



Nordic e-pavement teadus- ja arendusprojekt

Lõpparuanne

Projektijuht: Allan Lahi

Maanteeameti projektijuht: Taavi Tõnts

Töö on koostatud Maanteeameti teede arengu ja investeeringute osakonna tellimusel

Tallinn

2017

Projektijuht:

Allan Lahi

Töös osalesid:

TTÜ:

Ain Kendra – lektor, projekti tehniline juht

Arvo Mere - vanemteadur

Nicolae Spalatu – teadur, doktorant

Viktoria Vassiljeva - doktorant/insener;

Mihkel Viirsalu - doktorant/insener;

Professor Andres Krumme

Professor Malle Krunk

Riho Eichfuss – maanteede eriala magistrant

Raimond Kamm – maanteede eriala magistrant

TTÜ/TKTK

Sven Sillamäe lektor, doktorant

TKTK

Rauno Leppik - teedeehituse eriala tudeng;

Marko Ehrlich - teedeehituse eriala tudeng

AS Teede Tehnokeskus

Henri Prank

Mark Meikas

© Maanteeamet, 2017

Töö tellija on Maanteeamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Maanteeameti seisukohaga ega väljenda Maanteeameti poolt heakskiidetud arvamusi. Vastutus antud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest lasub täies mahus töö teostajal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

Sisukord

1	Päikeseelektrit tootvate kergliikluste ja maanteede arengutest ja tehnoloogiatest	4
1.1	Kirjanduse ja tehnoloogiate ülevaade	4
1.2	e-katendi võimalikud sideained	5
1.3	Vaigud A kattekihi valamiseks	7
1.4	Asfaldi tekstuuri skaneerimine ja A kattekihi positiivse matriitsi valmistamine	9
2	Süsteemi elementide arendus	11
2.1	Tee infrastruktuuri energiatarve	11
2.2	A-tüüpi kattega e-tänavakivide väljatöötamine	12
2.3	2 cm x 2 cm proovikehade elektrilised mõõtmised	21
2.4	15 cm x 15 cm A-katendi ettevalmistus	29
2.5	B-tüüpi katte väljatöötamine	42
3	Demoseadme ettevalmistus	50
3.1	Üldosa	50
3.2	A-tüüpi kattega demoseade	51
3.3	B-tüüpi katsekeha valmistamine	61
3.4	Visuaalse efekti rakendus (foor, LED; presentatsioon)	67
4	Teadusprojekti võimalikud edasiarendused	71
4.1	E-kergliiklustee elemendi ehk e-kivi elektriliste ühenduste kontseptsioon.	71
4.2	E-pavement perspektiividest	74
5	Lisa 1	81
	Development of the technologies of the PV roads and pavements	81
	Solar road panels	82
	Description of relevant commercial technologies	87
	Conclusions	95
	Kokkuvõte	96
	References	97

Sissejuhatus

e-Pavement projekt sündis Maanteeameti initsiatiivil, kelle huvi on populariseerida teedeinseneri elukutset. Arenduses osalesid TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituudi, Materjalide ja keskkonnatehnoloogia instituudi, Innovatsiooni- ja ettevõtluskeskuse MEKTORY ning Tallinna Kõrgema Tehnikakooli teadlased ning tudengid.

Kui USA, Prantsusmaa ja Hollandi varasemad lahendused kasutasid pinnakattena klaasi ning olid asetatavad tee peale siis TTÜ lahendus e-Pavement kasutab plastikkomposiiti kapseldatud päikeseelektri (PV ehk photovoltaic) elemente, mida saab installeerida tee sisse. Plastik võimaldab anda teekatte pealiskihile kuju, mille puhul on hõõrdejõud koos valguse läbilaskvusega suurimad. Lisaks laseb plastik läbi ka valgusspektri osa, mis klaasi puhul lihtsalt neeldub.

Päikeseelektrit tootvad teekatendid on mõeldud kasutamiseks kergliiklusteedel. Piirkondades, mis jäävad elektrivõrkudest eemale, võib nende kasutamine olla tasuv juba ainuüksi seetõttu et ei ole tarvis vedada kallist võrgukaabeldust. Valgel ajal toodetud energia salvestatakse akudesse ning seda kasutatakse pimedas tee infrastruktuuri elektritoiteks. Arvutuslikult peaks e-Pavement suutma päevasel ajal, elektrienergia tootmisel sulatada pealesadavat lund kuni -7 külmakraadini.

Esimene ruutmeeter katendit installeriti 29.09.2017 TTÜ Innovatsiooni- ja ettevõtluskeskuse MEKTORY ette. Eeloleval talvel selgub, kuidas käitub e-Pavement praktilistes oludes. Edasise arenduse käigus saab katendisse liita öiseks lume ja jää sulatamiseks vajalikud kütteelemendid.

Käesolev lõpp-aruanne koosneb neljast osast. Esimeses osas esitatakse kirjanduse ülevaade. Teises osas esitatakse kokkuvõtte erinevate katendimaterjalide ja –lahenduste laboratoorsetest uuringutest. Kolmandas osas antakse ülevaade praktilisest arendusest ca 1 m² suuruse katendi valmistamisel. Neljandas osas tehakse kokkuvõtte arendusest ning pakutakse välja edasise arenduse teed.

1 Päikeseelektrit tootvate kergliiklusteede ja maanteede arengutest ja tehnoloogiast

1.1 Kirjanduse ja tehnoloogiate ülevaade

Varasemate lahenduste ja kasutatavate tehnoloogiatega ülevaade on toodud Lisas 1. Lühikokkuvõtte:

e-katend kui alternatiivne teekatte võib olla odavam variant, kui see asendada kattena vana teekatte asemele. Siinkohal tuleb silmas pidada ka e-maanteekatte energiatootmisest tulenevat kasu. Selline teekatte asendus kerkib päevakorrale teekatte korralise uuendamise ajal. Mõnel juhtumil on teekatte uuendamine ajaliste tsüklitega limiteeritud ja siis on vaja e-teekattelahendust kaitsta kui perspektiivset lahendust teekattele.

Paljudes maades tähendab sisegeograafiline ühendamine maanteeühendusi. Seetõttu võiks arendada ka e-teekattega teid nende ühendusteede kõrvale. See on aktuaalne ka Põhjamaades, kus eespool käsitletud tehnilised lahendused on võimalikud. Põhjamaad on aktiivsed kaasalööjad fotovolt tehnoloogiates ja uurimistöodes. Kombineeride meie teadmisi fotovolt tehnoloogias koos kogemustega Prantsusmaalt ja Hollandist, kus on edukalt tehtud esimesed suuremahulised katsetused e-maanteekatetega, suudame näidata e-teekatte kasutamise võimalikkust Eestis.

E-maanteebate võimaldab ja nõuab:

1. Luua intelligentne, varjatud infrastruktuur, mis on kulutusi tagasiteeniv.
2. Luua intelligentne, varjatud, detsentraliseeritud isekorrastuv energiavõrk.
3. Vähendada olemasolevate fossiilsete- ja tuumaenergiajaamade vajadust.
4. Vähendada fossiilsete kütuste tarbimist.
5. Vähendada kasvuhoonegaaside hulka.
6. Pakkuda turvalist liikluskeskkonda.
7. Pakkuda elavale loodusele kaitset.
8. Kolme kompanii Solar Roadways, Wattway, SolarRoad e-teekeatted on lahendatud erinevalt. Ükski ei kasuta energia salvestamist.
9. Moodullahendus on eelistatud.
10. Elektrilised ühendused moodulite vahel on jootmisvabad
11. E-teekeatte remont peab olema kergesti teostatav.
12. Põhjamaades pole e-teekeatet veel katsetatud.

1.2 e-keatendi võimalikud sideained

Sissejuhatus

Eesmärgiks oli biobituumeni valdkonna kirjanduse uuring, leida võimalikult palju infot biobituumeni ning teiste alternatiivsete sideainete kohta ja nende sobivusest antud projekti. Peamiseks kriteeriumiks antud projekti sideainele on selle valguse läbilaskevõime ning tehnilised omadused, mis vastaksid praegu kasutusel olevale sideainele.

1.2.1 Biobituumen

Biobituumen vetikatest

Biobituumenit on võimalik toota vetikatest. Kuigi keemiline koostis võib erineda täiesti naftal põhinevast bituumenist, täheldati siiski sarnaseid viskoelastsusomadusi. Kõige suuremaks probleemiks on värvus. Tulemuseks on tumedat värvi saadus, mis ei rahulda antud projekti puhul meie nõudmist.

<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.5b00088>

<http://www.forconstructionpros.com/article/12069524/bio-asphalt-made-from-algae-is-the-future-of-green-roads>

Biobituumen ligniinist

Ligniiniist võib saada uus loodussõbralik sideaine bituumenile. Mitmetes artiklites ja väljaannetes on kirjeldatud ligniini, millega on võimalik asendada naftal põhinevat bituumenit. Ligniini sarnaneb naftal põhinevale bituumenile, tal on sarnased omadused ning erinevalt naftast, mis ei ole taastuv maavara, on ligniini taastuv maavara, mida on võimalik omandada taimedest. Ligniini on hea alternatiiv praegu kasutusel olevale bituumenile. Lähemalt uurimisel selgub, et kuumutamisel muutub ligniini tumedaks, mis välistab võimaluse, et me saaksime kasutada ligniini sideaine loomisel.

<http://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=992>

<https://www.wur.nl/en/article/Bioasphalt.htm>

1.2.2 Sideaine toiduõli jääkidest

Alternatiiviks traditsioonilisele bituumenile, on hakatud kasutama toiduõli jääke. Säästev suhtumine loodusesse on aktuaalne teema ning ainete ja toodangu taaskasutamine uute saaduste tootmiseks on nii loodussõbralikum kui finantsiliselt odavam ja kasulikum. Lähemal uurimisel selgub, et toiduõli kasutamine sideainena parandab kõiki aspekte, viskoosust, naket, vastupidavust, vananemis kindlust jne. Toiduõli pakub head alternatiivi, kuid toiduõli kuumutamisel muutub see tumedaks, mis välistab võimaluse, et kasutada antud projektis sideainena toiduõli.

<http://www.jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/8007/4915>

1.2.3 Sünteetilised sideained

Üheks heaks alternatiiviks võib pidada sünteetilisi sideaineid. Sünteetilistel sideainetel võivad tulemuseks olla paremad omadused, kui seda on praegu kasutusel oleval traditsioonilisel bituumenil. Süsivesinik vaik annab paremad omadused viskoossuses, parem nakkuvus, kleepuvus, sidusus ja suurendab vastupidavust. Praegu on põhiliselt sünteetilist sideainet kasutatud arhitektuursetel eesmärkidel ja kauniste urbanistlike lahenduste teostamiseks. Sünteetilist sideainet toodetakse sarnaselt traditsioonilisele bituumenile, samade seadmetega. Sünteetilist sideainet on võimalik toota läbipaistvana ning samuti on Eestis olemas ettevõtte „Novotrade Invest AS“, mis tegeleb sünteetiliste sideainetega.

http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/384/rap105.pdf

<http://www.vnk.ee/index.php/en/synthetic-binder>

1.2.4 Evizero

Evizero on innovaatiline keskkonnasõbralik sünteetiline sideaine, mida saab kasutada keskkonnasõbraliku asfaldi tootmisel. Seda on saada mitmetes värvitoonides ja samuti ka läbipaistvat. Välja on toodud, et sellega saab edukalt asendada bituumenit. Antud sideainet on juba edukalt kasutatud mitmel projektidel. Kuna see toode jääb läbipaistvaks, siis oletati, et see võib sobida e-Pavement lahendusel sideaineks.

<http://www.evizero.com/en/>

<http://www.evizero.com/download/technical-data-sheet-evizero.pdf>

1.2.5 Kokkuvõte sideainetest

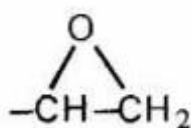
Uurimisel selgus, et biobituumen võib pakkuda head alternatiivi praegu kasutusel olevale traditsioonilisele bituumenile, mida toodetakse naftast. Kahjuks, ei ole võimalik luua biobituumenit, mis oleks läbipaistev, lubades valgusel läbi paista. Sünteetiliste sideainete uurimisel selgus, et neil on head tehnilised omadused, mis sarnanevad bituumeni omadele, samuti on võimalik valmistada läbipaistvat sünteetilist sideainet. Üheks plussiks on, et Eestis kohapeal on olemas ettevõtte, mis tegeleb sünteetiliste sideainetega. Projekti tarveks hangiti Evizero kuid, nagu näha p2.5, ei sobinud ka see sideaineks.

1.3 Vaigud A kattekihi valamiseks

A kattekihi valmistamiseks on valiti ja soetati optiliste omaduste katsekehade valmistamiseks epoksüüdvaik, polüestervaik ja polüüurea tüüpi vaik. Vaikude omaduste kirjeldus on esitatud järgnevates alampunktides. Lisaks sellele on varutud vaigu täiteainena kasutamiseks karastatud klaas ning nõ. „liivapritsis“ kasutatav klaasipuru. Soetatud on silikoon optiliste omaduste määramise katsekehade vormide valmistamiseks.

1.3.1 Epoksüüdvaik (kahekomponendiline)

Keemiline struktuur:



Lühikirjeldus:

Termoreaktiivne polümeer, mis võib kõveneda ka toatemperatuuril. Suurepärane nake enamuse materjalidega, eriti hea vastupidavus enamus komponentidele ja unikaalne kombinatsioon tugevusest ja sitkusest. Tüüpiline süsteem koosneb kahest vedelast komponendist: polümeerist ja kõvendist.

Tüüpiline kõvendi:

Alifaatsed amiinid või polüamiidid. Spetsiaalsed kõvendid (nt alifaatsed amiinid, polümerkaptanid, fluoriidpõhised ühendid) võib kasutada kui vajatakse eriline omadus produktile nt keemiline vastupidavus erilise kemikaali vastu või kiire kõvenemine

Kõvenemisreaktsioon:

Eksotermiline (eraldub 22000 kalorit iga 188g resini kohta)

Tüüpilised omadused:

Viskoossus (P)	50-150
Tõmbetugevus (MPa)	65-90
Pikendamine katkemisel (%)	2,5-6,5
Kuumusdeformatsioon (°C)	laguneb 300°C juures

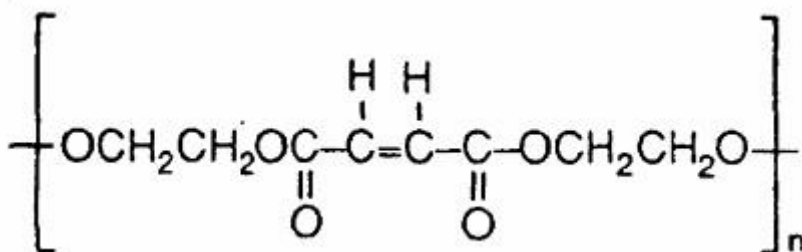
Informatsioon tootjalt:

Vaik	UV VA valuvaik (UV kindel)
Kõvendi	UV VB epo kõvendi (UV kindel)

Retsept	100g vaiku peale 37g kõvendit
Tööaeg (tund)	5
Gel-i aeg (tund)	10
Kuivamisaeg (tund)	48
Minimaalne töötemperatuur (°C)	15

1.3.2 Polüestervaik (kahekomponendiline)

Keemiline struktuur:



Lühikirjeldus:

Küllastamata polüestrid on polümeerid, mis koosnevad dihüdreeritud alkoholi ja dikarboksüülhappe korduvatest ühikutest. Üks või enam hapetest peab sisaldama kaksiksidet ristsidumisreaktsiooni toimumiseks ja termokõvenemiseks. Tüüpiline süsteem koosneb kahest komponendist, pulbrilisest põhiainest ja vedelast sidumisainest

Kõvenemisreaktsioon:

Reaktsiooni toimumiseks toatemperatuuril on vaja lisada initsiaatorit (orgaanilised peroksiidid), promootorit (kiirendi) (metallühendid ja amiinid) ja katalüsaatorit

Tüüpilised omadused:

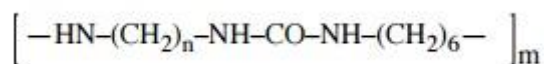
Kõvadus	40-49
Tõmbetugevus (MPa)	59-77
Katkemooduli (MPa*1000)	3,45-3,59
Pikendamine katkemisel (%)	1,9-5,5
Kuumusdeformatsioon (°C)	78-121

Informatsioon tootjalt:

Vaik	Akrüül polüestervaik
Kõvendi	M50
Retsept	0,5 kuni 1,5% kõvendit

1.3.3 Polüüurea (neljakomponendiline)

Keemiline struktuur:



Lühikirjeldus:

Polüüurea on orgaaniline polümeer, mis moodustub reaktsioonil polüeeter aminorühma ja isotsüanaadi vahel, moodustades kas plasti- või kummimoodi ainet. Toote kasutusala on samad, mis on PU, epoksüüd- ja polüestervaikudel. Ei sobi kokkupuuteks järgmiste ainetega: halogeenitud ja mittehalogeenitud lahustid, happed alla 4 pH ja alused üle 11 pH, tugevad orgaanilised ja anorgaanilised haliidid, orgaanilised anhüdriidid, isotsüanaadid ja aldehüüdid. Klaasistumistemperatuurid -17 ja +248°C, vastavad pehme ja kõva plokkidele elastomeeri koostises. Põleb otse leegis ja isekustub ilma leegita. Aromaatseid struktuure näitavad värvi muutust (pind muutub kollaseks) UV valguse kasutamisel 3800 tunni pärast +50°C juures (lambid on UVB-313). Alifaatsed struktuurid ei muutu ja 6000 tundi pärast samadel tingimustel elastomeer näitas üle 90% tugevusomadustest ja värv ei muutunud. Kannatab 9 tsükli -20 kuni +50°C ja omadused ei muutu. Kuna selle polümeeri ajalugu on lühike, on hetkel kindlaks määratud, et 20 aastat on tooted kasutuskõlblikud.

Tüüpilised omadused:

Kõvadus	30-80
Kuumusdeformatsioon (°C)	121
Töötemperatuur (°C)	176

Informatsioon tootjalt:

Neljakomponendiline (alifaatne polümeer). Kahe komponentide osade muutes saab reguleerida kõvenemiskiirust ja kahe komponentide osade muutes saab reguleerida lõpptoote kõvadusomadusi

1.4 Asfaldi tekstuuri skaneerimine ja A kattekihi positiivse matriitsi valmistamine

Eesmärk oli töötada välja kattekihi A-variandi mudel päikesepatarei mooduli peale kandmiseks. Selleks teostati järgmised etapid:

1. Vajaliku haardeteguriga pinna tekstuuri fikseerimine.
 - Vähemalt 15 cm x 15 cm asfaltkatte pinnast jäljendi tegemine (Teede Tehnokeskuse katsekeha)
2. katendi tekstuuri 3D mudeli loomine

3. alustati katseid kattekihi A-variandi tehnoloogia väljatöötamiseks – 4 cm paksusest plastist (2 cm x 2 cm) erinevate katse-eksemplaride koostamine, pind asfaldi tekstuuriga, optiliste omaduste katsetamiseks.

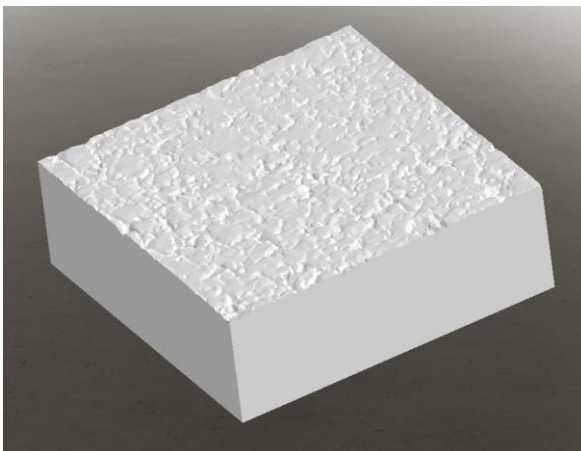
TTÜ-sse jõudis Teede Tehnokeskuse katsekeha mõõtmetega 30x25 cm (Joonis 1.1).



Joonis 1.1. Katsekeha Teede Tehnokeskusest

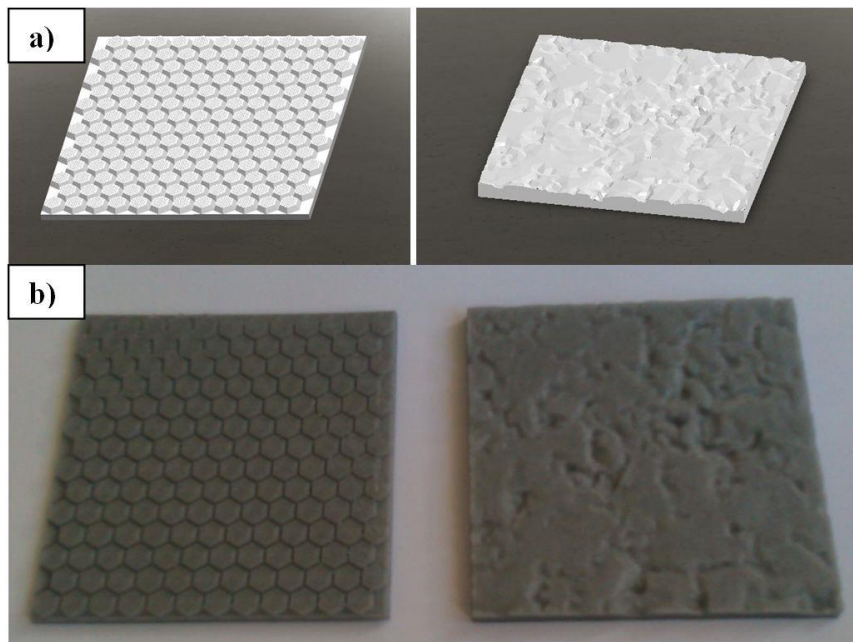
Katsekeha puhastati paberijääkidest ning valiti optimaalne pind skaneerimiseks suurusega 16x16 cm. Skaneerimine teostati TTÜ Mehaanika ja tööstustehnika instituudis skanneriga Atos II 400.

Skaneeritud fail teisendati raaljoonestusprogrammis töödeldavaks mudeliks (Joonis 1.2).



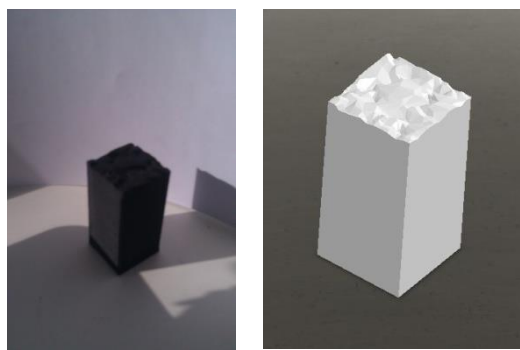
Joonis 1.2. 3D mudel skaneeritud katsekehast

Mudelist valiti esmalt 75x75 mm laiune ala, mille põhjal prinditi 3D printeriga Wanhao Duplicator välja esimene pinnanäidis kontrollimaks antud tekstuuri printimisvõimalust. Materjaliks kasutati PLA (polülaktiidhape) kuna printer oli antud momendil vastavalt sellele polümeerile seadistatud. Paralleelselt skaneeritud mudeliga töötamisele pakuti alternatiiviks töötada välja arvutiga joonestatud mudel, mida oleks võimalik kujundada vastavalt optiliste omaduste parendamise eesmärgi silmas pidades. Muutes pinnastruktuuri on võimalik muuta valguse langemisnurka päikeseplatadele. Joonestatud mudelid ning prinditud kehad joonisel 1.3.



Joonis 1.3 CAD mudelid a) ning nendest prinditud näidised b)

Skaneeritud mudelist valiti välja optimaalse pinnastruktuuriga 2x2 cm laiune ala, millest koostati arvutiprogrammis mudel selle edasiseks väljaprintimiseks. Prinditi välja esimene valuvormi valmistamiseks vajamineva positiivi näidis. Materjaliks kasutati ABS plastikut. Positiivi näidis joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Positiivi CAD mudel vasakul ning prinditud positiiv paremal

2 Süsteemi elementide arendus

2.1 Tee infrastruktuuri energiatarve

Elektritarbijatena oleme kaalunud kergliiklusele suunatud rakendusi, arvestades, et sõltumatu toitega rakendus on vajalik seetõttu, et elektrivõrgu ühendused on liiga kaugel või nõutakse ühendamisel ebamõistlikku liitumistasu. Seega, on kavandatud põhiliseks kergliikluse (jalakäijate) ületuskohtade, ülekäiguradadega seonduvad objektid alljärgnevas:

- Ülekäiguraja kohtvalgustus, võimalik kasutusrežiim sõltuks tegelikust jalakäijate hulgast hämaral või pimedal ajal. Päeval akumuleeritav energia peaks tagama puuduliku valgusega ajal lisavalgustuse. Valgustuse lülitus on tõenäoliselt vaja teha vastava liikumisanduriga. Liikumisanduri voolutarve on minimaalne, kuid selle juhtimissüsteem siiski vajab rohkemat. Valgustitele vajalik ca 50...100W
- Ülekäiguraja valgusfoor, voolutarve on ööpäevaringne, kuid pimedal ajal kombineerides ka valgusfoori töörežiimi liikumisanduriga, on võimalik foor välja lülida. Valgusfoorikomplekti voolutarve on ca 100W suurusjärgus, kuid sellele lisandub juhtmoodul, mis tänastes kasutustes võib võtta 100...300W. Lihtsama rakenduse korral ei oleks tarvis sedavõrd kompleksset lahendust ja on võimalik töötada välja oluliselt väiksema võimsustarbega juhtmoodulid.
- Valgustid teekatte pinnas, kaitsekihi all – dubleerimaks valgusfooride tulesid olukorras, kus nutiseadmete kasutajad ei tõsta enne teeületust pilku piisavalt kõrgele. Voolutarve sõltub valgustite tihedusest, hinnanguliselt ca 5W meetrile, saarega ülekäigurajal on seega neli liini ca 3-meetrise laiuses. Kokku siis ca 60W. Juhtimine fooriblokist.
- Kiirusnäidik (kiirusmõõteseade näidu visualiseerimisega) enne asulat, kus šikaaniga võetakse kiirus maha, võimsustarve hinnanguliselt 50W, kuid summaarne vajadus sõltub konkreetse tee liiklussagedusest. Õnneks on põhiline liiklus päevane, mistõttu on öine voolutarve mis tuleb katta akudega, väiksem.

Autonoomne valgustus võiks olla vajalik veel täiendavalt nii kiirusnäidikute kui VMS-märkide puhul (sh koos liikumisanduritega), kuid nendel juhtumitel on tõenäoliselt otstarbekam kasutada päikesepaneele ja akusid komplektis, mitte seoses katenditega. Kiiruspiirangu- ja tsentraalselt juhitavate märkide puhul on tarvilik ka sidemoodul.

Akud on võimalik paigutada maa sisse, ilmselt väljaspool otseselt ülekäigurada, vaid kivisillutisega kaetud alale.

2.2 A-tüüpi kattega e-tänavakivide väljatöötamine

2.2.1 A – tüüpi katte tehnoloogia väljatöötamine

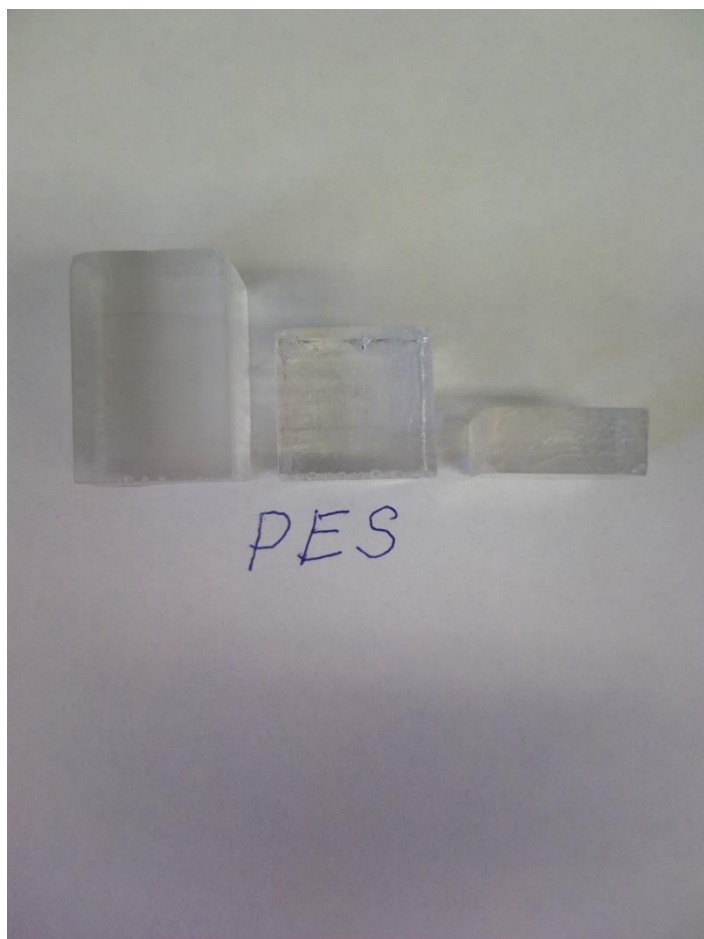
Antud etapi käigus mõõdeti 2 cm x 2 cm katsekehade optilisi spektreid ja valiti A-tüüpi kattele sobiv koostis üleviimiseks 15 cm x 15 cm pinnale

A-tüüpi katendite katsekehad valmistati A. Krumme grupi poolt. Sama markeeringuga valmistati 2cm x 2cm kolme erineva paksusega 1cm, 2cm ja 3cm katsekehad optilise läbipaistvuse mõõtmiseks.

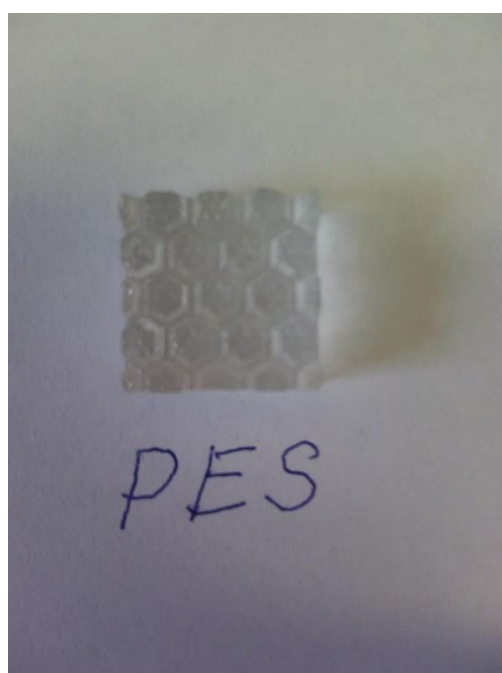
Tabel 2.1 Katsekehade võimalikud materjalid

Nr	Material	code	Preparing method
1	EPO		
2	PES		
3	Polyester	07.04_2311	1,5:100 without vacuum slowly stirred
4	Polyester	07.04_2211	1,5:100 without vacuum slowly stirred
5	Polyester	07.04_2111	1,5:100 without vacuum slowly stirred
6	Epoxy resin	07.04_1321	37:100 without vacuum slowly stirred, 1) mould filled with glass 2) mixture poured very slowly
7	Epoxy resin	07.04_1221	37:100 without vacuum slowly stirred, 1) mould filled with glass 2) mixture poured very slowly
8	Epoxyd resin	07.04_1121	37:100 without vacuum slowly stirred, 1) mould filled with glass 2) mixture poured very slowly
9	Poyester resin, pattern	07.04_2313	15:100 with pattern, without vacuum +50 hardened 16 h, slowly stirred, mixed
10	Poyester resin, asphalt	07.04_2312	15:100 with pattern, without vacuum +50 hardened 16 h, slowly stirred, mixed
11	Poyester resin, pattern	07.04_2213	15:100 with pattern, without vacuum +50 hardened 16 h, slowly stirred, mixed
12	Poyester resin, asphalt	07.04_2212	15:100 with pattern, without vacuum +50 hardened 16 h, slowly stirred, mixed
13	Poyester resin, pattern	07.04_2113	15:100 with pattern, without vacuum +50 hardened 16 h, slowly stirred, mixed
14	Poyester resin, asphalt	07.04_2112	15:100 with pattern, without vacuum +50 hardened 16 h, slowly stirred, mixed
15	Polyester resin	07.04_2221	1.5:100, without vacuum, slowly stirred 1) mould filled with glass 2) mixture poured very slowly
16	Polyester resin	07.04_2321	1.5:100, without vacuum, slowly stirred 1) mould filled with glass 2) mixture poured very slowly
17	Polyester resin	07.04_2121	1.5:100, without vacuum, slowly stirred 1) mould filled with glass 2) mixture poured very slowly
18	EPO asphalt	07.04_1212	37:100, pattern, without vacuum, slowly mixed, stirred
19	EPO asphalt	07.04_1312	37:100, pattern, without vacuum, slowly mixed, stirred
20	EPO pattern	07.04_1313	37:100, pattern, without vacuum, slowly mixed, stirred
21	EPO pattern	07.04_1213	37:100, pattern, without vacuum, slowly mixed, stirred
22	EPO pattern	07.04_1113	37:100, pattern, without vacuum, slowly mixed, stirred
23	EPO asphalt	07.04_1112	37:100, pattern, without vacuum, slowly mixed, stirred
24	EPO	07.04_1231	100:37, resi:brocen glass
25	EPO	07.04_1331	100:37, resi:brocen glass
26	EPO	07.04_1131	100:37, resi:brocen glass

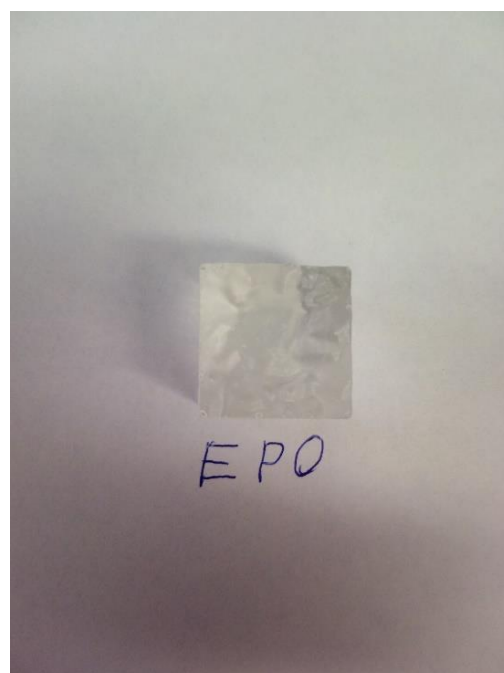
Firmast NAPS SOLAR ostetud päikeseelement on 16 cm x 16 cm, paksusega 0,18 mm, monokristalsest ränist, kasuteguriga 20.2 %, nominaalse pingega 0.5 V ja maksimaalse vooluga 10 A nn AM1.5 päikesekiirguse all (1000 W/m²). Kontrollimisel ilmnes, et tegelik kasutegur on 13%. Päikesepaneeli energiatootlikkuse seisukohalt on oluline teada kogu külgneva/katva konstruktsiooni optilisi parameetreid. Tähtsaim optiline parameeter on nn aknakihi läbilaskvus nii integraalses mõttes, kui ka spektraalses mõttes. Kuna kasutatav monokristalse räni plaat on vaid 0.18 mm paksune ja üsna habras, siis tuleb see pakkida nii ülevalt kui alt ja ka külgedelt läbipaistva materjaliga, mis annab sellele elemendile mehaanilise tugevuse ja kulumiskindluse. Edaspidi nimetame seda katet kapsliks. Antud etapi põhiülesanne on just sellise materjali leidmine, mis rahuldaks 1) mehaanilised tingimused ja 2) optilised tingimused. Selleks valmistati A. Krumme grupi poolt erinevtest polümeeridest katsekehad ja lisaks ka erineva pinnatöötlemisega katsekehad (joonised 2.1-2.3). Mõõdeti nn koguläbilaskvust, kasutades UV-VIS-NIR spektromeetrit Jasco 670 koos optilise sfääriga, lainepikkuste vahemikus 200nm-1600nm.



