



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

METSATEEDE STABILISEERIMINE PÕLEVKIVITUHAGA

USING SHALE ASH FOR FOREST ROAD CONSTRUCTION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rauno Leppik

Üliõpilaskood 192304EAXM

Juhendaja: Sven Sillamäe

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Rauno Leppik (sünnikuupäev:06.05.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Metsateede stabiliseerimine põlevkivituhaga,

mille juhendaja on Sven Sillamäe,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Rauno Leppik 192304EAXM

Õppekava, peeriala: EAXM15/15 - Hooned ja rajatised , Teedehitus

Juhendaja(d): Lektor. Sven Sillamäe. 53025265 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) **Metsateede stabiliseerimine põlevkivituhaga**

(inglise keeles) **Using shale ash for forest road construction**

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Põlevkivituhale kasutuse leidmine teedehituses.
2. Metsateede ehitamise tehnoloogiale alternatiivi leidmine.
3. Põlevkivituhaga stabiliseeritud pinnastee katselõigu ehitamine ja monitoorimine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katselõigu pinnaseproovide võtmine, pinnaseproovide katsetamine laboris ja seguretsepti väljatöötamine	01.06.20
2.	Katselõigu ehitamine ja monitoorimine	15.10.20
3.	Katselõigult saadud tulemuste analüüsimine, järelduste tegemine ja töö vormistamine	20.05.21

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "24" Mai 2021a

Üliõpilane: Rauno Leppik ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Sven Sillamäe ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

1.	SISSEJUHATUS.....	6
2.	PÕLEVKIVITUHAST.....	8
2.1	Põlevkivi tuhk.....	8
2.2	CFB tuhk	9
2.3	Tuha sideainelised omadused	9
3.	STABILISEERIMISE TEHNOLOOGIAD	11
3.1	Tsementstabiliseerimine	11
3.2	Sideaine laotamine	12
3.3	Mass-stabiliseerimine	14
4.	KASUTATAVAD SIDEAINED	16
4.1	Hüdraulilised sideained	17
4.2	Tsement	18
4.3	Lubi	19
4.4	Lendtuhk	22
4.4.1	Põlevkivituhaaga stabiliseerimise ajaloost	22
5.	RMK KATSELÕIK	26
5.1	Üldosa	26
5.2	Proovivõtt	27
5.2.1	Taarikõnnu tee.....	27
5.2.2	Viira tee	29
5.2.3	Võru maakonna metsasiht	30
5.3	Laboratoorsed katsed	31
5.4	Katselõigu ehitamine	36
5.5	Järelmonitooring	39
6.	MAJANDUSLIK TASUVUS.....	44
7.	JÄRELDUSED JA SOOVITUSED	47
7.1	Pinnase stabiliseerimise eesmärk	47
7.2	Uuringud objektil	48
7.3	Laboratoorsed katsed	48
7.4	Ehitustööd	49
	KOKKUVÕTE	51
	SUMMARY	53
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	55

1. SISSEJUHATUS

Põlevkivituhkade kasutusvõimalusi on uuritud aastakümneid ja praegugi on käimas mitmed uuringud. Põhjuseks muutused materjali koostises seoses tehnoloogiatega muutmisega. Varasemat tuhka on kasutatud ehitusmaterjalide tootmiseks, samuti sobib see teede aluskihtide stabiliseerimiseks (1970.-80. aastatel ehitatud tolmuwabakatted ning OSAMATI uuring). Praegused uuringud, mis on tehtud kasutades keevkihtkatelde elektrifiltri tuhkasid (CFB tuhk), on näidanud suurt potentsiaali tuha kasutamiseks pinnaste stabiliseerimiseks.

Üks probleemidest, mida käesolev lõputöö lahendab, on metsateede ehitamisele alternatiivse tehnoloogia leidmine. Seni on seda tehtud juurdeveetavast materjalist, milleks enamasti on kruus, kuid pinnaste stabiliseerimise tehnoloogia lubab teha järeldusi, et lisaks klassikalisele muldkeha ehitamisele võiks olla alternatiiv olemasolevate mineraalsete pinnaste stabiliseerimine põlevkivituhaga. Stabiliseerimise tehnoloogia ei peaks piirduma ainult metsateedega ja see võiks olla võimalus ehitada ka kruusa ja mustkattega teid.

Teine põhiline probleem, mida antud töö lahendab, on energiatööstuse ühe jäägi suunamine teedehitusse, et parandada ehituseks sobimatu pinnaste omadusi ja seeläbi vältida ehituseks sobimatute pinnaste ehk jääkide teket. Kuna Eesti ja kogu Euroopa Liit liigub kliima neutraalsuse suunas, siis see tehnoloogia on kindlasti üks moodus, millega saab suunata materjale ringmajandusse ja seeläbi vähendada süsiniku jalajälge.

Lõputöö peamine eesmärk on leida kas ja mis tingimustel sobib põlevkivituhk metsateede stabiliseerimiseks. Selle tarbeks ehitati RMK tellimusel katselõik, et välja selgitada stabiliseeritud metsatee vastupidavus ümarmaterjali transpordiks. Katselõigu ehitamine koosnes järgmistest etappidest:

- Objektilt pinnaseproovide võtmine ja kandevõime mõõtmine;
- Pinnaseproovide laboratoorne katsetamine ja seguretsepti väljatöötamine;
- Katselõigu ehitamine;
- Objekti järel monitooring koos kandevõime mõõtmistega;
- Saadud tulemuste analüüsimine ja järelduste tegemine.

Lõputöö vajalikud katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli laborites, kus toimus pinnaste omaduste määramine ja põlevkivituhaga stabiliseeritud pinnaste katsekehade valmistamine. Katsekehade survetugevuse mõõtmine toimus Teede Tehnokeskuse ja

Tallinna Tehnikaülikooli laborites. Saadud tulemustega tehti järeldused leidmaks parim võimalik seguretsept katselõigu ehitamiseks. Stabiliseerimise eel- ja järelmonitooringu käigus tehtud kandevõime mõõtmised teostati Dynatest LWD seadmega.

