



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

**PÄIKESEELEMENTIGA INTEGRERITUD
SILLUTISKIVID**

SOLAR PANEL INTEGRATED PAVEMENT

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kristjan Ostov

Üliõpilaskood: 134807KAOB

Juhendaja: Andres Krumme

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2017

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Sisukord

Kasutatud lühendid	5
Jooniste loetelu	6
Sissejuhatus	7
1 Päikeseelement	8
1.1 Tööpõhimõte.....	8
1.2 Tähtsamad sündmused päikeseelemendi arenguloos	9
2 Päikeseelemendiga integreeritud tee	12
2.1 Kasutusel olevad lahendused.....	12
2.1.1 SolaRoad.....	12
2.1.2 Wattway.....	13
2.1.3 Solar Roadways	14
2.1.4 Solmove.....	15
2.2 Planeeritud struktuur päikeseelemendiga integreeritud kergliiklustee sillutisele	16
2.2.1 Fotogalvaanilise elemendi maksumus	16
2.2.2 Teekatte tootmise kulukus	16
2.2.3 Paigaldamise kulu.....	17
2.2.4 Katte kestvus	17
2.2.5 Fotogalvaanilist katva kihi materjali maksumus	17
3 Pealiskiht päikeseelemendiga sillutiskivile	19
3.1 Vajalikud omadused	19
3.1.1 Optilised omadused	19
3.1.2 Tekstuur	19
3.1.3 Tugevus	20
3.2 Sobilikud materjalid	20
4 Katsekehad optilisteks mõõtmisteks ning survetugevuse mõõtmiseks	21
4.1 Ettevalmistus	21
4.2 Valmistamine.....	22
4.3 Survetugevuse mõõtmine	23
4.3.1 Metoodika.....	23
4.3.2 Tulemused	24
4.4 Optiliste omaduste mõõtmine.....	27

4.4.1 Tulemused	27
5 Päikeseelementi sisaldavad prototüübid	29
6 Kokkuvõte	32
7 Abstract.....	33
8 Kasutatud allikate nimekiri.....	34
LISA 1. Optilise läbilaskvuse katsete tulemused	37

Kasutatud lühendid

- EPO-vaik kahekomponendiline epoksiidvaik, kus kõvendit 37 g 100 g vaigu kohta.
- PES-vaik kahekomponendiline polüestervaik, kus kõvendit 0,5 g, 1 g või 1,5 g 100 g vaigu kohta.
- PU-vaik neljakomponendiline poliüurea vaik, kus kõvendit BH (hard) 33 g ja kõvendit BE (elastic) 70 g 100 g vaigu kohta, mis koosneb 1:1 suhtes kahest vaigust AF (fast) ja AS (slow) (edaspidi PU-vaik)

Jooniste loetelu

Joonis 1. Pn-siire. Autori joonis.	9
Joonis 2. SolaRoad paneeli struktuur. Autori joonis.	13
Joonis 3. Wattway mooduli struktuur. Autori joonis.	14
Joonis 4. Solar Roadways mooduli struktuur. Autori joonis.	15
Joonis 5. Solmove rulli struktuur. Autori joonis.	15
Joonis 6. 3D-prinditud šabloonid	21
Joonis 7. Silikoon vorm 2 cm x 2 cm katsekehade valmistamiseks	22
Joonis 8. Survekatse aparatuur ja katsekeha asetus	23
Joonis 9. Suurim mõõdetud surve erinevatele katsekehadele.....	24
Joonis 10. Elastusmoodul erinevatele katsekehadele.....	26
Joonis 11. PU-vaigust katsekeha kõrgusega 2 cm vahetult pärast survekatset ning 10 minutit pärast katset.....	27
Joonis 12. EPO-vaigu ja PES-vaigu põhiste katsekehade kõrgusega 1 cm optilise läbilaskvuse võrdlus	28
Joonis 13. 2 cm x 2 cm päikeselemente sisaldavad prototüübid erinevate vaikudega .	30
Joonis 14. EPO-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 1 cm optilise läbilaskvuse katsetele	37
Joonis 15. EPO-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 2 cm optilise läbilaskvuse katsetele	37
Joonis 16 EPO-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 3 cm optilise läbilaskvuse katsetele	38
Joonis 17. PES-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 1 cm optilise läbilaskvuse katsetele	38
Joonis 18. PES-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 2 cm optilise läbilaskvuse katsetele	39
Joonis 19. PES-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 3 cm optilise läbilaskvuse katsetele	39

Sissejuhatus

Kaasaegse maailma üheks suurimaiks väljakutseks on inimtagajärjelise kliimamuutuse aeglustamine, peatamine ning ümberpööramine. Üle maailma on üheks enimalt kasvuhoonegaase atmosfääri paiskavaks sektoriks energiatootmine. Seetõttu on oluline leida tulevikuks alternatiive traditsioonilistele energiaallikatele nagu seda on kivisüsi, maagaas ning nafta. Üheks selliseks alternatiivseks allikaks on päikeseenergia, mis oma üle 100 aasta pikkuse arengulooga on mitmel pool maailmas muutunud ka majanduslikult eelistatumaiks energiaallikaks.

Päikeseenergiat on võimalik kasutada nii päikese-soojuselektrijaamades kui ka kasutades ära erinevate materjalide fotogalvaanilist efekti. Viimase efektiivsuse arenguga kaasneb ka laialdasem võimalused selle kasutamiseks. Üks selliseid võimalusi on kasutada fotogalvaanilisi elemente teede osana. Tegemist on väga perspektiivika väljavaatega, sest potentsiaalne pindala, mida oleks võimalik katta energiatootlike lahendustega on väga suur võrreldes majakatustega, mis on hetkel enimlevinud päikeseelementide kasutusvaldkond.

Käesoleva töö eesmärk on anda esmalt teoreetiline ülevaade, millised lahendused on üle maailma kasutusel, kus päikeseelement on integreeritud teega. Teiseks pakutakse välja omanäoline lahendus sellise tee valmistamiseks ning testitakse selle sobilikkust.

1 Päikeseelement

1.1 Tööpõhimõte

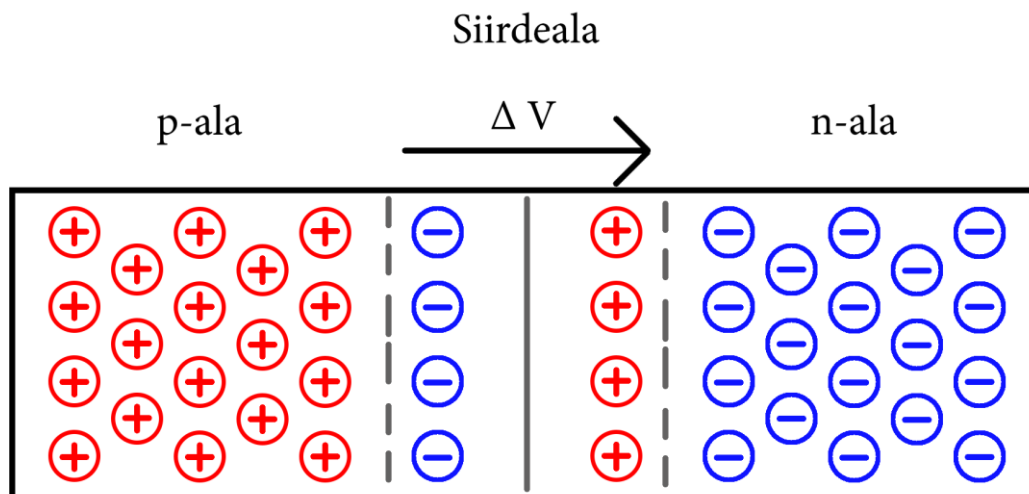
Päikeseelemendis ehk fotogalvaanilises elemendis tekitab valgus elektrivoolu. Enim kasutatud pooljuhtmaterjal päikeseelementides on räni. Footoni langemisel ränile (või mõnele muule fotogalvaanilisele materjalile) võib footon läbida materjali, peegelduda selle pinnalt või juhul kui footoni energia ületab materjalis oleva keelutsooni energia, siis footoni energia neeldub materjali ning see loob materjalis uusi laengukandjaid. Energia, mis ei kulu keelutsooni ületamiseks, muutub soojusenergiaks, mitte elektrienergiaks.

Footoni neeldumisel antakse selle energia elektronile kristallvõres. Tavaliselt on see elektron valentstsoonis ning on osa mõnest kovalentsest sidemest. Olles osa kovalentsest sidemest on elektroni liikumine väga raske. Footonilt saadud energiaga elektron ergastub ning liigub valentstsoonist juhtivustsooni, kus elektron saab vabalt liikuda pooljuhi kristallvõre piires. Kovalentne side, kust elektron pärit on, on selle tulemusel auguga. Augu täidab kõrval olevast kovalentsest sidemest pärit elektron jättes maha uue augu. Tekivad elektron-auk paarid [35].

Räni, kus ülekaalus on elektronid, nimetatakse n-tüüpi räniks. Räni, kus ülekaalus on augud, nimetatakse p-tüüpi räniks. Räni legerimisel saab määrata räni tüübi. Doonorlisandina, mis suurendab juhtivuselektronide arvu pooljuhis, kasutatakse kõige enam räni puhul fosforit. Akseptorlisandina, mis suurendab aukude arvu pooljuhis, kasutatakse kõige enam räni puhul boori. Levinuim päikeseelemendi struktuur seisneb doonorlisandi difundeerimises akseptorlisandiga ränisse või vastupidi. Lihtsustusena võib sellest mõelda kui suure pindalaga p-tüüpi räni alalt, mis on kontaktis suure pindala n-tüüpi räniga ning mille vahel tekib pn-siirdeala [35].

Pn-siirdeala läheduses olevad juhtivuselektronid n-alalt ja augud p-alalt liiguvad üksteise suunas ning juhtivuselektronid täidavad augud. See kestab kuni siirdeala piirkond on piisavalt suur, et vahemaa eri laengukandjate vahel on liiga suur, et külgetõmbejõud seda ületaks. Nende laengute tõttu tekib p-ala ja n-ala vahele elektriväli. Tekkinud elektriväli töötab vastu eelmainitud mehhanismile, lükates juhtivuselektrone tagasi n-alasse ning auke tagasi p-alasse. Kirjeldatud voolu nimetatakse fotogalvaaniliseks efektiks. Valguse neeldumine ning seeläbi uute elektron-auk paaride tekkimine töötab elektrivälja põhjustatud voolu kasuks. Kahe vastassuunalise voolu mõjul tekib dünaamiline tasakaal,

mis määrab siirdeala ümbritseva regiooni suuruse ja laengukandjate kontsentratsiooni (Joonis 1) [35].



Joonis 1. Pn-siire. Autori joonis.

Ühendades pn-siirde vooluringi allikana saavad juhtivuselektronid, mis on tekkinud n-alal või p-alal ja elektrivälja poolt liigutatud n-alale, liikuda läbi juhtmete läbi takistite ning täita augu, mis on tekkinud p-alal või n-alal ja elektrivälja poolt liigutatud p-alale, ning tekib alalisvool, mille voolutugevus oleneb pn-siirde ala suurusest [35].