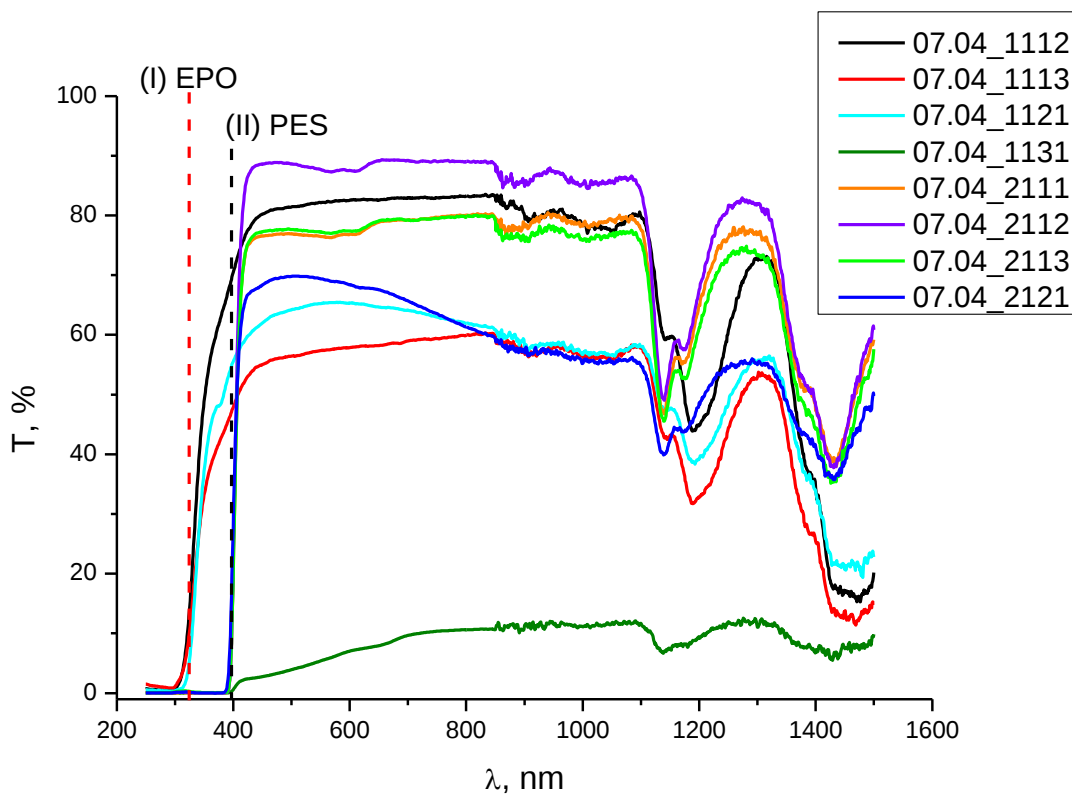
Joonis 2.1 Polüesteralusel valmistatud kolme erineva paksusega proovikehad optilisteks mõõtmisteks



Joonis 2.1 Polüesteralusel proovikeha struktureeritud pealispinnaga

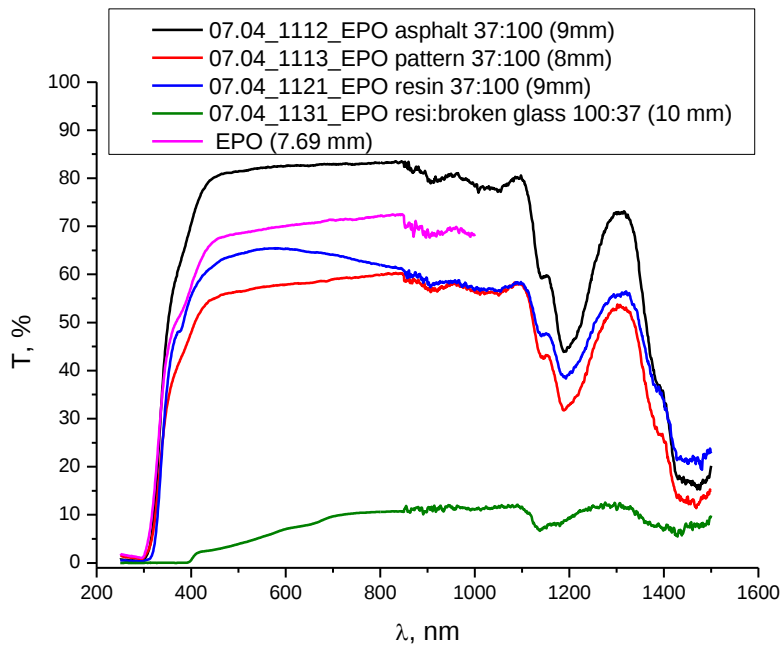


Joonis 2.3 EPO alusel proovikeha imprinditud asfaldi pinnaga



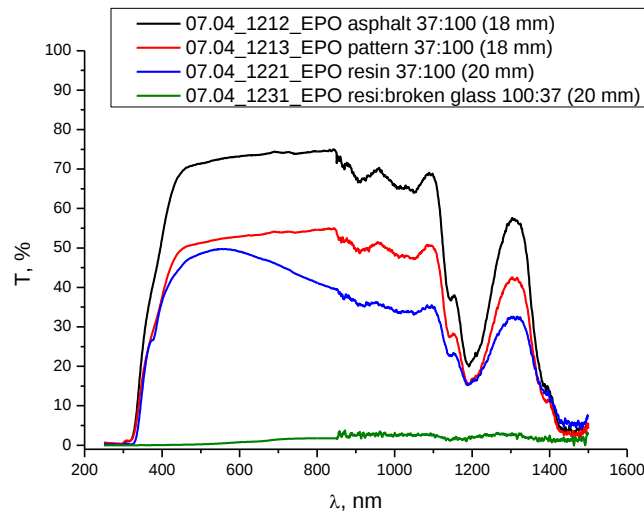
Joonis 2.2 Koguläbilaskvus ~1cm paksusega proovikehadele

Joonisel 2.4. on näha kahte trendi spektraalse läbilaskvuse seisukohalt. Proovikehadel 0704_1112, 0704_1113, 0704_1121 on laiem spektraalne läbilaskvuse vahemik algusega 320 nm. Proovikehadel 0704_1131, 0704_2111, 0704_2112, 0704_2113, 0704_2121 on spektraalse läbilaskvuse alampiiriks 400 nm. Seejuures suurema lainepikkuse läbilaskvuse püüab rüüa ise 1130 nm-ga. Kuna väiksema lainepikkusega kiirgusel on suurem energia ja elektritootmise seisukohalt on see väga tähtis, siis on vähemalt esialgu parem valik EPO baasil A-tüüpi katend. Kõige suurema läbilaskvusega on proovikeha 0704_2112, keskmiselt 88%. Kui pidada silmas head läbilaskvust ja ka väiksemat lainepikkust, siis on parim proovikeha 0704_1112.



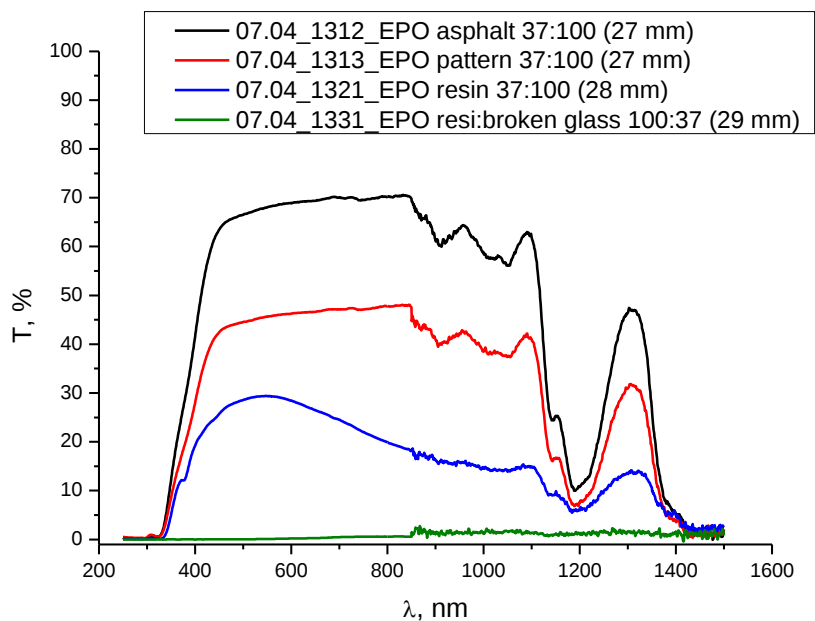
Joonis 2.3 Koguläbilaskvuse spektrid EPO materjalist erinevate pinnatöötlustega proovikehadel paksusega 8-10 mm

Joonisel 2.5 on näha, et parima läbilaskvusega 82% on proovikeha, mille pind on imprintimisega saadud tänava asfaldilt. Teised proovikehad olid valmistatud erineva pinna morfoloogiaga, mis oli kõrgema profiiliga, kui asfaldi imprinditud pind. Kõrgemal profiilil on veel üks oluline puudus. Nimelt ekspluatatsioonis toimub paratamatult pinna mustumine ja sellise kõrgprofileeritud pinna pesemine on tõsine väljakutse.



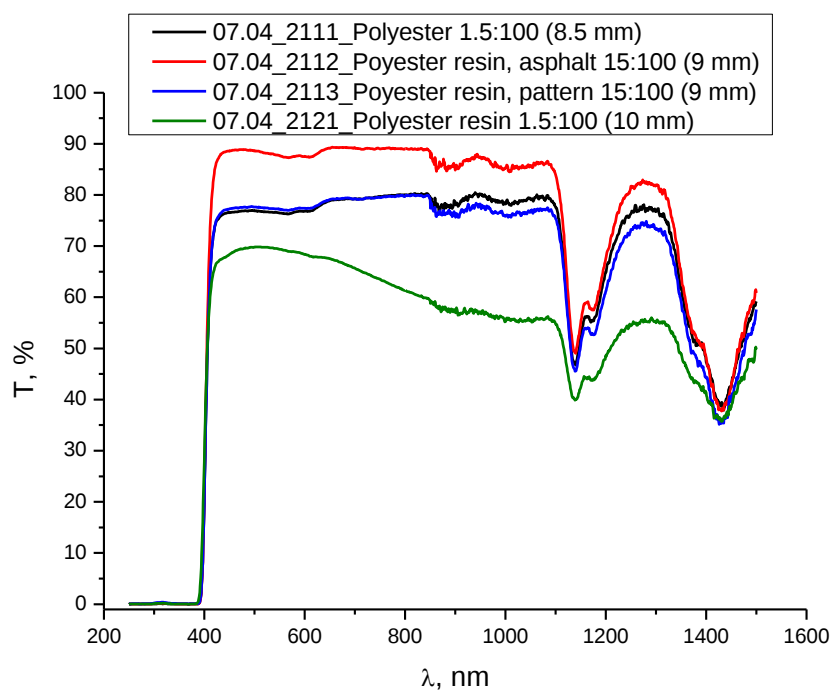
Joonis 2.4 Koguläbilaskvuse spektrid EPO materjalist erinevate pinnatöötlustega proovikehadel paksusega 18-20 mm

Joonisel 2.6 on näha, et proovikeha paksuse suurendamisel kaks korda (joonis 2.5) väheneb läbilaskvus ca 10%-15%, kuid läbilaskvuse seisukohalt on parim asfaldi imprintimise teel saadud pinnatöötlus. (proovikeha 0704_1212)



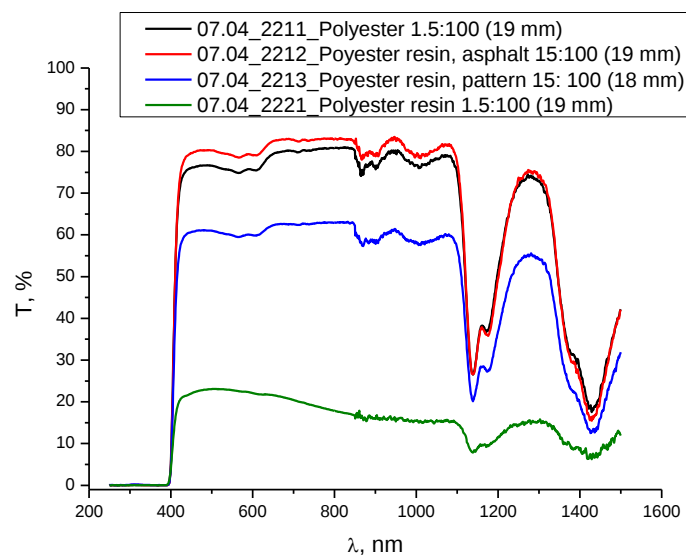
Joonis 2.5 Koguläbilaskvuse spektrid EPO materjalist erinevate pinnatöötlustega proovikehadel paksusega 27-29 mm

Joonisel 2.7 on proovikehade paksust suurendatud ca kolm korda võrreldes joonistel 2.1 ja 2.2 esitatud proovikehadega. Ka siin on parima läbilaskvusega (68%) asfaldi imitatsiooniga proovikeha 0704_1312.

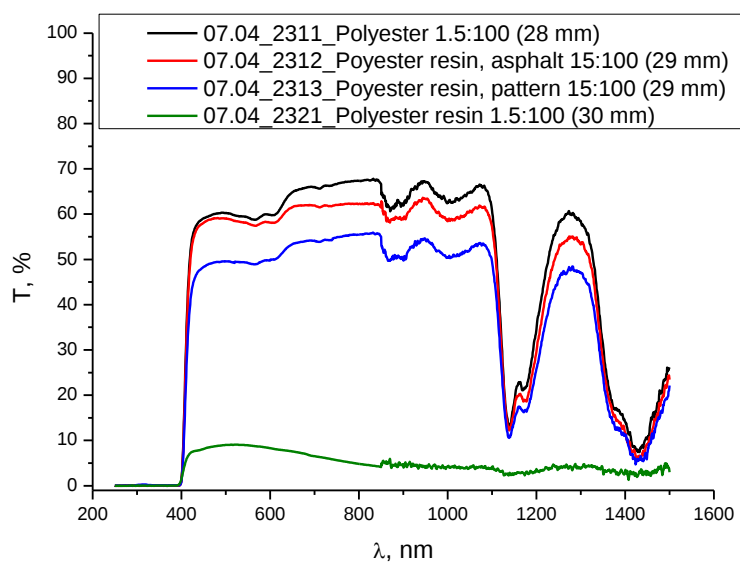


Joonis 2.6 Koguläbilaskvus PES baasil valmistatud proovikehadele, paksusega 8-10 mm, erineva pinnatöötlusega

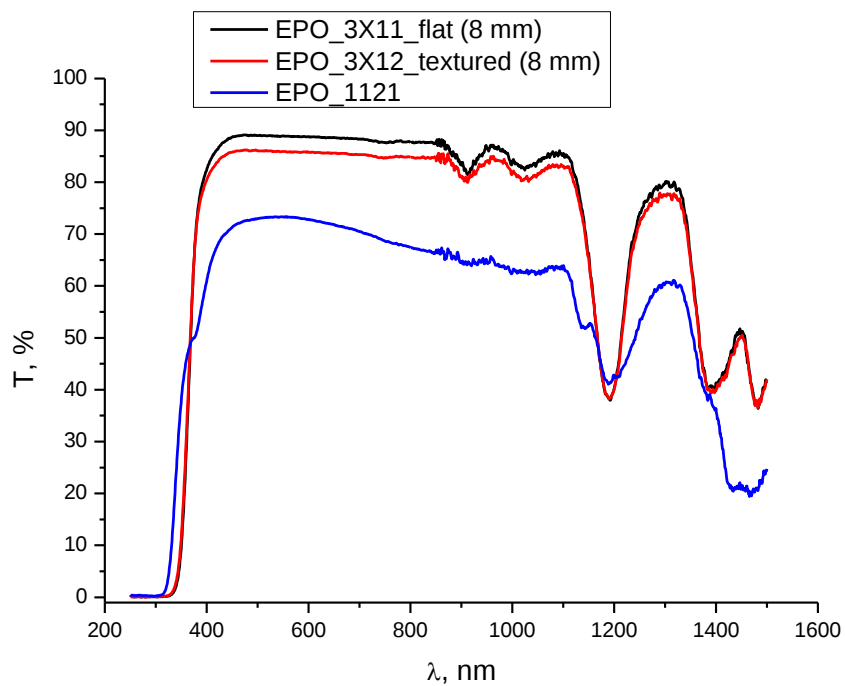
Parimat läbilaskvust, 88% omab asfaldi imitatsiooniga proovikeha 0704_2112



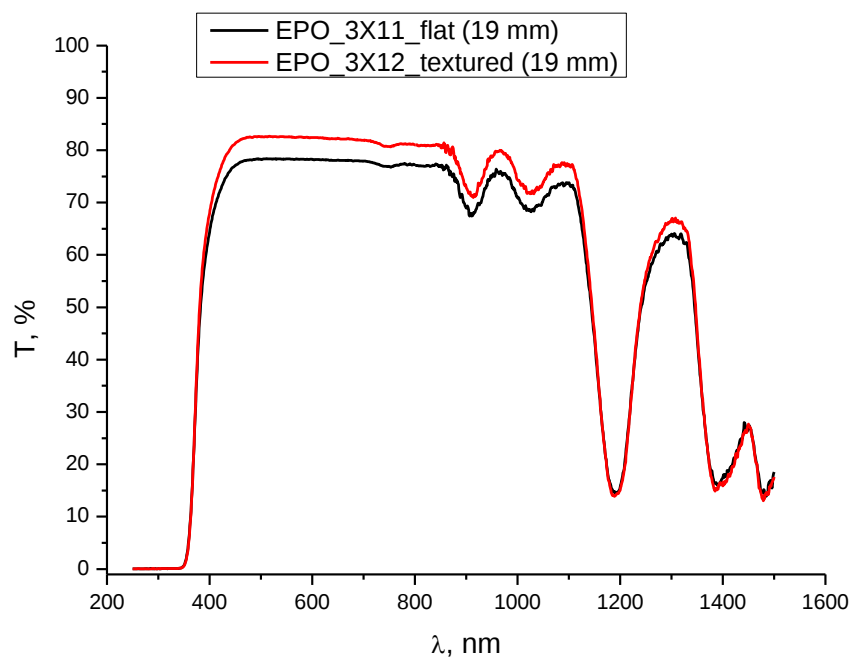
Joonis 2.7 Koguläbilaskvus PES baasil proovikehadele, erineva pinnatöötlusega



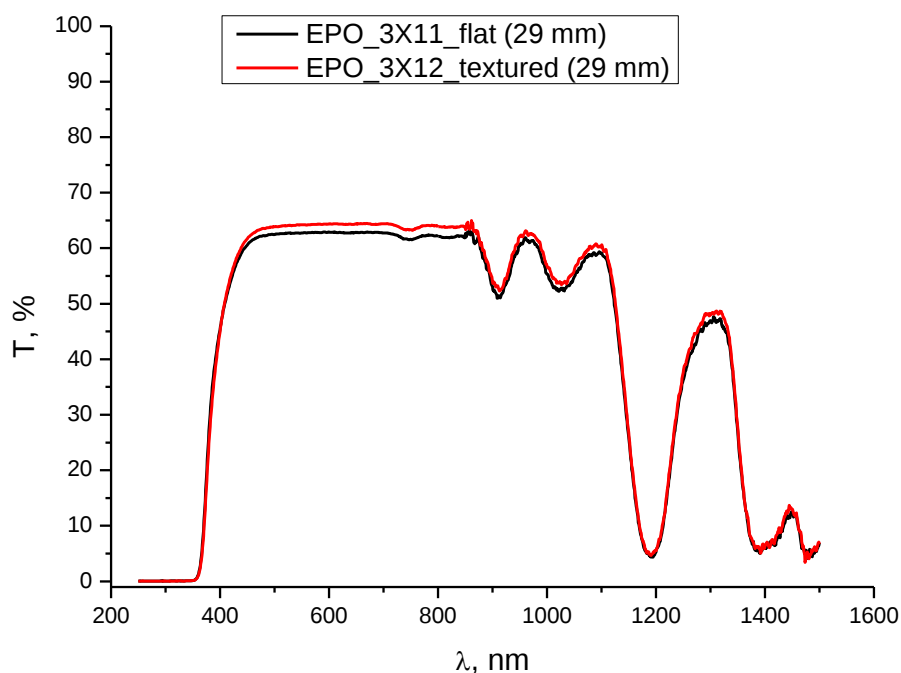
Joonis 2.8 Koguläbilaskvus PES baasil proovikehadele, erineva pinnatöötlusega ja paksusega 28-30 mm



Joonis 2.9 Koguläbilaskvus EPO baasil proovikehadele, erineva pinnatöötusega ja paksusega ~ 8 mm



Joonis 2.10 Koguläbilaskvus EPO baasil proovikehadele, erineva pinnatöötusega ja paksusega ~ 19 mm



Joonis 2.11 Koguläbilaskvus EPO baasil proovikehadele, erineva pinnatöötusega ja paksusega ~ 29 mm

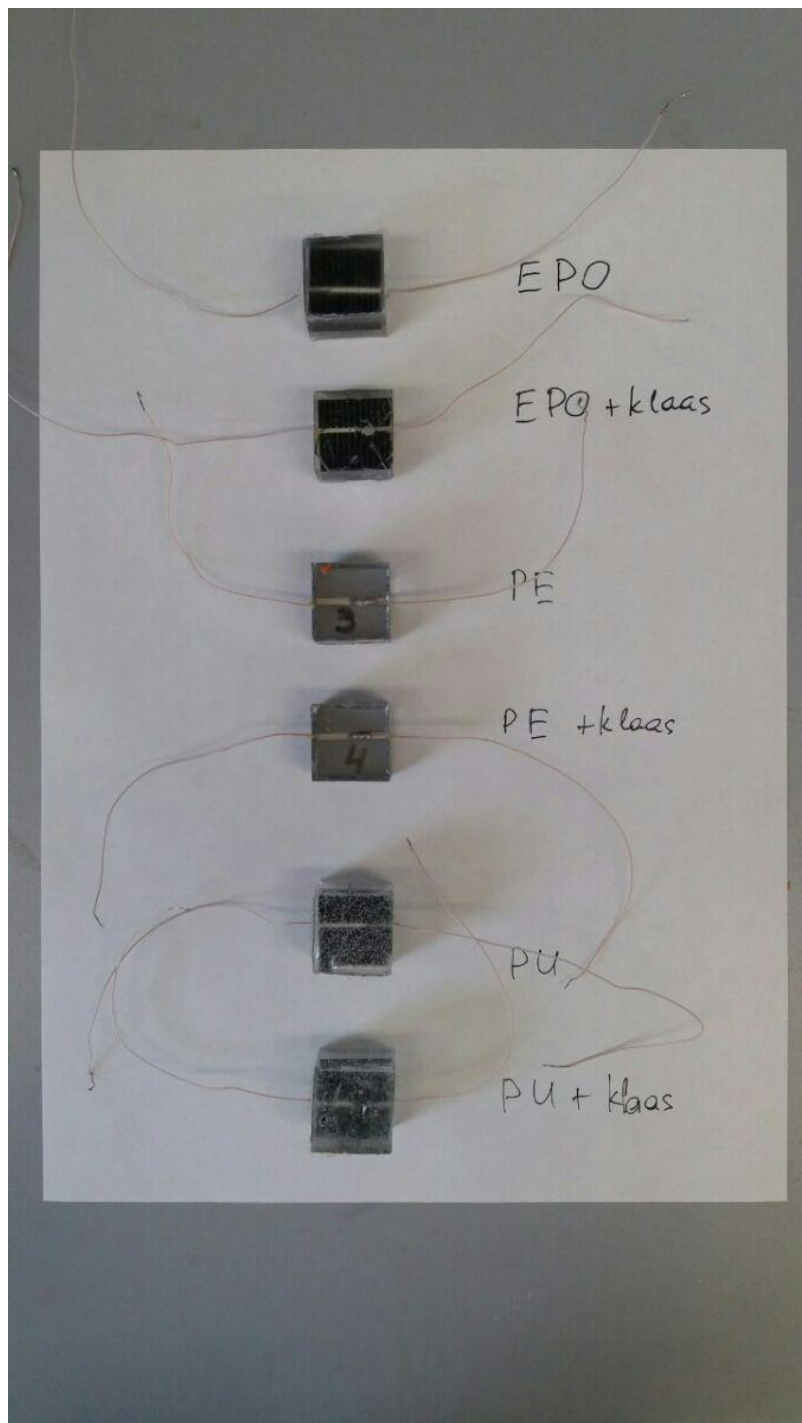
2.2.2 Spektraalsete mõõtmiste kokkuvõte

1. Spektraalses mõttes on EPO baasil kapsli materjal parem polüestri baasil valmistatud kapsli materjalist. Nimelt on EPO UV spektriosas läbipaistvam. Kuna UV spektriosa on fotoelemendi energia muundamise seisukohalt väga tähtis, siis langeb meie valik EPO-le.
2. Paksuse seisukohalt on lõppsõna öelda mehaanilistel katsetustel. Meie esialgne valik on 1 cm paksune kapsli aknaosa.
3. Pinna morfoloogia puhul on määrava tähtsusega pinna puhastatavus mustusest. Seega kõrge profiiliga pinna konarused pole soovitatavad. Seoses puhastatavusega valisime pinna morfoloogia tüübiks asfaldi imprintimisega saadud pinna. See on ka optiliselt kõige parema läbilaskvusega võrreldes teiste kõrgprofileeritud katetega.

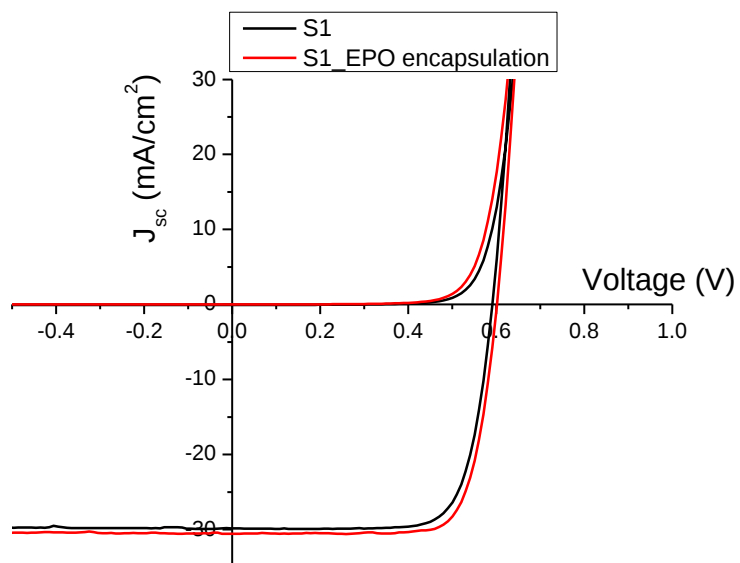
2.3 2 cm x 2 cm proovikehade elektrilised mõõtmised

Antud etapis teostati A-tüüpi katendi lõpliku valiku tegemiseks suurest päikeseelemendist väljalõigatud 2 cm x 2 cm proovikehade elektrilised mõõtmised.