2. PÕLEVKIVITUHAST

2.1 Põlevkivi tuhka

Eesti põlevkivi ehk kukersiit (nimetus on tuletatud seosed Kukruse külas, Ida-Virumaal olnud leiukohaga) on üks tahketest põlevatest maavaradest. Põlevkivi on moodustunud ca 450 miljonit aastat tagasi madalas soojas soolases meres. Soodsatel aastatel ladestusid vetikamatid, mis segunesid savi- ja lubimineraalidega.

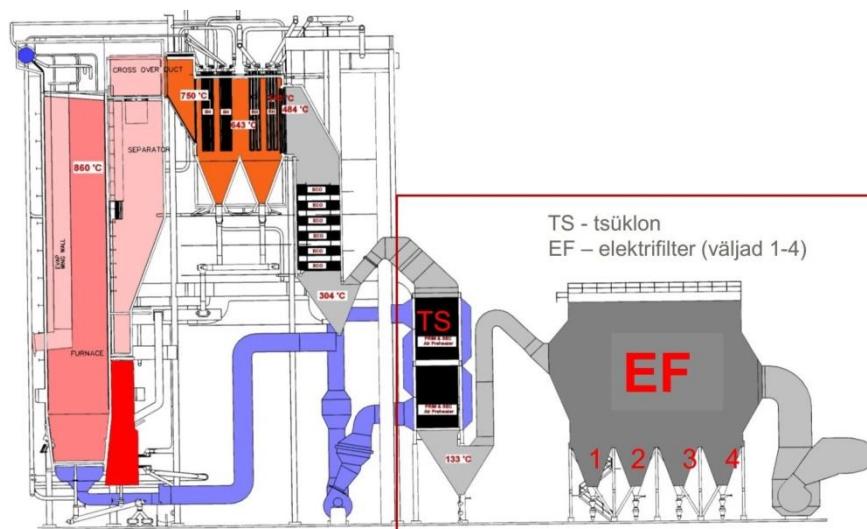
Põlevkivi koosneb mittetäielikult lagunenu orgaanilisest ainest (50-70% ulatuses) ja mittepõlevast mineraalosast. Orgaanilise ehk põleva osa kivist moodustavad süsinik ja vesinik, aga ka hapnik ja lämmastik, vähesel määral on fosforit ja kloori. Põlevkivi põlemisel jääb järele ligikaudu 55% tuhka. [1]

Eesti põlevkivitööstuses tekib aastas kokku ligikaudu 9,5 miljonit tonni põlevkivituhka, millest enamik ehk 9,3 miljonit tonni ladestatakse prügilasse. [2]

Käesolevas töös on kasutatud keevkihi katla tuhka tähistusega (CFB -ing. *circulating fluidized bed combustion*) See on tuhka, mille sideainelisi omadusi on küll uuritud (teede ehituses OSAMAT-projekt ja selle järelmonitooringud), ning antud töö autori 2019. aastal kirjutatud lõputöö Kruuskatete stabiliseerimisest põlevkivituhaga, kuid lõplike lahendusteni ei ole varem veel jõutud. Piisavalt on uuritud tolm põletamisel tekkivat PF-tuhka (ing. *pulverized fuel*), sest see on kasutusel olnud tehnoloogiatest kõige vanem ja millel on head sideainelised omadused, on ennast tõestanud. Selle toimimist on kinnitanud OSAMAT projekti 2018. aasta järelmonitooring ja ka Teede Tehnokeskuse poolt 2005. aastal avaldatud eelmise sajandi 1970.-1980. aastatel ehitatud põlevkivituhaga stabiliseeritud katete seisukorra uuring. PF-tuhka on kasutatud ja kasutatakse tänase päevani ehitusmaterjalide tootmiseks, samuti sobib see teede aluskihtide stabiliseerimiseks. Paraku ollakse sellest põletustehnoloogiast loobumas, sest selle käigus vabaneb liiga palju kasvuhoonegaase ning seoses sellega tuleb loobuda ka sellest tuhast. OSAMATi uuringu 2018. aasta järelmonitooring ja autori varasem lõputöö lubas siiski teha järelduse, et CFB tuhkadel on suur potentsiaalne kasutusvaldkond madalal klassiliste teede aluste ja kruuskatete stabiliseerimisel parandamiseks nende vastupidavust liigveest tingitud kandevõimekaotusele. [3]

2.2 CFB tuhk

CFB (ing. *circulating fluidized bed combustion*) ehk tsirkuleeriva keevkihi tehnoloogia omapäraks on koldest lahkuva põlemisgaasi ja tuhaosakeste siirdumine separaatorisse, kus mõõtmelt ja massilt suuremad tuhaosakesed välja separeeritakse ja koldesse tagasi suunatakse. Koldes on temperatuurid umbes 800–850 °C juures. Luuakse tasakaal koldesse antava kütuse ja ringleva tuha vahel, osakesed väljuvad pidevalt separaatorist ja põhjatuhana koldest. CFB tehnoloogia on keskkonnasõbralikum, väävel saadakse peaaegu täielikult kätte ehk seotakse tuhaga kaltsiumi poolt (põlevkivis on kaltsiumi ja vääveli suhe vahemikus 8–10, mis on küllaltki suur). Lämmastikdioksiidi tekib väikestes kogustes ja süsinikdioksiidi tekib 4–8% vähem kui PF tehnoloogiaga. Samuti on ka tuha keemiline koostis erinev. CFB tuhas on vähem reaktiivset kaltsiumoksiidi võrreldes PF-iga. Üheks miinuseks on see, et keevkihi tehnoloogiaga tekib vähem klinkrimineraale, mis on sideaine omadustega, see mõjutab põlevkivituha kasutusvõimalusi ehitusmaterjalina. Joonisel 2.1 on näha keevkihi katel ja selle tuhaarastussüsteem. [3]