Fotogalvaaniliste elementide efektiivsust määratletakse langenud valguse intensiivsuse ja tekkinud elektrienergia suhtena. Teoreetiline piir ühe pn-siirdealaga fotogalvaaniliste elementide efektiivsusele on 33,16%, kuid suurendades pn-siirdealade arvu lõpmatuseni on piir 68,7% [21, 22, 35].

1.2 Tähtsamad sündmused päikeseelemendi arenguloos

Esimene ülesmärke fotogalvaanilise efekti kohta on prantsuse füüsikult Edmund Becquerel'ilt aastal 1839. Becquerel valmistas elemendi kahest erinevast materjalist. Hõbekloriid, mis oli asetatud happelisesse lahusesse, oli ühenduses platinast elektrodidega. Valguse langedes hõbekloriidile tekkis vool ja pinge. Seda võib lugeda esimeseks fotogalvaaniliseks elemendiks [1].

1873. aastal täheldas inglise insener Willoughby Smith fotojuhtivust seleenis. Seleenist valmistatud komponendid olid osa vooluringist, mida kasutati veealuste kaablite

kvaliteedi testimiseks vahetult enne nende vee alla laskmist. Kaablite vedamise peainsener Smith valis seleeni, sest tegemist on pooljuhiga, millel on kõrge takistus. Materjal toimis planeeritult öisel ajal, kuid päeval ajal valguse käes vähenes seleeni takistus märgatavalt ning kontrollsüsteem ei toiminud. Smith korraldas katse, kus ta asetaski seleenist komponendid kaanega kasti, et kontrollida valguse mõju takistusele. Kaane sulgemisel, kus kasti sisu jäi pimedusse, toimis seleen ootuspäraselt. Kinnitamaks, et tegu on valguse, mitte temperatuuri mõjuga, kordas Smith katset asetades seleenist komponendid madalasse vette, kus nende temperatuur kõikus väga vähe, kuid kus valgus sai tungida läbi vee. Katse kinnitas, et valgusel on otsene mõju materjali elektrijuhtivusele [2].

1876. aastal, olles kuulnud Smithi avastusest, leidis William Grylls Adams koos oma õpilase Richard Evans Day'ga eksperimenteerides, et seleen, millele langeb päikesevalgus, lisaks takistuse muutumisele, toodab ka elektrienergiat. Adams konstrueeris selle efekti põhjal ka peeglist, mis koondasid päikesevalgust seleenile, koosneva torni. Lisaks teoretiseeris ta, et sellised konstruktsioonid saaks kasutada troopilistes kliimades alternatiivse energiaallikana söele ja puidule. Tema torni disain on aluseks pea kõikidel tänapäevastele päikese-soojuselektrijaamadele, kus päikeseenergiat muundatakse elektrienergiaks, mitte läbi fotogalvaanilise efekti, vaid kuumutades vett ning kasutades saadud auru turbiinide ringi ajamiseks, mis toodavad elektrit. Vaatamata sellele võib lugeda Adamsi ja Day tööd ka tänapäevaste fotogalvaaniliste elementide aluseks.[2, 17].

1883. aastal tuginedes Adamsi ja Day leidudele, ehitas Ameerika Ühendriikide leiutaja ning ettevõtja Charles Fritts seleenist elemente ning mõõtis nende takistuste muutumist erinevates valguskeskkondades ning temperatuuridel. Ta kasutas seleeni koos rauast, messingust, vasest, tinast, pliiist, platinast, kullast, niklist, nikkelpronksist, alumiiniumist, vismutist, süsinikust, puidust, vilgust ning klaasist lisanditega. Kattes seleeni üliõhukese kulla kihiga, saavutas ta suurima efektiivsuse. Kuigi see oli kõige efektiivsem kooslus, oli elemendi tõhusus ligikaudu 1% ning materjalide kalliduse tõttu ei olnud tegu reaalse võimalusega laialdaseks energia tootmiseks [2, 18].

1905. aastal Alber Einstein'i avaldatud nelja artikli seas oli töö, mis seletas fotoefekti kirjeldades valgust kui osakeste voogu, kus igal osakesel on energia, mis on seotud valguse lainepikkusega. Valguse osakese ehk footoni, mille energia on piisavalt suur, langemisel metallile lööb see pinnalt lahti elektroni, mis tekitabki fotoefekti. Einstein

pälvis töö eest 1921. aastal Nobeli preemia füüsikas. Valguse ning fotoefekti parem mõistmine olid aluseks ka fotogalvaanilise efekti mõistmisele ning kasutamisele [19].

1940. aastal avastas Bell Labs'i pooljuhtmaterjalide teadur Russell Shoemaker Ohl läbi juhuse pn-siirde. Töötades erinevate räni proovidega, märkas ta, et ühel proovidest oli keskel pragu ning valguse käes tekkis antud proovis vool. Edasisel uurimisel selgus, et pragu oli piirjooneks räni poolte vahel, milles olid erinevad lisandid. Üks pool oli akseptorlisandiga ning teine doonorlisandina ning pragu märkis ära pn-siirde asukoha ränil [20].

1953. aastal Bell Labs'i insener Daryl Chapin töötas välja päikeseelementi kasutades seleeni, kuid leidis, et tegemist on liialt ebaefektiivse materjaliga. Chapin'i tööga samaaegselt, samuti Bell Labs'i, keemik Calvin Fuller ja füüsik Gerald Pearson, töötasid välja meetodeid, kuidas kontrollida pooljuhtide omadusi erinevate lisanditega. Töö käigus avastasid nad, et räni, milles oli galliumi lisandeid, genereerib voolu, kui see viia kontakti liitiumiga. Pearson, kes oli teadlik Chapini tööst, jagas Chapingia oma leidu ning soovitas Chapinil kasutada seleeni asemel legeeritud räni. Nad jätkasid arendustööd kolmekesi. Suur takistus nende töös ilmnas toatemperatuuril oleva liitiumi omadusest liikuda sügavamale läbi räni ning liigutada nii pn-siirdeala kaugemale päikesevalgusest. Probleemi lahendamiseks leiti teisi lisandeid, millest praktilistel põhjustel otsustati boori ja arseeni kasuks. Lisaks pn-siirdeala elemendi pinna lähedal hoidmisele osutusid boori ja arseeniga legeeritud räni ka lihtsamini vooluringi elektrodidega ühendavamaks. Mitme sellise elemendi ühendamisel löid Fuller, Pearson ja Chapin seadme, mille nad nimetasid „päikeseplatadeks“. 1954. aastal esitles Bell Labs päikeseplatadeid, mille efektiivsus oli 6% [20].

1955. aastal hakkas Western Electric (Bell Labs'i sõsarettevõtte) müüma patendi litsentse fotogalvaaniliste elementide tehnoloogia ning nende tootmise kohta. Samal aastal tõi Hoffman Electronics'i pooljuhtide osakond turule esimese kommertsliku fotogalvaanilise elemendi, mille efektiivsus oli 2%. 1960. aastaks saavutas Hoffman Electronics 14% efektiivsusega kommertslikud elemendid [1].

Järgnes aeglane, kuid pidev areng päikeseelementide efektiivsuse tõstmises. 2014. aastal esitles Soitec ja CEA-Leti, Prantsusmaa koos Fraunhoferi päikeseenergia süsteemide instituudiga päikeseelementi, mis muudab 46% langevast valguse energiat elektrienergiaks. Ameerika Ühendriikide ettevõttel SunPower'il on turul kommertslikud tooted, mille efektiivsus ulatub 21,5% [3, 4].

2 Päikeseelemendiga integreeritud tee

Tulenevalt päikesepaneelide efektiivsuse arengust ning suurema vajadusest taastuvenergia järele, on viimase 10 aasta jooksul arendatud muuhulgas sõidu- ning kergliiklusteid, mis oleks integreeritud päikeseelemendiga - see tähendab, et fotogalvaaniline element on osa teekattest või on ise teekattematerjal. Sellised teed on väga atraktiivsed tuleviku väljavaated, sest vastupidiselt tavapärastele teedele on päikeseelemendiga integreeritud teedel otsene investeeringutasuvus elektrienergia tootmise näol. Arendustöö tulemusena on prototüübid olnud energia tootlikkuselt edukad, st. on saavutanud oma hinnangulised tulemused või ületanud need, kuigi probleemiks on teede rajamise maksumus. Stanfordi Ülikooli professor Mark Jacobson näeb probleemina ka teedele kogunevat saastet, mis muudavad teede tootlikkuse efektiivsuse liiga madalaks, et teede rajamise hind end ära tasuks. Teadus- ja nõustamisetevõtte IDTechEx esimees Peter Harrop näeb päikeseelementidega integreeritud teedele kasutust asukohtades, kus rajatakse uusi teid [23].

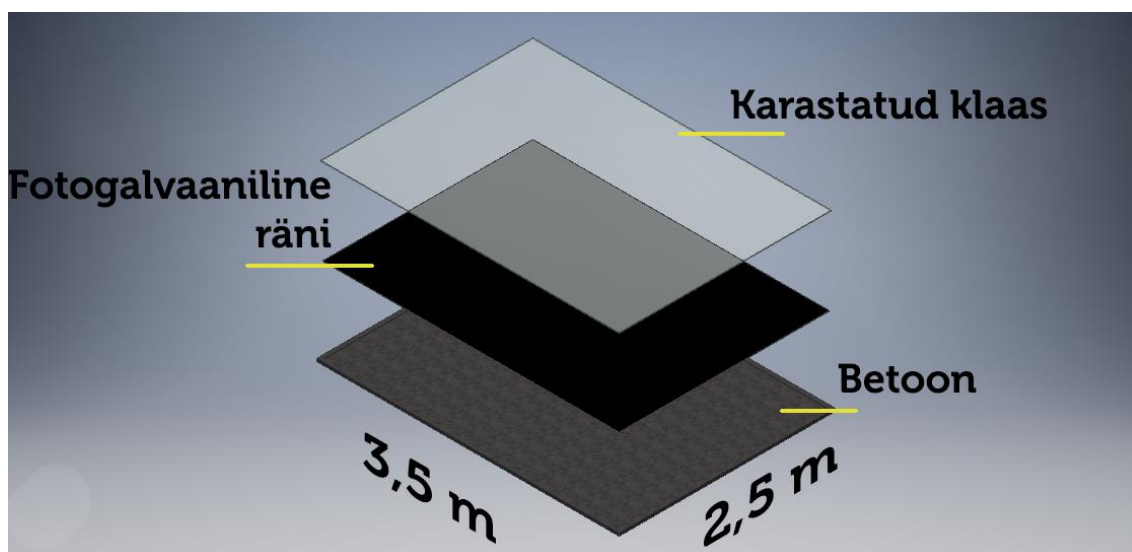
2.1 Kasutusel olevad lahendused

Käesoleva töö kirjutamise ajal, 2017. aasta aprillis, on üle maailma 3 projekti, mille raames on rajatud päikeseelementidega teid - 2014. aastal paigaldatud SolaRoad Hollandis, 2016. aastal paigaldatud Wattway Prantsusmaal ning 2016. aastal Solar Roadways Ameerika Ühendriikides. Lisaks plaanib Solmove (Saksamaa) rajada oma esimese tee 2017. aastal [23].