Valmistati 6 erinevat proovikeha (Joonis 2.14) ja mõõdeti nende karakteristikuid (Joonis 2.15-2.20)

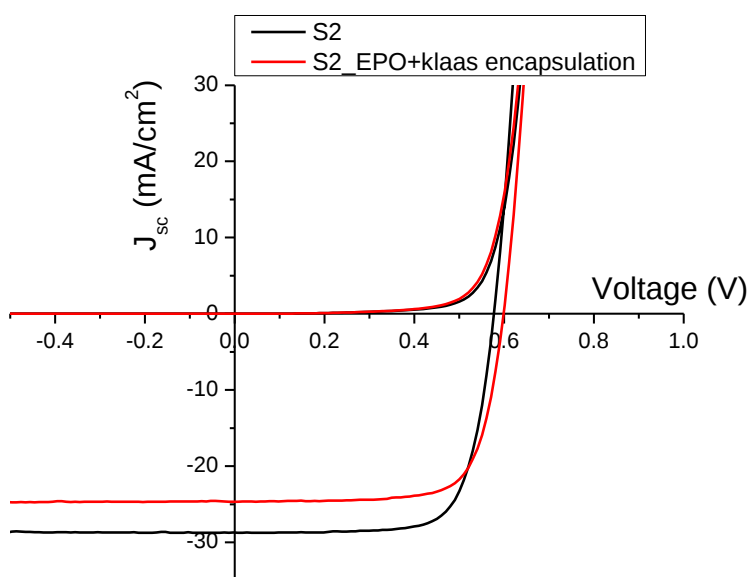


Joonis 2.12 EPO ja polümeeride massi kapseldatud proovikehad



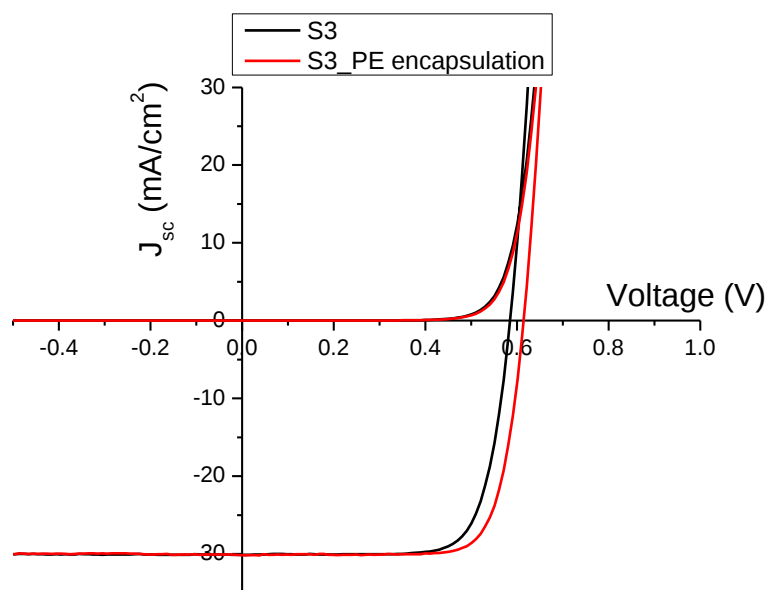
Sample nr.	V_{oc} , mV	J_{sc} , mA/cm ²	FF, %	η , %
S1	600	30	75	13.5
S1-EPO	610	30.6	76	14.2

Joonis 2.13 Proovikeha nr 1 karakteristikud



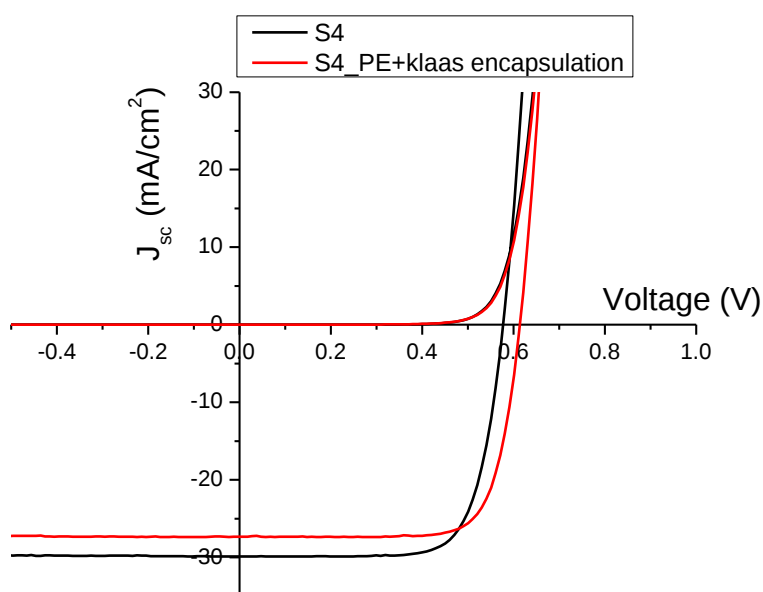
Sample nr.	V_{oc} , mV	J_{sc} , mA/cm ²	FF, %	η , %
S2	580	28.7	74	12.3
S2-EPO+klaas	600	24.7	74	11

Joonis 2.14 Proovikeha nr 2 karakteristikud



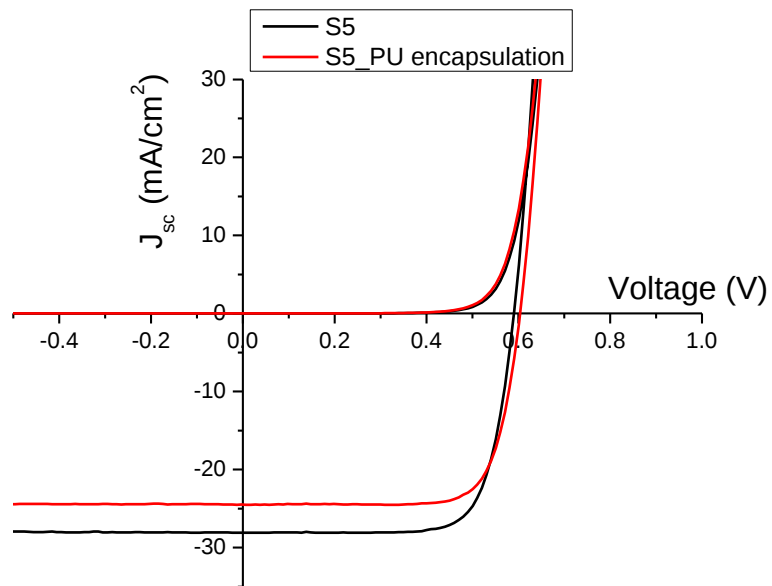
Sample nr.	V_{oc} , mV	J_{sc} , mA/cm ²	FF, %	η , %
S3	590	30	75.	13.3
S3-PE	615	30.2	77	14.3

Joonis 2.15 Proovikeha nr 3 karakteristikud



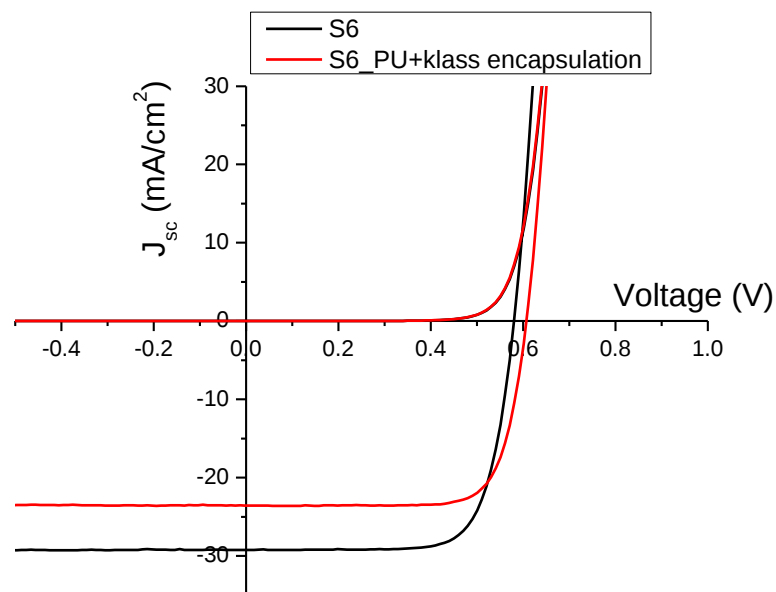
Sample nr.	V_{oc} , mV	J_{sc} , mA/cm ²	FF, %	η , %
S4	580	29.9	74	12.8
S4-PE+klaas	615	27.3	76	12.8

Joonis 2.16 Proovikeha nr 4 karakteristikud



Sample nr.	V_{oc} , mV	J_{sc} , mA/cm ²	FF, %	η , %
S5	590	28.1	76	12.6
S5-PU	610	24.5	76	11.4

Joonis 2.17 Proovikeha nr 5 karakteristikud



Sample nr.	V_{oc} , mV	J_{sc} , mA/cm ²	FF, %	η , %
S6	580	29.2	75	12.7
S6-PU+klaas	610	23.6	77	11.1

Joonis 2.18 Proovikeha nr 6 karakteristikud

2.3.1 A-katendi täiskapseldusega proovikehade volt-amper karakteristikud

Mõõtmised teostati Autolab PGSTAT 30 abil. Etalonlambiks oli 300 W halogeenlamp, mille kiirgusvoog kalibreeriti etalon ränielemendi abil enne igakordset mõõtmist 1000 W/m^2 ekvivalentkiirgusintensiivsusele. Selline protseduur tagab mõõtmiste usaldusväärsuse.

Proovikehadele joodeti tavalise jootetõlviku abil painduvad juhtmed sellise arvestusega, et nad säilitavad elektrilise kontakti ka pärast kapseldamist. Mõõtmiste käigus avastati, et esialgne päikeseenergia muundamise efektiivsus oli langenud 20.2% ca 12% -ni. Põhjus on nn FF ehk täiteteguri langemine 75% piirimaale, mis annab tunnistust nn šuntide tekkimisest laserlõikamise käigus. Kuna antud projektis läheb lõppkasutusse lõikamata päikeseelement, siis nende väikeste proovikehadega saame teada kapseldamise mõju elektrilistele parameetritele ja saame valida ka parima kapseldamise materjali. Kapseldamise juures tuleb arvestada, et kulumiskindluse seisukohalt tuleb kindlasti kasutada klaasipuruga väärimdatud kapseldust.



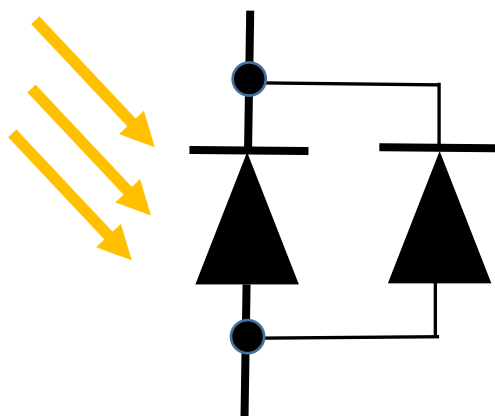
Joonis 2.19 Päikeseelement, monokristalne räni, kasutegur 20.2 %, 16 cmx 16 cm, paksus 0,18 mm. Pinge 0,5V

Päikeseelement on varustatud voolukogumise elektroodide süsteemiga, mille kaudu ühendatakse elemendid jadamisi patareiks. Mehaaniliselt on see element kergesti purunev. Seetõttu element varustatakse vähemalt 1cm läbipaistva kattega, mis tagab elemendi mehaanilise jäikuse ja kulumiskindluse. Mehaanilise jäikuse tagamiseks ja elemendi kaitsmiseks niiskuse eest tehakse ka

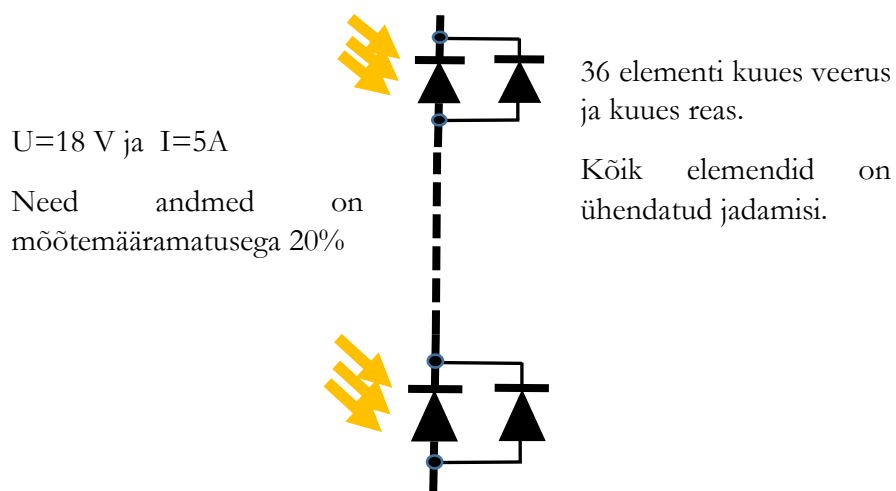
tagaküljele vähemalt 1 cm paksune kaitsekiht, mis elemendi monteerimisel paneeliks seotakse asfaldaluskihiga silikoon liimiga. Nii eesmine kui ka tagumine kaitsekiht ulatub igast küljest 0,5 cm üle ja niiviisi on element igast küljest ümbritsetud niiskuskindla ja mehaaniliselt tugeva kaitsekihiga. See ongi e-kõnnitee monoliitne element, mille ühendamisel patareiks saadakse päikesepaneel.



Joonis 2.20 Päikeseelemendi tagumine pool koos joodetud "bypass" diodiga. Sellisel kujul läheb see element mõlemalt poolt polümeeriga katmisele ja nii saadakse nn e-sillutisekivi



Joonis 2.21 Päikeseelemendi ja nn “bypass” diodi elektriline skeem. “bypass” diod on vajalik päikesepatarei jadaabela töökindluse tõstmiseks mõne elemendi rikke või varju sattumise puhuks. Diodi mark on STPS1045D, 45 V, 20 A



Joonis 2.22 e- kõnnitee päikesepaneeli põhimõtteline skeem

2.3.2 Kokkuvõtte 2 cmx 2 cm katsekeha II etapi tulemustest.

1. On uuritud proovikehade läbipaistvust. Optiliselt parim on EPO kate asfaldi imitatsiooniga paksusega 1 cm.
2. On ostetud diodid ja ühenduslatid. On olemas väljaviikude lahendus.
3. On olemas päikeseelement väljaviikudega ja varustatud bypass diodiga 36 tk.
4. On kindlaks määratud elementide arv paneelis 36.
5. Paneeli ligikaudne võimsus 45 kraadise nurga korral päikesekiirguse suhtes on 90 W.
6. On katsetatud päikeseelement 2 cm x2 cm mitmesuguste kapslitega 6 tk. Parim on EPO baasil kapsel.

2.4 15 cm x 15 cm A-katendi ettevalmistus

2.4.1 2 cm x 2 cm pesadega silikoonvormide valmistamine

Katsekehade loomiseks valmistati esmalt 3D-printides kaks 9-pesalist šablooni silikoon vormidele (Joonis 2.25.). Esimene koosnes 9 sileda pinnaga pesadest (mustrita), 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 seeria 1 cm, 2 cm ja 3 cm kõrgused pesad olid mustrita, teine seeria 1 cm, 2 cm ja 3 cm kõrgused pesad olid asfaltkatte mustriga ning kolmas seeria 1 cm, 2 cm ja 3 cm kõrgused pesad olid CAD-konstrueeritud mustriga.



Joonis 2.23 3D-prinditud 9-pesalised šabloonid

Nende šabloonide põhjal valmistati 2 silikoonist vormi (Joonis 2.26), milles sai vastavalt valmistada erinevate kõrguste ning erinevate katetega katsekehasid. Silikooniks kasutati „vormisilikoon 37ShA“.



Joonis 2.24 Silikoonvormid 2 cm x 2 cm katsekehade valamiseks

2.4.2 2 cm x 2 cm katsekehade valmistamine

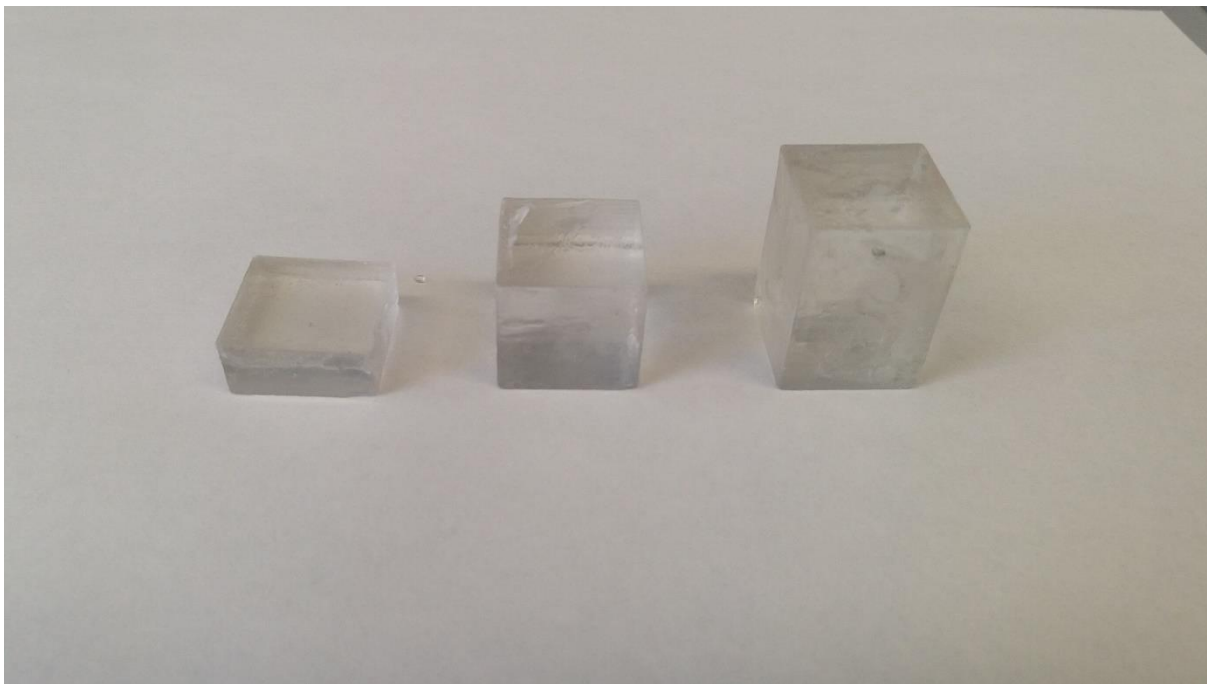
Katsekehade valmistamiseks puhastati esmalt vorm, ning kaeti see vormieraldussilikooniga. Seejärel valati vormi eelnevalt segatud vaik ning lasti sellel taheneda. Tahkumist katsetati toatemperatuuril ja 55° C juures. Katsekehad valmistati kolmest erinevast vaigust järgmises kompositsioonis:

- Kahekomponendiline epoksüüdivaik. 100 g vaigu kohta 37 g kõvendit
- Kahekomponendiline polüestervaik. 100 g vaigu kohta 0,5 g, 1 g ja 1,5 g kõvendit
- Neljakomponendiline polüüureavaik. 100 g kahekomponendilise vaigu kohta (1:1) 33 g kõvendit BH (hard) ja 70 g kõvendit BE (elastic).

Samuti valmistati katsekehasid täitematerjaliga, milleks on karastatud klaas. Karastatud klaasiga katsekehi valmistati erinevalt:

- klaas oli segatud vaiguga vahekorras massi järgi 1:1 ja vormi sisse valatud
- kõigepealt täideti vorm klaasiga ääreni ja siis vaik oli peale valatud
- kõigepealt täideti vorm klaasiga kõrguseni 0,5 cm ja siis vaik oli peale valatud

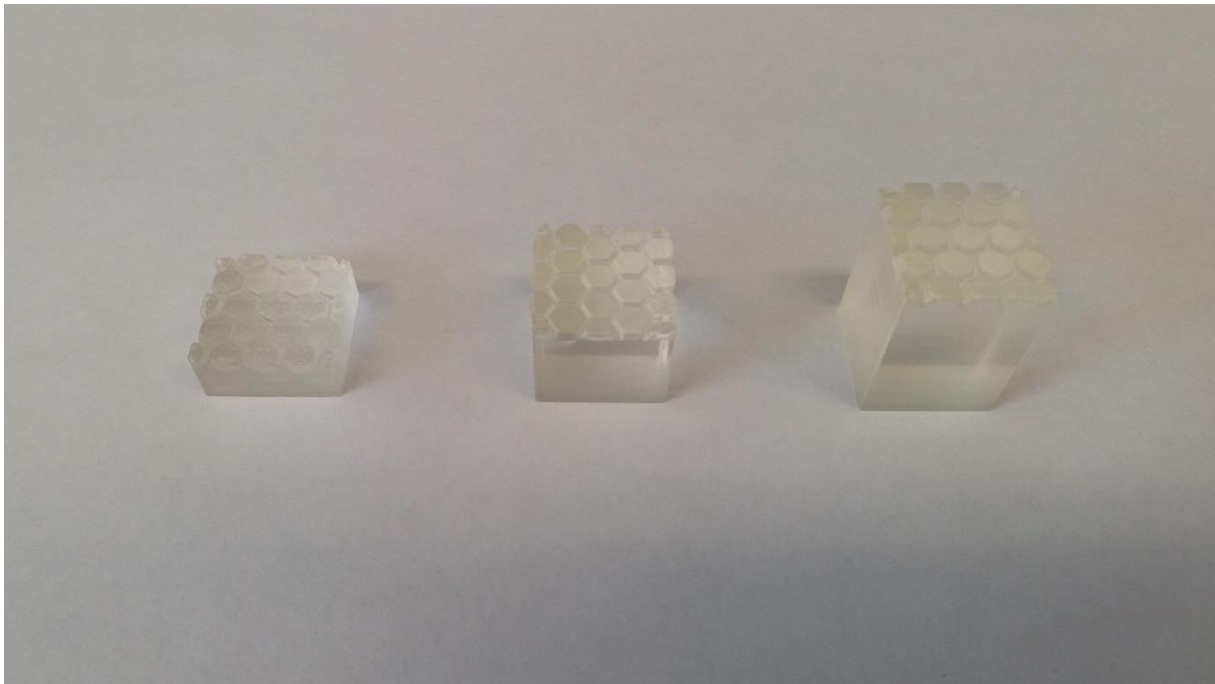
Kõik katsekeha tüübid valmistati nii 1 cm, 2 cm kui ka 3 cm kõrgused (Joonis 2.27-2.29). Kuusnurksete kärgedega mustrit kasutati vaid korra, sest ilmnis tõsiasi, et realses kasutuses koguneks kärgedesse mustus, mis piiraks oluliselt vaigust oleva päikeseelemendi töö efektiivsust.



Joonis 2.25 Mustrita katsekehad kõrgustega 1 cm, 2 cm ja 3 cm



Joonis 2.26 Asfaldimustriga katsekehad kõrgustega 1 cm, 2 cm ja 3 cm



Joonis 2.27 CAD-konstrueeritud mustriiga katsekehad kõrgustega 1 cm, 2 cm ja 3 cm

2.4.3 Katsekehade nimetuste süsteem

ab.cd_efgh

ab: proovide valmimise kuupäev

cd: proovide valmimise kuu

e: materjal

1 – EPO

2 – Polüester

3 – Polüüurea

f: ligikaudne paksus

1 – 1 cm

2 – 2 cm

3 – 3 cm

g: täiteaine

1 – täiteaineta

2 – karastatud klaas

3 – erinevate klaasiliikide segu kasutamiseks liivapritsis

h: katte muster

1 – mustrita/sile

2 – skaneeritud asfaldi jäljend

3 – CAD konstrueeritud muster

2.4.4 Survetugevuse mõõtmine

Survetugevuse mõõtmise eesmärk on kontrollida, kas kasutatud materjalid on piisavalt tugevad ja jäigad, et nad peaks vastu reaalses kasutamises. 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.

2.4.5 Metoodika

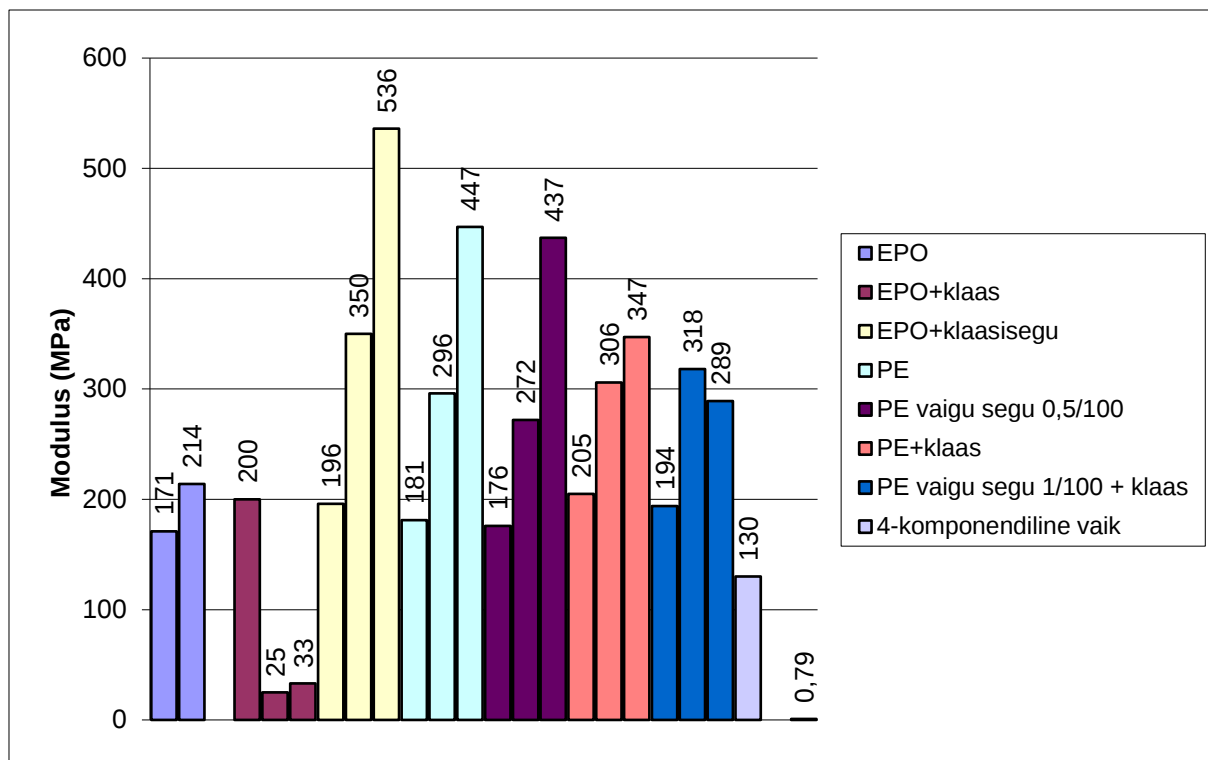
Survetugevuse mõõtmine viidi läbi Instron 5866 instrumendiga, millele olid kinnitatud kaks metallplaati. Alumisele plaadile asetati ülemise plaadi diameetrist suurema diameetriga metallist siledapõhjaline, silindriline kauss, et kaitsta võimalike lenduvate purdmaterjalide ees (joonis 6.). Kausi põhjale, keskosale, asetati katsekeha, mille mõõtmed olid teada täpsusega 0,05 mm. Seejärel hakkas raam plaate kokku viima kiirusel 1 mm/min . Mõõdetud parameetrid on esitatud tabelis 1., joonisel 7. ja joonisel 8. Põhjusel, et masina suurim lubatud koormus on 10 kN , ning katsekehade pindala ligikaudselt $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, siis suurim mõõdetud surve sai olla maksimaalselt ligi 25 MPa , mis tähendab, et katsekehade, mis ei purunenud 10 kN koormuse all, purunemise eelset survepiiri antud katsega teada ei saadud.



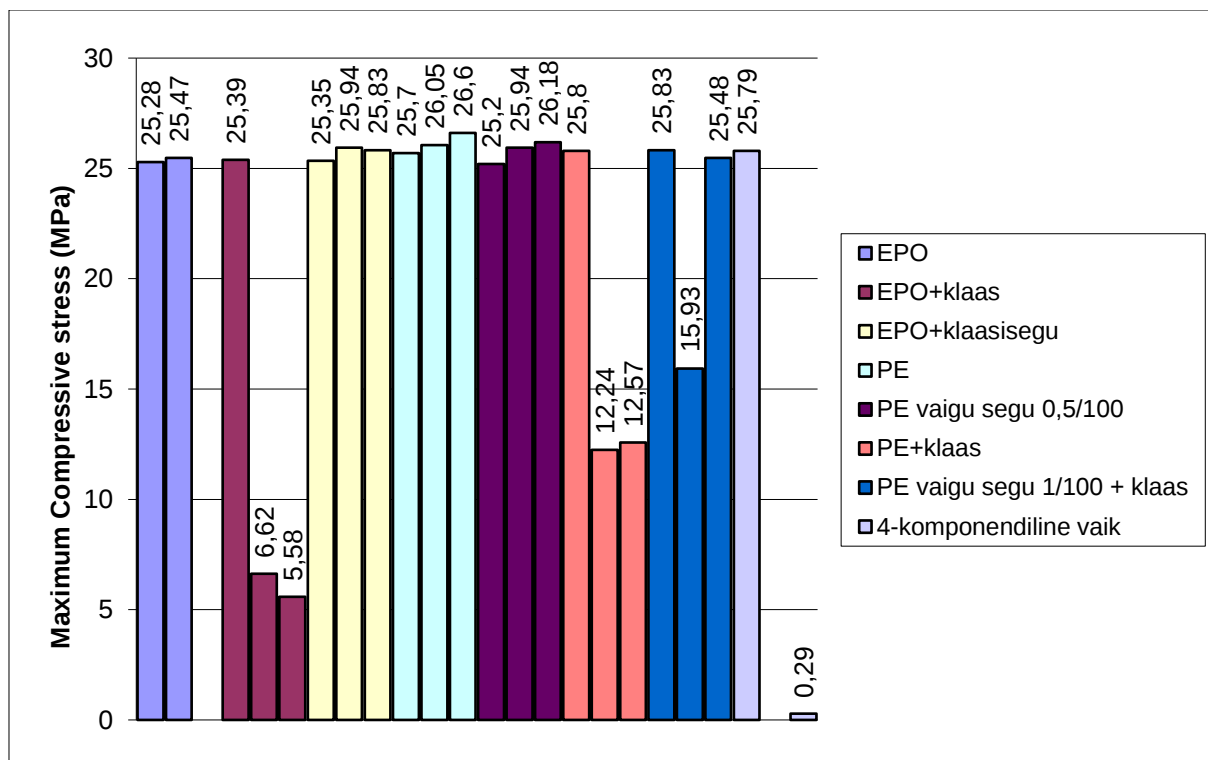
Joonis 2.28 Survekatse katsekehale

Tabel 2.2 Survekatsete tulemused

Katsekeha	Materjal	Kõrgus	Täide	Muster	Max.load (kN)	Compressive extension at Maximum Compressive load (mm)	Maximum Compressive strain (mm/mm)	Maximum Compressive stress (MPa)	Elastsusmoodul	Energy at Maximum Compressive load (J)	Modulus (Automatic) (MPa)
30.03_1111	1	1	1	1	10	3,93	0,5	25,28	0,68	6,14	171
07.04_1113	1	1	1	3	10	3,14	0,34	25,46	-0,61	9,94	163
07.04_1112	1	1	1	2	10	3,15	0,34	25,54	0,04	8,32	146
07.04_1121(klaasi peale valatud)	1	1	2	1	10	2,86	0,33	25,39	-0,85	5,75	200
07.04_1121(klaas segatud)	1	1	2	1	7,5	3	0,45	19,28	0,64	7,6	112
07.04_1131	1	1	3	1	10	2,28	0,24	25,35	-0,36	6,58	196
30.03_2111	2	1	1	1	10	3,51	0,44	25,7	-2,42	5,88	181
07.04_2113	2	1	1	3	10	2,6	0,27	26,26	-1,46	6,75	193
07.04_2112	2	1	1	2	10	2,42	0,26	25,46	0,94	7,11	177
07.04_2111(vaigu segu 0,5 100 kohta)	2	1	1	1	10	3,46	0,41	25,2	-0,94	6,34	176
07.04_2111	2	1	1	1	10	2,88	0,32	26,06	-2,06	6,15	195
07.04_2121(klaasi peale valatud, vaigu segu 1,0 100 kohta)	2	1	2	1	10	2,92	0,34	25,83	-1,69	6,01	194
07.04_2121(klaasi peale)	2	1	2	1	10	1,87	0,19	25,8	0,23	6,61	205
07.04_2121(klaas segatud)	2	1	2	1	10	2,21	0,24	25,79	-0,17	6,66	192
15.05_3112	3	1	1	2	10	8,77	0,95	25,85	0,17	12,61	132
15.05_3111	3	1	1	1	10	8,76	0,94	25,79	0,25	12,9	130
30.03_1211	1	2	1	1	10	2,37	0,13	25,47	188,04	11,2	214
07.04_1213	1	2	1	3	10	2,05	0,13	25,99	241,26	10,73	240
07.04_1212	1	2	1	2	10	2,14	0,14	25,86	202,68	11,56	217
07.04_1221(klaasi peale valatud)	1	2	2	1	2,5	4,6	0,36	6,62	128,23	6,45	25
07.04_1221(klaas segatud)	1	2	2	1	10	1,43	0,08	25,28	341,28	7,63	373
07.04_1231	1	2	3	1	10	1,38	0,08	25,94	291,97	6,74	350
30.03_2211	2	2	1	1	10	1,52	0,09	26,05	260,22	7,47	296
07.04_2213	2	2	1	3	10	1,5	0,09	26,45	276,2	7,43	312
07.04_2212	2	2	1	2	5,9	0,99	0,06	15,94	271,29	2,83	313
07.04_2211(vaigu segu 0,5 100 kohta)	2	2	1	1	10	1,58	0,1	25,94	239,81	7,88	272
07.04_2211	2	2	1	1	10	1,41	0,09	26,2	273,12	6,95	307
07.04_2221(klaasi peale valatud, vaigu segu 1,0 100 kohta)	2	2	2	1	6,1	1	0,06	15,93	292,24	3,23	318
07.04_2221(klaasi peale valatud)	2	2	2	1	4,8	1,13	0,07	12,24	-35,54	3,02	306
07.04_2221(klaas segatud)	2	2	2	1	2,1	0,66	0,04	5,52	221,49	0,84	279
15.05_3212	3	2	1	2							
15.05_3211	3	2	1	1							
07.04_1313	1	3	1	3	10	5,15	0,19	25,6	-1,66	11,95	410
07.04_1312	1	3	1	2	10	4,63	0,16	25,72	-1,17	10,45	364
07.04_1321(klaasi peale valatud)	1	3	2	1	2,2	10	0,36	5,58	-1,71	6,6	33
07.04_1321(klaas segatud)	1	3	2	1	10	3,6	0,13	25,22	-1,26	6,86	557
07.04_1321	1	3	2	1	10	3,95	0,14	25,38	-7,57	6,56	600
07.04_1331	1	3	3	1	10	3,55	0,12	25,83	0,78	7,65	536
30.03_2311	2	3	1	1	10	3,63	0,13	26,6	0,24	9,07	447
07.04_2313	2	3	1	3	10	3,62	0,13	26,51	-0,52	7,98	499
07.04_2312	2	3	1	2	6,7	3,14	0,13	17,8	-1,22	4,18	453
07.04_2311(vaigu segu 0,5 100 kohta)	2	3	1	1	10	4,98	0,18	26,18	-0,65	9,15	437
30.03_2321(vaigu segu 1,0 100 kohta)	2	3	2	1	10	4,79	0,16	25,48	-0,9	13,48	289
07.04_2321(klaasi peale valatud)	2	3	2	1	4,9	3,3	0,12	12,57	0,25	3,04	347
07.04_2321(klaas segatud)	2	3	2	1	3,7	2,02	0,08	9,5	-0,52	2,73	306
07.04_2321	2	3	2	1	5	2,62	0,09	12,72	2,46	3,03	425
15.05_3312	3	3	1	2	0,1	10	0,35	0,28	1,49	0,62	0,75
15.05_3311	3	3	1	1	0,1	9,95	0,34	0,29	-1,02	0,62	0,79



Joonis 2.29 Muuritud katsekehade mooduluse väärtused (EPO – epoksüidvaik, PE – polüestervaiik. Iga materjali kohta on 1 cm, 2 cm ja 3 cm kõrgusega katsekehad vasakult paremale)



Joonis 2.30 Muuritud katsekehade maksimaalne kokku surutav jõud (EPO – epoksüidvaik, PE – polüestervaiik. Iga materjali kohta on 1 cm, 2 cm ja 3 cm kõrgusega katsekehad vasakult paremale)

2.4.6 2 cm x 2 cm prototüüpi valmistamine

Lähtuvalt eelnevatest tulemustest valmistati 6 prototüüpi, kus on juba töötav 2 cm x 2 cm päikeseelement valatud vaigu sisse, et mõõta materjalide mõju päikeseelemendi töö efektiivsusele ning hinnata, kas materjalide sisepinged muudavad päikeseelemendid kasutuskõlbmatuks.