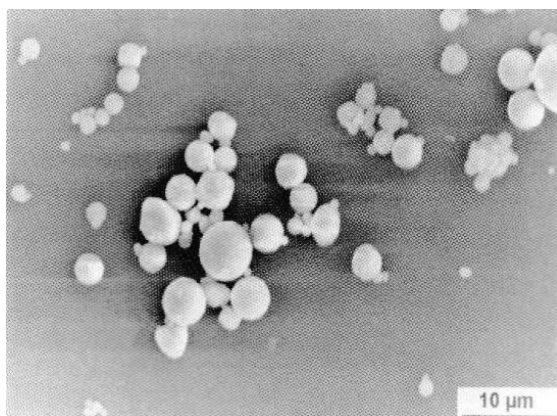


Joonis 2.1 Keevkihi katla skeem [4]

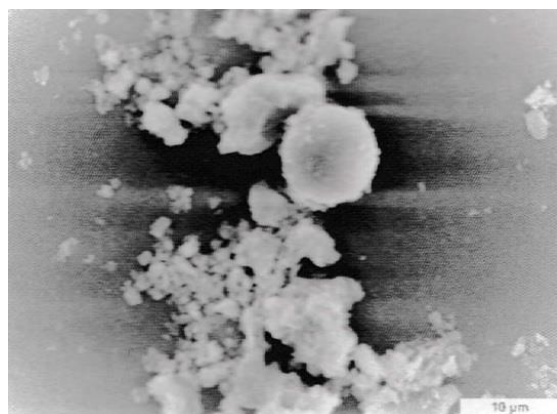
2.3 Tuha sideainelised omadused

Kõrgel põletustemperatuuril >1400 °C tolmpõletuskateldes moodustuvad esialgselt lubjakivi ja saviosakeste lagunemisel tekkinud vabast oksiididest madalaaluselised kaltsiumsilikaadid ja -aluminaadid, (10...12%). Kaltsiumaluminaadid ja -ferriidid aga sulavad, moodustades vedelfaasi (massist 27...34%), mis jahtudes katab terakeste pinna klaasja kihiga. Vaba ränioksiid (20...35%) jääb nn lahustumatu jäägina tuha koostisesse. Elektrifiltrites kinnipüütav tuhk on peen, 80% terakestest on väiksemad kui 20 µm. Selline peenus võimaldab tuhal veega kiiresti reageerida. Tolmpõletamisel

saadud ja elektrifiltrites kinni püütud tuha unikaalsed omadused põhinevad suurel mineraalosa sisaldusel põlevkivis ja kõrgel (>1400 °C) põletustemperatuuril, mis tekitab peente osakeste pinnale vedelfaasi ning muudab ümarate terakeste pinna jahtudes klaasjaks (joonis 2.2 ja 2.3). Sellise klaasja faasi teke osakeste pinnal vähendab hõõret ja seega väheneb veevajadus segus. [5]



Joonis 2.2 Tolmküttekatlas kõrgel temperatuuril >1400 °C põletatud elektrifiltrituha EF 1 terakesed on sileda klaasja pinnaga ja vormilt sfäärilised [5]



Joonis 2.3 Keeskihtkateldes 800°C juures põletatud elektrifiltrituha EF1 terad ei ole kaetud klaasifaasiga, on krobelised. Fotol on näha ainult üks sfääriline osake [5]

Põletamisel keevkihtkateldes temperatuuril 800 °C moodustunud põletatud põlevkivis (CFB) jääb osa lagunemisprotsesse toimumata, seega sisaldavad CFB tuhad lagunemata kaltsiumkarbonaate, mis edasisel kuumutamisel lagunevad. Samuti sisaldavad CFB tuhad oluliselt enam reageerimata jäänud vaba ränioksiidi, mis annab portlandtsemendile, milles on koostisosana kasutatud CFB tuhka, putsolaanse kivinemise tüübi (so Ca-hüdroksiidi ja lahustuva räniainese reageerimisega). Lisaks kivinemistüübi muutusele muutub CFB kasutamisel teise koostisosana ka segu veevajadus ja seda põletusprotsessis tekkinud tuhaterakeste kuju ja pinna muutumise tõttu (vt joonist 2.2 ja 2.3). [5]

3. STABILISEERIMISE TEHNOLOOGIAD

Võib väita, et stabiliseerimine teedeehituses jaguneb suures pildis kaheks. Üks tehnoloogia, mida laialdaselt kasutatakse üle maailma ja ka Eestis, on katete stabiliseerimine. Teine, natukene vähem kasutusel olev tehnoloogia, on pinnaste stabiliseerimine, või teise nimetusega modifitseerimine, mida Eestis on kasutatud üsna vähe, kuid paljudes riikides on see leviv praktika. Mõlemal tehnoloogial on oma koht teedeehituses, kuid eesmärk on neil erinev.

Alates 2005. aastast kehtima hakanud Stabiliseeritud katendikihtide ehitamise juhendi järgi võib katete stabiliseerimist defineerida kui loodusliku pinnase ja materjalide ning sideainetega töötlemata, või seotud teekatendist kobestatud freespuru omaduste parandamist uute materjalide lisamisega, mille eesmärgiks on teekonstruktsiooni kandevõime ja tasetasuse suurendamine, ning ilmastikukindluse tõstmine. [6]

Kuna antud töö käsitleb pinnaste stabiliseerimist, mille eesmärk on looduslike pinnase omaduste parandamine, siis katete stabiliseerimise tehnoloogiatel ja sideainetel rohkem ei peatu.

Pinnase stabiliseerimiseks nimetatakse loodusliku pinnase ja materjalide sideainetega töötlemist, muutmaks nende Atterbergi piire ehk plastsust ja kandevõimet nii, et saadav materjal on teedeehituses sobilik. Külmaskindlate materjalide järjepidev vähenemine on pannud teadlasi välja töötama erinevaid tehnoloogiaid ära kasutamaks olemasolevaid mittesobivaid pinnaseid. [7]

Pinnase stabiliseerimise ehk modifitseerimise eesmärk on tõsta olemaseoleva pinnase omadusi, et see oleks sobilik ehituseks. Enamasti on probleemiks miks pinnast ei saa kasutada liigniiskus, suur plastsus või vähene kandevõime. Neid ja ka teisi pinnase omadusi on võimalik modifitseerimise teel parandada.

