



TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO

Kristo Vaher

**PÕHJA-EUROOPA TINGIMUSTESSE
SOBIV KAHES TELJES PÄIKEST
JÄRGIVA PÄIKESEPANEELIDE
ALUSRAAMI TASUVUSE ANALÜÜS JA
EELPROJEKT**

LÕPUTÖÖ

Mehaanika teaduskond

Tehnomaterjalid ja turundus

Tallinn 2013

SISUKORD

Sissejuhatus	4
1. Päikeseenergia.....	7
1.1. Päikesekiirgus Eestis	8
1.1. Päikesepaiste kestus Eestis	11
1.2. Päikeseenergia hulk Eestis.....	13
1.3. Päikeseenergia hulk mujal Euroopas	16
1.4. Päikeseenergia tänapäev ja tulevik	18
2. Päikese järgimine	22
2.1. Erinevad süsteemid.....	25
2.2. Erinevate süsteemide selgitus	27
2.3. Võrumaa projekt Energy Smart OÜ näitel	29
2.4. Arukas energiasüsteem Tallinna Tehnikaülikoolis.....	30
2.5. Süsteemi hüpoteetiline tasuvuspiir	31
2.6. Analoogsed tooted	33
3. Eelprojekt – kahes teljes päikest järgiv süsteem	35
3.1. Töötingimuste analüüs ja sellest tulenevad nõuded materjalile	35
3.2. Materjalide valik koos kriteeriumitega.....	36
3.3. Toote valmistamise tehnoloogia	38
3.3.1. Metall-detailid	38
3.3.2. Elektroonika	38
3.4. Arvutused.....	39
3.4.1. Vastupidavus koormustele	39
3.4.2. Maksumus	44

Kokkuvõte	45
Summary	48
Viidatud allikad	50
Lisad	52
Lisa 1. Tõravere ilmajaama päikesekiirguse näitajad aastal 2011 [20].	53
Lisa 2. Suurimad ja vähimad ilma andmed Eestis läbi aegade [21].	54
Lisa 3. Energia tootlikkus erinevate süsteemide puhul Tallinna piirkonnas [16].	55
Lisa 4. Poltide tabel [22].	57
Lisa 5. Taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia osakaal kogu elektri tarbimisest (%) Euroopa Liidus [23].	58
Lisa 6. Eelprojekti joonised	59

SISSEJUHATUS

Lõputöö teema valikul lähtus autor oma huvist jõuda selgusele, kas Eesti piirkonnas on mõttekas päikest järgida, seda siis mitmes teljes, või üldse mitte. Varasemalt on autor analoogse toote oma töö raames vastavalt kliendi poolt ette antud tingimustel valmistanud, kuid kuna lepingud on alati seotud tähtaegadega, siis ei olnud aega teemasse süveneda ja taustinformatsiooni uurida. Tööde teostamise järel tekkis töö autoril suurem huvi uurida päikese järgimise kasulikkust Eesti piirkonnas ja käesoleva töö raames seda siis ka tehakse.

Päikese järgmise tehnoloogiate tasuvusuuringuid Eesti piirkonnas on tehtud väga vähesel määral. Pigem on see jäänud PV-paneeli¹ süsteemide müüjate enda huviks ning seda pole tehtud teaduslikul eesmärgil. Võib-olla selle pärast, et PV-paneelide kasutamine on olnud seni vähe tähtis ja pigem nišši toode ja rohelist eluviisi viljelevate inimeste pärusmaa. Seni on taastuvenergia teemat, selle vajalikkust ja tasuvust käsitletud pinnapealselt ning jäänud jutuajamise tasemele, reaalsete tegudeni on hakatud alles viimasel ajal jõudma. Võib-olla ei ole olnud meie aeg ja ühiskond selle jaoks piisavalt küps, võib-olla ei ole tehtud piisavalt teadvustamistööd, võib-olla on takerdunud see poliitiliste otsuste taha.

Selge on see, et ühel päeval saavad meie fossiilsed kütused otsa ja siis on juba hilja hakata mõtlema kuidas edasi, tegutseda tuleb juba täna. Tegutsemine ja asja laialdaselt kasutuselevõtt viib tehnoloogiat kiiremini edasi. Hetkel on PV-paneelide tehnoloogia veel toores, kasutegur on väike ja toote hind kõrge, kuid kui väga tahetakse ja nähakse selles potentsiaali, siis areneb tehnoloogia kiiresti edasi. Viimase 10 aasta jooksul on tuule- ja päikeseenergia kasutamiskiisid laienenud ja kasutamiskulud vähenenud, mistõttu võib prognoosida nende osatähtsuse kiiret suurenemist tulevikus. Taastuvate energiavarude laiemat kasutuselevõttu loetakse tähtsaks mitte üksi mittetaastuvate varude ammendumisohu tõttu, vaid ka seetõttu, et nende kasutamine ei suurenda õhu süsinikdioksiidisisaldust.

Elektrienergia tarbimise kasv maailmas on olnud väga kiire. Selleks, et üha kasvavat energiavajadust katta, tuleb arendada uusi, paremaid ja efektiivsemaid tehnoloogiaid ning parendada olemasolevaid, et süsteemi poolt toodetav energia oleks maksimaalne. Täna on kõige

¹ PV-paneelid - pooljuhtmaterjalidest fotoelektrilised päikesepaneelid

suurema osakaaluga elektrienergia tootmises kütustpõletavatel soojuselektrijaamadel ca 2/3, mis ei ole meie üha kasvavat energiavajadust, kliima soojenemist ja energiavarude piiratust silmas pidades jätkusuutlik. Tuuleelektrijaamade ja päikeseelektrijaamade osakaal kogu maailma elektrienergia tootmisest on hetkel veel väga väike, kuna oleme oma arengus ülemineku faasis, kus alles leitakse efektiivseid ja tasuvaid tehnoloogiaid energia tootmiseks taastuvatest energiaallikatest. *USA Department of Energy* hinnangul kasvab kogu maailma energiatarbimine kuni aastani 2025 ca 2 % aastas ning seni kindlaks tehtud fossiilsed kütused saavad lähima paarisaja aasta jooksul otsa.

Töö autor on seadnud oma tööle hüpoteesi, et päikese aktiivne järgimine annab PV-paneelide puhul olulise tootlikkuse kasvu ja samas tasub päikest järgiva alusraami investering ennast ära sama aja jooksul, kui on seda PV-paneelide investering ise. Päikese järgimisega saavutatav suurem tootlikkus peab ära katma investeeringu sama ajaperioodi jooksul, kui on seda PV-paneelide investering. Ilma toetusteta on see tänaste turuhindade juures ja sõltuvalt süsteemi suurusest 15 - 20 aastat.

Lõputöö eesmärk on analüüsida kas, kus ja kas üldse on mõttekas päikest järgida, ning kui palju sellest kasu võib saada. Selleks, et hinnata Põhja-Euroopa tingimustesse sobiva alusraami maksumust, koostatakse lõputöö tulemusena päikest kahes teljes järgiva alusraami eelprojekt ning teostatakse vajalikud mehaanika arvutused hindamaks materjalide valiku sobivust. Eelprojekti alusel küsitakse metallitöid tegevatest ettevõtetest hinnapakkumised metallist osade valmistamiseks. Teiste komponentide (reduktorid, automaatika, andurid) hinnad saadakse teada hinnapäringute teel.

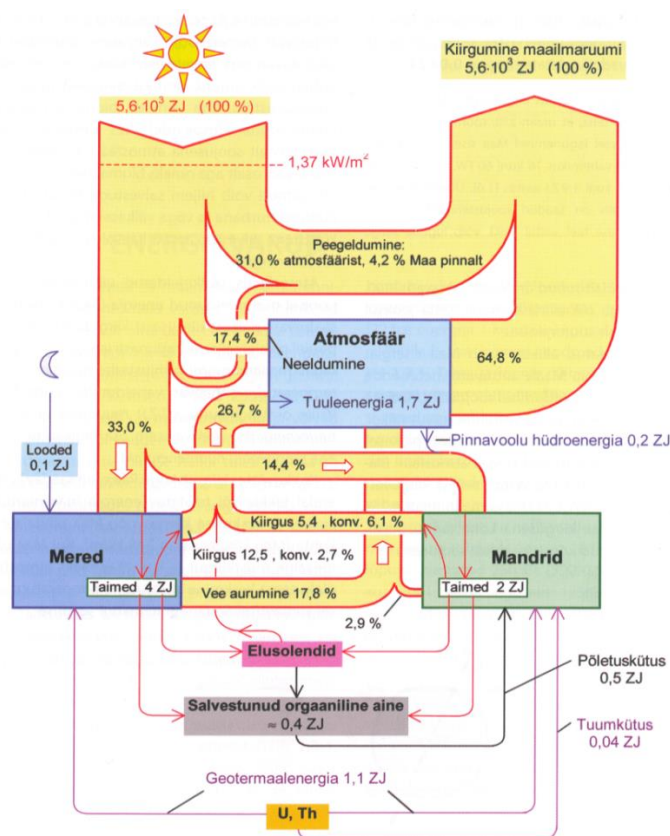
Töö sisu esimeses pooles selgitatakse põhjalikult mis on päike, kui palju sealt energiat tuleb ja kui palju on sellest realselt kasutatav. Põhjalikumalt uuritakse seda Eesti piirkonnas tuginedes EMHI pikaajalistele mõõtmistulemustele. Analüüsitakse kui palju on võimalik PV-paneelidega saavutada suuremat tootlikkust, kasutades selleks erinevaid päikest järgivaid süsteeme. Võrreldakse erinevate süsteemide puhul saavutatavat suuremat tootlikkust nii Eesti piirkonnas kui ka mujal Euroopas. Töö edasises analüüsis keskendutakse Eesti piirkonnale ja analüüsitakse milline päikest järgiv süsteem siia piirkonda kõige paremini sobib ning kui kiiresti see ennast tagasi on võimeline teenima. Päikesekiirguse hulga kohta erinevates Euroopa piirkondades on mitmeid väga põhjalikke andmebaase, kust saab vajalikku infot kiirgusenergia hulga kohta Eestis. Taastuenergia tuleviku prognooside, sealhulgas päikeseenergia, osas on väga erinevaid maailmavaateid: kes ennustab aastaks 2050 täielikult üleminekut taastuenergiale, kes ennustab fossiilsete kütuste põletamise suurt osatähtsust. Andmete valikul ja nende väljatoomisel käesolevas töös on autor valinud pigem kuldse kesktee ja jäänud realistlikuks.

Töö teises osas kirjeldatakse erinevaid päikest järgivaid süsteeme ja selgitatakse päikese järgimise põhimõtteid ning vajadust. Töö teises osas kirjeldab autor seni Eestis teostatud projekte ja võrdleb erinevate tootjate tooteid, mis võiksid kaheteljelise päikest järgiva süsteemi nõudeid Eesti ja ka Põhjamaade piirkonda rahuldada, mille tulemusena selgub, et ideaalset toodet turul ei pakutagi.

Töö kolmandas osas projekteeritakse Eesti tingimustesse sobiv päikese järgija, arvutakse välja toote maksumus ning lõpptulemusena hinnatakse selle tasuvusaega. Projekt piirdub koostudest ja alakoostudest, detailsemate jooniste koostamine ei ole maksumuse hindamiseks vajalik. Maksumuse arvutamise aluseks küsitakse hinnapakumised metalliga tegelevatelt firmadelt, ajamite tootjatelt ja elektroonika komponentide maaletootjatelt.

1. PÄIKESEENERGIA

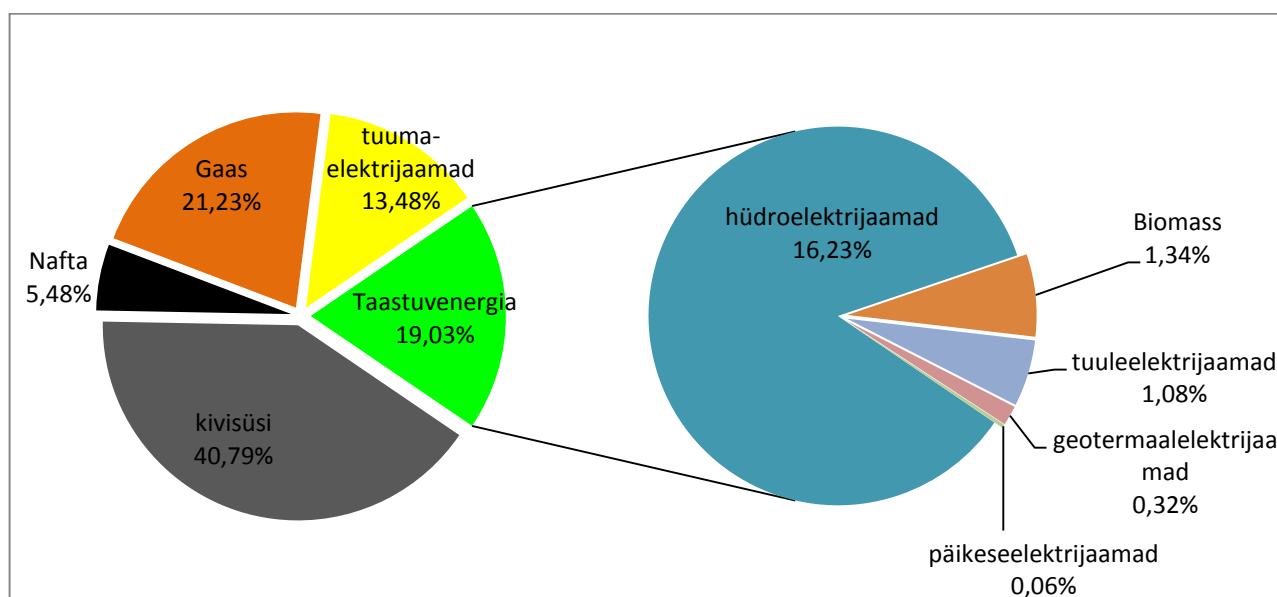
Päikesest tulevat kiirgust iseloomustab päikesekiirte risttasandi kiiritustihedus Maa atmosfääri ülapiiril (solaarkonstant) 1372 W/m^2 (vt sele 1). Päikeselt tulev kiirgusenergia hulk on tohutult suur, numbrites väljendades siis 5600 ZJ või siis näiteks 1 560 000 000 TWh. Seda energiat on enam kui kümne tuhande korda rohkem kui inimkond hetkel tarbib. Päikese kiirgusest peegeldub atmosfäärist 31 % ja maapinnalt 4,2 % lühilainelise optilise kiirgusena kohe tagasi maailmaruumi. Ülejäänud kogus neeldub soojusena atmosfääris (17,4%), meredes (33,0%) ja mandritel (14,4%). [1: 16]. Isegi seda, maapinda neelduvat energiat, on üle seitsme tuhande korra rohkem kui inimkond hetkel kasutab. Üle 99% energiast kantakse üle lainepikkuste intervallis $0,23 < \lambda < 4 \text{ } \mu\text{m}$. Ultraviolettkiirguse piirkonda $0,23 < \lambda < 0,4 \text{ } \mu\text{m}$ langeb 9% energiast, nähtava valguse piirkonda $0,4 < \lambda < 0,7 \text{ } \mu\text{m}$ langeb 40% energiast ja ülejäänud 50% kantakse üle infrapunase kiirguse piirkonnas $\lambda > 0,7 \text{ } \mu\text{m}$ [2: 18]. PV-paneelid töötavad peamiselt lainepikkuse vahemikus 0,4 kuni 1,2 μm , ehk siis nähtavas valguses ja infrapuna kiirguses.



Sele 1. Maa energiabilanss [1: 15]

Päikesest tulev energiaressurss, mida tänapäeval kasutatakse kahjuks veel väga vähe, on väga suur. 2008. aastal oli kogu maailma energiatarve ca 143 850 TWh, millest 81 % tuli fossiilsete kütuste põletamisest, 5,7 % tuumajaamadest ja 12,8 % taastuvatest energiaallikatest [14].

Maailma eripaigus toodetakse elektrienergiat erinevatest energiaallikatest, näiteks Norras tuleb üle 90% elektrienergiast hüdroelektrijaamadest, Islandil geotermilisest energiast ning Araabiamaa des vedelkütuse või gaasi põletamisest. Peamiselt sõltub see kättesaadavatest energiaressusside olemasolust konkreetses piirkonnas. 2008. aastal tootsid kõik elektrijaamad elektrienergiat kokku ~20 300 TWh, selle jagunemine elektrijaamade tüüpide järgi on toodud seel 2. Fossiilsetel kütustel töötavates jaamades (kivisüsi, nafta, gaas) ja tuumaenergiaga töötavates jamades toodeti 2010. aastal 80% kogu elektrist ja ca 20% taastuvates energiaallikatest. 2010. aastal toodeti elektrienergiat 21 300 TWh, see teeb kasvuks 5 %.



Sele 2. Maailma elektrienergia toodang jaamatüüpide kaupa aastal 2008 (% kogu tootmisest) [14]

1.1. Päikese kiirgus Eestis

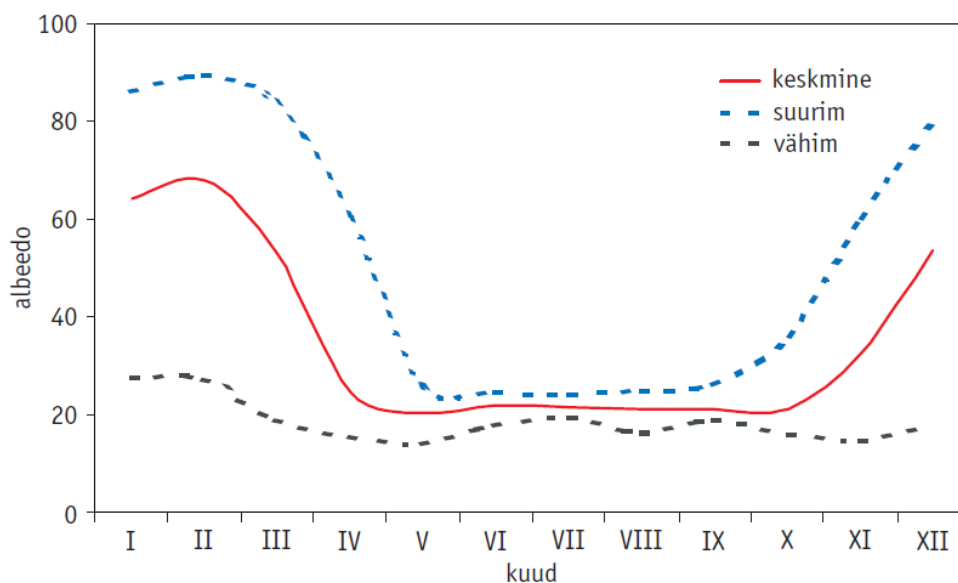
Maapinnani jõudmiseks tuleb päikese kiirgusel läbida atmosfäär. Maad ümbritsev atmosfäär kujutab endast gaaside segu, milles peamised komponendid on lämmastik (ruumalaliselt ca 78,1%), hapnik (ca 20,9%), argoon (ca 0,9%), süsihappegaas (ca 0,03%) ja teisi gaase väikestes kogustes ning muid ühendeid. Viimaste kontsentratsioon atmosfääris on väike, kuid paljud neist on aktiivsed kiirguse nõrgendajad. Veeauru sisaldus atmosfääris on väga muutlik nii ajas kui ruumis. Peale gaasiliste komponentide leidub atmosfääris veel vedelaid ja tahkeid osakesi, millede mõõtmed ulatuvad mõnest nanomeetrist kuni mõnekümne mikromeetrini ja mida kokku nimetatakse atmosfääri aerosooliks. Aerosool võib olla kas loodusliku päritoluga näiteks tuule, õhu turbulentsi ja konvektsiooniga õhku kantud pinnase osakesed, mereveest lainetusega õhku paiskunud

soolakristallid, vulkaanipursete produktid jne. või tekkinud inimtegevuse tagajärjel nagu näiteks kütuste põlemisjäätgid, tööstusheitmed jne. Aerosooli sisaldus atmosfääris on väga varieeruv ja seda nii ajaliselt kui ka ruumiliselt. Aerosool on kiirgust hajutava toimega.