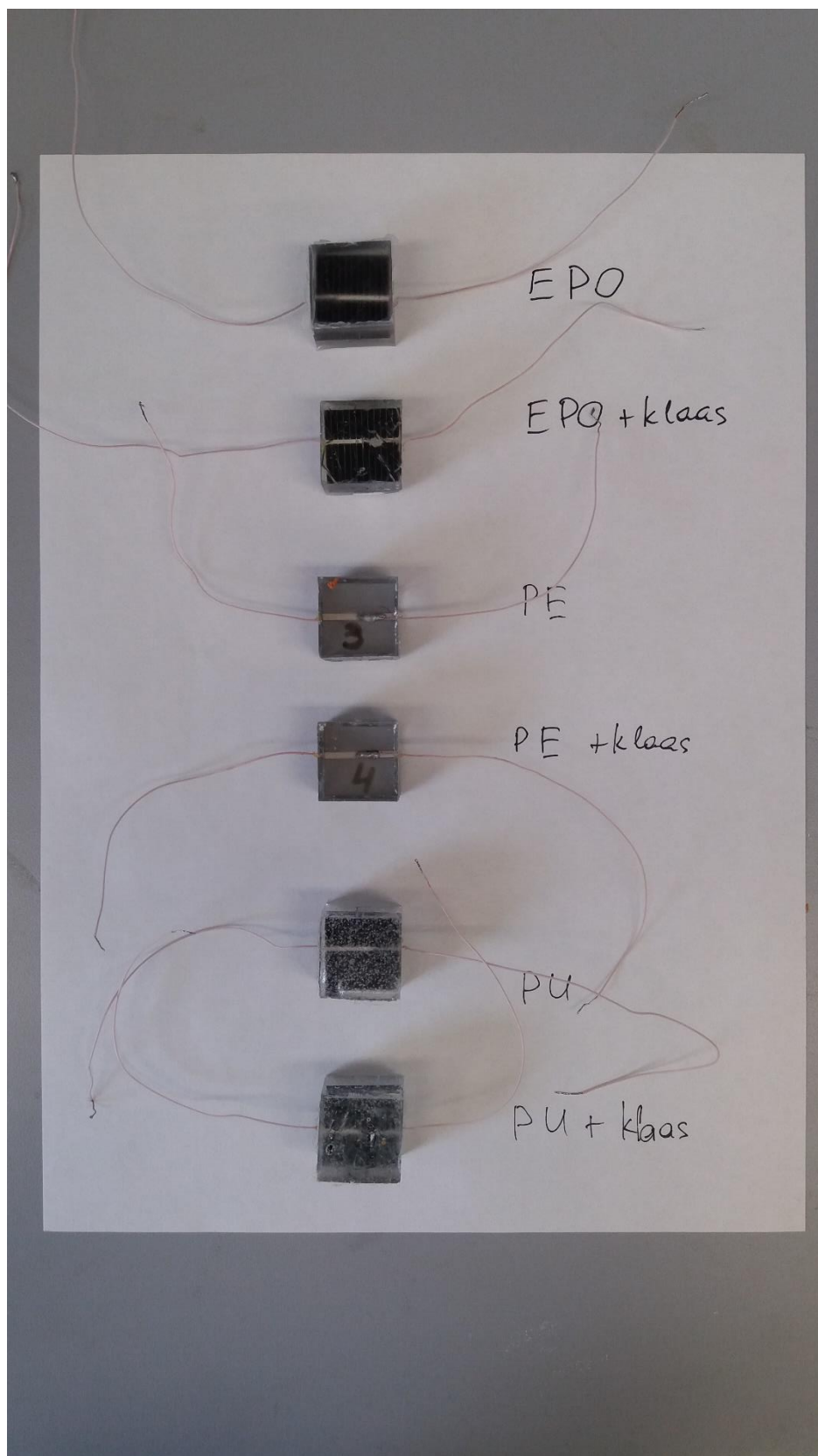
Selle jaoks valmistati 2 cm kõrgused vormid (Joonis 2.33), mille külgedele oli tehtud 1 cm sügavused süvised paneelide ühendusjuhtmete mahutamiseks ning paneeli hoidmiseks vormi keskosas. Plastvorm oli kinnitatud sanitaar silikoon-hermeetikuga alumiiniumplaadile.



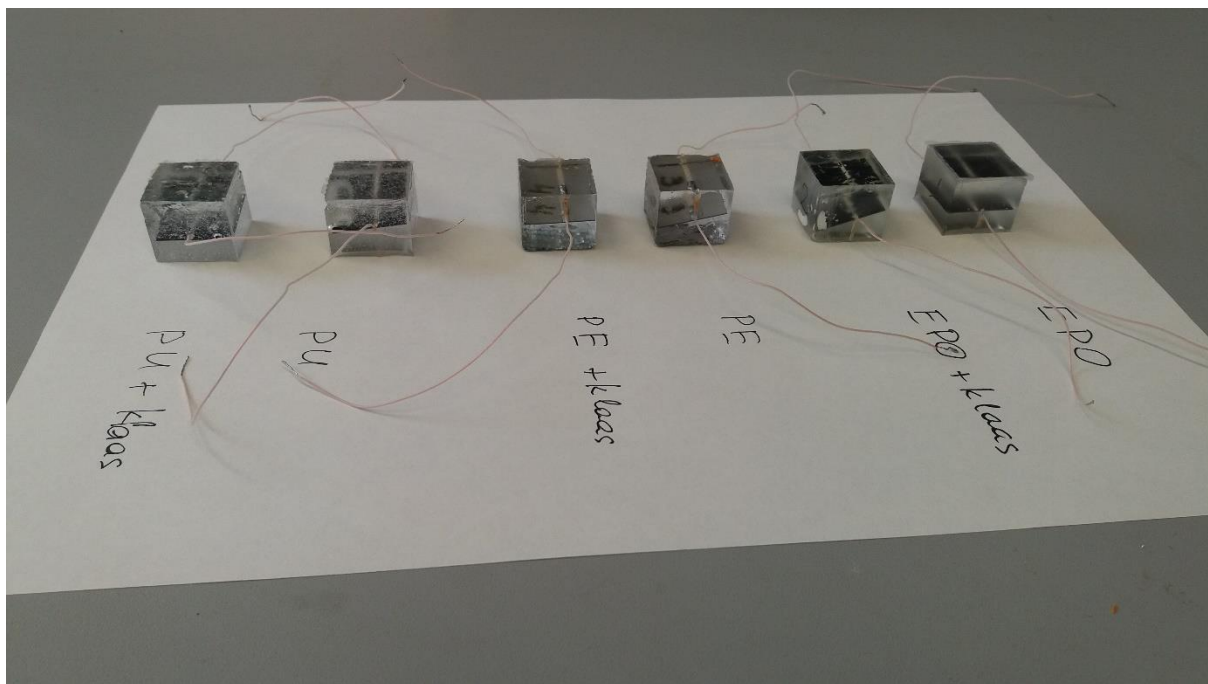
Joonis 2.31 Vorm 2 cm x 2 cm prototüübi valmistamiseks

Vorm kaeti vormieemaldussilikooniga. Seejärel fikseeriti paneel fotogalvaanilise poolega alla ning valati vaik paneeli peale ning lasti sel taheneda. Valmistati järgnevad katsekehad (Joonis 2.34-2.35):

1. EPO
2. EPO + klaas
3. PE
4. PE + klaas
5. PU
6. PU + klaas



Joonis 2.32 2 cm x 2 cm prototüübid



Joonis 2.33 2 cm x 2 cm prototüübid

Kõik prototüübid olid ilma muustrita. Kõik prototüübid tahenesid toatemperatuuril, välja arvatud katsekeha number 2, mis tahenes ahjus temperatuuriga 50° C. Sellega oli kontrollitud päikeseelemendi töö peale tahkumist kõrgendatud temperatuuril.

2.4.7 17 cm x 17 cm prototüüpide valmistamine

Kõigepealt valmistati šabloon silikoon vormidele ja asetati vastava suurusega plast anumasse (Joonis 2.36).



Joonis 2.34 17 cm x 17 cm šabloon plastanumas

Selle šablooni põhjal valmistati silikoonist vorm (Joonis 2.37-2.38), milles sai vastavalt valmistada valitud materjalist 17 cm x 17 cm prototüüp. Silikooniks kasutati „vormisilikoon 37ShA“.



Joonis 2.35 17 cm x 17 cm šabloon plastanumas + peale valatud vormisilikoon



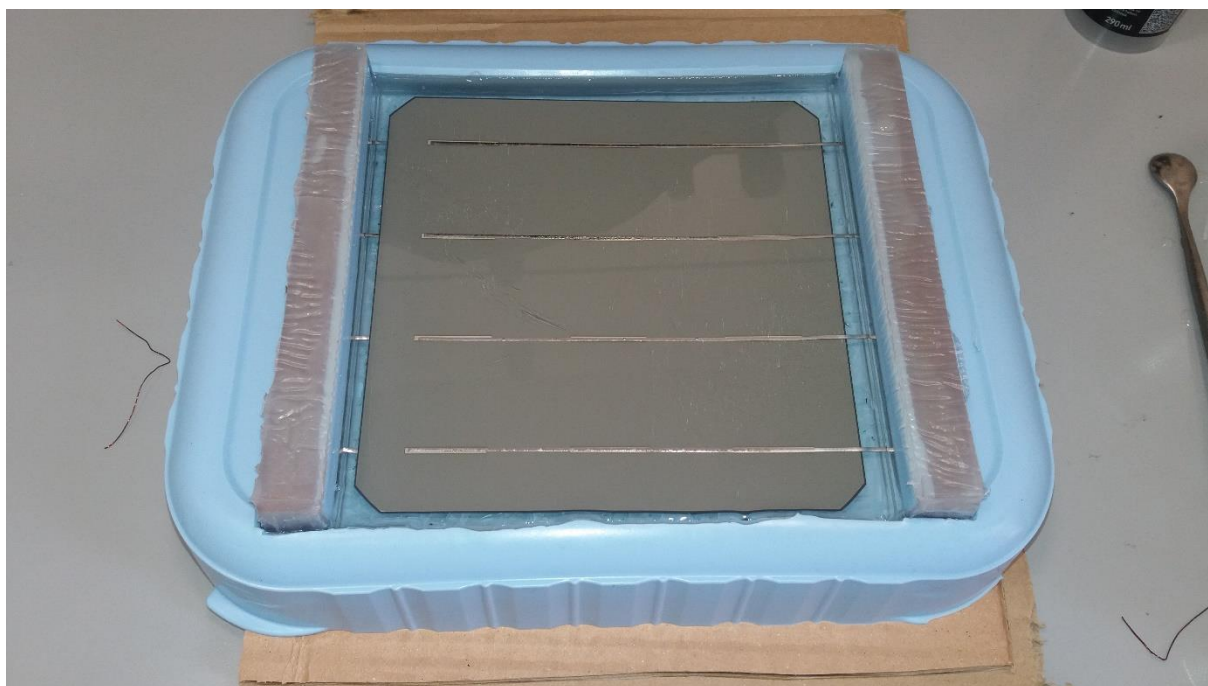
Joonis 2.36 17 cm x 17 cm silikoonvorm prototüübi valmistamiseks

Vastavalt eelnevalt mõõdetud optilistele ja mehaanilistele omadustele oli valitud valumaterjaliks epoksüüdvaik klaasikihiga 0,5 cm. Kõigepealt vorm kaeti vormieemaldussilikoniga. Siis asetati asfaldi mustri peale 0,5 cm paksune kiht purustatud karastatud klaasi tükke (Joonis 2.39). Järgmisena valati peale epoksüüdvaik ja asetati 15,6 cm x 15,6 cm päikeselement peale. Viimasena

kaitsti elektroodid ja valati teine 1 cm paks kiht epksüüdvaiku (Joonis 2.40). Prototüüp asetati ahju kõvenemiseks 50°C juures 16 tunniks.



Joonis 2.37 17 cm x 17 cm vorm täidetud klaasiga



Joonis 2.38 17 cm x 17 cm prototüüp silikoonvormis

2.4.8 Kokkuvõte.

Vastavalt mõõdetud mehaanilistele ja optilistele omadustele järgmine valik oli tehtud:

- 1) Mustriks on asfaldi jäljend. CAD-konstrueeritud muster reaalses kasutuses koguneks käreledes mustus, mis piiraks oluliselt vaigust oleva päikeseelemendi töö efektiivsust.

- 2) Põhimaterjaliks on epoksüüdvaik. Põhiliseks põhjuseks on selle materjali optilised omadused. Epoksüüdvaik laseb läbi valgust alates lainepikkusest 300 nm, mis on vastavuses kasutatava päikeelemendi töösagedusega. Polüestervaik laseb läbi valgust alates lainepikkusest 400 nm.
- 3) Mehaaniliste omaduste järgi valiti paneeli paksuseks 2 cm: 1 cm vaik + klaas päikeseelemendi peal ja 1 cm vaik + klaas päikeseelemendi all. Epoksüüdvaiku armeeritakse 0,5 cm paksuse kihiga purustatud karastatud klaasiga. Mehaaniliste omaduste poolt puhas epoksüüdvaik paksusega üle 1 cm ei anna piisava tugevusega materjali. Aga 0,5 cm kihi klaasiga armeeritud epoksüüdvaik oma mehaaniliste omaduste poolt kannatab soovitud raskust.
- 4) Klaas hakkab tööle alates 350 nm lainepikkusest. See viib prototüübi töövõimsust natuke alla. Kuid arvestades seda, et 0,5 cm kihina kasutatakse purustatud klaasi, ei mõjuta see oluliselt prototüübi tööd.

2.5 B-tüüpi katte väljatöötamine

2.5.1 B-katend asfaltbetoonist

Vastavalt lähteülesandele kavandati B-tüüpi katsekehad asfaltbetooni laadsest materjalist, mis peaks olema valmistatud mittefossiilsetest ja taaskasutatavatest lähtematerjalidest.

Sideaineks oli kavandatud biobituumen, projekti jaoks hangiti materjal Itaalia ettevõttelt Corecom s.r.l, kes toodab sideainet „evizero“ (<http://www.evizero.com/en/>). Sideaine oli konteineris kummitaoliste graanulite kujul (Joonis 3.1-3.2) ning vajab töötlemiseks temperatuuri 170 °C peale mida oli materjal väga viskoosne kuldse alatooniga vedelik (Joonis 3.3). Tootega kaasa tulnud info on lisatud käesoleva aruande lisadesse 1-3



Joonis 2.39 Biobituumeni graanulid

B-katte täitematerjalina kasutati O-I Production Estonia (end. nimega Järvakandi Klaas) AS juurest saadud purustatud klaasi (Joonis 3.3), mis sõeluti (Joonis 3.4) ja seejärel purustati (Joonisel 3.5 fraktsioon 8...12.5 mm enne ja Joonisel 3.6 pärast purustamist) AS Teede Tehnokeskuse laboris erinevatesse fraktsioonidesse:

- < 0.063 mm (filler, Joonis 3.7);
- 0.063...0.125 mm (Joonis 3.8);
- 0.125...0.25 mm (Joonis 3.9);
- 0.25...0.5 mm (Joonis 3.10);
- 0.5...1.0 mm (Joonis 3.11);
- 1.0...2.0 mm (Joonis 3.12);
- 2.0...4.0 mm (Joonis 3.13);
- 4.0...6.3 mm (Joonis 3.14);
- 6.3...8.0 mm (Joonis 3.15);
- 8.0...12.5 mm (Joonis 3.16);
- 12.5...16 mm (Joonis 3.17).



Joonis 2.40 Sulatatud biobituumen



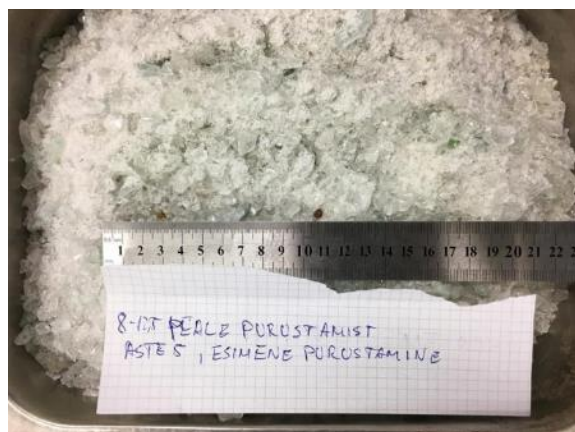
Joonis 2.41 Klaasitehase juurde kuulunud taaskasutusliinist saadud klaasipuru



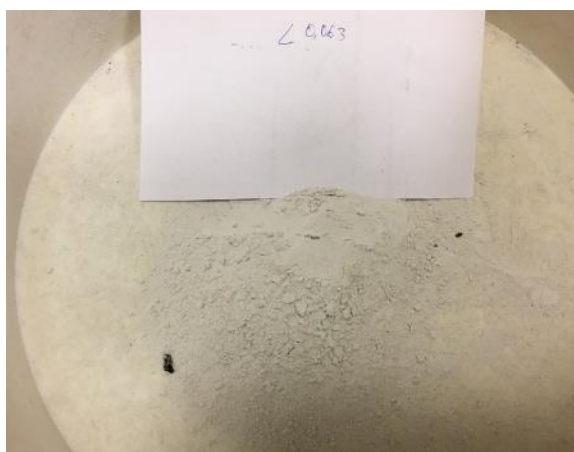
Joonis 2.42 Klaasipuru sõelumine, määramaks materjali fraktsioone



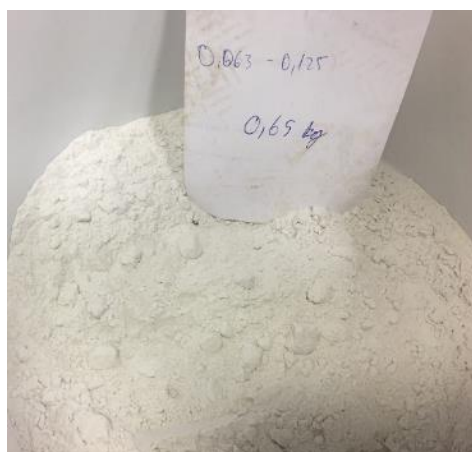
Joonis 2.43 Klaasipuru fr. 8...12.5 mm enne purustamist



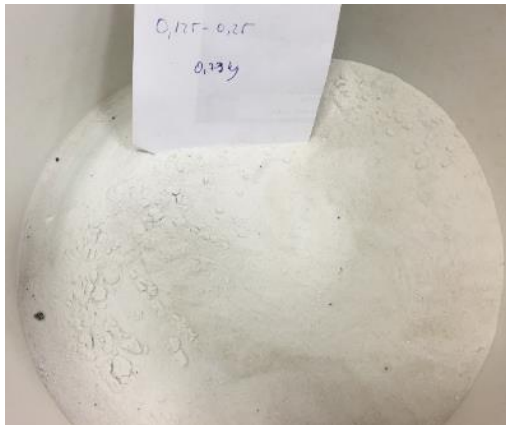
Joonis 2.44 Klaasipuru fr. 8...12.5 mm pärast purustamist



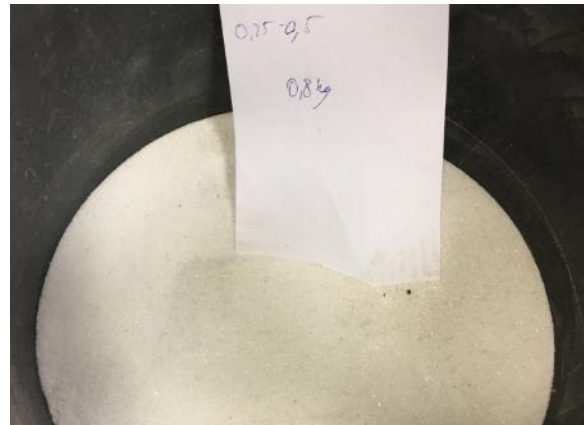
Joonis 2.45 Klaasipuru fraktsioon < 0.063 mm



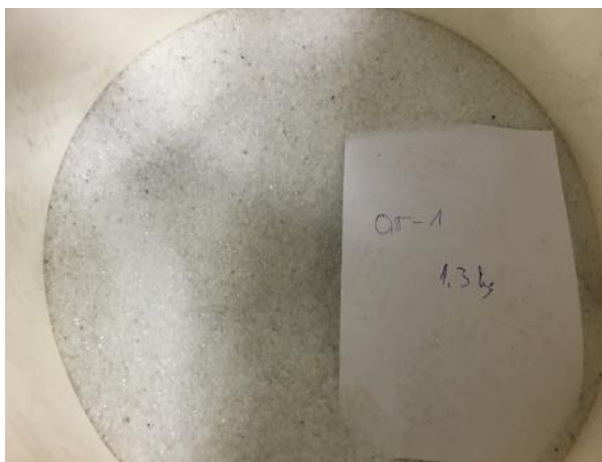
Joonis 2.46 Klaasipuru fraktsioon 0.063...0.125 mm



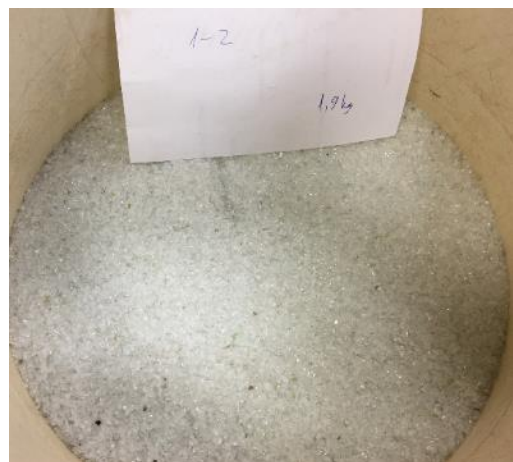
Joonis 2.47 Klaasipuru fraktsioon 0.125...0.25 mm



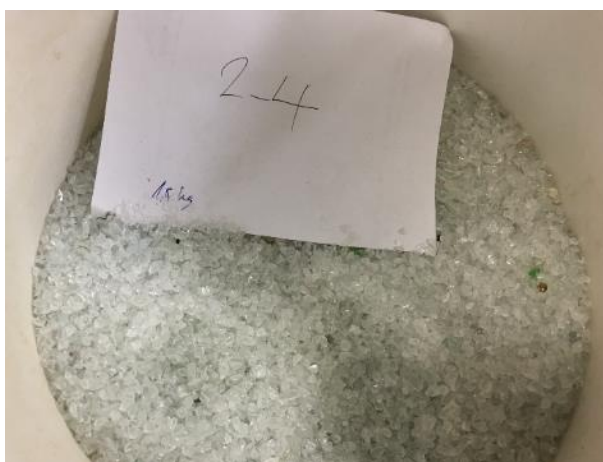
Joonis 2.48 Klaasipuru fraktsioon 0.25...0.5 mm



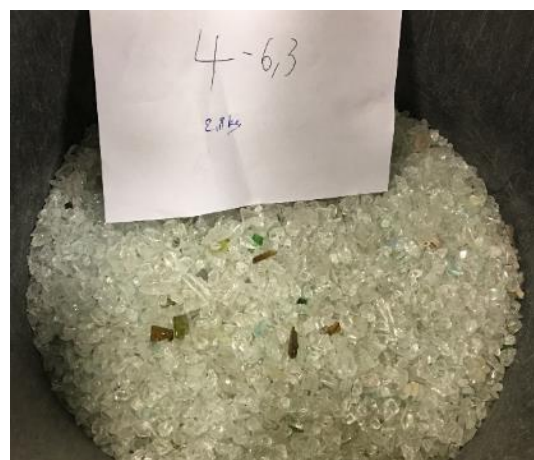
Joonis 2.49 Klaasipuru fraktsioon 0.5...1.0 mm



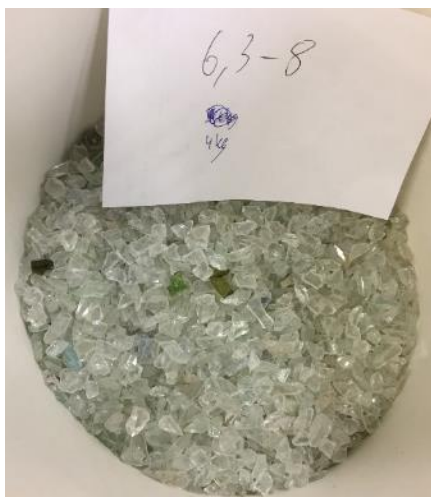
Joonis 2.50 Klaasipuru fraktsioon 1.0...2.0 mm



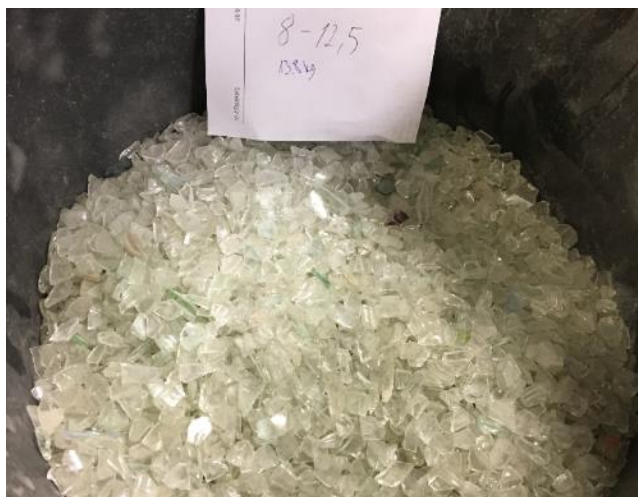
Joonis 2.51 Klaasipuru fraktsioon 2.0...4.0 mm



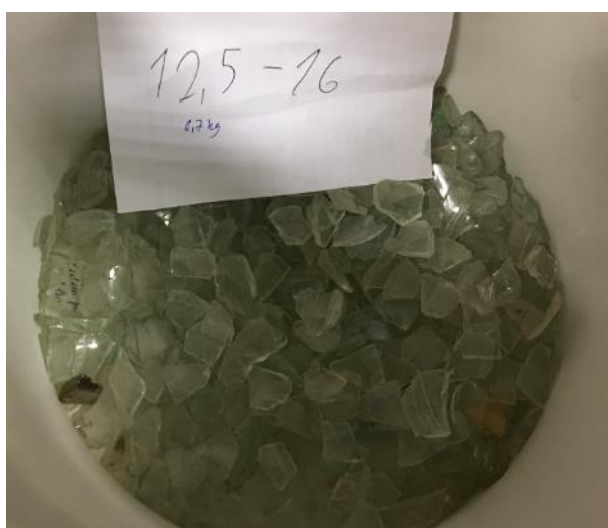
Joonis 2.52 Klaasipuru fraktsioon 4.0...6.3 mm



Joonis 2.53 Klaasipuru fraktsioon 6.3...8.0 mm



Joonis 2.41 Klaasipuru fraktsioon 8.0...12.5 mm



Joonis 2.55 Klaasipuru fraktsioon 12.5...16.0 mm

Seoses taaskasutatava klaasi olemusega (enamus toormest pärineb klaastaarast), on materjal väga plaatjas. Purustamise järgselt olid väiksemad fraktsioonid nurgelised, kuid muutusid alates fraktsioonist 4...6.3 mm pigem plaatjaks.

Peale täitematerjali purustamist ja sõelumist segati kokku terastikuline koostis, mis vastab SMA 12 sõelkõverale. Tulemus ei olnud ei visuaalselt ega ka toimivuselt aktsepteeritav – materjal oli liiga tume omamaks vajalikku valguse läbipaistvust ning samuti liiga plaatjas. Segust tihendati süiski ka proovikeha güraatoriga kasutades 50 pööret. Valmis segatud segu on esitatud joonistel 2.56 ja 2.57 ning tihendatud proovikeha joonistel 2.58 (et tihendamiseks kasutatud güraatori vorm oli õline, määrdus veidi ka tihendatud proovikeha). Valmistatud proovikeha ei püsinud hästi koos ning sellest oli võimalik kergesti eraldada klaasist täitematerjali, samuti oli eristatav täitematerjali purunemine. **Seetõttu ei olnud antud projekti eesmärkide täitmiseks võimalik kasutada klaasipurust ja biobituumenist valmistatud SMA 12 terakoostisele vastavat segu ning jätkati alternatiivse seguretseptiga.**



Joonis 2.43 SMA 12 terakoostisele vastav segu – tulemus on visuaalselt liiga tume ning täitematerjal väga plaatjas



Joonis 2.42 SMA 12 terakoostisele vastav segu – tulemus on visuaalselt liiga tume ning täitematerjal väga plaatjas

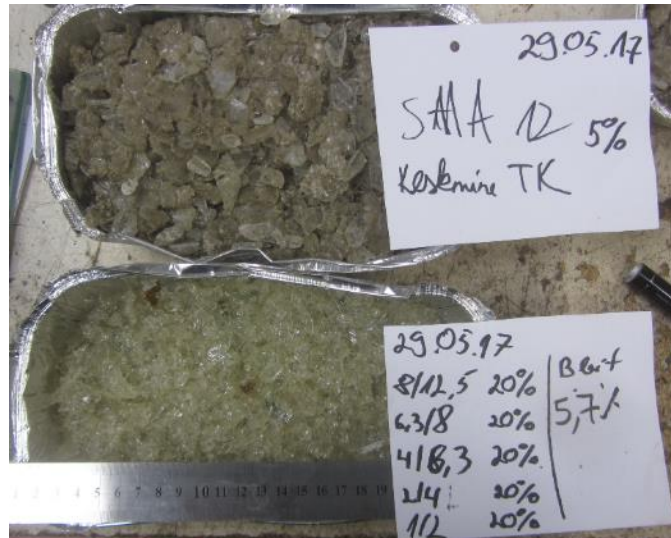
Et tõenäoliselt rikkus SMA segu valguse läbipaistvuse kasutatud peentäitematerjal (filler), siis koostati alternatiivse segureseptina segu, kus fillerist loobuti ja mis koosnes võrdsetes osades (igat 20 %) fraktsioonidest 1...2 mm, 2...4 mm, 4...6.3 mm, 6.3...8 mm ja 8...12.5 mm (Joonis 2.60). Saadud tulemus oli visuaalselt valguse läbipaistvuse suhtes oluliselt parem (Joonis 2.61). Valmistatud proovikeha saeti eri paksusega sektoriteks – 4 cm, 2.5 cm ja 1 cm (Joonis 2.62).



Joonis 2.58 SMA 12 terakoostisele vastav tihendatud proovikeha



Joonis 2.59 Valmis segatud asfaltsegu, milles kasutati võrdsetes osades fraktsioone (igat 20 %) 1...2 mm, 2...4 mm, 4...6.3 mm, 6.3...8 mm ja 8...12.5 mm



Joonis 2.60 Valmis segatud asfaltsegud – segu, milles kasutati võrdsetes osades fraktsioone (igat 20 %) 1...2 mm, 2...4 mm, 4...6.3 mm, 6.3...8 mm ja 8...12.5 mm ning SAM 12 terakoostisele vastav segu

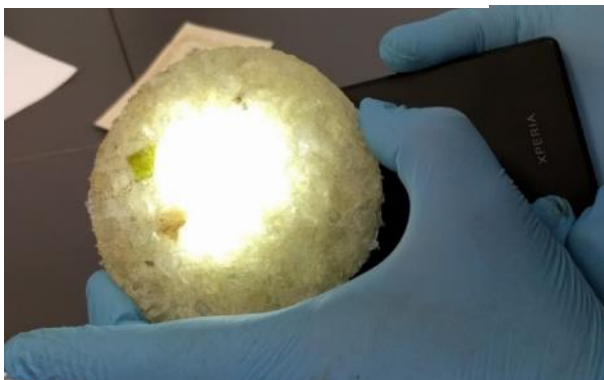


Joonis 2.61 Eksperimentaalse segu tihendatud proovikeha

Joonisel 2.61 kujutatud proovikeha saeti kolme eri paksusega kihiks (Joonis 2.62) ning saadeti testimisele valguse läbipaistvuse suhtes.