3.1 Tsementstabiliseerimine

Kuna pinnase modifitseerimist tehakse hüdraulilise sideainega, siis tehnoloogiliselt on see sama mis tsementstabiliseerimine ja seega on selle tehnoloogia nimetus tsementstabiliseerimine.

Tsement on kõige laialdasemalt kasutatav sideaine maailmas, seda kasutatakse rohkem kui kõiki teisi sideaineid kokku. Üheks põhjuseks on tsemendi kättesaadavus,

kuna seda toodetakse enamikes riikides üle kogu maailma. Teiseks põhjuseks on selle võidukäik ehitusmaterjalina. Tsemendiga töötlemise kohta on olemas terve rida standardeid, katsemetodeid ja spetsifikatsioone ning kümnete aastate vältel on tsemendiga stabiliseeritud kihid oodatust paremini vastu pidanud tuhandetel kilomeetritel teedel. [8]

Tsementstabiliseerimiseks nimetatakse hüdraulilise sideaine ja täitematerjali tihendatud segu. Täitematerjaliks võib olla uus juurde veetav materjal, olemasoleva sideainega töötlemata teekatte, kruusatee kulumiskihi kobestamisel saadud materjal, või vana asfalt- ja mustkatte freespuru. Stabiliseerimine viiakse läbi segamisfreesiga, mis on spetsiaalselt selleks tööks loodud masin või põllumajandustraktoriga millele on liidetud segamisfrees (joonis 3.1). Segamisfreesi tööorganiks on freestrummel, mis segab töödeldava pinnase ühtlaselt sideainega läbi (joonis 3.1). Traktori järele liidetaval freesil puudub võimalus lisada segusse vett ja see seab selle kasutamisele omad piirid. Sellist traktorit ei saa kasutada stabiliseerimisel kus tuleb segatavale pinnasele lisada vett, kuid seda saab kasutada edukalt pehmete pinnaste puhul, kus vajalik niiskuse sisaldus on juba pinnases olemas. Ühtlasi kasutatakse seda ka edukalt pinnase kuivatamisel lubja või põlevkivituhaga. [6]



Joonis 3.1 Põllumajandustraktorile liidetud segamisfrees (vasakul) [9], segamisfreesi tööorgan (paremal) [10]

3.2 Sideaine laotamine

Sideaine laotamiseks on erinevaid mooduseid. Enamasti kasutatakse tsemendi laoturiga sideaine varasemat paigaldust, kuid on ka teisi vähem kasutatavaid variante. Kottides kohalevedu ja käsitsi laotamine. Meetod on populaarne arenguriikides, kus on palju odavat tööjõudu. Kui teepind on eelnevalt märgistatud võrgustikuga, mis tähistab ühe kotitäiega kaetavat ala, on võimalik saavutada märkimisväärset täpsust. Pärast laotamist silutakse tsement ühtlaseks kihiks kaabitsatega. [8]

Puisteseadmete (laoturite) kasutamine (joonis 3.2). Seda meetodit kasutatakse kõige rohkem. Tsemendi teepinnale laotamiseks ettenähtud koguses kasutatakse mitmeid erinevaid süsteeme (lintkonveierit, tigu toiteseadet, pneumokonveierit), kusjuures igaühel neist on oma eelised ja puudused. Kulunormi kindlakstegemiseks viiakse läbi presenditüki katse. Kõikidel laoturitel on piirangud ning väga väikeste koguste (< 2%) laotamisel tuleb olla tähelepanelik. Kuiva tsemendi laotamist mõjutab ilm, eriti tuul ja vihm. Tsement on peeneteraline lenduv pulber, lennates õhku juba kerge tuulehooga, kaasa arvatud mööduvate veokite põhjustatud tuulega. Tuulest põhjustatud kaod vähendavad kulunormi ebaühtlaselt. Laotatud tsemendile langev vihm käivitab hüdratiseerumisprotsessi ning seepärast tuleb tsement kohe segada või sellest meetodist loobuda; [8]

Tsementstabiliseerimisel kasutatakse tihtipeale lisaks hüdraulilisele sideainele veel ka erinevaid sideaine lisandeid. Kuna sideaine lisandit peab doseerima väga vähe, olenevalt lisandist ja projekti eripärast, võib lisandi kogus jääda vahemikku 2-4% sideaine kogusest. Selle tarbeks peab lisandit doseerima spetsiaalse tehnika abil (joonis 3.2), sest traditsiooniline tsemendi laotur ei suuda nii väikest kogust doseerida ja üle doseerimise korral võib tekkida liiga jäik kiht, mis omakorda hakkab pragunema.



Joonis 3.2 Sideaine puisteseade (vasakul) [11], lisaaine dosaator (paremal) [12]

Laotamisseadmega segamisfreesi kasutamine. Segamisfreesile on võimalik lisada ka sideaine laotamise mooduli (joonis 3.3), millel on 5,5 m³ kolu. Tsement või lubi liigub kolust lüüsi kaudu laotamisseadmeni, mis laotab tsemendi või lubja ühtlase kihina teele vahetult freesimis- ja segamisturmi ette. Kui laotada tsement vahetult segamisfreesi ette, siis selline tolmuva laotamisviis on täpne alates 1,5 kg kuni 40 kg/m² kulunormini, ning lahendab kõik ilmastikust tulenevad probleemid. Laotamise moodul on jagatud kolmeks 80cm laiuks seksiooniks mida on võimalik eraldi

sulgeda, et vältida sideaine üle doseerimist juhul kui stabiliseeritava tee laius ei jagu täpselt segamisfreesi tööorgani laiusega, mis antud freesi puhul on 2,4m. Sideaine saab laadida tsisternautost otse segamisfreesi kolusse (joonis 3.3). [8] [10]



Joonis 3.3 Laotamiseseadmega segamisfrees (vasakul) [10], sideaine laadimine tsisternist otse segamisfreesi punkrisse (paremal) [10]

