäen $109 + 46,7 + 10 \approx 165$ €/ha/v varastoaltaan kanssa ja $85 + 46,7 + 10 \approx 140$ €/ha/v ilman allasta. Tämän lisäksi Haataja (2000) laskee käyttökustannuksiin 0,5 h/viikko/hehtaari eli 7,5 euron (45 mk) tuntipalkan mukaan 20 viikolle 90 €/ha/v. Kustannukset on eritelty normaaliputkiston ja kaksoisputkiston kustannuksiin, pääomakustannuksissa on käytetty 15 vuoden 5 %:n korkokantaa (Taulukko 3).

Taulukko 3. Kasteluojaston ja kaluston vuosikustannukset [€/ha] (Haataja 2000).

	Normaaliputkisto	Kaksoisputkisto
Ojituskustannus	162	228
Ojaston kunnossapito	11,7	11,7
Säätökaivojen ym. hoito	90	90
Kaksoisputkiston huuhtelu		88
Varastoallas	23,3	23,3
Yhteensä	287	441
Sähköpumppaamo		85
Sähkönkulutus		47
Pumpun kunnossapito		10
Yhteensä		142

Näiden kustannusten lisäksi on vielä otettava huomioon, että pumppaamon sähköistäminen saattaa tulla kalliiksi, jos lähin liittymä on vaikka kilometrien päässä.

Jotta sekä säätösalaajaston että sähköpumppaamon investoinnit ja käyttökustannukset peittyisivät, olisi sadonlisäysten oltava yksinkertaisella salaojaputkistolla ohralla +116 %, kauralla +73 %, sokerijuurikkaalla +24 % ja perunalalla noin +10 %, kaksoisputkistolla vielä korkeampia. Ravinteiden huuhtoutumista on Haatajan (2000) tutkimuksessa arvioitu vain sen yhteiskunnallisten merkitysten osalta, joten ravinnehuuhtoutumien tilakohtaisia vaikutuksia ei voida arvioida.

Haatajan (2000) laskuissa ei ole otettu huomioon ympäristötuen erityistukea, jota ympäristöohjelman tukivuosina 2000-2006 maksetaan 155 €/ha (930 mk/ha) 5 vuoden ajan (Peltomaa 2000). Koska tämän tutkimuksen kustannukset on laskettu 15 vuodelle, voidaan myös mahdollinen tukikertymä $5 \times 155 = 775$ €/ha jakaa 15 vuodelle, jolloin laskennalliseksi vuosituoksi saadaan 52 €/ha.

3.4 Sadetuskastelun kustannukset

Vertailun vuoksi seuraavassa esitellään arvio sadetuskastelun kustannuksista. Sadetuskoneen mitoituksen tulisi olla sellainen, että 25-30 millin sadetus voidaan tarpeen vaatiessa uusia 5-7 päivän välein. Isoimmilla, noin 4 hehtaaria vuorokaudessa sadettavilla vesitykeillä voidaan siis hoitaa 20-30 hehtaarin peruna-ala, kun ne pidetään koko ajan liikkeellä. (Ahvenniemi 1997)

Haataja (2000) arvioi sadetuskoneen hankintahinnaksi 11.000 € (65.000 mk), jolloin vuosikustannukseksi muodostuu 1.200 € (5 % korkokanta 15 vuoden poistoilla, kunnossapito 2 %). Työ- ja traktorikustannuksiksi hän on arvioinut 150 €/ha (900 mk/ha)vuodessa, kun sadetuskertoja on 5. Tämän arvion mukaan kustannus olisi 30 €/kerta, joka vastaa noin yhden tunnin työtä traktorin kanssa. Siten 10 hehtaarin alan sadetuskustannus olisi 270 €/ha/v, ja 20 hehtaarin alan vastaavasti 210 €/ha/v.

Tanner (1991) esittää puolestaan, että 10 ha:n sadetuskaluston hinta on 70.000 mk, 20 ha:n 100.000 mk. 15 vuoden 5 %:n korkokannan ja Tannerin käyttämän 4 %:n kunnossapitokustannuksen mukaan pääomakustannukseksi tulee 20.000 € ja 29.000 € eli vuosikustannukset 1.300 € 10 ha:lle ja 1.9000 € 20 ha:lle. Yhden hehtaarin 30 mm:n sadetuskerralle hän laskee traktorille polttoainekulutusta 55 l ja ihmistyötä 2 h eli 0,24 e:n litrahinnalla ja 7,5 €/h tuntipalkalla 28 €/ha. Siten 5 sadetuskerran kustannukseksi saadaan 10 ha:n viljelyksillä 275 €/ha/v ja 20 ha:n viljelyksillä 240 €/ha/v. Kustannukset ovat samaa suuruusluokkaa kuin Haatajan (2000) vastaavat.

Sadetuskastelu ei tämän mukaan välttämättä ole salaojakastelua kalliimpaa, mutta selvästi työläämpää ja tuo mukanaan kasvuston tautiongelmia (Haataja 2000).

4 PROTOTYYPIN SUUNNITTELUPARAMETRIT

Edellä on esitelty tuulivoiman hyödyntämistä ja tuulisuutta Suomessa sekä salaojakastelua. Tässä luvussa esitellään veden pumppaamista tuulivoimalla ja pumpputyyppejä ja sitä, miten nämä kolme kokonaisuutta voidaan sovittaa yhteen tietyin parametrein ja selvittää minkälainen prototyyppi näiden mukaan on rakennettu.

Roottorin mitoitus etenee siten, että lähtökohtana on *sadannan vaje*, joka halutaan tyydyttää *alueellisen tuulisuuden* puitteissa. Viljelykasvina on peruna, joka on vedentarpeeltaan peltoviljelykasveista kenties vaativin (Kuisma 1994). Kun ratkaistaan *roottorityyppi*, voidaan laskea *roottorin fyysinen koko* lähinnä käytettävyyden kannalta. Mitoitus käsittelee Savonius-roottorin mitoitus.

Näiden lisäksi on ratkaistava käytettävä *pumpputyyppejä* ja selvitettävä roottorin *valmistuskustannukset*. Näissä yhteyksissä tullaan myös viittaamaan esikokeiden tuloksiin, sillä vaikka ne esitellään vasta seuraavissa luvuissa, vaikuttivat nämä tulokset suunnitteluun.

4.1 Veden pumppaaminen tuulivoimalla

Veden pumppaamisessa keskeisiä tekijöitä ovat paine, veden tuotto, nostokorkeus, virtausvastukset ja virtauksen tasaisuus. Kun tunnetaan roottorilta saatava teho, voidaan tuoton teoreettinen maksimi laskea kaavalla 3 (MAOL 1991). Tästä tuotosta on vielä laskettava pois ainakin virtausvastukset, jotka on helpointa muuttaa paineen sijasta nostokorkeudeksi ja lisätä varsinaisen h:n arvoon.

$$P = m/t * g * h$$

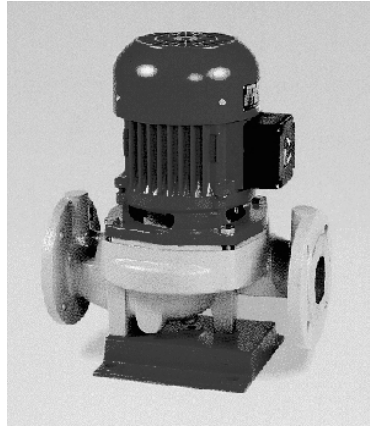
Kaava 3

Kaavan m/t = massavirta eli tuotto [kg/s] ja h = veden nostokorkeus [m]. Virtausteknisestä kirjallisuudesta löytyy nomogrammeja erilaisten putkenvahvuuksien ja virtausnopeuksien virtausvastuksille. Virtausvastus kasvaa putken pidentyessä ja kaventuessa. Lisäksi siihen vaikuttavat putken karheus, mutkat, venttiilit, liittimet ym. (Wuori 1994)

Veden virtauksen tasaisuudellakin on merkityksensä. Jos roottoriin kytketään mäntäpumppu, joutuu vesipatsas letkussa pysähtymään jokaisen pumppauksen välillä, jonka jälkeen koko vesipatsas on jälleen kiihdytettävä liikkeeseen. Tällöin virtauksen huippunopeus on tasaista virtausnopeutta korkeampi, ja virtausvastukset kasvavat. Esikokeissa ilmiöstä laskettiin aiheutuneen muutaman prosentin tehonalennus. Jos virtauksesta haluttaisiin mäntäpumppulla jatkuva ja tasainen, olisi roottoriin kytkettävä kaksi kaksitoimista pumppua 90°:n vaihe-eroon keskenään. Tällöin neljän pumppukammion virtausten summakäyrä olisi suora.

Kuten tuuliroottoreitakin, voidaan vesipumppuja luokitella monella tapaa. Tässä keskitytään kierrosnopeuteen, sillä tämä on pumpun ja roottorin yhteensovittamisen kannalta keskeisin tekijä.

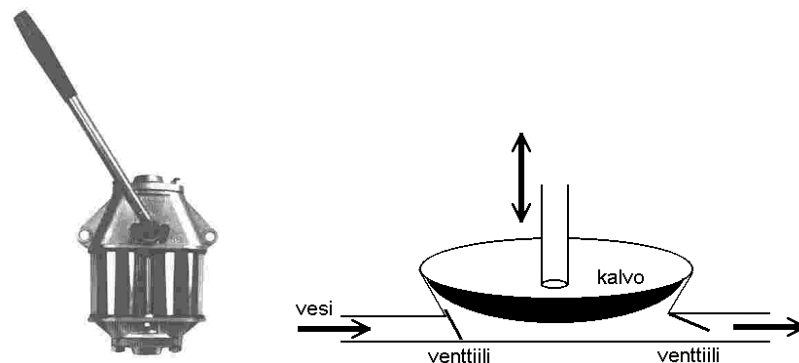
Pumput voidaan ylimalkaisesti jakaa keskipakopumppuihin ja syrjäytyspumppuihin. *Keskipakopumppu* on laite, joka ottaa nesteen tai kaasun sisään siipipyörästä keskiosasta ja pyörittää sitä kunnes neste syöksyy ulos siipipyörästä kehältä (Elo 1997). Keskipakopumppujen kierrosalueet ovat yleensä kapeita ja nimelliskierrokset lähes poikkeuksetta 1500 rpm:stä ylöspäin. Myytävät keskipakopumput on useimmiten varustettu sähkömoottorilla joka samalla toimii juoksupyörän laakerina, joten suoraveto on vaikea toteuttaa.



Kuva 16. Tyypillinen keskipakopumppu (Kolmeks 2001).

Syrjäytyspumppu tuottaa vakiomäärän vettä jokaisella iskulla eli on iskutilavuudeltaan kiinteä. Tästä huolimatta iskutuotto saattaa vaihdella pumpausnopeuden suhteen. Yleisesti käytettyjä syrjäytyspumppuja ovat mäntä-, kalvo-, ja hammaspyöräpumput. Myös ruuvipumput ja kuppikuljettimet ovat kiinteätilavuuksisia. Viimeksimainitut ovat toisaalta kalliita, toisaalta niiden nostomatka on lyhyt (Fraenkel 1986). Hammas- ja ruuvipumppuja leimaa kankeus. Ne on lähes poikkeuksetta suunniteltu sähkömoottorilla käytettäväksi, jolloin käyttöteho ei muodostu ongelmaksi ja pumpuista on tehty tiiviitä hyötysuhteen kustannuksella. Joitain pienikokoisia kumirataspumppuja ei jaksakaan käsivoimin pyörittää edes tyhjänä.

Kalvo- ja mäntäpumppujen etuna on se, että pumpun iskutuottoa voi muuttaa helposti iskun pituutta muuttamalla ja siten säätää vedentuottoa roottorin kierrosnopeuden suhteen. Mainittujen pumputyypien liikekitkat ovat vähäisiä ja hyötysuhteet korkeita. Koska pumpuissa on venttiilejä, ovat ne melko herkkiä epäpuhtauksille.



Kuva 17. Kaksitoiminen mäntäpumppu Nira 6b ja kalvopumppu.

Markkinoilla olevat kalvopumput ovat joko tuottonsa tai käyttöpaineensa puolesta tarkoitukseen sopimattomia. Esim. kasvinsuojeluruiskuissa käytettävien säteittäisten kalvopumppujen hyötysuhteet on optimoitu jopa 80 barin paineen alueelle (Hardi International 2002), kun taas salaojakastelussa vettä imetään 1-8 m:n syvyydeltä eli alipaine on korkeintaan 1 barin luokkaa. Prosessiteollisuudessa käytettävien annostelupumppujen tuotot ovat tyypillisesti vain muutaman litran minuutissa.

Veden pumppaaminen tuulivoimalla poikkeaa sähkön tuottamisesta lähinnä roottorin kierrosnopeuden suhteen. Kun tuotetaan sähköä, on generaattori saatava pyörimään korkeilla kierroksilla. Kuten edellä on todettu, ovat lentokoneen siiven aerodynamiikalla muotoillut kolmisiipiset roottorit tällöin parhaita. Pienikokoisten nosteeseen perustuvien propellimallisten roottoreiden kierrosalue on nolasta tuhansin kierroksiin minuutissa. Mikäli näillä kierrosnopeuksilla halutaan pumpata vettä eikä haluta käyttää vaihteistoa, sopivat vain keskipakopumput tarkoitukseen. Näiden ongelma on, että vedentuotto alkaa vasta, kun nimelliskierrokset saavutetaan.

Mikäli halutaan käyttää syrjäytyspumppua, tarvitaan suuri vääntömomentti ja alhaiset kierrokset. Nämä saavutetaan esim. Savonius-roottorilla (Fraenkel 1986, Gipe 1993, Eggleston 1998). Sovittamalla S-roottori oikein mitoitetuun mäntä- tai kalvopumppuun, vältetään kokonaan vaihteiston käyttämiseltä ja säästetään sekä kustannuksia että huoltotöitä. Roottorin kierrosnopeus valitaan mitoittamalla roottorin halkaisija tuulen nopeuteen oikein, sillä oikein roottorin paras teho saavutetaan, kun roottorin kehänopeus jarrutetaan 80-100 %:iin tuulen nopeudesta (kappale 2.4).

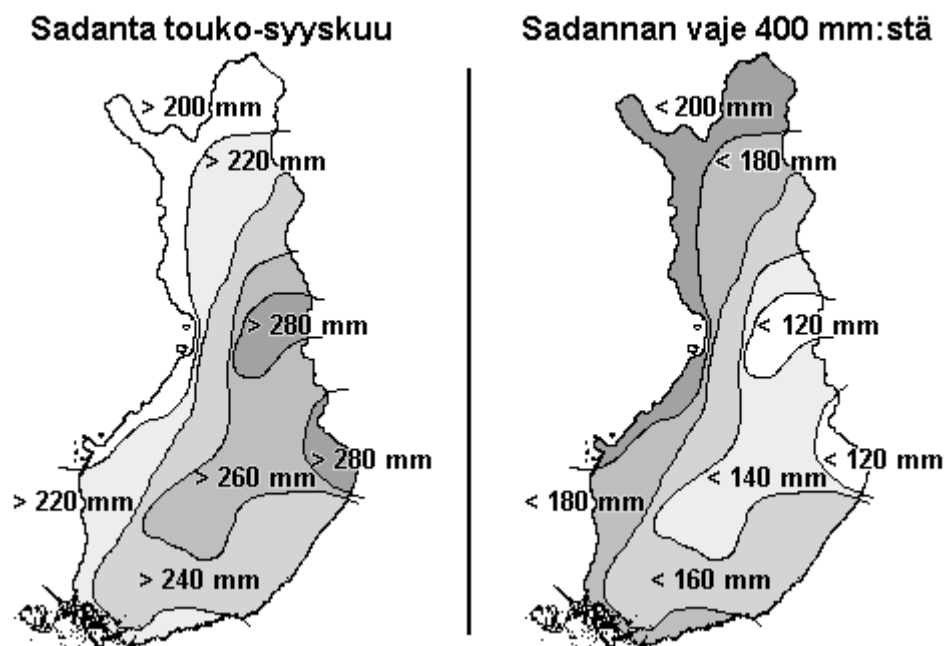
Tarkoitukseen sopivia pumppuja ei ole markkinoilla ja oman kalvopumpun valmistaminen osoittautui esikokeissa odotetusti vaikeaksi. Tässä tutkimuksessa ei esitellä kalvopumpuilla saatuja tuloksia. Laitteessa käytetty pumppu valittiin poissulkumenetelmällä kaupan olevien pumppujen joukosta. Kuten sanottu, pumpun tuotto ei saa riippua liikaa kierrosnopeudesta. Esikokeiden mukaan prototyyppi-roottorin kierrosnopeusalue on noin 0,5-2 r/s. Kokeissa päätettiin käyttää Vammalan konepajan Nira 6b-käsi-pumppuja, joiden isku-tuotoiksi voitiin säätää noin 0,2-0,6 l. Yksinkertaiset kumiläppä-takaiskuventtiilit sulkeutuvat melko tiiviisti hitaallakin pumppauksella. Nira 6b maksaa arvonlisäverollisena noin 115 € (700 mk) (Vammalan konepaja 2000). Valittavasti pumppuvarren pää on asennettu laakeroimattomasti pumppurungossa olevaan koloon, eikä pumppu siksi sovellu pitkäaikaiseen, jatkuvaan käyttöön. Tämän lisäksi pumpun kankeus kasvaa voimakkaasti pumppausnopeuden kasvaessa, kuten myöhemmin osoitetaan.

4.2 Sadannan vaje ja tuulisuus Suomessa

Haatajan (2000) tutkimuksessa salaojakastelun kustannuksista perunaviljelmien vedentarpeeksi on arvioitu 350-400 mm/kasvukausi. Kuisma (1994) ilmoittaa vastaavaksi vedentarpeeksi 300-500 mm/kasvukausi. Koska salaojakastelu on tarkan ja korkeisiin satoihin pyrkivän viljelijän menetelmä, arvioidaan tuuliroottorin suorituskykyä tässä tutkimuksessa suhteessa roottorin kykyyn toteuttaa 400 mm:n vesimäärä. Karttaan (Kuva 18 s. 29) on laskettu Il-

matieteenlaitoksen (2001) ilmoittamien vertailukauden 1961-90 kuukausisadantojen summa toukokuulta puoliväliin syyskuuta (135 vrk).