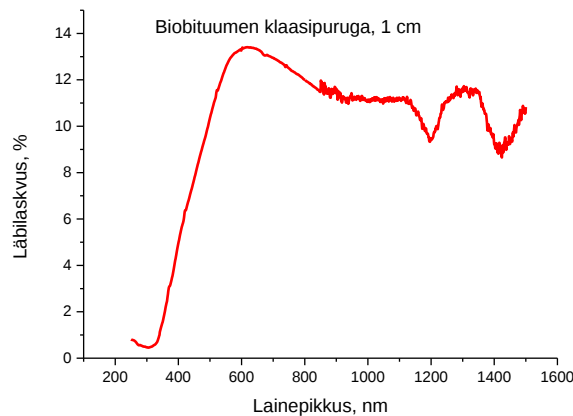


Joonis 2.62 Eri paksusega kihtideks saetud proovikeha



Joonis 2.63 Esiõlgset katsetused lõigatud sektorite valguse läbipaistvuse osas. 1 cm paksune sektor andis parimaid tulemusi, paksemate sektorite läbipaistvus vähenes oluliselt

Kõige õhema, 1 cm seibi optilist läbilaskvust kontrolliti TTÜ laboris ning selgus, et see oli ca 12% (Joonis 2.64). Ka sideaine ei lase läbi märkimisväärselt valgust. Võrdluseks, A-katsekehade materjalide läbipaistvuse näitajad olid selgelt üle 50%. **Seoses väga nõrga optilise läbilaskvusega ei ole otstarbekas jätkata B-katte arendamisega.**



Joonis 2.64 1 cm paksuse B-katte seibi optiline läbilaskvus on väga madal, mistõttu ei ole otstarbekas sellega jätkata

2.5.2 B-katendi alternatiiv

Järvakandi klaasipuru söelumise tulemusel eristatud fraktsioonidest fr 2...4 mm kujunes oma terakujult kõige sobilikumaks, kuna teistel oli klaasi kild liialt plaatjas ja terav. Järgnevalt jätkatakse katsetega, kasutades sideaineks EPO vaiku. Täitematerjaliks on kasutada nii Järvakandi klaas, kui ka karastatud klaasi purustamisjääk (üsna ühetaolised 2...5 mm küljepikkusega valdavalt kuubikujulised tükid) ja samuti metallvõrk. Purustatud klaasi ja EPO kombinatsioon on katsetatud A-katendina, seetõttu B-katendis erineks see vaid paigaldustehnoloogia osas (suurem monoliit või tänavakivi-elementid), mistõttu projekti antud faasis selle jaoks täiendavat proovikeha ja katsetamist ette ei nähtud.

Esmalt leiti, kuivõrd metallvõrk takistab valguse liikumist millest tulenevalt saab otsustada, kas seda kasutada. Metallvõrgu efekt oleks pinna karestamises. Täitematerjal ei vasta ühelgi juhul kehtivatele asfaltbetooni standarditele. Asfaldi nõuded tulenevad autoliikluse vajadustest (karedus - haardetegur), kui vähemalt algfaasis on kavandatud katend kergliiklusele (jalgrattad, jalakäijad jms), siis ei ole nende nõuete ühene täitmine nii kriitiline. Metallvõrgu kasutamine EPO-ga fikseeritud pinnakihi annab tõenäoliselt haardeteguri. Katte tekstuuride saavutamiseks on mitmeid tehnoloogilisi võimalusi, kuid B-katsekeha puhul tuleb kaaluda selliseid, mis on rakendatavad välitingimustes. Seega mitmesugused valuvormidega seotud variandid on sisuliselt välistatud ning tekstuur tuleb saavutada kasutades pindamist või vahepealses tardumisfaasis spetsiaalse pinnakattega rulliga töötlemise teel.

EPO vaikude kasutamine on sobilik katseseadme jaoks, kuid järgmise etapi kavandamisel tuleks leida odavam alternatiivne sideaine, seda nii tehnoloogiliste omaduste (valmistamine välitingimustes), kui ilmastikukindluse küsimustes (soojuspaisumine). Katse-eksemplaride tootmisel esinenud probleemid viitavad vajadusele suuremõõtmeliste paneelide puhul arvestada ka soojuspaisumise erisust paneeli üla- ja alakihi vahel, mis betoonteede puhul (Austraalia) on

nõudnud 4,5-meetri vahemaaga vuukide rajamist. Kui elektri- ja valgustehniliselt on võimalik EPO lahendus, siis järgmise etapi käigus tuleb uurida erinevate lahenduste kulumiskindlust, puhtal EPO pinnal on see teadaolevalt madal, kui kasutatakse naastrehve. Ka täiteainena kasutatava purustatud klaasi puhul võib kulumiskindlus madal olla, tõenäoliselt on olemas ka parema kulumiskindlusega klaasi, kuid see ei oleks taaskasutatav vaid uus, spetsiaalselt selleks toodetud materjal.

Uurimisgrupp on seisukohal, et projekti arendamisel tuleb katendi osas keskenduda just kergliikluse vajadustele.

3 Demoseadme ettevalmistus

3.1 Üldosa

Projekti 3. etapi käigus ehitati kaks katseseadet – üks koosneb tänavakivilaadsetest plokkidest ja teine on monoliitne, kaetud kulumiskindluse tõstmiseks terasvõrguga. Mõlema arvestuslik tootlikkus on päikeselise ilmaga 50W. Peamine potentsiaalne kasutusvaldkond on teede infrastruktuuri varustamine vajaliku elektriga mis võib anda efekti iseäranis elektrivõrgust kaugemal olevates piirkondades. Koostatud kahe katseseadme jaoks ehitati rakendused, mis koosnevad valgusfoorist ja LED-ribadest katseseadmes. Energia salvestuseks ja puhvriks kasutatakse käesolevas projektis tavapäraselt plii-happeakut mis on odavam võrreldes mahusäästlikuma liitiumioonakuga. Li-ion akul põhineva lahenduse loomine katendi jaoks eeldab täiendavat arendust. Projekti käigus uuriti ka superkondensaatorite kasutamise võimalust kuid peamiseks takistuseks on nende pinge ebastabiilsus. Superkondensaatoritel on kahtlemata eelised mis teevad selle kasutamise pikaajalises perspektiivis mõistlikumaks, kuid praeguses kontekstis on põhieesmärk siiski energia tootmise ja kattekonstruktsiooni osas toimiva rakenduseni jõuda.

Rakenduste (tarbija) juhtimiseks on koostatud elektroonikablokk, mis sisaldab kaks mikroarvutit – Arduino kontrolleri jälgib paneeli poolt toodetud energia kogust (vooluandur ja pingeandur) ning kuvab LCD paneelile iga sekundi kohta hetkeväärtused. Raspberry kontrolleri juhib rakenduste tööd ja on võimeline edastama minuti keskmised väärtused serverisse hilisemaks analüüsiks. Rakenduste töö on seotud liikumisanduriga ning esimeses lähenduses on toimeskeem alljärgnev:

- Liikumisanduri aktiveerimine rakendab valgusfoori punase tule, selle tööaeg on orienteeruvalt viis sekundit
- Seejärel on lühike periood kollase tulega
- Seejärel pikem periood, orienteeruvalt 15 sekundit, roheline tulega
- Seejärel pikem periood, orienteeruvalt 30 sekundit, kollase tule vilkuv režiimis
- Järgneb ooterežiim, kus foorituled ei põle, kuni järgneva liikumisanduri aktiveerimiseni.
- Liikumisanduri aktiveerimine enne ooterežiimi viib tsükli algusse punase tulega. Liikumine kuni roheline tule lõppemiseni tsükli ei mõjuta

LED-ribad katseseadmes on käesolevas etapis rakendati algselt pidevrežiimi võimalusega lülitist ühendus katkestada. Enne seadmete statsionaarset paigaldamist (üks, ilmselt e-tänavakivi rakendus, MEKTORY ette, teise seadme asukoha otsustab Tellija, kuid esialgne ettepanek on selle paigalduseks Maanteemuuseumi), lisata juhtblokki LED-ribade täiendav juhtimismoodul, mis võimaldab neid rakendada vilkuv režiimis. Kuna e-paneel rakenduse LED-ribas on tegemist kolme eraldi juhitava värviga, rakendatakse ka vilkuv režiim nendele värvidele eraldi (värvid lülitakse tööle järjestikku vahepealsete pausidega, nii töö kui pausi pikkus võiks olla ca 1 sekundi).

Rakenduse töörežiimid on programmiselt muudetavad ilma kasti avamata (programmi asendamine), kasutades traadita ühendust.

Elektroonikaosa ja aku monteeritakse veekindlast vineerist kasti, kaablite ühendamiseks kasutame klemmliistu (mitte pistikuid), kuna seadmed jäävad statsionaarsesse režiimi, ühendused hermetiseeritakse. Valgusfoori kandur (toru) kinnitatakse juhtbloki kasti külge. Statsionaarse paigutuse puhul on foor võimalik paigaldada ka eraldi, kuid juhtbloki lähedale.

Paneeli poolt toodetava energia info kasutamiseks pöördub projekti kodulehe rakendus serveri poole, mis edastab soovitud tulemused nii numbrilises kui graafilises kujus. Selle osa käivitamine

toimub septembrikuu jooksul ning lepitakse täiendavalt kokku Tellijaga. E-panel rakendus on metallvõrgu tõttu oluliselt vähem efektiivne ja projektimeeskonna ettepanek on selle toodetavat energiat mitte seirata.

Kuna PV-elementid suudavad päikeseenergiast elektri muundada vaid osa ning ülejäänud eraldub soojusena, on projekti ekspertide hinnangul talvetingimustes võimalik, et kuni -7°C temperatuuridel jääsoojus sulatab katseseadmelt ka lume. Selles osas saame järeldusi teha siiski alles praktikas.

Projektimeeskonna ettepanekud edasiseks arendustööks ja võimalike rakenduste kavandamiseks esitatakse lõpparuandes.

Projekti 3. etapi käigus loodi ka koduleht, mis asub aadressil <https://www.ttu.ee/projektid/e-pavement/>

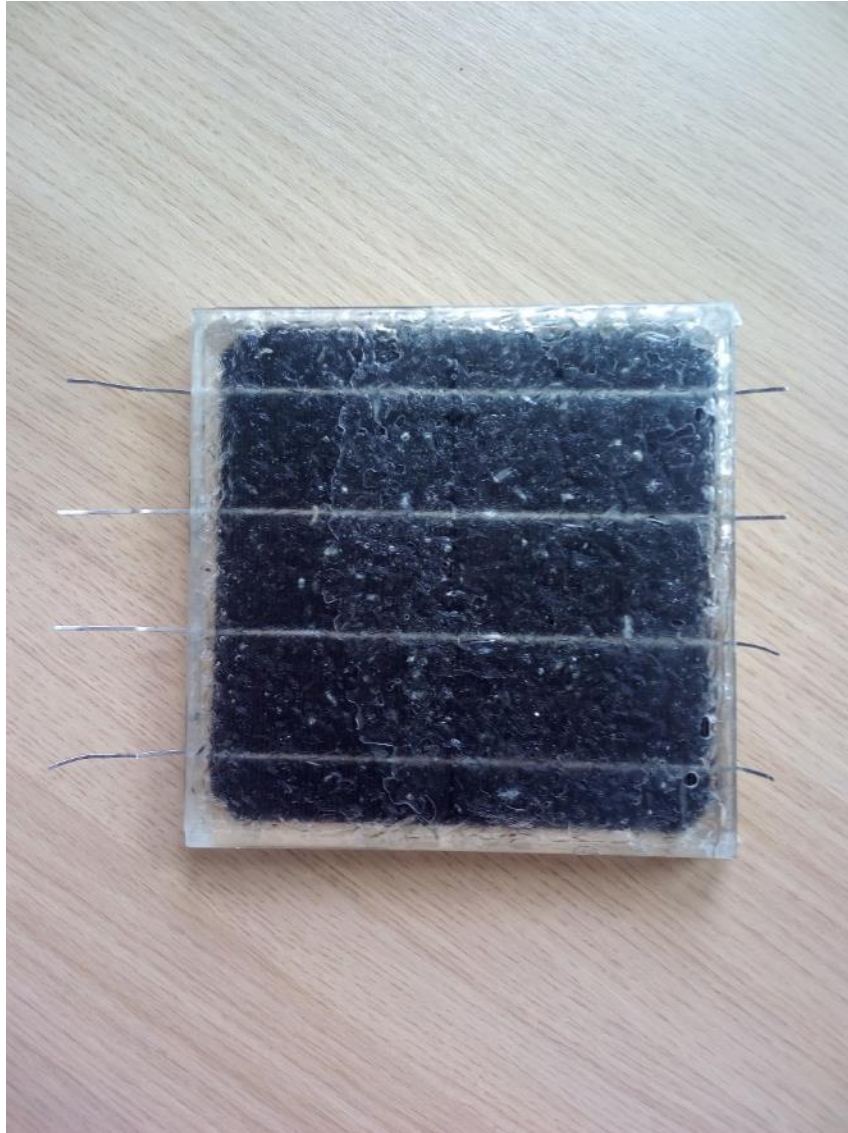
Turundusmaterjalidest valmisid A1 ja A0 formaadis postrid, mida demonstreeritakse nii Balti Maanteed konverentsil kui MEKTORY' s.

3.2 A-tüüpi kattega demoseade

3.2.1 Kivide parameetrite test

Hindamaks katendi optilisi omadusi, tehti viiele 17x17cm tänavakivile (Joonis 3.1) elektriliste väljundparameetrite test. Tulemused on esitatud alljärgnevas tabelis:

Katsekeha	Pinge, V	Vool, A	Võimsus, W	Võimsuse kadu
Algne päikeseelement	0.66	2.7	1.782	
e-katendi kivi nr 1	0.67	2.6	1.742	2.2%
e-katendi kivi nr 2	0.656	2.6	1.706	4.3%
e-katendi kivi nr 3	0.68	2.6	1.768	0.8%
e-katendi kivi nr 4	0.64	2.6	1.664	6.6%
e-katendi kivi nr 5	0.675	2.6	1.755	1.5%
e-katendi keskmine	0.6642	2.6	1.727	3.1%

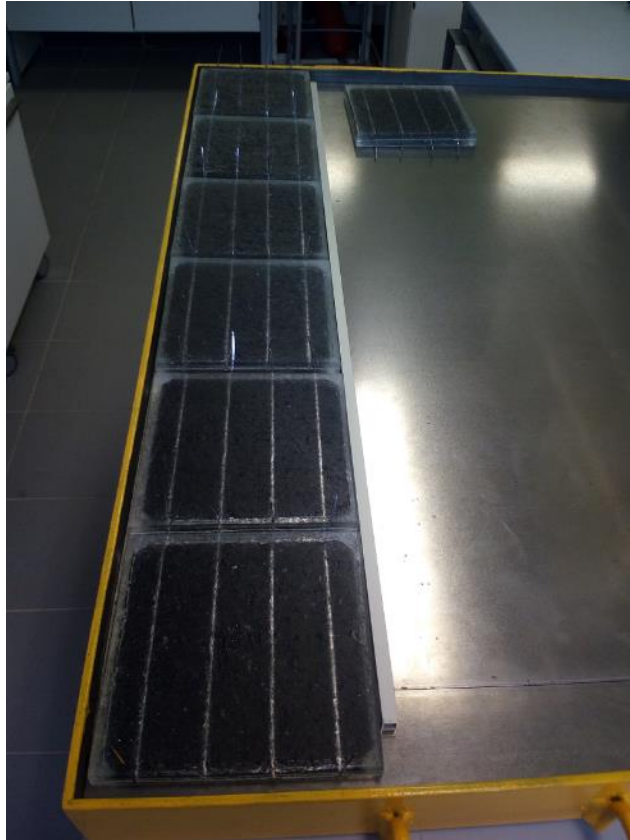


Joonis 3.1. E-katendi element. Näha on päikeseelement, väljundjuhtmed ja läbipaistev kattekiht EPO-st

Kokkuvõtvalt võib öelda, et e-katendi kivi on õnnestunult pakitud mehaaniliselt ja keskkonnamõjutuste eest kaitstud kesta, mis laseb suurepäraselt valgust läbi.

3.2.2 A-kattega ruutmeetrise kapseldatud katseseadme koostamine

A-variandi e-katendi jaoks konstrueeriti ja keevitati kokku 75 mm x 5 mm nurkraud raam, mille põhja asetati penoplastist 50 mm paksune kiht toetuseks. Sellele asetati 1 mm plekist vahekiht, millele valati 2-3 mm EPO kiht ja sellele veel 1mm kiht silikoonliimi, mille külge kinnitati e-kivid ja ühendati need jootmise teel nii, et kivide vahele jäi 10 mm puhverruumi. Puhverruumi mahutati kaks LED riba. Kõik elektrilised ühendused tehti töökindluse tõstmiseks jootmise teel. Väljaviigud toodi metallraami serva, keskele ja varustati karbikuga, millest lähevad kaks väljundjuhet akule ja juhtelektroonika plokki.

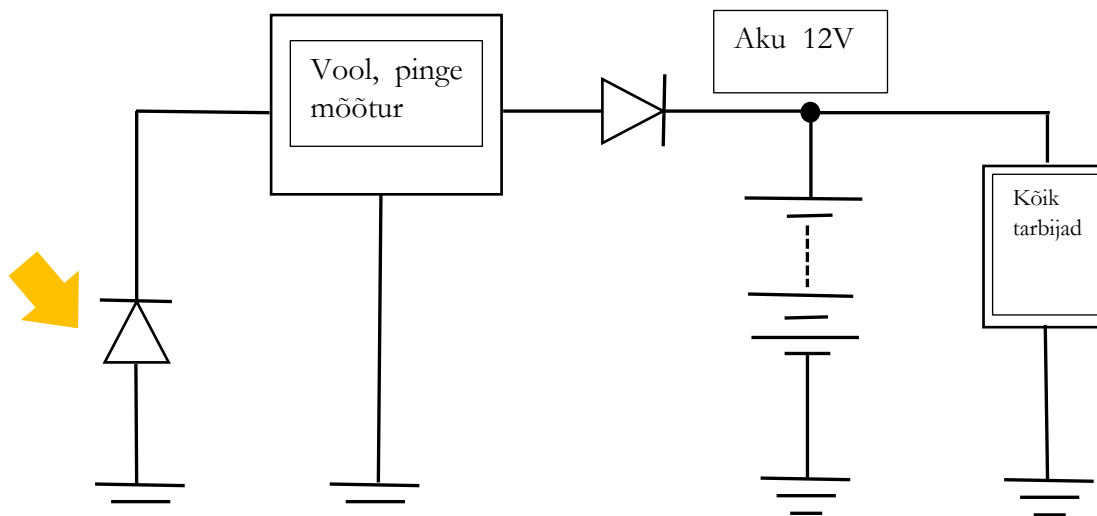


Joonis 3.2 E-katendi elemendid ja LED-ide alusliist valmis kinnitamiseks.



Joonis 3.3 Valmis e-katendi elementidest e-kõnnitee lõik. Elemendid on üksteisega ühendatud silikooniga, mis tagab kogu elektriühenduste veekindluse.

Väljundkaabliga ühendati puhvertoiteallikas (aku, superkondensaator) ja tarbija (LCD-foor, toodetava energiakoguse mõõteseadmed).



Joonis 3.4. E-katendi elektri tootmise ja tarbimise põhimõtteline skeem

Vaatlesime energia salvestamisel ühe võimaliku lahendusena ka superkondensaatorit. Leidsime, et:

1. See pole odav lahendus investeerimisel ehkki peab kauem vastu.
2. Kondensaatori pinge sõltub laetuse tasemest. Tarbijad nõuavad aga konstantset pinget. See eeldab väga laia sisendpingevahemikuga pingemuunduri olemasolu, mis on võimalik, aga teeb superkondensaatoritega salvesti veelgi kallimaks.
3. Akumulaatoril on aga pinge kogu laetuse ulatuses enam vähem konstantne.
4. Seega antud projektis me ei valinud salvestiks superkondensaatorit.

Kokkuvõtteks võib öelda elektriliste parameetrite kohta järgmist: A-tüüpi päikesepaneel toodab päikese all AM1.5 voolu 2,6 A pingega 18V, võimsusega 47W, mis annab 6 tunniga ca 16 Ah suuruse laengu akule. See laeng luba öise aja vajaduspõhist valgustamist LED valgustitega.

3.2.3 A-tüüpi katsekeha valmistamine

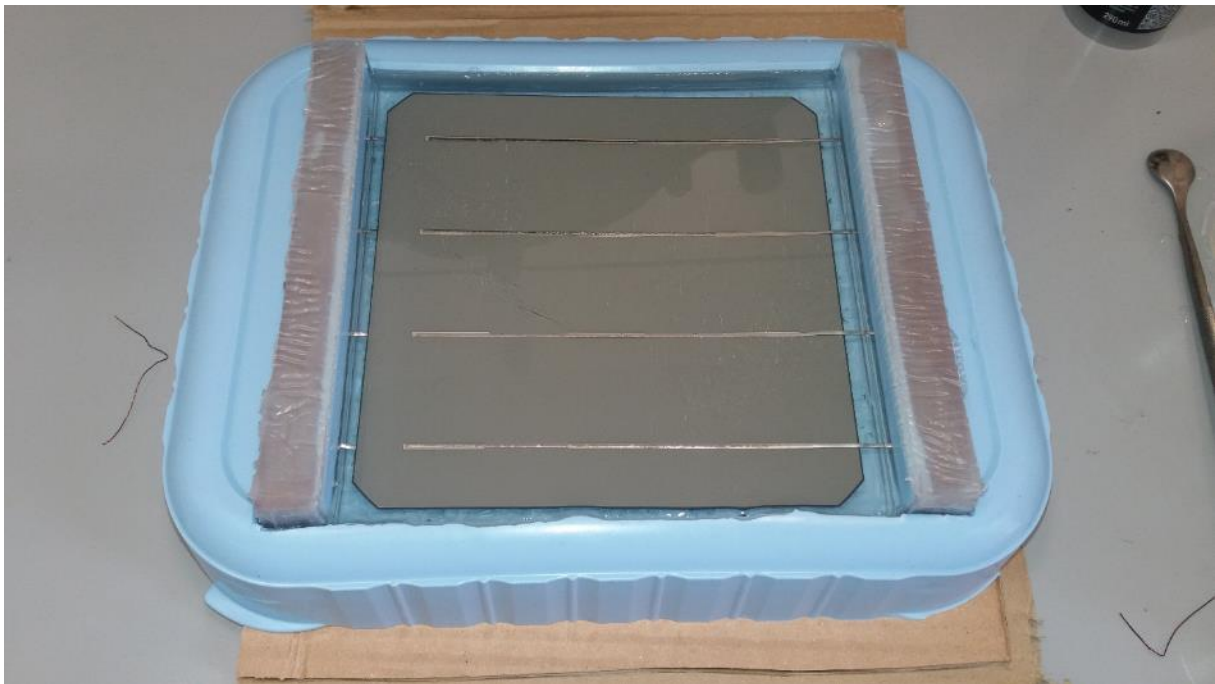
Kõigepealt valati 36 tk 16 cm x 16 cm sillutuskivisid järgmiselt:

- Vormisilikooni valati ~0,5 cm kiht EPO vaiku
- EPO vaigu sisse asetati ~0,5 cm kiht purustatud karastatud klaasi (joonis 3.5)



Joonis 3.5 Purustatud klaasiga valuvorm

- Saadud kihi peale asetati päikeseelement ja isoleeriti metallelektroodid külgedelt, et kuivamisel vedel EPO vaik ei kataks neid (Joonis 3.6)



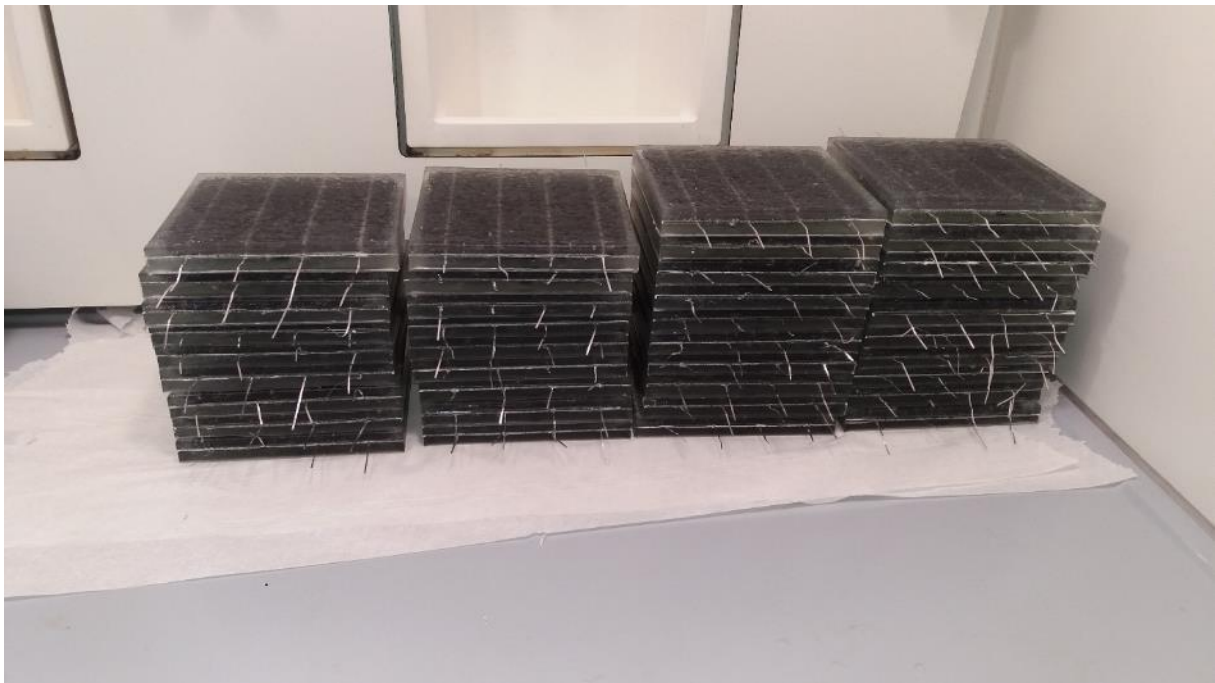
Joonis 3.6 Päikeseelementide ja isoleeritud metallelektroodidega valuvorm

- Peale seda valati järgmine kiht EPO vaiku ja asetati järgmine ~0,5 cm kiht purustatud karastatud klaasi. Purustatud karastatud klaas oli pandud fotoelemendi mõlemalt poolt kahel põhjusel: EPO kahanemise tõttu kuivamisel ja sillutuskivi omahinna vähendamiseks. (Juhul kui panna klaasi ainult pealiskihi sisse, tõmbub kokku rohkem sillutuskivi alumine kiht. See omakorda tekitab pinget fotoelemendile, sest ülemine kiht antud juhul sisaldab vähem vaiku).



Joonis 3.7 e-tänavakivide kuivamisprotsess

- Kõik sillutuskivid valmistati toatemperatuuril. Toatemperatuuril ühe sillutuskivi kuivamisaeg on 48 tundi:



Joonis 3.8 Valmis e-tänavakivid

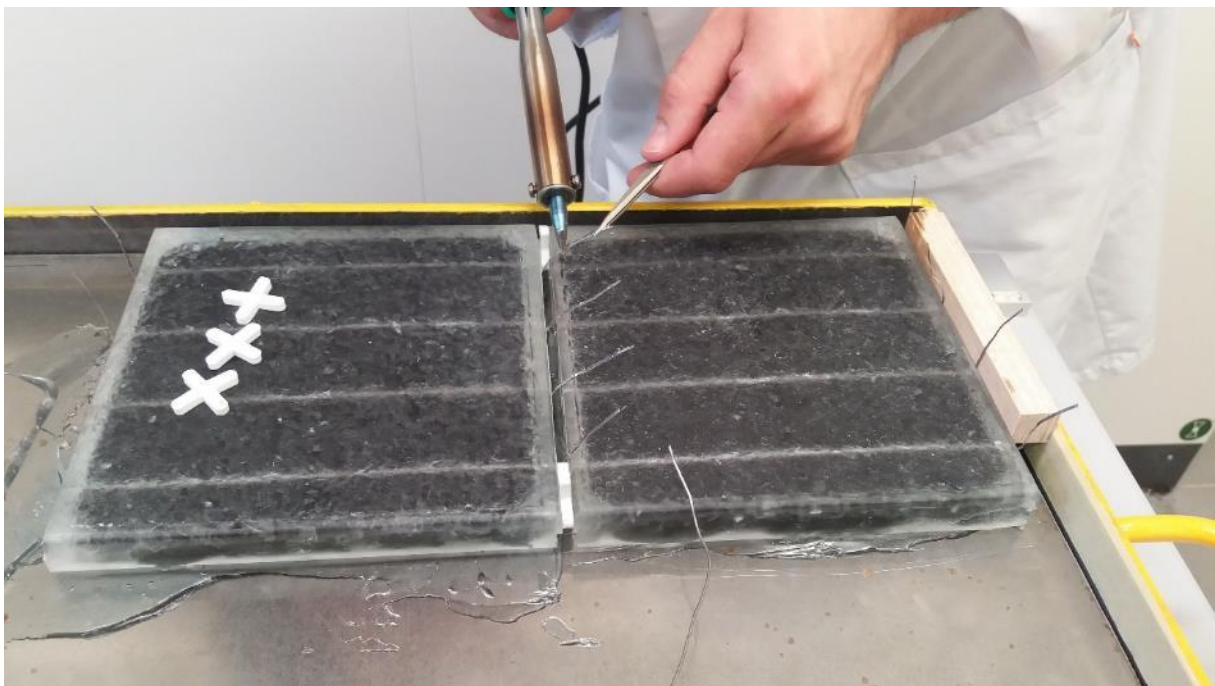
- Tegime katseid ka kõrgendatud temperatuuril, et lühendada kuivamisprotsessi. Katsed näitasid, et EPO liiga kiire ja ebaühtlase kuivamise tõttu moodustuvad sillutuskivi sisse praod ja valmis sillutuskivi on kõver:



Joonis 3.9 Kõrgendatud temperatuuril kuivanud e-tänavakivi

Järgnevalt installeeriti 36 e-tänavakivi ettevalmistatud metallkasti.

- Sillutuskivid olid asetatud ükshaaval kasti sisse. Kivide vaheline kaugus jäeti ~0,5 cm, kasutades vuugiriste



Joonis 3.10 Tänavakivide installeerimine. Vuugiristid on valged, joonisel vasakul.

- e-tänavakivi liimiti läbipaistva hermeetikuga Penosil Premium ClearFix (see on ilmastiku- ja UV-kindel hermeetik, mis annab tugeva ja hermeetilise liimliite). Enne järgmise sillutuskivi asetamist eelmine sillutuskivi oli ühendatud nelja elektroodiga jootmise teel ja fotoelemendi töö kontrollitud voltampermeetriga.

- LED-riba liimiti esmalt 1cm x 1 cm anodeeritud alumiiniumprofiili külge ja siis asetati kasti sisse:



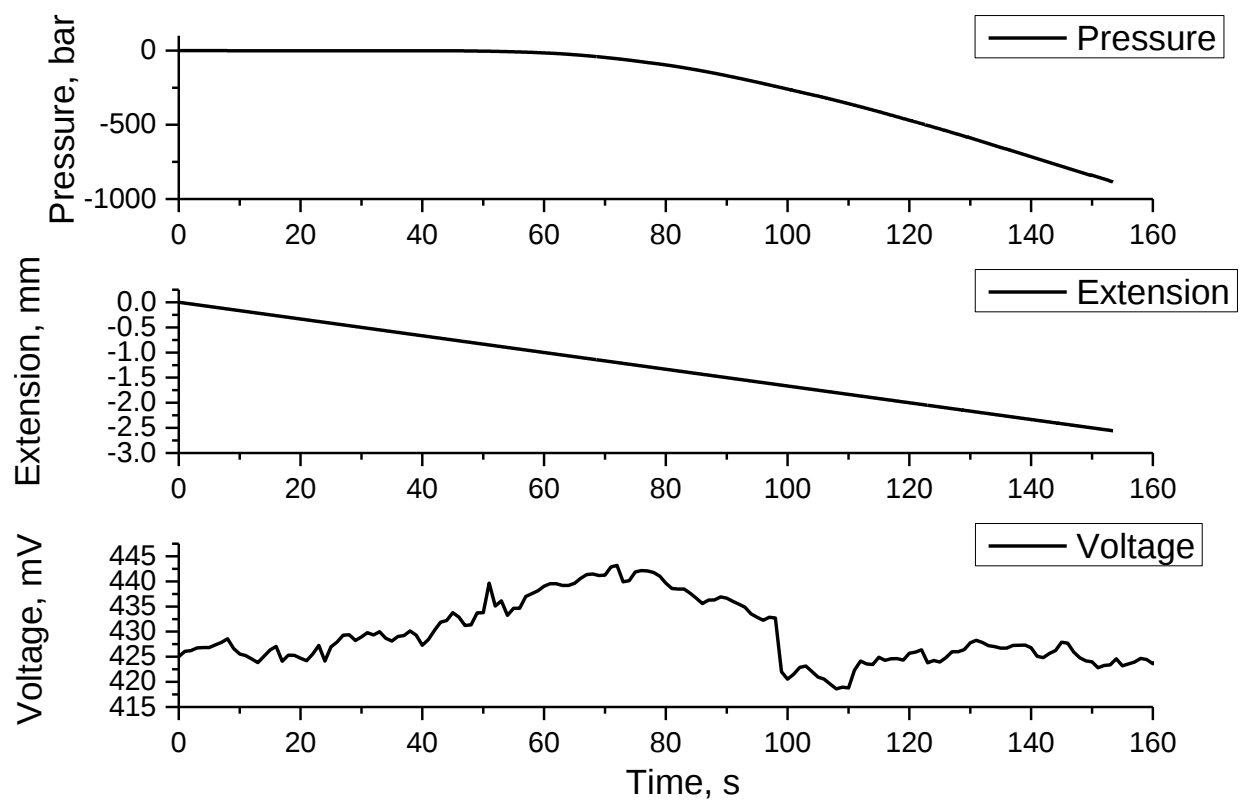
Joonis 3.11 LED ribade installeerimine

- Kui kõik elemendid ja LED-ribad olid liimitud metallpõhjale elektroodid asetati vuukide sisse pintseti abil ja vuugid isoleeriti sama hermeetikuga Penosil Premium ClearFix.
- Peale seda oli tehtud viimistluskiht musta silikoonhermeetikuga Penosil Premium Universal Silicone:

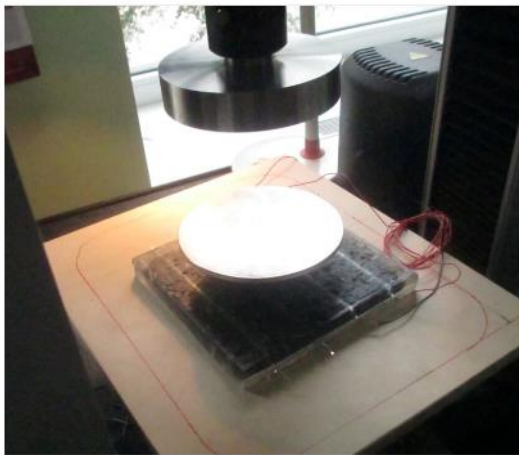


Joonis 3.12 Projektirühm tutvub A-tüüpi katendi prototüübiga

Kivile viidi läbi mehaanilisele stressile vastupidavuskatse. E-tänavakivile rakendati jõud, mis on võrdne koormusega 1000 kg/cm^2 kohta. Jõu rakendamise käigus fikseeriti pinge. Katsetulemused (Joonis 3.13) näitasid, et jõu suurusel isegi 1000 kg/cm^2 kohta E-tänavakivi töötab korralikult. Väline EPO katend täidetud karastatud klaasiga kaitseb päikeseelemendi paindumisest ja murdmisest. Joonisel 3.14 on illustreeritud katse läbiviimise kord.