Enamasti hajub päikesekiir enne aluspinnale jõudmist atmosfääris mitmeid kordi. Ka osa aluspinnalt hajusalt tagasi peegeldunud päikesekiirgusest jõuab pärast atmosfääris hajumist tagasi maapinnale, andes sellega lisa hajusale kiirgusele. Hajus kiirgus on seda suurem, mida suurem on Päikese kõrgus, mida rohkem on õhus hajutavat ainet, mida rohkem on õhukeste kõrged ja keskmise pilvi ja mida rohkem peegeldub aluspinnalt päikesekiirgust. Spektraalselt koostiselt on hajus kiirgus lühilainelisem kui otsene päikesekiirgus. See on tingitud hajumise intensiivsuse olenevusest lainepikkusest. Mida väiksemad on hajutavad osakesed, seda intensiivsemalt hajub lühema lainepikkusega kiirgus.

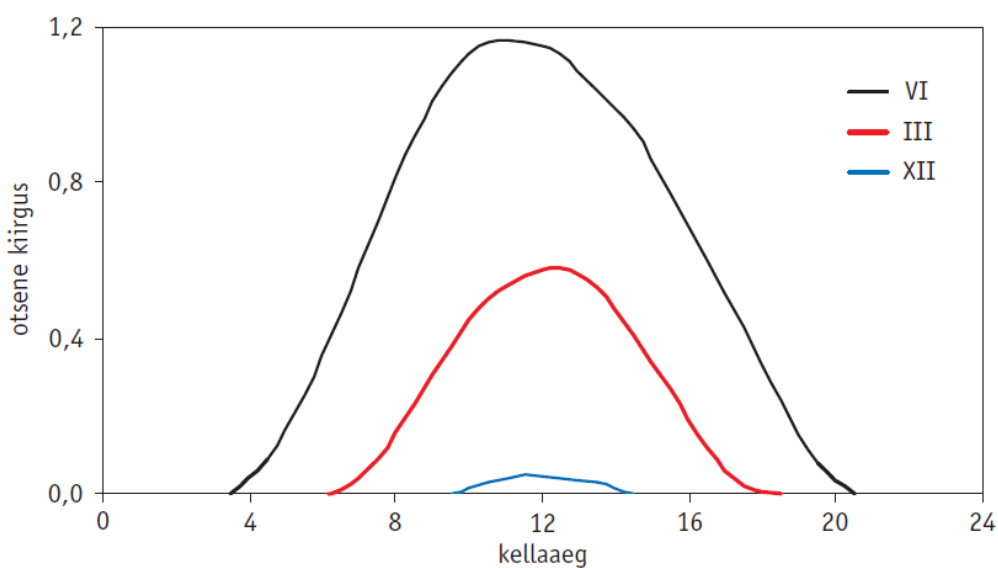
Atmosfääri läbipaistvuse ja väga paljudel juhtudel ka pilvisuse mõju on otsesele ja hajusale kiirgusele vastupidine ja summaarses kiirguses nad osaliselt kompenseerivad teineteist. Pilvisus võib vähendada või suurendada summaarset kiirgust. Atmosfääri läbipaistvus mõjutab summaarset kiirgust vähem kui pilvisus või päikese kõrgus.

Aluspinnale langenud päikesekiirgus ei jää tervenisti sinna, osa sellest peegeldub tagasi atmosfääri. Seda osa päikesekiirgusest nimetatakse peegeldunud kiirguseks. Tuntud peegeldumise reeglid, mille puhul kiire peegeldumisnurk võrdub tema langemisnurgaga, siin ei kehti, sest tavaliselt ei ole aluspind sile, vaid kare. Seeparast mõeldakse aktinomeetrias kiirguse peegeldumise all tema hajusalt peegeldumist, s.t pind hajutab kiirgust mitmesugustes suundades. Sellist kiirguse peegeldumist iseloomustatakse suurusega, mida nimetatakse albeedoks. See on arv, mis näitab, mitu protsenti aluspinnale langenud kiirgusest peegeldub hajusalt tagasi atmosfääri. Albeedo oleneb eelkõige peegeldava pinna optilistest omadustest ja varieerub väga laiades piirides. Veepinna puhul võib see olla ainult mõni protsent, samas värske ja koheva lume korral 90 - 95 %. Aluspinna albeedo väärtuste muutust aasta lõikes Tõravere piirkonnas illustreerib sele 3.



Sele 3. Aluspinna albeedo (%) keskmine aastane käik ja äärmuslikud väärtused Tõraveres (1955-2000). [3: 96]

Otsese kiirguse päevane käik kujuneb päikese kõrguse, pilvisuse ja atmosfääri läbipaistvuse koosmõju tulemusena. Otsese kiirguse tunnisummad on kõige suuremad juunikuu keskpäevalähedastel tundidel (Tõraveres keskmiselt 1,16, Tiirikojal 1,18 MJm²) (vt sele 4). Suvekuudel esinev tunnisummade väike ebasümmeetria keskpäeva suhtes on põhjustatud suuremast pilvisusest ja atmosfääri halvemast läbipaistvusest pärastlõunastel tundidel.



Sele 4. Horisontaalsele pinnale langenud päikese otsese kiirguse tunnisummade keskmine päevane käik Tõraveres (MJ/m²). [3: 81]

PV-paneelid kasutavad päikesest energia tootmiseks peamiselt otsekiirgust, hajuskiirgust ja maapinnalt peegelduv kiirgust.

Otsekiirgus on kiirgusenergia, mis jõuab maale paralleelsete kiirtena selge ilmaga (ei ole pilves). Otsekiirgus annab kõige enam energiat, mille püüdmiseks kasutatakse ühe- või kaheteljelisi päikest järgivaid ajameid. Otsekiirgust esineb Eestis kõige enam saartel ja Põhja-Eestis. Lõuna-Eestis on pilvisust enam ja seega PV-paneelide tootlikkus natukene väiksem.

Hajuskiirgus tekib aerosoolide suurema kontsentratsiooni tõttu õhus, pilvede tõttu või näiteks udu mõjul. Hajuskiirguse puhul ei ole üldjuhul vahet, mis ilmakaare suunas PV-paneelid on suunatud, energia tootlikkus jääb samaks. Hajuskiirgus on väiksema energiaga kui otsekiirgus, kuid siiski on see arvestatav elektri tootmisel päikeseenergiast.

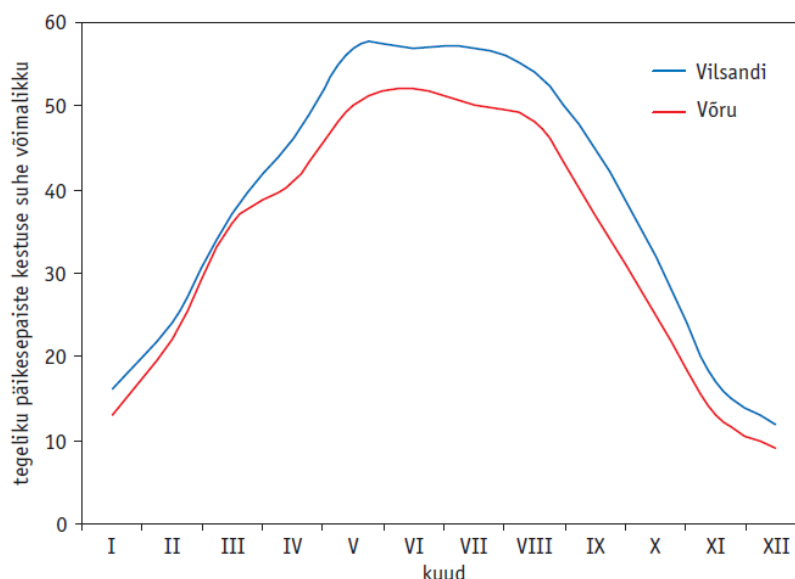
Peegelduv päikesekiirgus on Eesti puhul arvestatava tähtsusega, kuna talvekuudel on meil palju lund mille pinnalt peegeldub päike tagasi, lume albeedo väärtus võib olla meil kuni 95 %.

Kõige suurem päikesekiirgus ei ole alati otsene kiirgus (vt Lisa 1), näiteks jaanuari kuus võib peegeldunud kiirgus olla suurem kui otsene kiirgus ja pilvise ilma korral on hajuskiirgus suurem kui otsene kiirgus. Selleks, et saada kätte maksimaalne energia päikesepaneelidest, tuleks neid pidevalt juhtida ning hoida asendis, kus paneelile langev energia oleks maksimaalne.

1.1. Päikesepaiste kestus Eestis

Päikesepaiste kestuse puhul tuleb eristada kahte olulist terminit, üks neist on päikesepaiste võimalik kestus ja teine on päikesepaiste tegelik kestus. Päikesepaiste võimalik kestus on periood mingis kindlas geograafilises kohas, mille jooksul päikese ketas asub ülevalpool horisonti. Päikesepaiste tegelik kestus aga on määratud päikesepaiste tegeliku kestvusega vaadeldavas punktis, see on aeg, mille jooksul päikese otsene kiirgus jõuab aluspinnale, kui pole pilvi, udu, tugevat sompa vms ning ükski objekt ei varjutaks vaatluskohta. Aasta jooksul muutub päikesepaiste võimalik kestus päevast päeva, kuid on antud vaatluskohas aastati püsiv suurus.

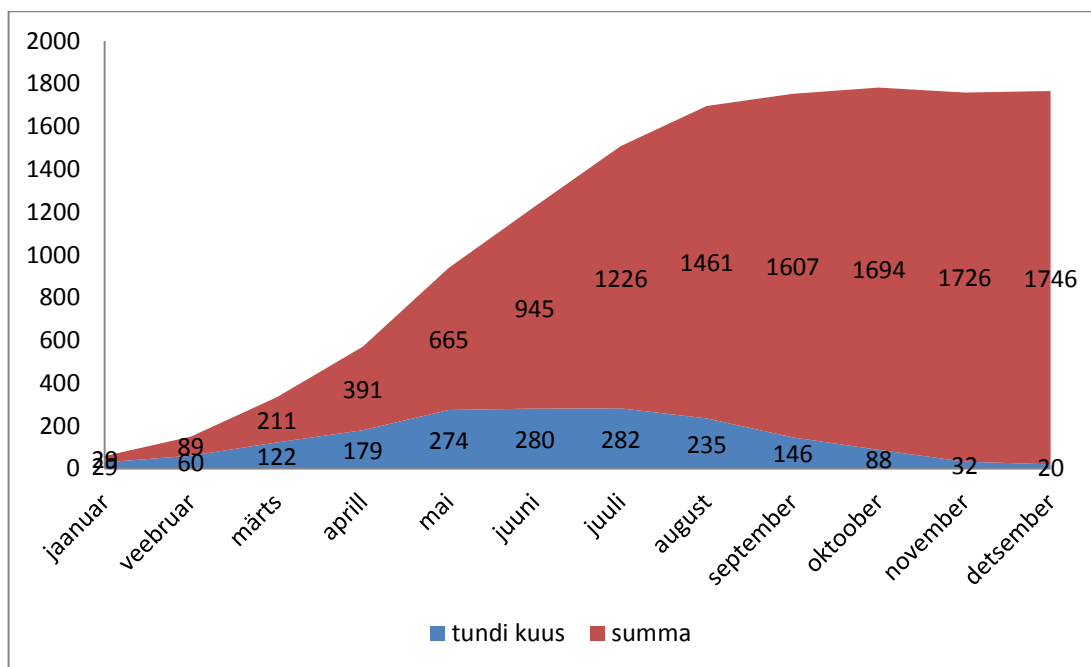
Päikesepaiste tegelik kestus on Eestis alati väiksem tema võimalikust väärtusest mis on ca 4500 tundi. Aasta tegelik päikesepaiste kestus moodustab Eestis keskmiselt 37...43 % võimalikust. Detsembris on see kõige madalam, 8...13 % selle võimalikust väärtusest ja suvel kõige kõrgem, 49...57 % võimalikust väärtusest (vt sele 5). Suvekuudel paistab päike rannikualadel päeva jooksul ligikaudu 1-2 tundi kauem kui sisemaal, talvel suurt erinevust ei ole. [3: 52]



Sele 5. Keskmine päikesepaiste tegeliku kestuse suhe selle võimalikku väärtusesse (%) Vilsandil (1959-2000) ja Võrus (1949-2000) [3: 62].

Aastas ei paista päike Eestis keskmiselt 97-l kuni 131-l päeval. Enamik selliseid päevi langeb talvekuudele. Kesksuvel on päikesepaisteta päevi keskmiselt vaid 2-5 [3: 55].

Kõige kauem paistab päike juunis-juulis (vt sele 6), kus on registreeritud kõige rohkem 13-17 tunniseid päevasummasid. Talvel see-eest on aga päevasummad väga väikesed, kõige rohkem on registreeritud kuni 1 tunniseid päevasummasid. Aastatel 1971 kuni 2000 kogutud andmete keskmise tulemuse järgi paistab Eestis päike aastas 1745,9 tundi.



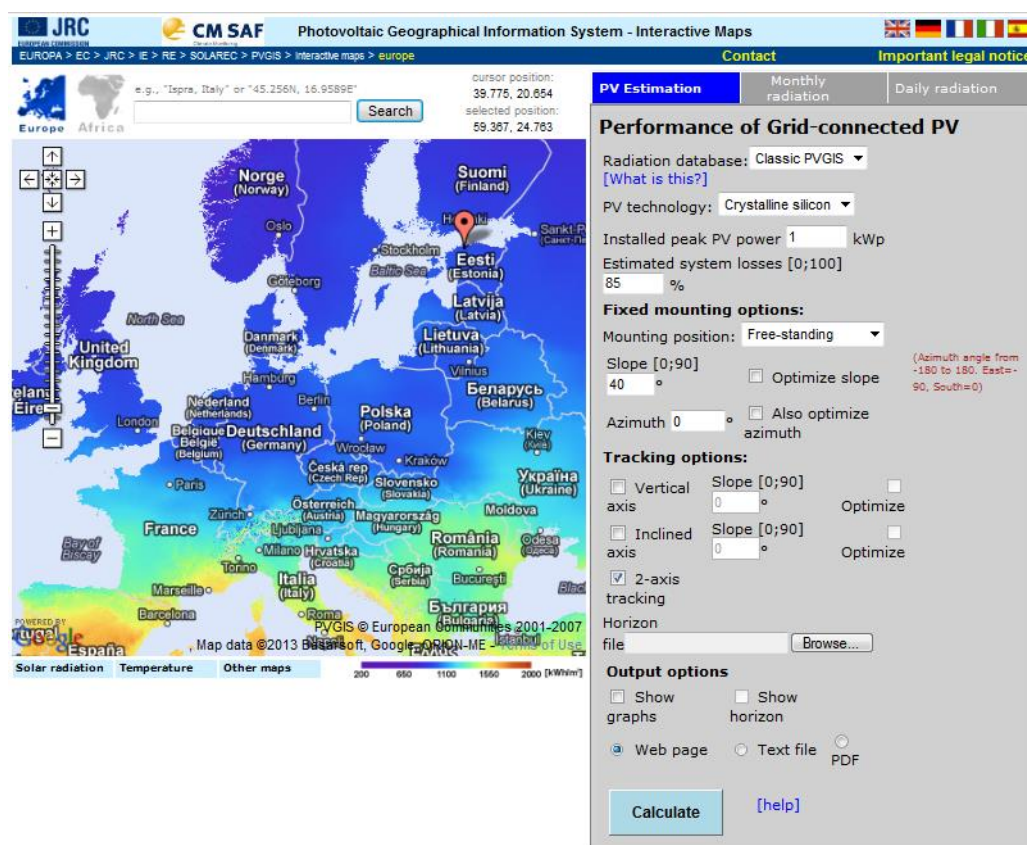
Sele 6. Päikesepaiste kestus tundides 1971-2000 aastate keskmine [3]

Ligikaudu kahel kolmandikul päevadest võib Eestis oodata kasvõi lühiajalist päikesepaistet.

Eelnevat kokkuvõttes võib öelda, et suvisel perioodil on Eesti päikesest tulenevat kiirgusenergiat piisavalt ja seda suvisel perioodil juuni-juuli kuus isegi kuni 17 tundi järjest, see on ca 70 % kogu ööpäevast. Talvekuudel jääb seda aga väga väheks ja teatud perioodil puudub peaaegu üldse. Talvisel perioodil mõjutavad seda ka sagedasem pilvkate.

1.2. Päikeseenergia hulk Eestis

Üheks heaks ja üldistavat infot andvaks andmebaasiks, päikeseenergia hulga kohta erinevates Euroopa piirkondades, on *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS), mis on loodud *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport* (IET) poolt kõigile vabalt kasutatavaks. Edaspidistes tabelites ja arvutustes võetakse aluseks selle andmebaasi info.



Sele 7. PVGIS kaardirakenduse veebileht. [16]

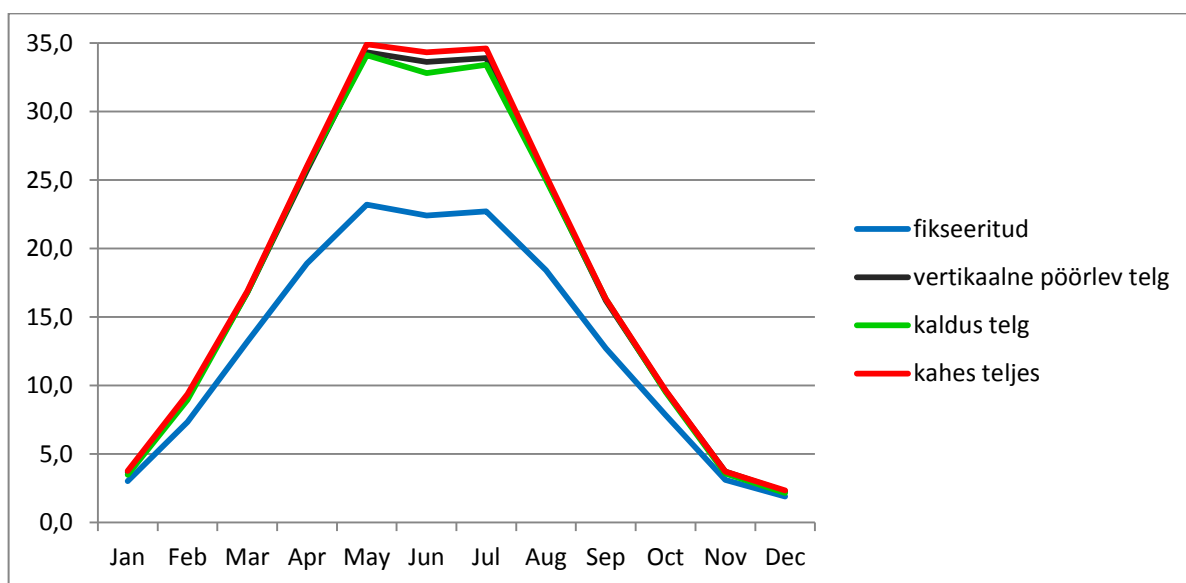
Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) kogub andmeid kogu maailmast, kõikidest kõikvõimalikest adekvaatsetest andmebaasidest nagu näiteks *ERSA*, *HelioClim-1*, *Satel-light*, *NASA SSE* ja paljudest teistest. Kogutud andmete põhjal on moodustatud oma andmebaas Euroopa kohta. Andmebaas kasutab oma andmete modelleerimisel (vt sele 7) ja kasutajale võimalikult lihtsalt arusaadavaks tegemisel GRASS GIS tarkvara [13].

