



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

MSJ40LT

*Mihkel Rehepapp*

**PÄIKESEST ELEKTRI TOOTMISE TEHNOLOOGIAD JA  
KASUTAMISE VÕIMALUSED EESTIS**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2016

# AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Aleksandr Hlebnikovi juhendamisel

“.....” ..... 2016. a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” ..... 2016. a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” ..... 2016. a.

..... allkiri

## **BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE**

2016 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Mihkel Rehepapp 120625

Õppekava: MASB02/09

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: Aleksandr Hlebnikov, dotsent

### **BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Päikesest elektri tootmise tehnoloogiad ja kasutamise võimalused Eestis

(inglise keeles) Technologies of producing electricity from the sun and possibilities in Estonia

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Täitmise tähtaeg</b>
<b>1.</b>	<b>Lähteandmete kogumine</b>	<b>2.05.2016</b>
<b>2.</b>	<b>Lähteandmete süstematiseerimine ja töötlemine</b>	<b>9.05.2016</b>
<b>3.</b>	<b>Tulemuste analüüs</b>	<b>13.05.2016</b>
<b>4.</b>	<b>Kokkuvõte ja järeldused</b>	<b>16.05.2016</b>
<b>5.</b>	<b>Lõputöö vormistamine</b>	<b>20.05.2016</b>

### **Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

Päikeseenergiast elektri tootmise tehnoloogiate uuringud, võrdlused ja sobivus Eestile.

### **Täiendavad märkused ja nõuded:**

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt .....

**Töö esitamise tähtaeg**.....

**Üliõpilane** Mihkel Rehepapp /allkiri/ ..... kuupäev.....

**Juhendaja** Aleksander Hlebnikov /allkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON .....	2
<i>BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE</i> .....	3
SISUKORD.....	4
EESÕNA .....	6
SISSEJUHATUS.....	7
1. PV TEHNOLOOGIA.....	9
1.1. Tehnoloogia ja ajalugu .....	9
1.2. Kasutus .....	10
1.3. Eelised ja puudused .....	11
2. PÄIKESEKOLLEKTORID.....	13
2.1. Üldine tehnoloogia .....	13
2.2. Mittekonsentreeruvad päikesekollektorid .....	13
2.3. CSP päikesekollektorid.....	15
2.4. Paraboolne rennsüsteem .....	16
2.5. Päikesetorn.....	17
2.6. Sulasoola tehnoloogia.....	18
2.7. Ajalugu ja kasutus .....	18
3. SOLAR ROADWAYS .....	20
3.1. Tehnoloogia sisu.....	20
3.2. Väljakutsed .....	21
3.3. Arengud .....	21
4. PÄIKESEELEKTRIAAMADE VÕRDLUS .....	23
4.1. Võrdlusparameetrid .....	23

4.2. PV elektrijaamad .....	24
4.2.1. Topaz.....	25
4.2.2. Golmud .....	26
4.3. CSP elektrijaamad .....	27
4.3.1. Ouarzazate.....	29
4.3.2. Valle.....	30
4.3.3. Andasol .....	31
4.3.4. Ivanpah.....	32
4.4. Solar Roadways elekter .....	33
4.5. Elektrijaamade kokkuvõte .....	34
5. PÄIKESEENERGIA KASUTAMISE VÕIMALUSED ELEKTRI TOOTMISEKS EESTIS	
38	
5.1. Elektri tootmine ja tarbimine Eestis .....	38
5.2. Päikesekiirgus Eestis .....	38
5.3. Päikeseelektrijaamade sobivus Eestile .....	40
5.4. Naaberriikide elektrienergia vajadus ja päikeseenergia kasutamise potentsiaal .....	42
KOKKUVÕTE.....	44
SUMMARY .....	46
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	48

## EESÕNA

Antud lõputöö on inspireeritud autori isiklikust huvist taastuenergia vastu ja soovist uurida päikeseenergiaga seonduvat statistikat. Kuna päike on Maa jaoks suure potentsiaaliga energiaallikas, siis võiks seda kasutada otse. Hetkel kasutatakse maapõue sügavustes varem salvestunud energiat. Ühe hea võrdpildi toob näide sülearvutist. Selle kasutamisel on mõistlik omanikul igal võimalikul juhul voolu võtta pistikust, mitte akust, sest nii säästame akut ja hoiame seda täis. Sama on ka meie energia tarbimisega Maal.

Maale on akumulunud suur hulk energiat, kuid samas on otse pistikust võetav energia päikese näol olemas. Nagu ka sülearvuti puhul, kus tihtipeale me ei viitsi laadijat kotist välja võtta mugavuse tõttu, siis sarnaselt on ka meie energiamajandusega. See on hetkel tugevalt rajatud juba salvestatud maavarade peale ja selletõttu on raske üle minna päikeseenergiele. Viimane nõuab vaid tehnoloogia arendamist ja investeeringuid, kuid jooksvalt on päikeseenergia tasuta. See ongi lühike seletus autori inspiratsioonist ja motivatsioonist selle töö kirjutamisega seoses.

Töö koostamine ja algandmete kogumine toimus iseseisvalt, uurides internetist erinevaid maailma taastuenergia organisatsioonide vahekokkuvõtteid, statistikat ja erinevate ehitatud elektrijaamade andmeid. Abiks andmete kogumisel ja analüüsimisel oli juhendaja Aleksandr Hlebnikov.

Autor tahab ka erilise tänu tuua oma abikaasale, kes on kogu töö tegemise käigus olnud abiks nii nõu kui jõuga ja motiveerinud endast parimat andma.

## SISSEJUHATUS

Seoses tehnika arenguga ja inimeste arvu kasvuga on viimase 100 aasta jooksul üsna selgelt kerkinud üles energeetika probleem. Hetkel saadakse Maa aastasest energiavajadusest 78,4% energiast fossiilsete kütuste kaudu, 2,6% tuumkütustest ja ülejäänud 19% taastuvenergia allikatest. Enamik energiavajadusest saadakse fossiilsetest kütustest, mis ei ole taastuvad ja ühel hetkel lõppevad. Kui inimkond jätkab sellise käitumisega, kus rajatakse oma vajadused millelegi, mis on pikas plaanis kohe otsa saamas, siis võib energiakriis tekkida väga järsult.(1)

Kui mõelda laiemalt, et kust kogu planeet oma energia saab, siis kõik energiaallikad, mis meil on, on otseselt või kaudselt saadud päikeselt. Sama kaudselt on kõik energialiigid taastuvad, lihtsalt taastumise ajaühik on kõigil erinev ning selletõttu nimetataksegi osasid allikaid taastumatuteks. Kõige kiiremini taastuv on päikeseenergia, sest see on konstantselt kättesaadav. Seetõttu pole päikeseenergiaga ka suuremat muret – kui päikesest enam energiat ei saa, lõpeb elutegevus Maal. Aastas langeb maapinnale keskmiselt 89 300 TWh energiat ja aastal 2001 oleks aastase energiatarbimise katmiseks vaja olnud seda energiat salvestada vaid poolteist tundi. Kui inimesed suudaksid salvestada päikeseenergiat 10% efektiivsusega, tuleks katta maakerast 0,17% päikesepaneelidega. Samas nii lihtne see pole. Sellega seonduvad veel ka mitmed väljakutsed. Esiteks riikide geograafiline paiknemine, mille tõttu on erinevatel laiuskraadidel erinev energiahulk, mida aastas päikesest saab omandada. Teiseks oleks päikese poolt soodustatud laiuskraadidelt elektrit mujale maakera piirkondadesse viia keeruline, kuna liinikaod on selle distantsi peale üpris suured. Väljakutseks võib lugeda ka tehnoloogiate keskkonnasõbralikkust ja energeetikute vähest kogemust päikeseenergia salvestamisel.(2)

Käesolev töö käsitleb kõigepealt läbi kaks peamist päikesekiirgusest elektrit tootvat tehnoloogiat. Esiteks vaadeldakse päikesest otse elektrit tootvaid päikesepaneele ja teiseks päikese soojusest kaudselt elektrit tootvaid suuremahulisi päikesekollektoreid. Samuti uuritakse ka ühte suure potentsiaaliga, kuid alles arenemisjärgus olevat tehnoloogiat, mille kaugemaks visiooniks oleks kõik asfaltteed asendada päikesepaneelidega.(3)

Peale tehnoloogiate ülevaadet saab erinevate päikeseelektrijaamade alusel analüüsida tehnoloogiaid hinna, efektiivsuse ja muude tegurite alusel ning teha vajalikud järeldused. Leitakse ka adekvaatsed näitajad, mille abil tehnoloogiaid võrrelda ja järeldusi teha.

Nende teadmiste ja järelduste põhjal saab hüpoteetiliselt pakkuda ka tehnoloogia sobilikkust Eestile, sest hetkel toodab Eesti enamuse elektrist põlevkivi abil, mis ei ole keskkonnasõbralik ja mille ressurss on piiratud.

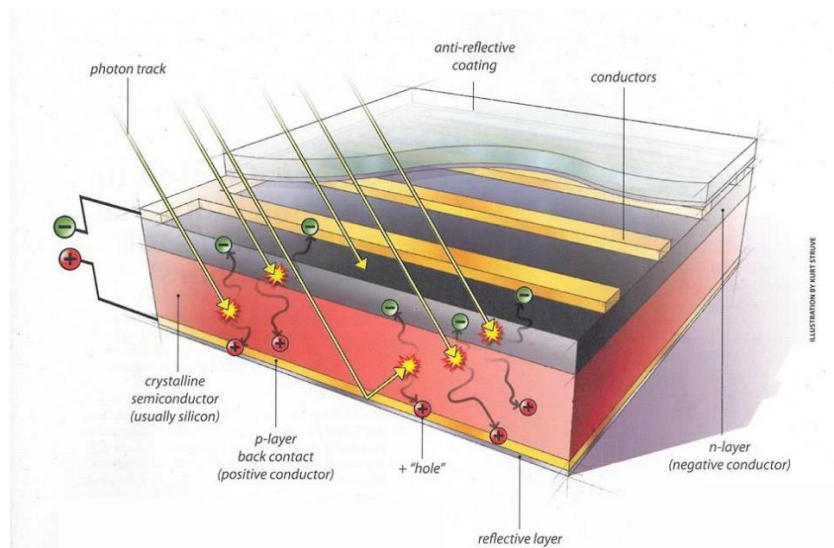


# 1. PV TEHNOLOOGIA

## 1.1. Tehnoloogia ja ajalugu

Nimetus PhotoVolaltics (PV) tuleb kahest inglise keelsest sõnast. Esiteks „photons“, mis tähendab footoneid, ja teiseks „voltage“, mis viitab elektrile. PV paneelide tehnoloogia põhineb sellel, et pooljuhtidele kaudu suudetakse elektrit toota otse päikesest. Pooljuhis tekivad päikesekiirguse mõjul vabad elektronid, mis suunatakse kas voolu vajavasse seadmesse või üldisesse vooluvõrku.(4)

PV tehnoloogia vaatlemist alustati aastal 1839. Teadlased avastasid, et liivas leiduv silikoon tekitab elektrivoolu, kui selle peale langes otsene päikesekiirgus. Aastal 1954 tutvustati Ameerika Ühendriikides esimest PV seadet, mis suutis märkimisväärse hulga elektrit toota.(5) Praegu, 60 aastat hiljem, puutume sellega kokku juba igapäevaselt, alustades väikestest kalkulaatoritest lõpetades suuremate majade katustel olevate paneelidega. Kui minna PV paneelide tehnoloogias täpsemaks, tuleb alustada päikesekiirguse teekonnast. See kiirgab footoneid, mis kokkupõrkel pooljuhiga vabastavad välisringis olevad elektronid aatomilistest sidemetest (Joonis 1.1.).



Joonis 1.1. PV paneelide tehnoloogia (6)

Pooljuhi struktuuri tõttu liiguvad elektronid ühes suunas ja tekitavad elektrivoolu. Selleks, et vältida päikese kiirguse peegeldamist atmosfääri ja saada kätte maksimaalne kasutegur, on paneelid kaetud peegeldumisvastase kattega. Kuigi otsene päikese paneeli kate ei peegelda kiirgust märkimisväärselt atmosfääri tagasi, ei suudeta 100% päikese kiirgusest elektri muundada. Põhjus on selles, et osa valgusest siiski peegeldub, osa on liiga nõrk, et toota elektrit ning mingi osa päikese kiirgusest muundub soojuseks. Tänu sellele ei suudeta kogu päikesest potentsiaalselt kätte saadavat energiat elektrivooluks suunata. (6)

## 1.2. Kasutus

PV paneelid jaotatakse vastavalt kasutusele kahte gruppi: võrguühendusega ja võrguühenduseta. Esimesel juhul on paneelid seotud üldise elektrivõrguga, mis tähendab, et energiat, mida toodetakse, saab suunata ka võrku ja müüa elektriturul. Kui tarbimine ületab paneelidega toodetavat energiat, siis ostetakse võrgust juurde. Võrguühendusega süsteemi kasutatakse tihti suuremates mastaapides, näiteks büroohooned, elumajad, kortermajad. Antud variant on küllaltki kulukas, kuna on vaja võrku ühendamiseks soetada mitmeid seadmeid. Samas võib selle eeliseks lugeda seda, et salvestatud energia ei lähe raisku ja toob osa investeeringust tagasi. (7)

Võrguühenduseta süsteem on suletud, mis tähendab, et toodetud elektrienergia kasutatakse ära kohapeal ja kui toodetakse rohkem, siis energia salvestatakse. Suletud süsteemi kasutatakse väiksemates mastaapides, nagu suvilad, mobiilside tugijaamad, kalkulaatorid, maanteel olevad kiiruskaamerad jne. Raskendav asjaolu on see, et kuna paljud selliselt ühendatud seadmed või hooned vajavad aastaringi ühesugust voolu, kuid kuna päikesehulk, mis maale langeb, on aastaegade lõikes erinev, läheb näiteks suvel palju salvestatud energiat raisku. On ka võimalus investeerida salvestusmeetoditesse akude näol, kuid see on kulukas ja akud ei ole veel nii arenenud, et suudaks mitu kuud suurt hulka energiat varuks hoida. Selle süsteemi selgeks eeliseks on sõltumatus üldisest elektrivõrgust, mis hoiab kokku kulud, mis oleksid vajalikud võrguga ühendamiseks. (7)