Joonis 3.13. Mehaanilisele stressile vastupidavuskatse tulemused.



Enne katsetamist



Pärast katsetamist

Joonis 3.14. Mehaanilisele stressile vastupidavuskatse teostamine.

3.3 B-tüüpi katsekeha valmistamine

B-tüüpi päikesepaneel kujutab endast standardset päikesepaneeli, mis on kapseldatud nii eest, kui ka tagant klaasipuruga täidetud EPO kihti. Kõige peal on hõõrdejõu ja tugevuse tõstmiseks metallvõrk.

Antud paneel on asetatud samuti karprauast 125 mm raami, mille põhjas on 10 cm penoplasti.

Raami suurus on 162 cm X 100 sm. B-tüüpi päikesepaneeli pinnal, uputatuna EPO-sse, on kaks kolmevärvilist LED riba. Igat värvi (sinine, punane, roheline) saab eraldi juhtida. Elektriline skeem on analoogiline Joonisel 2.22 kujutatuga. Antud paneelil on nn bypass dioode vaid kolm ja sellega lülitatakse sisse/välja kolme sektsiooni päikeseelemente.

B-tüüpi päikesepaneel kaotab ca 40% päikeseenergia tootlikkusest varjuefekti tõttu (metallvõrk).

Esmalt valmistati terasest metallkast mõõtudega 102x166 cm. Katsekeha valmimise protsess on kujutatud järgnevatel fotodel.



Joonis 3.15 Kasti põhi tehti kahekihiline, alumiseks kihiks vahtplast kõrgusega 7 cm ja ülemiseks kihiks veekindel vineer paksusega 2 cm.



Joonis 3.16 Vineeri lõigati juhtmetele ava



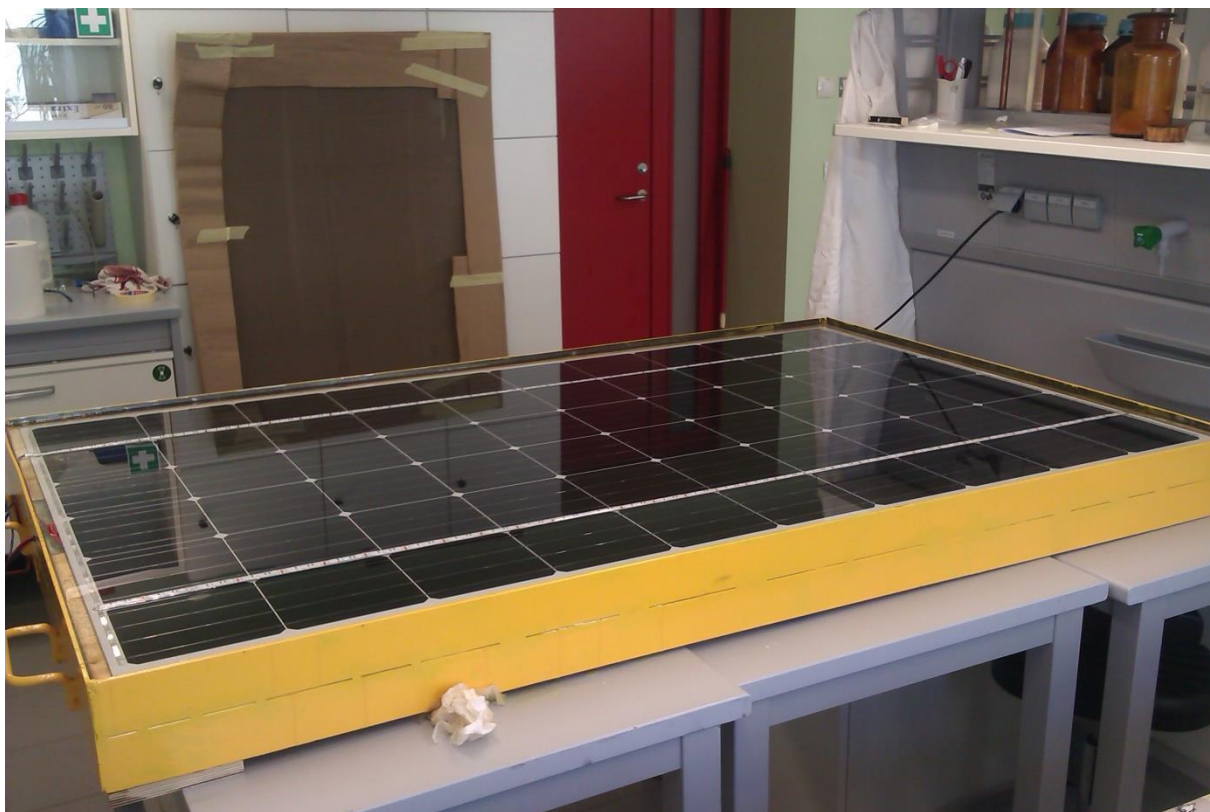
Joonis 3.17 Kõik sisemised vuugid isoleeriti läbipaistva Penosil Universal Silicone hermeetikuga



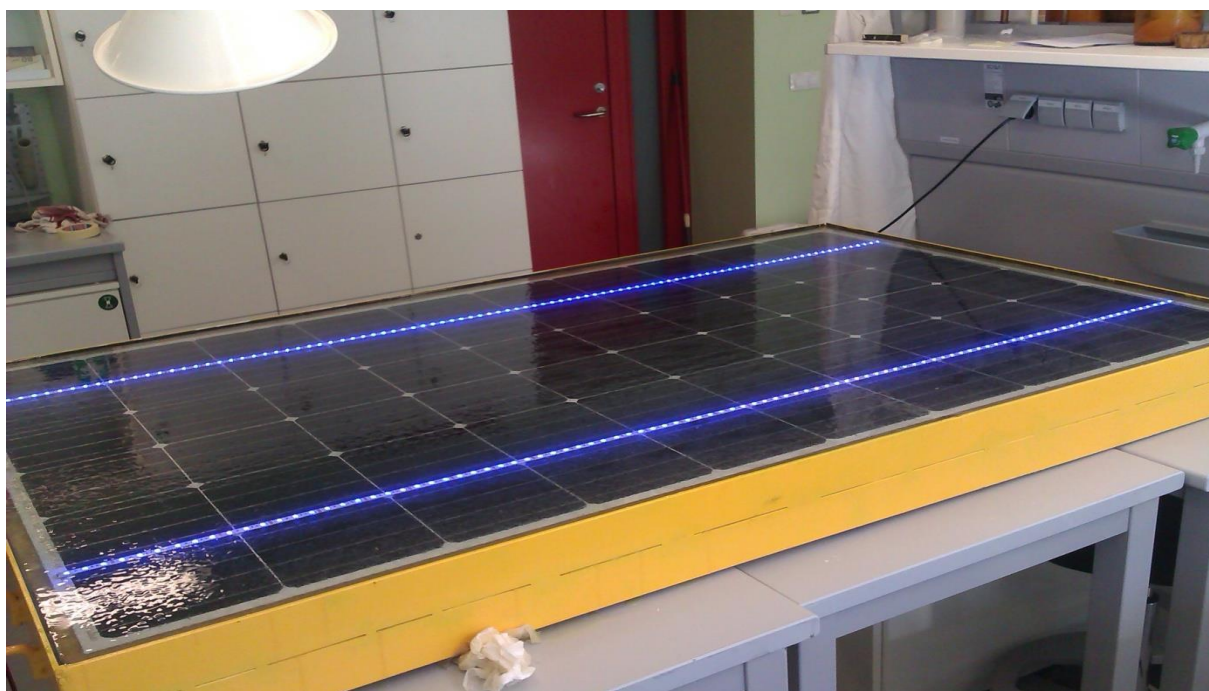
Joonis 3.16 B-tüüpi katsekeha puhul valati kõigepealt ~0,5 cm EPO kiht. EPO kihi sisse asetati ~0,5 cm kiht purustatud karastatud klaasi.



Joonis 3.17 Kuivanud EPO-klaas kihi peale asetati ettevalmistatud paneel. Paneeli pinna peale liimiti enne kasti panemist omavahel ühendatud LED-riba



Joonis 3.18 Järgnevalt valati kasti piisav kogus EPO-t, et see ettevalmistatud päikesepaneeli täielikult uputaks. Paneeli all kasutati paneeli tõstmiseks majakaid, et tagada vähemalt 0,5 cm paksune EPO kiht paneeli all (kokku on paneeli all EPO/klaasi segu 1 cm)



Joonis 3.19 Paneelile kanti 0,5 cm paksune purustatud klaasi kiht, mis omakorda kaeti taas EPO vaiguga (kokku läks paneeli peale EPO/purustatud klaasi segu 1 cm) ning jäeti 48 tunniks tahenema



Joonis 3.20 Järgnevalt valati pealiskihiks 0,5 cm EPO vaiku metallvõrgu kinnitamiseks katendile. Metallvõrk asetati paika, millele asetati tasase pinna saavutamiseks karastatud klaas ning täiendavad raskused (tellised)



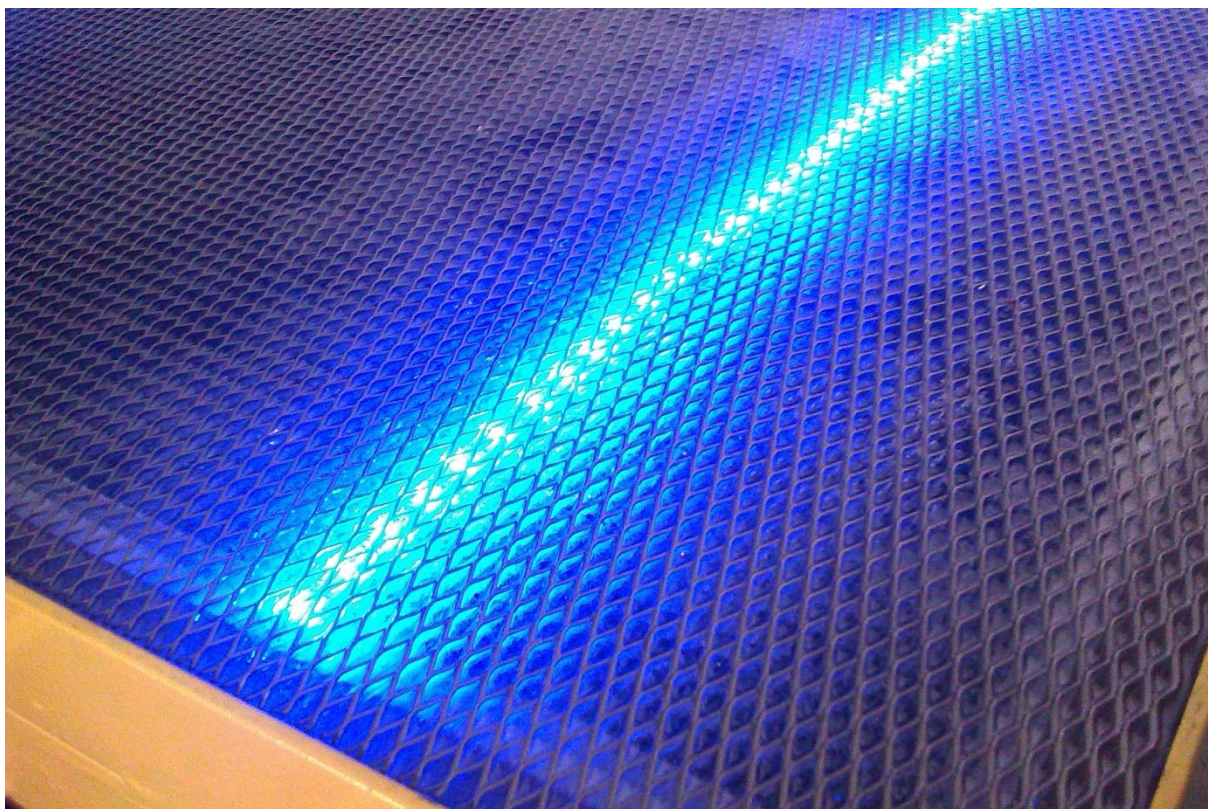
Joonis 3.21 48 tunni möödudes oli võimalik raskused ning klaas eemaldada. Selgus, et pind oli ebaühtlane ning katend vajab täiendavat pinnatöötlust



Joonis 3.22 Kõrgemad kohad lihviti maha, et metallvõrk täielikult katendi pinnalt välja ulatuks



Joonis 3.23 Et maha lihvitud kõrgemad kohad jäid ülejäänud pinnast tunduvalt tuhmimad, kanti pinnale täiendav õhuke kiht EPO-t andes ühtlasema tulemuse



Joonis 3.24 Sisseehitatud LED ribaga B-tüüpi katendi katsekeha

3.4 Visuaalse efekti rakendus (foor, LED; presentatsioon)

Foorid ja LED ribad A-tüüpi ja B-tüüpi e-kõnnitees on installeeritud.

A-tüüpi e-kõnnitees on kaks valget trasseerivat LED riba, mis töötavad vilkuvas režiimis, kui e-kõnnitee osale läheneb inimene. B-tüüpi e-kõnnitees on analoogilised, kolmevärvilised LED tulede ribad, mis thakkavad tööle vilkuvas režiimis, inimese lähenedes. Valgusfoor, mis on monteeritud püstasendis teisaldatavale alusele hakkab samuti tööle tavapärasel režiimis.

Antud etapil koostati ka poster (Joonis 3.25), mis tutvustab kogu e-kõnnitee projekti kuni selle etapi lõpuni. Poster formaadis A1 on mõeldud MECTORY fuajeesse.



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MAANTEEMET

Nordic e-Pavement

Local energy solution for streets and roads

Ain Kendra¹, Arvo Mere², Andres Krumme², Malle Krunks², Allan Lahi³¹Department of Civil Engineering and Architecture, ²Department of Materials and Environmental Technology, ³MEKTOY

Background

Solar energy plants require large areas that may mean preoccupation of natural landscapes or farmland. At the same time, the road network already exists and traffic participants cover relatively small share of the total paved area of the roads. e-Pavement solution enables to produce electric power without converting of natural landscapes and farmland, using the existing road surface. The electricity produced may cover the road infrastructure requirements without need for expensive wiring. The solution is estimated especially for Nordic climate conditions.

e-bricks

Optimal surface shape and epoxy-glass composition were developed. The surface transparency is at least 85% and it withstand to pressure 1000kg/cm².

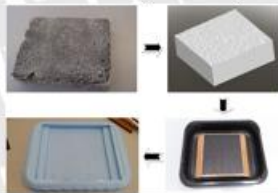


Fig 1. Stages of 3D modelling: 1) pavement sample, 2) 3D scan of pavement surface, 3) 3D printed positive, 4) silicon mold for e-brick casting.



Fig 2. Casting of e-bricks



Fig 3. A single E-brick before assembling PV element casted in EPO with crushed tempered glass

PV modules

Two modules were developed, one from e-bricks and another as a whole, covered by metal mesh.

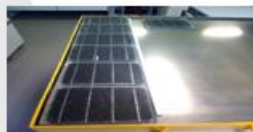


Fig 4. Module building from e-bricks



Fig 5. E-pavement module from e-bricks before assembling

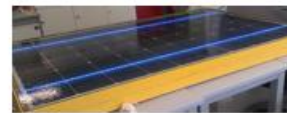


Fig 6. E-pavement module before covering with metal mesh for surface texturing

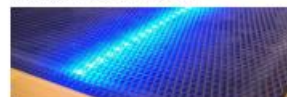
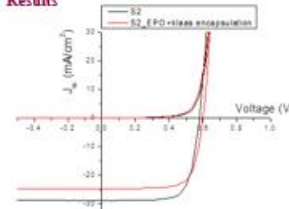


Fig 7. E-pavement module with metal mesh on the surface

Results



Sample nr.	V _{oc} mV	J _{sc} mA/cm ²	FF, %	η, %
S2	580	28.7	74	12.3
S2-EPO+glass	600	24.7	74	11

Fig 8. Solar element test under the AM 1.5

E-pavement panel A=1m² made from e-bricks is able to produce power of ca 70W under the standard solar radiation AM1.5. Produced energy is stored in battery and could be used for road infrastructure management, traffic lights, LED street illumination or LED strips in the pavement.

Conclusion:

The solar panel made from e-bricks is more powerful compared to e-panel with mesh due to better harvesting of solar incident light. E-panel light harvesting is about 40% worse due to mesh shading effect.

Project team:

TTU Department of Materials and Environmental Technology: Prof. Malle Krunks, Dr Arvo Mere, Dr Nicolae Spalatu, PhD student

Abayomi Titilope Oluwabi

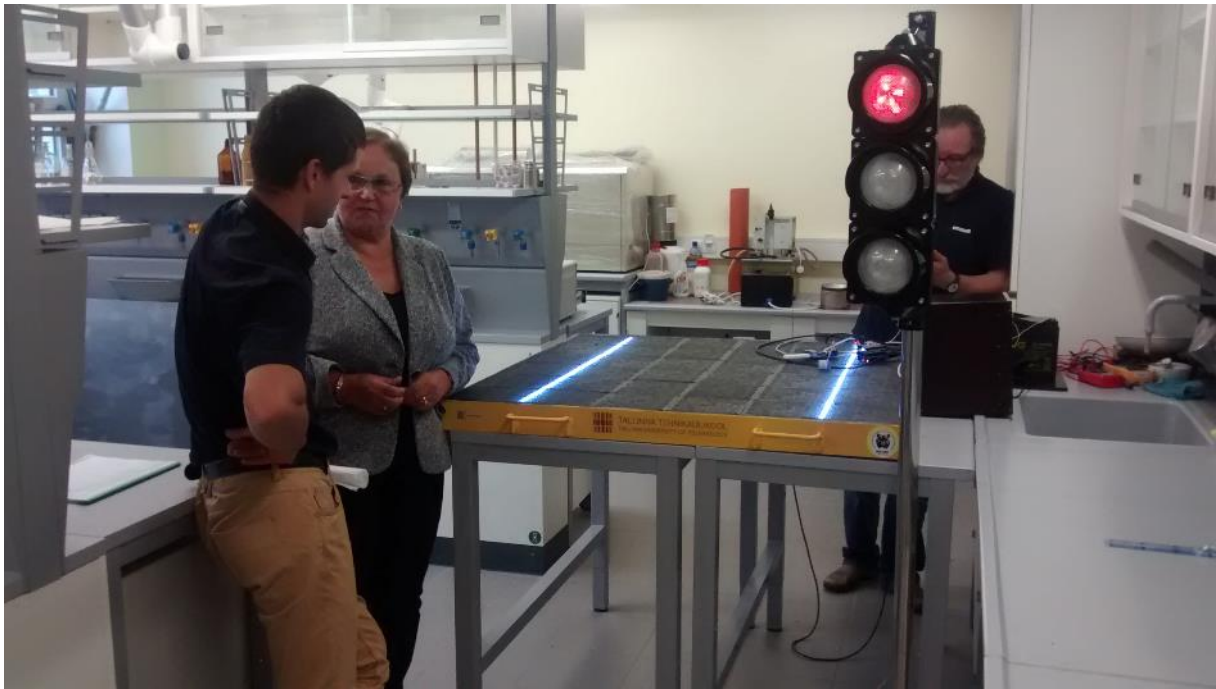
TTU Department of Materials and Environmental Technology: Prof. Andres Krumme, PhD student Mihkel Viisalu, PhD student Viktoria

Vassiljeva

TTU Road Engineering lecturer Msc Ain Kendra, PhD student Sven Sillanäe, MSc students: Riho Eichfuss, Raimond Karmen,

TTU PhD student Sven Silandi in cooperation with TTK UAS road construction BSc students: Marko Ehlich, Rauno Leppik

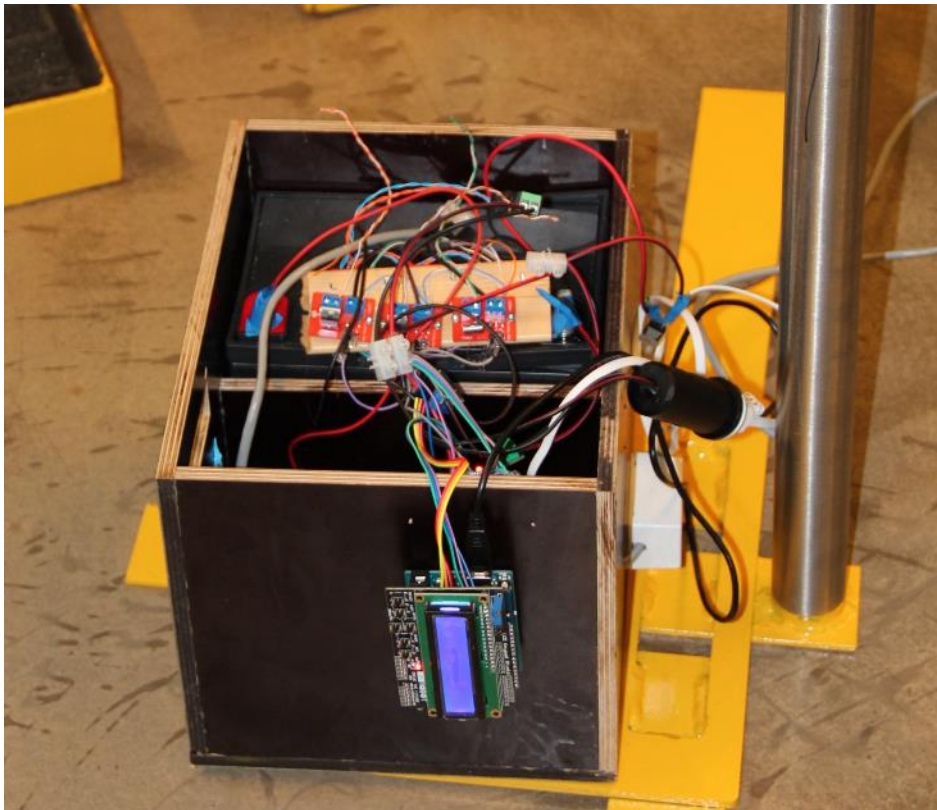
Contacts: allan.lahi@ttu.ee; malle.krunks@ttu.ee



Joonis 3.26 Laboris töötav demolahendus. E-katendi paneel suudab toita piisava elektrienergia kogusega LED-foori



Joonis 3.27 Integreeritud lahendus. Esiplaanil vasakul A-paneel, tagaplaanil vasakul B-paneel



Joonis 3.28 Juhtplokki prototüüp. Esiplaanil andmeloendur, mis mõõdab reaalajas toodetavat voolu ning pinget



Joonis 3.29 Projekti juhtrühm tutvub töötava prototüübiga

4 Teadusprojekti võimalikud edasiarendused

4.1 E-kergliiklustee elemendi ehk e-kivi elektriliste ühenduste kontseptsioon.

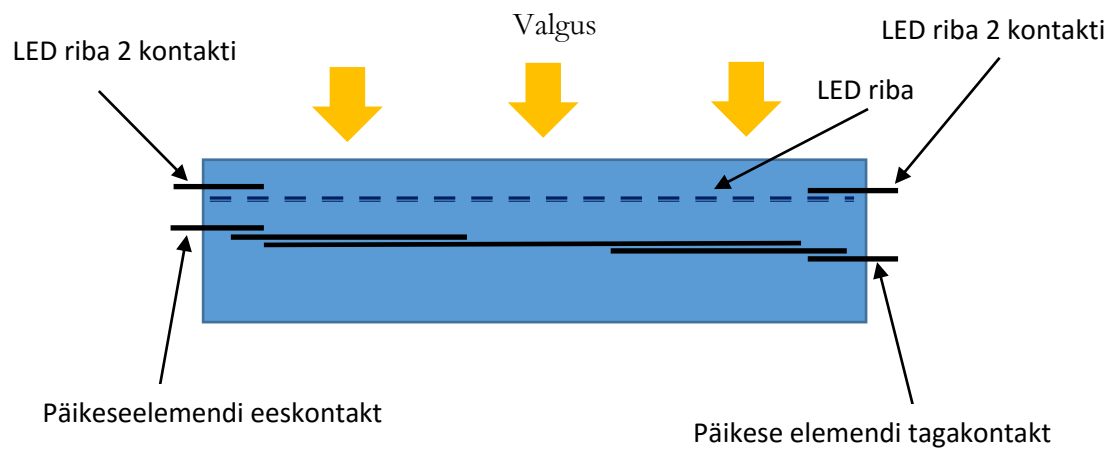
Elementide elektriliste ühenduste põhitingimus on mistahes kontaktide isoleerimine ja kaitsmine niiskuse ja vedelike eest. Seega pole võimalik teha täiesti klik-süsteemi. Ka elementide vahetamine pole nii lihtne nagu seda on tänavakivide vahetamine. Igal juhul tuleb vahetamiseks lahti võtta kive ümbritsev silikoontäidis.

Küsimus, milline kivi vajab väljavahetamist on ka tähtis. Kui kivi on silmaga nähtavalt katki, siis on asi selge. Kui kivi on kaotanud energiamuundamise omaduse, siis tuleb toimida järgmiselt. Tuleb valida pime aeg. Tuleb paneeli väljundisse ühendada ampermeeter mõõtepiirkonnaga ca 200 mA. Seejärel tuleb võtta halogeenlamp ja valgustada kordamööda kõiki kive. Iga valgustamisega annab terve kivi voolu ja seda näitab ampermeeter. Kui voolutõusu pole, siis see kivi on elektriliselt vigane ja kuulub väljavahetamisele.

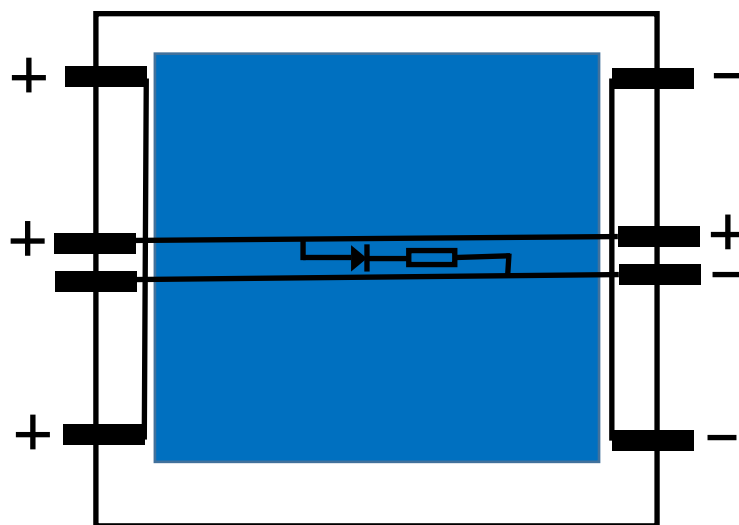
Arvestades olemasolevat teadmist trasseeringu kohta võiks tulevikus trasseeringu elemendid, 4-8 valgusdiodi koos nõutavate eeltakistustega, peita kivi katendi sisse ja väljaviigud tuua samuti kivi otstesse. Seega kujuneb e-kivi sõltumatute väljaviikude arvuks 4 ja kaob vajadus peita LED trasseering kivide vahele silikoontäidise sisse, mis on suhteliselt mehaaniliselt nõrk koht. Tuleb veel arvestada kivide usspaigutusega, mis eeldab päikeseelemendile kaks elektriliselt paralleelset väljaviiku kivi ühes otsas. Pistikühendused on kõige parem teha standardsed lameühendused. Niisuguse lahenduse korral pole vaja teetasandil teha ühtegi ühendust jootmisega.



Joonis 4.1. Põhiline ühendustarvik. Kaks 3 cm juhtmega kokkujoodetud tarvikut moodustavad jootevaba ühenduse nii päikeseelemendi, kui ka LED valgustite vahel .



Joonis 4.2. E-kivi väljaviikude asend, vaade küljelt



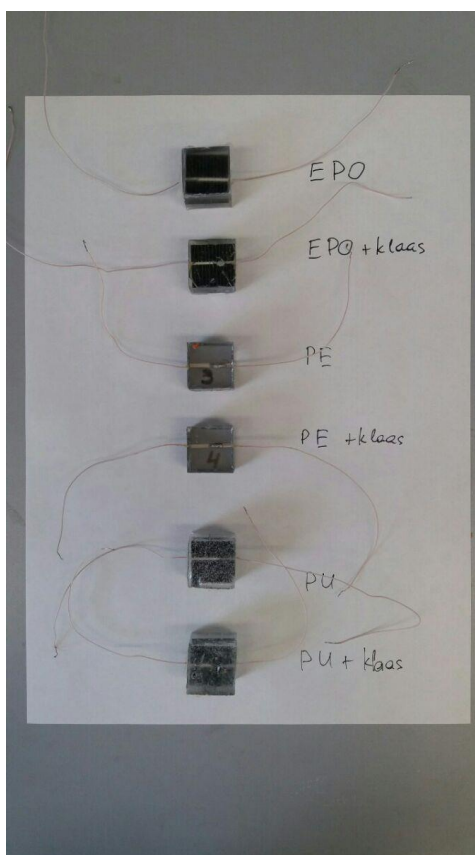
Joonis 4.3. E-kivi, vaade ülalt. Kontaktide paigutus on tehtud arvestusega, et osa kividest on nn äärekivid ja on võimalik vasak ja parempoolne ühendamine. E-kividest koostatud paneeli väljaviigud tehakse samade pistikute abil kogumisfiidritele, mis asuvad paneelide äärejoontel

4.1.1 E-kivide installeerimine teekattesse.

E-kivide installeerimiseks on vajalik teatud raamistiku olemasolu, mis ankurdatakse eraldi tee aluskattesse püstankrute abil- igal raamil ca 8 ankrut. Sellise raami eesmärk on fikseerida e-kivid külglibisemise ärahoidmiseks. Raami suurus võiks olla 107X107 cmXcm. Raamil on suureavaline põhja võrgustik. Võrgustiku ribad on 3mm paksusega ja 3 cm laiusega. Raami kõrgus on 25 mm ja materjal piisavalt paks plastik. Ankrud peavad olema ümarterasest ca 6mm ja läbistavad raami põhja võrgustiku ribasid. Ankrutel on peaosa, mis fikseerib ankru põhjavõrgustiku külge.

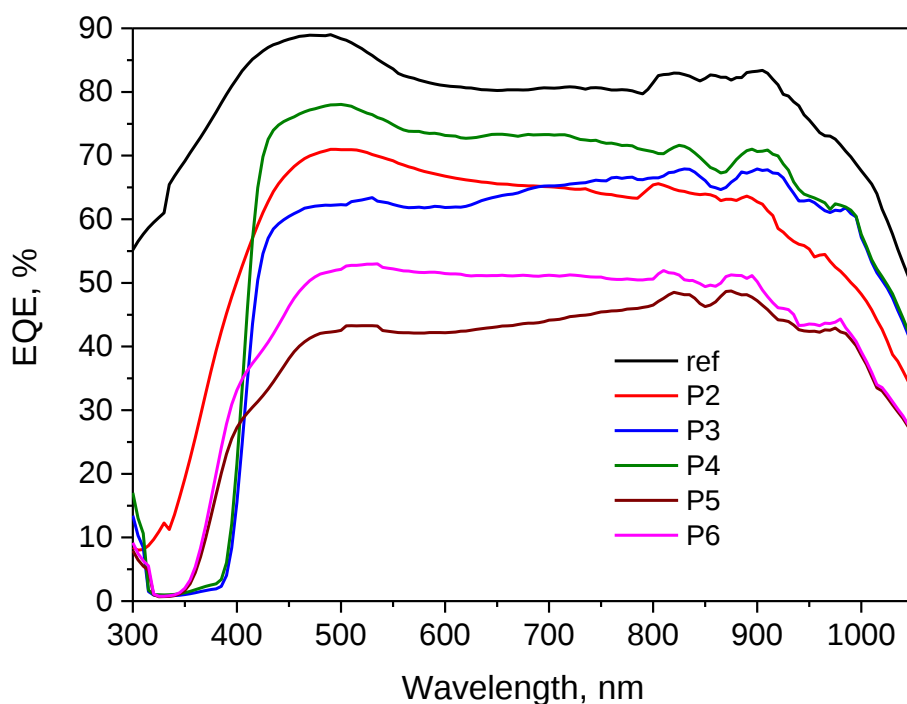
4.1.2 Kvantefektiivsuse mõõtmistulemused.