Töö sisus edaspidi kasutatavad energiahulga suuruste väärtused erinevates Euroopa piirkondades tulenevad PVGIS andmebaasist. Andmed on võetud kõikides piirkondades ühe ja sama suurusega PV-paneelide nimivõimsust arvestades, ning andmebaasi enda poolt soovitatud optimaalset kaldenurka fikseeritud ning ühes teljes päikest järgivate süsteemide puhul.

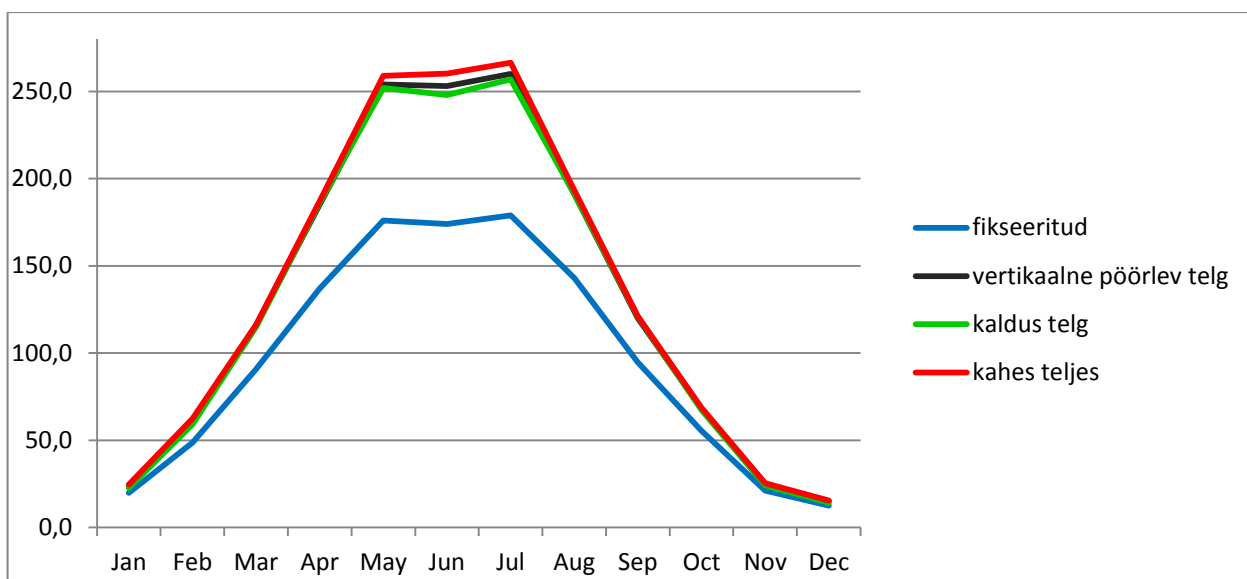
Määrates PVGIS kaardirakendusel asukohaks umbes Tallinna piirkonna ning sisestades all pool toodud olulisemad lähteandmed, saame tulemused mis on toodud Lisas 3.

Lähteandmed

- Asukoht: 58°59'43" põhjalaiust, 25°34'34" idapikkust (umbes Tallinn)
- PV süsteemi nimivõimsus: 1,0 kWp (crystalline silicon)
- Temperatuurist tulenevad kaod: 7,5%
- Peegeldumise tegurist tulenev kadu: 3,0%
- süsteemi kasutegur (PV-paneelid, kaablid, inverter jt.): 15,0%
- Süsteemi kombineeritud kasutegur: 13,5%



Sele 8. Kuu keskmine elektri tootlikkus 1 kWp süsteemi m² kohta (kWh/m²) Tallinnas [16]



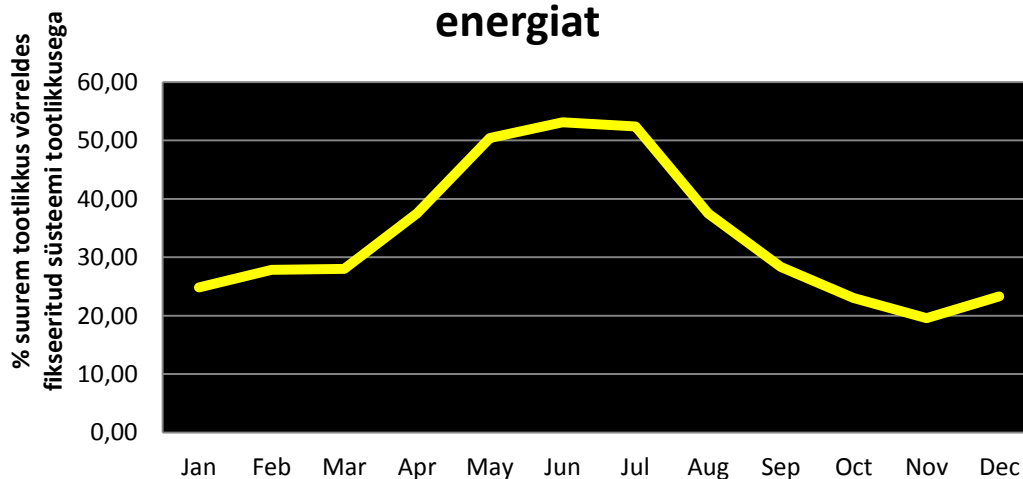
Sele 9. Kiirgusenergia kuu keskmine summa m^2 kohta mis langeb antud süsteemi PV-paneelidele (kWh/m^2) Tallinnas [16]

Aastane erinevus langevas energia hulgas, võrreldes fikseeritud süsteemiga, on järgmine:

- Vertikaalne telg + 36,5 % suurem tootlikkus
- Kaldus telg + 35,2 % suurem tootlikkus
- Kahes teljes + **38,9 %** suurem tootlikkus

Kahes teljes päikest järgiv süsteem toodab aastas keskmiselt 40 % rohkem elektrienergiat kui fikseeritud süsteem (vt sele 10). Talvekuudel on kaheteljelise süsteemi energia tootlikkus ca 20-30 % suurem kui fikseeritul ja suvekuudel rohkem kui 50 %.

Kaheteljeline süsteem toodab rohkem energiat



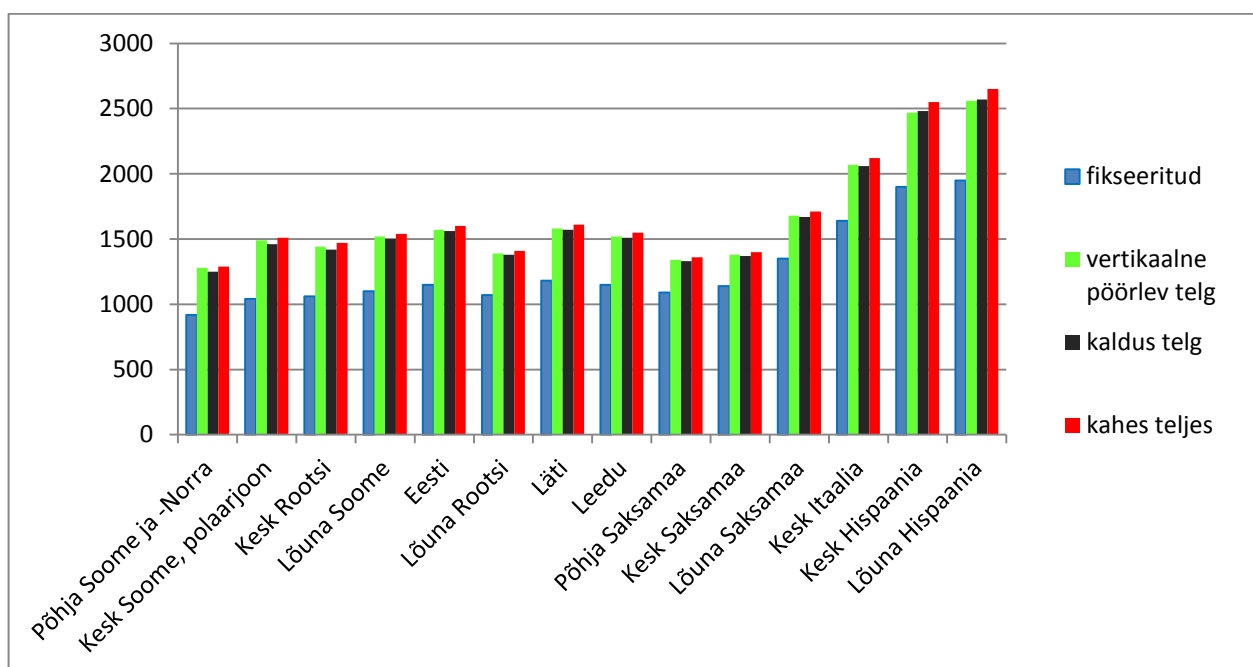
Sele 10. Kaheteljelise süsteemi tootlikkuse kasv %-ides võrreldes fikseeritud süsteemiga.

Edaspidistes arvutustes võetakse kaheteljelise süsteemi tasuvuse analüüsimiseks arvesse aasta keskmine 40 % suurem tootlikkus Eesti piirkonnas.

1.3. Päikeseenergia hulk mujal Euroopas

Mida rohkem ekvaatori suunas liikuda, seda soojemaks läheb kliima ning suuremaks maale langev päikesekiirguse hulk. PVGIS andmebaasist teiste Euroopa riikide kohta otsitud andmete põhjal võib järeldada, et Eestis on aastane päikesekiirguse hulk sama suur kui on see Kesk-Euroopas (vt Sele 11). Nende andmete põhjal selgub, et Eestis on isegi rohkem päikeseenergiat kui on seda Põhja-Saksamaal, kus propageeritakse väga suuresti päikesepaneelide kasutamist.

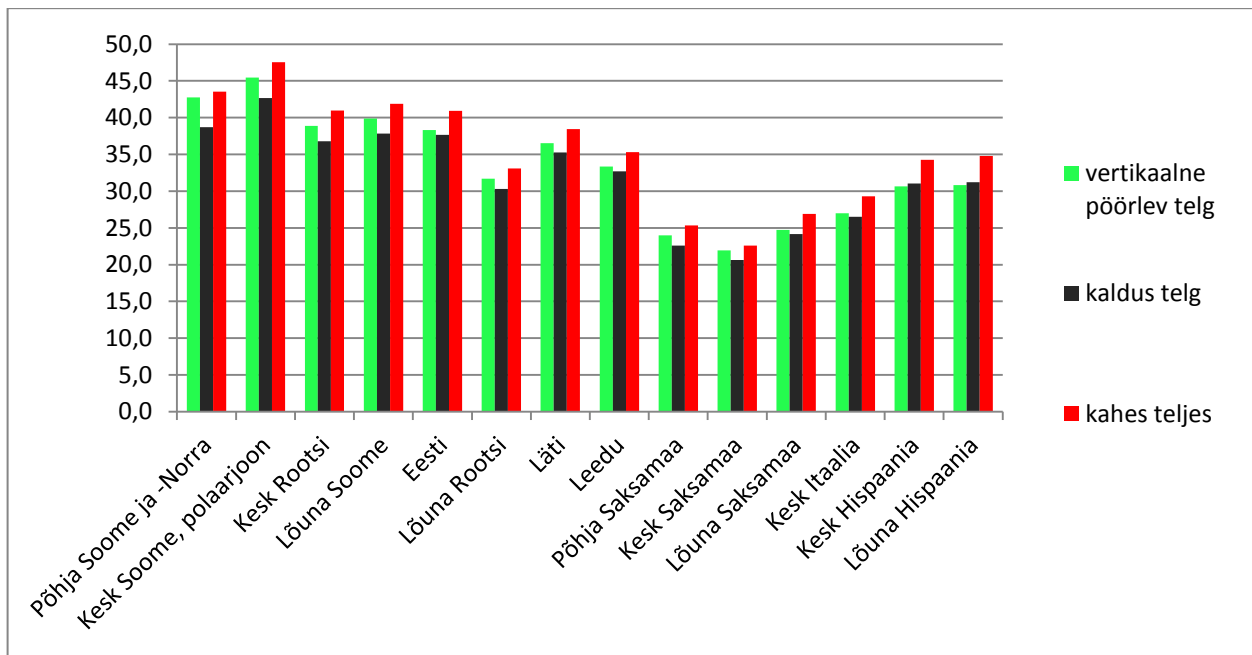
Suurem päikesekiirguse hulga erinevus algab Vahemere piirkonnast. Huvitav tähelepanek erinevate süsteemide võrdlemisel erinevates piirkondades oli, et Põhja-Euroopas on vertikaalse pöörleva teljega süsteem efektiivsem kui kaldus teljega ja vahemere piirkonnas vastupidi. Tuleneb see süsteemide võimekusest päikest järgida mööda asimuuti. Nimelt kaldusteljega süsteemi asimuut on maksimaalselt 90° (tõusu ja loojangu vaheline nurk maksimaalselt 180°) kui vertikaalse pöörleva teljega süsteem võib pöörata ümber oma telje kas või 360°.



Sele 11. Erinevates Euroopa piirkondade päikese kiirgusenergia hulk ühe ruutmeetri kohta, mis langeb 1 kWp süsteemi PV-paneelidele aastas (kWh/m²) [16]

Nagu järgnevalt graafikult näha (vt sele 12), on kõige suurem efekt päikest järgida Põhja-Euroopas, kõige suurem erinevus tuleb välja polaarjoonel. Selge on see, et mida kaugemale ekvaatorist liikuda, seda väiksemaks jääb aastane kiirgusenergia hulk ja efektiivsuse kasv ei tähenda alati suuremat tootlikkust. Kuid kui võrrelda Eestis kahes teljes päikest järgiva süsteemi aastast

tootlikkust ja Kesk-Itaalia fikseeritud süsteemi aastast tootlikkust, siis need on enam-vähem ühesuurused.

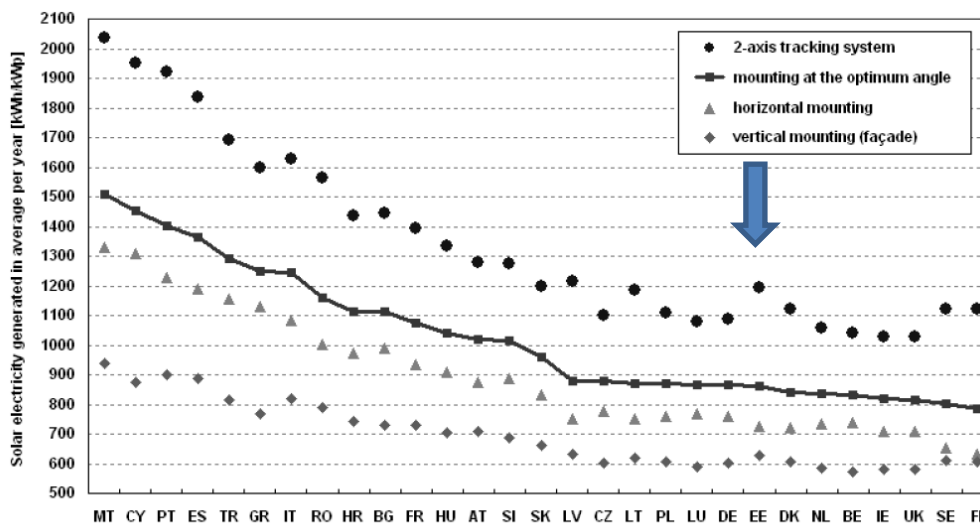


Sele 12. Erinevate süsteemide tootlikkuse kasv protsentides erinevates Euroopa piirkondades. [16]

Eelnevast analüüsist tehakse järeldus, et Põhja-Euroopas annavad päikest järgivad süsteemid suurema tootlikkuse kasvu kui lõunapoolsemates Euroopa piirkondades.

Samasugusele järelduseni jõudis ka Jennifer Rundle oma 2005 aasta raportis „*The Renewable Energies Unit Activities Report*“ [4: 11] (publikatsioon nr. 004517), mille ta esitas Euroopa Liidu ühinenud uuringute keskusele.

Alloleval graafikul (vt sele 13) toob J. Rundel välja, et kaheteljeline päikest järgiv süsteem avaldab kõige suuremat efekti Baltimaades ja Vahemere piirkonnas.



Sele 13. PV-paneelide elektrienergia tootlikkus erinevates Euroopa piirkondades. [4: 11]

1.4. Päikeseenergia tänapäev ja tulevik

2011. aastal oli kogu maailma elektrienergia tootmisvõimsus rohkem kui 5300 GW, sellest ~25 % moodustas taastuvenergiatel põhinevad energia tootmise tehnoloogiad, milles kõige suurema osa moodustasid hüdroenergiajaamad [6: 23]. 2010. aastal oli see veel alla 20 %.

1995. aastal oli kogu maailmas päikeseelektrijaamade koguvõimsus 0,6 GW, 2005 aastal juba 5,4 GW, pärast mida on kasv oluliselt kiirenenud ulatudes 2011. aastal juba 70 GW-ni [6: 48] ning kogutoodang ca 85 TWh (ca 4 % kogu elektritootmisest). PV-paneelidega elektrienergia tootmine taastuvatest energiaallikatest on olnud viimastel aastatel kõige suurema juurdekasvuga. Suurimad päikesest elektri tootjad Euroopas on Saksamaa, Kreeka, Austria, Itaalia, Prantsusmaa. Maailma mastaabis Saksamaa (36 %), Itaalia (18,3 %), Jaapan (7,1 %), Hispaania (6,5 %), USA (5,7 %) [6: 48].