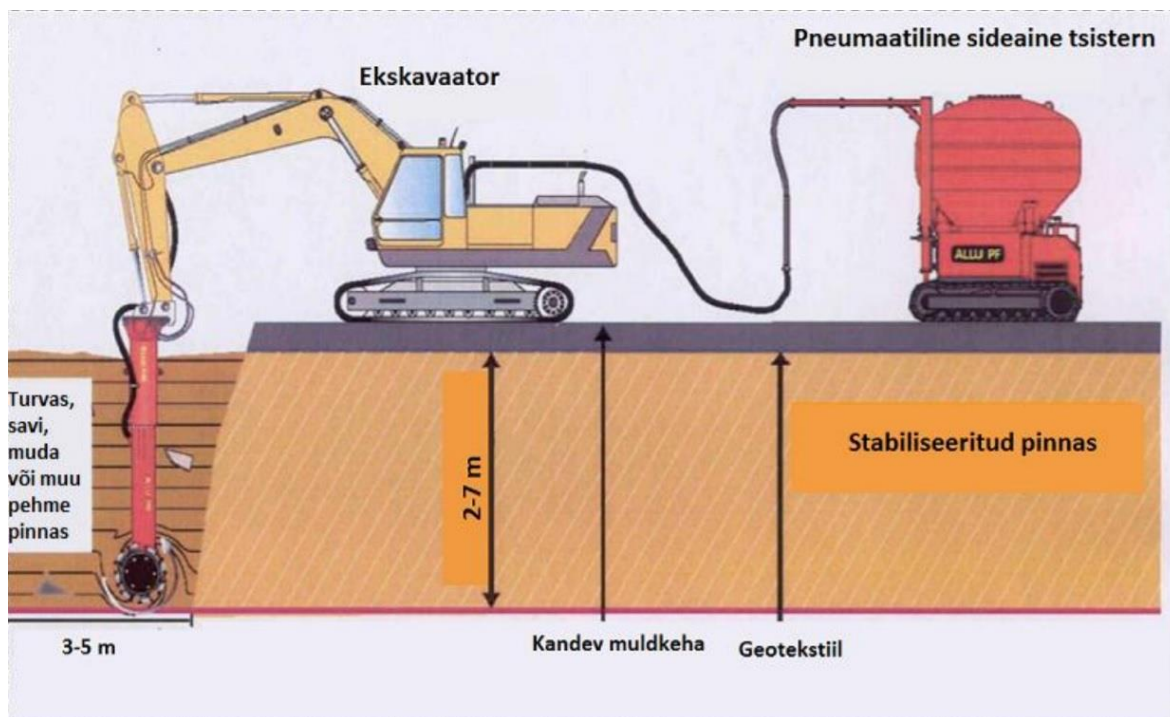
3.3 Mass-stabiliseerimine

Mass-stabiliseerimine on pehmete pinnaste tugevdamise meetod, mis põhineb printsiibil, et nõrku pinnaseid töödeldakse mehaaniliselt, segades sinna kuiva või märja sidusainet. Mass-stabiliseerimise kui tänapäevase tehnoloogia esmased katsetused toimusid juba Esimese Maailmasõja ajal, kuid algelised pinnase parandamise eksperimendid toimusid juba rohkem kui 5000 aastat tagasi Shen-hsi püramiidide ehitamisel Tiibeti platoole. Tänapäeval on mass-stabiliseerimine laialdaselt levinud Skandinaavias, eriti Soomes ja Rootsis. [13]

Pehmeteks pinnasteks loetakse turba-, savi- või muid kõrge veesisaldusega pinnaseid. Maapinna tugevdamine toimub kuiva või märja sideaine segamisel pehme pinnasega. Stabilisaatoritena kasutatakse üldjuhul ühte või mitut sideainet. Sideaineteks võivad olla tsement, lubi, lendtuhk või šlakk. Peale sideaine lisamist tuleb stabiliseeritav ala katta geotekstiiliga ning sellele omakorda laiali laotada eelkoormamiskiht. [13]

Mass-stabiliseerimist kasutatakse peamiselt nõrkade pinnaste tugevdamiseks, deformatsioonide ja vajumite vähendamiseks ning saastunud pinnaste olukorra parandamiseks. Pinnaste mass-stabiliseerimine on keskkonnasõbralik tehnoloogia avaldades keskkonnale vähe mõju. Samuti on ehitusaegsed müra- ning vibratsiooni tasemed madalad. Pinnaste mass-stabiliseerimist on mõistlik kasutada kuni 7 meetri paksuste pinnaste puhul. Paksemate pinnasekihtide puhul tuleks mass-stabiliseerimist

kombineerida teiste tehnoloogiatega, nagu sammastabiliseerimine. Antud meetodi puhul segatakse pinnas ilma kaevamiseta kohapeal (joonis 3.4). Selles protsessis toob pneumaatiline mehhanism sidusaine kohale ning sidusaine lisatakse pinnasele spetsiaalse segamispeaga, mis homogeniseerib pinnase. [13]



Joonis 3.4 Pinnase mass-stabiliseerimine [13]

Põhiline eesmärk, miks pinnaseid modifitseerida, ongi parandada nende omadusi, põhiliselt kandevõimet. Alternatiiviks on kehvad pinnased välja vahetada heade pinnaste vastu, kuid see nõuab palju ressursi. Stabiliseerimine on hea alternatiiv, sest selle abil saab ära kasutada kohalikke pinnaseid, sest tihtilugu tuleb tuua kvaliteetseid materjale kaugel asuvatest karjääridest.

Pinnase modifitseerimine ja mass-stabiliseerimine võib mõnesmõttes olla isegi võrdsustatud. Erinevus on lihtsalt selles, kui sügavalt sideainega segatakse ja mis on töö eesmärk. Kokkuvõtteks sõltub see projektlahendusest.