2.1.1 SolaRoad

2014. aasta novembris avati Krommenie linnas, Hollandis SolaRoad'i pilootprojektina päikeseelemendiga integreeritud 100 m pikkune ühesuunaline jalgratta- ja kergliiklustee. Tee maksumus oli 3 miljonit eurot. SolaRoadi tee on valmistatud paneelidest mõõtmetega 2,5 m x 3,5 m. Paneel koosneb betoonist alusest, millele on asetatud ränist fotogalvaaniline element. Paneel on kaetud karastatud klaasiga, mille paksus on ligikaudu 1 cm (Joonis 2). Esimese poole aastaga tootis tee üle 3000 kWh elektrienergia, mis on hinnanguliselt piisav keskmise Hollandi üheinimese kodu varustamiseks elektriga üheks aastaks. Ekstrapoleerides saavutatud energiahulka ühe aasta perioodile on tootlikus 70 kWh 1 m² kohta, mis oli SolaRoad arendajate hinnanguline ülempiir laboratoorsete

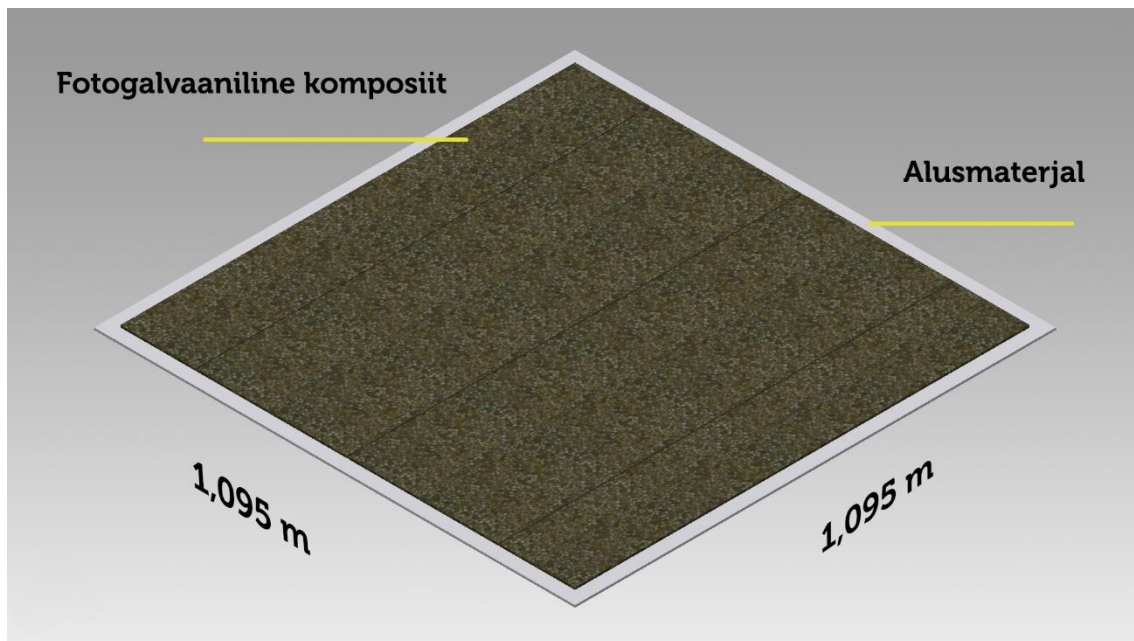
tingimustes. Krommenie projekt on planeeritud kestma veel kolm aastat, mille jooksul hinnatakse täpsemalt tootlikust ning kattematerjali sobivust liiklemiseks [24, 28, 29, 31, 32].



Joonis 2. SolaRoad paneeli struktuur. Autori joonis.

2.1.2 Wattway

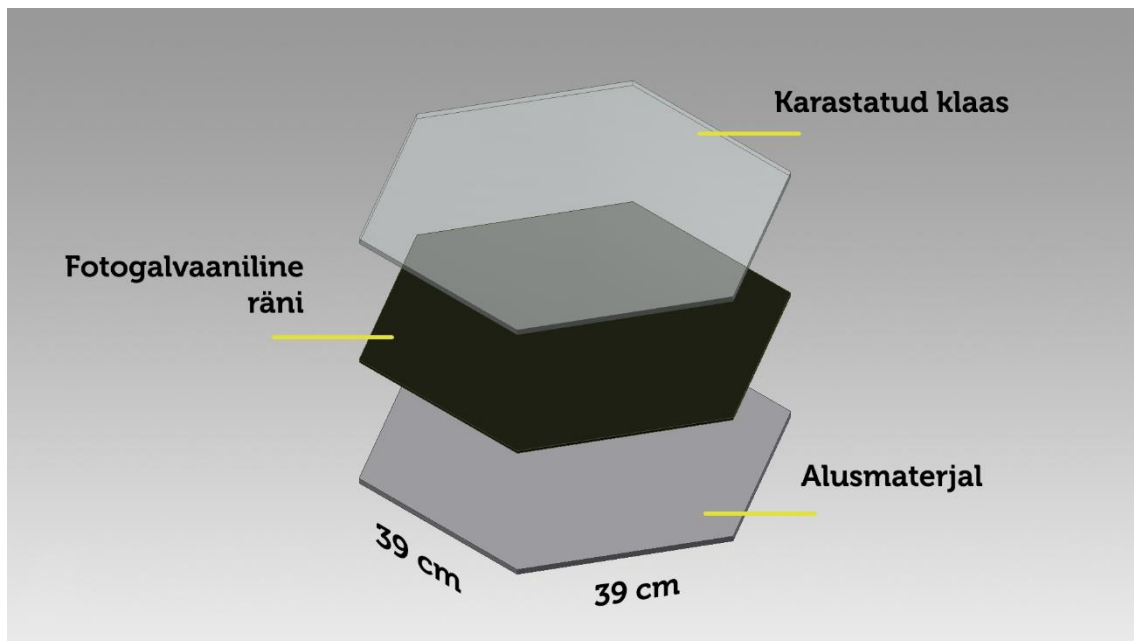
2016. aasta detsembris avati Tourouvre linnas, Prantsusmaal ettevõtte Colas Wattway projekti raames 1 km pikkune 2880 fotogalvaanilise mooduliga tee. Tee maksumus oli 5 miljonit eurot. Wattway tee moodulid on valmistatud mõne millimeetri paksusest komposiitmaterjalist, mis on kinnitatud tavalise kattega tee pinnale (Joonis 3). Wattway elemendid pole kaetud pealismaterjaliga – materjal ise on piisavalt vastupidav ning pakub vajalikku rehvide haarduvust. Hinnanguline tootlikus teele aastas on 280 MWh, kusjuures päevane keskmine tootlikus võib ulatuda 767 kWh-ni ning suvine tipptootlikus on hinnanguliselt 1500 kWh päevas. Toodetud elektrienergiaga valgustatakse Tourouvre tänavavalgustid ning ülejäänud saadetakse Enedi' (Prantsuse elektripakkuja) võrku. Lisaks Tourouvre teele on Wattway'l kaks projekti parklates. Prantsusmaal asuva Vendéspace spordikeskuse parklas oleva 50 m² ala tootlikus on hinnanguliselt 6300 kWh aastas. Ameerika Ühendriikide osariigis Georgias, Georgia osariigi turismiinfopunkti parklas oleva 50 m² ala tootlikus on hinnanguliselt 7000 kWh aastas. Wattway'l ja Georgia osariigil on plaanis ka 2017. aastal rajada 29 km pikkune teelõik maanteel 85, mis on kaetud Wattway elementidega [24, 25, 26, 27, 30].



Joonis 3. Wattway mooduli struktuur. Autori joonis.

2.1.3 Solar Roadways

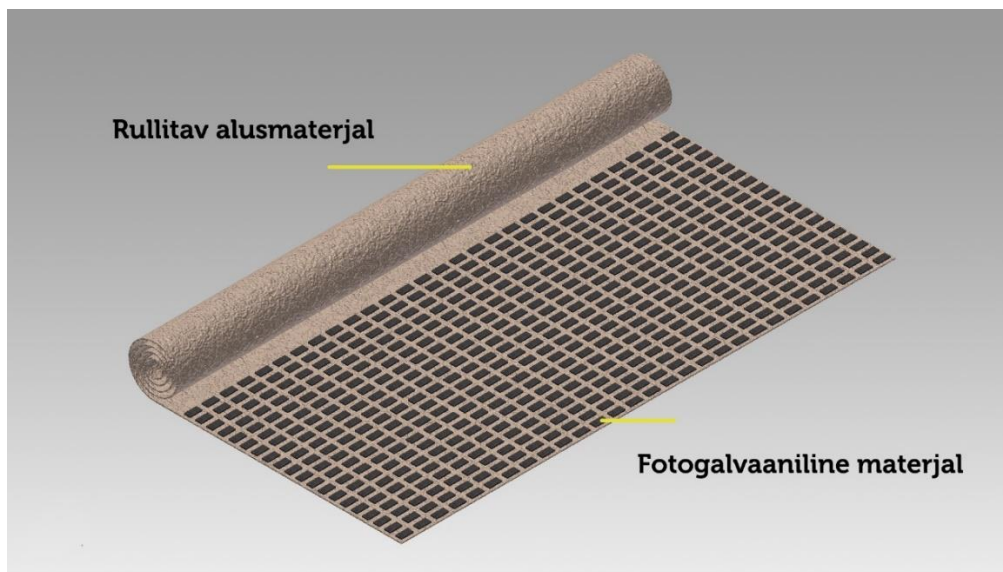
2016. aastal avati maanteel 66, Missouri osariigis, Ameerika Ühendriikides esimene avalik Solar Roadways 23 m² suurune tee osa. Tee maksumus oli 100 tuhat dollarit. Solar Roadways tee koosneb kuusnurksetest moodulitest, mis asendavad tavalist kattega teed. Iga kuusnurkne moodul on ligikaudu 0,4 m² suurune ning koosneb kolmest kihist – alumine aluskiht, millele toetub fotogalvaanilise elemendiga kiht, mis on kaetud karastatud klaasiga (Joonis 4). Kõige uuemad prototüübid on tootlikkusega 44 W mooduli kohta. Lisaks on moodulitesse integreeritud mikroprotsessor, soojenduselemendid ning lisaruum, kuhu on võimalik paigaldada vajadusel kaableid, sensoreid, LED-valgusteid ja muud sellist. Moodulite kuusnurkne kuju valiti, sest nii on võimalik lihtsalt rajada tee kurve ning teede vee äravooluks vajalikku kallet tee keskosast äärteni. Solar Roadways arendustöö raames leiti, et määrdunud paneel toodab keskmiselt 9% vähem energiat, kui puhas paneel. Praegu valmistatakse iga Solar Roadways moodul käsitsi, mis teeb lahenduse väga kulukaks [24, 33].



Joonis 4. Solar Roadways mooduli struktuur. Autori joonis.

2.1.4 Solmove

Saksamaal arendatav Solmove projekt planeerib avada esimesed pilootteed 2017. aasta jooksul. Solmove tee koosneb tavalisest kattega teest, kuhu peale on rullitud Solmove kate. Rullitav kate koosneb ränist päikeseelemendist, mis on kaetud karastatud klaasiga (Joonis 5). Karastatud klaas on kaetud hüdrofoobse kattega, mis aitab kattel ise puhastuda, et tee tootlikkuse efektiivsus hoida kõrge tasemel. Solmove hinnanguline tootlikus on 100kWh 1m² kohta [34].