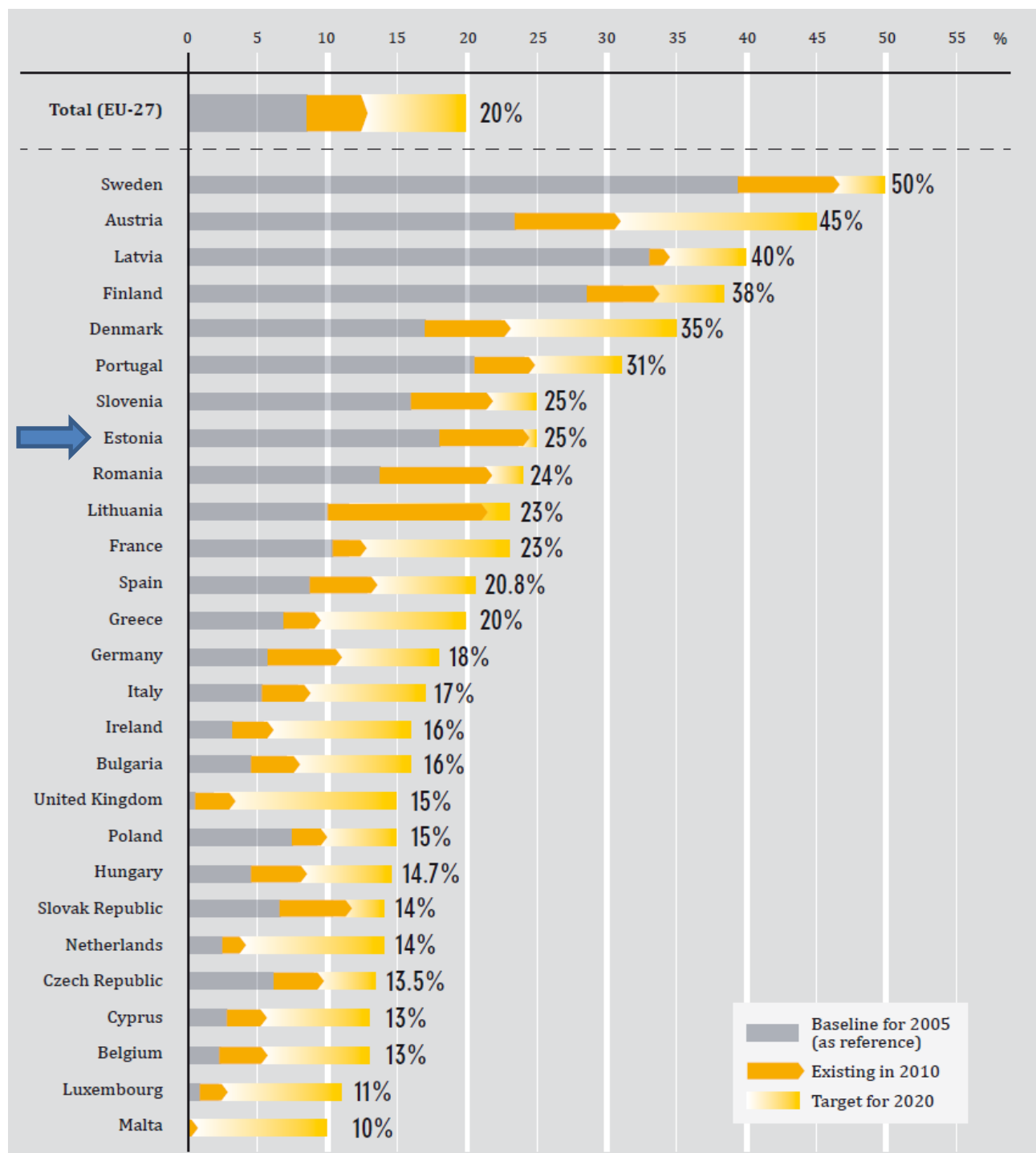
Aastaks 2020 prognoosib *European PV Industry Association* päikeseelektrijaamade koguvõimsuseks maailmas 200 GW.

Euroopa Liit on võtnud selge sihi vähendamaks energia tootmist mittetaastuvatest energiaallikatest. Energiapoliitika rakendamiseks on välja töötatud meetmed, ehk nn kliimapaketid, mis sisaldab olulisemaid sihtväärtuseid energia efektiivsuse, taastuvenergiaallikate ja biokütuste kasutamise ning süsinikdioksiidi kogumise ja ladustamise kohta aastal 2020, nendeks on [24: 23]:

- vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid vähemalt 20% võrra võrreldes baasaastaga 1990 (2005. aastaks oli vähendatud 6%);
- tõsta taastuvenergia osakaal 20%-ni primaarenergia lõpptarbimisest (2005. aastal oli EL keskmiseks osakaaluks 8,5%);
- saavutada 20% efektiivsem energia kasutamine primaarenergia lõpptarbimises;
- suurendada biokütuste osakaalu transpordikütustes 10%-ni eeldusel, et õnnestub välja töötada teise põlvkonna biokütused.

Liikmesriigid on seadnud endale taastuvatest energiaallikatest toodetava energia osatähtsuse eesmärgid saavutamaks EU keskmise 20% taseme. Eesti on selle tarvis koostanud dokumendi „Energiamajanduse riiklik arengukava aastani 2020“, mis kiideti heaks Vabariigi valitsuse poolt 26. November 2010, mille kohaselt peab taastuvenergia osakaal moodustama kogu lõpptarbimisest 25% [24: 26]. Alljärgneval graafikul, mis on pärit REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*) 2012 aasta raportist (vt Sele 14), on näha kes ja kui kaugele aastaks 2010 on jõudnud. Vaadates Eestit, oleme me oma eesmärgi saavutanud ja seda juba 2011. aastal, mil see näitaja oli 25,7 % [25].

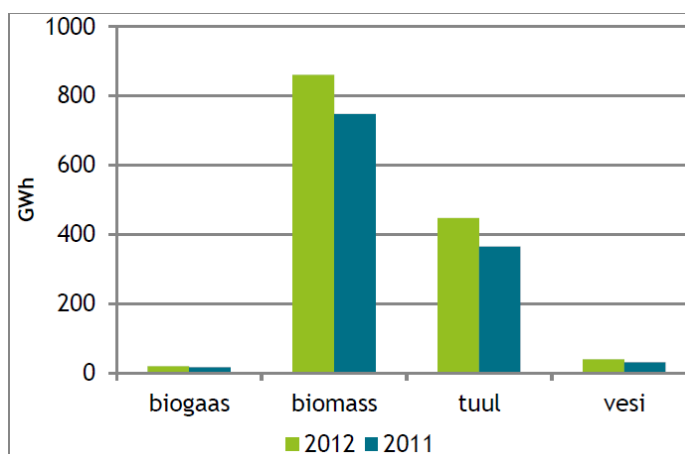
Elektrienergia tarbimine 2011. aastal oli Eestis Elering'i andmetel ca 7800 GWh, millest ca 35 % tarbis tööstus ja 27 % kodumajapidamised [24], ja aastaks 2013 prognoositakse tarbitavaks energiaks 8900 GWh, see teel 14,1 % juurdekasvu. Eleringi andmetel moodustas 2011. aastal Eestis taastuvatest energiaallikatest toodetud elekter kogutoodangust ca 13 % (vt lisa 5), 2012. aastal suurenes see ca 18% ja moodustas kogu bilansimahust juba ca 18 %.



Sele 14. Taastuvenergia osakaal ning eesmärgid aastaks 2020 kogutoodangust. [6: 66]

OÜ Eleringi juhi Taavi Veskimägi sõnul on taastuvenergia osakaalu ja mahu kasv olnud Eestis väga kiire, mis ühelt poolt on kindlasti rõõmustav trend, kuid teisalt on see selge märk vajadusest senine toetuste süsteem üle vaadata. [7]

Eestis toodetakse enamust taastuvenergiast biomassist ja tuulest (vt Sele 15). Energiatootmine PV-paneelidega päikesest on seni Eesti piirkonnas olnud olematu. Kuigi meil on päikest peaaegu sama palju kui Kesk-Euroopas ja sama palju kui Saksamaal, kus toodetakse väga suur osa elektrienergiast just PV-paneelidega, siis on selle valdkonna areng jäänud Eestis pigem poliitiliste otsuste taha. Täna on hakanud see muutuma tänu Euroopa liidu liikmesriikide ühistele eesmärkidele vähendada CO₂ emissiooni ning ka tänu päikesest energia tootmiseks vajalike komponentide hinna odavnemisele. Mõned aastad tagasi alustasid kaks väliseestlast pilootprojektiga rajada esimene PV-elektrijaam Võrumaale. Täna on jaam püsti, kuid vaidlus käib hetkel Elering'iga võrguliitumise saamise üle. Lähemalt kirjutatakse sellest projektist peatükis 3.2. Autori seisukohalt on see oluline pretsedent Eestis, mis tõenäoliselt sillutab teid ka teistele samasugustele projektidele.

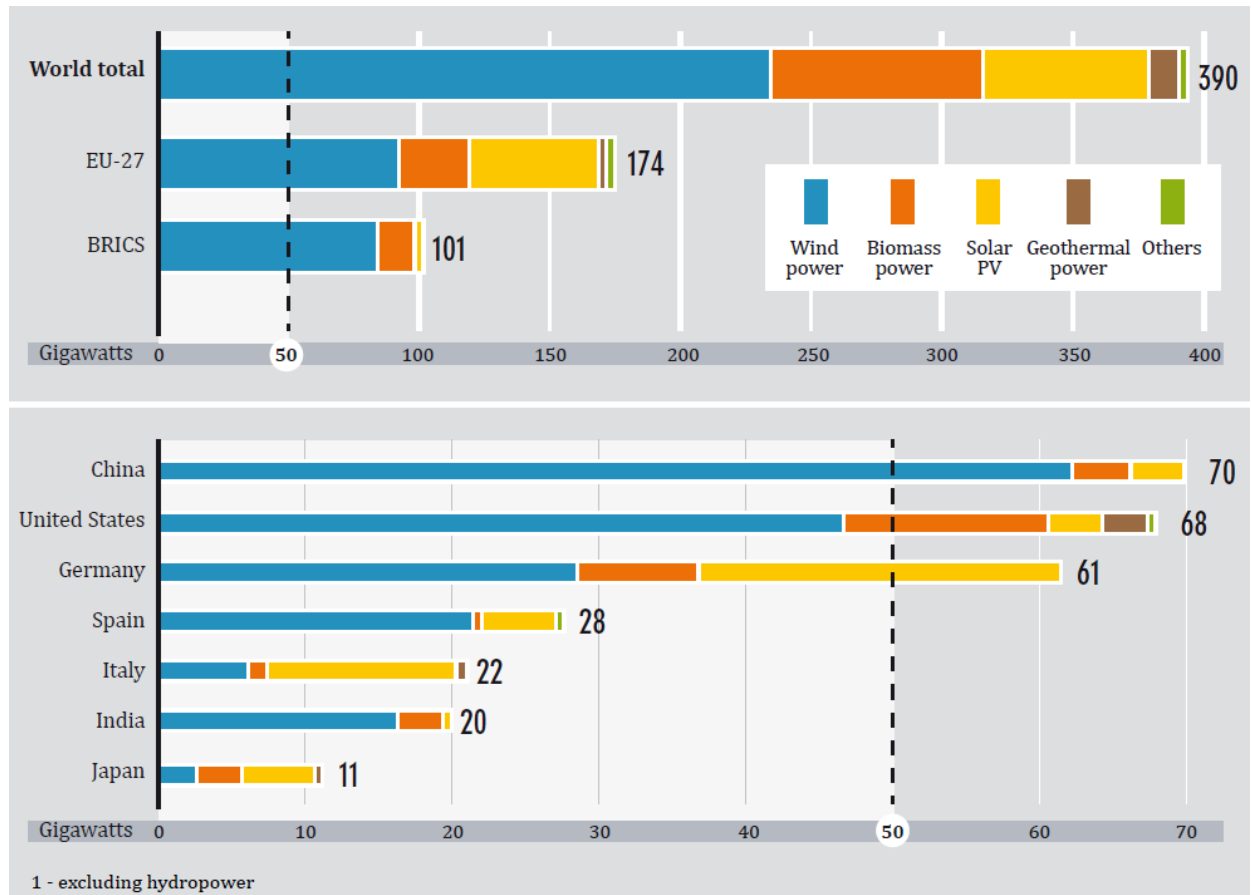


Sele 15. Taastuvenergia tootmise jaotus Eestis aastatel 2012 ja 2011 [17: 1]

Erinevaid raporteid ja kokkuvõtteid lugedes on selge, et arenenud ühiskonnad liiguvad selles suunas, et vähendada energia tootmist mittetaastuvatest energiaallikatest eesmärgiga vähendada CO₂ emissiooni keskkonda. Selleks arendatakse uusi tehnoloogiaid, üritatakse saavutada suuremat efektiivsust olemasolevatega ja suletakse vanu elektrijaamu. PV-paneelidega päikesest elektrienergia tootmine on maailmas üsna määrama osakaaluga - maailmas kolmas ja Euroopas teisel kohal (vt Sele 16). Euroopa mastaabis on kõige suuremaks päikesest elektrienergia tootjaks Saksamaa, kus moodustab see taastuvatest energiaallikatest toodetava energia kogutootmisest pea poole. Eestis ei ole kahjuks seda energiaallikat propageeritud, kuigi Eesti piirkonnas on aastane kiirgusenergia hulk enamvähem sama suur.

Taastuvenergia osakaal kogu energia tootmisel on kasvamas, seda kinnitavad kõik, kuid kui suures osas, siis seal lähevad arvamused lahku. Nafta töötlemisega seotud ettevõtted ja organisatsioonid

ennustavad aastaks 2050 taastuvenergia osakaaluks kogu energia tootmisel 15–20 %, seda ennustust nimetatakse konservatiivseks. Teise äärmuse esindajad nagu näiteks *Greenpeace* ja GEA (*Global Energy Assessment*) hinnangul võiks see näitaja olla isegi kuni 95%. Mõõduka hinnangu taastuvenergia osakaalu kasvamisele annab IAE (*International Energy Agency*), nende hinnangu on taastuvenergia osakaaluks energia tootmisel 2050 aastal 25-40 %. [5:15-16].

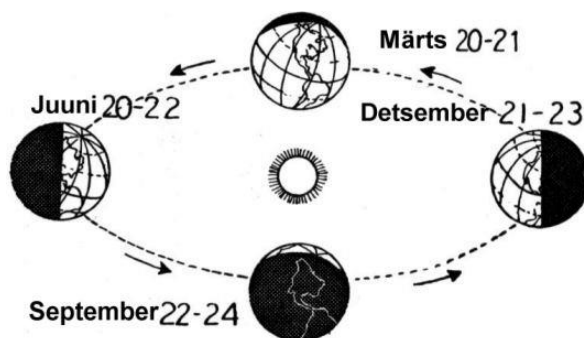


Sele 16. Erinevate taastuvenergia allikate tootmisvõimsused maailmas 2011. aastal [6: 25]

2. PÄIKESE JÄRGIMINE

Päike ei liigu aastaringselt mööda ühte trajektoori, vaid varieerub aasta lõikes ja erinevatel laiuskraadidel on see erinev. Mida kaugemal asutakse ekvaatorist, seda suurema varieeruvusega on päikese trajektoor aasta lõikes. See tuleneb sellest, et planeet Maa on oma ekliptika tasandi suhtes $66,6^\circ$ kaldus ja tiirleb ümber päikese. Ühe täis tiiru tegemiseks kulub üks aasta. Sellest tulenevalt on näiteks põhjapoolus suvel suunatud päikse poole ja talvel jällegi päikesest eemale niimoodi, et seal ei paista terve öö-päeva jooksul päikest (polaaröö) (vt sele 17).

Kui Maa telg oleks risti Päikese kiirte suhtes, kestaks nii päev kui ka öö kaksteist tundi muutusteta läbi aasta. Kuid Maa telg asub orbiidi tasapinna suhtes nurga all, ning selline asend põhjustabki aastaegade – kevade, suve, sügise ja talve esinemise.



Sele 17. Aastaaegade teke [15]

Eestis on suvisel pööripäeval päikese asimuut² $\sim 140^\circ$, see teeb päikese tõusu- ja loojangu vaheliseks nurgaks $\sim 280^\circ$! Talvisel pööripäeval on asimuut $\sim 40^\circ$ ja seega tõusu- ja loojangu vaheline nurk $\sim 80^\circ$.

Mida kaugemal ekvaatorist liikuda, seda suurem on vajadus päikesest päikesepaneelidega maksimaalse energia kättesaamisel, päikest järgida ja seda mitte ainult ühes teljes, mööda asimuuti, vaid tuleb ka järgida päikese tõusunurka³. Päikese tõusunurk Eestis on suvisel pööripäeval maksimaalselt $\sim 55^\circ$ ja talvisel pööripäeval ainult $\sim 7^\circ$. Järgnev pilt (vt sele 18) illustreerib hästi eelpool kirjeldatud.

²Asimuut - nurk päikese ja keskpäevajoone vahel, ida suunas negatiivne, lääne suunas positiivne.

³Tõusunurk - päikese kõrguse nurk vaadeldavas punktis horisontaalprojektsiooni suhtes



Sele 18. Päikesepaneelide asend suvel ja talvel samal kellaajal. Colorado osariik, USA.

Päikest järgiv päikesepaneelide alusraam, (ing.k. *Solar Tracker*) võiks ka lühemalt nimetada kui päikese jälgija – süsteem, mis järgib päikese liikumist, et hoida päikesepaneele terve päeva päikesekiirtega risti. Päikesepaneelide maksimaalne tootlikkus on siis, kui päike langeb neile 90° nurga all.

PV-paneelide energeetiline tõhusus sõltub paljudest teguritest. Kõige tähtsam on kui palju langeb kiirgusenergiat paneelidele, kuid olulised on ka veel ümbritseva keskkonna kliima ja millisel moel on paneelid paigaldatud. Kliimast tulenevad mõjud on peamiselt ümbritsev temperatuur, pilvisuse ja sademed nii suvel kui talvel. Temperatuuri tõustes kasvab PV-paneelide elementide sisetakistus, mis omakorda viib energia tootlikkust alla. Pilved omakorda takistavad päikese otsese kiirguse langemist paneelidele mis vähendab energia tootlikkust ning talvel võib lumikate katta paneele, mis taas kord viib PV-paneelide tootlikkust alla.

PV-paneeli energia tootlikkust langeb ka sellele langeva päikese kiirguse nurga suurenemisel (ing.k. *angle-of-incidence effect (AOI)*), mida suurema nurga all langeb päikesekiirgus PV-paneelile, seda väiksem on energia tootlikkus. Kiiritustihedus PV-paneeli pinnal iseloomustab järgmine valem:

$$E_p = S_0 \times \tau_{at,H} \times \cos \gamma \quad (1)$$

kus:

E_p – kiiritustihedus [W/m^2]

S_0 – solaarkonstant [$1372 \text{ W}/\text{m}^2$]

$\tau_{at,H}$ – atmosfääri läbipaistvustegur

γ – pinna normaali ja päikesekiirte vaheline nurk

Selle efekti vähendamiseks on tootjad kasutanud erinevaid tehnoloogiaid, nagu kindlate omadustega katteklaas, tekstuuriline katteklaas valguse paremaks murdumiseks paneeli pinnal jne. Lisaks eelnevale toodetakse ka erinevatest materjalides PV-elemente nagu kristalliline räni, amorfne räni, CdTe, $\mu\text{c-Si}$, c-Si, CIS, CIGS, HIT jt. Kuid kõikidel neil on omad eelised ja puudused, mis materjal töötab paremini külmas keskkonnas, mis on parema kasuteguriga maksimaalsel kiirgusel, mis on tundlikum jne. Uuringute järgi töötavad külmades piirkondades, nagu Põhja Euroopa, kõige efektiivsemalt c-Si ja CIGS tüüpi PV-paneelid, kuid samas on Tallinna Tehnikaülikooli teadlased oma katsetes jõudnud järeldusele, et Eesti tingimustes töötavad kõige paremini CdTe tehnoloogial⁴ baseeruvad paneelid. Seda just sellepärast, et CdTe kannatab madalamaid temperatuure ja töötab paremini kehvemas valguses [8: 37].