Sadetustarpeen laskeminen 400 mm:n vedentarpeen mukaan saattaa olla yliarvio. Mm. Ahvenniemi (1994) ja Kuisma (1994) puhuvat keskimääräisestä 100 mm:n vajeesta, joka esitetyillä sadannoilla tekisi 300-380 mm/kasvukausi. Vedentarve pellolla on vähäinen perunan pintaantuloon asti kesäkuun alussa ja varsiston ränsistyminen vähentää vedentarvetta elokuun loppupuolella (Ahvenniemi 1994). Kun pumppausajaksi lasketaan 135 vrk eli toukokuusta syyskuun puoliväliin (4,5 kk) voidaan olettaa, että näiden sadannan vajeiden mukaan mitoitettu pumppauskapasiteetti on vähintäänkin riittävä, sillä kuvan sadantakartta on jokseenkin pessimistinen arvio sadannan määrästä. Ilmatieteenlaitoksen aineiston sadanta ilmoitettiin kullekin kuukaudelle 10 mm:n haarukkana (Ilmatieteenlaitos 2001), joiden alarajojen summa on kartalla ilmoitettu keskimääräinen sadanta.



Kuva 18. Keskiarvoinen sadanta ja sadannan vaje toukokuusta syyskuun puoliväliin Suomessa.

Haatajan (2000) tutkimuksessa mainitaan sadannan olevan Pohjanmaan rannikkoalueilla ja Lounais-Suomessa keskimäärin vain 200-250 mm. Tämä sopii hyvin yhteen edellä esiteltyyn sadantakarttaan. Aivan kuten Haataja kertoo Wikmanin, Tortilan, Virtasen ja Kuisman esittäneen vuonna 1995 Perunan-tutkimuslaitoksen julkaisussa "Perunan vesitalous ja sadetus", on lisäveden tarve siis 100-200 mm. Verrattaessa edellä esitettyä sadannan vajetta kappaleessa 2.6 esiteltyyn tuulisuuden jakaumaan Suomessa, voidaan maa jakaa kolmeen, tuulivoima-salaojakastelun kannalta keskenään erilaiseen alueeseen:

1. **Länsirannikko.** Sadannan vaje 200 mm, keskituuli 4-5 m/s
2. **Lounais- ja etelärannikko.** Sadannan vaje 180 mm, keskituuli 4-5 m/s
3. **Sisämaa ja Itä-Suomi.** Sadannan vaje 140 mm, keskituuli 3,5-4 m/s

4.3 Roottorilaitteen mitoitus

Salaojakasteluun käytettävältä roottorilta päätettiin edellyttää seuraavassa esiteltäviä ominaisuuksia.

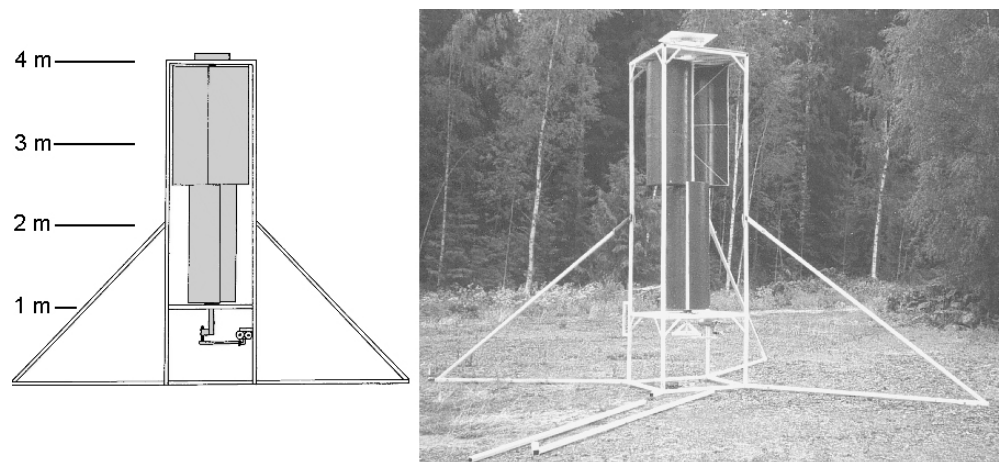
- Edullinen, kestävä ja yksinkertainen rakenne
- Alhainen kierrosnopeus eli vaihteettomuus
- Kohtuullinen hyötysuhde
- Hyvä suuntautuvuus tai omnidirektionaalisuus
- 20 %:n tuuli-mekaaninen- ja 10 %:n pumppaushyötysuhde
- Hyvä toimivuus tuulen nopeusalueella 4-10 m/s

Kestävyys ja yksinkertaisuus ovat pitkälti sama asia. Tuuli yltyy toisinaan hyvin nopeaksi, ja tällöin monimutkaiset laitteet sekä nosteseen perustuvat roottorit vaativat varojärjestelmiä ja automatiikkaa.

Jotta kalliin ja tehoa hävittävän vaihteiston käytöltä säästyttäisiin, on roottorin ja pumpun pyörimisnopeuksien oltava samat. Koska toisaalta Suomen oloissa tuulesta on yleensä "pulaa", on sekä pumpun että roottorin toimittava myös alhaisilla tuulen nopeuksilla (noin 4 m/s) ja siis alhaisilla kierroksilla, jopa luokkaa 10 rpm. Tämä poissulkee nosteseen perustuvien potkureiden käytön, joihin myös Darrieus-roottorit kuuluvat.

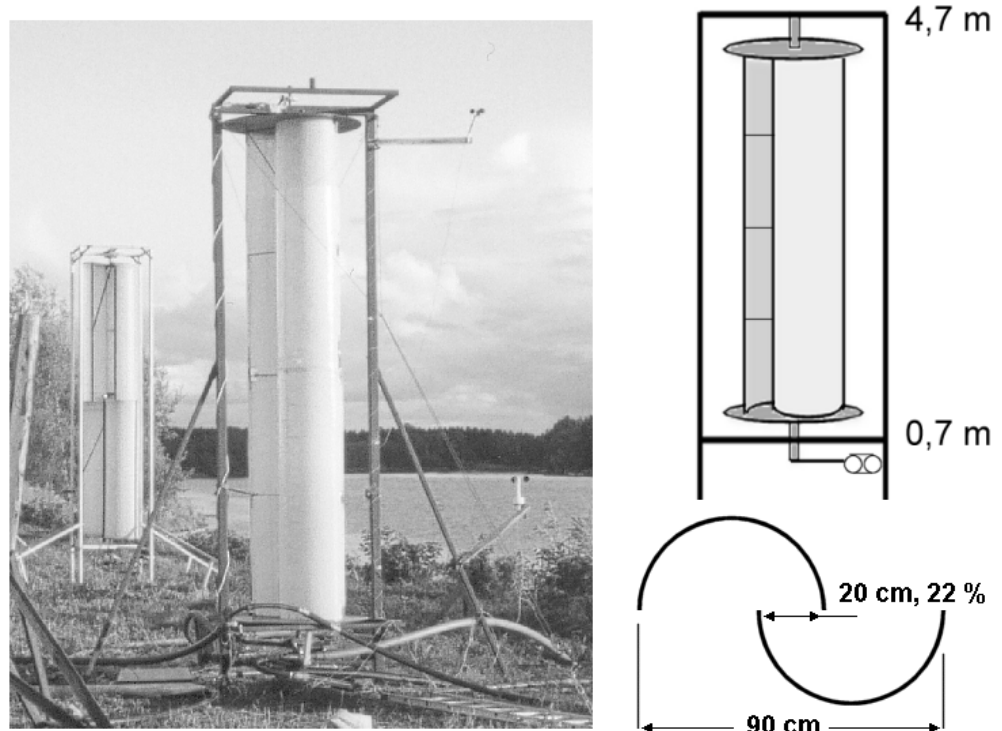
Koska tuuliolosuhteet lähellä maanpintaa ovat pyörteiset (Gipe 1993), vaaditaan helppokäyttöiseltä ja siksi matalalta roottorilta niin hyvää suuntaavuutta, että jäljelle jää vain Savonius-roottori. Kirjallisuus puoltaa valintaa, koska roottoria on kehitetty vedennostoon sopivaksi ja teknisesti yksinkertaiseksi (kappale 2.3).

Esisanoissa mainitun 11-metrinen S-roottorin huonojen käyttökokemusten perusteella roottorista haluttiin tehdä tukivaijeriton ja kahden hengen voimin pystytettävä laite. Roottorista päätettiin tehdä 4 m korkea, jolloin roottoriosan korkeus olisi 3 m ja halkaisija 1 m (sieppauspinta-ala 3 m²). Ensimmäinen prototyyppi, jolla myös tämän tutkimuksen kokeet on tehty, rakennettiin näillä mitoilla (Kuva 19).



Kuva 19. Esikokeissa käytetty prototyyppi.

Prototyypin rakennusvaiheessa sekä esikokeiden aikana kävi selväksi, että roottori voisi olla suurempi ilman, että laitteen valmistuskustannukset nousisivat juuri lainkaan tai että laitteesta tulisi vaikeampi käyttää. Seuraavasta roottorista rakennettiin 4,7 m korkea ja sieppauspinta-alaltaan $3,6 \text{ m}^2$ (Kuva 20). Samalla tukirakenteita yksinkertaistettiin ja korvattiin kiristettävillä vaijereilla. Tämä helpotti pystytystä (koko operaatio vain noin 15 min) ja alensi materiaalikustannuksia.



Kuva 20. Lopullisissa kokeissa käytetty $3,6 \text{ m}^2$:n Savonius-roottori.

Kahdella ensimmäisellä prototyypillä tehtiin molemmilla kymmeniä kahden tunnin mittausarjoja, joiden pohjalta lopullinen laite konstruoidiin. Tälläkin tehtiin vielä erilaisia mittauksia ja kehikkoon sovitettiin kolme erilaista säädettävää roottoria. Lopullisen roottorin suunnitteluun tähänneiden kokeiden tuloksia ei raportoida yksityiskohtaisesti. Lopulliset mittaukset tehtiin roottorilla, jonka kaarten halkaisijat oli 55 cm, läpisyöttörako 22 % koko roottorin halkaisijasta (Kuva 20) ja siten 4 m korkean roottorin sieppauspinta-ala $3,6 \text{ m}^2$. Roottoriosa alkoi 70 cm korkeudelta maan pinnasta lukien, joka myöhemmin osoitettiin liian matalaksi maanpinnan tuulta vaimentavan vaikutuksen tähden.

4.4 Roottorilaitteen kustannukset

Rakennetun mallisen roottorilaitteen kustannusta on rakennettujen prototyyppien perusteella vaikea määrittellä tarkkaan, mutta arvio valmistuskustannuksista voidaan antaa. Tähän arvioon sisällytetään hankintamenot, rakentamiseen käytetyn työn arvo (10 € /h) sekä tila- ja konevuokramenot. Kyseessä on siis valmistuskustannus, ei myyntihinta. Ensimmäisten prototyyppien kohdalla

rakentamistyökin oli lähinnä suunnittelua, mutta lopullinen laite rakennettiin nopeassa tahdissa valmiin suunnitelman mukaisesti.

Ensimmäisen 3 m² roottorin (Kuva 19 s. 30, esikokeissa käytetty prototyyppi) hinnaksi tuli noin 1.500 €. Kesällä 2001 rakennettiin kolme roottoria lisää, mutta metrin verran korkeampia ja siis teholliselta pinta-alaltaan 33 % suurempia (4 m²). Kolmen kappaleen sarjatuotannossa kookkaampi laite tuli maksamaan ilman pumppua noin 1.320 €.

Lopullisissa kokeissa käytetyn 3,6 m²:n roottorin (Kuva 20) rakentaminen sujui jo kitkatta; hankintamenoja kertyi 369 € ja kun tähän lisätään 35,5 tunnin palkka ja 76,25 € tila- ja konevuokraa (alv. 22 %) saadaan itse laitteen hankintamenoksi 800 € ilman pumppua ja 915 € yhden sekä 1.030 € kahden Nira-pumpun kanssa. Vuosittainen korkomeno 1.030 €:n laitteelle 15 vuoden poistoajalla on 25,75 €/v kun käytetään 5 %:n korkokantaa. Korkokertymä koko 15 vuoden ajalta on siten 386 €.

Roottorilaitteelle lasketaan 4 käyttökuukautta kasvukautta kohti ja pyörimiselle yksi kierros sekunnissa, joten roottorin laakereille arvioidaan noin 10 milj. kierrosta vuodessa. Koska dynaamiset kuormat ovat yleensä pieniä – esim. tuulella 5,5 m/s roottoriosalle alle 100 N – voidaan edullistenkin laakereiden olettaa kestävän kevyellä mutta säännöllisellä voitelulla vuosia, jopa 5 vuotta. Roottoriin asennettujen kiinalaisvalmisteisten laakereiden uusiminen maksaa noin 50 €. Roottorin rakenteellisessa suunnittelussa on kiinnitetty huomiota laakereiden helppoon vaihtamiseen.

Pumpun osien kulumista on vaikea arvioida, sillä lopullista pumppua ei ole vielä valittu. Kuluminen riippuu pumpattavan veden puhtaudesta ja asettaa siten vaatimuksia imueden suodattamiselle. Pumpun ja venttiileiden huoltokustannukseksi arvioidaan 8 €/vuosi.

Edellämainituin kustannuksin saadaan koko laitteen vuosikustannukseksi 112 € (674 mk).

Hankintamenot	369 €	25 €/v
Kaksi pumppua	230 €	15 €/v
Työn arvo	355 €	24 €/v
Vuokramenot	76 €	5 €/v
Korkomeno	386 €	25,75 €/v
Laakerihuolto		10 €/v
<u>Pumppuhuolto</u>		<u>8 €/v</u>
Yhteensä	1.416 €	112 €/v

Vuosikustannusta 112 € tullaan vertaamaan sähköpumppaamon aiemmin esitettyyn 140 €:n vuosikustannukseen hehtaarilta (kappale 3.3). Mikäli tuuliroottorilla voidaan tyydyttää 0,8 ha:n (112 € / 140 € / ha) kasteluvedentarve, on tuuliroottorin ja sähköpumppaamon vuosikustannukset samansuuruiset. Tämä pinta-ala voidaan olettaa saatavan peitettyä tuuliroottorilla joka osassa Suomea korkeintaan 8 m:n nostokorkeuksilla, kuten myöhemmin tullaan osoittamaan (kappale 7.3).

KOKEELLINEN OSA

5 KOEJÄRJESTELYT

Kehitetyn prototyypin suorituskykyä kokeiltiin siten, että voitiin laskea odotettavissa olevat vedentuottomäärät tunnetuilla tuulen keskinopeuksilla. Kokeissa mitattiin tuulen nopeutta, roottorin kierrosnopeutta, vedentuottoa ja nostokorkeutta. Tulosten pohjalta haluttiin laskea laitteen vuosikustannukset veden eri nostokorkeuksilla ja verrata näitä sadetuskoneiden ja sähkömoottoripumppaamon vastaaviin kustannuksiin. Koejärjestelyissä pyrittiin erityisesti selvittämään prototyypin hyötysuhde eri tuulen nopeuksilla.

Tutkimuksen kokeet on tehty järjestelmäkokeina, eikä järjestelmän yksittäisiä osia ole lähdetty koestamaan erikseen. Kaikki mittaukset on tehty pellon reunassa joen rannalla samanlaisissa olosuhteissa, kuin laitetta käytettäisiin kasveltaessa peltoa, kuten kokeiden tulosten ja johtopäätösten jälkeen esiteltävässä esimerkkitapauksessa myös tehtiin.

5.1 Esikoe

Roottorilaitteesta rakennettiin edellä esitetyn kaltainen prototyyppi (Kuva 19 s. 30). Tällä laitteella suoritettiin esikokeita, joiden tarkoituksena oli selvittää menetelmän toteutusmahdollisuuksia ylipäätään suunnitellun kaltaisella laitteella, sekä optimoida roottorin rakennetta. Roottoriosan akselista rakennettiin koottava, jotta eri läpisyöttörakoa voitiin kokeilla. Akselin oli kuitenkin oltava jäykkä ja kestävä, joten säätö tehtiin asentamalla lattarautapakat rakkoon ja muuttamalla 3 mm:n lattojen lukumäärää, jolloin koko akseli oli purettava.

Vesi imettiin Kokemäenjoesta, jonka vedenpinta oli 3,5-4,2 m roottorin pumppua alempana. Vettä ei vielä johdettu salaojastoon. Roottoriin kytkettiin yksi kaksitoiminen Nira 6b mäntäpumppu, joten veden virtaus oli sykkivää.

Roottoriosana oli kooltaan 1×3 m eli sieppauspinta-ala on 3 m^2 . Roottoriosan alareuna oli 1 m maanpinnan yläpuolella, joten koko laite oli 4 m korkea. Roottori oli kiinteän metallirungon sisässä siitäkin huolimatta, että tukiputket häiritsevät ilmavirtaa.

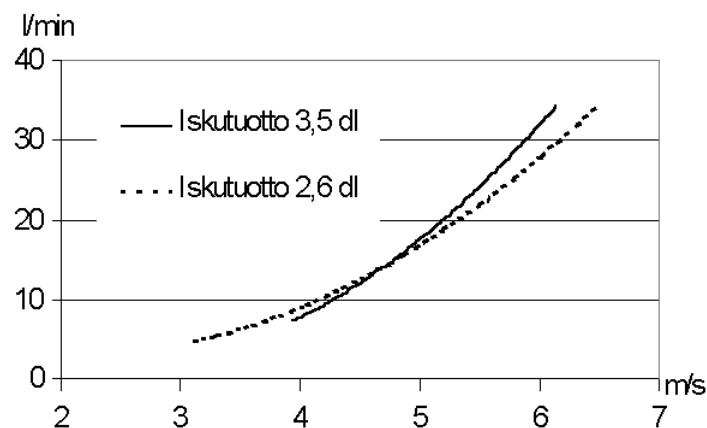
Esikokeissa mitattiin tuulen nopeus, roottorin kierrosluku sekä vedentuotto. Pumpun iskun pituudesta käytettiin kolmea eri asentoa ja roottorin läpisyötöstä kolmea eri leveyttä. Tuloksista laskettiin pumppausteho ja hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona kullekin asetukselle. Ensimmäisen koesarjan jälkeen läpisyöttörakoa levennettiin. Muutosta seuranneissa mittauksissa huomattiin suorituskyvyn laskeneen, joten rakoa kavennettiin hieman alle 10 %:iin roottorin halkaisijasta. Suorituskyky nousi hieman alkuperäisestä ja tästä pääteltiin, että roottori olisi siten optimoitu.