Joonis 5. Solmove rulli struktuur. Autori joonis.

2.2 Planeeritud struktuur päikeseelemendiga integreeritud kergliiklustee sillutisele

Arvestades teiste projektide kogemust on välja joondunud tõsine probleem päikeseelemendiga integreeritud teede maksumuses. Reaalse suuremahulise kasutuselevõtuga peab tee katmiseks kasutatava lahenduse maksumus olema konkureeriv tavapärase katmismaterjaliga, milleks Eestis on asfalt- ja tsementbetoon ning mustkate. Teekatte maksumuse komponentideks võib lugeda järgnevad:

- Fotogalvaanilise elemendi maksumus
- Teekatte tootmise kulukus
- Paigaldamise kulu
- Katte kestvus
- Pealiskihi materjali maksumus

2.2.1 Fotogalvaanilise elemendi maksumus

Lähtudes SolaRoad, Wattway ja Solar Roadways kogemusest, kus on saavutatud päikeseelementidega teoreetiline efektiivsus ka praktilises kogemuses, on mõistlik kulukuse vähendamiseks kasutada soodsamaid elemente, mille efektiivsus on väiksem. Majanduslikult kasumlikuima efektiivsuse määr tuleb leida läbi praktilise kogemuse Eesti kliimas ning arvestades ka ülejäänud komponentide hinda.

2.2.2 Teekatte tootmise kulukus

Arvestades võimaliku laienemisega kergliiklusteedelt, mida Eestis on 546 km, ka teistele teeliikidele oleks mõistlik leida ühtne lahendus mõlemale. Eestis on kokku 58 936 km erineva teeliigiga riigi- ja kohalike teid. Sellest tulenevalt peab konkurentsivõimelise hinna kujundamist arvestades olema võimalik teekatet kindlasti valmistata masstootmisega.

Töötavate projektide maksumusest on näha, et kõige soodsam lahendus m² kohta on Wattway modulaarne teekate Prantsusmaal, mis on kinnitatud tavalisele kattega teele. Sellele järgneb Solar Roadways lahendus, kus eelnevalt toodetud mitmekihilised moodulid asendavad kattega teed. Siinkohal tuleb arvestada, et Wattway fotogalvaaniline materjal, mis on ka materjal, millel liigeldakse, on ettevõtte Colas intellektuaalne omand, mida ettevõttel on võimekus ise toota, samas kui Solar Roadways mitmekihilised moodulid on komplekteeritud turul saadavatest toodetest. Solar Roadways'i suurem

kulukus tuleneb ka asjaolust, et iga moodul on hetkel käsitöö, mitte masstoodang. Võib osutada, et kattematerjali, mis täidab kahte funktsiooni, tootmise võimekuse puudumisel on mitmekihiline lahendus masstootmisel soodsam lahendus.

2.2.3 Paigaldamise kulu

Modulaarse lahenduse kasutamise kulukust mõjutab mooduli suurus ja kuju. Liiga väikese pinnaga moodulite paigaldamise kulukus tõuseb läbi paigaldamiseks vajalike töötundide suurenemise. Liiga suure pinnaga moodulitega transportimine on ebamugav ning võib olla takistuseks tee kurvide planeerimisel. Optimaalne suurus on mõistlik leida pidades nõu teede paigaldajatega ning teede projekteerijatega. Solar Roadways kasutab 0,4 m² suurust kuuenurkset moodulit, sest ettevõtte sõnul see lubab lihtsalt paigaldada mooduleid teedeks, mis nõuavad kurvi. Lisaks on selle kujuga võimalik teele tekkida vee äravoolule vajalik tõusev nurk tee keskosale. Samuti tuleb silmas pidada, kas paigaldada kate varasemalt asfalteeritud, või mõnel muul tavapärasel viisil kaetud, teele või paigaldada kate tavapärase katte asemele. Esimesel juhul on uue tee rajamine kulukam, kuid vana tee uuendamine soodsam. Teisel juhul on uue tee rajamine soodsam, kuid vana tee uuendamiseks on vajalik eelneva tee lõhkumine, mis suurendab kulusid.

2.2.4 Katte kestvus

Mida pikem on tee kasutamiskõlblik aeg enne, kui on vajalik seda uuendada, seda madalam on tee kulukuse määr. Kasutades modulaarset lahendust on lihtne ka tee uuendus vastavalt vajadusele väga väikesel pindalal, mis samuti on hoolduskulude seisukohalt otstarbekam lahendus.

Kasutades katmiseks mooduleid, mis koosnevad mitmest kihist tuleks silmas pidada erinevate kihtide erinevaid kulumismäärasid. Efektiivseim lahendus on kasutada komponente, mille efektiivsed funktsionaalsed ajaperioodid on võimalikult sarnased. Alternatiivselt, suuresti erinevate kuluvusperioodide korral, tuleks kihid valida võimalusel nii, et pikema kestvusega kihid oleksid lihtsasti taaskasutatavad uute moodulite tootmisel.

2.2.5 Fotogalvaanilist katva kihi materjali maksumus

Kasutades kihilist modulaarset lahendust tuleb arvestada pealispinna materjali kulukusega. Solar Roadways, Solmove ning SolaRoad kasutavad kattematerjalina karastatud klaasi. Alternatiivselt saaks kasutada materjale, mida oleks lihtsam mass toota

ning mille kulukuse määr võib olla palju madalam karastatud klaasist. Selleks võivad sobida näiteks plastid ja vaigud. Samas peab valitud materjal olema piisavalt tugev, et kanda teel liiklemisel mõjuvad jõud ning pakkuma võimalust luua tee pinnale tekstuuri, mis võimaldab piisavalt suure haardumise liiklemiseks.

3 Pealiskiht päikeseelemendiga sillutiskivile

Valides lahenduse, kus fotogalvaanilist elementi katab pealiskiht on vajalik leida materjal, mis täidab mitmeid olulisi kriteeriumeid, et selle peal oleks võimalik ka liigelda. Järgnevalt on kirjeldatud vajalike omadusi pidades silmas kergliiklusteed Eestis ning sellele kehtivaid nõudeid.

3.1 Vajalikud omadused

3.1.1 Optilised omadused

Ränipõhised pn-siirdega fotogalvaanilised elemendid muundavad elektrienergiaks nähtavat valgust ehk valgust, mille lainepikkus on vahemikus 380 nm kuni 750 nm. Kattmaterjal on mõistlik valida nii, et nende lainepikkuste sumbumine või peegeldumine oleks minimaalne, et võimalikult palju jõuaks päikeseelemendile.

Samas võib vajadusel kasutada ka materjali, mis ei lase vähemal määral valgust läbi, mis küll toob kaasa madalama efektiivsuse, kuid on majanduslikult optimaalsem.

Valitud materjal peaks olema mitte kergesti määrduv või kergesti puhastatav olemasoleva tänavapuhastuse taristuga, et vältida kadusid läbi määrdumise.

3.1.2 Tekstuur

Kõige olulisem aspekt pealispinna tekstuuri juures on tee haarduvus. Eestis peab kergliiklustee seisundi tase olema 3 või parem. Seisunditaseme 3 saavutamiseks peab muuhulgas tee IRI ehk *International Roughness Index*'i väärtus olema 5 mm/m. See tähendab, et mõõdetud 100 m pikkustel vahemikel, standardse kerega auto liikumisel 80 km/h, peab vertikaalsete võngete kogusumma jääma alla 5 mm 1 m kohta [15].

Lisaks haarduvusele on vajalik, et tee pind ei kahjustaks teel liiklevaid inimesi või sõidukeid. Seetõttu ei tohi tee pind olla liialt kare või terav.

Samuti peab silmas pidama, et kasutatav materjal ei oleks poorne. Poorse materjali puhul võib materjali pooridesse sattuda vesi. Temperatuuri langemisel vesi külmub ning paisumisel võib lõhkuda materjali ja muuta tee kasutamiskõlbmatuks.

Saavutamaks samasugust tee haarduvust ja vältides liigset abrasiivsust, on lihtsaim viis kasutada kergliiklustee tavapärase katte mudelit ning selle järgi luua šabloon, mida saaks kasutada pealiskivi tootmisel.

3.1.3 Tugevus

Eesti seadusandluses ei ole otseselt määratletud kergliiklusteedele mõjuvate koormuste piirmääre. Samas on olemas nõue, mille kohaselt peab kergliiklusteel saama liikuda tänavapuhastusmasin, mille standardne koormus teele on 6-tonnine telg. See tähendab, et igale mootorsõiduki paarisrattalisele teljele mõjuv raskus ei tohi ületada 6 tonni.

Lisaks sellele on oluline arvestada mitmesuguste kihiliste või integreeritud lahenduste puhul materjali võimalikku läbipainet, võttes arvesse päikeseelementides enimkasutatud materjali, räni, jääkust.

3.2 Sobilikud materjalid

Käesolevas töös on järgnevalt uuritud vaikude sobivust päikeseelementide katteks, kus element on valatud vaigu sisse. Vaikude eeliseks on võimalus külmvalamiseks, mis teeb tootmisprotsessi väga lihtsaks, sest tootmiseks on vajalikud ainult külmvormid. Samas võib vaigu kõvenemise aeg olla väga pikk, mis teeb protsessi muutmise reaalses tootmises riskantsemaks. Seetõttu on oluline tootmisele eelnevalt katsetada paljusid erinevaid lahendusi väikesel skaalal. Töö raames on uurimiseks valitud järgnevad vaigud:

1. kahekomponendiline epoksiidvaik, kus kõvendit 37 g 100 g vaigu kohta (edaspidi EPO-vaik)
2. kahekomponendiline PES-vaik, kus kõvendit 0,5 g, 1 g ja 1,5 g 100 g vaigu kohta (edaspidi PES-vaik)
3. neljakomponendiline polüürea vaik, kus kõvendit BH (hard) 33 g ja kõvendit BE (elastic) 70 g 100 g vaigu kohta, mis koosneb 1:1 suhtes kahest vaigust AF (fast) ja AS (slow) (edaspidi PU-vaik)

Lisaks valmistati vaigu segud karastatud klaasiga valades vaigu eelnevalt vormi asetatud klaasile või segades klaasi enne valamist vaiguga.

4 Katsekehad optilisteks mõõtmisteks ning survetugevuse mõõtmiseks

4.1 Ettevalmistus

Katsekehade loomiseks valmistati esmalt 3D-printides 2 šabloonid silikoon vormidele. Esimene šabloonid koosnes 9 sileda pealsega „tornist“, mille alus on 2 cm x 2 cm, neist kolm olid 1 cm kõrgused, kolm 2 cm kõrgused ning kolm 3 cm kõrgused. Teine šabloon oli sarnane esimesele, kuid üks kõrguste seeria oli sileda pealsega, teine kõrguste seeria oli asfaltkatte skaneeringu mudeli pealsega ning kolmas kõrguste seeria oli kaetud TTÜ Materjali- ja keemiatehnoloogia instituudi inseneri Mihkel Viirsalu poolt projekteeritud kattega, mis koosnes peamiselt kuusnurksetest kärgedest (Joonis 6).