Kuid kõik need tegurid mängivad väikest rolli saavutamaks suuremat energia tootlikkust kui on seda paneelide pidev ja õige positsioneerimine maksimaalsesse päikesekiirgusesse. Päikesekiirguse langemisel PV-paneelile suurema nurga all kui 15° hakkab kiirgustihedus oluliselt langema ja seda siis valemist (1) tuleneva $\cos \gamma$ teguri väärtuse pärast.

Kuna päike on pidevas liikumises, õigemini maa päikese suhtes, siis tuleb paneele füüsiliselt pidevalt päikese suunas hoida, et energiatootlikkus oleks maksimaalne. Selleks kasutatakse peamiselt kahte meetodit, üks neist on enam levinud ja teine vähem. Enim levinud meetodi põhimõtteks on ajasüsteem, ehk siis PV-paneele hoitakse pidevalt päikese suunas vastavalt kontrollerisse programmeeritud kella järgi. Süsteemi paigaldamisel tuleb programm kellale sisestada tema asukoha laiuskraad vastavalt millele ta arvutab välja piirasendid asimuudile ja tõusunurgale ning hakkab nende väärtuste vahel opereerima aasta lõikes.

Teine süsteem on maksimaalse kiirgusvoo järgmine (*ing. k. real tracking*), mis ei tule alati otse päikesest. Maksimaalne kiirgusvoog võib tulla erinevatel perioodidel erinevatest kohtades, nagu hajuskiirgus või peegelduv kiirgus. Eestis on lumerohketel talvekuudel suur osatähtsus lumelt peegelduval kiirgusel. Selliseid süsteeme, mis PV-paneele suudavad maksimaalses kiirgusvoos hoida, on vähe. Töö autorile teadaolevalt on Euroopas müüdava tootena turule tulnud ainult üks firma, kes on oma süsteeme müünud kümneid tuhandeid ja suure osa neist Põhja-Kanadasse. Internetist leiab ka mitmeid artikleid analoogsete süsteemide prototüüpide kohta, kuid valmistootena turule neid lastud veel ei ole.

Selal 19 on toodud töö autori ettevõttes valmistatud katseseade. Sellise süsteemi põhimõte seisneb ühesugustele fotoelektrilistele anduritele langeva kiirgusenergia võrdlemises. Robotkäele on

⁴ CdTe (ing.k. *Cadmium telluride*) - kaadmiumtelluriid. Enamasti kasutatakse õhukeste kile tüüpi PV-paneelide tootmiseks.

paigaldatud võrdsete nurkade all neli PV-paneeli millede tühijooksu väljundpinget võrdleb kontrollerr. Pingete erinevusest tulenevalt liigutab robotkäsi ennast kontrollerrisse programmeeritud algoritmi järgi suurema kiirgusvoo suunas, kõikides koordinaatides korruga (x, y, z). Pingete võrdsustumisel on katseseade suunatud maksimaalse kiirgusenergia allika suunas. Kontrollerreri funktsioon on teostada mootori juhtahelates releelülitusi vastavalt PV-paneelide väljundpingete ehk kontrollerreri sisendite järgi.



Sele 19. Maksimaalse kiirgusvoo järgmise katseseade

2.1. Erinevad süsteemid

PV-paneele paigaldatakse mitmel erineval viisil. Selle peamiseks põhjusteks on paigaldatava süsteemi suurus, geograafiline asukoht ning süsteemi paigaldamise eesmärk. Kui eesmärk on paigaldada kodumajapidamisse mõned üksikud paneelid põhivajaduste (valgustus, külmkapp) rahuldamiseks, siis paigaldatakse paneelid fikseeritud kujul parimasse võimalikku kohta suunaga lõunasse ja optimaalse kaldenurgaga. Suuremad süsteemid, nagu näiteks elektrienergiapargid, kasutavad lisaks fikseeritud süsteemidele ka päikest järgivaid süsteeme. Süsteemi valik sõltub siin juba geograafilisest asukohast ja eesmärgist saavutada maksimaalne tootlikkus. Mida lähemal ekvaatorile, seda vähem on vajadus päikest järgida, kuna päikese trajektoori asimuut muutub seal aasta lõikes oluliselt vähem kui näiteks Eestis, ning sellest tulenevalt ei saavutata suurt tootlikkuse kasvu. Mida rohkem põhja või lõuna suunas ekvaatorist, seda suurema efekti annab päikese järgimine saavutamaks suuremat tootlikkust.

PV-süsteemid jagunevad kulupõhiselt mitmeks osaks, millede maksumus sõltub paigaldatava süsteemi võimsusest. Suur rahaline erinevus tuleb võrguga ühendatud ja mitte ühendatud süsteemide puhul. Võrguga mitte ühendatud (*off-Grid*) süsteemi puhul on vaja energiat salvestada, seda siis PV-paneelide ebaühtlasest tootlikkusest tulenevalt energiatarbimise ühtlustamiseks kui ka üle jääva energia salvestamiseks. Võrguga ühendatud (*on-Grid*) süsteemide puhul toimub nii-öelda akuna elektrivõrk. Lisaks paneelide, inverterite ja akude maksumusele tuleb teha investeering ka paneelide paigalduslahendusse. Kõige odavam lahendus on paigaldada paneelid olemasoleva hoone katusele, mis on optimaalse kaldega ja suunaga lõunasse. Sobiva viilkatuse puudumisel või selle vähese pindala tõttu, tuleb paneelid paigaldada tugevale alusraamile lamekatusele või maapinnale, mis konstrueeritakse vastavalt objekti võimalustele ja süsteemi võimsusele ning mis võib maksta isegi mitu tuhat eurot süsteemi kW kohta. Lisaks fikseeritud asendiga raamile on olemas mitmeid aktiivseid alusraame mis PV-paneeli päikese suunas pööravad tehes seda siis ühes või kahes teljes.

REN21 2012 aasta raportist, mis võtab kokku taastuvenergia valdkonnas toimuva 2011. aastal kogu maailmas, tuleb välja, et maailma keskmine hind PV-paneelide süsteemi katusele paigaldatava süsteemi kohta on 1900 – 2500 EUR/kW (eramutel süsteemid 3-5 kW, tööstus 100-500 kW) ja maapinnale paigaldatavate elektrijaamade 2,5 – 100 MW süsteemide maksumus 1400 – 1800 EUR/kW.

Ühe näitena võib välja tuua ka Taastuvenergia OÜ kodulehel välja toodud PV-paneelide paigaldamise standardlahenduse. Võttes aluseks käesolevas töös projekteeritava PV-paneelide alusraami 16 paneelilise mahutavuse, analüüsis töö autor just nii suurearvulisi teisi PV-paneelide paigaldamise lahendusi ning nende maksumusi Taastuvenergia OÜ kodulehel toodud näidete põhjal.

Tabel 1.

Kivikatusele paigaldatava fikseeritud süsteemi kogukulu [18]

süsteemi osa nimetus	maksumus EUR	osakaal %	
Võrguinverter (3680 W)	1120,00	15,1	62,8
PV-paneelid 245W x 16 tk (3920 W)	3528,00	47,7	
Paigaldustarvikud (s.h. ka alusraam)	1005,00	13,6	27,2
paigaldus	1012,00	13,7	
võrguga liitumise projektitasud	138,00	1,9	10,0
võrguga liitumise tasu	600,00	8,1	

Maksumus kokku ilma k.m.	7403,00
Süsteemi maksumus ilma võrguga liitumata EUR/kW	1848,64
Süsteemi maksumus EUR/kW	2011,68

Kõige suurema osa kogu projekti maksumusest moodustavad PV-paneelid ~48%, võrguinverter 15%, paigaldustarvikud ~14 %, paigaldustööd ~14% ning võrguga liitumise tasud ning selleks vajalikud projektid moodustavad 10% kogu investeeringu osast.

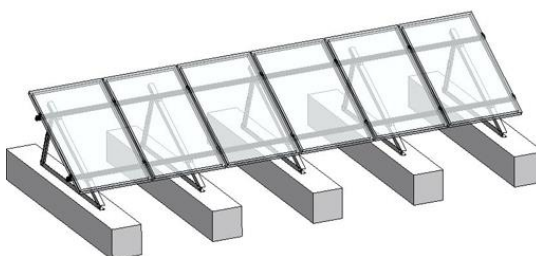
Sellise süsteemi aastane tootlikkus Taastuvenergia OÜ andmetel on 3600 kWh. Võttes aluseks hetkel kodutarbijale kehtiva elektrienergia tarbimise hinna (elekter+võrgutasu+aktsiis) mis on ilma käibemaksuta 0,116 EUR/kWh, siis saame aastase kokkuhoiu 417,60 eurot, just nimelt kokkuhoiu omatarbimiselt. Võrku tagasi müümisel kehtivad Eestis kahjuks veel madalamad tariifid kui ostmisel. Tõenäoliselt jääb see veel tükiks ajaks nii.

Selline investeering tasub ennast ära ca 17-18 aastaga juhul, kui süsteem on soetatud ilma toetusi kasutamata.

2.2. Erinevate süsteemide selgitus

Fikseeritud süsteem

Paneelid on fikseeritud statsionaarsele alusraamile kindla nurga alla ja on suunatud võimalusel lõunasse.



Sele 20. Fikseeritud süsteem

Vertikaalse pöörleva teljega süsteem

Paneelid on kinnitatud fikseeritud nurga all vertikaalse ümber oma telje pöörleva masti külge. Paneele hoitakse pidevalt päikese suunas. Päikese järgimine tõusu- ja loojangu nurga suhtes 360 °.



Sele 21. Vertikaalse pöörleva teljega süsteem

Kaldus teljega süsteem

Paneelid on kinnitatud paralleelselt pöörleva telje külge, mis on horisontaaltasapinna suhtes kaldus selliselt, et paneelidele langeva päikesekiirguse aastane hulk oleks maksimaalne. Pöörlev telg ise on põhja-lõuna suunaline. Päikese järgimine tõusu- ja loojangu nurga suhtes maksimaalselt 180° .



Sele 22. Kaldus teljega süsteem

Kahes teljes pöörav süsteem

Paneelid on kinnitatud alusraamile, mis on võimeline paneele liigutama nii horisontaal- kui vertikaal suunal. Selline süsteem võimaldab PV-paneele hoida kogu aeg suunaga päikesepoole selliselt, et päikese kiirguse langemise nurk PV-paneelile oleks võimalikult väike. Kuna otse päikesest tulev kiirgusenergia ei ole alati kõige suurem, siis kaheteljeline süsteem võimaldab paneelid suunata vajadusel hetkel kõige suurema kiirgusallika suunas (hajuskiirgus pilvedest, peegelduv kiirgus lumelt).



Sele 23. Kahes teljes pöörav süsteem

Erinevaid süsteeme on veel, kuid nende osakaal maailmas kasutatavates energiaparkides on sekundaarne ja pigem on need tootjate katsejaamad oma tehnoloogia katsetamiseks reaalsetes tingimustes.

2.3. Võrumaa projekt Energy Smart OÜ näitel

2010. aastal projekteeris Energy Smart OÜ esimese päikesepargi Eestisse, mille võimsuseks saab 100 kW. Päikesepargi ülespanek koos seadmetega läheb eelarvestuste kohaselt maksma umbes 300 000–400 000 eurot. Arvestuste kohaselt võib Kurenurme päikesepark aastas toota kuni 150 megavatt-tundi elektrit, mis peaks katma umbes sadakonna majapidamise vajaduse. Pargi päikesekiirgust elektrienergiaks muundavate seadmete eluiga küünib ligikaudu 30 aastani.

„Keema külas Kurenurme lähistel on juba püstitatud üksteist betoonist vundamenti ning metallposti. Nüüd käib pinnase ettevalmistus seadmete paigaldamiseks ning kaablite veoks. Tulevikus hakkavad paneelid end ise päikese järgi keerama. Õigupoolest valguse järgi, sest ka veebruaris pilvise ilmaga toodab selline jaam energiat, kogudes seda lume pealt peegelduvast valgusest. Lõuna-Eesti künklik maastik on päikeseenergia tootmise osas üks tänuväärne nähtus, kuna küngaste lõunapoolsetele külgedele on võimalik panna päikesepaneele tihedamalt, kui tasase maa peale.“ [9]

Ideega toota Eestis päikeseenergiast elektrit tuli välja Austraaliast Võrumaale kolinud Eesti juurtega Michael Wegecsany, kes aastaid Austraalias ja Saksamaal just alternatiivenergia alal tegutsenud. Asutanud siin päikeseenergia võimaluste kasutuselevõtuks firma Energy Smart OÜ, nakatas ta südamelähedase teemaga ka oma naabrimehe Viido Polikarpuse, kes USAst naasnuna oli loonud Tallinnasse Eesti Maja.

Wegecsanyi hinnangul päikesefarmiga ka „ratsa rikkaks“ ei saa. Vähemalt Eestis praegu mitte. Toetuse puhul, mis kataks 60% investeeringust, teeniks see praeguse (2009) hinna juures – Eesti Energia maksab taastuvenergia eest 85 senti/kWh – tagasi 16 aastaga. Lätis oleks võimalik see tagasi teenida 8 aastaga, sest seal väärtustatakse taastuvenergiat topelt kõrgema hinnaga, teab Wegecsanyi. [10]

Majandus- ja kommunikatsiooniminister Juhan Parts on Kurenurme lähitulevikus kerkiva päikesepargi puhul märkinud, et selle tööst saadavate andmete põhjal saab tulevikus otsustada, kas ja millises mahus on mõttekas Eestis päikesest elektrienergia tootmist arendada ja toetada.

Tänaseks hetkeks on park valmis saanud ja väidetavalt töökorras, kuid hetkel veel elektrivõrguga ühendamata. Võrguga liitumise ja elektrienergia võrku müümiseks on vaja sõlmida võrguettevõttega pisitootja võrguliitumise leping. Autori hinnangul seisab hetkel liitumine vaidluste taga, kes peaks tegema investeeringuid võrgu taristusse, et see oleks võimaline vastu võtma toodetavat energiat. Elektri jaam on rajatud võrgu alumisse madalama pingega ossa ning pargi asukohas ei ole piisava võimsusega alajaamasid.

2.4. Arukas energiasüsteem Tallinna Tehnikaülikoolis

Möödunud aastal koostas Energiatehnika OÜ Tallinna Tehnikaülikoolile riigihanke raames tellitud süsteemi „arukas energiasüsteem“, mille eesmärk on süsteemi osad nagu näiteks energia tootjad, energiasalvestid ning elektrienergia tarve juhtida automaatselt. Üheks süsteemi osaks oli ka kahes teljest päikest järgiv PV-paneelide alusraam (vt sele 24), mille projekti autoriks oli käesoleva töö koostaja ise.



Sele 24. Kahes teljest päikest järgiv süsteem Tallinna Tehnikaülikooli katusel

Päikesepaneelide komplekt asub TTÜ VII korpuse katusel koos oma juhtautomaatika kilbiga. Alusraamil paiknevad mootorid võimaldavad 2-teljelist keeramist päikese suunas.

Õige nurga päikese suhtes tagab kontrolleri. Pööramine toimub kontrollerrisse salvestatud piirkondliku informatsiooni järgi. Kontrolleri on ühendatud võrgukaabliga ja ta töötab serverina, võimaldades üle interneti vaadata ja muuta kõiki parameetreid ning sätteid.

Pilves ilmaga keeratakse alusraam horisontaalseks, sest siis on paneelidele langev kiirgusintensiivsus suurim. Sama tehakse ka liiga tugeva tuule korral, mis võib ohustada alusraami ja PV-paneeli.

2.5. Süsteemi hüpoteetiline tasuvuspiir

Tihti peale räägitakse, et Eestis ei tasu PV-paneelid ennast ära, kuna meil ei ole piisavalt päikest. Jüri Krustok, Tallinna Tehnikaülikooli professor, on oma intervjuus Maalehele öelnud:

„Ei tea, kust on tulnud legend, et Eestis pole päikesepatareidega midagi teha. TTÜ päikesepatareide labori pikaajaliste katsetuste tulemused näitavad küll hoopis midagi muud ning kokkuvõttes paigutub Eesti oma suhteliselt jaheda kliimaga umbes samadesse tingimustesse, kui seda on Saksamaa. Ja Saksamaa on praegu üks suuremaid päikesepaneelide tarbijaid maailmas. Küsimus on ikkagi rohkem poliitilises tahtes ning Eesti Energia monopoolses seisundis. Seetõttu pole pikaajalises Eesti energeetika arengukavas päikeseenergeetikale kohta.“ [10]

Erinevatel paneelitüüpidel ja erinevatel tootjatel on erinevad PV-paneelide karakteristikud. Arvutuste tegemiseks võetakse subjektiivsetel hinnangutel keskmised väärtused. Arvutuste tulemusena ei soovita saada teada täpseid tulemeid, vaid pigem soovitakse näidata ligikaudseid piirväärtuseid süsteemi tasuvuse seisukohalt.

Arvutuste aluseks võetakse 250 W nimivõimusega PV-paneel, mille kasutegur tootja andmetel on 15,3%. Realistlikemate tulemuste saamiseks hinnatakse antud paneeli kasutegurit pessimistlikumalt ja ümardatakse 15% peale. Võttes arvesse ka temperatuuri-, peegeldumise- ja süsteemi enda kaod, saadakse arvutuste jaoks kasuteguri 13,5%.

Kuna eelnevates tabelites toodud andmed on toodud kWh/m² kohta, siis arvutatakse välja ühe 1 kW nimivõimsusega süsteemi PV-paneelide pindala. Arvutuste aluseks võetud paneeli pindala tootja andmetel on 1,63 m². Seega on 1 kW süsteemi pindala 6,52 m².

Tabel 2.