PV paneelide kasutus on tänapäeval väga lai. Kuna neid on arendatud suhteliselt pikka aega, on kasutusala jõudnud peaaegu kõikjale. Levinuim kasutus on elumajade või kortermajade katusel, et toota elektrit majapidamiseks. Kuid laialt kasutatakse ka kohtades, kus voolutarbimine ei ole väga suur või kus üldise elektrivõrguga ühenduse saamine on kulukam, kui päikeseenergiast sõltuvusele üleminek. Näiteks Eesti mobiilsideoperaator Elisa on võtnud suuna rajada mobiilside tugijaamad päikesepaneelidest sõltuvateks. Lisaks aastatel 2015-2016 tehti maailmarekordeid lennukiga Solar Impulse 2, mis lendas päikesest laetud energia abil ümber maailma, kusjuures see oli õhus ka öösel, kui ta lendas päeval akudesse salvestatud energia abil. (8, 9)

Olemasolevaid andmeid ülemaailmselt paigaldatud PV paneelide võimsusest on alates aastast 1992, kui paigaldatud nimivõimsus oli 105 MW antud tehnoloogia abil. Alates sellest ajast on kasv olnud eksponentsiaalne ning viimaste andmete järgi oli 2014. aastaks paigaldatud PV paneele 178 391 MW jagu, ehk 22 aastaga on võimsus suurenenud ligi 1700 korda. 2014. aastal olid suurimateks PV paneelide abil elektri tootjateks Saksamaa (38 200 MW), Hiina (28 199 MW) ja Jaapan (23 300 MW). 10 suurimat PV paneelide elektritootjat toodavad kokku 85-90% kogu PV paneelide poolt toodetud energiast. Aastaks 2050 ennustatakse, et PV paneelide abil toodetakse 11% maailma elektrivajadusest ning seega hoitakse ära 2.3 gigatonni CO<sub>2</sub> emissiooni aastas. (10, 11)

### **1.3. Eelised ja puudused**

PV paneelidel on palju eeliseid ja puuduseid, kuid selles töös keskendutakse pigem nendele punktidele, mille abil saab võrrelda omavahel erinevaid päikesesalvestusmeetodeid.

Järgnevalt tuuakse esile PV paneelide eelised:

1. PV paneelide suureks eeliseks on see, et päikesekiirgusest saab elekter ilma vaheseadmeteta. Vaja on vaid inverterit, mis pole mahult suur. Pole vaja ei soojusvaheteid ega generaatoreid. Selle tõttu on kogu süsteem kompaktne ja väga sobiv väikeste mahtude

tarvis, mis on ka üks põhjus peale alaneva hinnataseme, miks PV paneelide hulk üle maailma on eksponentsiaalselt kasvanud.

2. Eeliseks on ka see, et PV paneelid sobivad suurepäraselt elumajade, büroohtonete ja muude sarnase tarbimisega üksuste elektritarbimise katmiseks. Tänapäeval on paneelide hind langenud piisavalt, et enamik tarbijaid saavad seda endale lubada.
3. Erinevalt paljudest muudest taastuvenergia liikidest nagu tuuleenergia ja hüdroenergia, on PV paneelidega võimalik toota elektrit olematu müratasemega.

Nende eeliste juures esinevad ka järgmised puudused:

1. Raskuspunktiks on paneelide puhul see, et elektrit toodetakse vaid valgel ajal, ehk kui päike paistab peale. Küll suudavad paneelid toota vähesel efektiivsusega elektrit pilves ilmaga, kuid pimedas on tootlikkus null. Suur vahe tekib ka seoses laiuskraadide ja aastaegade. Suvel ja talvel saadava elektrienergia tootlikkuse vahe kipub olema 20 kuni 50 kordne. See seab suured ootused salvestusmeetoditele akude näol, mis ei ole tänapäeval veel nii kõrges arengujärgus, kui vaja oleks. Samuti on nende hinnad kõrged, mis seab akude paigaldamise tasuvuse küsimärgi alla.
2. PV paneele on rendatud juba aastakümneid, kuid hetkel jäävad kasutegurid sellegipoolest 14-25% vahele sõltuvalt paneeli generatsioonist, geograafilisest paiknemisest ja ilmast.
3. Paneelid on üsna õrna konstruktsiooniga ja võivad vale käitlemise korral kergelt puruneda. Seetõttu on ka väga oluline need kindlustada. (13)

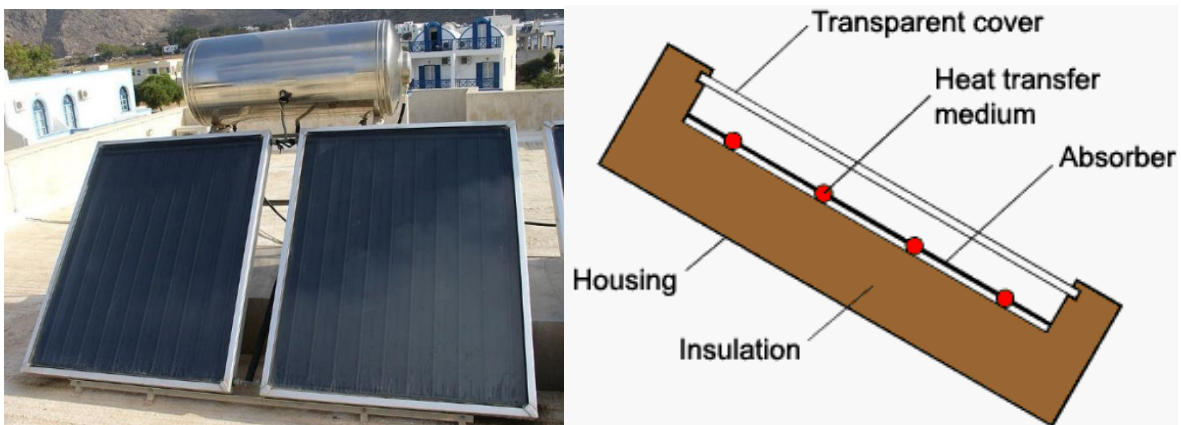
## 2. PÄIKESEKOLLEKTORID

### 2.1. Üldine tehnoloogia

Kui PV paneelid tootsid päikesekiirgusest otse elektrit, siis väga levinud on ka soojusvahetite abil elektri või soojuse tootmine, milleks jaoks on tehtud päikesekollektorid. Sõna “kollektor“ antud kontekstis tähendab päikesekiirguse kinnipüüdmist ja endasse neelamist. Kollektori pinnale langev energia suunatakse soojusvahetisse, kust edasi soojendatakse kas vett, õhku või muud soojuskandjat. Päikesekollektorid jagatakse kaheks: kontsentreeruvateks ja mittekontsentreeruvateks. (13, 14)

### 2.2. Mittekontsentreeruvad päikesekollektorid

Mittekontsentreeruvad päikesekollektorid oma mõistelt on sellised, kus kollektori pind on sama, mis neelava ala pind. Kõige parem näide on tasapinnaline päikesekollektor (Joonis 2.1.), mis ongi kõige lihtsam kollektor. (14)



Joonis 2.1. Plaatkollektorite tehnoloogia (13)

See koosneb lihtsalt päikesekiirgust absorbeerivast pinnast, soojusvahetist ja soojustusest, et kaod oleksid minimaalsed. Kui vaadata päikesekiirguse teekonda, siis läbib see kõigepealt kollektori pealispinna, mis on läbipaistev. Antud pinna taga on aga absorbeeriv pind, mis suudab maksimaalselt kiirgust endasse imeda. Selle pinnaga on väga tugevalt ühendatud torud, milles voolab vastav soojust juhtiv vedelik, enamasti vesi. Soojuskadude vältimiseks on neelav pind igast küljest soojustatud. (13)

Teine, sama liigi alla kuuluv on vaakumtorudega päikesekollektor. Põhiline tehnoloogia on sama – päikesekiirgus läbib läbipaistva pinna ning seejärel põrkub kokku absorbeeriva pinnaga, mis omakorda soojendab soojuse edasi kandmiseks mõeldud vedelikku. Võrreldes tasapinnalise kollektoriga on siin kaks olulist erinevust. Esiteks ei ole need kujult tasapinnalised, vaid üksteise kõrvale tihedalt paigutatud torud (Joonis 2.2.). (13)



Joonis 2.2. Vaakumtorudega kollektori tehnoloogia (15)

Teine erinevus on selles, et kui tasapinnalisel kollektoril oli läbipaistva ja neelava pinna vahel õhk, siis vaakumtorudega kollektoris on nende kahe pinna vahel vaakum. Vaakum on valitud põhjusel, et see keskkond ei juhi soojust ja tänu sellele on soojuskadod antud kollektoris oluliselt väiksemad. Nagu ka (jooniselt 2.2.) näha, siis liigub külm vedelik soojenedes ülesse ja tekib ringlus, kus kogu aeg soojendatakse soojust juhtivat vedelikku. Tasuks veel ära märkida, et kui tasapinnalise

päikesekollektori puhul sõltus kättesaadav energia sellest, mis nurga alt päike paistab, siis torude puhul pole vahet, mis nurga alt päike paistab, toru pindala jääb ka nurga alt vaadates täpselt samaks. 2008. aastal telliti EAS-i rahastamisel uuring, milles kinnitati, et vaakumkollektorid on 25% efektiivsemad kui tasapinnalised kollektorid. (14, 16)

### **2.3. CSP päikesekollektorid**

Mittekontsentreeruvad päikesekollektorid on väga sobivad sooja tarbevee tootmiseks või ventilatsiooni soojendamiseks, kuid nendes ei suudeta saavutada selliseid temperatuure, mis oleksid piisavad elektrienergia tootmiseks. Seepärast on mõeldud välja ka kontsentreeruvad päikesekollektorid (inglise keeles Concentrated Solar Power – CSP), mis oma mõistelt tähendavad seda, et kollektori pind on kordades suurem kui absorbeeriv pind. Siit saab järeldada, et ühele pinnaühikule loomulikult langev päikesekiirgus koondatakse kokku väiksemasse punkti, ehk kontsentreeritakse. Tekib sarnane efekt, kui panna luup päikese ja paberi vahele ning kui teatud kaugusel seda õigesti hoida, paber süttib. See juhtub, kuna suurele pinnale langev päikesekiirgus sai kontsentreeritud paberi ühele punktile ja temperatuur tõusis nii suureks, et paber läheb põlema. Sellel samal põhimõttel toimivad ka päikesekiirgust kontsentreerivad päikeseelektrijaamad. Kontsentreerides päikesekiirgust, on võimalik punktis tekitada piisavalt suur temperatuur, mille abil saab läbi soojusvaheti tekitada auru. Aur omakorda annab võimaluse turbiini abil elektrit toota. Päikesekiirgust ühte punkti suunatakse läbi peeglite, mis liiguvad päeva jooksul päikesega kaasa. Viimane on vajalik selleks, et igal hetkel oleks päike vajalikku punkti koondatud. (14)

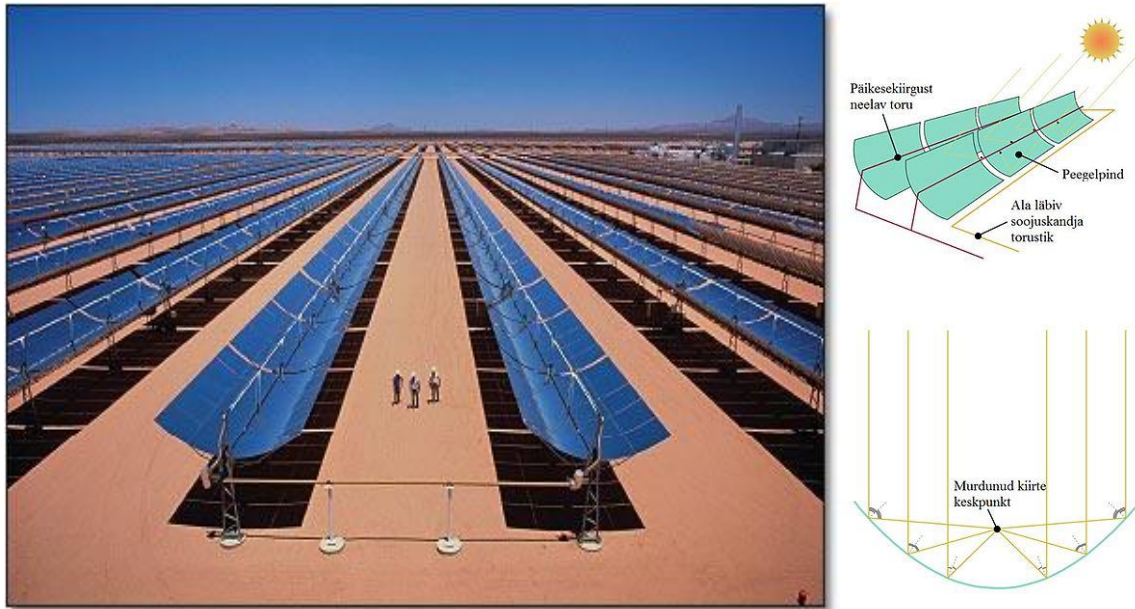
Viise, kuidas peeglid on paigaldatud erinevates lahendustes, on mitmeid ja nendest on ülevaade allpool, kuid edasi uuritakse, mis saab sellest kiirgusest, mis suunatakse kontsentreeritult ühte punkti. Kogu kiirgus suunatakse vastavale absorbeerivale pinnale, millel on maksimaalne võimekus päikesest kiirgav energia endasse imeda. Sellest pinnast või absorbeerivast alast jookseb läbi toru, kus voolab soojust juhtiv vedelik. Enamasti kasutatakse seal näiteks soola, mis on sulanud kujul või termaalõli. Juhtides kõrge temperatuuriga soojuskandja soojusvahetisse, saab tekitada auru, mis ühendatult turbiiniga saab toota elektrit. See, kuidas kontsentreeritakse päikesekiirgust,

on süsteemiti erinev, kuid elektri tootmistehnoloogia on neil kõigil siiski sama. Sõltuvalt asukohast on võimalik ka saadud soojus suunata otse kaugküttevõrku, kui selleks on vajadust. Kuna selle tehnoloogiaga on võimalik väga suures mahus toota elektrit, siis väljakutseks on, kuidas päeva jooksul toodetud suur energiahulk jõuab tarbijateni öösel, kui päikest paistab vähem. Selle jaoks on välja mõeldud lähiaastatel Marokos Ouarzazates valmiva päikeseelektrijaama jaoks päris hea lahendus. Päevasel ajal kasutamata jäänud soojus varundatakse suurtesse sulanud soola paakidesse, kus hoitakse seda kõrgel temperatuuril. See annab võimaluse seda soojust kasutada ka öösel generaatori abil elektri tootmiseks. Kui selle konkreetse päikeseelektrijaama esimese etapi osa suudab elektrit toota veel kolm tundi peale päikesekiirguse kadumist, siis teine ja kolmas etapp viivad selle näitaja seitsme tunni peale. See on suur edasikäik selle suunas, et ka öösel saab loota otseselt päikeseenergia peale. (17)