4. KASUTATAVAD SIDEAINED

Vanade dokumentide põhjal võib väita, et teadaolevalt kasutasid roomlased teedeehituses sideaineid juba kaks tuhat aastat tagasi. Lisaks klompsillutise (munakivisillutise) kasutuselevõtule töötlesid roomlased materjali katendi tugevuse parandamiseks lubjaga. Tänapäeval kasutatakse sideaineid looduslike materjalide omaduste parandamiseks kõikjal maailmas. Lisaks materjalide tugevusomaduste parandamisele muudavad sideained materjalid vastupidavamaks vee ja keskkonna mõjudele. [8]

Paljudes maailma piirkondades pole heakvaliteedilist materjali saada. Sobiva materjali importimise kulud on pannud teadlasi välja töötama stabiliseerimise tehnoloogiaid, mille tulemusel on võimalik ära kasutada kohalikke ressursse. Sageli on võimalik muuta viletsate omadustega kohalik materjal väikeste kulutustega nõutava tugevusomadustega materjaliks, lisades vaid väikese koguse sideainet. Selline tehnoloogia on rakendatav nii taastamistöodel kui ka uute teede ehitamisel. Sideaine lisamisega parandatakse olemasolevast katendist saadud materjali omadusi, vähendades seega uue materjali lisamise vajadust. [8]

Tänapäeval kasutatakse kogu maailmas palju erinevaid sideaineid. Nende hulka kuuluvad keemilised ühendid, nagu kaltsiumkloriid, pika ahelaga polümeerid ja sulfatiseeritud naftatooted, teised vähem levinud tooted ning palju tavapärasemad sideained nagu tsement ja bituumen. Kõikide sideainete kasutamisel on eesmärgiks siduda materjali üksikuid osakesi, et suurendada seeläbi materjali tugevust ja/või muuta see veekindlamaks. Mõned sideained on sobivamad teatud materjalide puhul, mõnedel on hinnaeelis, kuid kõigil on turul oma koht ja enamikke neist saab kasutada moodsate segamisfreesidega. [8]

Pidevalt töötatakse välja uusi tooteid ja tööstuse seisukohalt on oluline, et kõiki neid proovitaks ka praktikas. Uuendusi tuleks igati toetada, kuna ükski sideaine ei sobi kõikide kasutusvaldkondade puhul. Kui inseneridel tuleb otsustada, millist sideainet konkreetse projekti puhul kasutada, peaksid nad suhtuma eelarvamusteta kõikidesse variantidesse. Otsuseid mõjutavad tähtsuse järjekorras järgmised tegurid: [8]

- Hind. Esmase tähtsusega on stabiliseerimisel alati ühikhind (harilikult väljendatuna ruutmeetri maksumusena valmis kihi kohta);
- Kättesaadavus. Mõnel pool maailmas ei pruugi teatud sideained olla kättesaadavad. Näitena võiks tuua bituumenemulsiooni, mida mõnedes riikides praegu ei toodeta;

- Materjali omadused. Teatud materjalide puhul on mõned sideained paremad kui teised. Näiteks tuleks lupja eelistada tsemendile, kui on tarvis stabiliseerida väga plastseid pinnaseid (plastsusarv > 10);
- Väljakujunenud seisukohad. Paljudel tellijatel on teatud sideainete kasutamise suhtes väga jäigad seisukohad. Tihti põhinevad need eelneval kogemusel.

Sideainete suhtes väljakujunenud seisukohad erinevad riigiti, kuid eriarvamusi on ka tellijatel. Tihti ei põhine need seisukohad aga tehnilistel põhjendustel, vaid väärarusaamadel. Tehnoloogia ei tunne piire; kui katsekriteeriumid ja materjalid on samad, on tugevusnäitajad võrreldavad, olenemata sellest, kus katsed läbi viidi. Seepärast pole mingit põhjust välistada kõikidele asjakohastele tehnilistele nõuetele vastavat sideainet. [8]

Insenerid kipuvad aga olema konservatiivsed. Eesrindliku tehnoloogia kasutamine võib olla riskantne ja üksildane ettevõtmine ning seepärast eelistatakse kasutada teadatud meetodeid. Hüdraulilisi sideaineid ja vähemal määral ka bituumensideaineid on põhjalikult uuritud. Neid kasutatakse laialdaselt ning optimaalsete projektsegude ja kvaliteedinõuete määramiseks on olemas standardsed katsemeetodid. Peale selle kasutatakse nii tsementi kui bituumenit laialdaselt ehituses, mistõttu nad on kättesaadavad peaaegu kõikjal maailmas. Seega pole üllatav, et nad on kõige populaarsemad sideained. [8]

4.1 Hüdraulilised sideained

Pinnaste modifitseerimisel kasutatakse hüdraulilisi sideaineid ja teisi teedeehituses tuntud sideaineid kasutatakse peamiselt katete stabiliseerimisel. Antud töös käsitletakse 3 eri tüüpi sideaineid millel on erinevad omadused ja erinev kasutuse eesmärk.

Hüdraulilised sideained kivinevad kokkupuutel veega – hüdratiseerumisreaktsioonide tagajärjel ning seda nii vees kui õhus, ning säilitab peale kivilinemist oma stabiilsuse ja tugevuse ka vee all. [14]

Kõige levinumateks hüdraulilisteks sideaineteks on lubi, tsement ja nende segud lendtuha, kõrgahjuräbu ja muude putsolaansete materjalidega. Kui välja arvata roomlaste poolt kasutatud lubi, on tsement olnud kasutusel kõige kauem – esimene kirjalik teave tsemendi ametlikust kasutamisest sideainena pärineb aastast 1917 USAs. [8]

Hüdraulilised sideained, mida kasutatakse modifitseerimiseks, on järgmised:

- Tsement
- Lubi
- Lendtuhk (antud töös põlevkivituhk)

Nimetatud sideainete esmane ülesanne on suurendada tugevust. Lisaks sellele reageerib hüdratiseerimisel vabanenud lubi plastsetes pinnastes leiduvate saviosakestega, vähendades nii plastsust. Tsemendi kasutamist tuleks siiski piirata selliste materjalide töötlemisel, mille plastsusarv on väiksem kui 10. Suurema plastsusega materjalide stabiliseerimiseks on parem kasutada lupja. [8]