Joonis 6. 3D-prinditud šabloonid

Nende šabloonide põhjal valmistati 2 silikoonist vormi, milles sai vastavalt valmistada erinevate kõrguste ning erinevate katetega katsekehasid. Vormide loomisel kasutatav silikoon oli ettevõtte Erismet OÜ tootevalikus olev silikoon „vormisilikoon 37ShA“ (Joonis 7).



Joonis 7. Silikoon vorm 2 cm x 2 cm katsekehade valmistamiseks

4.2 Valmistamine

Katsekehade valmistamiseks puhastati esmalt vorm, ning kaeti see vormieraldus pritsimisvedelikuga „Mann Ease Release 200“, mis on saadaval ettevõtte Erismet OÜ veebipoest <http://www.carbon.ee/et/a/eraldus-aine>. Seejärel valati vormi eelnevalt segatud vaik ning lasti sellel taheneda. Samuti valmistati katsekehasid, kus eelnevalt asetati ~0,5 cm paksune klaasikiht vormi põhja ning valati vaik selle peale. Lisaks sellele katsetati ka klaasi segamist vaiguga enne valamist ning nende koos valamist vormi. Tahenemisperioodiks jäeti osa vorme toatemperatuurile ning osa asetati ahju, mille temperatuur oli 55°C. Valmistati järgnevad katsekehad:

1. EPO-vaik ilma muustrita ning mõlema muustriga
2. EPO-vaik klaasiga segatud ilma muustrita ning asfaldi muustriga
3. EPO-vaik purustatud klaasiseguga segatud ilma muustrita
4. EPO-vaik klaasi peale valatud ilma muustrita ning asfaldi muustriga
5. PES-vaik restseptiga 0,5% kõvendit ilma muustrita
6. PES-vaik restseptiga 1% kõvendit ilma muustrita ning asfaldi muustriga
7. PES-vaik restseptiga 1,5% kõvendit ilma muustrita ning asfaldi muustriga
8. PES-vaik restseptiga 1% kõvendit klaasiga segatud ilma muustrita
9. PES-vaik restseptiga 1,5% kõvendit klaasi peale valatud ilma muustrita
10. PU-vaik vaik ilma muustrita ning asfaldi muustriga.

Klaasi all peetakse silmas purustatud karastatud klaasi tükke ning purustatud klaasisegu all peetakse silmas liivapritsis kasutatavat klaasipuru, mis on valmistatud klaaspakendite jäätmetest.

Kõik katsekeha tüübid valmistati nii 1 cm, 2 cm kui ka 3 cm kõrgused. Kuusnurksete kärgedega mustrit kasutati vaid korra, sest ilmselt tõsiasi, et realses kasutuses koguneks kärgedesse mustus, mis piiraks oluliselt vaigust oleva päikeseelemendi töö efektiivsust.

4.3 Survetugevuse mõõtmine

Survetugevuse mõõtmise eesmärk on kontrollida, kas kasutatud vaigud on piisavalt tugevad ja jäigad, et nad peaks vastu realses kasutamises teedena. Arvestades piirjuhtu, kus teele astub näiteks 100 kg kaaluv inimene, kelle kingakontsa pindala on 1 cm^2 , peab tee vastu pidama $\sim 10 \text{ MPa}$ survele. Samuti peab vaik olema küllaltki jäik, sest liialt elastse materjali puhul, kus sees on päikesepaneel, võib tekkida moodulis liigne paine, mis lõhub päikeseelemendi. Samas on raske ennustada soovitud elastsusmooduleid ning sobivaim tulemus tuleb leida läbi praktiliste katsetuste.

4.3.1 Metoodika

Survetugevuse mõõtmine viidi läbi Instron 5866 universaalse mehaaniliste katsetuste süsteemiga, millele olid kinnitatud kaks metallist surveplaati. Alumisele plaadile asetati ülemise plaadi diameetrist suurema diameetriga metallist siledapõhjaline, silindriline kauss, et kaitsta võimalike lenduvate purdmaterjalide eest (joonis 8.).



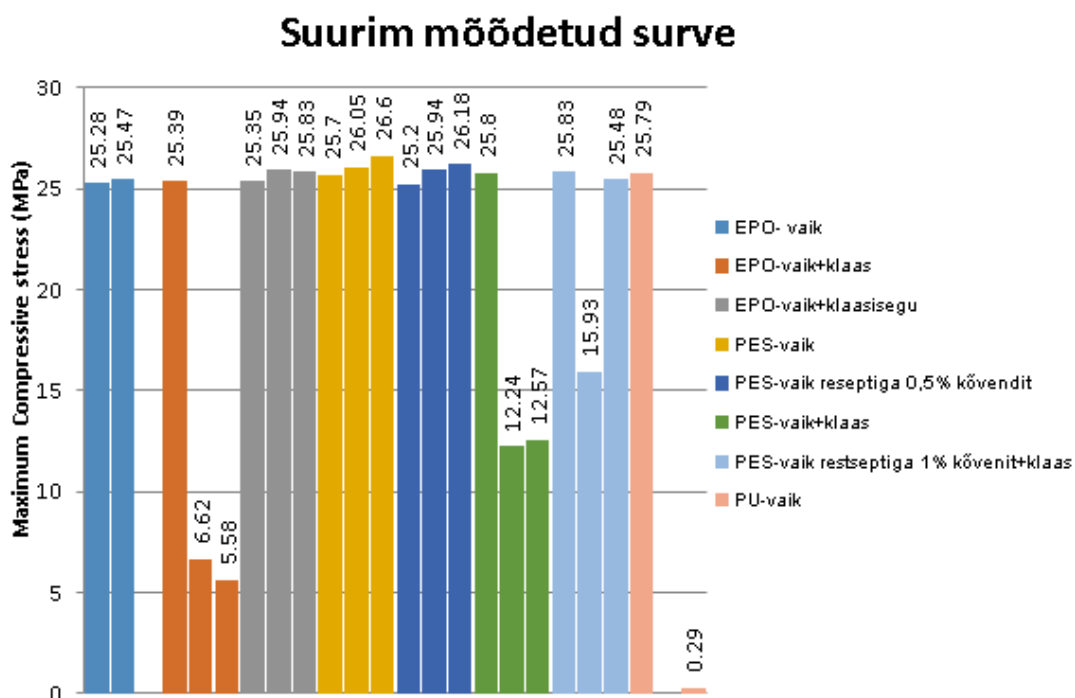
Joonis 8. Survekatse aparatuur ja katsekeha asetus

Kausi põhjale, keskosale, asetati katsekeha, mille mõõtmed olid teada täpsusega 0,05 mm. Seejärel hakkas seade plaate kokku suruma kiirusel 1 mm/min. Mõõdeti katsekehade elastsusmoodulit ning suurimat mõõdetud survet. Põhjusel, et masina suurim lubatud koormus on 10 kN, ning katsekehade pindala ligikaudselt 2 cm x 2 cm, siis suurim mõõdetud surve sai olla maksimaalselt ~25 MPa, mis tähendab, et katsekehade, mis ei purunenud 10 kN koormuse all, survepiiri enne purunemist ei olnud selle katsega võimalik määrata. Samuti oli raamile rakendatud piirang, mis ei lasknud sellel suruda katsekeha kokku rohkem kui 10 mm.

4.3.2 Tulemused

4.3.2.1 Suurim mõõdetud surve

Järgneval graafikul (Joonis 9) on esitatud erinevates materjali kooslustest valmistatud sileda pealsega katsekehade suurim mõõdetud surve. Esitamiseks on valitud just sileda pealsega katsekehad, sest neid valmistati kõige rohkematest materjalide variatsioonist ning katseandmed näitasid, et katte muster ei mõjuta suuresti tulemusi. Joonisel on näha värvikoodiga materjalid ning katsekehad kõrgustega 1 cm, 2 cm ja 3 cm vasakult- paremale iga uue värvi piires.

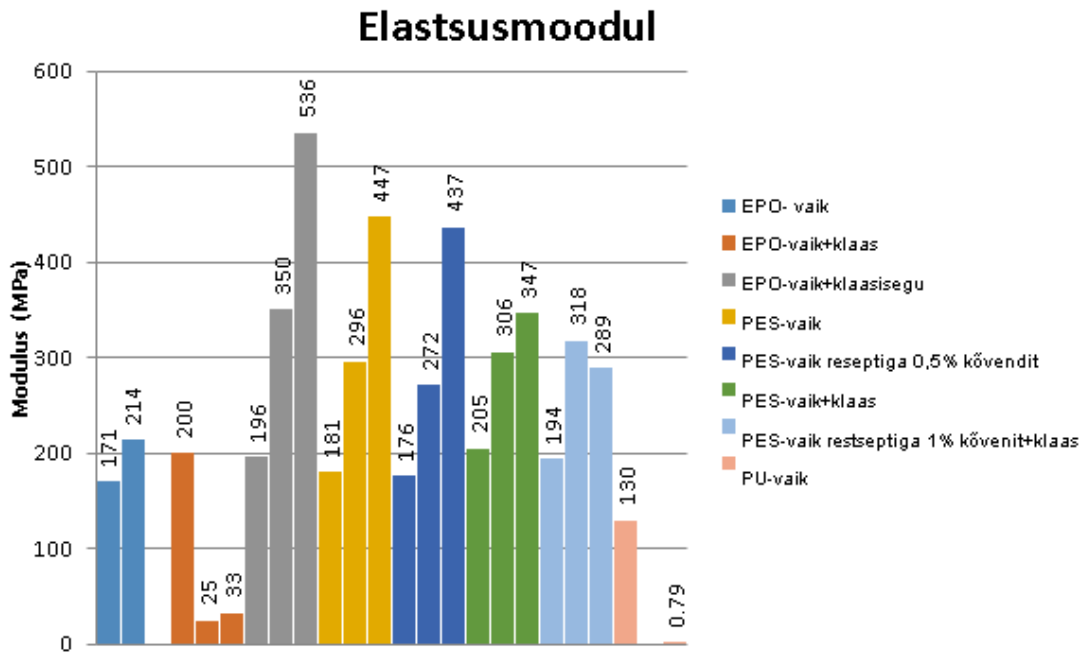


Joonis 9. Suurim mõõdetud surve erinevatele katsekehadele

Katseandmed näitavad, et enamik materjale ei purunenud raami poolt maksimaalselt rakendatud 10 kN jõu puhul. Samas purunesid näiteks EPO-vaigu ja klaasi ning PES-vaigu ja klaasi 2 cm ja 3 cm kõrgused katsekehad, kusjuures PES-vaigu ja klaasi purunemise surve on pisut suurem kui hüpoteetiliselt püstitatud piirsurve samas kui EPO-vaigu ja klaasi purunemise surve jääb alla selle. Veel on huvitav märkida, et mõlema 1 cm kõrgune katsekeha jäi terveks. Lisaks purunes PES-vaigu (vaigu segu 1/100) ja klaasi 2 cm kõrgune katsekeha, kuid 3 cm ja 1 cm kõrgused katsekehad jäid terveks. Samuti joonisel mitte kajastuvalt purunesid PES-vaigust katsekehad kõrgustega 2 cm ja 3 cm, millel oli asfaldi muster. Nende purunemise surved olid vastavalt 15,94 MPa ja 17,8 MPa. 4-komponendilise vaigu 3 cm kõrguse katsekeha surve määramine ei peegelda seda, et katsekeha oleks purunenud väga väikese surve juures vaid probleem ilmnes selles, et tegemist on väga pehme vaiguga ning raam surus katsekeha kokku maksimaalselt 10 mm, mistõttu vastusurve raamile oli väga väike. 1 cm kõrguse katsekeha tulemus on ühtlane teiste terveks jäänud katsekehadega, sest raam surus selle kokku 87% ulatuses. Ülejäänud katsekehad jäid terveks ning nende survepiiri polnud selle katsega võimalik mõõta. Saadud katseandmete põhjal võib väita, et katsekehad, mis olid valmistatud ilma klaasita peavad hästi vastu välja pakutud suurimale hüpoteetilisele survele ~10 MPa. Klaasi lisamine muudab materjali vähem vastupidavamaks survele ja ettearvatumaks.