## **2.4. Paraboolne rennsüsteem**

Teades tehnoloogiat, mis saab päikesekiirguse kontsentreerimisest edasi, vaatame ka erinevaid süsteeme, kuidas päikesekiirgus koondatakse. Esimeseks variandiks on rennsüsteem (Joonis 2.3.), kus on ridade kaupa koondatud parabooli kujulised pikad peeglid, mis koondavad kogu päikesest tuleneva kiirguse keskel olevale torule. Torus paikneb soojust kandev vedelik, näiteks eelpool mainitud Ouarzazate päikeseelektrijaamas kasutatakse sünteetilist termaalõli, mille temperatuur antud torudes tõuseb 393 kraadini.(62) Paljudes teistes kasutatakse 566 kraadini tõusvat sulasoola.(22) See suunatakse soojusvahetisse, kus toimub soojuse vahetamine termaalõlilt veeaurule ja sealt edasi suunatakse aur generaatorisse elektri tootmiseks. Peeglite puhul on oluline faktor see, et kuna päike liigub kogu päeva vältel, peavad peeglid kaasa liikuma ja selleks ongi paigaldatud selle süsteemiga töötavatele päikeseelektrijaamadele vastav automaatika. (18)

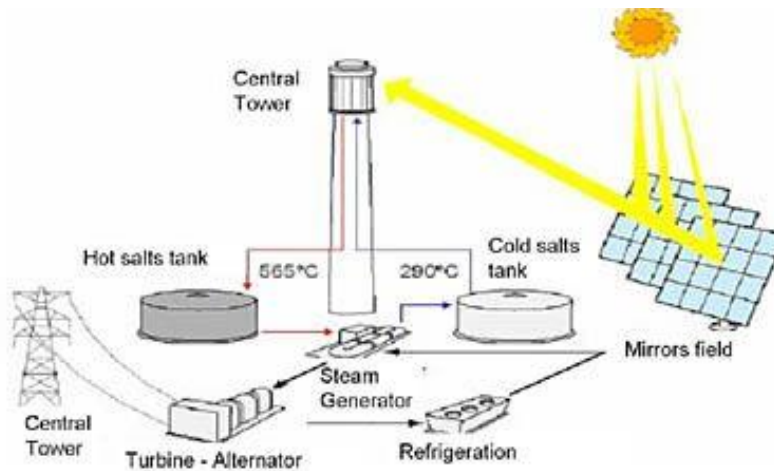




Joonis 2.3 Paraboolse rennsüsteemi tehnoloogia (19)

## 2.5. Päikesetorn

Teine väga oluline tehnoloogiline lahendus päikesekiirguse kontsentreerimiseks on päikesetorn, mis kujutab endast ette suurt hulka peegleid, mis on paigutatud suurele maa-alale ja on suunatud kõik ühte keskpunkti (Joonis 2.4.). Keskkel asub torn, mille tippu kiirgus koondub. Tipust voolab läbi soojust juhtiv aine ja liigub ringlusesse. Soojust juhtivaks vedelikuks kasutatakse sellise tehnoloogia puhul enamasti sulasoola ning siin jäävad temperatuurid 288 kuni 566 kraadi vahele. Soola eeliseks on see, et tänu tema omadustele saab väiksemas ruumala ühikus salvestada rohkem soojust kui teiste tehnoloogiate puhul. Kui nüüd sulasool on jõudnud ringlusesse, suunatakse see kas mahutitesse, kus sarnaselt eelpool mainituga hoitakse soojust varuks või otse elektri tootmiseks. (20)



Joonis 2.4 Päikesetorni tehnoloogia (21)

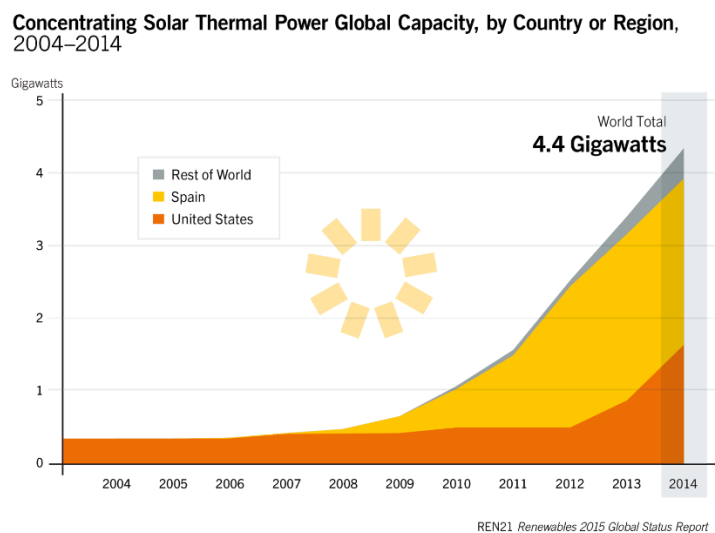
## 2.6. Sulasoola tehnoloogia

Lisaks eelpool toodud kahele tehnoloogiale on ka palju väiksemaid lahendusi päikesekiirguse kontsentreerimisel peeglite abil, kuid hetkel on siin peatunud vaid nendel kahel põhilisel, sest need on suuremahulised ja annavad kõige kiirema lootuse liikuda taastuvenergia allikatele. Päris palju on mainitud sulasoola kasutamist ja tekib küsimus, miks just sulasool on parim vahend sooja salvestamiseks. Erinevate andmete järgi on sulasoolaga energia talletamise kasutegur 93-99%, ehk energia salvestamisega läheb kaotsi maksimaalselt 7%. Tehnoloogiliselt on sulasool parimate omadustega aine, millega soojust salvestada. Esiteks on ta vedelas olekus atmosfääri rõhu all, selle temperatuurid ja rõhud ühilduvad tänapäeva auruturbiinidega. Lisaks ei ole sulasool ei tuleohtlik ega ka mürgine. (22, 23, 24)

## 2.7. Ajalugu ja kasutus

Päikesekollektorid on väga hea moodus päikeseenergia püüdmiseks ja selle kasutus levib aina laiemalt. Ajalooliselt sai nende kasutamine alguse 19. sajandist. Mõõdetavaks võimsuseks on küll ainult kontsentreeritud kiirgusega kollektorite elektri tootmise võimsus, kuna ülejäänud ei tooda

elektrit, vaid ainult sooja vett. Kui aastal 1984 oli selliste päikeseelektrijaamade koguvõimsus 14MW, siis aastast 2009 kasvas võimsus eksponentsiaalselt ja 2014. aasta lõpuks oli paigaldatud 4400 MW võimsuse jagu antud tehnoloogiaga päikeseelektrijaamu. Kõige suuremaks tootjaks on Hispaania, kes toodab koguvõimsusest üle poole, ehk 2300 MW. Võrreldes PV paneelidega on ülemaailmselt see küll umbes 40 korda väiksema koguvõimsusega, kuid siin on olnud suureks põhjuseks ka PV paneelide hinnalangus ja riikide vähene tahe riskida uuemate tehnoloogiatega. Mõned ennustavad, et aastaks 2050 moodustavad kontsentreeritud päikesekollektoritega päikeseelektrijaamad 12-25% kogu maailma elektritoodangust. See oleks suur edasimineku taastuenergiade üleminekul. (25, 26, 27)



Joonis 2.5 CSP kasutuse ajalugu

## 3. SOLAR ROADWAYS

### 3.1. Tehnoloogia sisu

Aastal 2006 USA-s asutatud firmas SolarRoadways (SR) hakati ellu viima revolutsioonilist ideed. Innovaatilisus sai alguse sellest, et mõeldi välja, mis saaks, kui kõik asfaltteed oleksid kaetud asfaldi asemel päikesepaneelidega (Joonis 3.1.). Just sellise idee peale tulid kaks inimest aastal 1960. Hetkel on see küll veel arendusjärgus, kuid olles jõudnud 3. generatsiooni paneelideni, on saavutatud juba päris palju. Tehnoloogia seisneb selles, et paigaldades asfalttee asemele heksagonaalsed päikesepaneelid, on võimalik kogu päikesest tulenev energia, mis varasemalt lihtsalt asfaldi imendus, salvestada elektriks ja selle läbi toetuda rohkem taastuvenergiaallikatele.

(3)

Lisaks CO<sub>2</sub> saaste vähendamisele ja roheline energia arendamisele on plusse veelgi. Kui muidu talvel on teed lumised, siis nendesse paneelidesse on paigaldatud ka küttekahad, mille abil saab lund sulatada, teed on puhtad ja pole libedad. Lisaks saab paneelidel olevaid LED tulesid kasutada valgustamiseks ja jooni poleks maha enam vaja joonistada. Veel enam, kuna kõik paneelid on võrku ühendatud, on neil ka vargavastane süsteem, mis annab märku, kui keegi tahab illegaalselt endale paneeli omandada. Kaob ka vajadus pikkadeks ja vaevalisteks teeremontideks, kuna paneele saab vahetada ühekaupa.



Joonis 3.1. Pilt paneelidest (29)

Hetkel on viimase generatsiooni 0,41 ruutmeetrise paneeli võimsus 48 vatti, ehk 100 ruutmeetrine ala suudaks toota kuni 11,7 kW võimsusega elektrit sõltuvalt päikesekiirguse hulgast. See teeb kuni 117W ruutmeetri kohta. (3)

### **3.2. Väljakutsed**

Selle tehnoloogia poolt on väga palju argumente, kuid kõik pole ka nii lihtne. Mõni aeg tagasi tehti arvutused, kui palju läheks maksma USA teede asendamine paneelidega, et toota piisavalt elektrit. Praegu maksab 1 ruutmeeter asfalti kuni 16 dollarit. Antud paneelide maksumus oleks esialgu umbes 10 000 dollarit 12 ruutmeetrise paneeli eest, mis on umbes 800 dollarit ruutmeetri kohta. See on täpselt 50 korda kallim kui asfaldi paigaldamine. Antud hind pärineb küll aastast 2010 ning uuem informatsioon puudub. Aga nagu varem nähtud erinevate tehnoloogiate puhul, siis see hind kindlasti langeb. Hetkel maksaks USA teede asendamine paneelidega umbes 10 USA aasta eelarvet. Väljakutseid selle tehnoloogiaga seoses on veelgi. Kuna kogemus nende paneelidega puudub, ei ole võimalik enne teada saada, kui vastupidavad on nad autodest tulenevale raskusele, erinevatele kliimavöönditele, temperatuuridele ja aastaegadele. Paneelide pealispind on klaasist, ehk nende tegelikku vastupidavust on raske uskuda. Raskuspunktiks on ka teede puhtus, sest mistahes sodi, muld ja liiv, mis tee peale läheb, takistab päikesel paneeli sisse jõudmast. Nagu ka teiste päikeseenergia salvestusmeetodite suureks väljakutseks on energia talletus, on see sama probleem ka siin. Kuna päike paistab enamuse ajast päeval ja suurim energiavajadus on õhtupoolikul ning teatud laiuskraadidel talvel kütteks, siis kuidas jaotada ja salvestada energiat selliselt, et seda saaks kasutada igal hetkel. SolarRoadways ise pakub välja, et ülejäägiks jääv energia müüa elektrivõrku või kasutada uuema põlvkonna akusid. (29, 30)

### **3.3. Arengud**

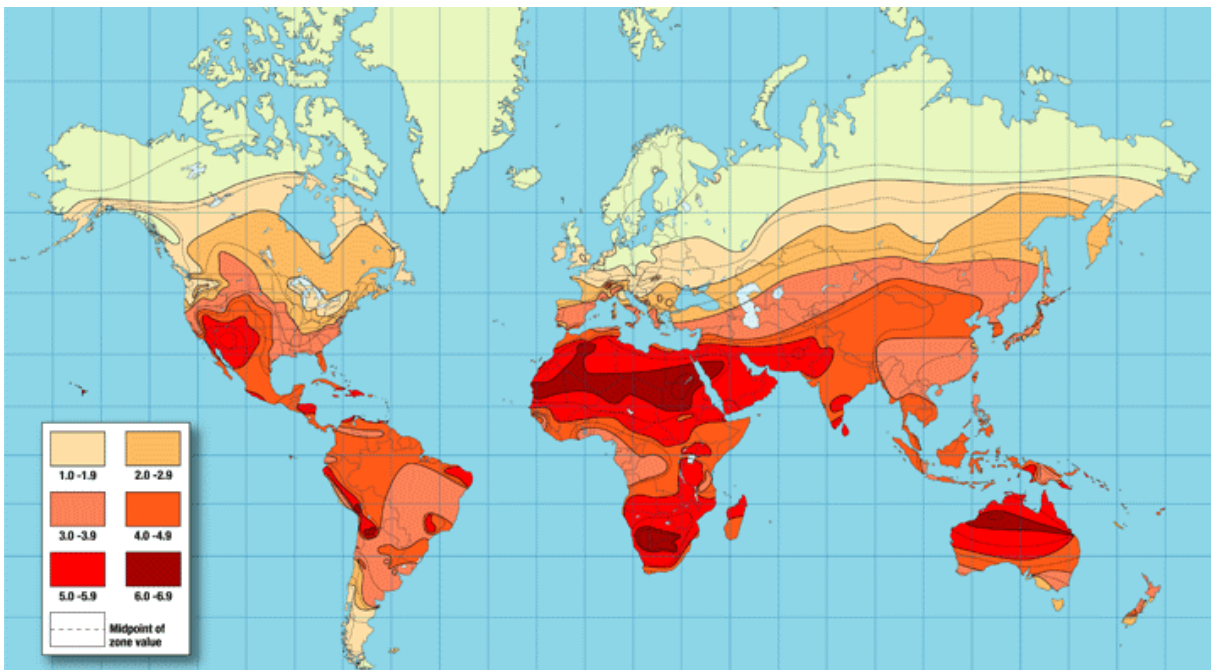
Vaatamata suurtele väljakutsetele on uudistes levinud info, et Prantsusmaa plaanib umbes 1000km pikkuse teehulga katta päikesepaneelidega ja selle abil toota elektrit 8% Prantsusmaa elanikest. Internetis on väga palju eriarvamusi antud tehnoloogiale ja päris mitmed allikad teevad arvutustega selgeks, et võrreldes majade katustele paigaldatavate paneelidega on see tehnoloogia väga kallis.