Kvantefektiivsus $2 \times 2 \text{ cm}^2$ proovikehadel jäi aparatuuri tõttu mõõtmata ja on tehtud selle etapi käigus. II-el etapil asendas kvantefektiivsuse mõõtmisi I-V kõverad, mille põhjal sai teha katendi materjali valiku.



Joonis 4.4. Kvantefektiivsuse mõõtmise katsekehad.

Numeratsioon ülalt alla: P, P2, P3, P4, P5, P6. Märkus: katsekeha P ei katsetatud kvantefektiivsuse seisukohalt.



Joonis 4.5. Välise kvantefektiivsuse mõõtmistulemused $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 1 cm paksuse katendiga proovitükkidele. Ref tähistab ilma katendita proovikeha. Kvantefektiivsus on arv, mis näitab igal lainepikkusel mitu elektroni läheb välisesse vooluringi iga pealelängenud footoni kohta. Ideaaljuhul on see arv 1. Graafiku püstteljel on toodud protsentuaalne elektronide osa footonite kohta. Võib öelda, et katend P2 on uurituteist kõige parem, sest töötab ka nn ultravioletne piirkond. See on EPO+klaasimurd

4.2 E-pavement perspektiividest

Üldiselt võiks perspektiivsed suunad eristada põhimõtteliselt kahe liiniga – plastide taaskasutus ning elektrit tootvad katendid. Teatud tingimustes need liinid kattuvad, kuid e-katendi projekti käigus on selgunud, et piirdudes ainult taaskasutatava materjaliga, ei ole võimalik saavutada elektri tootmiseks vajalikku kattematerjali optilist läbipaistvust. Seetõttu järeldame, et taaskasutatava väga hea läbipaistvusega täitematerjali kasutamiseks on vajalik sideaine, mis ei pärine jäätmekäitluse süsteemist. Järelikult vaatleme edasise arengu suundadena kaht lahus suunda – plastide taaskasutust ja elektrit tootvat katendit. Viimasel juhul tuleb tagada, et vahetult PV (photo-voltaic, päikesepaneel) paneeli katteks kasutatav materjal omab piisavat läbipaistvust ning taaskasutatav materjal sobib seetõttu vaid PV-paneeli alla.

4.2.1 Erivärvilised teekatendid

Värviline katend – tellija soovil katsetati biobituumenit, mida toodetakse taimsetest õlidest (Itaaliast). Konkreetseks kasutuseks ei osutunud biobituumen sobilikuks puuduliku optilise läbipaistvuse tõttu, kuid sideainelised omadused on materjalil olemas ning biobituumeniga toodetud asfaltkatte värv on seotud otseselt kasutatud kivimaterjaliga. Lisaks on võimalik seda korrigeerida ka pulbrilise värvaine lisamisega. Tulemus ei sobi elektrit tootvale katendile, kuid näiteks sõidutee osade eristamiseks (peatumiskeeluala ristmiku tsentris, ühissõidukipeatused jms) ning kergliiklusala markeerimiseks (sh jalgrattarajad ja laiendused enne ristmikke) küll. Võib kaaluda

ka biobituumeni kasutamist sorteeritud värvilise klaasi purust asenduskivimaterjaliga asfaltkattes. Biobituumeniga toodetud asfalt säilitab kivimaterjali värvuse.

4.2.2 Klaasi taaskasutus

Klaasi taaskasutus – projekti raames katsetati Järvakandi tehase klaasipuru, mis ei sobinud projekti eesmärkidega (sõelutud materjali puudulik optiline läbipaistvus, ebasoodne terastikuline koostis ja kildude kuju). Biobituumeni ja Järvakandi klaasi baasil standardse SMA terastikulise koostisega materjali koostamine ebaõnnestus, raske on täpselt määratleda põhjust, kuid proovikeha ei omanud piisavat mehaanilist tugevust. Tehniliselt õnnestus proovikehade tegemine peenfraktsiooni mahu kahandamisel, kuid ka sellel juhul osutusid proovikehad hapraks ning lisaks ka optiline läbipaistvus ebapiisavaks.

Sõelumata karastatud klaasi puru baasil, kasutades sideaineks EPO vaiku, saavutati vajalikud omadused ning seda materjali tuleks lugeda perspektiivseks – piisav kogus materjali on võimalik saada (Soome) klaasitootjatelt kuna karastamisprotsessiga kaasnevad alati kaod. Kergliikluse tarbeks on karastatud klaasi baasil toodetud katend perspektiivne, autoliikluse osas on vajalik täiendav uurimine et analüüsida naastrehvide mõju katendile (nii katendi kulumiskindlus kui ka eralduva tolmu omadused). Üldistusena võib hinnata, et naastrehvide kasutust piiratakse lähiaastatel sest naastud kulutavad katendit ja lamellrehvi kvaliteet tõuseb – piiramine toimub kaudselt läbi maksustamise ja võimalik, et ka otseselt liikluskorraldusvahenditega, esialgu geograafiliselt piiritletud aladel (südalinn, näiteks Rootsis juba praegu), edaspidi ka üldisena. Seetõttu ei tohiks arendustöös välistada pikemas perspektiivis ka kasutust autoliikluse aladel.

4.2.3 E-tänavakivide kulumiskindlus

Tänavakivi paneeli kulumiskindlus naastrehvidele on katsetatud Teede Tehnokeskuses. Standardile EVS-EN 12697-16 (meetod A) vastaval katsel katsekeha kaal kahanes 224,6 grammilt 220,8 grammile (3,8 grammi ehk massikadu 1,7%). Arvutusliku kulumiskindluse (AbrA) saamiseks tuleb massikao väärtus jagada katsekeha tihedusega ning tulemus antakse milliliitrites. Kulumiskindluse nõutud arvuline väärtus on vahemikus 24 (SMA, tiheda liiklusega teedel) kuni 50 (AC surf, madala liiklussagedusega teedel). Tulemus on üllatavalt hea, kuid tuleb hinnata ka optiliste omaduste muutust kulumiskindluse katse tulemusena. Visuaalselt hinnates on suuremad klaasiterad purunenud ja kuna optiline läbipaistvus sõltub otseselt kasutatud terade suuruselt, on tõenäoliselt läbipaistvus kahanenud. Oletades katsekeha tiheduseks 2,5 Mg/m³, saame kulumiskindluse väärtuseks 1,5 mis on suurusjärgu võrra parem asfaltbetooni analoogsetest näitajatest. Samas ei pruugi tulemus olla objektiivne seetõttu, et katsekeha ettevalmistamise (100 mm diameetriga proovikeha puurimine 160*160 mm katsekehast) käigus proovikeha kuumenes ja selle käigus muutus pinna tekstuur (klaasi ja EPO paisumiserisuste mõjul). Korrekse naastrehvi katse jaoks tuleb teha spetsiaalsed proovikehad ainult kattekihist ning otseselt 100 mm diameetriga. Praegusel juhul katsetati kogu paneelist (kate, PV-paneel ja alus) saetud moodulit. Sel juhul ei hakka mõju avaldama saagimisega seonduv võimalik muutus katte pinna omadustes.

Teede Tehnokeskuses teostatud kulumiskindluse katse annab indikaativseks kulumiskindluse näitaja (Pralli katse) väärtuseks 1,5%..

Antud juhul korrektset näitaja arvutust ei ole teostatud selle tõttu, et õhukese kattekihiga proovikeha sisaldas ka alakihid, mida katse metoodika ei eelda. Fakt on aga see, et SMA asfaldisegudel on massikadu katsel vähemalt 15 g, antud katsel vaid 3,8 grammi. Siit tulenevalt, selle ühe katse puhul osutus kulumiskindlus vähemalt neli korda paremaks, kui laboris parimate SMA segude puhul fikseeritud.

Siiski ei tohi ainult ühe katse tulemustest teha kaugeleulatuvaid järeldusi.

Katsete protokoll on esitatud aruande Lisas 2

4.2.4 Elektri tootmine

Siinjuures tuleks eraldi käsitleda omatarbelist tootmist energeetilisest võrku suunatud tootmisest.

Omatarbe puhul tuleb tegeleda energia vahepealse salvestusega. Põhjus PV-paneelide kasutamiseks võib olla majanduslik (elektrivõrguga ühendamise liiga suur kulu) või ka poliitiline taastuvenergeetika eeliskasutusena.

Võrku suunatud tootmisel püütakse parima kasuteguri saavutamiseks paneelid orienteerida päikese suhtes võimalikult täisnurga alla, kuid häid tulemusi on võimalik saada ka horisontaalsete või vertikaalsete paneelidega sest paneelid suudavad energiat püüda ka hajusast valgusest (eeldus – paneelid tuleb katta võimalikult vähe peegeldava kattega).

- Omatarbelise elektritootmise osas tuleb eristada teekattega katmata PV-elementide kasutust kattealuste PV-elementide kasutusest. Teekatmealuse paigalduse puhul on olulised – lisaks mehaanilistele (kulumiskindlus, haardetegur) ka optilised omadused.

o Katmata elemendid – eristuvad paigutuselt: posti otsas, teerajatisel (sild, viadukt) või teeäärse rajatise küljes

□ Posti otsa paigaldatud lokaalsed lahendused - mis teenindavad tavaliselt LED-valgusteid, seda nii taustvalgusega liikluskorraldusvahendites (vertikaalmärgised ja seesmise valgustusega liikluskärgid), otseselt liikluskorraldusvahendite valgustamisena (prožektorid ehk lambid mis on suunatud liikluskorraldusvahenditele) või ka teekattele suunatuna, ohtlike kohtade kohtvalgustuseks ehk üldvalgustuseks. Siia kategooriasse tuleks lugeda ka sildade külge paigutatud paneelid. Meil on lisaks teeilmajaamade toitele, enam kasutatud lahenduseks bussipeatuse (ja selle juures ülekäiguraja) valgustus olukorras, kus lähedal puudub elektri liitumisvõimalus (paneel on paigutatud kõrge posti otsa). Poolas on levinud ka liiklussõlmedes ja rampidel liikluskärgide taustvalgustus koos vertikaalmarkeeringuga (lisaks taustvalgusega märgile on kollaste LEDidega valgustatud ka märgi post, paneel ja juhtblokk on paigutatud suhteliselt madalale, ca 4 meetrisel postil, kuid post on varustatud ronimisvastaste turvatõkenditega).

□ Teeäärse rajatise pinna ära kasutamiseks - müratõkkeseinad ja -vallid, kuid sel juhul on tavaliselt võimalik pindala suurem kui kohalik energiavajadus ning siis võib tegemist olla nii suurema ala üldvalgustuse tagamisvajadusega kui ka juba võrku tootmisega. Müraseinu kasutatakse tihti asustuse kaitseks ja sel juhul on asustuses ka elektriühendused, mis hõlbustab võrku tootmise valikut (sel juhul ei ole vajalik kohapealse elektri salvestamine).

Autonoomsed skeemid on eelistatud just olukorras, kus lähedal sobilik ühendus puudub (kohati kasutatakse müraseinu ka looduslikus keskkonnas, sealhulgas ka talvel tuisutõkke funktsioonis). Siiski, kiirteedel eeldatakse valgustamist ja müraseinad PV-paneelidega sobiks teeala valgustamiseks. Lisaks saab LED-pikslitest moodustada kujundeid ka müraseinal mis omakorda võivad kujuneda teatud mõttes maamärgideks. Siinjuures tuleb küll läheneda ettevaatlikult et mitte tekitada uusi liiklusohhte juhtide tähelepanu liigse hõivamisega.

o Kaetud elemendid - saab omakorda eristada vahetult sõidutee katte alla paigutatut, mis peab taluma tee koormust, elementidest, mis paigutatakse pigem vahetult koormusalast väljapoole. Võimalikud on autonoomsed lahendused, kus moodul sisaldab kogu vajaliku tehnilise kompleksi patareist tarbijani koos juhtimisülulistega, aga ka ühendatud lahendused, kus moodulid toimivad osadena tervikust (varustavad väliseid voolutarbijaid või juhitakse väliste signaalidega lisaks üldvalgustusele). Moodulid võiksid olla mõõtudelt ja ühendustelt standardiseeritud – see hõlbustab nii lahenduste komponeerimist (LED-diodidega moodulid ja pelgalt päikesepaneeliga moodulid, aga ka sama mõõtu kuid tavapärase betoonkivi konstruktsiooniga moodulid) kui ka nende asendamist rikete korral.

□ Projekti raames on koostatud horisontaalse paigutusega elemendid tänavakatte all ja võrreldud nn tänavakivi tüüpi lahendust suurpaneelipõhisega. Ilmne eelistus on väiksemate moodulite kasutusel, kuna see võimaldas tagada soovitud katte tekstuuri ja omab eeliseid ka erinevate koormuste suhtes (tänavakivilahenduses on võimalik moodulite vaheline elastsus, moodul võib veidi liikuda nii vertikaal- kui horisontaalsuunas, suurpaneelide korral on paneel ise habras ning võib vajada väga tugevat tugiplaati paneeli all). Katte tekstuuri osas on tellija soovil valitud asfaltkatte imitatsioon, kuid põhimõtteliselt on võimalikud ka mitmesugused muud tekstuurid, nii matemaatiliselt modelleeritud pindade kui ka juhuslikumat laadi kujundusega pindadega. Kergliiklusteede haardetegurile ei ole esitatud erinevaid nõudeid, kuid ilmselt tuleb need alles välja töötada.

□ Projekti raames väljatöötatud lahendus sobib alusena nii kergliikluse liiklusalal katteks kui ka ohutussaarte kivisillutisena sealhulgas alal, mis ei ole vahetult teekasutajate poolt ületatav.

□ Teekonstruktsioonis, kuid vahetult katte alt eemal paiknevate lahenduste osas tasub kaaluda äärekivimoodulite arendamist, kus PV-elementid võivad paikneda nii äärekivi üla- kui ka külgpinnal. Elementide kattematerjali osas ei ole tekstuurinõuded nii kriitilised, kuna haardetegurit ei ole vaja tagada. Äärekivi küljepinda võib mõjutada lumetõrjeseadmete sahk, kuid siin on võimalik nõrgemad elemendid süvistada.

Elektri kasutusvaldkondade kontekstis saab eristada katendisisest kasutust (LED ribad või üksikdiodid) katendivälisest kasutusest (liiklusmärgid, valgustus).

□ Katendisiselt võiks kõne alla tulla nii tavapärase joonelementidest kattemärgistuse (värvi või termoplasti) asendamine kui ka mitmesuguste kujundmarkeeringute kasutamine (üksikutest valgusdiodidest maatriksi moodustamine või katseseadme eeskujul standardsete valgusdiodiribade kasutus). Samuti ka fooritulede dubleerimine kergliiklejatele ristmikul ehk jalakäijate ülekäigu eel või ohutussaarel. Katseseadmel on kasutatud valgusdiodiribasid paneelide vahelisel silikoontäidisega alal, kuid võimalik on valgusdiodid integreerida ka otseselt kattekihti. Diodiriba paigutusega PV-paneeli alale kaasneb teatud energeetiline kadu, üksikute diodide kasutamisega on kadu võimalik minimeerida.

□ Katendivälisena võiks käsitleda äärekividesse integreeritud valgustust, mis saaks olla suunatud küljelt tee poole. Üldiselt tuleks analüüsida kergliiklusteede üldvalgustuse vajalikkust – seda põhjendatakse tavaliselt turvalisuse kaalutlustega (valgustatud ala on turvalisem valgustamata alast), kuid ilmselt on olukordi, kus

piisab teekatte ääre markeerimisest. Äärekivi eeliseks on asjaolu, et ebapiisava hoolduse tingimustes võib katte äär jääda rohukatte varju, tee poole suunatud servaga seda ei juhtu. Äärekidid toodetakse betoonist (lisaks tavabetoonile võiks neid teha ka väävelbetoonist, mis tagab elementidele lisaks tugevusele ka külmakindluse) tehases, kivid on piisava suurusega ning seetõttu on kivisse võimalik integreerida korraga peale PV-paneeli ka akupatarei, LED ja anduritega juhtelektroonika.

□ Käesolevas projektis on kasutatud nii siseseid tarbijaid (LED-riba pinnakatte sees) kui ka väliseid tarbijaid (valgusfoor, mis aktiveeritakse liikumisanduriga; 5V toiteühendused mobiiltelefonide toiteks), perspektiivseks võiks lugeda liikumisanduritega rakendatavad liikluskorraldusvahendid (liiklusmärkide taustvalgus; foorid) ja kohtvalgustus (jalakäijate ülekäigurada). Katsetada tuleks rõhuandurite kasutust et tuvastada koormatud plaat ning LEDide süsteemi juhtimist.

4.2.5 Plastide taaskasutus

Plastide taaskasutus – eesmärgina maksimaalne jäätmekäitlus, kuid tõenäoliselt ei ole selles suunas võimalik tagada taaskasutatud plasti optilisi omadusi, mistõttu otsene elektritootmine päikesevalgusest läbi taaskasutatud plastiku ei pruugi olla otstarbekas. Küll aga on perspektiivne kombineeritud kasutus, kus elektrit tootvates moodulites kasutatakse taaskasutatud plastikut, mis ei paikne otseselt PV-paneeli kohal, vaid kas fotoelementide vahel või ka paneeli alusena (taga). Paikusel (OÜ Paikre) asub Eesti kaasaegseim jäätmesorteerimistehnika, mis suudab eristada vähemalt nelja põhiliiki. EL jäätmekäitlusreglemendi karmistumine lähiaastatel (kogutud plasti põletamine ei kvalifitseeru jäätmete taaskasutuseks) annab aluse ka plasti taaskasutuseks tänase põletamise (Kunda, Vao) asemel. Seetõttu on vägagi perspektiivne asuda arendama taaskasutatavast plastist võimalikke tooteid. Esmase analüüsi käigus on selekteeritud alljärgnevaid variante:

- Jäik plast

o korduvkasutatavad kattemoodulid ajutiste ümbersõitude tarbeks aeglasel kiirusel – kuni 30 km/h (lähtepositsioon – euroalus), oluline lahendada moodulite omavaheline kinnitus; vajalik kandevõime – 11,5-tonnine telg. Vajalik, et moodulid tagavad kandevõime ka ilma teisi ehitusmaterjale kasutamata – seetõttu võib kaaluda ka mitmekihilist (50/50 nihkes) konstruktsiooni et ühtlustada koormuse jaotust aluspinnale. Mooduli laius ei tohiks piirata nende vedamise võimalusi, ilmselt 3-meetrise laiusega on külgmine gabariidiületus minimaalne mis ei vaja veel täiendavat märgistust. Võimalik integreerida ka e-brick lahendustega mis tagaks tee äärejoonte markeerimise iga ilmaga, kuid tõenäoliselt on mõistlik e-lahendused liita küljelt ruumiliste moodulitega (autonoomsed moodulid, mis sisaldavad nii PV-paneeli, hämaraandurit, juhtelektroonikat ja valgusdioode).

o kombinatsioon geovõrgu või geokärjega ajutise teelahenduse jaoks – standardse võrgu või kärje avadega haakuvate lego-laadsete blokkide tootmine, blokkide materjal peaks olema kerge (poorne), kuid täiteainena saaks kasutada ka põlevkivituhka.

o kergliiklustee ruumilised moodulid, mis sisaldavad kanali torude ja kaablite jaoks ning valgustuspostide kinnitused (lähtepositsioon - Hollandi planeeritav tüüplahendus); integreerida LEDid ja PV-paneelid tee ääre markeerimiseks. Võimaldab kergliiklusteede konstruktsiooni oluliselt odavdada (paneel paigutatakse eemaldatava kasvumulla asemele või liivale, maapinna tasemele) – peab kandma hooldussõidukit

- Poolpehme plast
 - o maapinna kaitsemoodulid – kasutuses ka Ramirent poolt (pinnasekaitse matid – mida toodab Ground-Guards, UK, laiaast valikust kasutatakse siin vaid üht toodet)
- Pehme plast
 - o rahvaürituste jaoks (laulupidu, folk, tantsupidu jne) murukaitseplaadid või võrgud ajutiseks katteks – ei pea kandma sõidukeid
 - o rahvaürituste ajutiste liikumisteede ja parkimisplatside kattevõrgud (kandevõime tõstmiseks sõiduaudote jaoks, tagab murupinna terviklikkuse ka märgades tingimustes)

Lisaks teedevaldkonna rakendustele on võimalikud mitmed muud rakendused:

- Monumentaalkunsti objektide (au- ja mälestussambad, arhitektuurimälestised jms) valgustus – nende objektide puhul on reeglina võimalik ka juhtblokid turvaliselt paigutada, süsteemi rakendamiseks saab kasutada nii liikumisandureid kui ka rõhuandureid elementide all. Tihti on objekti ümbritsev ala sillutiskattega, mis võimaldab kasutada tänavakivide tüüpi lahendusi. Kui rakenduse ajaline ulatus on piiratud (pimedal ajal ei ole valgustus vajalik siis, kui inimesi lähialal pole), siis saab pöörduda väiksema energiasalvestusmahuga.
- Hoone seina integreeritud PV-elementide kasutus koos liikumisanduritega või rõhuanduritega kattes, mis valgustaks tänavat (kõnniteed) vastavalt inimeste juuresviibimisele ja vähendaks valgusreostust öisel ajal kui tänav tühi. Fassaadide efektiivne valgustus täna ei ole seotud inimeste liikumisega ning rakendus võimaldaks selleks kasutada PV-paneeli toodetavat elektrit.
- Reklaamitabloode taust- ja suundvalgustus maanteeäärses kasutuses (tahvli tagapind ja võimalik varikatus tagavad piisava pinna PV-paneelidele).

4.2.6 Tehnilised arendussuunad

Edasises arendustöös tuleb analüüsida paneelide tootlikkust nõrga valguse perioodil ja tasakaalustada vajalik tarbimisvõimsus minimaalse tootlikkusega. Täna katsestatud puhul on selgunud, et kasutatud LED-ribade voolutarve 50% kasutusrežiimis ületab kõige ebasoodsamates tingimustes paneeli toodetud energiakoguse millest on maha arvatud kahe mikroprotsessori skeemi voolutarve.

Järgmiste rakenduste kavandamisel tuleb tähelepanu pöörata ka rakenduste aktiveerimise andurite kavandamisele ja häälestamisele (esimese rakenduse puhul osutus takistavaks faktoriks spetsiaalklaas, mis segab infrapunakiirgusspektris töötavat andurit). Projekti lõppfaasis asendati juhtimisblokki kinnitatud andur välise liikumisanduriga valgusfoori korpuse küljes, mis tagab adekvaatema töörežiimi.

Kattematerjali valdkonnas tuleb püüda leida odavamaid lahendusi, mis sobivad masstoodanguks. Täna kasutatud EPO-vaik ei ole tõenäoliselt piisavalt soodne materjal masstoodanguks.

Alusuuringutena on vajalik detailsemalt käsitleda katendi haardeteguriga seonduvat, eriti kergliiklustee kontekstis – mitteregulaarse pinnastruktuuriga asfaldi asemel on võimalik kasutada matemaatiliselt modelleeritud pinnavormi, kui see osutub tarbijaomadustelt paremaks. Siinjuures tuleb uurida piiratud kalde tingimustes (kergliiklustee põiklalle 2%) kattelt vee äravoolu ja vee külmumisprotsessi negatiivsel temperatuuril.

Teekatte valgustuse vajalikkuse aspektid vajavad samuti täpsustamist – tänased regulatsioonid on pigem suunatud üldise turvalisuse tagamisele mis ei ole otseselt seotud liiklusohutusega. On selge, et kui rajatakse postidel valgustus, siis peab see vastama teatud nõuetele. Kui aga valgusallikas on integreeritud kattesse, võivad nõuded valgustugevusele olla oluliselt erinevad.

Lisa 1 Kirjanduse ülevaade inglise keeles

Lisa 2 Katsekeha kulumiskindluse protokoll

5 Lisa 1

Arvo Mere PhD, vanemteadur

Nicolae Spalatu PhD, teadur

Development of the technologies of the PV roads and pavements

5.1.1 Introduction

Sustainable solutions are a requirement to modern design problems due to society's overreliance on natural resources for everything from energy generation to transportation infrastructure. In order to come up with these solutions it is important for creativity to be a focus of design, as clearly the traditional practices are lacking and new ideas are required [1-3].

The majority of the materials currently used in roads and highways have not changed over the last few decades. Recent pushes have been made to make pavements more sustainable in a number of ways. One such way has been looking at using more recycled materials in pavements, be it glass, asphalt shingles, recycled asphalt pavements, recycled rubber tires, or other additives in asphalt mixes or recycled concrete and other additives in concrete mixes. Other focuses for increasing pavement sustainability have included reducing the processing temperatures required for asphalt and creating porous pavements which offset the need for storm water management. While these technologies combined help make pavements incrementally more sustainable, the fact of the matter is they all look at pavement design through the same lens as designers have for the last few decades [1-3].

This becomes a problem within the transportation industry due to how large transportation's impact on the environment is as a whole. It is well established that for our society to be more sustainable there must be substantial changes in our energy consumption and greenhouse gas emission patterns, and transportation is the cause of 19% of global energy consumption [4] and 23% of global CO₂ emissions [5]. While most of this is a direct result of transportation modes and not the infrastructure that satisfies these modes, the infrastructure is always designed with the mode energy consumption and emissions in mind. For roads there are direct correlations on the impact that roughness [6] and grade have on vehicle fuel consumption, traffic intersections are naturally designed to minimize delays and as a result vehicle idling time, and the same applies to minimizing delays when performing road maintenance. All of these factors are the responsibility of regional transportation authorities, so solutions that minimize their energy or carbon footprint in a major way are highly sought after solutions.

One way that many jurisdictions have started making their transportation corridors more sustainable is by incorporating renewable energy projects into their territory. While using transportation corridors for utility purposes other than transportation is not a novel idea, the interest in incorporating renewable energy projects has only been building slowly over the last few decades. Most of the longer term projects exist in Europe, where they have constructed solar railway tunnels in Belgium [7], solar highway tunnels in Italy, and solar highway tunnels and noise barriers in Germany [8]. The most promising technology in this field also happens to be the most innovative and is the only one to completely disregard traditional paving practices: the development of solar road panels.

Solar road panels are a new technology being designed to serve as the top layer of pavement infrastructure. The key benefit from this approach is that it is a modular structure which incorporates photovoltaic cells which directly convert the incident solar energy into electricity. This electricity could have a number of uses, such as powering street lights, charging electric vehicles, or being sold to local distribution companies. While the greatest influence of these panels would come from replacing highway pavements, many lower speed and volume applications are currently being considered as ideal locations for installation of these panels [1-4].

Solar road panels

The Solar Roadway is a series of structurally-engineered solar panels that are driven upon. The idea is to replace all current petroleum based asphalt roads, parking lots, and driveways with Solar Road Panels that collect energy to be used by our homes and businesses [9]. The solar photovoltaic has the advantage of direct conversion of sunlight to electricity and also well suitable for most of the regions therefore it is highly preferred when compared to other renewable energy sources [9].

The general design of the solar road panel is as shown in Figure 1. The panels are a three-layer composite structure that consists of transparent, optical, and base layers. The transparent layer handles direct interaction with vehicles and allows solar radiation to pass through to the optical layer. The optical layer transfers the load on the transparent layer to the base layer by directing it around the embedded solar cells within the structural cutouts. Lastly the base layer transfers load to the structured base beneath the panel [2-3].

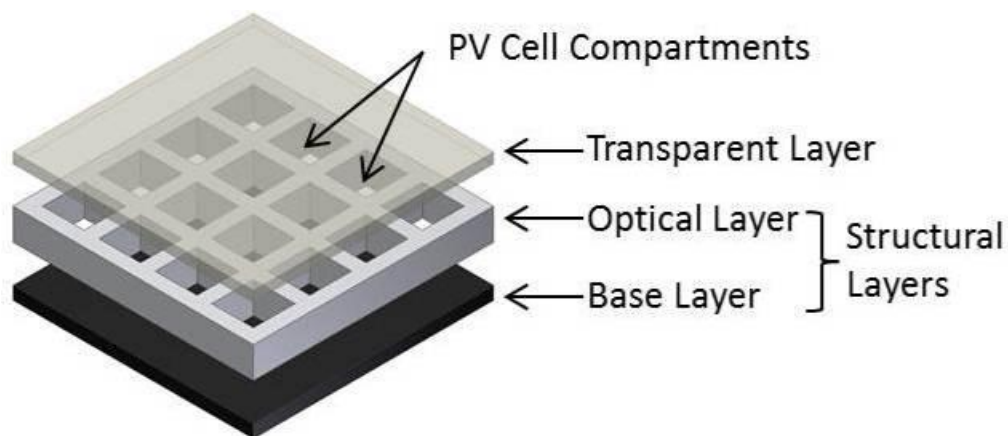


Fig. 1. Exploded view of a conceptual solar road panel [2]

The greatest challenge of designing a solar road panel is that the design requirements for pavement structures and solar modules frequently contradict each other. These requirements are outlined below, divided into the structural and electrical requirements respectively.

5.1.2 Structural design requirements

The foremost structural design requirement is that solar road panels must be able to withstand the cyclic loading from vehicles without failing through static or cyclic loading. In the field these panels would be installed on a structured base, be it compacted granular materials or a

paved asphalt or concrete structure, which provides greater support to the panel and must be taken into account during material selection [1-3].

The second major structural requirement is that the surface of the panel must provide adequate friction for vehicles to safely travel across it. This is a major challenge as the surface must also be transparent enough to allow solar radiation to reach the solar cells embedded within the structural layers and any sort of texturing could impair light transmission if not designed properly [1-3].

Since modern high-efficiency solar cells are made from brittle silicon wafers, a solar road panel design must allow load to be bypassed around the cells. This can be accommodated by cantilevering the transparent layer over the solar cell compartments, however the transparent layer would then need to be strong enough to not deflect onto and load the solar cells [2].

The panel also needs to be designed in such a way that it is weatherproof. This is important for both structural and electrical reasons as water and contaminant penetration would degrade the structural integrity of the composite panel and damage the embedded electronics [2].

5.1.3 Structural Layers

As was shown in Figure 1, the structural layers of the solar road panel are the optical and base layers within the conceptual design model. The main requirements for the material selection for these layers are that the material should be able to provide adequate structural performance for the panel, as defined within the design requirements, and that the material be suitable to easy in-house prototype construction. The mechanical properties of these materials are identified in

Table 1 with the same properties of traditional pavement materials [3].

Table 1: Structural layer material mechanical properties [3]

Category	Material	Compressive Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
Structural	Steel – A36 [10]	152	200	7.85
Structural	Aluminum – 6061-T6 [10]	276	68.9	2.70
Structural	GPO-3 Laminate Fiberglass [11]	55	12	1.90
Structural	HDPE – Glass Fiber Filled [10]	36.9	7.38	1.25
Structural	ABS – Glass Fiber Filled [10]	120	5.55	1.56
Pavement	Concrete Pavement [12]	32	29.6	2.32
Pavement	Asphalt Pavement [13]	N/A	2.76	2.46

In terms of material performance one of the major objectives is to minimize deflections within the panel due to external loading in order to protect the solar cells. To this end A36 and 6061-T6 are the best options due to their high compressive yield strength and Young's modulus; meaning they can withstand large loads and require large loads before substantial deformation

occurs to the material. The yield strengths for the FRP materials are more comparable to the ultimate strength of typical concrete pavements, however the Young's modulus only being two to three times that of a typical asphalt pavement indicates that these materials are more prone to high strains under low loads given a comparable cross section to the A36 and 6061-T6 options. Typically, the major benefit of the comparatively high strengths of metals over polymers is that you are able to use less material to obtain the same level of performance, thus having an overall lower cost and lower weight component [2-3].

Another challenge with the structural layers is choosing a material that is cost effective for building a prototype out. This creates a large difference between the available material options as the ideal way to construct the details for the optical layer out of a metal is through a casting operation while the ideal method for the fiberglass is through customized multi-ply construction [3]. Both of these processes are very complicated and expensive to accomplish, though for the purposes of developing a one-off prototype it is simpler to go with a multi-ply fiberglass approach. The simpler alternative to these is purchasing sheets of the respective material and then cutting them down to the required sizes, which is not structurally optimal due to the epoxied ribbing but allows for simple construction of the layers out of any desired material [3].

One major area where these materials differ is on environmental resistance. Steel and aluminium would both require coatings to protect them from rusting and from being conductors of the current flowing through the panel from the photovoltaic system. The two glass-filled polymers both have typically poor environmental resistance as the polymer matrix degrades in corrosive environments. The GPO-3 material is designed to be an electrical insulator and also be inert in challenging conditions [1-3].

5.1.4 Optical Layer

Overall the optical layer of the solar road panel prototype needs to be thin in order to minimize solar cell shading, as outlined in the design requirements. This layer also needs to allow for cut-outs to be made for cell interconnections, making it easier to design a two-layer structure for the optical layer; one with the cut-outs for interconnections and one without to support the transparent layer [1-3].