4.3.2.2 Elastsusmoodul

Järgneval graafikul (Joonis 10) on esitatud erinevates materjali kooslustest valmistatud sileda pealsega katsekehade elastsusmoodul ning graafiku esitamisel on lähtutud samades põhimõtetest nagu suurima mõõdetud surve graafikul leheküljel 22.



Joonis 10. Elastsusmoodul erinevatele katsekehadele

Uuritud vaigud on plastide hulgas suhteliselt kõrge elastsusmooduliga kuid jäävad alla anorgaanilistele materjalidele. Näiteks klaasi elastsusmoodul on 50 GPa – 90 GPa ja monokristallilise räni elastsusmoodul on 130 GPa - 185 GPa. Samuti on näha, et mida kõrgem on katsekeha, seda jäigemaks see muutub, kusjuures erinevate materjalide erisus avaldub märgatavalt alles alates 2 cm kõrgustest katsekehadest.

Kõige jäigem materjal, EPO-vaigu ja purustatud klaasi segu, kahjuks kasutuseks ei sobi, sest materjal on suuresti läbipaistmatu. Huvitava kõrvalekaldega tasub märkida, et EPO-vaigu ja klaasi katsekehad kõrgustega 2 cm ja 3 cm elastsusmoodul vähenes võrreldes 1 cm kõrguse katsekehaga, kuid teiste materjalide elastsusmoodul suurenes. Samuti tuleks märkida, et klaasi lisamine PES-vaigule vähendab katsekehade jäikust.

Kõige pehmem uuritud materjal on PU-vaik. Peale survekatse sooritamist, kus katsekeha oli surutud oluliselt rohkem kokku kui teiste materjalide puhul, saavutas katsekeha oma algmõõtmed pea täielikult 10 minuti jooksul ning katsekehad, millel oli ka muster, taastasid ka mustrit (joonis 11.). Seega on tegemist huvitava mälu efektiga materjaliga.



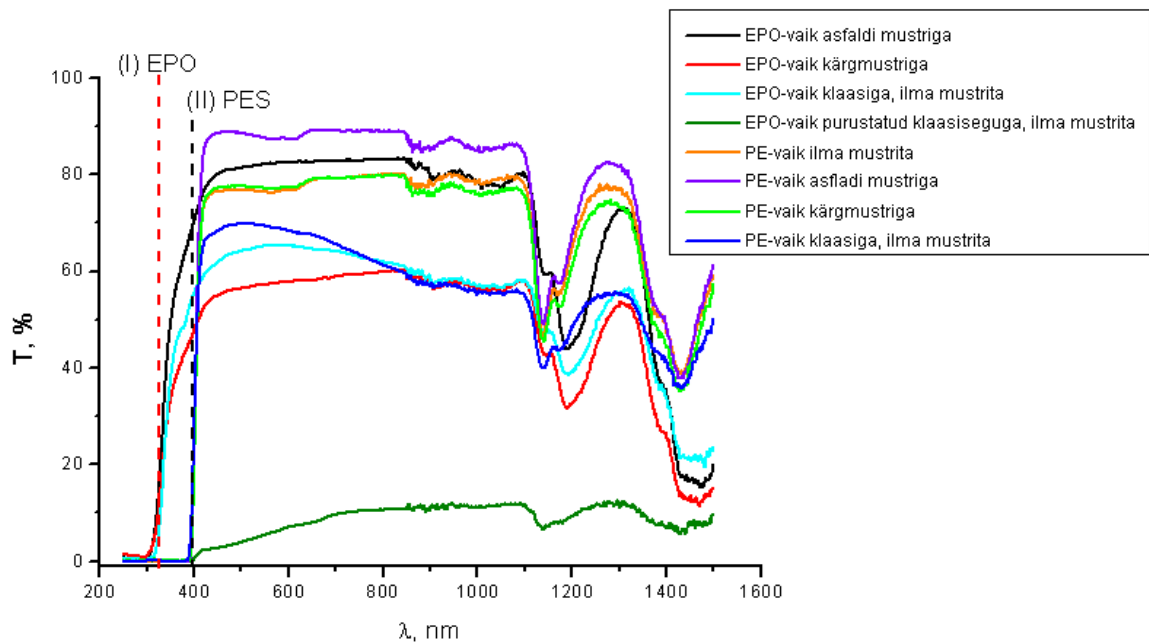
Joonis 11. PU-vaigust katsekeha kõrgusega 2 cm vahetult pärast survekatset ning 10 minutit pärast katset. Katsete tulemustest lähtuvalt on selge, et lisakatsed valmis prototüüpidega on vajalikud, et hinnata materjalide sobivust reaalseks kasutamiseks. Eksisteerib võimalus, et piisaval surveel toimub deformatsioon moodulites või päikeseelemendi purunemine mooduli sees.

4.4 Optiliste omaduste mõõtmine

Kõik optilised katsed, mille tulemusi on töös esitletud, on tehtud TTÜ Keemiliste kiletehnoloogiate teaduslaboris ning tulemused on esitatud katsete läbiviijate loal. Esmalt mõõdeti katsekehade valguse läbilaskvust erinevatel lainepikkustel. Päikeseelemendi tööks on vajalikud lainepikkused 380 nm kuni 750 nm. Samuti on töös prototüüpide peatükis esitatud katsete tulemused juba vaiku valatud päikeseelementidele.

4.4.1 Tulemused

Järgneval graafikul (Joonis 12) on esitatud valguse läbilaskvus katsekehadele kõrgusega 1 cm, mis on valmistatud EPO-vaigu ja PES-vaigu baasil. Lisas 1 joonistel 14-19 on esitatud eraldi EPO-vaigu ja PES-vaigu põhjal valmisatud erinevate kõrgustega katsekehade katsete tulemused.



Joonis 12. EPO-vaigu ja PES-vaigu põhiste katsekehade kõrgusega 1 cm optilise läbilaskvuse võrdlus. Katsete tulemustest võib selgelt välja lugeda, et katsekeha kõrgus mõjutab valguse läbilaskvust väga oluliselt. Samuti on oluline märkida, et EPO-vaik hakkab läbi laskma valgust ~320 nm ning PES-vaik ~400 nm. Seda arvestades võib EPO-vaik olla eelistatud PES-vaigule, kuid tegeliku mõju hindamiseks on vajalikud katsed juba vaiku valatud päikeseelementidega. Lisaks eelnevale on huvitav näha, et EPO-vaik puhul asfaldi muster katsekehal mõjutab läbiva valguse hulka positiivselt. Nii klaasi kui ka purustatud klaasi lisamine pärsib oluliselt valguse läbitunge võimet.

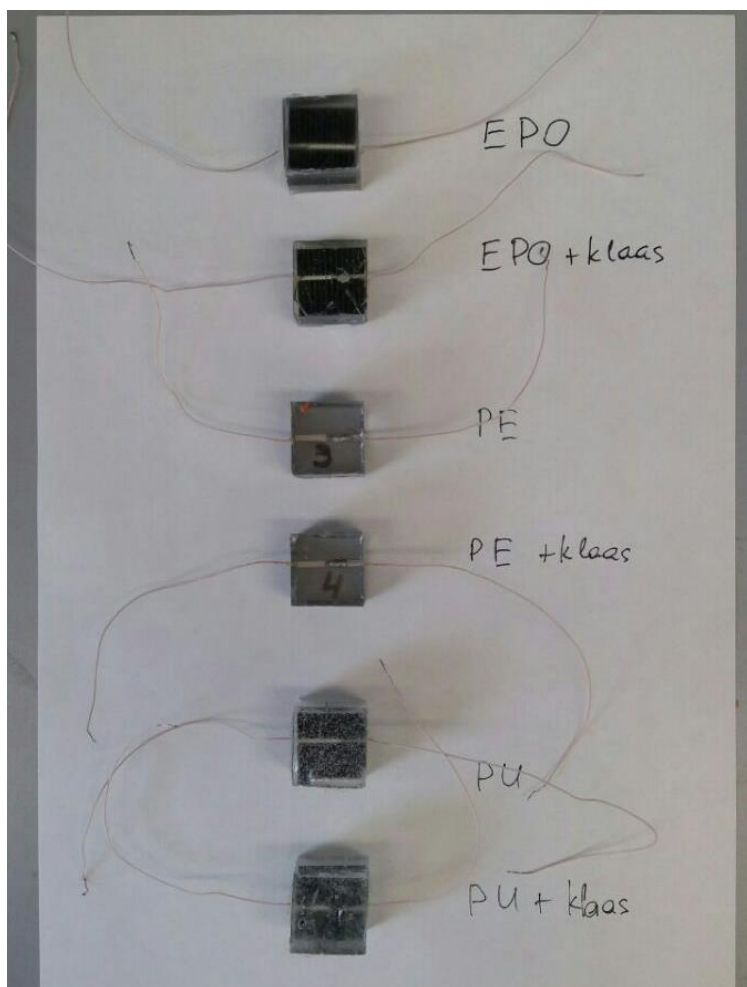
5 Päikeseelementi sisaldavad prototüübid

Lähtuvalt eelnevatest tulemustest valmistati 6 katsekeha, kus on juba töötav 2 cm x 2 cm päikesepaneel valatud vaigu sisse, et mõõta materjalide mõju päikeseelemendi töö efektiivsusel ning hinnata, kas materjalide sisepinged muudavad elemendid kasutuskõlbmatuks.

Selle jaoks valmistati 2 cm kõrgused vormid, mille külgedele oli tehtud 1 cm sügavused süvised paneelide ühendusjuhtmete mahutamiseks ning paneeli hoidmiseks vormi keskosas. Vorm kaeti vormieemaldus pritsimisvedelikuga. Seejärel fikseeriti paneel fotogalvaanilise poolega alla ning valati vaik paneeli peale ning lasti sel taheneda. Osade proovide puhul asetati enne valamist vormi põhja 5 mm kõrgune kiht karastatud klaasi puru. Valmistati järgnevad katsekehad:

1. EPO-vaik
2. EPO-vaik klaasi peale valatud
3. PES-vaik retseptiga 1,5% kõvendit
4. PES-vaik retseptiga 1,5% kõvendit klaasi peale valatud
5. PU-vaik
6. PU-vaik klaasi peale valatud

Kõik katsekehad olid sileda pealsega ehk ilma muustrita (Joonis 18). Kõik katsekehad tahenesid toatemperatuuril, välja arvatud katsekeha number 2, mis tahenes ahjus temperatuuriga 50°C. Ahjus tahenenud katsekeha näitas, et päikeseelement töötab ka pärast toatemperatuurist suuremal temperatuuril olevas keskkonnas viibimist.