Yksittäisen kokeen mittausjakso oli n. 30 s. Tuulen nopeus mitattiin veneilykäyttöön tarkoitettulla Rää Varv kuppimittarilla. Mittarissa on dynamon tuottamaa virtaa mittaava neulaosoitin, jolta tuulen nopeus luettiin 0,5 m/s tarkkuudella 10 sekunnin välein, eli 30 sekunnin jaksolta saatiin 4 tuulilukemaa. Mittari oli asetettu roottorin puolivälin korkeudelle noin 20 metrin etäisyydelle roottorista. Lukemataajuus oli suurin, johon mittausjärjestelyssä kyettiin, muttei kuitenkaan riittävä. 10 s ajanjaksoon mahtuu merkityksellisiä puuskia ja tyvenä. Tuulen suunnasta riippuen eivät saadut mittalukemat myöskään vastanneet tuulta juuri roottorin kohdalla.

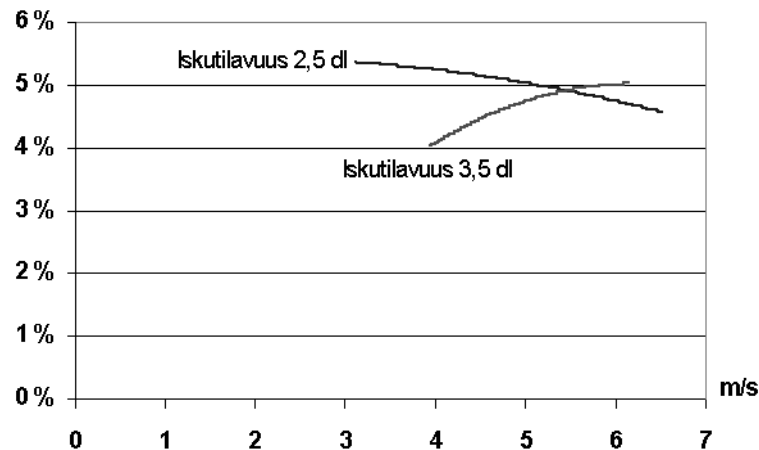
Roottorin kierroskertymä mittausjaksolta otettiin ylös mekaanisella kierros-laskurilla, joka laski vain kokonaisia kierroksia. Vesi laskettiin saaviin, jonka vesisisältö mitattiin litramitalla mittausjakson päätteeksi 1 dl tarkkuudella.

Tuulen nopeuden lukemista laskettiin kuutiopainotettu keskiarvo, jonka avulla laskettu tuulen teho yleistettiin koko mittausjaksolle. Tuloksiin tuli pienestä mittaustaajuudesta johtuen suurta hajontaa. Niinpä tuulikertymää päätettiin kuvata roottorin kierroslukeman avulla, ja kuutiopainotetun (eli tehollisen) tuulen ja kierroslukeman välille laskettiin regressiosuora. Mittalukemien hajontaa suodatettiin siten, että jokaisen vedentuottolukeman arvo asetettiin tämän suoran mukaiselle tuulen nopeudelle.

Roottori osoittautui teknisiltä ratkaisuiltaan kehityskelpoiseksi. Laitteen käytettävyys oli hyvä ja ongelmaton. Laitteen esikokeessa tuottamat vesimäärät ovat salaojakastelun kannalta riittäviä, mutteivät tavoitteiden mukaisia (Kuva 21). Esimerkiksi tuotto 30 l/min vuorokauden ajan tekisi noin 40 m³. Tämä vesimäärä on hehtaarille levitettynä 4 mm. Rohkaisevaksi koettiin se, että jo 4 m/s tuulella saatiin tuotetuksi lähes 10 l/min, joka on noin 1,5 mm/ha/vrk. Menetelmän edelleenkehittäminen nähtiin mielekääksi ja päätettiin järjestää varsinaiset mittaukset, jotta voitaisiin selvittää, miksei tavoitteiden mukaisia hyötysuhteita (yli 10 %) saavutettu vaan jäätiin luokkaan 4-5 % (Kuva 22).



Kuva 21. Vedentuotto mäntäpumpun eri iskuotoilla esikokeissa.



Kuva 22. Kokonaishyötysuhde tuulen nopeuden suhteen mäntäpumpun eri iskutilavuuksilla esikokeissa.

Esikokeet antoivat syytä olettaa, että iskunpituudella olisi pumppaustehon kannalta ratkaiseva merkitys (Kuva 22). Tuulen nopeuden suuri hajonta osoitti kuitenkin, ettei jaksottainen mittaus sovi roottorin suoritusarvojen selvittämiseen, vaan mittauksen on oltava jatkuva. Tämä johtuu kappaleessa 2.1 esitettyihin teorioihin tuulen tehon luonteesta. Tämän lisäksi huomattiin, että tuulimittarin on oltava liikuteltava, jotta se voidaan asettaa roottorin kanssa samalle rintamalinjalle tuulen pääsuunnan suhteen. Tällöin voidaan olettaa, että tuulilukemat vastaavat paremmin myös roottoriin osunutta tuulta, sillä esikokeissa saatiin usein mittarille puuska, joka kuitenkin saavutti roottorin vasta mittausjakson jo päätyttyä.

Esikokeissa haarukoitiin myös oikeaa läpisyöttörakoa roottorin kaarten välille. Rakoa muutettiin lisäämällä 3 mm:n lattarautoja tukirakenteiden väliin. Säättäminen oli hankalaa, mutta kokeet osoittivat selvästi raon ratkaisevan merkityksen roottorin hyötysuhteeseen.

Esikokeiden jälkeen luultiin, että oikea rako oli löydetty ja heikko tuotto johtuisi huonosta pumpusta ja epätasaisesta virtauksesta imuletkussa. Siten varsinaisissa mittauksissa päätettiin kiinnittää huomiota pumpun ominaisuuksien selvittämiseen.

5.2 Mittausjärjestelyt ja instrumentointi

Varsinaisten kokeiden mittaukset tehtiin jatkuvina mittauksina. Samanaikaisesti mitattiin tuulen nopeus, roottorin kierrosluku sekä pumpun tuottama virtaus. Mittausjaksot olivat keskimäärin noin 1 tunnin mittaisia. Niin tuulimittari kuin kierros- ja virtausmittaritkin olivat pulssiantureita, joten tiedonkeruulaitteella kerättiin laskurityyppisesti kumulatiivista pulssikertymää. Aluksi kokeiltiin mittausjaksona 1 sekuntia, mutta koska loggerin toiminnassa ilmeni epävarmuutta, pidennettiin jakso 2 sekuntiin.

Tuulen nopeuden osalta pyrittiin saamaan lukemia koko alle 20 m/s alueelta, mutta käytännössä mittausjaksoille osui tuulen nopeuksia 0 – 16 m/s, valtaosan jäädessä alle 10 m/s. Tuulten esiintymistodennäköisyyksien johdosta mielenkiinto kohdistui ensisijaisesti alle 8 m/s alueelle, joten mittauksen kat-

tavuutta voidaan pitää hyvänä. Ulvilassa tuulen keskinopeus on mm. Porin lentokentältä saadun suullisen tiedonannon ja luvussa 2.6 esitettyjen arvojen mukaan 5,5 m/s.

Roottori pystytettiin pellolle 20 m:n etäisyydelle joentörmästä. Imuletkuna käytettiin 68 mm:n pvc-putkea. Putken päässä oli 2 tuuman yhdistetty imusih-ti ja takaiskuventtiili. Imuputken pituus oli 25 m, joten virtausvastus oli lähes olematon (Wuori 1994).

Tiedonkeruuseen käytettiin Data Electronics Ltd:n DataTaker 500 ja 600 dataloggereita. Useiden analogisten linjojen lisäksi laitteessa oli 3 kpl korkea-taajuuksista laskurikanavaa. Kanavat laskivat joko linjan jännitteen nousuja tai linjan ja maan oikosulkuja. Laite toimi 10 – 30 V tasajännitteellä. Laitteessa on sisäinen akku, joka säilyttää laitteen muistin. Laitetta käytettiin 12 V:n akkujännitteellä.

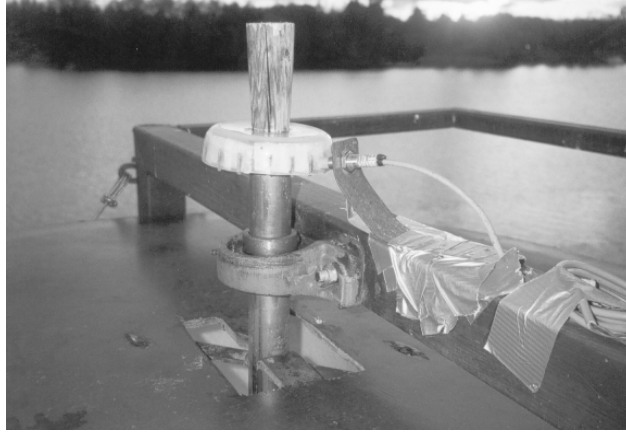
DataTaker 500 ja 600 ohjelmoidaan tietokoneella sarjaportin kautta. Laitteen sisäiseen muistiin mahtuu yli 13.000 mittaustulosta sekä muistikortille noin 170.000. Laskurikanavan korkeimmaksi taajuudeksi ilmoitetaan 1 kHz. Muistikorttien käytössä ilmeni ongelmia, joten mittaukset luettiin koneen sisäiseen muistiin, jolloin yhden mittausjakson maksimi kesto aika oli 113 minuuttia.

Tuulen nopeus mitattiin Vaisalan WAA 15 kuppianemometrillä. Laitteen mittausalue on 0,4 – 75 m/s ja tarkkuus $\pm 0,1$ m/s alueella alle 10 m/s. Laitteen käyttöjännitteenä syötettiin 12 V:n akkujännitettä. Mittarissa on rei'itetty rumpu ja valodiodi. Anturi antaa 14 pulssia yhdellä kuppian kierroksella. Pulssitaajuus f muunnettiin tuulen nopeudeksi kaavalla 4.

$$u \text{ [m/s]} = (1,402 \times f \text{ [Hz]} / 14) - 0,232 \text{ [m/s]} \quad \text{Kaava 4}$$

Tuulimittarin kalibrointia on vaikea toteuttaa ilman tuulitunnelia. Kalibroinnin sijaan tehtiin tarkistukseksi luonnehdittava koe, sillä mittariin vaihdettiin ylälaakeri ennen kokeita. Tyynenä päivänä mittari asennettiin puutelineeseen avolava-auton lavalle, jonka jälkeen autolla ajettiin 1920 m:ä tasaisella, auton mittarin mukaan 60 km/h nopeudella. Ajoajaksi kelloitettiin 122 s, joten keskinopeus oli 15,73 m/s (56,63 km/h). Mittausdatasta laskettiin tuulen nopeudet 2 s:n välein edellämainitulla kaavalla ja laskettiin keskiarvo näistä 60 lukemasta, jolloin keskiarvoksi saatiin 15,19 m/s. Oletetulla tuulella 15,73 m/s saatua virhettä 0,54 m/s (3,43 %) voidaan pitää erittäin hyvänä saavutuksena, ja mittarin voidaan katsoa toimivan valmistustietojen mukaisesti.

Roottorin kierroslukema mitattiin induktiivisella pulssianturilla TURCK Ni4-M12-AP6X. Anturi antaa oikosulkupulssin aina, kun metalliesine kulkee alle 4 mm päästä anturin kärjestä. Roottorin yläpäähän (Kuva 23) kiinnitettiin muovikiekko, jossa 16 kpl rautalankoja, joten pulsseja saatiin 1/16 kierroksen välein. Pulssien lukumäärä tarkistettiin pyörittämällä roottoria käsin yksi kierros ennen jokaista mittausta, mutta kun ongelmia ei ilmennyt, jätettiin tarkistukset harvempaan.



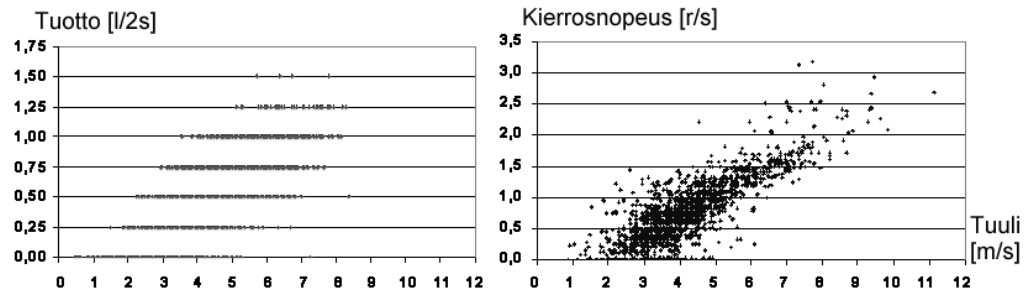
Kuva 23. Roottorin kierroslukumittari asennettuna.

Veden virtaus mitattiin Suomen Vesimittarit OY:n valmistamalla mittarilla. Mittarirummussa on 1 tuuman putkikierteet ja viisariosoitimet 1, 10 ja 100 litran määrille sekä kuutiolaskuri. Tämän lisäksi laitteen pulssianturi antaa oikosulkupulssin aina 0,25 litran välein. Laite on valmistettu ja sinetöity 1995. Virtausta mitattiin tuottopuolelta (Kuva 24), jotta imupuolen liitokset ja vuodot saatiin minimoiduksi. Mittarin toiminta varmistettiin ennen kokeita ja kokeiden jälkeen valuttamalla neljästi 5 l vettä kastelukannulla mittarin läpi eri nopeuksilla. Jokaisen 5 l:n pulssikertymä oli 19 – 20 ja kokonaispulssikertymä joko 80 tai 81.



Kuva 24. Loggeri, vesimittari ja kaksi Nira 6b pumppua asennettuina.

Veden nostokorkeus mitattiin aina sekä ennen mittausjaksoa että mittausjakson jälkeen mittakepillä joen rannassa vaakatasossa olevan rajan suhteen 10 cm:n tarkkuudella. Tämä oli tarpeen, koska noin 50 kilometriä yläjuoksulla sijaitseva vesivoimala muutti joen vedenpinnan korkeutta. Koska yhdenkään mittausjakson aikana muutos ei ollut yli 10 cm:ä, laskettiin alussa mitattu nostokorkeus koko mittausjakson ajalle. Nostokorkeudet olivat luokkaa 2,9-3,7 m. Lopulliset kokeet tehtiin nostokorkeudella 3,6 m.

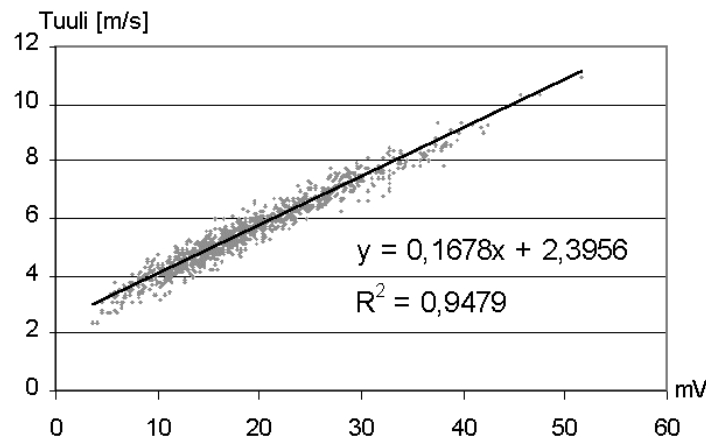


Kuva 25. Esimerkki tyypillisen mittauksen tuloksista.

Kahden sekunnin välein kerätyt pulssikertymät purettiin DataTaker 500:sta pöytä tietokoneelle ja käsiteltiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Mittalukemien pulssikertymien erotuksista laskettiin kullekin 2 s:n jaksolle tuulen nopeus, vedentuotto sekä roottorin kierrosnopeus (Kuva 25). Tulosten käsittelyssä käytettiin 5 arvon yli liukuvaa keskiarvoa.

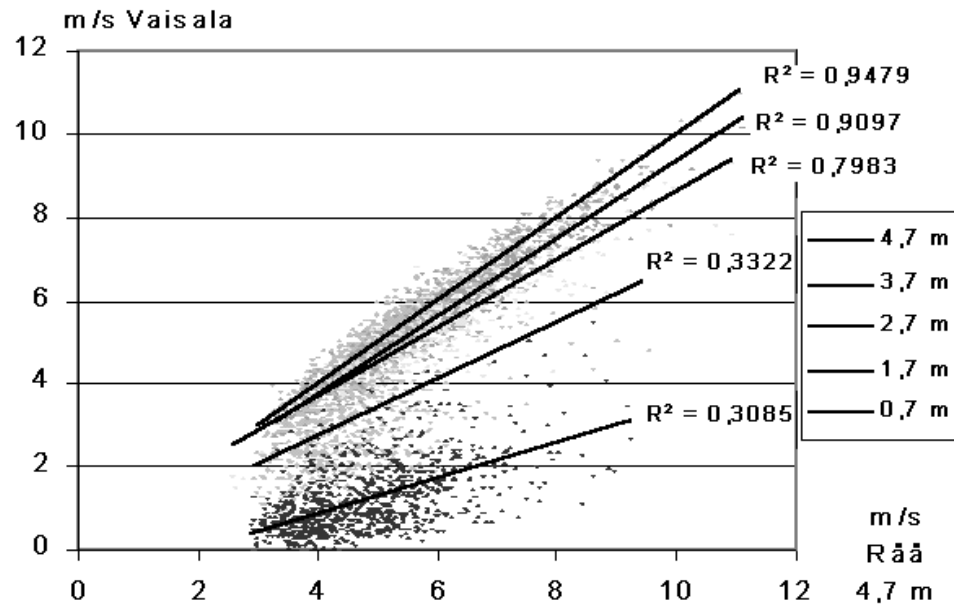
5.3 Tuulen korkeusprofiili

Jottei kokeissa tarvitsisi mitata tuulen nopeutta eri korkeuksilta, laadittiin ensin profiili tuulen nopeudesta eri korkeuksilla, jotta sitten voitiin laskea se mittakorkeus, jolla mitattu tuulen nopeus edustaa koko profiilin tehollista keskiarvoa. Ensin sekä Vaisalan WAA 15 että esikokeissa käytetty Rää Varvin kuppianemometrit kiinnitettiin roottorin yläreunaan 4,7 m korkeudelle ja niiden annettiin pyöriä lähes kahden tunnin ajan. Nyt Rää Varvin lukemaa ei luettu neulaosoittimesta, vaan osoittimen sisältä vedettiin johdot Datatakeriin ja mittarin tuottaman virran sijaan mitattiin jännitettä viisarini ylitse (Kuva 26).