Saavutatud tugevus sõltub suuresti lisatud sideaine kogusest, kuid ka töödeldava materjali tüübist. Vastupidiselt paljude arvamusele võib tugevuse suurendamiseks lisatav suur sideaine kogus mõjuda kihi käitumisele kahjulikult. Hüdraulilise sideainega töödeldud materjal on habras. Tugevuse suurendamine muudab materjali veelgi hapramaks, mille tulemusel väheneb stabiliseeritud kihi elastsus. See viib omakorda pragude tekkimiseni. Seepärast on oluline, et nõuded stabiliseeritud kihi käitumisomadustele oleksid ühemõttelised ning et täpsete kulunormide määramiseks vajalikud seguprojektid põhineksid katendit iseloomustavatel proovidel. [8]

4.2 Tsement

Tsementi kasutatakse pinnase ja vee koosmõjul moodustunud ühtne mass, mille omadused on sõltuvuses olemasolevast materjalist, lisatava sideaine ning vee kogusest. Eesmärk on muuta sobimatu pinnase omadusi. Tavaliselt kasutatakse portlandtsementi, kuid võib kasutada ka teisi variatsioone tsementidest. Eestis peab tsemendi valikul lähtuma EVS-EN 197-1 kehtivatest nõuetest. Valitud seguretsept peab moodustama ilmastikukindla tööplatvormi ehitusobjektidel ja tugeva, püsiva „vundamendi“ mulde ja teekatendi ehitamisel. Probleemid esinevad eriti peeneteraliste veega üleküllastunud materjalidega (mõllid, savid). Sellised pinnased on üldjuhul pehmed, plastsed ning raskesti tihendatavad. Vajadusel tuleb plastseid pinnaseid kõigepealt lubjaga töödelda, et vähendada nende plastsust ja niiskuse sisaldust. Tsementstabiliseerimist kasutatakse eelkõige kandevõime suurendamiseks ning tihendatavuse ja külmakindluse parandamiseks. Pinnase tsementstabiliseerimise tulemus on tihedalt seotud materjal, mida saab arvesse võtta järgnevate kihtide ehitamisel. Selline kiht on ilmastikukindel ja võimeline vastu võtma liiklusest tingitud jõude üle projekteeritud katendikihtide kestvusaja. [7]

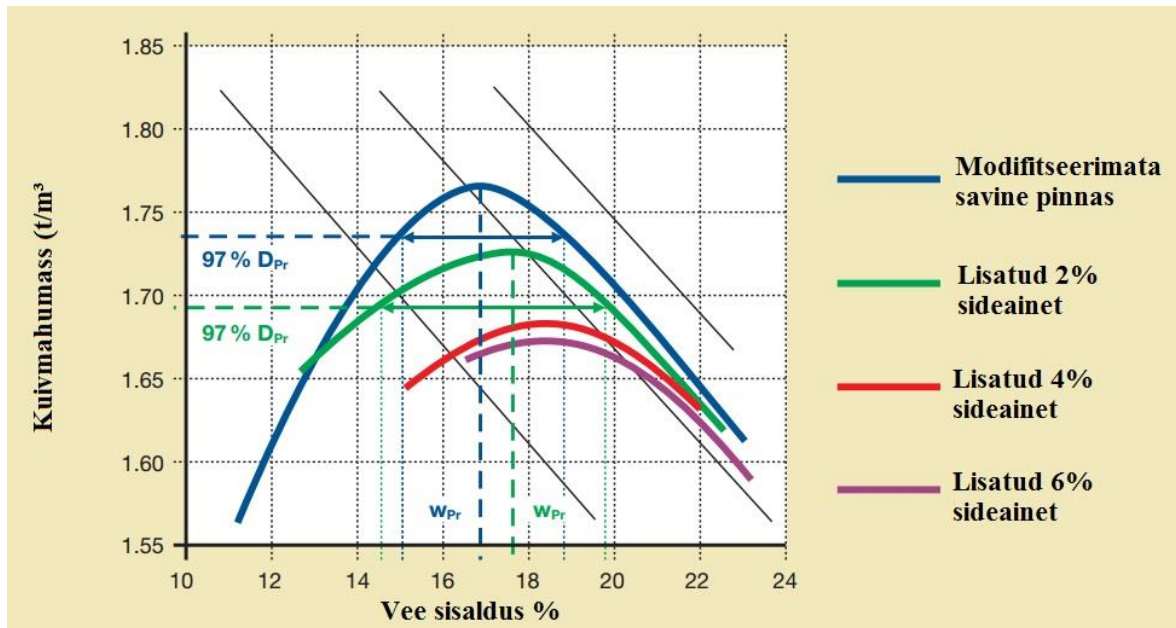
Tsemendiga stabiliseerimine nõuab korralikku projekteerimist. Tsemendi lisamise esmaseks eesmärgiks on suurendada tugevust ning tähtsamaks projekteerimiskriteeriumiks survetugevus. Siiski tuleb peale survetugevuse võtta arvesse ka teisi tegureid, nagu tugevuse suurenemise kiirus, tõmbepinged, pragunemise ja vastupidavuse probleemid. [8]

Tsementi kasutatakse laialdaselt nii pinnaste kui ka aluste stabiliseerimisel. Seda tehnoloogiat on juba aastakümneid kasutatud, kuid tsemendi kõrgete hindade tõttu ei ole see Eestis kruusateede ja pinnase stabiliseerimisel seni eriti suurt kasutust leidnud. Ühtlasi kasutatakse tsementi pehmete pinnastde mass-stabiliseerimisel.