Fikseeritud ja kahes teljes järgiva süsteemi tootlikkuse võrdlus [16]

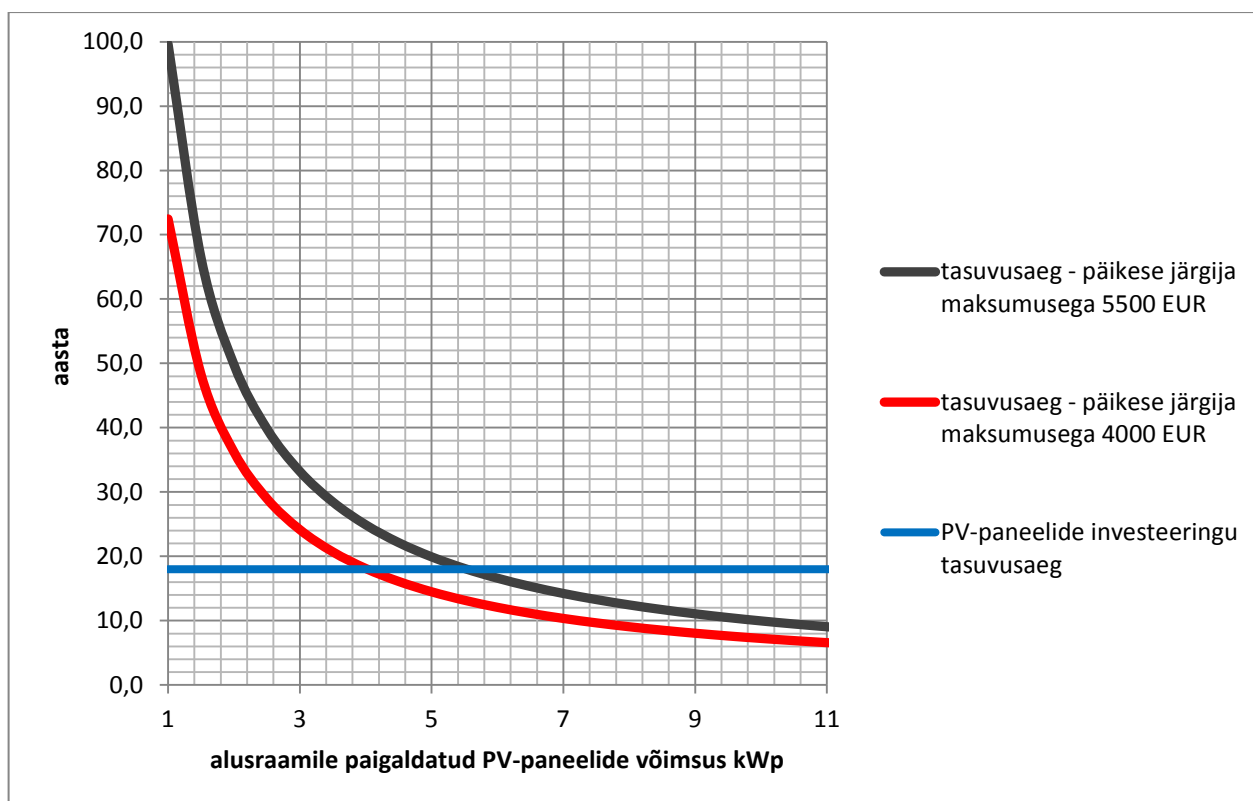
Päikeseenergia Eestis	kWh/m ² aastas	1 kWp süsteemi tootlikkus (kWh/a)		Tootlikkuse kasv kWh/a
Aastane energia hulk fikseeritud süsteemiga	1152	1014		
Aastane energia hulk kahes teljes järgiva süsteemiga	1600	1408	+38,9 %	394

2013. aastal avanes Eestis elektriturg ja tänaseks on kõik kodutarbijad kätte saanud ka oma esimesed elektriarved uute lepingute alusel. Võttes aluseks keskmise elektriarve, saame hetkel elektrienergia hinnaks jagades koguarve (koos käibemaksuga) tarbitud elektrienergia hulga, saame kWh hinnaks ~0,14 eurot.

Korrutades elektrihinna tootlikkuse kasvuga (vt tabel 2), mille me saame kahes teljes järgiva süsteemiga, siis saame rahaliseks võiduks 1 kWp süsteemi puhul aastas 55,21 eurot.

Kui võtta hüpoteetiliselt kahe teljelise (sõltumata paigaldatavatest PV-paneelide arvust) alusraami maksumuseks tabelis 3 toodud DEGERtraker'i mudeli 3000NT hinna 5500 EUR, siis 1 kWp süsteemi puhul on alusraami tasuvusajaks (arvestades ainult alusraami maksumust) ca 100 aastat.

Mõistlikuks tasuvusajaks võiks pidada aega, mille jooksul tasub ennast ära PV-paneelide, nende lisakomponentide (inverter, kaablid) ja paigalduse investeering. Mõistliku suhtearvuga eurot vati kohta (EUR/W) maksumusega (milleks on maailmas keskmiselt 2 EUR/W võrguga ühendatud süsteemi korral, sealhulgas siis inverter, kaablid ja paigaldus) süsteemi puhul on hetkel tasuvusaeg Eesti elektri hindade juures ca 18 aastat (vt peatükk 2.1.). Rajades oma süsteemi toetusmeetmete raames, siis muidugi lühem. Siinkohal ei ole arvestatud inflatsiooni, mille kasvades lüheneb investeeringu tasuvusaeg. Kui võtta alusraami tasuvusajaks (mis tuleneb kahes teljes päikest järgides suuremas tootlikkusest) 25 aastat, siis on see alusraami puhul võrdne 4 kWp PV-paneelide süsteemiga. Alla 4 kWp võimsusega süsteemi ei olegi eriti mõttekas paigaldada. 18 aastase tasuvusaja juures tuleks alusraamile paigaldada vähemalt 5,5 kWp PV-paneele. Seega saab siit järeldada, et alusraami investeering saab tasuda ennast ära PV-paneelide investeeringuga sama perioodi jooksul ainult siis, kui aluseks võetud 5500 eurot maksva alusraami peale paigaldatakse vähemalt 5,5 kWp koguses PV-paneele või teise variandina tuleb vähendada alusraami soetamismaksumust (vt sele 25).



Sele 25. Kahes teljes päikest järgiva alusraami tasuvusaeg võrreldes PV-paneelide investeringuga.

$$\text{tasuvusaeg} \left(\frac{a}{kWp} \right) = \frac{\text{päikese järgija maksumus (EUR)}}{\text{süsteemi võimsus (kWp)} * \text{suurem tootlikus (kWh/a)} * \text{elektri hind (EUR/kWh)}}$$

Selet 25 on graafiliselt näidatud kui palju tuleb kahe erineva maksumusega päikest kahes teljes järgiva süsteemi puhul paigaldada sellele PV-paneelide võimsust, et see saavutaks samapika tasuvusaja kui on seda PV-paneelide investering ise. Päikest kahes teljes järgiva süsteemi maksumuse juures 5500 eurot, tuleb sellele paigaldada PV-paneeli nimivõimusega vähemalt 5,5 kWp. 4000 eurot maksva süsteemi puhul piisab PV-paneelide nimivõimsusest 4,0 kWp.

2.6. Analooesed tooted

Valmistatava päikese järgija eesmärk on mahutada 16 (~1x1,6 m) PV-paneeli, ehk ca 25 m². Analooesid tooteid otsides jäid peamiselt silma suuremad süsteemid. Kõige ligilähedasem kahes teljes päikest järgiv süsteem, mis projekteeritava tootega konkureerida võiksid, on Saksamaa tootja DEGERtraker tooted (vt tabel 3).

Tabel 3.

Analoogsed tooted [Internet, tootjate kodulehed]

Kaubamärk (tootja)	mudel	PV-paneelide pindala (m ²), (p.arv)	Nurk* (°)	Tõusu- nurk (°)	hind EXW (EUR)	päritolu	www
DEGERtraker	3000NT	25 (16)	360	15...90	5 500,00	Saksamaa	http://www.degerenergie.de/en/
Solar Motors	ST44M3V1 5P	24 (15)	100	15...90	3 100,00	Sloveenia	http://www.solar-motors.com/gb/
meca solar	MS-2 Tracker 10	90	240	0...60		Hispaania	http://www.mecasolar.com/bin/index.php
pairan	Tracker CPV40	40	270	0...90		Saksamaa	http://www.pairan.com/
pairan	SunFlex 40 SD	40	270	25...87	11 000,00	Saksamaa	http://www.pairan.com/
pairan	SunFlex 18 SD	20	270	25...87	6 000,00	Saksamaa	http://www.pairan.com/
Everta	Solar-Trak ST2000	47	270	12...78		Austria	http://www.everta.at/
Wattsun	AZ-225	21	270	5...75	5 500,00	USA	http://www.wattsun.com/
Sentinel SOLAR						USA	http://www.sentinel-solar.com/

* nurk päikese tõusu ja loojangu vahel

3. EELPROJEKT – KAHES TELJES PÄIKEST JÄRGIV SÜSTEEM

Nagu eelnevas teooria osas välja tuli, on päikest järgivaid süsteeme mitmeid. Käesoleva töö raames keskendutakse kahes teljes päikest järgiva süsteemi eelprojekti koostamisele. Lähteandmeteks võetakse Eesti kliima andmed ja geograafiline asukoht. Projekti eesmärk on hinnata kahes teljes päikest järgiva süsteemi võimalikku odavamast tootmishinda, võttes aluseks peatükis 2.6. toodud analoogsed tooted, et hinnata selle võimalikku tasuvusaega.

Teadagi on eelnevalt, et päikesepaiste trajektoor varieerub aasta lõikes suuresti, suvisel pööripäeval on päikese asimuut $\sim 140^\circ$ ja tõusunurk $\sim 55^\circ$ ning talvisel pööripäeval on asimuut $\sim 40^\circ$ ja tõusunurk $\sim 7^\circ$. PV-paneelide positsioneerimise kohta on eestikeelset teaduslikku kirjandust väga vähe. Raamatukogude kartoteeke uurides leiab selle temaatilist kirjandust kõige rohkem TTÜ tehnikadoktori Teolan Tomsoni sulest. Tema teoseid uurides selgub, et ta on oma uuringutes keskendunud rohkem heliokollektorite (veega töötavad päikesepaneelid) kui PV-paneelide uurimisele ning väga vähe leiab infot tema teostest päikest järgivate süsteemide kohta. T. Tomson on oma 2006 aasta grandiprojekti „Kahepositsiooniliselt juhitud heliokollektorite efektiivsuse uuring“ väitnud, et *„keerukad ja kallid kaheteljelised pideva toimega jälgimissüsteemid ei õigusta ennast tasapinnaliste (PV ja termiliste) kollektorite puhul, mida on rõhuv enamasti.“* [11: 6]. Tomson keskendub oma eelpool nimetatud töö raames kahepositsiooniliselt juhitud süsteemi nende kahe asendi (asimuudi nurga) leidmisele.

Seitsme aasta jooksul on tehnoloogia oluliselt edasi arenenud ja palju odavamaks ning kättesaadavamaks muutunud ning seega julgeb töö autor sellele väitele vastu vaielda.

3.1. Töötingimuste analüüs ja sellest tulenevad nõuded materjalile

Päikesepaneelide raam paigaldatakse Eestisse välitingimustesse. Välitingimustes kus on niiske, on metallide kõige suuremaks probleemiks korrosioon, mille tulemusel võivad metallkonstruktsioonid laguneda. Mõned metallid, nagu alumiinium, võivad moodustada korrosiooni takistava oksiidikihi. Kui alumiinium reageerib õhus sisalduva hapnikuga, tekib metalli pinnale väga õhuke oksiidikiht, mille paksuseks on vaid paar sajandikku μm ($1 \mu\text{m}$ on üks tuhandik millimeetrist). See kiht on väga

vastupidav ja tagab suurepärase korrosioonivastase kaitse. Kihi kahjustamise korral taastub see kiiresti.

Päikesepaneelide raami ehitamiseks alumiiniumsulamist on materjalil mitmeid puudusi: habras, vähene mehhaaniline vastupidavus, väike tugevus, suur plastsus.

Vastupidiselt alumiiniumsulamile on teras suurema tugevusega (nii staatiline kui dünaamiline), sitke, peab paremini vastu pingetele. Kuna teras on õhuniiskuse käes kergesti korrodeeruv tuleb see katta teise mitte korrodeeruva metalliga. Teras katmiseks teise metalliga on mitmeid variante nagu näiteks pulbervärvimine, galvaniseerimine või kuumtsinkimine. Antud raami juures on terase kasutamisel üheks positiivseks näitajaks veel ka tema kaal. Kuna päikesepaneelide pindala on üsna suur, avaldab tuul paneelidele suurt jõudu ja seda eriti tormi korral. Raami suur mass aitab lihtsustada selle ankurdamist. Alumiiniumsulami ja terase tiheduse vahe on ca 3 kordne, alumiiniumsulami tihedus on 2700 kg/m^3 , terasel 7800 kg/m^3 .

Keskkond, kus alusraam töötama ja kaua vastu pidama peab, on üsna karm: aastane temperatuuride vahe rohkem kui 60°C ; suhteline õhuniiskus tihti 100 %; otsene UV kiirgus; vihm; rahe; lumi; tugevad tuuled. Kõik see seab kõrged nõudmised materjali valikule. Täpsemad andmed Eestis esinenud suurimate ja vähimate ilma andmete kohta vaata Lisa 2.

3.2. Materjalide valik koos kriteeriumitega

Raami valmistamisel lähtutakse põhimõttest, et kogu raam tuleb valmistada võimalikult suures osas standardsetest profiilidest, mis on kaubanduses kättesaadavad. Niimoodi hoitakse kokku aega ja raha detailide valmistamisel. Arvestama peab veel ka Eesti ilmastikuoludega nagu tugevad tuuled, mis avaldavad raamile suurt dünaamilist koormust ja talvel väga madalad temperatuurid, mis omakorda mõjutavad materjali omadusi.

Konstruksiooniteraste all mõeldakse eelkõige masina- ja aparaadiosade ning metalltarindite valmistamiseks kasutatavaid teraseid. Keemiliselt koostiselt jagunevad konstruktsiooniterased nagu terased üldiselt mittelegeer- ja legeerterasteks. Süsinikkonstruksiooniterased sisaldavad harilikult kuni 0,6% süsinikku ja need liigitatakse omakorda tava- ja kvaliteetsüsinikkonstruksiooniterasteks. Esimesi kasutatakse profiilmetallina eelkõige metallkonstruktsioonide korral, millelt ei nõuta suurt tugevust (tõmbetugevus kuni 600 N/mm^2) ega eriomadusi. Kvaliteetsüsinikkonstruksiooniteraseid kasutatakse peamiselt masina- ja aparaadiehituses, kui on täpsemalt piiritletud nõuded keemilise koostise ja paremate mehaaniliste omaduste suhtes.

Alusraami suuremaid koormusi kandvate konstruktsiooni osade valmistamiseks sobivad hästi külm- kui ka kuumvaltsitud konstruktsiooniterased, näiteks terasaed S355J2H ja S235J2H standardite EN 10210 ja EN 10219 järgi. Masti jaoks kasutatakse natukene suurema voolavuspiiriga terast kui teiste detailide jaoks, kuna kõige suuremad jõud koonduvad masti jalamile.

S235JR, S235JO, S235J2, S355JR, S355JO, S355J2 tähistavad konstruktsiooniterasest kuumvaltsitud tooteid (euroterased EVS-EN 10025). Arvud 235 ja 355 näitavad nende teraste normtugevust ehk voolavuspiiri N/mm^2 . J2 näitab head löögisitkust veel temperatuuril $-20\text{ }^{\circ}C$. JR ja JO tähistusega teraseid ei ole soovitatav alla $0\text{ }^{\circ}C$ löökoormusega koormata (terase külmhapruse oht).

EN 10210 terase tähistuse selgitus, kvaliteet S355 J2H:

S = ehitusteras

355 = minimaalne voolavuspiir $[N/mm^2, MPa]$

J2 = minimaalne löögisitkus $[27\text{ J}, -20\text{ }^{\circ}C\text{ juures}]$

H = õõnes profiil

Tabel 4.

Materjalide valik raami komponentide kaupa [19]

Alusraami osa, tähis joonisel	Materjali nimetus	Mark	standard
Mast, detail nr. [10]	legeerimata konstruktsiooniterasest toruprofiil	S355J2H	EN 10219
Alusraami hark, [3]	legeerimata konstruktsiooniterasest toruprofiil, -U-profiil ja -leht	S235J2H, S235J2	EN 10219, EN 10025
Alusraami tugitala [2], otsatala [7]	legeerimata konstruktsiooniterasest T-profiil	S355J2	EN 10025
Pikkitugi [5]	legeerimata konstruktsiooniterasest U-profiil	S235J2	EN 10025
Paneelide aluslatt [6]	Alumiiniumsulamist U-profiil		EN AW 6082 – T6

3.3. Toote valmistamise tehnoloogia

3.3.1. Metall-detailid

Päikesepaneelide alusraami metall-detailid detailid valmistatakse standardsetest profiilidest, mis lõigatakse vastavalt tööjoonistele sobivate suurustega tükkideks ja keevitatakse sulava elektroodiga kaitsegaasi keskkonnas kokku sobivateks alakoostudeks. Täpsema keevitamise tehnoloogia valib metallist detailide valmistaja.

Detailide projekteerimisel arvestatakse Eestis kuumtsinkimist pakkuvate ettevõtete tootmisvõimalustega. Tsinkimise pajad on kindla suurusega, kuhu tsingitav detail või detailid peavad üleni kuuma tsingi sisse uputatud olema. Toodete maksimaalsed gabariidid on 6,90 x 1,40 x 2,65 meetrit. Maksimaalne detaili kaal 5,3 tonni. [12]

Kuumtsinkimine on protsess, mille käigus terasdetailid saavad endale korrosiooni eest kaitseks tsingikihi. Tsingikihi paksus on üsna õhuke 70 – 100 mm (mikromeetrit), kuid see on tõhusaim viis terase korrosiooni eest kaitsmiseks. Tsingitud detailid ei vaja tavakeskkonnas hooldust ~50 aasta jooksul. Ka on tsingikihil võime ennast ise „parandada“, s.t. kuni 5mm vigastused ja kriimustused suudab tsink elektrokeemilise protsessi tulemusena hoida korrosioonikindlana.[12]

Kuumtsinkimiseks sobib ideaalselt keevteras (teras, mille valmistamisel sulametalli pealispind “keeb” süsihappegaasi eraldumise tõttu). Kõige parem kasutada tsinkimiseks materjali, mis on tugevusega kuni S 235 ning mis on valtsimisdefektidest, pooridest, nõest ja rübustilisanditest puhas. Üldjoontes saab kuumtsinkida terast kuni tugevuseni S 355, sel juhul vastavad terase omadused standardile EN 10025. Materjale tsingitakse standardite EVS-EN ISO 1461 ja EVS-EN ISO 14713-2 kohaselt. [12]

3.3.2. Elektroonika

Automaatika ja elektrikomponendid valitakse võimalikult standardsed ja tööstuses kasutatavad. Niimoodi on võimalik toote omahind hoida madalal. Alusraami juhtimise „südameks“ saab tööstuslik kontrollier, mis vastavalt anduritelt saadavale infole juhib alusraami ajameid vastavalt etteantud algrütmidele ja seadistustele. Süsteemi juhtimine ning PV-paneelide hoidmine maksimaalses kiirgusenergiast saab toimuma kahel viisil: programmkella järgi ja maksimaalse kiirgusvoo järgi. Süsteemi on võimalik juhtida ka käsitsi, seda siis PV-paneelide hooldusvajadust silmas pidades.

3.4. Arvutused

Hindamaks valitud materjalide sobivust nii mehhaanilisest- kui finantsilisest aspektist, teostatakse järgmistes alapeatükkides vastavad arvutused ja tuuakse välja olulisemad arvvaartused.

3.4.1. Vastupidavus koormustele

Päikesepaneelidele ja nende raamile avaldab kõige suuremat mõju tuul. Arvutuste tegemisel võetakse aluseks kõige ekstreemsemad olukorrad, millele alusraam vastu peab pidama. Arvutused on tehtud olukorras, kus tuulekiiruseks on $v=40$ m/s ja alusraam on asendis, kus tuule mõju on kõige suurem. Selliselt saab välja arvutada kui suure jõuga (paine, vääne, surve) tuul mõjub alusraamile, mastile, keevituskohtadele, reduktorile, lineaarajamile ja kinnitustele.

Tuul

Tuule poolt päikesepaneelidele avalduva surve valem:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

kus (SI süsteemis):

q = dünaamiline surve e. rõhk [Pa]

ρ = õhu tihedus (või ka vedeliku) [kg/m^3]

v = liikumiskiirus [m/s]

õhu tihedus $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ (sõltub temperatuurist. Mida külmem õhk, seda suurem tihedus,

normaaltingimustes 1,1...1,5)

õhu liikumiskiirus (tuul) $v_{\max} = 40 \text{ m/s}$

$$q = \frac{1}{2} 1,25 \text{ kg/m}^3 (40 \text{ m/s})^2$$

Tuule poolt avaldatava surve 40 m/s tuule puhul on $q = 1000 \text{ Pa}$

Vastavalt IEC 61215-2 standardile peavad päikesepaneelid vastu kuni koormuseni 2500 Pa.