Samas on kõik tehnoloogiad alguses kallid ja hiljem on hind langenud. Idee on innovaativne ja annab palju maad edasistele arenemisvõimalustele. Näiteks soodustaksid sellised teed elektriautode kasutamist. Kuna juhtmevabad laadimistehnoloogiad on juba olemas, siis oleks tulevikus väga realistlik selliste teede puhul sõidu ajal auto laadimine paneelide abil. (3, 31)

## 4. PÄIKESEELEKTRIJAAMADE VÕRDLUS

### 4.1. Võrdlusparameetrid

Olles vaadanud kõiki juba olemasolevaid või veel arendatavaid suuremamahulisi tehnoloogiaid, vaatame ka numbrilisi näitajaid. Peamised näitajad, mida saame võrrelda, on ülemaailmselt paigaldatud võimsus, nende efektiivsus, aastane kogutoodang ja maksumus. Maailma keskmiste näitajate asemel on võetud lähteandmeteks konkreetset juba paigaldatud või valmimisjärgus suurimad päikeseelektrijaamad. Eelnevalt on uuritud kolme erinevat ideed ja tehnoloogiat, millel on potentsiaali maailma energia ressurside vallas muutusi tuua. Suureks ühiseks teguriks kõikide süsteemide puhul on päikesekiirguse aastane hulk. Teatakse, et päike kiirgab maa peale selliselt, et kui kiirgus 100%-se kasuteguriga salvestada, saaksime ühe ruutmeeri pealt võimsuse 1000W. Aga see on võimalik ainult juhul, kui päike on seniidis ja ilm on pilvitu. Selleks, et erinevaid piirkondi võrrelda, on loodud kaart (Joonis 4.1.), mille pealt saab välja lugeda, mitu kWh elektrit m<sup>2</sup> kohta on teoorias võimalik mingis piirkonnas toota.



Joonis 4.1. Päikese paiste maailma kaart (kWh/m<sup>2</sup> päevas) (32)

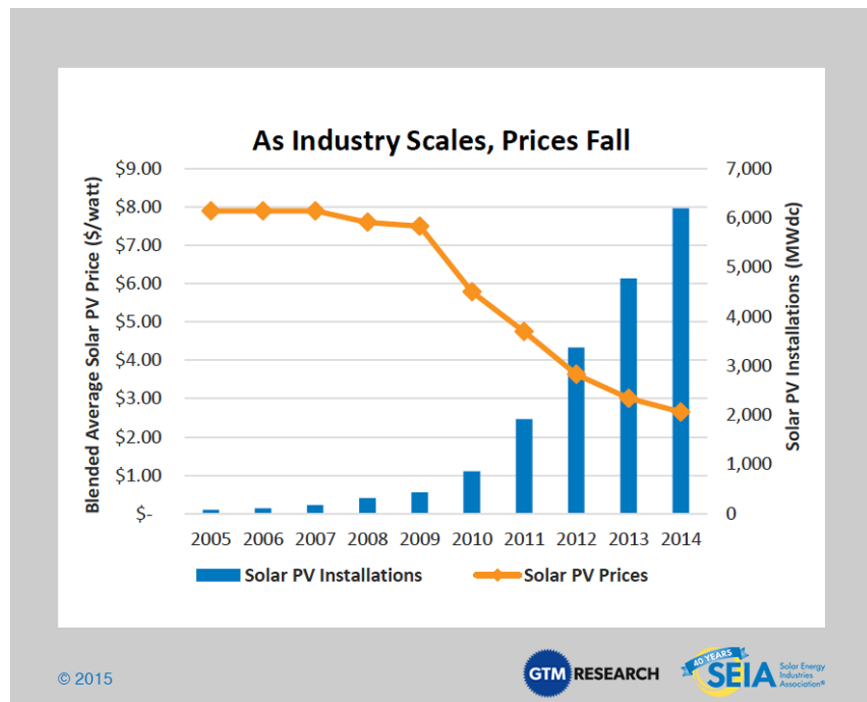
Pildil on toodud päeva keskmised näitajad, mis korrutades 365-ga annavadki aastase potentsiaalse ruutmeetrile langeva energiahulga kilovatt-tundides.

Kui oleks võimalik saada kätte kogu maapinnale langev päikeseenergia, piisab vähem kui tunnist, et saada kätte terve aasta vajadus. Tehtud on arvutus, et kui suudetaks piirkonnas, kus aastast langeb 2000 kWh/m<sup>2</sup> kohta, salvestada päikeseenergiat kasuteguriga 20%, siis tuleks paneelidega katta üle maailma Hispaania riigi pindalaga võrdne ala, mis on ühtlasi 10 Eesti pindala. Pigem on pindala juures küsimus selles, et kui me katame selle pindala ära päikeseelektrijaamadega, siis tegelikult ei ole 100% tootmise alast kaetud paneelidega, vaid reaalsuses on see oluliselt hõredam. Ehk jaama efektiivsus ja kasutegur saavad hoopis uue tähenduse. Kui päikesepaneeli efektiivsus tähendab seda, kui efektiivne on paneeli pindala, siis päikeseelektrijaama efektiivsus annab meile teada, kui efektiivselt saadakse kätte kogu jaama pindalale langev päikeseenergia. Viimaseks väga oluliseks teguriks on ka mahtuvustegur, mis tähendab, mitu protsenti on perioodis toodetud elektrienergia sellest hulgast, mille saaks, kui jaam töötaks kogu aeg täisvõimsusel. Mida suurem on mahtuvustegur, seda suurem tootlikkus on jaamal selle nimivõimsuse kohta. Kui see protsent on väike, siis see näitab, et jaamal on küll suur võimsus, aga toodangus see nii väga ei kajastu. Esialgu võib tunduda see ebaoluline tegur, kuid lõpus tuleb jaamade võrdluses välja selle olulisus. (33)

## **4.2. PV elektrijaamad**

Esimeseks tehnoloogiaks, mida me vaatleme, on PV paneelid. Need on maailmas kõige levinumad praeguseks hetkeks ja samuti on ka hind kõige madalam. Hinda arvestatakse selliselt, et jagatakse ehituse maksumus paigaldatud maksimaalse võimsusega, ehk dollarit vati kohta.





Joonis 4.2. PV paneelide hind läbi aastate (34)

Nagu graafikult näha, siis 10 aastat tagasi oli päikeseenergia väga kallis, 8 dollarit paigaldatud vati kohta. Põhjus on ka selles, et tehnoloogia oli vähe arenenud ja masstootmise puudumise tõttu ei olnud laialt levinud. Praeguseks hetkeks on hind langenud sõltuvalt mastaabist ja kvaliteedist 2,5-3,5 dollarini paigaldatud vatise võimsuse kohta. Hind on 10 aastaga üle 2 korra langenud. Veel suurem vahe on aga paigaldatud päikesepaneelide koguvõimsuses. Kui enne 1990. aastat oli üle maailma paigaldatud alla 100 MW võimsuse jagu paneele, siis 2014 aastaks umbes 177 000 MW, mis on 1770 korda rohkem. PV paneelid on viimasel kümnel aastal kogunud väga suurt populaarsust. Keskendudes töö eesmärgile, milleks on leida lahendus suures mahus elektri tootmisele, vaatame kahte näidet PV paneelidega sisustatud päikeseelektrijaamadest. (10, 11)

#### 4.2.1. Topaz

Esimene nendest asub USAs California osariigis. Aastatel 2011-2014 ehitatud Topazi nimeline päikeseelektrijaam on oma 550 MW-se nimivõimsusega üks suurimaid maailmas. 25

ruutkilomeetri peale on paigaldatud 9 miljonit päikesepaneeli ja aastal 2015 tootis see jaam rekordilised 1300 GWh (Tabel 4.1.). See tähendab, et üks ruutmeeter suudab salvestada päikeseenergiat 52 kWh. Päike pakub selles asukohas 2244,75 kWh energiat aastas ruutmeetri kohta (45). Kuigi PV paneelide kasuteguriks on tänapäeval 15-20%, siis antud juhul päikeseelektrijaama kontekstis on jaama kasutegur 2,32%, sest jaama pindalast ei ole kõik kaetud päikesepaneelidega. Projekti maksumuseks on 2 miljardit USA dollarit. Teades jaama nimivõimsust, saame väita, et antud juhul on ühe vati võimsuse paigaldamine läinud maksma 3,636 dollarit. Mahtuvusfaktoriks on siin 27%, mis enne võrdlust teiste jaamade ja tehnoloogiatega ei ütle palju, küll aga on see PV elektrijaama kohta väga hea tulemus. (35, 36, 37, 38)

Tabel 4.1. Päikeseelektrijaama Topaz andmed

PV päikeseelektrijaam	Topaz - USA	Ühik
Pindala	25	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	1300	GWh
Nimivõimsus	550	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	52	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	2244,75	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	2,32	%
Projekti maksumus	2	mld \$
Hind vati kohta	3,636	\$/W
Mahtuvusfaktor	27	%

#### 4.2.2. Golmud

Teine väga suur PV paneelide projekt on teostatud Hiinas Qinghai provintsis. Golmudi nimelise päikeseelektrijaama 5,64 ruutkilomeetrise ala peale on paigutatud 200 MW-se võimsuse jagu päikesepaneeli (Tabel 4.2.). Jaam ehitati aastatel 2009-2011 ja oli tol hetkel kindlasti üks maailma suuremaid ja samas ka suhteliselt soodsalt ehitatud. Projekti maksumuseks oli 0,5 miljardit dollarit, ehk ehitamine maksis 2,5 dollarit ühe vati paigaldamise kohta, mis on ligi 30% odavam kui Topaz.

Natukene suurem on ka aastas ruutmeetri kohta toodetud elektri maht, milleks on 56,24 kWh. Päikest paistab selles asukohas oluliselt vähem, ehk 1821 kWh ruutmeetri kohta aastas (45). Kasuteguriks tuleb siit 3,09%, mis on samuti kõrgem võrreldes Topazi päikeseelektrijaamaga. Kui paljud näitajad on antud juhul eelmisest jaamast paremad, siis Golmudi puhul on mahtuvusfaktor 18%, mis on suure tõenäosusega tingitud sellest, et päikese poolt pakutavat energiat on Golmudi jaamas ligi 20% vähem ja selletõttu on seal vähem ressursi suurema võimsusega töötada. (39, 40)

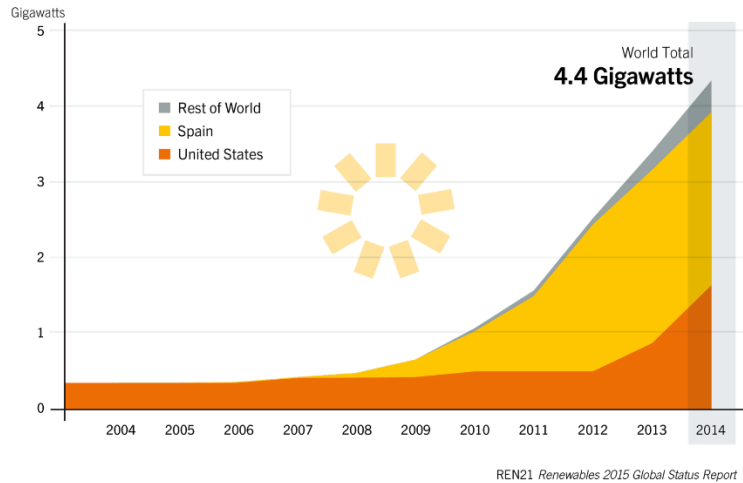
Tabel 4.2. Päikeseelektrijaama Golmud andmed

PV päikeseelektrijaam	Golmud - Hiina	Ühik
Pindala	5,64	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	317	GWh
Nimivõimsus	200	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	56,24	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	1821	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	3,09	%
Projekti maksumus	0,5	mld \$
Hind vati kohta	2,5	\$/W
Mahtuvusfaktor	18	%

### 4.3. CSP elektrijaamad

Teiseks tehnoloogiaks on CSP päikeseelektrijaamad, mis on PV paneelide järel teiseks põhiliseks päikesest elektri tootmise tehnoloogiaks. Sarnaselt PV paneelidega oli 1990. aastal paigaldatud umbes 350 MW jagu antud tehnoloogiaga elektrijaamu. Samas siin ei ole kasv olnud nii eksponentsiaalne, kui PV paneelide puhul. (25)