Kuva 26. Rää Varv kuppianemometrin kalibrointi kiinnitettynä roottoriin 4,7 m korkeudelle käyttäen Vaisalan WAA 15 mittaria.

Tämän jälkeen Rää Varv -mittari jätettiin yläreunaan paikoilleen ja Vaisala WAA 15:ä alettiin siirtää alemmas 0,5 m kerrallaan, siten että jokaisella korkeudella tehtiin noin 30 minuutin mittaus. Mittajärjestelyt näkyvät roottorilaitteen mitoitusta käsittelevän kappaleen kuvassa, jossa on käynnissä mittaus 1,7 m korkeudelta (Kuva 20 s. 31). Näin mitattuja tuulen nopeuksia vertailtiin keskenään profiilin muodostamiseksi (Kuva 27).

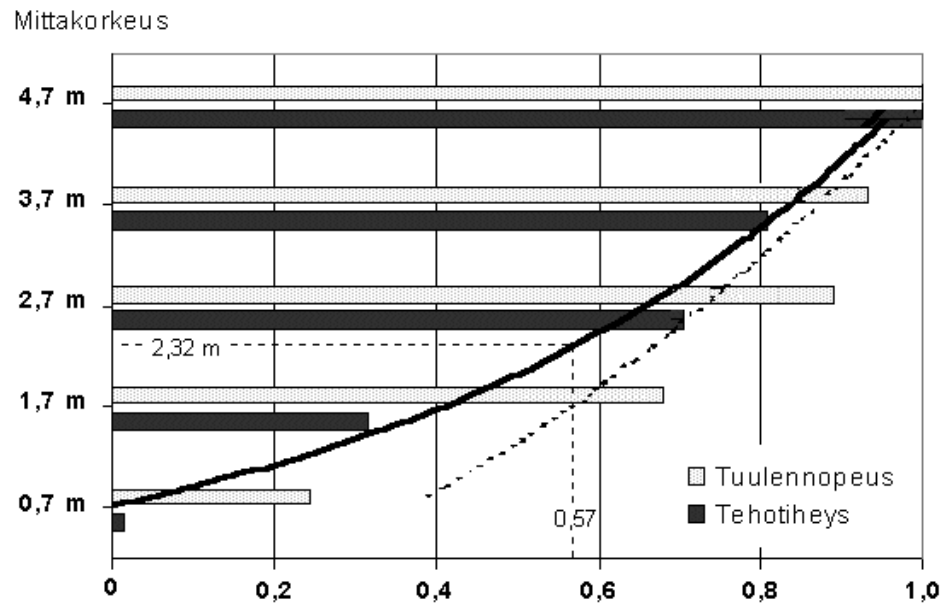


Kuva 27. Eri korkeuksilta mitatut tuulen nopeudet.

Kolmen ylimmän korkeuden mittaukset antoivat hyvin pientä hajontaa, ja siksi tuulten nopeuksien korrelaatiot ovat erittäin hyvät. Mitä alemmaksi verrattavan tuulen nopeuden mittakorkeus tuotiin, sitä suuremmaksi kävi hajonta, mikä johtuu tietenkin maan pinnan tuulta pyörteyttävästä vaikutuksesta, kuten kappaleessa 2.1 mainittiin. Korkeuden vaikutus saatiin silti hyvin esille.

Seuraavaksi kullekin mittapisteelle laskettiin suhteellinen ero 4,7 m korkeudelta mitattuun tuuleen, ja näistä eroista keskiarvot kullekin korkeudelle. Nämä keskiarvot esitetään harmaina palkkeina (Kuva 28), kun 4,7 m korkeudelta mitatun tuulen suhteellinen arvo on 1. Mutta koska tuulen teho riippuu nopeuden kolmannesta potenssista, laskettiin näistä suhdeluista vielä kuutiot, jotka esitetään mustina palkkeina. Suhteellisten tehottiheyksien keskiarvo on 0,57, joka saadun kuvaajan mukaan vastaa *mittakorkeutta* 2,32 m. Vaisala WAA 15 mittarille rakennettiin tämän korkuinen teline.

Kuvassa on myös katkoviivalla maanpinnan karkeusvakion $\alpha=1/6$ mukaan laskettu tehottiheyden kuvaaja. Kuvasta nähdään, että jokirannassa korkeudella on huomattavasti teoriaosassa arveltua dramaattisempi vaikutus tuulen nopeuteen. Saatu kuvaaja vastaa lähinnä $\alpha=1/3$ mukaan laskettuja tuulen tehon arvoja.



Kuva 28. Tuulen suhteellinen nopeus ja tehotiheys roottorin vieressä mittakorkeuden 4,7 m suhteen. Käyrä on tehotiheyden kuvaaja ja katkoviiva karkeusvakion $\alpha=1/6$ mukaan laskettu tehotiheys.

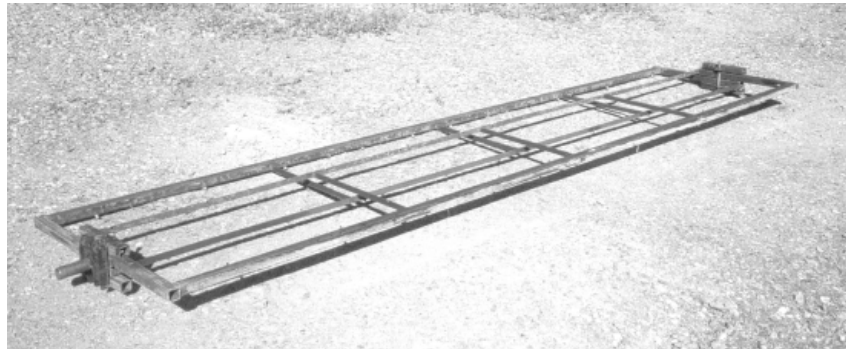
Karkeusvakiolle saatu arvio poikkeaa niin paljon kirjallisuusosassa arvioidusta, että roottorin rakenteellista suunnittelua voidaan pitää tämän perusteella epäonnistuneena. Kuvaajasta nähdään selvästi, ettei alle 1,5 m korkeudelle sijoittuvalla osalla roottoria ole juuri mitään tehollista merkitystä. Mikäli 4 m korkea S-roottori nostettaisiin välille 1,5 – 5,5 m, olisi roottorin suhteellinen tehotiheys 4,7 m korkeudelta mitattuun tuuleen verrattuna keskimäärin 0,84 kun se nyt oli 0,57. Tällä toimenpiteellä saavutettaisiin siis 47 %:n tehonlisäys.

6 KOKEIDEN TULOKSET

6.1 Kokeiden eri vaiheiden pääpiirteet

Kolmen vuoden aikana tehtiin kaikkiaan huomattava määrä erilaisia mittauksia, joiden pohjalta joko tehtiin muutoksia roottoriin tai suunniteltiin uusi roottori. Alkupään kokeet keskittyivät roottorin kuormituksen optimointiin. Tällä oletettiin olevan ratkaiseva vaikutus roottorin hyötysuhteeseen. Iskutuottoa muuttamalla saatiin pieniä eroja eri asetusten välille, mutta mitään selitystä 10 %:n hyötysuhteen saavuttamattomuudelle ei löydetty. Tässä luvussa selvitetään kesällä 2002 rakennetulla 4 m²:n roottorilla tehtyjen kokeiden kulku.

Roottoriin rakennettiin läpisyöttöraoltaan säädettävä akseli (Kuva 29), jolla haarukoitiin läpisyöttöraot 0-30 cm (0-33 %) 3 cm:n portain, jotta voitiin todeta onko aiemmissa kokeissa tutkittu aivan väärää läpisyöttöraon kokoaluetta.

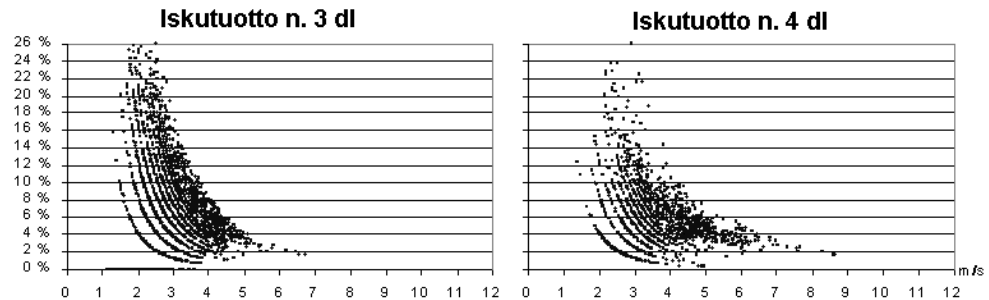


Kuva 29. Raoltaan säädettävä akseli.

Vaikka raon kasvaessa (ja siis roottorin kaventuessa) pumppausteho ensin nousi ja sitten laski jonkin verran, ei roottorin hyötysuhde muuttunut juuri ollenkaan. Noin prosenttiyksikön verran muita parempia hyötysuhteita saavutettiin läpisyöttöraoilla 21-24 cm (24-28 %), joilla myös pumppaustehot olivat parhaat. Tulos on yhteensopiva mm. Savoniuksen (1925) ja Mganilwan (2002) kanssa. Tavoitteeseen nähden alhainen hyötysuhde ei siis selittynyt läpisyöttöraon koolla.

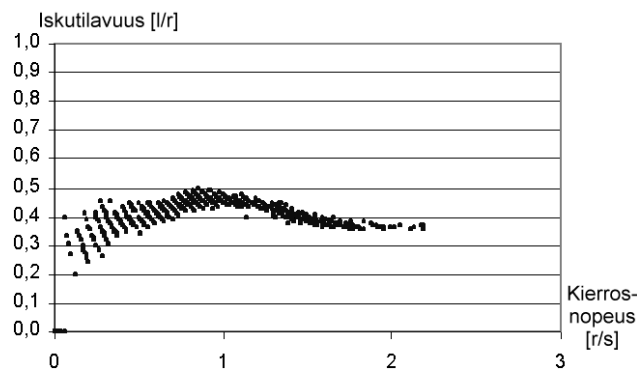
Lopuksi roottorille rakennettiin kevytrakenteinen akseli 24 %:n raolla ja pyörötangolla akselin keskellä (kuten Kuva 7 ja Kuva 8 sivulla 14). Hieman karkeapintaiset, lasikuidusta laminoituvat siipikaaret pinnoitettiin kontaktimuovilla. Tähän roottoriin kytketyllä Nira 6b pumpulla saatiin selvä tulos, jonka mukaan iskutuoton kasvattaminen paransi pumppaushyötysuhdetta. Tässä vaiheessa kokeita eri mittausajojen tuloksista ei tehty tilastoanalyysyjä, vaan sirontakuvioista tulkittiin vain verhoikäyrää. Tämä johtuu siitä, että mittauksiin tuli aina huomattava määrä ”nollalukemia” eli mittapisteitä, jotka osoittivat roottorin pysähtyneen pienellä tuulella. Koska joukkoon olisi sovitettava potenssiikäyrää, ei funktiota tällöin voitu laskea. Sirontakuvioista (Kuva 30) voidaan helposti tulkita ilman trendiviivaakin, että pienempi pumpun asentauttaa roottoria pyörimään alle 3 m/s tuulella, mutta suurempi asento antaa

paremman hyötysuhteen kun tuuli yltyy yli 4 m/s:n. Hyötysuhdepisteiden lajittuminen raidoiksi sirontakuvioon johtuu vesimittarin epätarkkuudesta; kukin mittaustulos voi saada vedentuottoarvon vain 0,25 l:n portailla.



Kuva 30. Pumpaushyötysuhde yhdellä pumpulla tuulen nopeuden suhteen kahdella eri iskunpituudella.

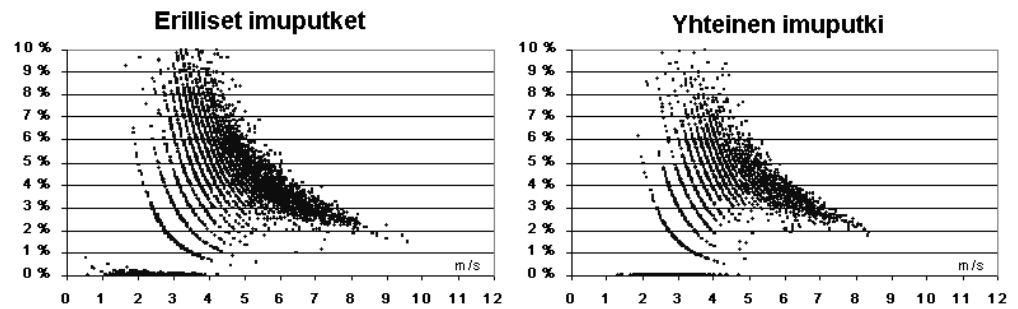
Iskutuotto joudutaan ilmoittamaan pyöristettynä arvona, sillä pumpun tuotto ei ollut pumpausnopeuden suhteen vakio (Kuva 31). Selityksenä iskutuoton kuvaajan muodolle voidaan arvailla seuraavaa: Hitaassa pumpausliikkeessä mäntien venttiilien vuoto pienentää iskutuottoa ja kierrosten noustessa yli 0,5 r/s venttiilit sulkeutuvat paineen noustessa tiiviimmin. Kierrosten noustessa edelleen saattaa paine-ero männän eri puolilla nousta entisestään ja mahdollisesti myös vuoto alkaa jälleen.



Kuva 31. Esimerkki pumpun iskutuotosta kierrosnopeuden suhteen.

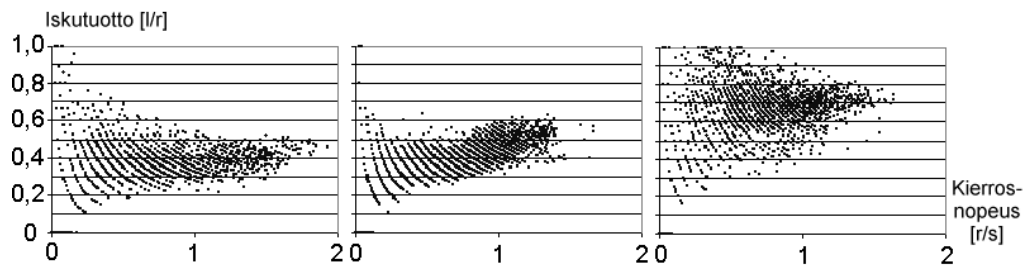
Koska pumpua ei voitu säätää enää suuremmalle, asennettiin roottoriin kaksi samanlaista pumpua ristiin keskenään. Tällä kokoonpanolla tehtiin lopulliset kokeet, jotka tässä luvussa raportoidaan tarkemmin. Nyt voimansiirto mitoitettiin siten, että säätöalue oli noin 0,4-0,8 l/isku. Näissä kokeissa selvitettiin laitteen pumppausteho, pumppaushyötysuhde ja hukkateho.

Aluksi kahden pumpun yhteenliittäminen epäonnistui pahasti. Kierrosten noustessa pumput alkoivat varastaa vettä toistensa sylintereistä ja vedentuotto romahti. Ongelmasta selvittiin liittämällä kumpaankin messinkinen takaiskuventtiili, mutta koska yhden venttiilin hinnalla saa jo hankittua kymmenen metriä imuputkea, kokeiltiin vedentuottoa sekä yhteisellä että erillisillä imuputkilla. Näissä kokeissa ei pumppausteholle eikä hyötysuhteellekaan saatu tilastollisesti merkitsevää eroa. Hyötysuhteen sirontakuvion (Kuva 32) perusteella voidaan arvioida, että erillisillä imuputkilla oltaisiin saatu hieman parempia tuloksia. Seuraavat kokeet uusittiin tällä järjestelyllä.



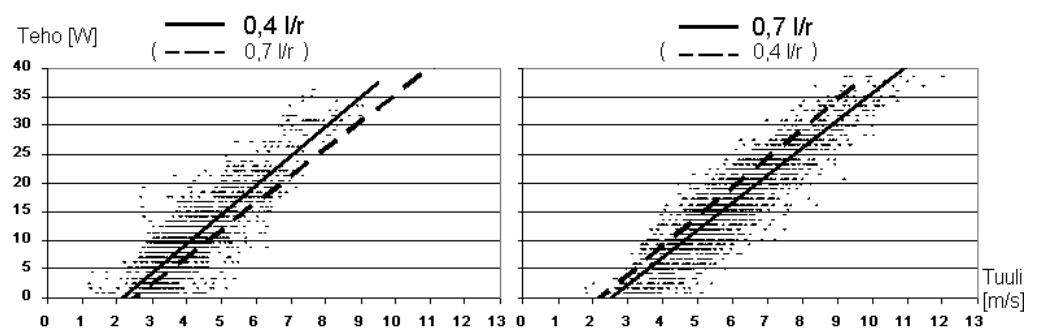
Kuva 32. Pumpaushyötysuhde kahdella pumpulla.

Seuraavaksi kokeiltiin kahden pumpun iskutuoton vaikutusta pumppaustehoon. Koe tehtiin kolmella eri pumppujen asenniolla, joiden iskutuotot näkyvät allaolevasta kuvasta (Kuva 33). Iskutuotoiksi voidaan lukea noin 0,4 l/r, 0,5 l/r ja 0,7 l/r. Kun roottorissa on kaksi pumppua, tasaantuu virtaus niin ettei aiemmin esiteltyä iskutuoton käyränmuotoa enää havaita.



Kuva 33. Kahden pumpun iskutuotto kierrosnopeuden suhteen eri asetuksilla.