Ühele päikesepaneelile avalduv jõud 40 m/s tuule puhul:

$$1000 \text{ Pa} = 1000 \text{ N/m}^2$$

Lumi

Paneelide horisontaalasendis, näiteks kui talvisel perioodil püütakse hajuskiirgust, võib paneelidele langeda suuremas koguses lund, mis niiskena/märjana on väga raske. EMHI kogutud andmete põhjal aastatel 1962 – 2002 on välja arvatud Eesti territooriumil maksimaalne lume koormus pindala ühikule. Sellise info põhjal on hea arvutada konstruktsioonide kandevõimeid. Eesti mandrila kaalutud keskmine lumekoormus on $1,51 \text{ kN/m}^2$. Ranniku aladel ja Lääne-Eestis on lumekoormus üldiselt väiksem. Sisemaal ning eriti Haanja kõrgustikel ja Lõuna-Eestis on lumekoormus olnud maksimaalselt $F_{\text{lumi}} = 2,0 \text{ kN/m}^2$. Seda väärtust võetakse edaspidistes arvutustes arvesse.

Alusraam

Päikesepaneelide kogu süsteemi kaal on jaotatud arvutuste tegemiseks kaheks osaks;

- Jalg e. mast (koos kõikide kinnituste, üleminekute ja ajamitega);
- alusraam (päikesepaneelide alusraam koos päikesepaneelidega).

Alusraami käsitletakse eraldi, kuna teatud asendites on selle raskuskese jala suhtes eemal ja avaldab seega oma massiga jalale paindemomenti.

Standardprofiilide suurused valitakse esialgu tunnetuslikult ja põhinedes varasematele kogemustele. Hilisemate arvutuste käigus selgub, kas valitud materjalide tugevused ja suurused sobivad või tuleb konstruktsioonis teha muudatusi.

PV-paneelid

Päikesepaneelide arv alusraamil on $n=16$ tükki mõõtudega $\sim 1,0 \times 1,6 \text{ m}$, mis teeb pindalaks $S_{PV}=1,6\text{m}^2$ ning ühe paneeli kaaluks on $m_{PV}=22 \text{ kg}$.

Paneelide poolt avalduv raskusjõud:

$$F_{PV} = m_{PV} \times n \times g = 22\text{kg} \times 16 \times 9,81 = 3453 \text{ N}$$

Paneelide pindalale mõjuv tuule jõud 40 m/s tuule korral:

$$F_1 = S_{PV} \times n \times 1000\text{Pa} = 1,6\text{m}^2 \times 16 \times 1000 \text{ N/m}^2 = 25600 \text{ N}$$

See jõud võrdub ka kui maksimaalne jõud x-telje sihis.

Süsteemi komponentide mass

PV-paneelide mass $m_{PV} \times n = 352kg$

Masti mass $m_1 = 140kg$

Hargi mass $m_2 = 35kg$

Alusraami mass $m_3 = 190kg$

Kogu mass kokku $m_{KOKKU} = 717kg$

Jõud

Kõige ekstreemsemas olukorras, kus PV-paneelid on vertikaalses asendis ja tuul kiirusega 40 m/s mõjub alusraamile tagant poolt (vt. Sele 26), on süsteemile mõjuvad jõud järgmised:

Maksimaalne jõud x-telje sihis: $F_1 = 25600N$

Maksimaalne jõud z-telje sihis: $F_2 = m_3 \times g + F_{PV} = 5317N$

Maksimaalne paindemoment punktis A $M_A = F_1 \times 3m + F_2 \times 0,1m = 77,33kNm$

Maksimaalne paindemoment punktis D $M_D = F_1 \times 0,4m + F_2 \times 0,1m = 10,77kNm$

Punkt D tähistab reduktori sõlmpunkti kus mõjub reduktorile paindemoment mida tuleb sobivat reduktorit valides arvesse võtta.

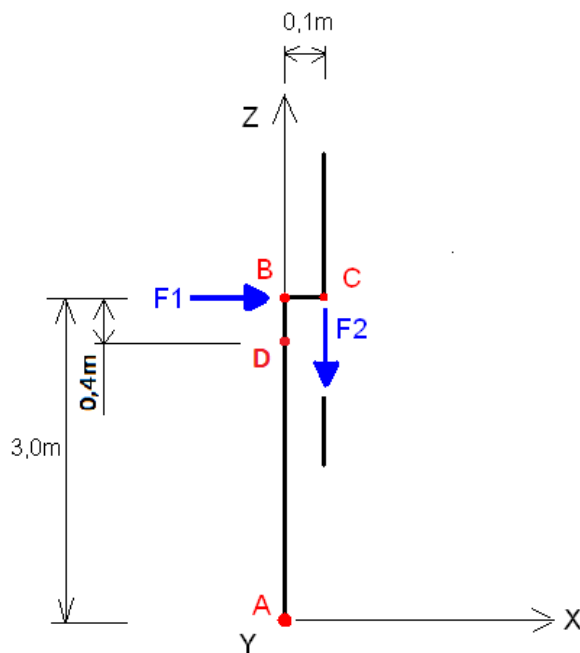
Maksimaalne jõud punktis D z-telje sihis

$$F_D = (m_2 + m_3) \times g + F_{PV} = 5660N$$

$$F_D = (m_2 + m_3) \times g + F_{PV} + F_{lumi} \times S_{PV} \times n = 56860N$$

$F_{lumi} \times S_{PV} \times n$ rakendub ainult siis, kui PV-paneelid on horisontaalses asendis, mis võimaldab lumel selle peale koguneda.

See on jõud, mis mõjub reduktorile aksiaal suunas, mida tuleb sobivat reduktorit valides arvesse võtta.



Sele 26. Jõudude mõjumise suunad kõige ekstreemsemas olukorras.

Masti inerts- ja tugevusmoment valitakse vastavalt valitud materjali mõõtmetele tabelist Lisa 9.

Inertsmoment $I = 2386,14 \text{ mm}^4 \times 10^4$

Tugevusmoment $W = 217,81 \text{ mm}^3 \times 10^3$

Maksimaalse staatilise pinge valemi kaudu leiame masti materjali voolavuse piiri.

$$\sigma_{st} = \frac{M_A}{W} \quad (3)$$

$$\sigma_{st} = \frac{M_A}{W} = \frac{77330}{217,81 \times 10^{-6}} = 3,55 \times 10^8 = 355 \text{ MPa}$$

Masti materjaliks valitud terase voolavuse piiriks $[R_{p0,2}]$ on 355 MPa, seega võib järeldada, et antud materjal sobib, kuid on piiri peal. Soovitav on valida suurema voolavuspiiriga teras või suurendada masti läbimõõtu ja/või ristlõike pindala.

Masti materjaliks valitud toruprofiili ristlõikepindala on tabelist võetuna $A = 4212 \text{ mm}^2$.

Valitud materjali paksuse sobivuse hindamiseks tuletame järgmisest valemist minimaalse ristlõike pindala:

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \leq (\sigma) \quad (4)$$

$$A = \frac{\frac{M_A}{D}}{\frac{2}{\sigma}} = \frac{\frac{77330}{0,112}}{355} = 1945 \text{ mm}^2$$

Arvutuskäigust järeldub, et valitud materjali ristlõike pindala on piisav.

Masti kinnituspoltide suuruse määramiseks tuleb välja arvutada tõmbe- ja surve jõud poldi kinnituse kohal.

Kogu raamile mõjuv paindemoment koondub masti jalamile mõjudes ühel pool masti poldidele tõmbejõuna ja teisel pool masti survejõuna. Selle tõttu jaguneb paindemoment kaheks.

Poldiaukude tsentrite raadius masti keskel on $l_1 = 140 \text{ mm}$

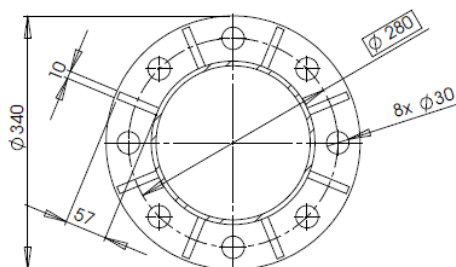
$$F_p = \frac{\frac{77330}{2}}{0,14} = 276178 \text{ N}$$

Maksimaalne **tõmbe jõud** ühele äärmisele poldile, kui poldi läbimõõt on M27 (ristlõike pindala $S_p = 459 \text{ mm}^2$), on:

$$F_{tõmbe} = \frac{F_p - m_{KOKKU} \times g}{S_p} = \frac{70296,23}{456} \approx 586 \text{ MPa}$$

Maksimaalne **surve jõud** ühele äärmisele poldile, kui poldi läbimõõt on M27 (ristlõike pindala $S_p = 459 \text{ mm}^2$), on:

$$F_{tõmbe} = \frac{F_p + m_{KOKKU} \times g}{S_p} = \frac{84363,77}{456} \approx 621 \text{ MPa}$$



Sele 22. Masti kinnituse poldi avad.

Arvutused on tehtud tingimusel, et masti hoiavad kinni kaks äärmist polti, üks siis neist maksimaalsel pingel ja teine on maksimaalse surve all. Lisa 4 tabelis toodud poldide

elastsuspiirväärtusi võrreldes arvutustega, siis võib järeldada, et M27 polt tugevusklassiga 10.9 ei ole piisava tugevusega ja valida tuleks üks samm suurem polt, ehk siis M30. Kui arvestada ka seda, et painde teljest punktis A jääb kummagile poole vähemalt kolm polti, millest kaks on punktile A lähemal, siis piisab poltidest M30 tugevusklassiga 10.9.

3.4.2. Maksumus

Hindamaks päikest järgiva alusraami tasuvusaega on alljärgnevalt toodud selle maksumus. Tabelis on toodud masti orienteeruv tootmiskulu, kus ei ole arvestatud arendustööga kaasnevaid kulusid mis osutuvad tõenäoliselt kordades suuremaks, kui on süsteemi enda lõplik tootmismaksumus ja komponentide hulgi ostmisel kaasnevat hinnasoodustust. Hindade aluseks on tarnijatelt ja tööde teostajatelt küsitud hinnapakumised vastavalt lisas 6 toodud joonistele ning ette antud parameetritele. Detailsema info väljatoomine töö autori ärilistest huvidest ja tarnijate vahelisest kokkuleppest tulenevalt ei ole käesolevas töös võimalik.

Tabel 6.

Alusraami maksumus

Nimetus		maksumus
alusraam	alusraami metallist detailide valmistamine	800,00
	alusraami metallist detailide materjali maksumus koos lõikustöödega	1 000,00
ajamid	tigureduktor	785,00
	lineaarajam	360,00
juhtimine	juhtautomaatika komponendid raami pööramiseks (Delta tööstusautomaatika [26], andurid)	300,00
töö	komponentide montaaž töökojas	200,00
maksumus kokku:		3 445,00

Konkureerimaks rahvusvahelisel turul, ei tohiks toote lõpphind ületada oluliselt analoogsete toodete hindasid (vt tabel 3). Võttes arvesse Eesti turu hetkeolukorra, päikest järgiva süsteemiga saavutatava kasuteguri ning hetkel kehtivaid elektrienergia hindasid, siis peaks toote müügihind Eesti kliendile jääma hinnavahemikku 4 000 – 4 500 EUR. Teenimaks projekteeritud päikest järgiva süsteemi müügist piisavalt kasumit ja katmaks ettevõtmisega kaasnevad kaudsed kulud, tuleb tootmismaksumust vähendada, mis on igati saavutatav. Tootmishind peaks jääma hinnavahemikku 2000-3000 eurot.

KOKKUVÕTE

Nüüdisaegne ühiskond sõltub elektrist. Ühelt poolt tarbib arvuliselt kasvav inimkond järjest rohkem energiat, teiselt poolt on aga selgeks saanud energiavarude piiratus ja traditsiooniliste energiatootmisviiside kahjulik toime keskkonnale. Selleks tuleb leiutada uusi ja tõhusamaid tehnoloogiaid, saavutamaks samade ressursside juures suurem kasutegur ja üha enam tuleb kasutusele võtta taastuvatest energiaallikatest tulevat energiat, et ka tulevikus oleks meie energiavajadused rahuldatud. Aastaks 2050 ennustatakse inimeste arvuks 9 miljardit. Kõige suurem energiaressurss on muidugi päike, millest tulevat energiat kasutatakse tänapäeval väga vähe. Päikesest tulev energia hulk on nii suur, et see kataks hetkel kogu maailma energiavajaduse 10 000 kordselt. Teoreetiliselt saaks kogu maailma energiavajaduse rahuldatud päikesepaneelidega, mis asuksid pindalal alla 800 x 800 km.

Töö eesmärgiks seatud hüpotees leiab kinnitust. Esiteks, et päikest on mõttekas Põhja-Euroopas järgida, ja seda eriti Eestis piirkonnas, ning teiseks, et alusraam tasub ennast ära sama perioodi jooksul, mis PV-paneelide investeering ise. Aktiivse järgimisega saavutatakse Eesti piirkonnas kuni 40 % tootlikkuse kasv, mis on ka piisav teenimaks tagasi järgimissüsteemi investeeringut mõistliku aja jooksul. Eesti piirkonnas on aastane otsekiirguse energia hulk ca 1100 kWh/m², mida on umbes sama palju kui keskmiselt kogu Saksamaal.

Tasuvusaja pikkuse osas võrreldi ka ühes teljes järgiva süsteemi tasuvusaega, mis on sama pikk kui kahes teljes järgiva süsteemi puhul. Ühes teljes süsteem maksab natukene vähem, peamiselt lineaarajami maksumuse võrra, kuid samas on ka tema tootlikkuse kasv väiksem kui on seda kahes teljes järgiva süsteemi puhul ning sellest tulenevalt siis umbes sama pikk tasuvusaeg.

Töö esimeses osas käsitleti päikesest tuleva energia hulga suurust, võrreldi aastast kiirgusenergia hulka erinevates Euroopa piirkondades saamaks aru kas ja kui palju on seda Eestis. Tulemusena leiab autor, et seda on samapalju kui on Saksamaal, kes on maailmas kõige suurem PV-paneelide kasutaja. Analüüsides Eesti kliima andmeid EMHI andmebaaside põhjal täpsemalt selgub, et Eestis on talveperioodil kiirgusenergiat vähe ja esineb ka perioode novembrist kuni jaanuarini, kus päikest ei paista üldse. Vastupidiselt talvele on suvel jällegi päikest aasta keskmisest oluliselt rohkem ja tõusu ning loojangu vaheline nurk on väga suur, millest tulenevalt ongi vaja päikest järgida.

Omamoodi efekt esineb meil veel talvel, kus kõige suurem kiirgusenergia ei tule otse päikese suunalt, vaid peegeldub lumelt. Selle efekti ärakasutamiseks tuleks päikest järgiva süsteemi puhul kasutada maksimaalse kiirgusvoo otsimise süsteemi, millest on lühidalt juttu ka käes olevas töös.

Kuna Saksamaal on samapalju päikese energiat kui Eestis, siis on meie riigi areng PV-paneelide kasutusele võtul jäänud poliitilise tahte ja otsuste taha.

Tuleviku suundi vaadates on selge, et meie energia nõudlus kasvab üha kiiremini kasvava rahvaarvu tõttu. Üha uusi tehnoloogiaid ja olemasolevate täiendusi tuleb kasutusele võtta, et suurendada efektiivsemat energiatootmist taastuvatest energiaallikatest. Fossiilsete kütuste varud on enamvähem kindlaks määratud ja kurb tõsiasi on, et neid ei jätku väga pikaks ajaks. *Greenpeace'i* hinnangul võiksime aastaks 2050 minna üle 100% taastuvenergia kasutamisele.

Töö teises osas kirjeldati erinevaid päikese järgimise süsteeme ja selgitati nende sobivust erinevatesse geograafilistesse piirkondadesse. Eestis annab kõige suuremat efekti kahes teljes päikest järgiv süsteem, kuna sellega on võimalik saavutada kuni 40 % suurem tootlikkus, mis on piisavalt suur, et investeering päikese järgimisse tasuks ennast ära vähemalt sama perioodi jooksul, kui PV-paneelide investeering ise.

Otsides Eesti tingimustesse sobivat järgimis-süsteemi, võrreldi turul pakutavaid analoogseid tooteid ning jõuti järeldusele, et ideaalset toodet ei ole. Kõige sobivamad tooted on Saksamaa tootja DegerTracker'i omad, kuid nende hind on natukene kõrge tasumaks ennast ära mõistliku aja jooksul. Optimaalse hinna leidmiseks koostas autor arvutuste põhjal graafiku, mis näitab järgimis-süsteemi tasuvuse aega sellele paigaldatud PV-paneelide nimivõimsusest tulenevalt. Et järgimis süsteemi tasuvusaeg hetkel kehtivate elektrihindade juures oleks 4 kWp, mis PV-paneelide võimsuse juures on enamvähem sama mis on PV-paneelide investeering ise, peaks järgimis-süsteemi investeering olema maksimaalselt 4000-4500 eurot.

Töö kolmandas osas koostab autor eelprojekti Eesti tingimustesse sobiva päikese järgimise süsteemi maksumuse teada saamiseks ning tasuvusaja leidmiseks. Eelprojekti käigus koostati joonised, valiti sobivad materjalid, teostati vastupidavusarvutused. Metallist detailide ning muude komponentide hindade teadasaamiseks küsiti hinnapakkumised, mille põhjal arvutati välja toote omahind. Toote omahinna arvutamisel ei võetud hetkel arvesse toote väljatöötamisega kaasnevaid arenduskulusid, mis võivad osutuda kordades suuremaks, kui süsteemi enda maksumus. Eesmärk oli jõuda selgusele, et Põhja-Euroopa tingimustesse sobiva päikest järgiva süsteemi valmistamine on teostatav ja toote müügihind jääb alla hinnapiiri, kust alates süsteemi investeering tasub ennast ära sama perioodi jooksul kui sellel paiknevate PV-paneelide investeering ise.

Jooniste koostamisel piirduti koostude ja alakoostude koostamisega, mis olid piisavad hindamaks metallist detailide tootmismaksumust.

Töö koostamise käigus kogutud kiirgushulga andmed Eesti piirkonnas, peamiselt PVGIS andmebaasist ja EMHI mõõtmistulemused, võivad olla tõesed, kuid reaalse tulemuste saamiseks tuleks läbi viia võrdlev test fikseeritud, ühes teljes ja kahes teljes järgiva süsteem vahel. Igal konkreetsel piirkonnal on omad eripärasused ja neid PVGIS andmebaas ei kajasta. Sellist katset või mõõtmistulemust ei ole autorile teadaolevalt seni Eestis mitte ükski ettevõtte ega haridusasutus korraldanud. Autori haridustee jätkumisel magistriõppes või tööalaste ülesannete käigus on autori kindel soov ja eesmärk teostada selline võrdlev katse ja see avalikustada.

SUMMARY

“Cost-benefit analysis and conceptual design of dual axis solar tracker for Northern Europe condition”.

Choosing the topic for the academic thesis wasn't difficult for the author. The interest came from the work, where the author designed for a customer a dual axis solar tracker without knowing, what is the knowledge behind it. The customer order was with given parameters. From this point on the author wanted to know more and to get an understanding whether it is reasonable to follow the sun in Estonian region, in how many axis and how much energy it can give more.