Concentrating Solar Thermal Power Global Capacity, by Country or Region, 2004–2014



Joonis 4.3. CSP kasutuse ajalugu (28)

Aastal 2014 oli CSP tehnoloogiaga elektrijaamu 4400 MW-se summaarse nimivõimsusega. PV paneelide puhul oli kasv toimunud 177 000 MW-ni (Joonis 4.3.). Oluline on mõista siinkohal seda, et see tehnoloogia ei ole nii kiiresti arenenud, kuna seda ei saa kasutada väikeses mahus elektri tootmiseks majapidamistes. CSP päikeseelektriijaama efektiivseks tööks on vajalik saavutada soojust juhtiva aine jaoks piisavalt suur temperatuur, et saaks toota auru ja selle kaudu turbiin käivitada. Kõrge temperatuuri saavutamiseks on aga vaja suurt pindala ja sellisel juhul toodetav elektrivõimsus ja elektriijaama maksumus on nii suured, et seda ükski majapidamine endale lubada ei saa. Neid elektriijaamu ehitatakse suurte projektide käigus riigi ja pankade rahastamisel. Kui mõelda, et miks ei ole siis riigid panustanud antud tehnoloogiasse, siis loogiline järeldus oleks, et muud energiaallikad on võrreldes sellega väga odavad ja taastuvenergiade üleminek on kallis. Mõned riigid, nagu näiteks Maroko, on hakanud sellele üleminekule mõtlema ja plaanis on 2020. aastaks 32% Maroko aastasest energiavajadusest toota taastuvenergiavahendite abil. 2030. aastal juba 52%. Marokos on ka hetkel käimas maailma suurim kontsentreeritud päikeseelektriijaama ehitus ja selle andmed saavad ka siin kajastatud. (41)

### 4.3.1. Ouarzazate

Marokos alustati 2013. aasta mais ehitust Ouarzazate päikeseelektrijaamaga, mis koosneb neljast osast. Esimesed kaks, ehk Noor I ja Noor II, on rennsüsteemi tehnoloogiaga, nendest Noor I nimivõimsusega kuni 160 MW ja Noor II 200 MW. Kolmas osa ehk Noor III on päikestorni tehnoloogiaga ja nimivõimsuseks 150 MW. Viimane, ehk neljas Noor IV on erinevate allikate järgi 50-70 MW-ne PV paneelidega varustatud elektrijaam. Arvutustes arvestame selle võimsust 60 MW-ks. Esimesel kolmel etapil on ka paigaldatud sulasoola reservuaarid, mis suudavad elektrit toota vastavalt Noor I kolm tundi, Noor II seitse tundi ja Noor III kaheksa tundi. Võimalik oleks ka kõiki faase eraldi võrrelda, aga vaatame selle elektrijaama statistikat summaarselt (Tabel 4.3.).

(43)

Tabel 4.3. Päikeseelektrijaama Ouarzazate andmed

CSP jaam	Ouarzazate - Maroko	Ühik
Pindala	18,8	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	1470	GWh
Nimivõimsus	580	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	78,19	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	1971	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	3,97	%
Projekti maksumus	2,677	mld \$
Hind vati kohta	4,62(5,15)	\$/W
Mahtuvusfaktor	32,3	%

Kuna selle elektrijaama ehitamine toimub etappide kaupa, siis on osa informatsioonist kättesaamatu või poolik, kuid arvutused põhinevad andmetel, mida saab kinnitada. Neljast osast esimese kolme informatsioon on täielik, viimase kohta teame vaid võimsust, milleks tuleb 50-70 MW. Kogu siin mainitud päikeseelektrijaama nimivõimsuseks on 580 MW ja seda numbrit ei saa nelja etapi võimsuseid kokku liites, vaid see on projektijärgne koguvõimsus. Esimese kolme osa ennustatav aastane toodang saab olema 1470 GWh. Jaam ise paikneb 18,8 km<sup>2</sup> suurusel alal ning

nende andmete põhjal saame kätte selle tootlikkuse, milleks on 78,19 kWh/m<sup>2</sup> kohta aastas. See on 3,97% selles asukohas aastas mahalangevast päikesehulgast, milleks on 1971 kWh/m<sup>2</sup> (45). Need arvutused on koostatud arvestades esimest kolme etappi. Mis puudutab aga projekti maksumust, siis leidub selle kohta väga erinevat infot ning projekti maksumuseks öeldud 2,677 miljardi dollari puhul jääb segaseks, kas selle hulka kuulub ka Noor IV või mitte. (42) Sellest hoolimata on meil võimalik seda arvutada ja andmete vähesuse tõttu saab tuua välja kaks vastust. Ouarzazate päikeseelektrijaama ehitus maksis 4,62 dollarit ühe vati paigaldamise kohta, kui Noor IV maksumuse hulka arvata ja 5,15 dollarit vati kohta, kui arvestada, et maksumus sisaldas ainult esimest kolme etappi. Samuti saame ka mahtuvusfaktori esimese kolme etapi abil, milleks on 32,3%. (43)

#### 4.3.2. Valle

Teine päikeseelektrijaam, mille näitel andmeid analüüsida saab, on Valle-nimeline jaam Hispaanias. Selle jaama eripäraks on see, et ta on võrreldes teistega väiksema mahuga ning maksumusega.

Tabel 4.4. Päikeseelektrijaama Valle andmed

CSP jaam	Valle – Hispaania	Ühik
Pindala	4,6	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	350	GWh
Nimivõimsus	100	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	76,09	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	1935	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	3,93	%
Projekti maksumus	0,54	mld \$
Hind vati kohta	5,4	\$/W
Mahtuvusfaktor	40	%

Veel on üsna märkimisväärne selle elektriijaama mahtuvusfaktor, mis arvutuste tulemusel on 40% (Tabel 4.4.). See annab mõista, et tegemist on suhteliselt hea lahendusega, kus kasutatakse nimivõimsusest ära rohkem kui teistes. Jaam on ehitatud kahest kõrvuti asuvast tagasihoidlikust 50-megavatisest parabolse rennsüsteemiga päikeseelektriijaamast. Aastane toodang 350 GWh annab 4,6 km<sup>2</sup> suurusel alal meile kasuteguriks 3,93%. Päike pakub selles asukohas 1935 kWh/m<sup>2</sup> kohta aastas ning sellest suudetakse kätte saada 76,09 kWh ruutmeetri kohta (45). Projekt maksis kokku 0,54 miljardit dollarit, ehk antud päikeseelektriijaama ühe vatise nimivõimsuse paigaldamine maksis 5,4 dollarit. (44)

### 4.3.3. Andasol

Täiesti esimene Euroopas ehitatud suuremahuline parabolse rennsüsteemiga päikeseelektriijaam oli Hispaanias asuva Andasoli kompleksi esimene osa Andasol 1, mis valmis 2009. aastal. Nagu tavaliselt ikka, siis ka selle tehnoloogiaga on esimene taoline kallim kui järgnevad. Antud juhul maksis selle päikeseelektriijaama rajamine 7,6 dollarit ühe vatise nimivõimsuse kohta (Tabel 4.5.). Kuna jaam on suhteliselt kaua töös olnud, on leitud mõned huvitavad tähelepanekud seoses aastase elektritoodanguga.

Tabel 4.5. Päikeseelektriijaama Andasol andmed

CSP jaam	Andasol 1 – Hispaania Teoreetilised väärtused	Andasol 1 – Hispaania Praktilised väärtused	Ühik
Pindala	2	2	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	158	175	GWh
Nimivõimsus	50	50	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	79	87,5	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	1993	1993	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	3,96	4,39	%
Projekti maksumus	0,38	0,38	mld \$
Hind vati kohta	7,6	7,6	\$/W
Mahtuvusfaktor	36,1	40	%

Kui algselt arvestati, et see jaam hakkab tootma 158 GWh elektrit aastas, siis realselt toodab see umbes 10% rohkem, ehk 175 GWh. Selletõttu on allpool olevas tabelis esitatud ka kaks veergu andmeid, ehk arvutused on teostatud mõlemast toodangust lähtuvalt. Muutumatuks arvudeks on siiski pindala, milleks on 2km<sup>2</sup>, projekti maksumus, milleks on 0,38 miljardit dollarit ja aastane päikesepaiste 1993 kWh/m<sup>2</sup> (45). Kui algselt arvestati, et ruutmeeter suudab aastas toota elektrit 79 kWh, siis realsuses oli toodang 87,5 kWh/m<sup>2</sup> aasta kohta. Algse kasuteguri 3,96% asemel on suudetud saavutada 4,39% ning kui mahtuvusfaktor oli planeeritud olema 36,1%, on hetkel see tõusnud 40% peale. Nagu näha, siis võivad esialgsed arvutused erineda antud juhul tervelt 10% sellest, mis teoreetilised arvutused enne ehitamist on näidanud. (46, 47, 48)

#### 4.3.4. Ivanpah

Viimaseks näiteks CSP elektri jaamade seast on eelnevast kahest erinev päikesetorni kogumissüsteem. Eriliseks teeb antud jaama ka see, et hommikuti on vaja käivitamiseks kasutada maagaasi. Erinevalt eelmisest päikeseelektri jaamast, kus peale ehitust selgus, et jaam osutus efektiivsemaks, kui teoorias, on USA-sse ehitatud Ivanpahi jaamaga juhtunud vastupidi.

Tabel 4.6. Päikeseelektri jaama Ivanpah andmed

CSP jaam	Ivanpah – USA Teoreetilised väärtused	Ivanpah - USA Reaalne 2015	Ühik
Pindala	14,16	14,16	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	940	653	GWh
Nimivõimsus	377	377	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	66,38	46,12	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	2300	2300	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	2,89	2,01	%
Projekti maksumus	2,2	2,2	mld \$
Hind vati kohta	5,84	5,84	\$/W
Mahtuvusfaktor	28,5	19,8	%



Algselt planeeritud 940 GWh aastase tootlikkuse asemel oli 2015. aasta toodang 653 GWh (Tabel 4.6.) (50). Vaatame ka selle jaama puhul nii teoreetilisele kui praktilisele toodangule vastavaid näitajaid. Elektri jaama pindalaks on 14,16 km<sup>2</sup> ning sellel asub kolmest osast koosnev jaam nimivõimsusega 377 MW. 2,2 miljardi dollari suuruse maksumuse juures teeb see 5,84 dollarit ühevattise võimsuse paigaldamise kohta. Päikesel on antud piirkonnas pakkuda palju, ehk 2300 kWh/m<sup>2</sup> kohta. Kuid reaalselt suudab see päikeseelektri jaam ruutmeetri pealt kätte saada teoorias 66,38 kWh ja praktiliselt suutis 2015. aastal vaid 46,12 kWh/m<sup>2</sup> kohta. Kasutegurid on vastavalt 2,89% ja 2,01%. Suur erinevus on ka mahtuvusfaktoris, mis teoorias oleks pidanud olema 28,5%, kuid praktikas saadi kätte 19,8%. Meedias pole täpsemalt räägitud, mis on läinud viltu ja spekulieritakse palju ka selle üle, et võibolla tuleks Ivanpah sulgeda. Võrreldes teiste CSP elektri jaamadega võib olla sellel jaamal nii kehv tulemus ka seepärast, et siin ei ole kasutatud sulasoola mahuteid, et toota elektrit ka siis, kui päike on loojunud. (49, 50, 51)

#### **4.4. Solar Roadways elekter**

Solar Roadways (SR) tehnoloogia kohta on väga vähe konkreetseid andmeid ja arvutused, mida siin vaatame, põhinevad tootja enda kodulehel esitatud katsetulemustel. Katseid tehti poole aasta jooksul Põhja-Ameerikas, Idaho osariigis, kus kahjuks päike pakub vaid 1602 kWh/m<sup>2</sup> kohta (45). Saadud tulemuste järgi saame välja arvutada, et kui kaherealine tee ühe miili ulatuses ära katta paneelidega, suudetaks aastaga toota 302,5 MWh elektrit. Toodangu puhul on juba arvestatud ka tee valgustamiseks maksimaalselt kuluv elekter, kuid pole maha võetud energiat, mis kuluks talvel teepinnalt jää sulatamise jaoks. Sellise tee pindala on 5884 m<sup>2</sup> (Tabel 4.7.) ning nii vähe arendatud tehnoloogia kohta on väga hea näha, et antud piirkonnas 51,41 kWh/m<sup>2</sup> kohta aastas tootvad paneelid on kasuteguriga 3,2%. Arvutuste kohaselt oleks selliste mõõtmetega ala nimivõimsuseks 0,086 MW. Oluline on teada, et võrreldes antud tehnoloogia tutvustuses (3. pt) mainitud 117W võimsusega ruutmeetri kohta, on siin arvutustes arvestatud 78 W võimsusega, sest 48 vattise SR3 paneeli asemel kasutati katseid tehes 36 vattist SR2 paneeli.

Tabel 4.7. SolarRoadways katsetuste andmed

SolarRoadways	Katsed – USA – Idaho	Ühik
Pindala	0,00588	km <sup>2</sup>
Aastane toodang	0,3025	GWh
Nimivõimsus	0,08639	MW
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	51,41	kWh/m <sup>2</sup>
Päikest aastas	1602	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	3,2	%
Projekti maksumus	4,4	mln \$
Hind vati kohta	50,94	\$/W
Mahtuvusfaktor	40	%

Vaadates tehnoloogiat, tundub kõik ideaalne, kuni vaadata hinda. Paneelide maksumust ei ole tahtnud tootja avaldada, kuid mitmes kohas on spekulieritud hinna üle ja on tulnud välja, et tootja pakkus aastal 2010 ühe 12x12 jala suuruse paneeli hinnaks 10 000 dollarit. Kuna pole uuemat infot hindade kohta, peame sellel tuginema ning antud hinna järgi maksaks näidiseks võetud pindala ehitamine 4,4 miljonit dollarit. Kahjuks aga selle hinna juures näitavad arvutused, et ühevattise nimivõimsuse paigaldamine läheb maksma umbes 51 dollarit. Mahtuvusteguriks on nende katsetulemuste alusel arvatades 40%, kuid kuna tehtud on vaid mõned lühikesed katsed, siis võib selle usaldusväärsuses kahelda. (30, 53)

#### 4.5. Elektri jaamade kokkuvõte

Võttes kokku kõikide analüüsitud elektri jaamade andmed, saame võrrelda nende andmeid ja teha ka sisulisi järeldusi seoses andmete erinevusega. Eelnevalt vaadatud elektri jaamadest kahe puhul olid välja toodud teoreetiliste ja praktiliste andmete erinevus ja siin tabelis on mõlema jaama puhul pandud need tulemused, mis realselt on olnud. Põhiliselt võrdleme hetkel omavahel PV ja CSP elektri jaamu (Tabel 4.8.).