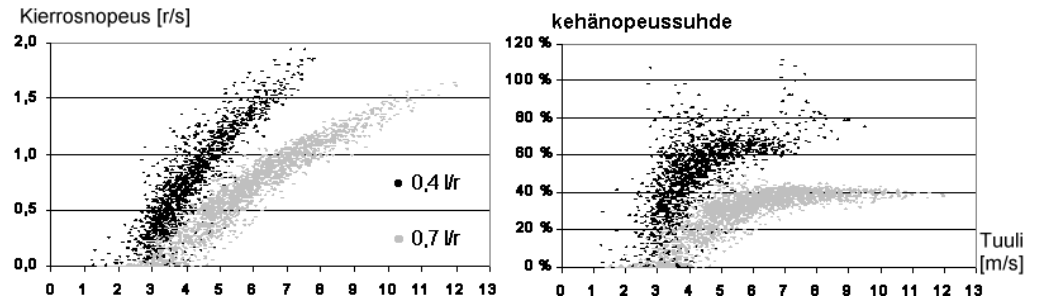
Näillä pumppuasetuksilla saavutetuista pumppaustehon tuloksista saadaan esille selvä, mutta hämmästyttävän pieni ero. Roottorin kuorman lähes kaksinkertaistaminen (iskutuotto 0,4 l:sta 0,7 l:aan) laskee pumppaustehoa vain muutamalla watilla (Kuva 34).



Kuva 34. Pumppausteho tuulen nopeuden suhteen kahdella eri iskutuotolla.

Roottori käyttäytyy yllättävän tasaisesti kuormasta riippumatta. Kierrosnopeus laskee kyllä kuorman noustessa, mutta vääntömomentti vastavasti kasvaa niin paljon, ettei kokonaisteho juurikaan muutu. Tämä on luonnollisesti pumpun ja roottorin yhteensovittamisen kannalta hyvä tulos. Yllättävintä on tehon löyhä riippuvuus kehänopeussuhteesta. Esimerkiksi Modin ym. (1983) mukaan kehänopeussuhteen putoaminen 100 %:sta 60 %:iin laskisi tehokkuutta

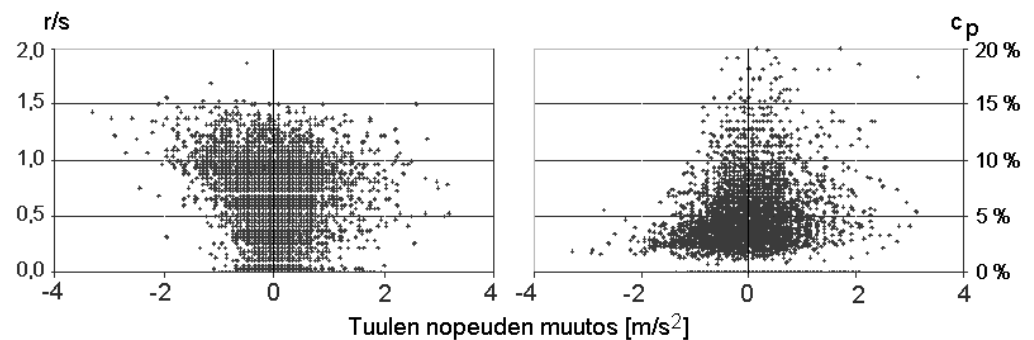
yli neljäsosalla. Joissain yhden pumpun kokeissa kehänopeussuhde nousi noin 75 %:iin, mutta tällöinkaan ei tehokkuus kasvanut muihin kokeisiin verrattuna. Tulos herättää epäilyksen, että huipputeho jäisi jostain muusta syystä saavuttamatta, ja siksi pudotus ei olisi niin voimakas. Joka tapauksessa kahdella pumpulla ja iskutuotolla noin 0,4 l/r saavutettiin kaikista kokeista parhaat pumppaustehot, joten näiden asetusten mukaisten kokeiden tulokset esitellään yksityiskohtaisemmin.



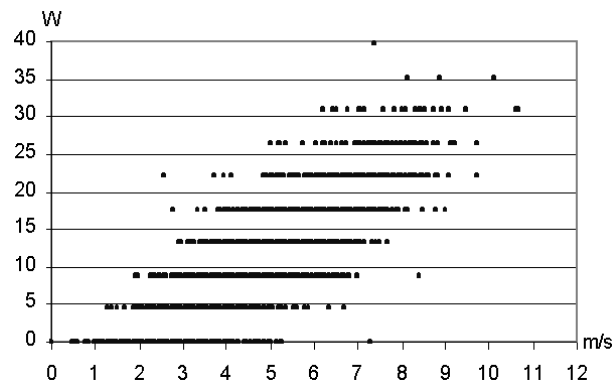
Kuva 35. Kierrosnopeus ja kehänopeussuhde tuulen nopeuden suhteen kahdella eri iskutuotolla pumpattaessa kahdella pumpulla.

6.2 Pumppausteho

Kaikki edelläesitetyt sirontakuviot ovat esittäneet 5 arvon yli liukuvia keskiarvoja, sillä siten suodatetut tulokset ovat visuaalisesti helpoiten tulkittavia. Tätä käytäntöä tuki myös oletus siitä, ettei roottori voisi reagoida tuulen puuskiin yhtä herkästi kuin tuulimittari. Siitä huolimatta että ilmiö havaittiin aikaisempien roottorimallien kokeissa, ei ilmiötä – yllättävää kyllä – saatu viimeisissä kokeissa esille, kuten sirontakuvioiden tasaisesta jakaumasta (Kuva 36) nähdään. Jos roottorilla olisi hitautta, tulisi hyötysuhteen olla alhaisempi tuulen kiihtyessä kuin sen hidastuessa, mutta roottori on nähtävästi niin kevyt, ettei näin käy.

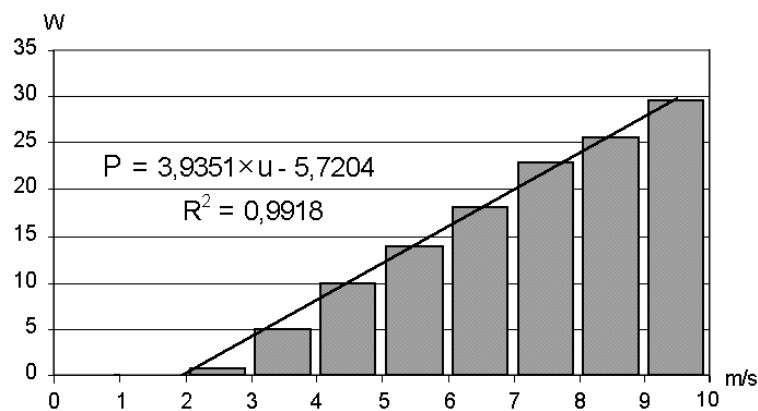


Kuva 36. Kierrosnopeuden ja hyötysuhteen jakauma tuulen nopeuden muutoksen suhteen.



Kuva 37. Pumppaustehon havainnot tuulen nopeuden suhteen.

Edellämainituista syistä pumppausteho määritetään suodattamattomien mittalukemien pohjalta. Pumppaustehon sirontakuviassa on huomattavasti hajontaa (Kuva 37), joten lineaarisen regression sijoittaminen siihen suoraan on vaikeaa. Tästä syystä havainnot jaettiin 1 m/s luokkiin ja näistä luokista lasketuista keskiarvoista laadittiin histogrammi (Kuva 38). Regressiokerroin $R^2 = 0,9918$ ei kerro suoran sopivuudesta havaintoaineistoon vaan havaintoaineiston lineaarisuudesta; havaintoaineiston sirontakuviioon (Kuva 37) sijoitettuna suoran regressiokerroin olisi $R^2 = 0,7305$, jota voidaan myös pitää hyvänä. Pumppausteho notkahtaa selvästi suoran arvoista tuulen nopeuksilla 2-4 m/s, mutta kuten jo kappaleessa 2.6 todettiin, on vedentuoton kannalta merkityksellinen tuulialue 4-10 m/s, ja tällä alueella tehon nousu on erittäin lineaarista.



Kuva 38. Pumppausteho tuulen nopeuden suhteen.

6.3 Hukkateho

Jotta voitiin selvittää roottoriosan tuuli-mekaaninen hyötysuhde, oli selvitettävä laakereihin, voimansiirtoon, pumpunvarsiin ja virtausvastuksiin menetettävän tehon suuruusluokka. Tämä päätettiin tehdä yksinkertaisella roottorin hidastuvuuskokeella. Roottorista irrotettiin siipikaaret ja sille annettiin käsin haluttu alkunopeus sekuntikellon tahtiin, jonka jälkeen kelloitettiin roottorin pysähtymiseen kuluva aika ja ämpäriin laskettu vedentuotto mitattiin tältä ajalta. Nostokorkeus oli sama kuin pumppaustehon kokeessa, 3,65 m ja pumppujen iskunpituudet samat kuin kokeessa n. 0,5 l iskutuotolla. Vesimäärät olivat alle kolme litraa.

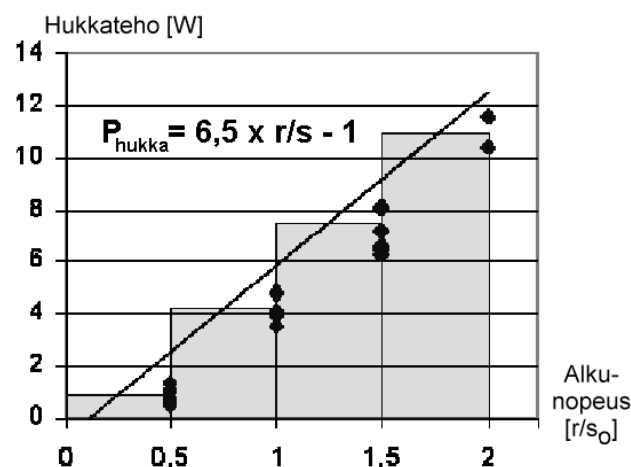
Roottorille laskettiin hitausmomentti J yhdistelemällä kaikkien roottoriosien massat ja muodot. Momentti jäi melko alhaiseksi. Koska edes-takaisin liikkuvien pumpunvarsien liike-energiaa oli vaikea ottaa huomioon, kiinnitettiin roottorin ulkosäteelle kaksi 10 kg:n lisäpainoa vähentämään huomioon ottamattomien kappaleiden suhteellista merkitystä. Momentit laskettiin seuraavilla kaavoilla (MAOL 1991):

Vaneripäädyt	$0,5 \times m \times r^2$	1,794 kgm ²
Vaaka- ja vinotuet	$1/3 \times m \times l^2$	0,202 kgm ²
Kaarien kiinnikkeet	$m \times r^2$	0,128 kgm ²
Lisäpainot 2×10 kg	$m \times r^2$	3,528 kgm ²
Yhteensä	$J =$	5,652 kgm ²

Pyörimisenergia E_k mittauksen lähtöhetkellä t_0 laskettiin sitten seuraavalla kaavalla (MAOL 1991):

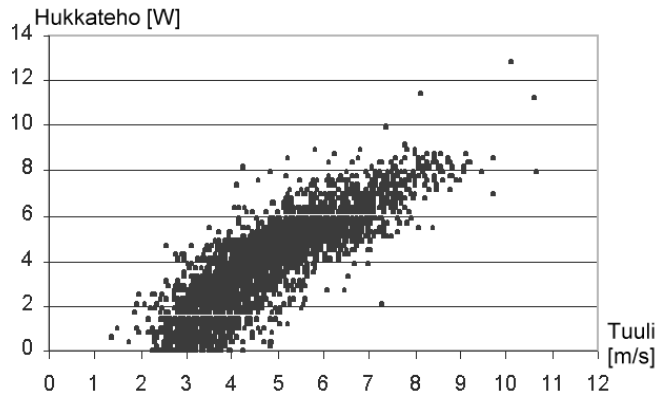
$$E_k = 0,5 \times J \times \omega^2 \quad \text{Kaava 5}$$

Kun tästä sitten laskettiin roottorin hidastumisen aikana nostetun vesimäärän potentiaalienergian muutos, saatiin erotukseksi arvio hukkaenergialle. Tämä puolestaan hidastumisajalla jaettuna ilmoitti hukkatehon. Roottorille annettiin lähtönopeudet 0,5 r/s, 1,0 r/s, 1,5 r/s ja 2,0 r/s. Muilla nopeuksilla tehtiin 6 mittausta, mutta lähtönopeudella 2,0 r/s vain kaksi, sillä roottorin kiihdyttäminen tähän nopeuteen käsivoimin oli erittäin vaikeaa. Koetulokset nähdään sirontakuviosta (Kuva 39).



Kuva 39. Hukkatehon mittaustulokset ja karkea interpolointi.

On vielä otettava huomioon, ettei esimerkiksi lähtönopeudeltaan 1,0 r/s koeksessa saatu hukkateho 4,23 W ole kyseisen pyörimisnopeuden hukkateho, vaan keskiarvo lähtö- ja pysähtymishetkien väliltä – onhan selvää, että hukkatehon on oltava pyörimisnopeudella 1 r/s huomattavasti 4 W:a suurempi. Tästä syystä tuloksille tehtiin karkea graafinen interpolointi siten, että saatu tulos yleistettiin kyseisen ja edellisen lähtönopeuden keskiarvoksi (palkki kuvassa) ja nämä keskiarvot liitettiin yhteen suoralla. Siten hukkateholle saatiin arvio $P_{\text{hukka}} = 6,5 \times r/s - 1$.



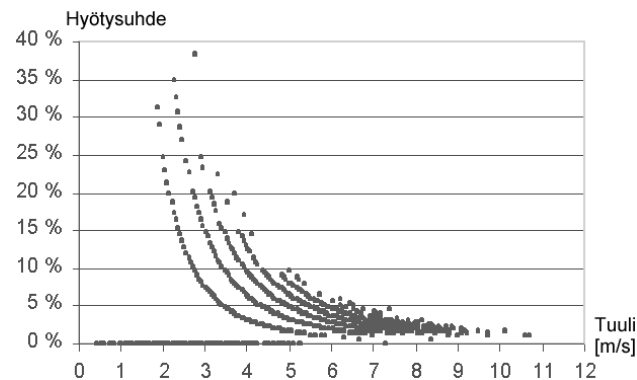
Kuva 40. Hukkateho tuulen nopeuden suhteen iskutuotolla n. 0,5 l.

Tällä funktiolla lasketut, käsittelyssä olevan aineiston hukkatehot ovat luokkaa 3-10 W tuulialueella 4-10 m/s (Kuva 40), eli noin 30-40 % pumppaustehosta. Siten voimansiirrolle ja pumpuille voidaan arvioida noin 70-75 %:n hyötysuhde, joka on 50 %:n tavoitetta huomattavasti korkeampi. Niinpä koko roottorilaitteen alhainen kokonaishyötysuhde ei selity hukkatehon suuruudella.

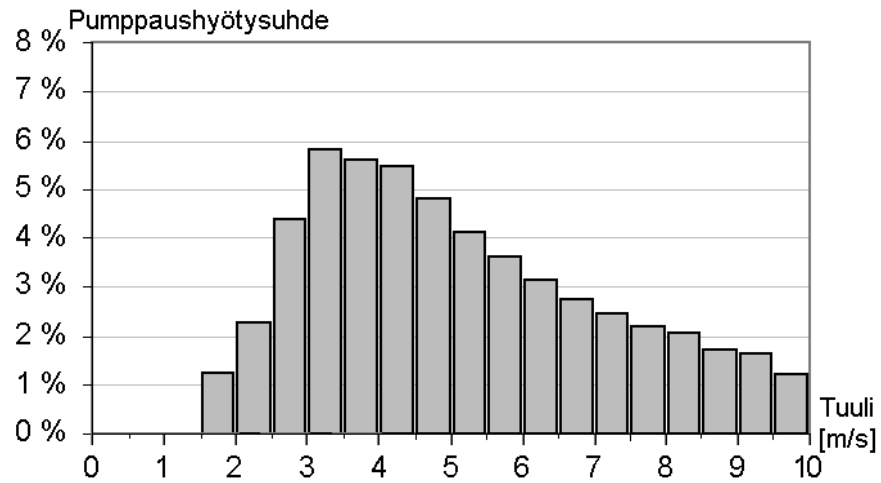
6.4 Laitteen hyötysuhde

Vaikka kappaleessa 2.2 kerrottiin, miten hyötysuhde on ongelmallinen roottorin paremmuutta kuvaava tunnusluku, esitellään tässä kuitenkin käsittelyssä olevalle roottorille laskettu hyötysuhde, jotta roottoria voitaisiin vertailla muiden tutkimusten vastaaviin tuloksiin. Ensinnä esitellään *kokonaishyötysuhde* eli vedennostotehon ja roottorin sieppauspinta-alan läpi puhaltavan tuulen tehon suhde, sitten arvioidaan *roottoriosan tuuli-mekaanista hyötysuhdetta*, eli akseloitujen siipien kykyä muuttaa tuulen liike-energia mekaaniseksi pyörimisenergiaksi.

Kuten hyötysuhteen sirontakuviosta (Kuva 41) nähdään, ei havaintoaineistoon voida sijoittaa trendiviivaa, sillä alle 5 m/s tuulella alkaa roottori pysähdellä. Samalla tavalla kuin roottorin tehon tapauksessa, jaettiin havainnot luokkiin – tällä kertaa 0,5 m/s jaotuksella – ja näille luokille laskettiin keskiarvot histogrammin (Kuva 42) muodostamiseksi.