5.1.5 Transparent Layer

There are naturally less material options for the transparent layer of the solar road prototype due to the layer needing to be optically transparent. This limited selection down to acrylic, polycarbonate, and tempered glass as these are typical materials used in transparent structural applications, with the respective mechanical properties as shown in Table 2 [3]. These materials all demonstrate higher compressive strengths than typical concrete pavements, which indicates that they should all be able to operate as a transparent layer within a solar road panel through diligent design. The large structural difference comes through the Young's Modulus of the materials, as tempered glass is far more rigid under loading than concrete while acrylic and polycarbonate will be nearly as flexible as an asphalt pavement is currently. This could cause issues in designing the transparent layer for the polymer materials as they are cantilevered over the solar cells and large deflections should be avoided as they may cause damage to the solar cells [2].

Table 2: Transparent layer material mechanical properties [3]

Category	Material	Compressive Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
Transparent	Acrylic – Optical Grade[10]	95.0	2.87	0.655
Transparent	Tempered Glass [10]	70.0	2.35	1.13
Transparent	GPO-3 Laminate Fiberglass [14]	>5000 ¹	72.0	2.50
Pavement	Concrete Pavement [12]	32	29.6	2.32
Pavement	Asphalt Pavement [13]	N/A	2.76	2.46

Another large difference between these materials is the way in which they are most likely to fail under loading. Polymer materials under vehicle loading typically demonstrate plastic deformation through rutting and shoving of the top layers of the cast material. Also, the optical grade versions of these polymers, which are required in order to maximize the solar energy that is able to reach the photovoltaic cells, are typically specified for temperatures above 0°C, meaning that they should not perform as well as expected under typical winter conditions [1-3].

The tempered glass, on the other hand, does not fail through plastic deformation like the polymer options though this means there is less indication of performance loss before failure. In order to safely design a tempered glass panel, it must conform to typical glass flooring standards, so the structure must use multiple redundant panes of tempered glass which are laminated together. The tempering process also means that should a pane catastrophically fail it would break into very small shards instead of large sheets of glass while the lamination also helps bind these broken shards to the other layers of glass in the panel instead of spreading into the rest of the environment [1-3].

The last set of important differences between these materials is in cost and texturing. The tempered glass is substantially more expensive a design option than the cast polymers, especially since this would have to be outsourced for the construction of the CPATT prototypes. Also, all of these materials can have surface textures applied to them through a number of processes during casting or in post-processing through etching [1-3].

5.1.6 Electrical design requirements

Many of the electrical design requirements focus on the exposure of the photovoltaic cells to solar radiation and the physical robustness of the electrical circuit formed between the individual cells.

Shading is a major issue for photovoltaic panels because cell area that is not exposed to radiation is not able to operate as a part of the electrical circuit and this quickly degrades the performance of the panels. Since the design requires the solar cells to be recessed from the transparent layer, care needs to be taken to ensure the ledges of the structural layers do not cause internal shading on the solar cells. Additionally, debris collecting on the surface would need to be removed through street sweeping, rubber removal, or other processes if it begins to impact the overall radiation reaching the solar cells [1-3]

In addition to the solar cells being very fragile components, the connecting links between the cells are also very fragile. The cell interconnections are typically a tin-lead ribbon that is

soldered to the top of one solar module and the bottom of the next one in the series. In a solar road panel these connections would need to be more robust due to the higher loadings on the panel and the larger distances between solar cells due to the ribs in the structural layer design [1-3].

After identifying the materials available for use in the design of the solar road panel prototypes one important step is to identify how the electrical system would be installed within the panel. This consists of three segments; photovoltaic cell selection, cell interconnection, and external hardware [2].

5.1.7 Photovoltaic cell selection

The most important selection in the design of the electrical system is the selection of the photovoltaic cells. There is a vast array of technologies to choose from for this application including monocrystalline, and polycrystalline silicon cells; dye sensitized cells; thin film; and organic thin film solar cells. However, single crystalline silicon PV cells currently offer the best conversion efficiency (~20 %) for mass marketed cells [16]. Monocrystalline silicon photovoltaic cells are available in a variety of sizes to meet various needs in custom OEM products. The typical sizes used in utility power generation applications are 125 mm (5 inches) or 156 mm (6 inches) square solar cells (Fig. 2), as these can be produced efficiently with relatively high energy conversion rates [15].

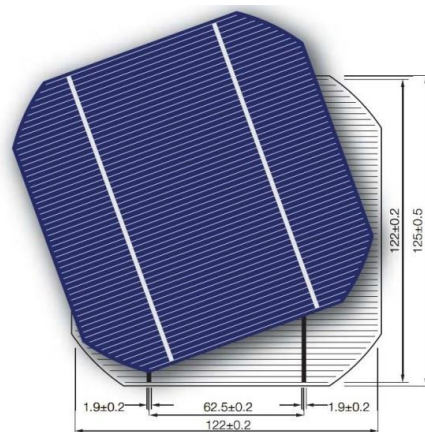


Fig. 2. 125 mm square monocrystalline silicon solar cell [15]

5.1.8 Cell interconnections

Typical solar cells used in utility grade solar modules have a high individual current capacity but small voltage potential. To accommodate this, solar cells within a module are linked together in series to allow the voltage to build while keeping the current constant. Depending on the size of the module there can be multiple strings of series solar cells linked in parallel to achieve the desired power output characteristics. In typical module fabrication there are 72 cells combined in two parallel strings of 36 [16].

The interconnection is essentially a conductor that is soldered onto the top bus bar of one solar cell and the bottom bus bar of the adjacent cell to complete a circuit between them. Traditionally the cells in a solar panel would be connected by soldering a tin-coated copper ribbon across the bus bars of one cell and then soldering these ribbons onto the adjacent cell. One of the disadvantages of this is that the interconnections are one of the most fragile

components of the module, and with the loads the solar road panel will be seeing this is not a feasible option. Instead, the ribbon will be soldered only across the bus bar of one cell and then a wire will be soldered to the output of the one cell and to the input of the adjacent cell in the next compartment. Using insulated wires to complete this task should improve the reliability of the system despite the addition of more components and solder points [2]. The major design challenge with interconnections is ensuring that there are not significant power losses across the strings of solar cells within the module, as this has been shown to have a large impact when studied in practical applications [17]. Figure 3 shows an example of schematic solar road panel interconnection scheme, where the squares represent the solar cells, the two lines between represent the two power connection lines between the cell bus bars, and the positive and negative signs indicate the input and output lines from the solar road panel respectively.

5.1.9 External hardware

In addition to the electrical circuit built within the panel, a reverse current protection diode is required to ensure that no current is allowed to pass in the wrong direction through the panel as this would result in destroying the sensitive electronics [2].

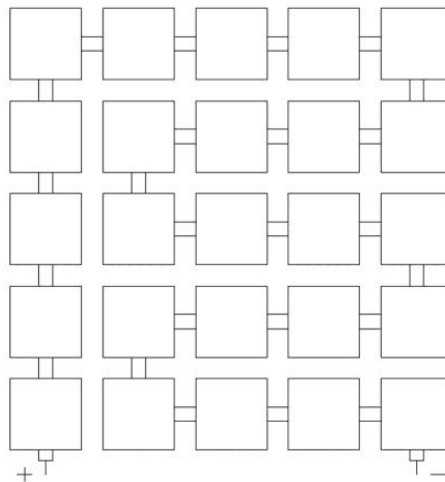


Fig. 3. Example of schematic solar road panel interconnection scheme [2].

Description of relevant commercial technologies

There are three companies that are actively working on the development of solar road panels: Solar Roadways, Wattway and SolaRoad. The PV panels only deliver power to the electrical grid, rather than store the energy for lighting purposes during the night time. Both Wattway and Solar Roadways utilize technologies that would enable LED lighting, but because they do not integrate storage (e.g. batteries) it is dependent on grid power. Nevertheless, there is motivation for providing LED lighting for purposes beyond pedestrian safety. For example, there is discussion about lighting lanes with LED's rather than relying on paint. One could even envision a scenario where sensors of various sorts communicate with the cars and thus the road is able to serve as a "smart highway" and talk to other "smart cars", all the while generating the power to drive them. All these technologies are not available to the general public and are

largely being promoted by the companies as potential technologies that are currently being tested at relatively small scales. Below is a description of the technologies available from established companies [18].

5.1.10 Solar Roadways

Solar Roadways Incorporated is a startup company based in Sandpoint, Idaho aiming to develop solar powered road panels to form a smart highway. Their proof-of-concept technology combines a transparent driving surface with underlying solar cells, electronics and sensors to act as a solar array with programmable capability. The road panels are to be made from recycled materials and incorporate photovoltaic cells [19].

The company was founded in 2006 by Scott and Julie Brusaw, with Scott as President and CEO. They envisioned replacing asphalt surfaces with structurally-engineered solar panels capable of withstanding vehicular traffic. The proposed system would require the development of strong, transparent, and self-cleaning glass with the necessary traction and impact-resistance properties at competitive cost [19].

In 2009, Solar Roadways received a \$100,000 Small Business Innovation Research (SBIR) grant from the United States Department of Transportation (USDOT) for Phase I to determine the feasibility of the proposed project [20]. In 2011, Solar Roadways received \$750,000 SBIR grant from the DOT for Phase II to develop and build a solar parking lot; [21] from this, they built a 12-by-36-foot (3.7 by 11.0 m) parking lot covered with hexagonal glass-covered solar panels sitting on top of a concrete base, heated to prevent snow and ice accumulation, with LEDs to illuminate road lines and display messages. In April 2014, the company started a crowdfunding drive at Indiegogo to raise money so they could get the product into production. The campaign raised 2.2 million dollars and became Indiegogo's most popular campaign ever in terms of the number of backers it attracted [19]. In December 2015, the USDOT announced that it had awarded Solar Roadways a Phase IIB SBIR contract to further their research [19]. Finally, in 2016 they were awarded a second \$750,000.00 phase II grant for further developing and refining their modules [22]. Currently their product is not available to the general public.

Figure 4 shows an artist's depiction of a single module of the latest proposed design alongside three built prototypes of the same module. Each photovoltaic module is sandwiched between two plates of tempered glass and integrated with the PV module are LED lights that may be configured in a variety of different ways [18]. There is a buffer between the tempered glass and PV cells in order that compressive forces that are incident on the glass are not seen by the sensitive PV cells. The modular design would hypothetically allow for easier maintenance as the modules are not permanently connected to each other - allowing for localized repairs as opposed to traditional asphalts where cracks and deformations easily spread throughout the structure of the road. Perhaps most relevant is that these lights are proposed to eliminate painted lines on roads and highways [18]. They are described to be actively changing with the environment and they state that their newest iteration is reported to have LED lights that are adequately visible throughout the day [19]. Effectively these modules would be controlled by microprocessors and potentially be able to alert drivers with warning messages or change lane displays in an emergency. Unfortunately, there is no specific data available from Solar Roadways regarding their design that would allow us to assess what the performance of the lights will be during the day. Nevertheless, lighting for a crosswalk is more of an issue during the night-time and there should be no issues with LED visibility then [18].



Fig.4. Digital depiction and built prototype of a Solar Roadways experimental solar road module [19].

The first public installation was in Jeff Jones Town Square in Sandpoint, Idaho. It opened to the public on September 30, 2016 (Fig. 5). As a pilot install it is for walkways only [23]. This installation consists of 30 Solar Roadways SR3 panels covering an area of roughly 150 square feet. The cost of this installation was roughly \$60,000 with the majority of the money coming from a grant from the Idaho Department of Commerce (\$47,134), and a \$10,000 grant from the Sandpoint Urban Renewal Agency [24]. The installation is monitored via a webcam 24/7 that is available to the public to observe (<http://www.sandpointidaho.gov/visiting-sandpoint/solar-roadways#ad-image-5>) [25].



Fig.5. World first ever public installation of Solar Roadways [25].

The company has indicated that their modules will be able to withstand heavy duty vehicles and are quoted as saying that “it will stop vehicles going 80 miles per hour on a wet surface” [23]. They do not give more specifics but do state that this is because the surface of the tempered glass is covered with a macro and micro texture to provide traction. A major issue with using fiber glass or tempered glass as asphalt replacement is the materials’ ability to keep consistent friction between the wheels of a vehicle and the surface at high speeds. A method previously utilized by Solar Roadways was equidistant rough elevations in the top panel that are used as peak pressure points and as such peak friction points [19]. This method seems to have been abandoned in the most recent prototype presented by Solar Roadways. This is of great concern

as the company does not publicly disclaim the exact variation of tempered glass that is being used [18].

Regarding the weight that the modules are able to withstand, their website states that their "goal" is to withstand 250,000lb of weight. The number is based on the limit of refinery equipment up to 230,000lbs on frozen roads. This has been confirmed with actual physical load testing at civil engineering labs and finite element analysis [18, 19].

Their calculations indicate that if all roadway surfaces were covered with their technology then they would be capable of producing three times the energy demand of the United States. However, it remains unclear that this technology would be economically viable in rural areas where ample land is available to put other forms of solar electricity generating devices. Alternatively, where land is scarcer, such as urban areas, the amount of available sunlight available is also diminished because of shading and increased traffic [18].

5.1.11 Wattway

Wattway is a concept by a French transportation infrastructure company, Colas, to replace highways made of asphalt with solar panels that cars and trucks can drive on. The technology is based on thin solar modules designed to be placed directly on top of the road surface, in contrast to the modules of Solar Roadways that replace asphalt [26, 27]. Like Solar Roadways, the major goal of this company is providing solar electricity directly to the grid. The modules appear to only be capable of providing power and are not capable of lighting or storage, although the company does state that: "Other technologies can be added into Wattway panels because a road that produces electricity is a connected road. For example, integrated sensors can provide us with real time information on traffic conditions, help us manage traffic dynamically and allow the road to self-diagnose potential maintenance issues. It could also be possible to charge electric vehicles using induction" [26].

The world's first photovoltaic road has been opened in Tourouvre, Orne, France in November-December 2016 (Fig. 6). The roadway is just one-kilometre-long, but that still works out at 2,800 square metres of photovoltaic cells - enough, to power the village's street lights. One of the main selling points of Wattway, according to Colas, is that each panel is just a few millimetres thick, and can thus be installed on top of an existing road, which in turn massively reduces construction costs. Having said that, the 1km road in Normandy cost €5 million to build. And that's for a single lane of a two-lane highway! [26].

Overall, the modules appear to be much more streamlined than the modules of Solar Roadways. There is no specific information given about how the PV modules are protected, but it does appear that there is a durable transparent layer coated onto the modules, as seen in Figure 7. Thus, unlike Solar Roadways® the modules and protective cover appear to be in contact with one another which should increase the stresses on the PV cells when vehicles drive over them. Nevertheless, the company states that their major advantage compared to competitors is the fact that "Wattway panels are sturdier than their competitors. Tests have shown that they can bear one million truck tire passes without damage". Unlike Solar Roadway's however there is no indication of how much weight these modules are capable of absorbing without being damaged.



Fig. 6. The world's first photovoltaic road opened in Tourouvre, Orne, France. Route in Tourouvre-au-Perche will be used by about 2,000 motorists a day during two-year test period [28].

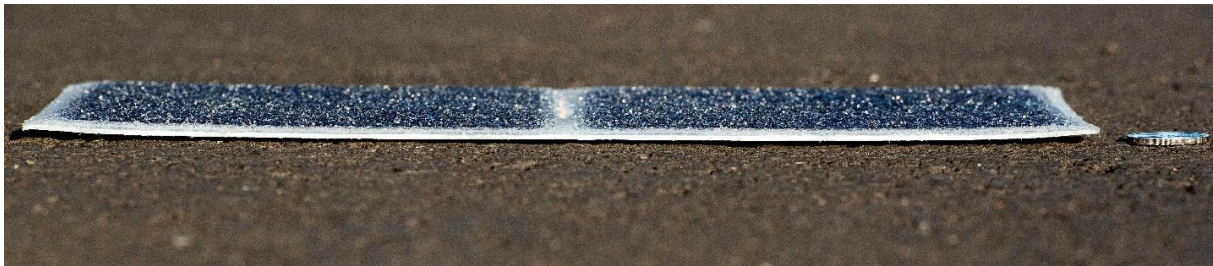


Fig. 7. Wattway's solar module that is designed to be placed directly on top of asphalt [21]. The design is streamlined as indicated by the thickness relative to the coin on the right.



Fig. 8. Wattway's solar modules integrated to serve as a roadway surface [21].

Like Solar Roadways, these modules are not available to the general public but the company does state that they expect them to be released in 2-3 years. There is currently an ambitious demonstration project underway in France to build a 621 mile stretch of road with Wattway's panels [29, 30]. This was signed in 2016 by the French Minister of Ecology and Energy and is expected to take up to five years to complete. According to France's Agency of Environment

and Energy Management, 4m of solarised road is enough to supply one household's electricity needs, apart from heating, and one kilometre will light a settlement with 5,000 inhabitants. So the maximum effect of the programme, if successful, could be to furnish 5 million people with electricity, or about 8% of the French population [30]. Ms Royal has proposed to pay for improvements in France's transport infrastructure by raising taxes on petrol, which she said was "natural" given the falling cost of oil. She estimates that this could contribute between 200 and 300 million euros (\$220-440m) to the cost of improvements such as road solarising [30].

Overall, there is little to no scientific data provided by Wattway to provide a reasonable technical or economic analysis of their panels. It is also stated by Popular Mechanics that "What we don't know now is how much the solar road surface will cost, how it will stand up to inclement weather, and how long it will last until stretches of road need to be replaced" [29].

5.1.12 SolaRoad

SolaRoad is concept by a consortium of Dutch institutions to replace roadway surfaces with prefabricated solar electricity generating modules [31]. The technology was developed by a consortium consisting of Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Imtech (Dynniq) and Ooms Civiel, with a grant of €1.5 million from the province (county) North Holland as owner of the path. The total cost of the pilot project was €3.5 million. In addition to the €1.5 million from the province North Holland were that contributions from TNO, Ooms Civil, Imtech (Dynniq) and the European PV-Sin project (partly subsidized by the Dutch government) [31-33]. Similar to Wattway, the technology is only aimed to generate electricity and is not integrated with lighting as the Solar Roadway's panels are. In contrast to Wattway however, the panels are designed to replace asphalt rather than be placed on top of it; they are relatively bulky, and in that way similar to the Solar Roadway's panels.

SolaRoad is being developed as prefabricated slabs. It consists of concrete modules of 2.5 by 3.5 meters with a translucent top layer of tempered glass, which is about 1 cm thick (Fig. 9) [31]. Underneath the glass are crystalline silicon solar cells. The top layer immediately shows an important difference from the traditional road surface. It has to be translucent for sunlight and repel dirt as much as possible. At the same time, the top layer must be skid resistant and strong enough in order to realize a safe road surface. This is one of the technical challenges of SolaRoad [31].

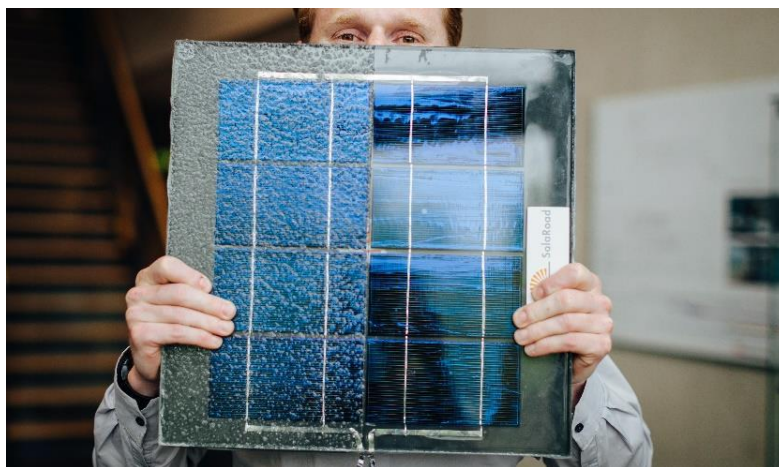


Fig. 9. Representative module being used for the SolaRoad project [31].

The large size of the modules can be seen in the figure 10 and we anticipate that the installation costs could be substantially higher for these than Solar Roadway or Wattway, simply due to their large size.



Fig. 10. Pre-fabricated concrete modules with the PV module placed on the surface. The PV module is placed between two slaps of tempered glass [31].

SolaRoad is being developed in stages. After a technical-economical feasibility study, a first prototype was developed in 2010 and it has been tested extensively in the laboratory. The results raised questions and revealed some points for improvement, but at the same time they were so promising that in 2011 it was decided to further develop SolaRoad [31]. In 2014, the consortium completed construction of a 72-meter bike path (Fig. 11) to test the technology [34]. It was reported 6 months later that the surface was still producing power and in good working order but that the anti-slip coating that was used on the surface saw some deterioration. It was reported that “The anti-slip coating began to peel away thanks to long-term sun exposure and temperature fluctuations, but researchers told Al Jazeera they are already at work developing an improved version” [34].



Fig. 11. SolaRoad: World's first solar cycle path to open in the Netherlands [31]

This is a major concern for roadway applications as any decrease in the friction of the surface would constitute a safety hazard, especially in rain conditions. It should also be noted that this company recognizes that energy storage is not possible with its current configuration but they are working on the development of batteries for energy storage, but it is not clear if they plan on integrating them directly within the modules or not [35]. The total cost for the 72 meter project was \$3.7 million [31].

On the 29 of March 2016, the Californian highways agency, Caltrans and the province of North Holland, signed a declaration of intent to look at sustainable options for capturing solar energy in transportation infrastructure. The proposed location is in Lebec, Kern County. Also, in 2016 the SolaRoad bike path in Krommenie was extended by 20 meter. The added elements are improved versions of the elements that were installed in 2014. The extension is part of the three-year SolaRoad pilot project, and will generate new test results [31]. To meet the demand from home and abroad, the SolaRoad Kit was introduced: four elements SolaRoad with an area of 10m² and therefore easily procured and extended by governments and companies. The province of Groningen will be the first to apply a SolaRoad Kit. It will be connected to a ‘smart bench’ that enables charging smartphones and e-bikes. The SolaRoad Kit and bench will be placed in April 2017 [31].

Below is a tabulated overview of all of the technologies discussed above.

Table 3. Comparison of different technologies [18].

	Solar Roadways	Wattway	SolaRoad
Mechanical Durability	High	High (no data)	No data
Optical Durability	Uncertain	Uncertain	Uncertain
Surface Roughness	High (not quantified or studied long term)	Uncertain	High but wear due to weathering noticeable after 6 months
Lighting Capability	Yes	No	Yes, but only theoretically
Cost	High (not quantified)	Equivalent to standard PV (analysis not discussed)	High (\$3.7 million for 70 meter bike path)
Energy Storage	No, but possible	No	No
Roadway Integration	Yes	Yes	Yes
Maintenance	High	Medium	High

The modular design of Solar Roadways, would hypothetically allow for easier maintenance as the modules are not permanently connected to each other - allowing for localized repairs as opposed to traditional asphalts where cracks and deformations easily spread throughout the structure of the road. Perhaps most relevant is that these lights are proposed to eliminate painted lines on roads and highways. Effectively these modules would be controlled by microprocessors and potentially be able to alert drivers with warning messages or change lane displays in an emergency. Unfortunately, there is no specific data available from Solar Roadways regarding their design that would allow us to assess what the performance of the lights will be during the day.

Wattway modules –Relative to Solar Roadways, these modules are less complex and simpler to install. It could make sense to discuss cost in more detail with Colas and consider this as a viable option. Battery storage and lighting would need to be integrated. Closely follow future deployment on a French Highway. The biggest concern will be related to “gluing” the modules to the pavement surface. By doing so this will cause secondary stresses to the modules because of the expansion and contraction of the pavement during day/night. This will increase the stresses the modules are subjected to and could lead to cracking.

SolaRoad - These have been successfully used for two years on a Dutch Bikepath but the surface roughness has been compromised. Installation is a major endeavor compared to Wattway modules and will probably dominate cost. There do not appear to be any advantages to using these over Wattway modules.

For all of these technologies, a detailed cost analysis and sustainability benefits should be investigated. The initial cost of solar road panels will be higher than that of a traditional road structure, however the additional benefit of generating clean and renewable energy and being made of different materials could help this to improve the sustainability aspects of civil infrastructure. One of the challenges of this analysis is determining the lifetime maintenance requirements of such a panel to appropriately determine lifetime costs.

Conclusions

The solar roadway alternative could be made at less cost with an energy return while phasing out the old system. As old roads are scheduled to be under maintenance, the process of solar roadway placement could occur seamlessly. The alternatives of airports and parking lots are under varying timelines. Whenever fiscal dilemmas become the primary motivating factor for a state or municipal budget, the option of solar roadways should be presented and defended.

In many countries the major part of the geographical area is to be explored in terms of road connectivity. So instead of implementing the higher targets roads to be developed per day it is possible to reduce the target by developing solar roads so they could improve economy with infrastructure. This is also the case for Nordic countries where there is anything technically limiting the feasibility of any of the aforementioned technologies. Nordic countries are very active in both manufacturing and research of various PV technologies. Combining our knowledge in PV technology and taking experience from France and Netherland which have been successfully

implemented solar road approach, we can develop and show the feasibility of solar pavements in Nordic countries.

Generally, the solar roads will and need:

1. Create an intelligent, secure highway infrastructure that pays for itself.
2. Create an intelligent, secure, decentralized, self-healing power grid.
3. Decrease the need for coal-fired or nuclear power plants.
4. Decrease our dependency on oil and other fossil fuels (oil, coal and natural gas).
5. Reduce greenhouse gas emissions by over 50%.
6. Provide safer driving conditions.
7. Wild life protection and security.
8. The comparison of three companies Solar Roadways, Wattway, SolaRoad e-roads shows different approach. None using energy storing.
9. Modular construction is preferable.
10. The electrical connections between modules are soldering free.
11. The maintenance of the solar road must be easily carried out.
12. In the Nordic countries the e-pavement is not proved.

Kokkuvõte

E-maanteebate kui alternatiivne teekate võib olla odavam variant, kui see asendada kattena vana teekatte asemele. Siinkohal tuleb silmas pidada ka e-maanteebate energiatootmisest tulenevat kasu. Selline teekatte asendus kerkib päevakorrale teekatte korralise uuendamise ajal. Mõnel juhtumil on teekatte uuendamine ajaliste tsüklitega limiteeritud ja siis on vaja e-teekattelahendust kaitsta kui perspektiivset lahendust teekattele.

Paljudes maades tähendab sisegeograafiline ühendamine maanteeühendusi. Seetõttu võiks arendada ka e-teekattega teid nende ühendusteede kõrvale. See on aktuaalne ka Põhjamaades, kus eespool käsitletud tehnilised lahendused on võimalikud. Põhjamaad on aktiivsed kaasalööjad fotovolt tehnoloogiates ja uurimistöodes. Kombineeride meie teadmisi fotovolt tehnoloogias koos kogemustega Prantsusmaalt ja Hollandist, kus on edukalt tehtud esimesed suuremahulised katsetused e-maanteebatega, suudame näidata e-teekatte kasutamise võimalikkust Eestis.

E-maanteebate võimaldab ja nõuab:

1. Luua intelligentne, varjatud infrastruktuur, mis on kulutusi tagasiteeniv.
2. Luua intelligentne, varjatud, decentraliseeritud isekorrastuv energiavõrk.
3. Vähendada olemasolevate fossiilsete- ja tuumaenergiajaamade vajadust.
4. Vähendada fossiilsete kütuste tarbimist.
5. Vähendada kasvuhoonegaaside hulka.
6. Pakkuda turvalist autojuhtimist keskkonda.
7. Pakkuda elavale loodusele kaitset.
8. Kolme kompanii Solar Roadways, Wattway, SolaRoad e-teekatted on lahendatud erinevalt. Ükski ei kasuta energia salvestamist.
9. Moodullahendus on eelistatud.
10. Elektrilised ühendused moodulite vahel on jootmisvabad
11. E-teekatte remont peab olema kergesti teostatav.
12. Põhjamaades pole e-teekatet veel katsetatud.

References

- [1] A. Northmore and S. Tighe, Developing innovative roads using solar technologies, *CSCE 9th International Transportatoin Specialty Conference, Edmonton* (2012).
- [2] A. Northmore and S. Tighe, Innovative pavement design: Are solar roads feasible? *Conference of the Transportation Association of Canada, Fredericton* (2012).
- [3] A. Northmore, Canadian Solar Road Panel Design: A Structural and Environmental Analysis, Master thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, (2014).
- [4] US EIA, International energy outlook 2011, Washington, DC.: U.S. Energy Information Administration.
- [5] IEA. (2011). *IEA statistics: CO2 emissions from fuel combustion: 2011 edition*. Paris: International Energy Agency.
- [6] Costello, S. B., Bargh, L. S., Henning, T. F. P., & Hendry, M. (2013). Proposed new performance indicator - vehicle operation cost index (VOCi) due to road roughness. *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, Washington, D.C.
- [7] Enfiinty. (2011). Europe's first "green" train leaves the station thanks to Belgium's solar tunnel. Retrieved July 5, 2012, from <http://www.enfinitycorp.com/downloads/news-releases/europes-first-green-train>
- [8] US DoT. (2012). *Alternative uses of highway right-of-way: Accommodating renewable energy technologies and alternative fuel facilities*. Cambridge: U.S. Department of Transportation.
- [9] A.J. Renoald, V. Hemalatha, R. Punitha, M. Sasikala, M. Sasikala, Solar Roadways-The Future Rebuilding Infrastructure and Economy, *International Journal of Electrical and Electronics Research* 4 (2016) 14-19. Available at: www.researchpublish.com.
- [10] ACI. (2013). Matweb material property data. Retrieved May 13, 2013, from <http://www.matweb.com/index.aspx>.
- [11] Rochling. (2013). *Grade UTR Arc/Track & flame resistant laminate*. Cleveland: Rochling Glastic Composites.
- [12] ARA. (2011). *Methodology for the development of equivalent pavement structural design matrix for municipal roadways*. (No. 000830). Toronto, Ontario: RMCAO.
- [13] ASHTO. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, DC: AASHTO.
- [14] D.J. Alsop, R.J. Saunders, Structural use of glass in buildings. London: Institute of Structural Engineers (1999).
- [15] Remon Industrial Limited, "Mono 125S0R2 Solar Cell," [Online]. Available: <http://www.rmsolarpanel.com/html/49/2010-12-13/content-34.html>. [Accessed 2012 March 14].

- [16] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering. Chichester: Wiley 2003.
- [17] H.H. Hsieh, F.M. Lin, & S.P. Yu, Performance of low series-resistance interconnections on the polycrystalline solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (2011) 39-44.
- [18] J. Scheffe, Integrated Solar Lighting for Pedestrian Crosswalk Visibility, A report written for the Florida Department of Transportation, (2016) 1-19.
- [19] Solar Roadways. <http://www.solarroadways.com/>.
- [20] "Solar Roadways: Phase I Grant". Available: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/355952>.
- [21] "Solar Roadways: Phase II Grant". Available: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/362311>.
- [22] "Solar Roadways - SBIR.gov". Available: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/355949>.
- [23] G. Prentice, "Sandpoint Will Light Up Solar Roads This Friday". Boise Weekly. Retrieved September 29, 2016. Available: <http://www.boiseweekly.com/boise/sandpoint-will-light-up-solar-roads-this-friday/Content?oid=3899013>.
- [24] "City Council Minutes 7/20/2016". Sandpoint, ID: City Council Minutes. Retrieved 23 October 2016. Available: <http://www.cityofsandpoint.com/your-government/city-council-minutes>.
- [25] <http://www.sandpointidaho.gov/visiting-sandpoint/solar-roadways#ad-image-5>.
- [26] Wattway. <http://www.wattwaybycolas.com/en/>.
- [27] Wattway - Paving the way to tomorrow's energy. <https://www.wattwaybycolas.com/wp-content/uploads/2015/10/Wattway-DP-UK.pdf>.
- [28] <https://www.theguardian.com/environment/2016/dec/22/solar-panel-road-tourouvre-auperche-normandy>.
- [29] Popular Mechanics. <http://www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/news/a19362/france-planning-over-600-miles-solar-panel-roads/>.
- [30] <http://www.globalconstructionreview.com/trends/france-pave-1000km-road-so-lar-panel/>.
- [31] SolaRoad. <http://en.solaroad.nl>.
- [32] "SolaRoad combineert weg met zonnepaneel". TNO.
- [33] <http://deorkaan.nl/provincie-stak-ruim-e-15-miljoen-in-solaroad/>.
- [34] Tech Mic. <https://mic.com/articles/117948/6-months-later-here-s-what-s-happened-to-the-netherland-s-solar-bike-paths#.xlcKsGDwd>.
- [35] New Civil Engineer. <https://www.newcivilengineer.com/future-tech/energy-solar-roads-take-off/8669755.article>.

KATSEPROTOKOLL NR 6257/17

20.10.2017 nr 7-6.4/6924

Lk 99/101

Tellija: Tallinna Tehnika Ülikool – Ain Kendra

Töö ülesanne: Puurproovi katsetamine

Proovid:

Objekt	-	Toomise aeg ja tooja	
Võtmise koht	-	17.10.2017 16:00,	
Võtmise aeg ja võtja	-,-,-	Ain Kendra, Tallinna Tehnika Ülikool	
Tellija poolne tähistus		Labori reg nr	-

Katsetamine ja tulemused

Nelinurksest materjali proovist puuriti 100mm läbimõõduga puurkeha. Puurkeha katsetati vastavalt standardile EVS-EN 12697-16 (meetod A). Puurkeha mahumassi ei määratud.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Katsetamise tulemus		
			Enne katsetamist, g	Pärast katsetamist, g	Kulumine, g
			224,6	220,8	3,8

Puurkeha puurimine



Puurkeha enne katsetamist



Puurkeha peale katsetamist