Tabel 4.8. Eelnevalt analüüsitud päikeseelektrijaamade koontabel

Sulasool (aeg)	Mahtuvusf aktor	Hind vati kohta	Kasutegur	Päikest aastas	Toodang aastas per m <sup>2</sup>	Toodang aastas	Nimivõ imsus	Pindala	Jaam
0	27	3,63	2,32	2244	52	1300	550	25	Topaz (PV)
0	18,1	2,5	3,09	1821	56,24	317,2	200	5,64	Hunaghe (PV)
3-8	32,3	5,15	3,97	1971	78,19	1470	580	18,8	Quarazate (CSP)
7,5	40	5,4	3,93	1935	76,09	350	100	4,6	Valle (CSP)
7,5	40	7,6	4,39	1993	87,5	175	50	2	Andasol (CSP)
0	19,8	5,84	2,01	2300	46,12	653	377	14,16	Ivanpah (CSP)
0	40	51	3,2	1602	51,41	0,303	0,0864	0,00588	SR
h	%	\$/W	%	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	GWh	MW	km <sup>2</sup>	ühik

Vaadates näitajaid seoses päikeseenergia salvestamise suutlikkusega, on näha CSP jaamadel selget eelist. Põhjus on tegelikult üsna lihtne. Kuna PV paneelid toodavad rangelt elektrit vaid sellel ajal, kui on valge, siis kõik CSP jaamad peale Ivanpahi, teevad seda ka sulasoola salvestusmeetodi abil öösiti. Sellest selgub, et sulasoola kasutamise tehnoloogia, mis on võimalik tehnoloogiliselt vaid CSP jaamades, annab juurde ruutmeetri peale aasta jooksul toodetud elektrile ja seeläbi suurendab ka kasutegurit. Nagu näeme, siis PV elektrijaamade kasutegur on 2-3% vahel, siis sulasoola reservuaaridega varustatud CSP paneelide kasutegur küündib 4,5%-ni sõltuvalt jaamast. Samal põhjusel on ka väga erinevad mahtuvusfaktorid, mis väljendavad, et kui palju suudeti perioodis toota elektrit võrreldes sellega, kui elektrijaam oleks samal perioodil kogu aeg täisvõimsusel töötanud. Ja siit tulebki välja, miks see pealtnäha ebaoluline näitaja osutub väga määravaks. Kui võrrelda omavahel Huanghe ja Valle elektrijaama, siis näeme, et mahtuvusfaktor on Valle's veidi üle kahe korra suurem. Ja kui samal ajal võrdleme ka nimivõimsust ja aastast toodangut, siis näeme, et Valle elektrijaam suudab kaks korda väiksema nimivõimsusega toota 10% rohkem elektrit, kui Huanghe oma. Sellest saab järeldada, et kui võrrelda sama võimsusega CSP ja PV elektrijaamu, on CSP jaam oluliselt suurema tootlikkusega.

Peale sulasoolast tingitud kasuteguri erinevusi, mis panevad tugevalt pooldama CSP tehnoloogiaga päikeseelektrijaamu, tuleb vaadata ka jaamade ehitamise hinda. Koondtabelisse ei ole pandud projektide kogumaksumusi, kuna pigem on võrdluseks hea vaadata mitu dollarit oli jaama paigalduse hind ühe vati kohta. Tabelist on selgelt näha, et keskmiselt on PV elektrijaamade paigaldamise hind nimivõimsuse kohta ligi kaks korda odavam, kuid nagu eelmises lõigus nägime, võib ka teiselt poolt sama nimivõimsusega jaamade tootlikkuse vahe olla kuni kahekordne ja see tasandab hinnast tuleneva erinevuse. Oluline on ka mõista, et siin välja arvatud hindade võrdlemine ei pruugi olla kõige otstarbekam, kuna jaamad on ehitatud erinevatel aastatel ja viimasel kümnendil on nii PV kui ka CSP päikeseelektrijaamade ehitamise hinnad iga aasta väga tugevalt langenud.

Eraldi vaatame veel siin tabelis ka SolarRoadways tehnoloogia näitajaid võrreldes teistega. Suuremasse võrdlusesse teistega ei kaasanud seda, kuna tehnoloogiat on katsetatud väga vähest

aeaga. Olemasolevatest andmetest saame aga järeldada, et tegemist on täiesti konkurentsivõimelise kasuteguriga, kuid hetkel teada olevate hindade juures on see veel täiesti otstarbetu lahendus. Samas on oluline ka hinda võrrelda vastavate näitajatega. Vaadates 40 aastat tagasi, olid PV paneelide hinnad 76 dollarit paigaldatud vati kohta, mis on isegi kallim, kui 51 dollarit vati kohta maksev uus SR tehnoloogia, mis pole veel otseselt tootmisesse läinud. (53)

## 5. PÄIKESEENERGIA KASUTAMISE VÕIMALUSED ELEKTRI TOOTMISEKS EESTIS

### 5.1. Elektri tootmine ja tarbimine Eestis

Eelnevatest tehnoloogiatest ja andmetest lähtuvalt vaatame ka Eesti energia tootmisesse. Aastal 2014 tarbiti Eestis 32260 GWh energiat, millest omakorda elektrienergiat 6910 GWh ja kuna antud töö on keskendunud just sellele, et kuidas toota päikese kiirgusest elektrit, ei hakka autor siin muid energialiike vaatlema. Huvitav on see, et elektrit toodeti Eestis 2014. aastal 12282 GWh, ehk üsna suur hulk toodangust eksporditi. Kui vaadata, mis allikatest Eesti elektrit tootis, siis sellest 88,2%, ehk 10823 GWh toodetakse põlevkivist, põlevkiviõlist ja uttegaasist. Taastuvenergiaallikatest saadakse 5,33%, ehk 655 GWh, kusjuures 4,92% tuleb tuuleenergiast. (54, 55, 56)

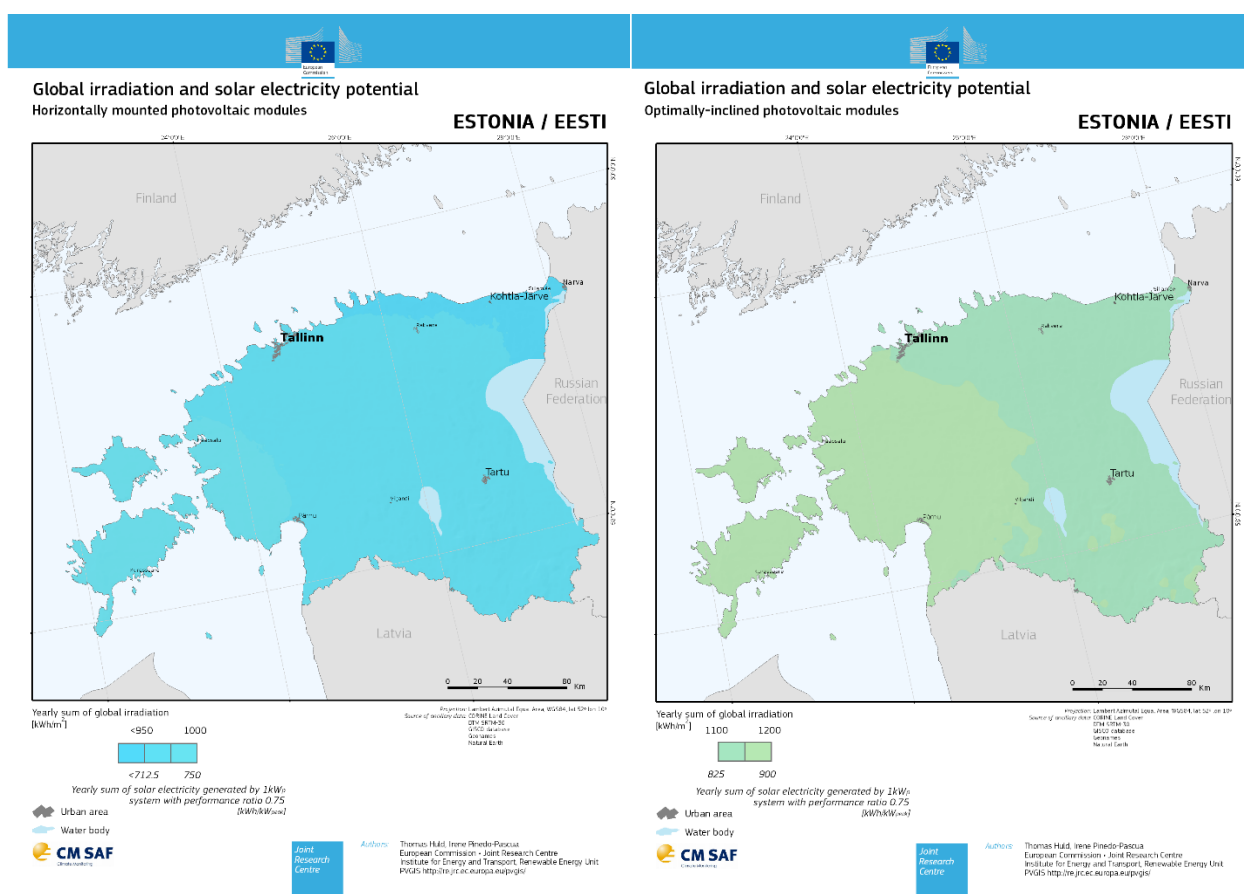
Tabel 5.1. Eesti elektrienergia tootmise jagunemine energiaallikate järgi

Põlevkivi	10246	83,42%
Turvas	53	0,43%
Puit	687	5,59%
Põlevkiviõli	43	0,35%
Maagaas	64	0,52%
Uttegaas	534	4,35%
Hüdro	27	0,22%
Tuule	604	4,92%
Muud taastuvad allikad	24	0,20%

### 5.2. Päikese kiirgus Eestis

Neid andmeid teades keskendutakse sellele, kuidas toota päikesest elektrit Eestis. Kui päikeseenergia tootmise suuremateks eesmärkideks on olla sõltumatu taastumatutest energiaallikatest ja vähendada kütuste põletamisest tulenevate kasvuhooonegaaside hulka, siis ei hakka me teoorias taastuvenergia allikaid välistama. Suhteliselt hästi on taastuv ka puit, kuid

põlemisproduktid siiski on. Arvutustes vaatame, kuidas oleks võimalik 2014. aasta näitel tarbitud 6910 GWh katta ära päikeseenergiaga, kusjuures juba 655 GWh on kaetud taastuvenergiaallikatega, ehk alles jääb 6225 GWh. Arvestades ka võrgukadusid, mis aastal 2014 olid suuruses 6,8%, saame vajalikuks toodetavaks energiahulgaks 6679 GWh aastas. Enne arvutusi tuleks vaadata, mis eeldused on Eesti geograafilisel asukohal päikese suhtes. Selleks on väga hea kasutada jooniseid, mis annavad aimu, kui suurt hulka energiat päikesekiirgus Eestis pakub. Antud on kaks joonist, millest esimene näitab, kui palju ruutmeetri kohta annab päike kWh aastas ja teine joonis näitab, kui palju ruutmeetri kohta kWh aastas annaks päike, kui paneelid suunata õige nurga alla päikese suhtes (Joonis 5.1.) (57).



Joonis 5.1. Eestis saadaolev päikeseenergia paneelide horisontaalselt paigaldamisel ja soodsaima kaldenurgaga paigaldamisel (kWh/m<sup>2</sup>) (58)

Siit näeme, et aastas jääb Eestis ruutmeetritele langeva päikeseenergia hulk enamasti 950-1000 kWh vahele. Samas tasub tähele panna, et kui paneelid paigutada õigesti, siis saab kätte isegi 1100-1200 kWh. Kasutame arvutustes väärtust 1100, ehk arvestame minimaalset kättesaadavat päikesekiirgust paneelide õige paigutuse puhul.

### **5.3. Päikeseelektrijaamade sobivus Eestile**

Eelmistes peatükkides käsitletud kolme tehnoloogia hulgast valides on kõige mõistlikum ainuvalikuliselt panustada PV paneelide peale. CSP elektrijaamade efektiivseks tootluseks jääb Eestis päikesest väga väheks. Kuna neid ei ole veel paigaldatud vähese päikesekiirgusega aladele, ei saa kindlalt öelda, et Eestis olevast päikesekiirgusest on küllalt, et saavutada soojusjuhisis piisavat temperatuuri turbiinis elektrit tootva auru jaoks. CSP tehnoloogia toimib vaid otsese päikesekiirguse juures, kuid PV paneelid suudavad toota ka pilvise ilmaga ning Eesti kiirguse juures ei annaks ka sulasoola abil energia salvestamise meetod palju juurde. Kolmas tehnoloogia oli ka SolarRoadways, mille sobivus Eestile on üpris reaalne, kuid vähene informatsioon hinna osas teeb arvutuste tegemise otstarbetuks.