It is clear, that one day all the fossil fuels are coming to the end and then it is late to think how we can go on. We have to think now! Electricity consumption is growing every year and 2/3 of it comes from fossil fuels. To be able to use electricity in future, like we are doing it today, we have to develop new technology's, make the old systems more better and more efficient to get the maximum from a existing technology.

One thing that we can do with PV-panels is to use them together with solar tracker. Work author has established a hypothesis that active dual axis solar tracking in Estonian region gives significant productivity growth and at the same time the tracking systems earns itself back in same time as PV-system investment itself. At the moment with present electricity prices and without any subsidy it is approximately 15 – 20 years.

Thesis contains three main chapters. First chapter analyses the sun as power source and how much energy we get from there. Also author compares the amount of energy in different regions in Europe to find out, how much solar energy is available in Estonia, and it is almost same amount as in Germany. In the end of first chapter author describes the existing situation in solar energy and the plans for the future based on different global organization annual reports.

Second chapter describes principle of solar tracking and different solar tracking systems like one horizontal axis, one tilted axis, dual axis and others. From authors point of view there is one important project described and it is the first solar park in Estonia, that is using dual axis solar trackers. End of chapter two author calculates the cost and the size for dual axis tracking system that

is needed to be able to earn for the system itself back within optimum time. Roughly it has to be 1000 EUR per installed kWp at the tracker. In other words, if 4 kW of PV-panels are installed at the solar tracker, then the cost for it must be approximately 4000 EUR. Then the investment in tracking system earns itself back in same time as the PV-panel system (PV-panels, inverter, installation etc.), according to the electricity prices at the moment.

Third chapter is about conceptual design of dual axis solar tracker for Northern Europe condition. In this chapter author chose suitable materials, explains why he chose those and makes necessary strength and durability calculations to evaluate the correctness of the selected materials. To calculate the cost of whole system, there are assembly and subassembly drawings made by author. According to the drawings, price inquiries were made to metalworking companies to get the cost for frame and metal parts. All mechanical parts like slew drive, linear actuator, sensors and electrical components like controller, power supply, motors, switches were selected by author himself and inquiries were made to get the prices. End of third chapter all costs are merged and the result is as it was expected. The production cost does not contain cost for developing, that is much higher as the cost for on tracker. Target was to get knowledge, that it is possible to produce a new and for North Europe condition a solar tracker with lower price if it is for a solar tracker on the market that is more or less suitable for Estonia region.

Work with the target hypothesis is confirmed. In Estonia and in other North Europe country's is expedient to track the sun, especially in dual axis. With active sun tracking the growth of energy productivity in Estonia region is 40 % per year and the amount of energy, that is produced more, is enough to cover the investment for a dual axis solar tracking system within same time as the investment for PV-panel system itself.

VIIDATUD ALLIKAD

1. Endel Risthein. (2007). „Sissejuhatus energiatehnikasse“. Tallinna Raamatutrükikoda
2. Teolan Tomson (2000). „Helio energeetika“. Tallinn humare
3. V. Russak. (2003). Eesti kiirkliima teatmik
4. „The Renewable Energies Unit Activities Report“, Jennifer Rundle. [WWW] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/doc/report/JRC-IES-REU_Activity_report_2005.pdf, (25.03.2013)
5. „Renewables Global Futures Reports 2013“, REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century and Institute for Sustainable Energy Policies [WWW] http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf (25.03.2013)
6. REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. (2013). „Renewables 2012 Global Status Report“
7. Taastuvenergia osakaal Eesti elektritarbimisest ulatus ligi 13 protsendini. [WWW] <http://elering.ee/taastuvenergia-osakaal-eesti-elektritarbimisest-ulatus-ligi-13-protsendini/> (30.10.2012)
8. TEUK XIII Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. (2011). Kolmeteistkümnenda konverentsi kogum, Tartu
9. Igor Taro. [WWW] <http://uudised.err.ee/index.php?06250879> (18.04.2012)
10. Maaleht. [WWW] <http://www.maaleht.ee/news/uudised/elu/paikesefarm-kas-reaalsus-voiu-utoopia.d?id=27459555> (11.12.2009)
11. Teolan Tomson. (2006). „Kahepositsiooniliselt juhitavate heliokollektorite efektiivsuse uuring“. Tallinn, TTÜ Materjaliteaduste Instituut
12. ZINCPOT (AS Paldiski Tsingipada) koduleht. [WWW] www.zincpot.ee (25.03.2012)
13. GRASS GIS tarkvara. [WWW] <http://grass.osgeo.org/#> (25.03.2013)
14. Wikipedia. [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_generation (12.04.2013)
15. Miksike. [WWW] <http://www.miksike.ee/docs/elehed/7klass/1kaardid/7-1-14-1.htm> (12.04.2013)

16. Photovoltaic Geographical Information System. [WWW] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>, (12.04.2013)
17. Elering. „Elektrisüsteemi kokkuvõte 2012“. [WWW] <http://elering.ee/elektorisusteemi-2012-aasta-kokkuvote/> (31.01.2013)
18. Taastuvenergia OÜ koduleht. [WWW] <http://www.taastuvenergia.ee/mikrotootja.html> (12.04.2013)
19. RUUKI tootevalik [WWW] <http://www.ruukki.ee/Tooted-ja-teenused/Metallitooted> (12.04.2013)
20. Ain Kallis, Külli Loodla. (2012). Eesti meteoroloogia aastaraamat 2011. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut
21. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut [WWW] <http://www.emhi.ee/index.php?ide=6,747,750> (02.04.2012)
22. Baltic Bolt OÜ koduleht [WWW] <http://www.balticbolt.ee/toode.php?show=products&parentID=40&productID=191> (23.04.2013)
23. Statistikaamet [WWW] www.stat.ee (23.04.2013)
24. Majandus- ja kommunikatsiooni ministeerium. Energiamajanduse riiklik arengukava aastani 2020. [WWW] <http://www.mkm.ee/public/ENMAK.pdf> (23.04.2013)
25. Vabariigi Valitsus [WWW] <http://valitsus.ee/et/valitsus/tegevusprogramm/energiajulgeolek/taastuvenergia-osakaal-energia-lopptarbimises> (23.04.2013)

LISAD

Tõravere ilmajaama päikesekiirguse näitajad aastal 2011 [20].

Kuu	Summaarne kiirgus	Otsene kiirgus	Otsene kiirgus horisontaal pinnale	Hajus kiirgus	Peegeldunud kiirgus	Aluspinna albeedo	Päikese- paiste kestuse summa (h)	Summaarne kiirgus keskmiselt tunnis
	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(MJ/m ²)	(%)		kW/m ² /h
	Q	S	S'	D	Rq	A		
1	40,1	30,2	5,3	33,7	33,9	84	18,1	0,615
2	142,7	286,5	78,8	60,6	116,5	82	133,6	0,297
3	293,7	347,7	130,0	156,5	221,1	75	164,5	0,496
4	461,5	537,5	273,3	178,7	133,9	29	238,3	0,538
5	585,0	620,1	341,5	232,4	139,9	24	280,0	0,580
6	677,9	735,8	428,3	238,3	156,9	23	317,8	0,593
7	589,1	509,6	294,3	281,5	119,1	20	262,2	0,624
8	458,7	437,6	230,7	215,5	90,4	20	216,0	0,590
9	290,6	286,6	125,7	155,7	62,2	21	154,0	0,524
10	148,9	200,4	60,9	83,6	33,7	23	104,1	0,397
11	47,0	74,0	13,8	32,1	9,8	21	44,9	0,291
12	23,7	39,2	5,0	17,1	5,8	24	28,4	0,232
SUM:	MJ/m ²	3 758,9	4 105,2	1 987,6	1 685,7	1 123,2	1961,9	
SUM:	kWh/m ²	1044,1	1140,3	552,1	468,3	312,0		
AVERAGE:								0,481

Otsese kiirguse suurim ja vähim Tõraveres registreeritud aastasumma perioodil 1955-2002 olid:

- suurim (2002) 4382,8 MJ/m² = 1217,44 kWh/m²
- vähim (1977) 2762,4 MJ/m² = 767,33 kWh/m²

Lisa 2.

Suurimad ja vähimad ilma andmed Eestis läbi aegade [21].

Kirjeldus	Väärtus	Aeg	Koht
Suurim mõõdetud tuule kiirus (puhang) - tuule kiiruse absoluutne maksimum	48 m/s	2.nov 1969	Ruhnu
Kõige tuulisem kuu - suurim kuu keskmine tuule kiirus	11,9 m/s	detsember 1898	Sõrve
Kõige tuulisem aasta - suurim aasta keskmine tuule kiirus	7,9 m/s	1929	Pakri
Kõrgeim mõõdetud temperatuur - õhutemperatuuri absoluutne maksimum	35,6 °C	11.aug.1992	Võru
Madalaim mõõdetud temperatuur - õhutemperatuuri absoluutne miinimum	-43,5 °C	17.jaan.1940	Jõgeva
Kõige soojem kuu - kõrgeim kuu keskmine õhutemperatuur	23,4 °C	juuli 2010	Narva-Jõesuu
Kõige külmem kuu - madalaim kuu keskmine õhutemperatuur	-18,0 °C	jaanuar 1987	Narva
Kõige soojem aasta - kõrgeim aasta keskmine õhutemperatuur	8,5 °C	2008	Vilsandi
Kõige külmem aasta - madalaim aasta keskmine õhutemperatuur	1,6 °C	1942	Jõgeva

Lisa 3.

Energia tootlikkus erinevate süsteemide puhul Tallinna piirkonnas [16].

Fikseeritud süsteem: kaldenurk 39°, asimuut 0°					vertikaalne pöörlev telg, paneeli kaldenurk 59°				
Kuu	E_d	E_m	H_d	H_m	Kuu	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	0,10	3,0	0,64	19,9	Jan	0,12	3,7	0,78	24,0
Feb	0,26	7,3	1,74	48,7	Feb	0,33	9,2	2,18	61,1
Mar	0,42	13,2	2,92	90,9	Mar	0,54	16,8	3,73	116,0
Apr	0,63	18,9	4,57	137,0	Apr	0,86	25,7	6,15	185,0
May	0,75	23,2	5,66	176,0	May	1,11	34,3	8,18	254,0
Jun	0,75	22,4	5,80	174,0	Jun	1,12	33,6	8,45	253,0
Jul	0,73	22,7	5,77	179,0	Jul	1,09	33,9	8,39	260,0
Aug	0,59	18,4	4,60	143,0	Aug	0,81	25,1	6,16	191,0
Sep	0,42	12,7	3,16	94,7	Sep	0,54	16,2	4,00	120,0
Oct	0,25	7,8	1,79	55,5	Oct	0,31	9,6	2,20	68,2
Nov	0,10	3,1	0,70	21,2	Nov	0,12	3,7	0,84	25,1
Dec	0,06	1,9	0,40	12,5	Dec	0,07	2,3	0,48	15,0
keskmine	0,42	12,9	3,15	96,0	keskmine	0,59	17,8	4,30	131,0
Aasta summa	155		1152		Aasta summa	214		1572	

kaldus telg, kaldenurk 45°					Kahes teljes järgiv süsteem				
Kuu	E_d	E_m	H_d	H_m	Kuu	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	0,11	3,5	0,73	22,7	Jan	0,12	3,8	0,80	24,7
Feb	0,32	9,0	2,11	59,2	Feb	0,34	9,4	2,23	62,5
Mar	0,54	16,8	3,72	115,0	Mar	0,55	16,9	3,75	116,3
Apr	0,86	25,9	6,19	186,0	Apr	0,87	26,0	6,22	187,0
May	1,10	34,1	8,14	252,0	May	1,13	34,9	8,35	259,0
Jun	1,09	32,8	8,28	248,0	Jun	1,14	34,3	8,67	260,2
Jul	1,08	33,4	8,28	257,0	Jul	1,11	34,6	8,59	266,5
Aug	0,81	25,0	6,17	191,0	Aug	0,82	25,3	6,24	193,3
Sep	0,54	16,3	4,02	121,0	Sep	0,54	16,3	4,02	121,1
Oct	0,31	9,5	2,17	67,3	Oct	0,31	9,6	2,21	68,6
Nov	0,12	3,6	0,80	24,1	Nov	0,12	3,7	0,84	25,3
Dec	0,07	2,2	0,45	14,1	Dec	0,08	2,3	0,50	15,5
keskmine	0,58	17,7	4,26	129,8	keskmine	0,59	18,1	4,37	133,3
Aasta summa	212		1557		Aasta summa	217		1600	

E_d : Päevane keskmine elektri tootlikkus (kWh/m^2)

E_m : Kuu keskmine elektri tootlikkus (kWh/m^2)

H_d : Kiirgusenergia päeva keskmine summa ühe ruutmeetri kohta mis langeb antud süsteemi PV-paneelidele (kWh/m^2)

H_m : Kiirgusenergia kuu keskmine summa ühe ruutmeetri kohta mis langeb antud süsteemi PV-paneelidele (kWh/m^2)

Kaldenurk: nurk paneeli ja horisontaaltasapinna vahel. Tabelites toodu kalde nurk on PVGIS andmebaasi poolt soovitatav optimaalne nurk süsteemi maksimaalse kasuteguri saavutamiseks aasta lõikes.

Poltide tabel [22].

Poltide minimaalne katkemispiir kN

Nimimõõt ┐	Ristlõige mm ²	Tugevusklass				
		4.6	5.8	8.8	10.9	12.9
M3	5,03	2,01				
M4	8,78	3,51				
M5	14,2	5,68	7,38	8,52		
M6	20,1	8,04	10,4	12,1	20,9	24,5
M8	36,6	14,6	19,0	29,2	38,1	44,6
M10	58	23,2	30,2	46,4	60,3	70,8
M12	84,3	33,7	43,8	67,4	87,7	103
M14	115	46,0	59,8	92,0	120	140
M16	157	62,8	81,6	125	163	192
M20	245	98,0	127	203	255	299
M22	303	121	158	252	315	370
M24	353	141	184	293	367	431
M27	459	184	239	381	477	560
M30	561	224	292	466	583	684
M33	694	278	361	576	722	847
M36	817	327	425	678	850	897

Elastsus- või 0,2-piir kN

Nimimõõt ┐	Ristlõige mm²	Elastsuspiir		0,2-piir		
		Tugevusklass				
		4.6	5.8	8.8	10.9	12.9
M3	5,03	1,21				
M4	8,78	2,11				
M5	14,2	3,41	5,68	9,09	12,8	15,3
M6	20,1	4,82	8,04	12,9	18,1	21,7
M8	36,6	8,78	14,6	23,4	32,9	39,5
M10	58	13,9	23,2	37,1	52,2	62,6
M12	84,3	20,2	33,7	54,0	75,9	91,0
M14	115	27,6	46,0	73,6	104	124
M16	157	37,7	62,8	100	141	170
M20	245	58,8	98,0	157	220	265
M22	303	72,7	121	194	273	327
M24	353	84,7	141	226	318	381
M27	459	110	184	294	413	496
M30	561	135	224	359	505	606
M33	694	167	278	444	625	750
M36	817	196	327	523	735	882

Lisa 5.

Taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia osakaal kogu elektri tarbimisest (%) Euroopa Liidus [23].

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
EL (27 liikmesriiki)	13.61	14.18	12.69	12.59	13.65	13.62	14.24	15.14	16.36	18.25	19.94	20.44
Belgia	1.18	1.21	1.27	1.31	1.6	2.26	3.08	3.65	4.62	6.08	6.79	9.04
Bulgaaria	7.36	4.69	6.03	8.16	8.87	11.8	11.18	7.52	7.42	9.81	15.15	9.8
Tšehhi	3.59	3.95	4.6	2.8	4.0	4.48	4.91	4.73	5.18	6.78	8.32	10.3
Taani	15.3	15.87	18.39	21.61	25.5	26.27	23.97	27.04	26.7	27.49	33.11	38.81
Saksamaa	6.12	6.42	7.45	7.7	9.22	10.0	11.37	14.11	14.63	16.2	16.9	20.35
Eesti	0.24	0.23	0.38	0.59	0.71	1.29	1.45	1.48	2.04	6.11	10.75	12.64
Iirimaa	4.92	4.16	5.38	4.31	5.14	6.69	8.46	9.46	11.69	14.13	12.83	19.4
Kreeka	7.7	5.22	6.22	9.73	9.52	10.04	11.82	6.77	8.29	12.45	16.68	12.99
Hispaania	15.64	20.64	13.93	21.51	18.33	14.26	17.58	19.45	20.58	25.83	33.06	30.18
Prantsusmaa	14.91	16.24	13.37	12.65	12.55	10.98	12.17	12.96	14.07	13.62	14.45	12.84
Itaalia	15.85	16.6	14.39	13.59	15.44	13.73	14.1	13.25	16.19	20.54	22.23	23.64
Küpros	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.01	0.02	0.06	0.27	0.07	0.7	2.53
Läti	47.67	46.07	39.3	35.38	47.1	48.4	37.65	36.39	41.21	49.23	48.47	41.93
Leedu	3.37	3.04	3.19	2.78	3.54	3.89	3.61	4.6	4.65	5.5	7.76	9.63
Luksemburg	2.52	2.42	2.09	1.9	2.6	2.85	3.12	3.33	3.58	3.66	3.09	2.95
Ungari	0.63	0.65	0.59	0.82	2.27	4.45	3.47	4.29	5.36	6.99	7.09	6.35
Malta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Holland	2.74	2.98	3.54	3.48	4.47	6.28	6.71	6.18	7.72	9.15	9.26	10.09
Austria	72.52	67.39	66.29	53.68	59.16	58.79	57.45	60.72	62.3	67.69	61.41	55.23
Poola	1.68	2.0	2.02	1.59	2.12	2.64	2.85	3.53	4.27	5.8	6.97	8.3
Portugal	28.79	33.67	20.27	35.66	23.87	15.47	28.86	29.63	26.42	33.27	49.99	43.62
Rumeenia	28.84	28.39	30.93	25.0	29.86	35.77	31.43	26.86	28.37	27.91	34.18	27.05
Sloveenia	31.73	30.47	25.36	22.02	29.04	24.17	24.43	22.13	29.11	36.76	33.13	26.2
Slovakkia	16.21	17.91	19.17	12.38	14.37	16.59	16.51	16.57	15.48	17.88	20.51	17.01
Soome	28.55	25.51	22.81	21.36	28.24	26.78	23.96	25.92	30.78	25.77	26.52	27.65
Rootsi	55.45	53.99	46.78	39.61	45.56	53.78	47.55	51.54	54.98	56.44	54.48	58.72
Suurbritannia	2.55	2.42	2.81	2.65	3.52	4.16	4.47	4.88	5.4	6.63	6.71	9.2
Island	99.93	99.95	99.93	99.93	99.95	99.94	99.96	..	..	..	..	..
Norra	114.67	96.24	107.19	92.08	89.61	108.38	98.33	106.12	109.42	103.01	89.96	97.92
Šveits	62.35	68.1	57.68	55.63	53.56	48.91	48.14	55.38	55.05	55.85	54.81	..
Horvaatia	40.21	42.92	34.04	29.53	41.12	36.18	33.4	23.0	27.92	36.89	45.05	25.62
Makedoonia	16.9	9.22	11.0	17.87	18.9	17.46	18.74	11.24	9.29	15.36	27.99	..
Türgi	24.29	19.19	25.62	25.19	30.87	24.72	25.49	19.19	17.38	19.65	26.47	25.22

Eelprojekti joonised

JOONISED