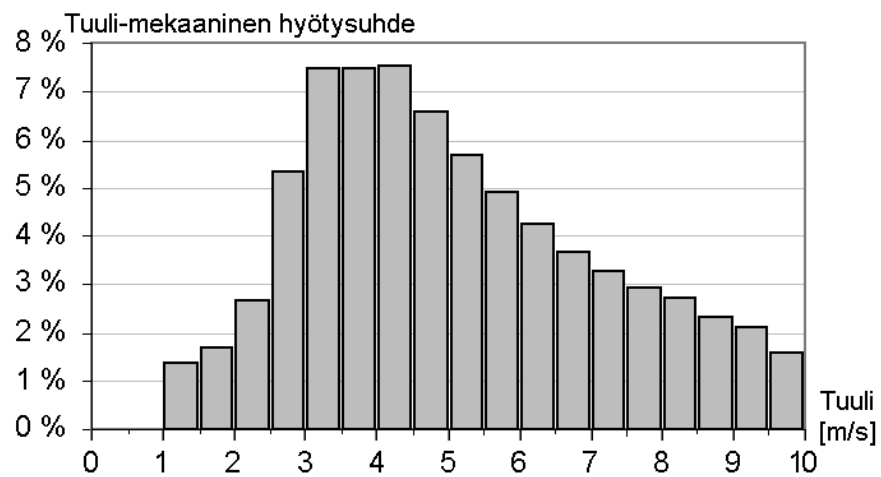


Kuva 41. Roottorilaitteen pumppaushyötysuhde tuulen nopeuden suhteen iskutuotolla n. 0,5 l ja kahdella pumpulla.



Kuva 42. Pumppaushyötysuhde tuulen nopeuden suhteen.

Kun pumppaustehoon summataan edellisessä kappaleessa 6.3 esitelty hukka-teho, saadaan käsitys roottoriosan tuuli-mekaanisesta hyötysuhteesta (Kuva 43). Hyötysuhde on yli 4 m/s tuulilla noin kolmanneksen pumppaus-hyötysuhdetta korkeampi mutta yhä erittäin kaukana asetetusta 20 %:n tavoit-teesta.



Kuva 43. Roottoriosan tuuli-mekaaninen hyötysuhde tuulen nopeuden suhteen.

7 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Tulosten arviointi ja luotettavuus

Kokeiden mittauksissa keskeisimpien mittausten – tuulen nopeuden ja veden tuoton – tuloksilla on kummallakin etunsa ja ongelmansa.

Jokainen tuulen nopeuden tulos on mittalukemana erittäin tarkka. Laittevalmistaja ilmoittaa anturin tarkkuudeksi $\pm 0,1$ m/s, ja ennen kokeita järjestetyssä koestuksessa päästiin tarkkuuteen $\pm 0,54$ m/s (3,43 % tuulella 15,73 m/s). Ongelma onkin mittauksen sisältö; eli mitä tuulta on itse asiassa mitattu. Siitä huolimatta, että mittari oli tehollisessa mielessä oikealla korkeudella ja roottorin kanssa tuulirintaman suhteen samalla linjalla, ei voida väittää että mittari olisi mitannut juuri samaa tuulta kuin minkä roottori sai osakseen, niin pyörteiseksi tuuli osoittautui tuulen profiilin kokeessa, kuten kappaleessa 5.3 esitettiin. Roottorin tukirakenteiden sisällä tuulen nopeus saattaa olla alhaisempi ja ainakin pyörteisempi kuin roottorin vieressä, ja tällöin on taas vaikea sanoa kumpu tuulta olisi kokeiden kannalta mielekkäämpää mitata – jos mitaaminen roottorin sisältä olisi edes mahdollista. Määriteltäessä roottoriosan tuuli-mekaanista hyötysuhdetta, tulisi tietää juuri se tuuli, joka todella osuu roottoriin, kun taas esitettäessä laitteen vedentuottoa paikallisiin tuuliolosuhteisiin suhteutettuna, on ”roottorin ympärillä” puhaltava tuuli mielekkäämpi vertailukohta.

Vedentuoton mittauksessa validiteetti on puolestaan erittäin hyvä; kokeet mitaavat aivan varmasti juuri pumpattua vettä. Sen sijaan jokaisen yksittäisen tuloksen tarkkuus on huono. Kun virtausmittarin erottelukyky oli 0,25 l ja mittausjakso 2 s, saatiin virtausnopeudelle käytännössä jokin seitsemästä lukuarvosta (0,125 l/s, 0,25 l/s, 0,375 l/s, 0,5 l/s, 0,625 l/s, 0,75 l/s tai 0,875 l/s). Edelliseltä mittalukemalta ”mittaamatta jäänyt” 0,25 litran tuotto näkyy kuitenkin seuraavan mittauksen arvossa, eli virheet jakautuvat tasan todellisen virtauksen ylä- ja alapuolelle ja menettävät merkitystään tulosten käsittelyssä.

Kierrosnopeuden mittauksessa jokainen mittalukema on tarkkuudeltaan $\pm 0,0625$ kierrosta (1/16). Koska mittaväli oli 2 s, saatiin kierrosnopeudella 0,5 r/s epävarmuus $\pm 1/16 / (2 \times 0,5 \text{ r}) = \pm 6,25 \%$, nopeudella 1 r/s $\pm 1/16 / (2 \times 1 \text{ r}) = 3,13 \%$ ja nopeudella 2 r/s $\pm 1/16 / (2 \times 2 \text{ r}) = \pm 1,56 \%$. Havaintoaineisto on kuitenkin suuri – yli 5000 havaintoa – joten virheiden voidaan olettaa jakautuneen tasan todellisen kierrosnopeuden ylä- ja alapuolelle, jolloin näiden virheiden vaikutus nollautuu regressioita tai keskiarvoja laskettaessa.

Alhaisilla tuulen nopeuksilla roottorilaitteen pumppaushyötysuhde oli hieman muiden tutkimusten (Modi ym. 1983, Mganilwa 2002) tuloksia parempi, poislukien Savoniuksen (1925) kyseenalaistetut tulokset. Tuulella 7 m/s laite jää noin prosenttiyksikön verran Mganilwan tuloksista ja vasta tuulella 9 m/s laskee kokonaishyötysuhde Modin ym. tulosten tasolle. Itse roottoriosan tuuli-mekaaninen hyötysuhde oli yli 4 m/s tuulilla noin kolmanneksen pumppaushyötysuhdetta korkeampi mutta yhä erittäin paljon tuulitunneleissa tehty-

jen kokeiden n. 25 %:n hyötysuhteita (Ushiyamaja Nagai 1988, Modi ja Fernando 1989) alhaisempi.

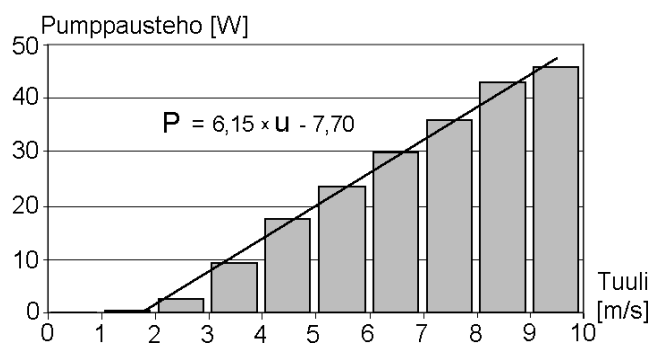
Näissä puitteissa voidaan saatuja mittaustuloksia pitää luotettavina ja prototyypiroottorilla saavutettua *pumppaustehon* kuvaajaa todenmukaisena. *Hyötysuhteen* tulkinta on hieman kyseenalaisempi ja hukkatehon koejärjestely lähinnä vain suuntaa-antava, mutta ottaen huomioon tulosten suuruusluokan muihin vastaaviin kokeisiin verrattuna, on tulosten tulkinta vankalla pohjalla.

7.2 Roottorilaitteen kehittäminen tulosten pohjalta

Tulokset ja käyttökokemukset antavat aihetta muuttaa hieman roottorin rakennetta. Ensinnäkin todettiin että roottori voisi käytettävyyden kannalta olla vielä hieman suurempi, eikä tämä muutos nostaisi valmistuskustannuksia merkittävästi, pystyputken ja lasikuidun menekin myötä ehkä 20-30 €. Toiseksi tuulen korkeusprofiilikokeessa roottorin havaittiin olevan sijoitettu liian matalalle, roottorin alareunan ollessa vain 0,7 m:n korkeudella.

Tulosten pohjalta roottoria on päätetty muuttaa siten, että halkaisija kasvetaan 1,25 m:iin jolloin sieppauspinta-alaksi tulee 5 m². Tämä tarkoittaa samalla hyötysuhteella 39 %:n tehonlisäystä nyt rakennettuun 3,6 m²:n roottoriin verrattuna. Kappaleessa 0 todettiin, että roottorin nostaminen 0,7 m:n korkeudelta 1,5 m:iin kasvattaisi pumppaustehoa 47 %. Niinpä näillä muutoksilla pitäisi saavuttaa 104 %:n pumppaustehon lisäys, eli vedentuottokyky saadaan kaksinkertaistetuksi. Samalla roottorin halkaisijan kasvaessa kierrosnopeus laskee noin kolmanneksen, jolloin hukkatehon osuus saattaa laskea hieman.

Ennen kuin pumppaustehoa voidaan verrata kappaleessa 2.6 esitettyihin tuulisuuksiin ja siis kappaleessa 4.2 mainittuihin kolmeen kastelualueeseen, on roottorin tehokkuutta korjattava hieman alemmas, sillä tuulisuutta käsiteltiin 3 m korkeudelta mitattuna, mutta kokeissa mittari oli korkeudella 2,32 m. Korkeusprofiilin kuvaajasta (Kuva 28, s. 40) voidaan lukea että korkeudella 3 m on tehotiheyden suhdeluku 0,66 verrattuna mittauskorkeuteen 4,7 m, kun taas mittauskorkeuden 2,32 m suhdeluku oli 0,57. Jotta tässä määritellyn kaltaisen roottorin pumppaustehon arvio olisi verrattavissa 3 m korkeuden tuulisuuslukemiin, on 204 %:n pumppaustehoa alennettava 15 % alas 173 %:iin, eli roottorin teho olisi 73 % kokeissa käytettyä roottoria parempi (Kuva 44).



Kuva 44. Esitetyn kaltaisen, 5 m²:n roottorilaitteen oletettu pumppausteho n. 3 m:n korkeudelta mitatun tuulen nopeuden suhteen.

Pumppausteho on helppo muuttaa vedentuotoksi m^3/vrk jakamalla teho nostokorkeudella ja kertomalla muuntokertoimella $8,808 \text{ s}^3/\text{m}$. Tämä on kuitenkin vain vedentuotto hetkellisellä tuulella. Todellinen tuotto selviää vasta kun pumppausteho kerrotaan eri tuulen nopeuksien paikallisten esiintymistodennäköisyyksien kanssa (Taulukko 4). Esimerkiksi tuulen 4 m/s vedentuotto 4 m:n nostokorkeudella olisi n. $31 \text{ m}^3/\text{vrk}$, mutta keskituulella 4 m/s tuotto olisikin $36 \text{ m}^3/\text{vrk}$. Ero on melko pieni verrattuna ilmiön vaikutuksiin esimerkiksi sähkövoimaloiden kohdalla, sillä tässä käsiteltävän roottorin hyötysuhde laskee jyrkästi tuulen nopeuden noustessa.

Taulukko 4. Suunnitellun 5 m^2 roottorin vedentuotto [m^3/vrk] tuulen nopeuden paikallisen keskiarvon ja nostokorkeuden suhteen.

		Tuulen nopeuden paikallinen vuosikeskiarvo [m/s]								
		3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Nostokorkeus [m]	1	80,0	116,4	143,7	171,3	198,8	226,6	254,0	281,3	309,1
	2	40,0	58,2	71,8	85,6	99,4	113,3	127,0	140,6	154,5
	3	26,7	38,8	47,9	57,1	66,3	75,5	84,7	93,8	103,0
	4	20,0	29,1	35,9	42,8	49,7	56,6	63,5	70,3	77,3
	5	16,0	23,3	28,7	34,3	39,8	45,3	50,8	56,3	61,8
	6	13,3	19,4	23,9	28,5	33,1	37,8	42,3	46,9	51,5
	7	11,4	16,6	20,5	24,5	28,4	32,4	36,3	40,2	44,2
	8	10,0	14,6	18,0	21,4	24,9	28,3	31,7	35,2	38,6

7.3 Roottorilaitteen kastelukyky perunanviljelyksillä

Teoriaosan kappaleessa 4.2 osoitettiin kolme tuulivoima-salaojakastelun kannalta keskenään erilaista aluetta Suomessa, jotka ovat näkyvillä myös allaolevassa taulukossa (Taulukko 3). Yhdistämällä edellisessä kappaleessa esitellyn 5 m^2 :n roottorin vedentuottoluvut kyseisten alueiden sadannan vajeisiin, voidaan esittää pinta-ala, jonka vedetarpeen yksi roottori pystyy keskimäärin tyydyttämään nimenomaisella alueella nostokorkeudesta riippuen.

Taulukko 5. Yhden 5 m^2 roottorin tyydyttämä perunapinta-ala [ha] eri nostokorkeuksilla Suomessa keskimääräisenä vuotena.

		Tuulen nopeuden paikallinen vuosikeskiarvo [m/s]								
		Länsi- ja lounaisrannikko (200 mm = $14,8 \text{ m}^3/\text{vrk}$)			Etelärannikko (180 mm = $13,3 \text{ m}^3/\text{vrk}$)			Keski- ja Itä-Suomi (140 mm = $10,4 \text{ m}^3/\text{vrk}$)		
		4	4,5	5	4	4,5	5	3,5	4	
Nostokorkeus [m]	1	9,7	11,6	13,4	10,8	12,9	14,9	11,2	13,8	
	2	4,9	5,8	6,7	5,4	6,4	7,5	5,6	6,9	
	3	3,2	3,9	4,5	3,6	4,3	5,0	3,7	4,6	
	4	2,4	2,9	3,4	2,7	3,2	3,7	2,8	3,5	
	5	1,9	2,3	2,7	2,2	2,6	3,0	2,2	2,8	
	6	1,6	1,9	2,2	1,8	2,1	2,5	1,9	2,3	
	7	1,4	1,7	1,9	1,5	1,8	2,1	1,6	2,0	
	8	1,2	1,4	1,7	1,4	1,6	1,9	1,4	1,7	

Asian kääntäminen toisin päin siten, että halutulle pinta-alalle ilmoitettaisiin tarvittava roottorien lukumäärä ei ole yhtä yksinkertaista, sillä roottorien lukumäärä on mitoittettava luonnollisesti kokonaislukuin. Tällöin tullaan rajanvetotapauksiin, sillä alimääräinen kastelu ei tuota tappioita vaan päinvastoin koko roottorin investointipääoma tulee hyötykäyttöön, kun taas ylikastelu on täysin turhaa ja siten tappiollista. Ilmaston vielä muuttuessa kovaa vauhtia yhä arvaamattomammaksi on roottorien lukumäärä mitoittettava kompromissein, mutta lähtökohtaisesti alakanttiin.

7.4 Menetelmän taloudellinen kanattavuus

Tässä kappaleessa esitellään edellä mainittujen pinta-alojen (Taulukko 5) ja kappaleessa 4.4 esitetyn roottorikustannuksen 112 €/v mukaan laskettuja arvioita roottorikustannuksista salaajakasteluun. Kuten jo mainittiin, on roottorien lukumäärä mitoittettava suurpiirteisesti, joten seuraavassa taulukossa (Taulukko 6) esitettävät roottorikustannukset perunahehtaaria kohti vuodessa on pyöristetty lähimpään kymmeneen euroon. Vaikka käytännön oloissa kustannus saattaa muuttua paljonkin tilanteesta riippuen, saadaan taulukosta hyvä ja perusteltu käsitys kustannusten suuruusluokasta ja niihin vaikuttavien tekijöiden merkityksestä.

Kaikilla alle 8 m:n nostokorkeuksilla ja joka puolella Suomea roottorin hehtaarikustannus on alle 100 euroa vuodessa, pääosin luokkaa 30-70 €/ha/vuosi. Tämä edellyttää luonnollisesti, että viljelyssä on useampi hehtaari, jotta roottorien lukumäärä voidaan mitoittaa oikein. Kustannukset ovat selvästi sähköpumppaamolle kappaleessa 3.3 laskettua 140 euron hehtaari vuosikustannusta alhaisemmat, eli tältä osin tutkimuksen tavoite saavutettiin.

Taulukko 6. Roottorikustannus €/ha/vuosi perunaviljelyksillä eri nostokorkeuksilla Suomessa kymmeneen euroihin pyöristettynä.

		Tuulennopeuden paikallinen vuosikeskiarvo [m/s]								
		Länsi- ja lounaisrannikko			Etelärannikko			Keski- ja Itä-Suomi		
		4	4,5	5	4	4,5	5	3,5	4	
Nostokorkeus [m]	1	10	10	10	10	10	10	10	10	
	2	20	20	20	20	20	20	20	20	
	3	40	30	30	30	30	20	30	20	
	4	50	40	30	40	40	30	40	30	
	5	60	50	40	50	40	40	50	40	
	6	70	60	50	60	50	50	60	50	
	7	80	70	60	70	60	50	70	60	
	8	90	80	70	90	70	60	80	70	

Kappaleessa 3.3 esiteltiin salaajakastelun kustannuksia ja esitettiin, että salaajakastelun edellyttämien perusparannusten kustannukset ovat kaltevuudesta ja maalajista riippuen luokkaa 1.600-2.000 €/ha. Kun näiden arvioiden mukaan lasketaan 15 vuoden ja 5 %:n korkokannan mukaiset poistot, ovat perusparannusten vuosikustannukset luokkaa 150-190 €/ha. Koko tuulivoima-

salaojakastelu-menetelmän kustannukset saadaan selville siis summaamalla ylläolevat roottorikustannukset näihin perustuskustannuksiin. Liitteessä 2 on laskettu esimerkinomaisesti kustannuksia maantieteellisen alueen, keskituulen, ojituskustannuksen ja nostokorkeuden suhteen. Kustannukset ovat luokkaa 100-200 €/ha/v salaojitetulla pellolla ja 250-450 €/ha/v salaojittamattomalla pellolla. Tämän lisäksi on muistettava, että hankkeille myönnetään jo aiemmin mainitut 52 €/ha/v ympäristötuen erityistukea tukikaudella 2000-2006.

Salaojakastelun hyödyistä kertovassa kappaleessa 3.2 kerrottiin perunanviljelyksillä Tyrnävällä saaduista 17,3-18,8 tonnin hehtaarisadonlisäyksistä. Tärkkelysperunan hinnalla n. 8 snt/kg tämä tarkoittaisi noin 1.400 €:n lisätuloa hehtaarilta. Vertaamalla tätä summaa maksimissaan muutaman sadan euron kustannuksiin, on menetelmän helppo todeta olevan erittäin kustannustehokas. Noin 2 tonnin sadonlisäys jo entuudestaan salaojitetulla pellolla ja 3-6 tonnin vielä salaojittamattomalla kattaisi menetelmän kustannukset lähes kaikissa olosuhteissa.