Joonis 13. 2 cm x 2 cm päikeseelemente sisaldavad prototüübid erinevate vaikudega

Katsekehades kasutatavate elementide omadused mõõdeti enne vaiku valmist ning siis uuesti peale katsekehade valmimist (Tabel 1). Päikeseelemendid on tähistatud S1-6. V_{oc} tähistab pinget klemmidel, kui element pole voluring ühendatud, J_{sc} tähistab voolu lühisvoolul, FF ehk *fill factor* tähistab päikeseelemendi võimsust maksimaalses võimsuspunktis jagatud avatud voluringi pinge ja lühisvoolu korrutisega ning näitab elemendi lähedust teoreetilisele maksimaalsele võimsusele, η tähistab päikeseelemendi efektiivust.

Tabel 1. Vaikude mõju päikeseelemendi tööle

Katsekeha	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	
S1	600	30	75	13,5	
S1+EPO-vaik	610	30,6	76	14,2	+5,18%

S2	580	28,7	74	12,3	
S2+EPO-vaik + klaas	600	24,7	74	11	-10,6%
S3	590	30	75	13,3	
S3+PES-vaik	615	30,2	77	14,3	+7,52%
S4	580	29,9	74	12,8	
S4+PES-vaik + klaas	615	27,3	76	12,8	+0%
S5	590	28,1	76	12,6	
S5+PU-vaik	610	24,5	76	11,4	-9,52%
S6	580	29,2	75	12,7	
S6+PU-vaik + klaas	610	23,6	77	11,1	-12,6%

Katsete tulemustest on näha, et vaiku valamine mõjutas elementide kasutegurit pigem negatiivselt. On näha, et PU-vaik viib kasutegurit alla. Arvestades, et sellele vaigule ei tehtud eelnevalt valguse läbilaskvuse katseid, on raske määratleda põhjust, miks vaik pärsib nii palju efektiivsust, kuid üheks põhjuseks võib olla õhumullide teke vaigu vormi valamisel, mida teiste vaikude puhul oli võimalik vältida.

Lisaks võib märkida, et klaasi lisamine mõjub samuti negatiivselt kasutegurile, nagu oli ka näha ilma elementideta katsekehade optilistel mõõtmistel. Samas ei ole teada, kas klaasi lisamise negatiivne mõju on piisav, et klaasi üldse mitte kasutada. Klaasi lisamine vähendab vaigu kulu ning muudab lõppkomposiidi jäigemaks. Samuti vaigust pealispinna kulumisel aitab klaas kaasa tee haarduvuse säilitamisel pikaajalisel välikasutusel.

Eksisteerib ka võimalus, et mõõtetulemustes avalduv efektiivsuse negatiivne muutus jääb veapiiridesse ning realses kasutuses paneelide efektiivsuse muut on piisavalt väike, et seda mitte arvestada tee planeerimisel.

Edasise arengu jaoks on vajalik prototüüpide pindala järkjärguline suurendamine ning vaheetappide tulemuste analüüs. Veel on võimalik uurida teisi vaike, mida töös käsitletud pole ning mitte-vaik materjale, mida saaks kasutada päikesepaneelidega integreeritud teedes.

6 Kokkuvõte

Võib arvata, et fotogalvaaniliste elementide integreerimine teedesse on üks potentsiaalirikkamaid uusi rakendusvaldkondi päikesepaneelidele, mis seni on tavakasutuses enim levinud majakatustel. Energiatootlike teede toodetud elektrit saaks mugavalt kasutada tänavavalgustites, valgusfoorides, majapidamistes ning eraldiseisvates seadmetes, mille traditsioonilisse elektrivõrku ühendamise võib olla tülikas.

Maailmas olevad päikeseelementidega integreeritud teede pilootprojektid on näidanud, et idee kasutada tee pinda energia tootmiseks on teostatav ning toimiv. Tehnoloogiad lahendusteks on olemas, kuid takistuseks on teede kulukus. Samas võib arvata, et sobilike materjalide leidmisel ning tootmistehnoloogiate väljakujunemisel on võimalik jõuda ka lahendusteni, mis on majanduslikult jätkusuutlikud.

Üks võimalike lahendusi selliste teede loomiseks on kasutada päikesepaneeli, mis on külmvalatud vaiku. Täpsemalt on välja pakutud lahendus, kus päikesepaneel valatakse koos karastatud klaasi tükkidega epoksiidvaiku paneelides, mille pealispind on kaetud asfaldi mustriaga.

Epoksiidvaiku valatud 2 cm x 2 cm päikesepaneeli kaitsekehade efektiivsus vähenes vaigu tõttu ebaolulisel määral ja see tõestab, et antud kombinatsioon on praktilisteks rakendusteks sobilik. Karastatud klaasi tükid lisavad paneelidele töökindlust kulumisel, säilitades tee haarduvuse ka vaigu kulumisel. Võrreldes klaasiga on vaigu puhul siiski tegemist suhteliselt pehme materjaliga, mis suurematel mõõtmetel võib osutada probleemiks. Vaatamata sellele on mõistlik edasi uurida erinevate vaikude potentsiaali ja sobivust selliste teede valmistamiseks.

Vaikude kasutamisel päikesepaneelidega integreeritud sillutiskivides on perspektiivikas väljavaade.

7 Abstract

Integrating solar panels into roads is one of the most lucrative future applications of photovoltaics that have been traditionally used as roofing. Energy producing roads can be used to power street lights, traffic lights, households and appliances that are not easily connected to the grid.

Existing pilot projects have shown that the idea to use photovoltaics in roads is a feasible way to produce energy. The challenge to overcome is the cost of installing said roads but it is reasonable to believe that with advancement in the field more economically sound solutions will emerge.

One possible way to create solar roads is to use solar cells cast into resins. Specifically, it is proposed to use epoxy resin in combination with tempered glass to cast panels with asphalt patterns.

Epoxy resin did not inhibit the efficiency of 2 cm x 2 cm samples to the extent that it would be reasonable to believe that it is not suitable to use in a real-world solution. Crushed tempered glass add longevity to proposed panels – as the resin wears the glass maintains the needed road grip. At the same time, it is necessary to remember that resins are soft materials and extensive testing is needed with larger panels.

Using resins to create solar panel integrated roads is a viable prospect with a lot of opportunity for development.

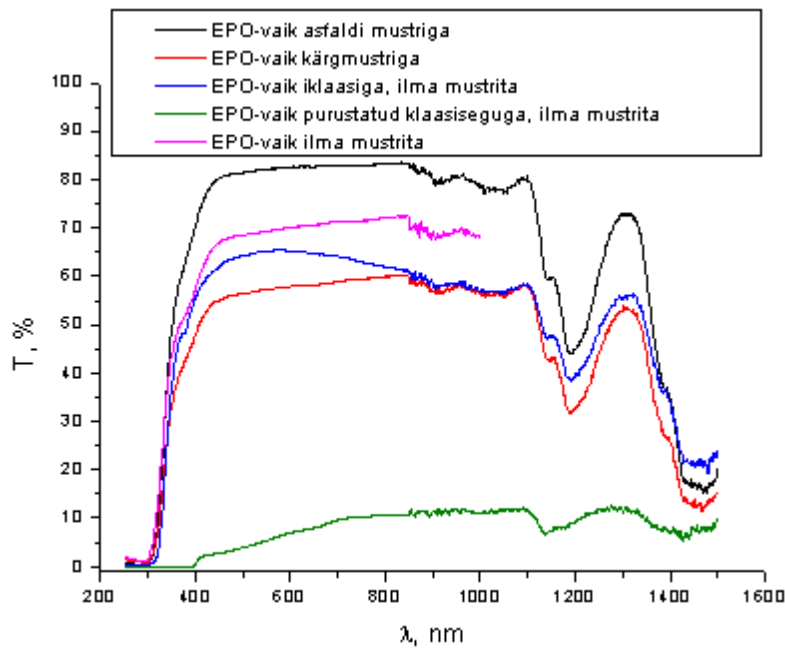
8 Kasutatud allikate nimekiri

- [1]. Timeline of Photovoltaics History: 1839 to 1996 [WWW].
<https://www.thoughtco.com/photovoltaics-timeline-1992481> (23.04.2017)
- [2]. Photovoltaic Dreaming 1875–1905: First Attempts At Commercializing PV [WWW]. <https://cleantechnica.com/2014/12/31/photovoltaic-dreaming-first-attempts-commercializing-pv/> (23.04.2017)
- [3]. New world record for solar cell efficiency at 46% – French-German cooperation confirms competitive advantage of European photovoltaic industry [WWW].
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html> (23.04.2017)
- [4]. X-Series Solar Panels [WWW].
<https://us.sunpower.com/sites/sunpower/files/media-library/data-sheets/ds-x21-series-335-345-residential-solar-panels-datasheet.pdf> (23.04.2017)
- [5]. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018 [WWW].
<http://www.webcitation.org/6QGSvAF7w> (23.04.2017)
- [6]. DOE Closes on Four Major Solar Projects [WWW].
<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2011/09/doe-closes-on-three-major-solar-projects.html> (23.04.2017)
- [7]. Philadelphia likes solar powered „Big Belly“ [WWW].
<http://www.nbcnews.com/id/32110044> (23.04.2017)
- [8]. AT&T installing solar-powered charging stations around New York [WWW].
<http://www.idownloadblog.com/2013/06/19/att-installing-solar-charging/> (23.04.2017)
- [9]. Chevrolet Dealers Install Green Zone Stations [WWW].
<http://www.autotrader.com/car-news/chevrolet-dealers-install-green-zone-stations-114924> (23.04.2017)