Teades Eesti elektrienergia vajadusest seda osa, mis ei ole taastuenergiaga põhinev, aastas ruutmeetritele langevat päikeseenergia hulka ning eelmistes peatükkides välja toodud arvutuste tulemusi, saame välja arvutada, et kui suure pindala jagu tuleks Eestisse päikesepaneelide panna, et ära katta elektrienergiavajadus. Kasuteguri arvestamise puhul ei arvestata arvutustes päikesepaneelide kasutegurit, vaid nagu eelnev järeldus oli, päikeseelektrijaamade kasutegurit, mis väljendab, kui palju elektrienergiat pindalaühikult saadi kätte sellest, mis päike potentsiaalselt pakub. Kahe PV päikeseelektrijaama kasutegurit vaadates võtame järelduseks 3%, sest tegelikult Eestis olev madalam temperatuur tõstab päikesepaneelide kasutegurit ja võime loota natuke rohkem, kui eelneva statistika minimaalseim väärtus. Siit saamegi, et PV päikeseelektrijaama üks ruutmeeter suudab aastas salvestada 33 kWh elektrienergiat. Ja selliste näitajatega oleks vaja Eestimaa pindalast ära katta 202,4 km<sup>2</sup>. See on vaid veidi suurem kui Tallinna pindala ja moodustab Eesti pindalast 0,446%. Arvestades andmeid 1kW paneeli tootlikkust keskmiselt 900 kWh aastas,



saame teada, et paigaldada tuleks selleks 7421 MW jagu paneele (7). Arvestame hetkehinnaks 1,5 eurot vati paigaldamise kohta, sest maailma keskmine hetkel on umbes 1,5 dollarit vati paigaldamise kohta ja hinnad on veelgi langemas. Antud hinnaga tuleks Eestis teha veidi üle 11 miljardi suurune investeering. See on 1,5 korda rohkem kui 2014. aasta Eesti riigieelarve.

Samas tasub ka mõista, et kogu elektrienergia tootmise puhul ei oleks otstarbekas loota nii suure osakaalus päikeseenergiale, sest olgugi et arvutuslikult kataksime selle järgi aastase elektrienergia vajaduse ära, siis hooajaliselt ei oleks tootmine kaugeltki kooskõlas. Talvel, kui on tarbimine suurim, on paneelide tootlikkus väikseim ja vastupidi on suvega ning kuna pikaajaliselt efektiivselt elektrit hoidvaid salvestusmeetodeid pole, siis pole ka sellele mingit ideaalset lahendust.

Tabel 5.2. Eesti elektrienergia tootmine päikeseenergiaga

	100% katmisel	25% katmisel	Ühik
Vajalik toodang	6680	1670	GWh
Päikesekiirguse hulk	1100	1100	kWh/m <sup>2</sup>
Kasutegur	3	3	%
Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	33	33	kWh/m <sup>2</sup> aastas
Vajalik kaetud pindala	202,4	50,6	km <sup>2</sup>
Osakaal riigi pindalast	0,446	0,111	%
1 kW paneel toodab	900	900	kWh/aastas
Paigaldatav võimsus	7421	1855	MW
Hind vati kohta	1,5	1,5	€/W
Maksumus	11,132	2,783	miljardit eurot

Seega oleks mõistlik esialgu vaadata, kuidas jõuda näiteks 25%-se sõltuvuseni (Tabel 5.2.) päikeseenergiast, ehk et kuidas sellest vajalikust elektrienergiast, mida veel ei toodeta taastuenergiaallikatest, toota 25% päikesepaneelide abil. See annaks võimaluse suvisel ajal enamuse vajadusest toota paneelidega ja talvel kasutada põlevkivi jms. Sellisel juhul tuleks katta paneelidega 50,6 km<sup>2</sup> suurune maa-ala, mis moodustab 0,104% Eestimaa pindalast. Paigaldada

oleks vaja 1855 MW jagu päikesepaneele, mis läheks maksma samade andmete järgi 2,783 miljardit eurot, mis on juba palju reaalsem ja 20 aasta peale ära jaotatult nõuaks aastas 140 miljoni euro suurust investeeringut. Võrreldes päikeseenergiat teise olulise taastuvenergia liigiga, ehk tuuleenergiaga, saame võrrelda investeeringute suurusi. 2015. aasta lõpu seisuga on Eestis paigaldatud 303MW jagu tuuleenergiast elektrit tootvaid jaamu, mis annavad hetkel 5% Eesti aastasest elektritoodangust, mis omakorda on 9% Eesti aastasest elektrienergia vajadusest. Kasutame võrdluseks ka siinkohal kattuvuseks 25%, sest tegelikult on raske välja arvutada, et milline oleks mõistlik osakaal taastuvenergia allikatele. Põhjus selles, et kuna nende elektritootlikkus sõltub ilmast, mis on väga muutlik, võib liialt nendele lootma jäädes saabuda hetk, kus ilm ei ole soodne ja kogu riik on ilma elektrita. Selletõttu on subjektiivselt esialgu 25% sobivaim osakaal, mida võtta. Andmete vähesuse tõttu tuleb arvutada Eesti võimsus keskmiste paigaldamise hindadega ja seeläbi saab oletada, et nende investeeringute suurus, millega kaeti 9% vajadusest, on olnud umbes 500 miljonit eurot. Antud töös teostatud arvutuste tulemusel leiti, et 25% elektrienergia tootmiseks on vaja investeerida ligikaudu 2,8 miljardit eurot. Tuuleenergiaga võrreldes sama protsendi katmiseks oleks vaja investeerida päikeseelektrijaamadesse natuke üle 1 miljardi euro, mis on 2 korda suurem summa. (59, 60)

#### **5.4. Naaberriikide elektrienergia vajadus ja päikeseenergia kasutamise potentsiaal**

Teades näitajaid Eesti kohta, oleks hea ka vaadelda naaberriike, nagu näiteks Soome, Rootsi, Läti ja Leedu. Kui muud konstandid jätta samaks ja muuta arvutuskäigus riigi aastast elektrivajadust ja saadaolevat päikeseenergiat, saame arvutada ka nende riikide jaoks välja vajaliku pindala, osakaalu pindalast, paigaldatava võimsuse ja viimaseks tänapäeva isegi olulisema faktori, mis otsustamisel määrav on, ehk maksumus. Uurides eelpool mainitud riikides saadaolevat päikeseenergiat, siis võrreldes Eestiga oli vahe väga minimaalne. Kui Eestis on saada 1100 kWh/m<sup>2</sup> kohta aastas, siis on need näitajad vastavalt Soomes 1100, Rootsis keskmisel 1000, kuigi Põhja-Rootsis langes 900 peale, Lätis 1100 ja Leedus 1150. Elektri tarbimine on Lätis sarnane Eestile, ehk 6580 GWh, Leedus 9230, Soomes 79 000 ja Rootsis 122 200. Nendele andmetele tuginedes saab teha arvutused (vt tabel 5.3.) (61).

Tabel 5.3. Naaberriikide tarbitava elektrienergia tootmise võimalused päikeseenergiaga

Riik	Päikest aastas kWh/m <sup>2</sup>	Toodang m <sup>2</sup> kohta aastas	Aastane tarbimine GWh	Mitu km <sup>2</sup> vaja katta	% riigi pindalast	Mitu MW paigaldada	Maksumus miljardit eurot
Soome	1100	33	79000	2394	0,708	87 778	131,67
Rootsi	1000	30	122200	4073	0,905	135 778	203,67
Läti	1100	33	6580	199	0,309	7 311	10,97
Leedu	1150	34,5	9230	268	0,41	10 256	15,38
Eesti	1100	33	6680	202,4	0,446	7421	11,13

Antud arvutused on teostatud arvestusega, kui kaetaks kogu riigi aastane elektritarbimine PV paneelidest koosnevate päikeseelektrijaamadega. Reaalsuses on iga riigi elektritootmise jaotus erinev, kuid selles töös detailsemaks enam ei minda, ehk võrreldes Eestiga on siin jäetud arvestamata see osa, mis juba toodetakse taastuenergiaallikatest ja pole ka sisse pandud võrgukadusid. Kuid nagu Eesti näitel näha, siis meile vajalik number oli vähe erinev sellest, mis tuli peale võrgukadude ja juba taastuvatest allikatest tootva energia sisse arvestamisel, sest need suuresti tasandasid üksteist. Sellest järeldub, et andmed on piisavalt usaldusväärsed, et teha esialgseid järeldusi. Tabelist on näha, et riigid on üsna erinevad elektri tarbimiselt ja esineb ka kuni 15% erinevus saadaoleva päikesekiirguse osas, kuid üks hea näitaja, mida jälgida, on mitu % riigi pindalast tuleks täita energiavajaduse täitmiseks päikesepaneelidega, siis Rootsi puhul on see kõige suurem. Põhjus on üsna lihtne – seal on päikese ressursi ruutmeetri kohta kõige vähem. Samas Läti puhul on see näitaja kõige parem. Seal on vaja katta vaid 0,309% riigi pindalast. Eestile kõige sarnasemate näitajatena on Läti, kus aastane tarbimine on peaaegu sama ning ka päikese poolt pakutav aastane ressurss pindalaühiku kohta klapib. Sellest saamegi, et vajatav pindala, paigaldatav võimsus ja ka maksumus on peaaegu samad. Ainus erinevus on protsent riigi pindalast, kuid erinevus tuleb sellest, et Läti pindala on peaaegu 1,5 korda suurem Eesti omast. Üldiselt veel vaadates maksumusi, siis on need ilmselgelt nii suured summad, et hetkel ei tasuks need ennast ära, kui nagu Eesti näitel vaatasime, siis 25% vajaduse katmine on paarikümne aastaga päris reaalne samm taastuenergiaallikatest sõltuvaks üleminekuks.

## KOKKUVÕTE

Päikeseenergia on tohutult suure potentsiaaliga saadav energia, mida inimkonnal on peaaegu piiramatult. Selleks, et saada kätte inimkonna aastane energiavajadus, tuleks tegelikult saada kätte 0,17% maakera pindalale langev päikeseenergia. Loodud on mitmeid tehnoloogiaid selle tegemiseks ja seda antud töö ka käsitles. PV paneelid on head otse päikeseenergiast elektri tootmiseks, on vaiksed ja ei vaja suuremaid lisaseadmeid. Selle tõttu on see ka olnud viimastel kümnenditel väga populaarne ja nende kasutus on kasvanud eksponentsiaalselt.

PV paneelide puuduseks on see, et elektrit toodetakse vaid päeval ja kui vaadata töös käsitletud teist päikesest elektri tootmise meetodit, milleks on päikesekollektorid, siis seal on võimalik tänapäeva tehnoloogia abil juba ka öösel toota elektrit. Päikesekollektorid ei tooda otse päikesekiirgusest elektrit, vaid väikesemahulised annavad meile sooja vett majapidamistesse ja suuremad CSP päikeseelektrijaamad toodavad kõrgete temperatuuride abil läbi auruturbiinide elektrit. Selle tehnoloogia suureks eeliseks on see, et elektrit saab tänu sulasoola mahutitele, kuhu on kogutud päeval salvestatud soojus, mida saab kasutada selle tehnoloogia abil ka öösel. Puuduseks on pigem see, et suure kasuteguriga elektri tootmiseks peab elektrijaam olema üsna suur ja väikse päikesehulgaga laiuskraadidel pole seda veel katsetatud, kuid hüpoteetiliselt langeks nende kasutegur oluliselt seoses väikse päikesehulga ja madala välistemperatuuriga.

Kolmandaks tehnoloogiaks, mida põgusalt uuritud sai, oli SolarRoadways, milleks on asfaldi asemele paigaldatavad päikesepaneelid. Tegemist on väga värske arendusega ja seetõttu on selle kohta andmeid vähe. Sellest hoolimata on idee – kogu asfaldisse neelduv soojus hoopis elektriks pöörata ja sellega energiamajandust rohelisemaks muuta – väga hea. Suureks eeliseks on see, et päikese kätte saamiseks ei pea uut pinda hõivama, vaid kasutatakse juba kasutusel olevaid maa-alasid, ehk teid. Puuduseks on vähesed teadmised ja kogemused ning kõrge maksumus.

Nende kolme uuritud tehnoloogia põhjal vaadeldud päikeseelektrijaamade analüüsist tulid välja erinevad näitajad. Kuna bakalaureusetöö keskendus mitte paneelide ega päikesekollektorite peeglite kasutegurile, vaid eesmärgiks oli uurida, kuidas toota elektrienergiat roheliselt suuremas mastaabis, siis sai kasutegur uue mõiste. Siin töös määratletud kasutegur ei ole paneeli kasutegur, vaid kui palju päikeseenergiat suudeti kätte saada kogu päikeseelektrijaama territooriumilt, mille alla kuulub kõik seal sisalduv. Välja tuli selgelt, et CSP jaamade mahtuvusfaktor ja kasutegur olid kohati ligi 2 korda suuremad kui PV paneelidega varustatud päikeseelektrijaamad. Samuti järeldus, et ühe ja sama nimivõimsusega päikeseelektrijaamade aastane tootlikkus võib üle 2 korra erineda ja seetõttu ongi võrdluses oluline vaadata ka mahtuvusfaktorit. Maksumuse osas ei ole CSP ja PV jaamadel enam väga suurt vahet. See vahe, mis on, kompenseeritakse kasuteguri poolt.

Teades tehnoloogiaid ja olles vaadanud erinevaid juba rajatud päikeseelektrijaamu, oli võimalus uurida ka lahendust Eestile. Teades Eesti aastast elektrivajadust, päikesekiirgust ja pindala, sai välja arvutada, palju Eesti vajaks päikeseelektrijaamadesse investeerimist. Nagu eelnevalt mainitud, tuleb arvestada sellega, et talvel, kus päikest on vähe, on Eesti elektrienergia vajadus oluliselt suurem ning paneelide toodang väike. Samas suvel toodavad paneelid enamuse aastasest toodangust. Kuna pikaajaliselt hea kasuteguriga salvestusmeetodeid pole, tuleb elekter kohe ära kasutada ja selletõttu olekski mõistlik esialgu vaadata, kuidas toota 25% Eesti elektrienergia vajadusest päikesepaneelide abil ja ülejäänud põlevkivi ja muude praegu kasutusel olevate energiaallikate abil. Sellise projekti teostamise maksumus oleks 2,783 miljardit eurot, mis teeks 20 aasta peale jaotatult iga aastaselt 140 miljoni euro suurust investeringut. Katta oleks vaja 50,6 km<sup>2</sup> suurune ala päikeseelektrijaamadega.