Sadetuskastelun 210-270 €/ha/v kustannus alittuu silloin, kun tuulivoimasalaojakastelu-järjestelmä perustetaan jo entuudestaan salaojitettuun peltoon. Jos salaojittamattomasta peltoa halutaan kastella, on sadetuskastelu todennäköisesti tässä esiteltyä menetelmää edullisempi mutta viljelyteknisesti vaikea.

Tässä yhteydessä on vielä syytä mainita, ettei tämä kannattavuustarkastelu ole mitenkään ottanut ympäristöarvoja huomioon – ravinnetaloutta tai energian uusiutuvuutta ja kotimaisuutta.

7.5 Menetelmän edellytyksistä Suomen ulkopuolella

Eri viljelykulttuureja eri maissa on vaikea vertailla keskenään, mutta joitain johtopäätöksiä menetelmän kannattavuudesta muualla kuin Suomessa voidaan vetää.

Keski-Euroopassa sadetetaan peruna-alasta 70-80 % ja Tanskassa ja Ruotsisakin perunaviljelmistä pystytään sadettamaan selvästi yli puolet (Kuisma 1994). Sadanta touko-syyskuussa on Etelä-Ruotsissa samaa luokkaa kuin Suomen sisäosissa, 250-300 mm (Helgesson 1997), mutta vedentarpeen ja siis sadannan vajeen voidaan suotuisempien kasvuolojen ansiosta olettaa olevan korkeampi.

Tuulivoiman parhaat hyödyntämisalueet Euroopassa ovat Iso-Britanniassa, Norjassa ja Islannissa, joiden keskituulen nopeudet ovat 8-10 m/s. Edellytykset ovat hyvät myös rannikkoalueilla Belgiassa, Hollannissa, Saksassa, Tanskassa ja eteläisessä Ruotsissa, joilla keskituulen nopeudet ovat luokkaa 6-8 m/s (Svensk energiförsörjning 2000) eli tehollisessa mielessä Suomeen nähden kolmin – nelinkertaiset.

Muun Länsi-Euroopan lupaavat tuulivoiman edellytykset yhdistettynä ahkeaan sadettamiseen antavat olettaa, että menetelmälle olisi hyvät edellytykset Suomen ulkopuolellakin.

7.6 Menetelmän soveltaminen käytäntöön

Tutkimuksen tieteellistä osaa voidaan pitää onnistuneena ja roottorilaitteen kehittäminen tulee vielä jatkumaan tuotekehityksenä. Tulokset ovat hyviä vaikka herättävätkin joitain uusia kysymyksiä. Menetelmää varten onnistuttiin kehittämään laite, joka on kustanustehokas ja ostoenergialla tapahtuvaa pumppausta edullisempi. Mitään tyhjentävää selitystä roottorin muihin tutkimuksiin nähden huomattavasti alhaisemmalle hyötysuhteelle ei silti kyetty antamaan. Tämä ei kuitenkaan estä markkinoimasta menetelmää käytännön sovelluksiin, onhan menetelmä helppokäyttöinen ja melko huoltovapaa, lisää tuloja ja taasoittaa sadon vuosieroja.

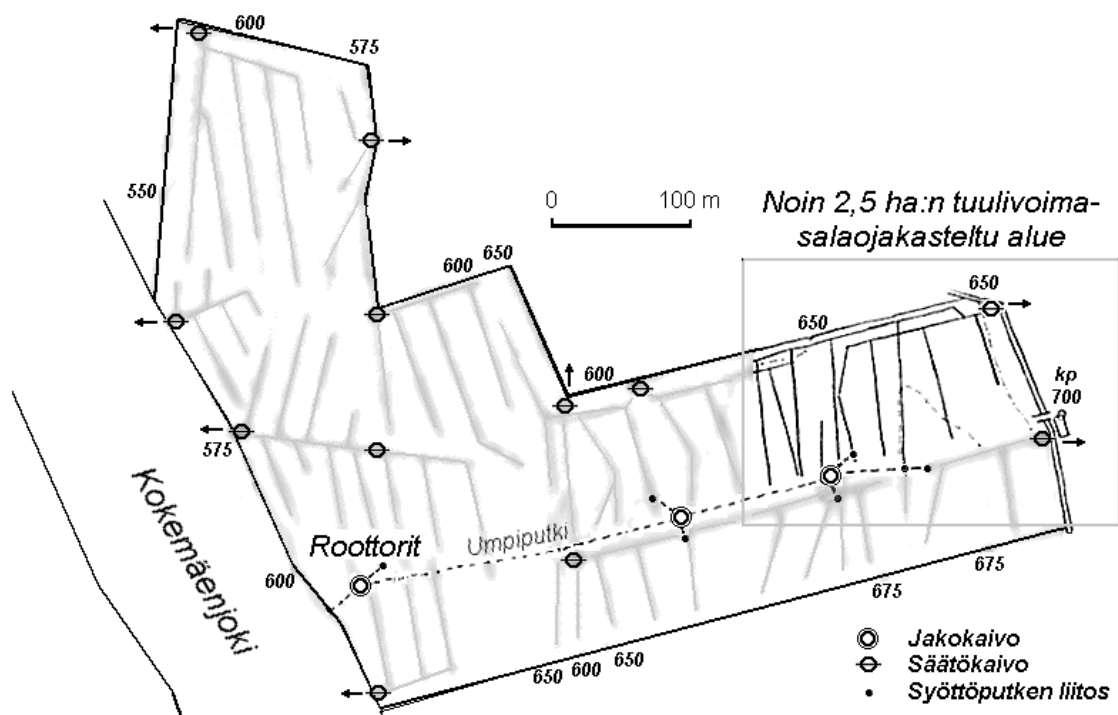
Toinen selvästi auki jäänyt kysymys on sovellukseen sopivan pumpun puuttuminen. Tutkimuksen alkumetreillä rakennettiin lujitemuovista muutamia kokeiluversioita kumikalvopumpuista, jotka toimivat lähes Nira-pumppujen veroisesti mutteivät olleet kestäviä eivätkä virtausteknisesti onnistuneita. Kokeilut antavat kuitenkin olettaa, että asianmukaisella ammattitaidolla sopiva pumppu kyetään kehittämään. Koepumpun valmistuskustannukset olivat muutaman kymmenen euron luokkaa.

Täten voidaan sanoa, että menetelmän markkinointipotentiaali on hyvä. Kuten todettu, on Suomen pelloista noin 40% säätöojustuskelpoisia, joten ainakin samansuuruisen osa perunapinta-alastakin voidaan olettaa olevan. Jo säätöojustettuja maitakin on yli 14.000 ha. Lohkojen tuuli-mikroilmastot ja kasteluvedensaanti ovat menetelmän sovellettavuuteen vaikuttavista tekijöistä kaikkein vaikeimmin arvioitavat. Vaikka salaajakastelu on tarkan viljelijän menetelmä, ei tuuliroottori sitä välttämättä ole. Kun laite on pystytetty ja sen kuormitus säädetty nostokorkeuden mukaan, ei sen toimintaan juuri voi vaikuttaa, eikä tarvitsekaan. Myrskytuulella laitteessa kannattaisi olla jokin ylikierrosuoja, mutta esimerkiksi kalvopumpun tapauksessa rajoitusmekanismin hinnalla saa kymmeniä ja taas kymmeniä kumikalvoja.

Mm. huonosti hoidettu Natura-hanke, turkistilatorisismi ja alkuvaiheessa järjettöminä vastaanotetut ympäristötuen määräykset ovat saaneet maanviljelijäväestön varovaiseksi ympäristönsuojelua kohtaan. Uusiutuvia energioita hyödyntävien menetelmien kauppaaminen onkin oikeutetuinta silloin, kun menetelmä voidaan osoittaa ympäristövaikutustensa lisäksi – eli oikeastaan ympäristövaikutuksistaan huolimatta – taloudellisesti kannattavaksi. Tässä suhteessa salaajakastelu tuulivoimalla lunastaa teknisen yksinkertaisuutensa ansiosta niitä tuulivoimaa kohtaan ladattuja odotuksia, joiden kanssa sähkön-tuotanto vielä painii. Vaikkei menetelmällä ole esim. tärkkelysperunanviljelyssä imagoarvoa, saattaa ruokaperunan tapauksessa olla toisin. Vaikkei ”tuuliperuna” ole omana tuoteryhmänään kovin todennäköinen, voi asian esille-tuominen vaikuttaa myönteisesti kuluttajan ostopäätökseen mikäli jälleen-myyjät eivät tapansa mukaan lisää tuuliperunalle imagohintaa; onhan kyseessä tuotantokustannuksia alentava menetelmä.

8 KÄYTÄNNÖN ESIMERKKI TUTKIMUSTILALTA

Tässä luvussa selvitetään koepaikan yhteydessä kokeillun salaojakastelujärjestelmän toteutusta, kustannuksia, käyttökokemuksia ja tuloksia. Lohkot (Kuva 45) sijaitsevat Satakunnassa Kokemäenjoen rannassa Ulvilan Suosmeren kylässä Sirkka ja Pekka Tiusasen tilalla. Säättöojitus toteutettiin vuonna 2001 ja joelta itäänpäin kulkevan syöttöputken suuntaisella 11,38 ha:n suorakulmion alueella viljeltiin Saturnaa tärkkelysperunaksi. Maalaji on valtaosin multava KHt, mutta puolivälissä lohkoa kulkee muinainen joenuoman pohja etelä-pohjois-suunnassa, jonka maalaji on multava HHT. Lohkoilla ei ole aikaisemmin viljelty perunaa.



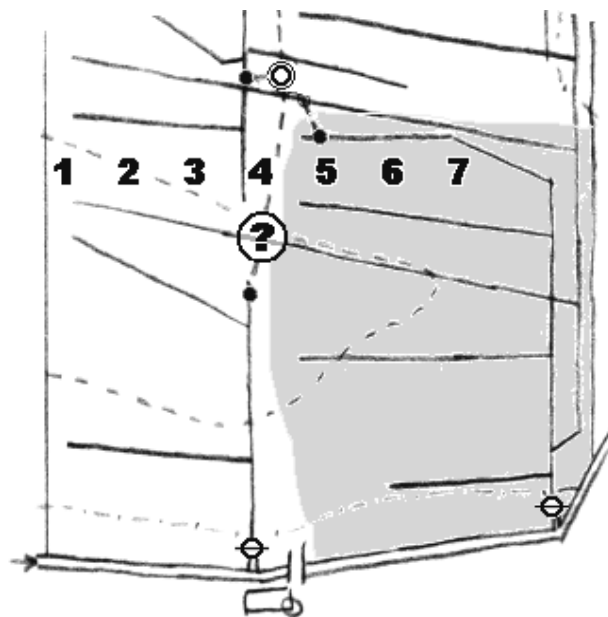
Kuva 45. Salaojakartta Ulvilassa 2001 säättosalaojitetuista, kaikkiaan 18,49 ha:n lohkoista. Jokirannassa sijaitsevalta jakokaivolta lähtevä syöttölinja merkitty katkoviivalla. Mittaustyöt ja suunnitelma A. Suoja.

Säättosalaojitettaviin lohkoihin kaivettiin n. 300 m kasteluveden syöttöputkea, 3 syöttökaivoa sekä 12 säätkäivoa. Salaojaurakoitsijan lasku oli 12.733 €, josta säättöjärjestelmän osuus oli 7.000 €, joten yhden kaivon hinnaksi saadaan noin 583 €. Salaojasora maksoi 489 €, suunnittelu ja mittaus 849 € ja oman työn kustannusarvio (työkone ja kuljettaja 26,7 €/h) kahdelta työpäivältä 427 €. Kun summaan 14.498 € lisätään 15 vuoden poistoajan 5 %:n korkomenot 5.799 €, tullaan salaojitusten osalta pääomakustannukseen 20.297 € (1.100 €/ha), eli 73,3 €/ha/vuosi ilman tukea. Hankkeelle myönnettiin ympäristötuen erityistukea koko 18,49 ha:n alalle jo aiemmin mainitut 155 €/ha viiden vuoden ajalle eli yhteensä 14.330 €. Siten tilalle jäi pellon kunnostuksen osalta maksettavaa 5.967 € eli 323 €/ha tuen kanssa, joka tekee 21,5 €/ha/vuosi tuen kanssa 15 vuodelle jaettuna. Tämä kustannus on tietenkin hyvin pieni verrattuna menetelmästä saavutettaviin hyötyihin.

Kuten mainittu, veden nostokorkeus Kokemäenjoesta oli tilalla (ilman varastoallasta) alle 4 m. Tällöin vesi nostettiin pellon pinnan tasoon, ja valutettiin omalla painollaan salaojaverkostoon jakokaivon kautta. Jakokaivo on pellon korkeimmalla kohdalla. Syöttölinja laskee koko matkan itään noin 0,3 %:n kaltevuudella. Jotta menetelmän toteutustapa tulisi kokeiluksi, päätettiin kahdella vanhalla prototyypillä kastella kauimmainen, noin 2,5 ha:n ojastoalue. Vesi valui erittäin hyvin omalla painollaan syöttökaivolta koko matkan viimeiseen säätökaivoon koilliskulmaan.

Niin tämän tutkimuksen kuin Porin lentokentänkin ilmoittamien lukuarvojen mukaan on Ulvilan keskituulen nopeus 30 m:n korkeudella noin 5,5-6,0 m/s, joten roottorin korkeudella keskituuleksi oletetaan 4,0 m/s. Säätöoijitettu ala oli 18,49 ha, mutta tärkkelysperunaa viljellään vain 10 ha:lla kerrallaan. Kaksi vanhinta prorotyyppiä toimivat lähes tauotta koko kesän. Suurempi 4 m²:n roottori kärsi pahoin roottorin päästyä voimakkaalla tuulella pyörimään irtotaisen pumpunvarren kanssa ja koko roottorin akseli vääntyi sillä seurauksella, ettei roottori heinäkuun alun jälkeen pyörinyt lainkaan alle n. 6 m/s tuulella. Pienempi 3 m²:n roottori seisoi pysäytettynä korkeintaan muutamia tunteja koko kasvukauden aikana.

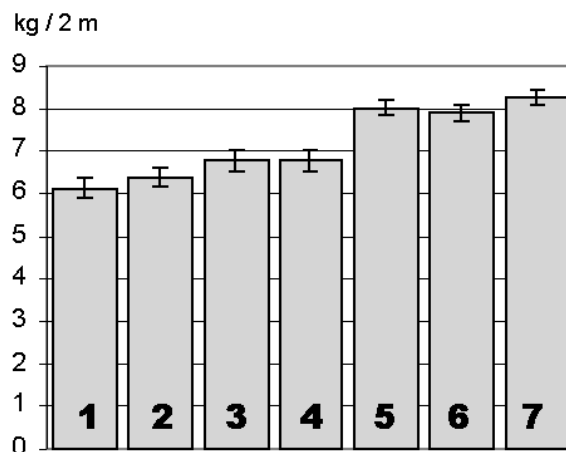
Vanhoilla prototyypeillä tehtyjen aiempien mittausten pohjalta voidaan näiden roottoreiden yhteenlasketun 7 m²:n sieppausalan pumppaustehoa arvioida keskituulen nopeudella 4 m/s, sillä niiden hyötysuhteet olivat hyvin lähellä lopullisen roottorin arvoja. Tuloksena saadaan vain muutaman watin edellä suunniteltua 5 m²:n voimalan tehoa suurempi arvio, joten ottaen huomioon suuremman roottorin tekniset vaikeudet, voidaan prototyyppien yhteenlasketun pumppaustehon sanoa edustaneen yhtä suunniteltua roottoria. Kun kasteltava pinta-ala oli 2,5 ha, nostokorkeus 4 m ja keskituuli 4 m/s, voidaan tuloksesta (Taulukko 5) lukea, että yksi roottori kattaisi juuri tämän pinta-alan, tarkalleen ottaen 2,4 ha.



Kuva 46. Tuulivoima-kasteltu alue harmaalla ja näytteenottopaikat.

Perunasadon kehitystä seurattiin kaivamalla perunat käsin eri kohdista peltoa 2 m:n matkalta ja punnitsemalla perunat käsipuntarilla 100 g:n tarkkuudella. Viljelijöiden kokemusten mukaan 2 m:n näytekoee ennustaa noin 10 % liian suuren sadon. Heinäkuussa ero ei ollut havaittava, mutta elokuun puolivälissä kaivetut 5-8 kg:n näytteet ennustivat jo tonnien eroa sadossa (riviväli 75 cm, eli yksi näyte 1,5 m²). Kun perunannosto aloitettiin elo-syyskuun vaihteessa tehtiin järjestelmällinen satoennustekoe kaivamalla perunat aina 2 m:n matkalta kahdesta vierekkäisestä rivistä seitsemästä eri kohdasta lohkon poikki kulkevalta linjalta (Kuva 46). Koe jäi lohkon oikeassa reunassa hieman kesken pimeäntulon takia.

Koska kahden nostotuloksen keskiarvoista selvästi havaittiin porras 4. ja 5. näytteiden välissä (Kuva 47), jaettiin aineisto kahteen ryhmään, 1-4 ja 5-7, ja näille ryhmille laskettiin keskiarvot (8,04 ja 6,5 kg) ja keskivirheet (0,19 ja 0,26 kg). Näytteet ennustavat kastelematomalle alueelle (90 % näytteen mukaan lasketusta sadosta) satotasoa 39,0 t/ha ja kastellulle 48,2 t/ha. Tämä osoittaisi noin 24 %:n sadonlisäystä. Syksyllä salaojakartasta huomattiin kuitenkin että eräs täydennysoja (kysymysmerkki Kuva 46) leikkasi kastellun ja kastelemattoman alueen ja siten saattoi vuotaa vettä kastelualueelta vertailualueelle. Tällöin tehtiin koe, jossa kastelualueen säätökaivo kuvan oikeassa alakulmassa avattiin ja veden annettiin juosta valtaojaan. Noin kahden tunnin kuluttua veden pinta vertailualueen kaivossa (kuvassa keskellä alhaalla) laski parikymmentä senttiä, joten ojaot ovat yhteydessä toisiinsa. Siten voidaan olettaa että tarkemmin kohdennetulla kastelulla oltaisiin saavutettu huomattavasti suurempi ero.