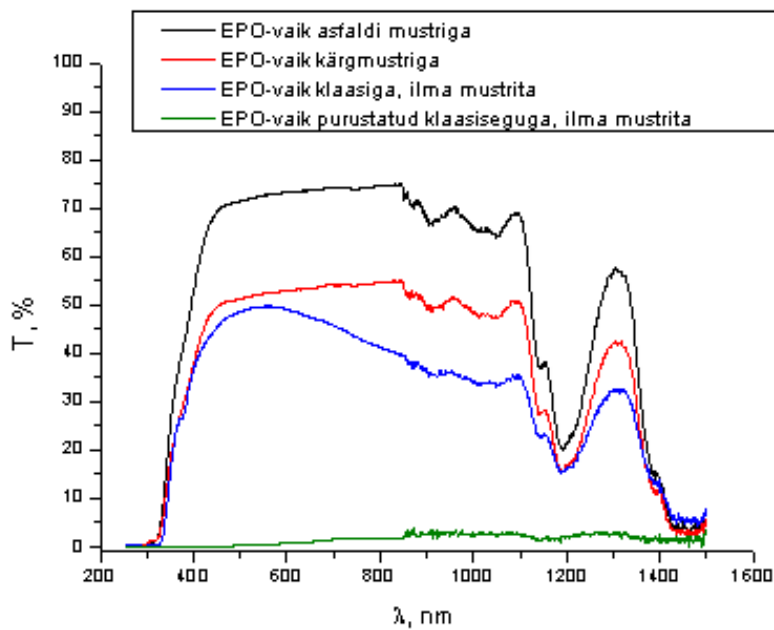
- [10]. Solar Powered Parking Meters Make Downtown Debut [WWW].
<https://communityimpact.com/southwest-austin/recent-news/5158-solar-powered-parking-meters-make-downtown-debut/> (23.04.2017)
- [11]. Solar Water Pumping [WWW].
<http://www.builditsolar.com/Projects/WaterPumping/waterpumping.htm> (23.04.2017)
- [12]. Solar-Powered Parking Meters Installed [WWW].
<http://www.10news.com/news/solar-powered-parking-meters-installed> (23.04.2017)
- [13]. Smil, V. Energy at the Crossroads – *Conference on Scientific Challenges for Energy Research, Paris, France, May 17-18, 2006* [WWW].
http://home.cc.umanitoba.ca/~vsmil/pdf_pubs/oecd.pdf (23.04.2017)
- [15]. Tee seisundinõuded. - *Riigi Teataja* I, 15.07.2015, 13.
- [17]. Smith, Z., Taylor, K. Renewable and Alternative Energy Resources A Reference Handbook. Santa Barbara: ABC-CLIO, Inc., 2008
- [18]. Fritts, C. On a New Form of Selenium Photocell - *American Journal of Science*, 1883, 26 (3), 465-473.
- [19]. Einstein, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt - *Annalen der Physik*, 1905, 17 (6), 132–148.
- [20]. April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell [WWW]. <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm> (25.04.2017)
- [21]. de Vos, A.; Pauwels, H. On the thermodynamic limit of photovoltaic energy conversion - *Applied Physics*, 1981, 25, 119-125.
- [22]. Rühle, S. Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells – *Solar Energy*, 2016, 130, 139-147.
- [23]. Will We Soon Be Riding on Solar Roads? The Idea Gains Traction [WWW].
<http://news.nationalgeographic.com/energy/2016/03/160310-will-we-soon-be-riding-on-solar-roads/> (27.04.2017)

- [24]. World's first solar road opens in France: It's ridiculously expensive [WWW]. <https://arstechnica.com/cars/2016/12/worlds-first-solar-road-opens-in-france/> (27.04.2017)
- [25]. Wattway: first trial section in western France [WWW]. <http://www.wattwaybycolas.com/wp-content/uploads/2015/11/Wattway-CP-GB-June2016.pdf> (27.04.2017)
- [26]. First ever US Wattway solar road installed in Georgia [WWW]. <http://www.wattwaybycolas.com/wp-content/uploads/2016/12/20161220-CP-Wattway-Georgia-US.pdf> (27.04.2017)
- [27]. Ségolène Royal, Minister of Environment, Energy and Sea, unveils one kilometer of Wattway solar road in Normandy, (France) [WWW]. <http://www.wattwaybycolas.com/wp-content/uploads/2016/12/20161222-Communiqué-de-presse-Inauguration-Tourouvre-GB.pdf> (27.04.2017)
- [28]. Development - SolaRoad [WWW]. <http://en.solaroad.nl/development/> (27.04.2017)
- [29]. Technology – SolaRoad [WWW]. <http://en.solaroad.nl/technology/> (27.04.2017)
- [30]. Wattway by Colas | Paving the Way to Tomorrow's Energy [WWW]. <http://www.wattwaybycolas.com/en/> (27.04.2017)
- [31]. SolaRoad opens [WWW]. http://www.solaroad.nl/wp-content/uploads/2013/06/PressReleaseSolaRoadOpened_21Oct.pdf (27.04.2017)
- [32]. SolarRoad produces more energy than expected [WWW]. <http://us7.campaign-archive2.com/?u=fc23dec47019a23d70031492e&id=39c5c2acf8> (27.04.2017)
- [33]. Specifics – SolarRoadways [WWW]. <http://www.solarroadways.com/Specifics/> (27.04.2017)
- [34]. FAQs- Solmove [WWW]. <http://www.solmove.com/faqs/> (27.04.2017)
- [35]. Halliday, Resnick, Walker.(2012). Füüsika Põhikursus. Kd 2. Tallinn : Printon Trükikoda

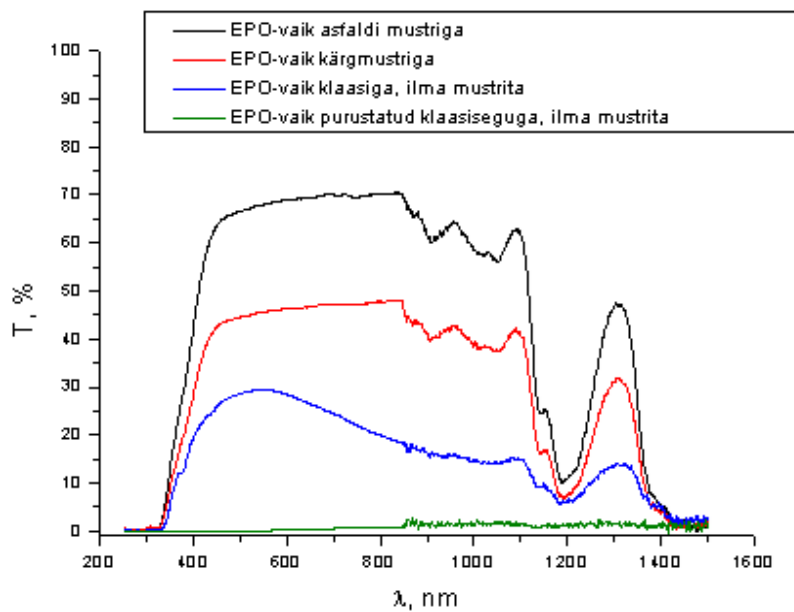
LISA 1. Optilise läbilaskvuse katsete tulemused



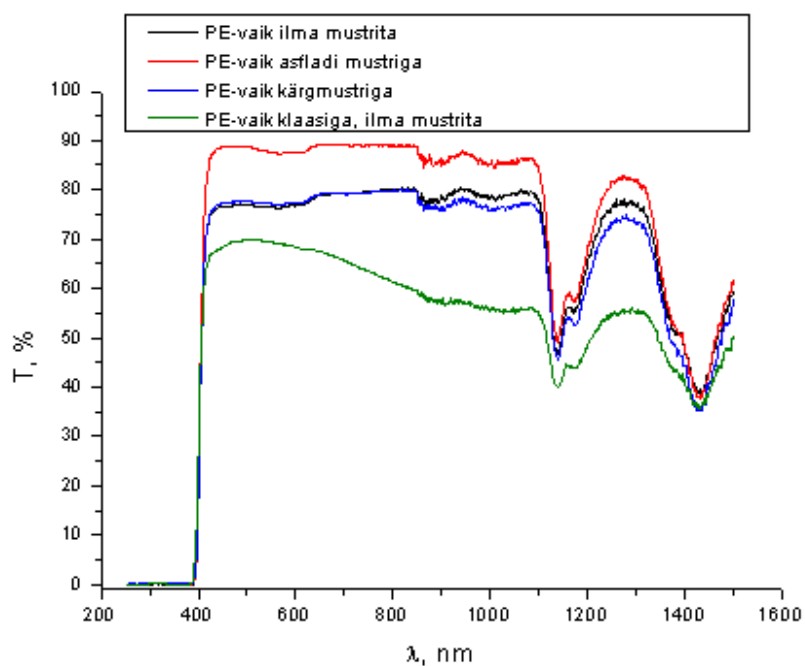
Joonis 14. EPO-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 1 cm optilise läbilaskvuse katsetele



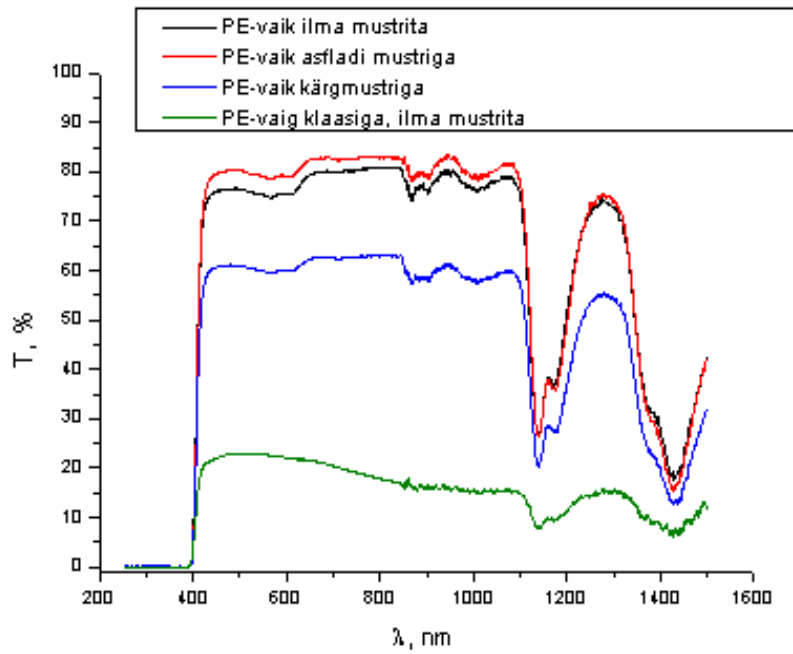
Joonis 15. EPO-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 2 cm optilise läbilaskvuse katsetele



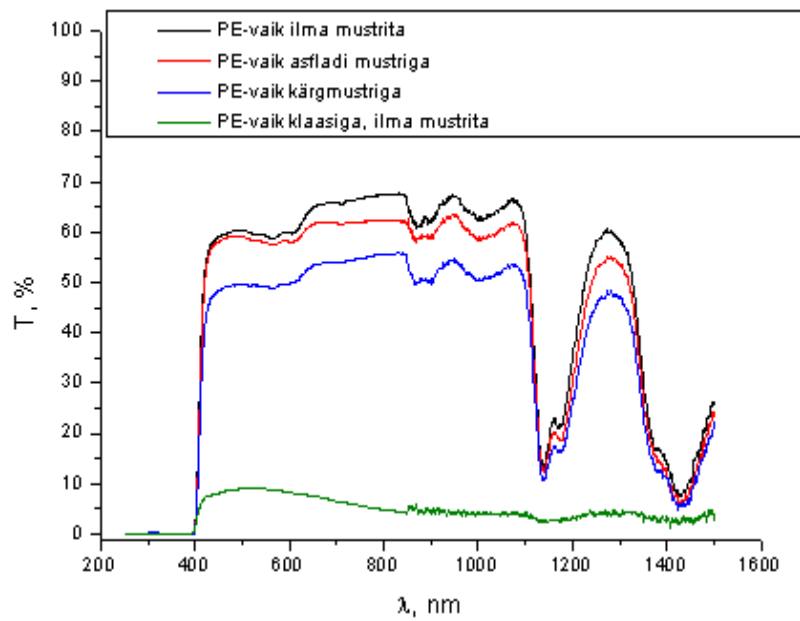
Joonis 16 EPO-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 3 cm optilise läbilaskvuse katsetele



Joonis 17. PES-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 1 cm optilise läbilaskvuse katsetele



Joonis 18. PES-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 2 cm optilise läbilaskvuse katsetele



Joonis 19. PES-vaigu põhised katsekehad kõrgusega 3 cm optilise läbilaskvuse katsetele