Tehnoloogia on küll kallis, aga pikas plaanis edasi vaadates on päikeseenergiale toetumine mõistlik ja keskkonnasõbralik lahendus. Kõik muud maavarad üks hetk saavad otsa, kuid päikesest tulev energia on lõputu ja miks mitte kasutada seda, mis on kogu aeg tasuta ja lõputult saadaval, kui kaevandada seda, mis saab otsa. Suurimaks takistuseks ongi tehnoloogia hinnad, kuid ka need on ajas muutuvad. Konkureerivaks taastuvenergia allikaks on ka tuuleenergia.

## SUMMARY

Solar energy has a big potential covering world's energy needs. To produce Earth's yearly energy consumption we should save all the sun from 0,17% of earth's area. There are many technologies invented and this thesis was concentrated in exploring them.

PV panels are good to produce electricity directly from the sun. They are also quiet and do not need many extra equipment. The price has been falling in the last decades and this is the reason it is so popular. Cons are that PV panels can produce electricity only at day but CSP technology is also capable of producing electricity at night. CSP does not produce electricity directly from the sun, but heats the heat carrier and through the heat exchanger produces hot steam. This will lead to electricity production in steam turbine. Possibility to produce electricity at night comes from molten salt technology which stores the heat into molten salt tanks. Cons about this technology is that to produce electricity with high efficiency it must be very capacious. Also there is no information about efficiency in longitudes where the sun has lower potential.

Third technology explored was Solar Roadways. Very innovative invention that should cover all roads with solar panels. Technology has very big potential, but high price. Lack of knowledge and experience is the cons of this technology but the idea may be reality in the future.

Comparing these three technologies gives some conclusions between them. This thesis was concentrating on not the efficiency of the panels but on the efficiency of the solar power plants. This was the main thing to compare. Very important is to follow capacity factor that describes efficiency mainly. One of the discoveries was that PV and CSP power plants with the same nominal power could produce very different amount of energy. The difference was about 2 times. Acknowledging this is possible to say that actually the price difference is exactly compensated by the capacity factor and efficiency.

Analysing technologies and examples we can discover the possibilities in Estonia. Knowing yearly energy needs, sun's potential and area it is possible to calculate the investments needed to cover some part of Estonias energy needs with solar energy. Mainly is needed to produce electricity in winter but there is not enough sun to produce electricity needed. On the contrary in summer the panels produce more than needed. So it would not be useful to produce with sun more than 25% of yearly energy needs. This project would need investments about 2,8 billion euros. Dividing to 20 years it would be 140 million per year. The area that is needed to cover with solar plants is 50,6 km<sup>2</sup>.

Technology is expensive but looking forward it is reasonable to rely on solar energy. All the other energy sources will end in the future but solar will stay. The biggest cons are the prices but these are in the relegation tendency.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Statistical Review of World Energy.  
<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (14.05.2016)
2. Solar FAQs  
<http://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf> (14.05.2016)
3. Solar Roadways.  
<http://www.solarroadways.com/> (14.05.2016)
4. National Renewable Energy Laboratory. Solar Photovoltaic Technology Basics.  
<http://www.nrel.gov/workingwithus/re-photovoltaics.html> (14.05.2016)
5. US. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy. The History of Solar.  
[https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf) (14.05.2016)
6. Solar Energy Industries Association. Photovoltaic (Solar Electric).  
<http://www.seia.org/policy/solar-technology/photovoltaic-solar-electric> (14.05.2016)
7. Energiatalgud. Päikesepaneel.  
<http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=P%C3%A4ikesepaneel&menu-119>  
(14.05.2016)
8. SolarImpulse.  
<http://www.solarimpulse.com/adventure> (14.05.2016)
9. Elisa. Elisa võtab kasutusele päikesepaneelide energial töötavad mobiilside tugijaamad.  
<https://www.elisa.ee/et/elisast/organisatsioonist/elisa/uudised/1270/elisa-votab-kasutusele-paikesepaneelide-energiat-tootavad-mobiilside-tugijaamad/> (14.05.2016)
10. International Energy Agency. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic energy.  
[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv\\_roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf)  
(14.05.2016)
11. Wikipedia. Growth of Photovoltaics.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics) (14.05.2016)



12. Renewable Energy World. Advantages and disadvantages of Solar Photovoltaic – Quick Pros and Cons of Solar PV.  
<http://www.renewableenergyworld.com/ugc/blogs/2012/12/advantages-and-disadvantages-of-solar-photovoltaic-quick-pros-and-cons-of-solar-pv.html> (14.05.2016)
13. Energiatalgud. Päikesekollektor.  
<http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=P%C3%A4ikesekollektor> (14.05.2016)
14. Wikipedia. Solar Thermal Collector.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_thermal\\_collector](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector) (14.05.2016)
15. Solar Tribune. Evacuated Tube Collectors.  
<http://solartribune.com/evacuated-tube-solar-hot-water/> (14.05.2016)
16. Päikeseenergia.eu. Päikesekollektorid.  
<http://xn--pikeseenergia-bfb.eu/et/content/p%C3%A4ikesekollektorid> (14.05.2016)
17. Power-technology. Noor Ouarzazate Solar Complex, Morocco.  
<http://www.power-technology.com/projects/noor-ouarzazate-solar-complex/> (14.05.2016)
18. Wikipedia. Parabolic trough.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic\\_trough](https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_trough) (14.05.2016)
19. Vikipeedia. Päikesekollektor.  
<https://et.wikipedia.org/wiki/P%C3%A4ikesekollektor> (14.05.2016)
20. Wikipedia. Solar Power Tower.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power\\_tower](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_tower) (14.05.2016)
21. Solar Novus Today. Mirrors and Optics for Solar Energy  
[http://www.solarnovus.com/mirrors-and-optics-for-solar-energy\\_N1733.html](http://www.solarnovus.com/mirrors-and-optics-for-solar-energy_N1733.html)  
(14.05.2016)
22. SolarReserve. Molten salt energy storage.  
<http://www.solarreserve.com/en/technology/molten-salt-energy-storage> (14.05.2016)
23. Sandia. Advantages of using molten salt.  
<http://www.webcitation.org/60AE7heEZ> (14.05.2016)
24. Scientific American. How to use solar energy at night.  
<http://www.scientificamerican.com/article/how-to-use-solar-energy-at-night/> (14.05.2016)
25. Aalborg CSP. History of concentrated Solar Power.  
<http://www.aalborgcsp.com/what-is-csp/history-of-csp/> (14.05.2016)

26. Wikipedia. Concentrated solar power.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power) (14.05.2016)
27. The Guardian. Concentrated solar power could generate „quarter of world’s energy“.  
<http://www.theguardian.com/environment/2009/may/26/solarpower-renewableenergy>  
(14.05.2016)
28. Wind Energy and Electric Vehicle Review. Concentrated Solar Power (CSP) in 2014  
grew 27% to 4.4 GW  
<http://www.evwind.es/2015/06/23/concentrated-solar-power-csp-in-2014-grew-27-to-4-4-gw/52899> (10.05.2016)
29. The SolarRoadways. Solar Roads: Bad Idea?  
<http://thesolarroadways.com/solar-roads-bad-idea/> (14.05.2016)
30. Gigaom. We don’t need solar roadways, we need to help unleash current solar panels.  
<https://gigaom.com/2014/05/29/we-dont-need-solar-roadways-we-need-to-help-unleash-current-solar-panels/> (14.05.2016)
31. Global construction review. France to pave 1,000km of road with solar panels.  
<http://www.globalconstructionreview.com/trends/france-pave-1000km-road-solar-panels/> (14.05.2016)
32. Solar journey USA. Solar vs Gasoline.  
<http://solarjourneyusa.com/solarvsgas.php> (14.05.2016)
33. Tech Insider. Here’s how much of the world would need to be covered in solar panels to  
power earth.  
<http://www.techinsider.io/map-shows-solar-panels-to-power-the-earth-2015-9>  
(14.05.2016)
34. Solar Energy Industries Association. Solar Industry Data.  
<http://www.seia.org/research-resources/solar-industry-data> (14.05.2016)
35. U.S. Energy Information Administration. Electricity Data Browser.  
<http://www.eia.gov/electricity/data/browser/#/plant/57695> (14.05.2016)
36. Sustainable business. \$1 Billion Bond Offering Completed for World's Largest Solar  
Project.  
<http://www.sustainablebusiness.com/index.cfm/go/news.display/id/25018> (14.05.2016)

37. Solar Reviews. Topaz Solar Farm, World's Largest Solar Farm, Now Fully Operational.  
[http://www.solarreviews.com/news/topaz\\_solar\\_farm\\_worlds\\_largest\\_now\\_online\\_112714/](http://www.solarreviews.com/news/topaz_solar_farm_worlds_largest_now_online_112714/) (14.05.2016)
38. Wikipedia. Topaz Solar Farm.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Topaz\\_Solar\\_Farm](https://en.wikipedia.org/wiki/Topaz_Solar_Farm) (14.05.2016)
39. Power Technology. The world's biggest solar power plants,  
<http://www.power-technology.com/features/feature-largest-solar-power-plants-in-the-world/> (14.05.2016)
40. Wikipedia. Huanghe Golmud Solar Park.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Huanghe\\_Hydropower\\_Golmud\\_Solar\\_Park](https://en.wikipedia.org/wiki/Huanghe_Hydropower_Golmud_Solar_Park) (14.05.2016)
41. The National Business. Morocco sets target for 50 per cent renewable energy by 2030.  
<http://www.thenational.ae/business/energy/morocco-sets-target-for-50-per-cent-renewable-energy-by-2030> (14.05.2016)
42. The World Bank. MA - Noor Ouarzazate Concentrated Solar Power Project.  
<http://www.worldbank.org/projects/P131256?lang=en> (14.05.2016)
43. National Renewable Energy Laboratory. Concentrating Solar Power Projects in Morocco.  
[http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by\\_country\\_detail.cfm/country=MA](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_country_detail.cfm/country=MA) (14.05.2016)
44. National Renewable Energy Laboratory. Concentrating Solar Power Projects in Spain.  
[http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by\\_country\\_detail.cfm/country=ES](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_country_detail.cfm/country=ES) (14.05.2016)
45. PVWatts Calculator.  
<http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php> (14.05.2016)
46. Wikipedia. Andasol Solar Power Station.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Andasol\\_Solar\\_Power\\_Station](https://en.wikipedia.org/wiki/Andasol_Solar_Power_Station) (14.05.2016)
47. Power Technology. Andasol Solar Power Station, Spain.  
<http://www.power-technology.com/projects/andasolsolarpower/> (14.05.2016)
48. National Renewable Energy Laboratory. Concentrating Solar Power Projects in Spain.  
[http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by\\_country\\_detail.cfm/country=ES](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_country_detail.cfm/country=ES) (14.05.2016)
49. National Renewable Energy Laboratory. Ivanpah Solar Electric Generating System.  
[http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=62](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=62) (14.05.2016)
50. U.S. Energy Information Administration. Electricity Data Browser.  
<http://www.eia.gov/electricity/data/browser/#/plant/57074?freq=A&ctype=linechart&ltyp>

- e=pin&pin=ELEC.GEN.SUN-US-  
99.A&maptype=0&linechart=ELEC.PLANT.GEN.57074-ALL-  
ALL.A&columnchart=ELEC.PLANT.GEN.57074-ALL-ALL.A (14.05.2016)
51. Energy.gov. Ivanpah. <http://energy.gov/lpo/ivanpah> (14.05.2016)
52. SolarRoadways. Research and Findings.  
<http://solarroadways.com/Research/Research> (14.05.2016)
53. Clean Technica. 13 charts on solar panel cost & growth trends.  
<http://cleantechnica.com/2014/09/04/solar-panel-cost-trends-10-charts/> (14.05.2016)
54. Eesti Statistika. Aastastatistika.  
[http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Majandus/02Energeetika/02Energia\\_tarbimine\\_ja\\_tootmine/01Aastastatistika/01Aastastatistika.asp](http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Majandus/02Energeetika/02Energia_tarbimine_ja_tootmine/01Aastastatistika/01Aastastatistika.asp) (14.05.2016)
55. Energiatalgud. Energiatarbimine.  
[http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Energiatarbimine#cite\\_note-KE024-18](http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Energiatarbimine#cite_note-KE024-18)  
(14.05.2016)
56. Eesti Statistika. Elektrienergia bilanss, aasta.  
<https://www.stat.ee/34170> (14.05.2016)
57. Energiatalgud. Võrgukaod: elekter.  
[http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=V%C3%B5rgukaod:\\_elekter](http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=V%C3%B5rgukaod:_elekter) (14.05.2016)
58. Joint Research Centre. Solar radiation and photovoltaic electricity potential country and regional maps for Europe  
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eur.htm> (14.05.2016)
59. Tuuleenergia assotsiatsioon. Tuuleenergia Eestis.  
<http://www.tuuleenergia.ee/about/statistika/> (14.05.2016)
60. Energiatalgud. Taastuvenergiatehnoloogiate maksumused.  
[http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Taastuvenergiatehnoloogiate\\_maksumused](http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Taastuvenergiatehnoloogiate_maksumused)  
(14.05.2016)
61. Eurostat.  
[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity\\_production,\\_consumption\\_and\\_market\\_overview](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_production,_consumption_and_market_overview)  
(14.05.2016)

62. Digital Trends. Morocco building the largest solar power plant the world has ever seen.  
<http://www.digitaltrends.com/cool-tech/worlds-largest-solar-power-plant-ouarzazate-morocco/#:lSt7BRQzPRsC4A> (2.06.2016)