Kuva 47. Perunannostokokeen 31.8.2002 tulokset edellä esitellyiltä (Kuva 46) näytteenottoaikoilta.

Poislukien toisen roottorin käyttövirheestä johtunut rikkoontuminen, toimivat molemmat prototyypit huoltovapaasti koko kesän ja tuottivat kastelualueelta ainakin noin 20 tonnia sadonlisää eli noin 1.600 €:n lisätulon, joka on jopa enemmän kuin koko yhden roottorin hankintameno, menetelmän 150-200 €:n hehtaari vuosikustannuksesta puhumattakaan.

9 TIIVISTELMÄ

Salaojakastelu on hyvä esimerkki kiirreettömästä vedennostosta, johon tuuli-voima epätasaisesta luonteestaan huolimatta soveltuu. Salaojakastelu on maan altakastelumenetelmä, jota on tutkittu runsaasti säätösaloajituksen yleistyttyä. Menetelmällä voidaan nostaa satotasoa, tasata sadon laatua sekä parantaa pellon ravinnetaloutta ja vähentää ravinteiden huuhtoutumista. Salaojakastelu ostoenergialla on kustannustehokasta vain juures- ja perunaviljelyksillä, mutta viljan viljelyssä ei sadonlisä kata kustannuksia.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää liikuteltava pientuulivoimala, jonka käyttö on taloudellisesti kannattavaa. Kehitetyn Savonius-roottoriin perustuvan prototyypin odotettavissa olevat vedentuottomäärät selvitettiin kirjallisuuden pohjalta ja empiirisesti mittauksilla, joissa mitattiin veden tuottoa tuulen nopeuden suhteen ja yhdistettiin tuottotulokset eri tuulen nopeuksien esiintymistodennäköisyyksiin eri puolella Suomea. Vaikka laitteesta saatiin toimiva ja kustannustehokas, ei laitetta saatu toimimaan kirjallisuuden pohjalta asetettujen odotusten mukaisesti.

Tuulen teho riippuu tuulen nopeuden kolmannelta potenssista ja nopeat tuulet ovat harvinaisia ja esiintyvät paikallisen keskituulen nopeuden ympärillä ns. Rayleigh-jakauman mukaisesti. Siten tehollisessa mielessä oleellinen tuuli-alue on Suomen oloissa 4-10 m/s, tuulen keskiarvon ollessa 3,5-5,5 m/s. Savonius-roottori on yksinkertainen ja siksi myös edullinen roottorimalli, joka alhaisen kierrosnopeuden ja korkean vääntömomenttinsa ansiosta soveltuu veden pumppaamiseen mäntäpumpulla huolimatta melko alhaisesta 20-25 %:n hyötysuhteestaan. Kalliiden potkurimallisten roottoreiden hyötysuhteet ovat luokkaa 40-45 %.

Salaojakastelun menestyksellä soveltaminen käytäntöön asettaa reunaehdoja. Pellon kaltevuuden on oltava alle 1-2 % ja maan on oltava hiekka- tai hieta- maata. Hieno hieta on maalajina salaojakastelulle ihanteellinen, sillä siinä yhdistyy riittävä kapillaarinen nostokyky sekä hyvä nostonopeus. Maan vettä läpäisemättömän kerroksen tulee olla 3-8 m:n syvyydessä. Ojavälin tulisi olla maalajista riippuen luokkaa 10-15 m ja kasteluvettä on oltava saatavana alle 8 m:n nostokorkeudella. Oikein järjestetyn kastelun tuloksena satotaso voi nousta kymmeniä prosentteja viljan-, ja jopa 90-110 % perunanviljelyssä. Salaojakastelujärjestelmän perusparannusten kustannus on noin 100-400 €/ha/v. Salaojakasteluun rakennettava sähköpumppaamo maksaa 8 ha:n lohkolle 7.100 €. Pumppaamon ja sähkönkulutuksen hehtaarikustannus on 15 vuoden poistoilla 140 €/ha/v.

Kokeissa yritettiin selvittää, mikä aiheuttaa kehitetyn prototyypin muihin tutkimuksiin verrattuna alhaisen hyötysuhteen, joka huomattiin jo esikokeissa. Roottoriosalta odotettiin noin 20 %:n tuuli-mekaanista hyötysuhdetta ja koko laitteelta noin 10 %:n pumppaushyötysuhdetta (pumppausteho/tuulen teoreettinen teho). Monien roottoriin tehtyjen muutosten jälkeenkään ei lopullisella laitteella saavutettu yli 6 %:n pumppaushyötysuhdetta millään tuulen nopeudella. Tuuli, roottorin pyörimisnopeus ja veden virtaus mitattiin kaikki puls-

siantureilla, ja 2 sekunnin taajuudella tehtyjen jatkuvien mittausten tuloksena saadussa aineistossa epätarkkuudet menettivät merkityksensä.

Roottori käyttäytyi kierrosnopeuden suhteen kuten odotettu, eli roottorin vääntömomenti kasvoi kun pumppua säädettiin raskaammalle, eikä pumpun iskuilavuuden säätö siksi ratkaisevasti vaikuttanut pumppaustehoon. Hukka-tehon (kitkat, virtausvastukset ym.) suuruus selvitettiin yksinkertaisella hidastumisen nopeutta mittaavalla kokeella, jonka tuloksena hukka-tehon todettiin nousevan maksimissaankin vain kolmasosaan pumppaustehosta.

Kun myöskään roottoriosan läpisyöttösakoon ja akselin sijoitteluun kohdistuneet geometriset muutokset eivät ratkaisseet hyötysuhteen alhaisuutta, tehtiin lopulliset kokeet, joilla määriteltiin roottorilaitteen pumppausteho kustannusten selvittämiseksi. Laitteen käyttökokemusten ja tuulen korkeusprofiilia koskevien mittausten pohjalta laitteeseen päätettiin tehdä kokoon ja korkeuteen liittyviä muutoksia, joiden mukaan arvioitiin niiden mukaan valmistettavan laitteen pumppausteho. Kun tämä yhdisttiin eri puolilla Suomea oleviin sadannan vajeisiin perunanviljelyn tarvitsemasta 400 mm/kasvukausi, voitiin laskea roottorilaitteen kyky tyydyttää perunapinta-alan vedentarve.

Kun tässä kehitetyn 1030 €:n roottorilaitteen korollinen vuosikustannus on 15 vuoden tasapoistoilla ja 5 %:n korkokannalla 112 €/v, muodostuu hehtaarikustannukseksi tuulisuudesta ja veden nostokorkeudesta riippuen noin 30-70 €/ha/v. Tuulivoima-salaojakastelu on kannattavaa jopa viljanviljelyssä joillain kasteluveden nostokorkeuksilla. Perunaviljelmillä menetelmä on sähkömoottorilla tapahtuvaa pumppaamista edullisempaa kaikilla kasteluveden imukorkeuksilla.

Samalla kun lopullisella roottorilla tehtiin mittauksia, kytkettiin vanhat kaksi prototyyppiä kastelemaan noin 2,5 ha:n osaa vieressä sijaitsevasta 10 ha:n tärkkelysperunalohkosta. Roottorit toimivat huoltovapaasti mutta huonosta rakenteestaan johtuen yhteensä korkeintaan viimeisimmän mallin teholla koko kesän, ja vaikka osa kasteluvedestä valui vertailualueelle ja kasvukausi oli muutenkin vaikea, saatiin kastellulta alueelta noin 24 %:n sadonlisä.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- Ahvenniemi, P.** 1997. *Perunan kannattavimmat sadot ovat veden varassa. Maatilan Pirkka* 1997(2):50-52. [Viitattu 1.12.2001] <http://www.sci.fi/~ahven/peruna/learti11.htm>
- Ahvenniemi, P.** 1994. *Perunan sadetus. Peltö-Pirkan Päiväntieto* 1994:108-110. [Viitattu 1.12.2001] <http://www.sci.fi/~ahven/peruna/leartiark1.htm>
- AWEA (American Wind Energy Association).** 1998. *Basic Principles of Wind Turbine Power Production.* [Viitattu 10.09.2002] <http://www.awea.org/faq/index.html>
- Benesh, A.** 1989. *Wind turbine system using twin savonius-type rotors. US Patent US4830570.* [Viitattu 13.09.2002] <http://12.espacenet.com/espacenet/viewer?pn=us4830570>
- Ecotools.** 2002. *Vertical Wind Turbine "Wind Rose".* [Viitattu 13.09.2002] http://www.ecotools.net/english/wind_rose.htm
- Eggleston, E.** 1998. *What Are Vertical-Axis Wind Turbines (VAWTs)? American Wind Energy Association.* [Viitattu 17.04.2002] <http://www.awea.org/faq/vawt.html>
- Elo, I.** 1997. *Momentti. Elämme fysiikan maailmassa.* [Viitattu 17.04.2002] <http://www.internetix.fi/opinnot/opintojaksot/5luonnontieteet/fysiikka>
- Ewans, R.O., Skaggs, R.W.** 1989. *Design Guidelines for Water Table Management Systems on Coastal Plain Soils. Applied Engineering in Agriculture* 5(4):534-548.
- Fraenkel, P. L.** 1986. *Water lifting devices. FAO irrigation and drainage paper 43:1-137. Rome.*
- Gipe, P.** 1993. *Wind Power for Home & Business. Chelsea Green Publishing CO. Vermont. 413 p.*
- Haataja, K.** 2000. *Säätösalaajituksen ja salaajakastelun kustannukset ja hyödyt. MTTL Selvityksiä* 5:1-33. Helsinki.
- Hardi International.** 2002. *Piston pumps.* [Viitattu 17.04.2002] <http://www.hardi-international.com>
- Helgesson, L.** 1997. *Vattenkraft i Sverige.* [Viitattu 1.12.2001] <http://home.swipnet.se/~w-19094/lennart.htm>
- Holma, M.** 1995. *Luentomateriaali Turun seminaarissa 27.2.1995: "Kokemuksia säätökastelusta avo- ja salaajapelloilla".* Turku.
- Ilmatieteenlaitos.** 2001. *Sää ja ilmasto – Säätilastot.* [Viitattu 1.12.2001] http://www.fmi.fi/saa/tilastot_60.html
- Keso, L.** 1947. *Maan luontaisen viljelyskunnan parantaminen viljelystoimenpitein. Maamiehen käsikirja, 3. painos toim. Ilmari Poijärvi. Otava. Helsinki. 627 s.*
- Kleemola, J & Teittinen, M.** 1996. *Satotuloksia säätöajituksen ja padotuskastelun koekentiltä 1994-1995. Salaajituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote* 21:1-59. Helsinki.

- KM (Käytännön maamies).** 1994. ”Säätöojitus antaa suuria sadonlisäyksiä” ja ”Säätöojitus säästää lannoitteissa 400 markkaa hehtaaria kohti”. *Käytännön Maamies* 12:1-39.
- Kolmeks.** 2001. *Kolmeks tuotekuvasto 2001*. Turenki.
- Korkman, J.** 1971. *Maalajiopas*. Helsingin yliopisto, maanviljelyskemian laitos. Helsinki.
- Kuisma, P.** 1994. *Peruna tarvitsee vettä jo ennen keitokattilaa. Tuottava peruna 1:1-48*. Perunantutkimuslaitos. Lammi.
- KWH Pipe.** 2002. *Wehonal-säätösalaajakaivo. Kuivatustekniset tuotteet/salaajaputket, osat*. [Viitattu 18.04.2002] <http://www.kwhpipe.fi/tuotteet/kuivatustekniikka>
- Maatilan Pirkka.** 2000. *K-Maatalouden asiakaslehti 2/2000. Altakastelu tuotti yli 1500 kiloa lisää viljaa*. [Viitattu 1.12.2001] http://www.maatilan.pirkka.fi/mp2_00/otsikko24.htm
- MAOL.** 1991. *MAOL taulukot. 6. uudistettu painos. Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto. Keuruu. 121 s.*
- Mganilwa, Z. M.** 2002. *Development of a Savonius Wind Turbine Water Pumping System. Department of Mechanical Engineering. Dar es Salaam Institute of Technology*. [Viitattu 18.4.2002] <http://www.iet.co.tz/paper9.htm>
- Modi, V. J., Roth, N. J., Pittalwala, A..** 1983. *Blade Configurations and Performance of the Savonius Rotor With Application to an Irrigation System in Indonesia. Journal of Solar Energy Engineering* 105:294-298. *Transactions of the ASME. The American Society of Mechanical Engineers. New York.*
- Modi, V. J., Fernando, M. S. U. K.** 1989. *On the Performance of the Savonius Wind Turbine. Journal of Solar Energy Engineering* 111:71-81. *Transactions of the ASME. The American Society of Mechanical Engineers. New York.*
- Paasonen-Kivekäs, M.** 1998. *Pellon vesitalouden säädön vaikutus typen huuhtoutumiseen. Peltoviljelyn ravinnehuuhtoutumien vähentäminen pellon vesitaloutta säätämällä / toim. Rauno Peltomaa. Salaajituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 23:1-58. Helsinki.*
- Peltomaa, R.** 2000. *Valumavesien käsittely. Säätösalaajitus, säätökastelu, valumavesien kierrätys. Maatalouden ympäristötuen erityistuet 2000-2006. Maa- ja metsätalousministeriö. 8 s.*
- Savonius, S.** 1925. *The wing-rotor in theory and practice. Savonius & Co. Helsinki. 40 p.*
- STVY (Suomen tuulivoimayhdistys ry.).** 2001. *Altener – TUULIENERGIA*. [Viitattu 1.12.2001] <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/sisalto/tietoa/altener/index.htm>
- Svensk energiförsörjning.** 2000. *Energifakta. Världens energitillgångar*. [Viitattu 1.12.2001] <http://www.svensk-energi.com/UpplDokBilder/EF-4.1-MAJ00.pdf>
- Tanner, R.** 1991. *Sadetussuunnitelman teko perunalle. Tuottava peruna 1:1-48*. Perunantutkimuslaitos. Lammi.
- Ushiyama, I., Nagai, H.** 1988. *Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors. Wind Engineering* 12:59-75. *Official Journal of the British Wind Energy Association & the European Wind Energy Association. Multi-Science Publishing Company. Brentwood.*

Vakkilainen, P. 1982. *Maa-alueelta tapahtuvan haihdunnan arvioinnista. Acta Universitas Ouluensis Series C Technica 20:1-146. Oulu.*

Vammalan konepaja. 2000. *NIRA-käsipumppujen Ohje- ja varosahinnasto 1.1.2000. Vammala.*

Viljakainen, J., Peltomaa, R., Holma, M. *Säätösalaajitus ja padotuskastelu. Farma Maaseutukeskuksen Seminaari 27.2.1995. Turku.*

Virtanen, S. 1993. *Säätöajituksella vesistökuormitus pienemmäksi – ravinteet talteen ja sadon laatu paremmaksi. Tuottava peruna 1:1-48. Perunantutkimuslaitos. Lammi.*

Wasserstoff AG. 2002. *Die veschiedenen Rotortypen. [Viitattu 17.04.2002]*
http://wasserstoff_ag.tripod.com/wind

Windside. 2000. *Energy Solution for Extreme Conditions. [Viitattu 1.2.2000]*
<http://www.windside.com>

Wuori, P. 1994. *Virtausmekaniikan perusteet. Otatieto. Helsinki. 159 s.*

LIITE 2. MENETELMÄN KOKONAISKUSTANNUKSET [€/HA/V].

		Tuulennopeuden paikallinen vuosikeskiarvo [m/s]								
		Nostokor- keus [m]	Länsi- ja lounaisrannikko			Etelärannikko			Keski- ja Itä-Suomi	
			4	4,5	5	4	4,5	5	3,5	4
Salaajittamattomaan peltoon 2-putkisto ja allas	2	390	390	380	390	380	380	390	380	
	3	400	400	390	400	390	390	400	390	
	4	410	410	400	410	400	400	410	400	
	5	430	420	410	420	410	410	420	410	
	6	440	430	420	430	420	410	430	420	
	7	450	440	430	440	430	420	440	420	
	8	460	450	440	450	440	430	450	430	
	Salaajittamattomaan peltoon 1-putkisto ja allas	2	260	250	250	260	250	250	260	250
3		270	260	260	270	260	260	270	260	
4		280	270	270	280	270	270	280	270	
5		290	280	280	290	280	270	290	280	
6		310	290	290	300	290	280	300	280	
7		320	300	290	310	300	290	310	290	
8		330	310	300	320	310	300	320	300	
Salaajitettuun peltoon säätökustannus 667 e/ha ja allas		2	160	160	150	160	150	150	160	150
	3	170	170	160	170	160	160	170	160	
	4	180	180	170	180	170	170	180	170	
	5	190	190	180	190	180	170	190	180	
	6	210	200	190	200	190	180	200	190	
	7	220	210	200	210	200	190	210	190	
	8	230	210	200	220	210	200	220	200	
	Salaajitettuun peltoon säätökustannus 667 e/ha, ei allasta	2	140	130	130	130	130	130	130	130
3		150	140	140	150	140	140	140	140	
4		160	150	150	160	150	140	150	150	
5		170	160	160	170	160	150	160	150	
6		180	170	160	180	170	160	170	160	
7		200	180	170	190	180	170	190	170	
8		210	190	180	200	180	170	200	180	
Salaajitettuun peltoon säätökustannus 333 e/ha ja allas		2	130	120	120	130	120	120	130	120
	3	140	130	130	140	130	130	140	130	
	4	150	140	140	150	140	140	150	140	
	5	160	150	150	160	150	140	160	150	
	6	180	160	160	170	160	150	170	150	
	7	190	170	160	180	170	160	180	160	
	8	200	180	170	190	180	170	190	170	
	Salaajitettuun peltoon säätökustannus 333 e/ha, ei allasta	2	100	100	100	100	100	100	100	100
3		120	110	110	110	110	100	110	110	
4		130	120	120	120	120	110	120	110	
5		140	130	120	130	130	120	130	120	
6		150	140	130	150	130	130	140	130	
7		160	150	140	160	140	140	150	140	
8		180	160	150	170	150	140	160	150	