4.3 Lubi

Lubi kokkupuutel veega tekitab leeliselise keskkonna ($\text{pH} > 7$), milles lubi hakkab reageerima iga putsolaanse (ränioksiidi ja alumiiniumoksiidi sisaldav) materjaliga mis on olemasolevas pinnases. Orgaanilise materjali olemasolu vähendab selle keemilise reaktsiooni mõju. Lubja reageerimise pinnasega võib jagada kahte etappi. Esiteks, lubi kuivatab pinnast, liites peened saviosakesed sõmerateks osakesteks. Teiseks, pinnase pH tõuseb üle 12, mille keemiliste reaktsioonide tulemusel hakkavad formeeruma kaltsiumsilikaadid ja aluminaadid. Esimene etapp annab kohese tulemuse, mida võib nimetada pinnase modifitseerimiseks. Kui on pinnasesse segatud optimaalne kogus sideainet, hakkab leeliseline keskkond pärast modifitseerimist tekitama putsolaanseid reaktsioone. Need reaktsioonid on väga aeganõudvad ja võivad kesta veel pikki aastaid. [7]

Pinnase niiskusesisalduse kiire vähenemine lubja ja vee omavaheliste keemiliste reaktsioonide tõttu. Kasutades kustutamata lupja, reageerib vesi koheselt sinna lisatud lubjaga ning eraldab soojust. Vee reageerimisel lubjaga kuivatatakse pinnast. Samuti aitab eksotermiline reaktsioon kaasa liigse vee aurustumisele pinnases. Nende keemiliste protsesside tõttu muutub kustutamata lubi kustutatud lubjaks ning tekib järgnev protsess kus reageerivad (CaOH_2) ja saviosakesed. Need protsessid kuivatavad pinnast veelgi, kuna vähendavad pinnase võimet hoida endas niiskust. Kui kasutada kustutatud lupja või lubja lobri, ilmneb kuivenemine ainult pinnase keemiliste omaduste muutumise tõttu. Joonisel 4.1 on toodud savika pinnase niiskusesisalduse ning kuivmahumassi suhe pärast lubjaga töötlemist. [7]



Joonis 4.1 Savise pinnase niiskusesisalduse ja maksimaalse kuivmahumassi suhe [15]

Lubjaga modifitseerimine aitab pinnase plastsust vähenendada, tihendamist lihtsustada, külmakindlust tõsta ning suurendada tugevust ja stabiilsust pärast tihendamist. Need omadused ilmnevad 1 kuni 48 tunni jooksul pärast lubjaga segamist ning on efektiivsemad pinnastes mille savisisaldus on suhteliselt suur. Pärast esmast segamist stabiliseerijaga hakkavad kaltsiumioonid reageerima saviosakesega. Pinnas muutub sõmeraks ja granulaarseks, mis teeb pinnasel töötamise ning tihendamise kergemaks. Mõnel juhul on see ainus võimalus kuidas saab üldse tehnikaga pinnasele minna. Kui varasemalt on pinnas olnud liigniiske ja selle tihendamine võimatu (joonis 4.2), siis peale lubjaga kuivatamist on materjal jälle tihendatav (joonis 4.2). [7] [16]



Joonis 4.2 Liigniiske pinnas (vasakul) ja lubjaga kuivatatud pinnas (paremal) [16]

Stabiliseerida võib pinnaseid mille savisisaldus ning mineraloogiline koostis on optimaalne, et saada pikaajalist ning püsivat tugevuse kasvu. Tõhus lubistabiliseerimine nõuab täiendavat lubja kogust ja pikemat kivinemisperioodi. Lubjaga stabiliseeritud pinnase omadused muutuvad koheselt ning on tõestatud, et täiendav lubi annab püsiva külmakindluse kasvu ja plastsusarvu vähenemise, mille mõju ei kao ka pikaajaliselt vees leotades. Joonisel 4.3 on näha katsekehad, millest vasakpoolne on lubjaga töödeldud ja parempoolne mitte. Mõlemad katsekehad asetati 1 minutiks vette. Paremalt on katsekehad, mis seisis 8 tundi vees. Pärast modifitseerimise protsessi eralduvad ränioksiidid ja aluminaadid ning lubjas olev kaltsium hakkab nendega reageerima, mis moodustavad kaltsiumsilikaathüdraadi (CSH) ja kaltsiumaluminaathüdraadi (CAH). CSH ja CAH on tsemendilaadsed produktid, mis sarnanevad portlandtsemendiga. CAH ja CAH moodustavad ühtse massi ning sellega panustavad nad lubistabiliseeritud pinnase tugevuse kasvu. Pinnas muutub liivakast, granulaarsest materjalist tugevaks, peaaegu läbimatuks kihiks, mille kandevõime katendikihtide ehitamiseks on piisav. [7]



Joonis 4.3 Katsekehad, mis asetati 1 minutiks vett (vasakul), katsekehad, mis asetati 8 tunniks vette (paremal) [7]

Lubi suudab reageerida pinnastega mille savisisaldus on vähemalt 7 protsenti ning plastsusarv ≥ 10 . Kui pinnases pole piisavalt reaktiivseid ained, võib lubja kombineerida mõne putsolaanse toimega materjaliga (näiteks põlevkivituhk ja tsement). Lisatud putsolaanid reageerivad lubjaga ning moodustavad ühtse tsemendilaadse massi. Õige seguresepti järgi on võimalik stabiliseerida väga erinevaid pinnaseid, kuid enamasti kasutatakse seda madala plastsusega pinnaste jaoks. [7]

Kokkuvõtteks võib öelda, et lubi sobib väga hästi platsete pinnastega, nagu näiteks: moreen ja savi, kuivatamiseks, et neid oleks võimalik tihendada ja seeläbi saavutavad sellised materjalid juba vajaliku kandevõime, et seal peal oleks võimalik sõita tehnikaga ning ehitada peale uusi kihte.

4.4 Lendtuhk

Antud töös käsitletakse lendtuhana põlevkivituhka. Põlevkivituhha sideainelistest omadustest oli piemalt juttu varasemas peatükis. Põlevkivituhk on pinnase stabiliseerimiseks väga hea materjal, sest selle omadused sarnanevad nii tsemendi kui ka lubjaga. CFB tuhk on oma omadustelt hästi sarnane tsemendiga, andes pinnasele vajaliku kandevõime kuid samas omab väga häid kuivatamise omadusi nagu lubi.

Kuna autori eelmises lõputöös tuli välja, et stabiliseeritud materjal on vähem niiskustundlik, nagu näha joonisel 4.4, ja kandevõime numbrid lubasid teha järeltõus, et selline tehnoloogia võib toimida edukalt kruusa ja metsateede stabiliseerimisel, sai katselõigu idee välja pakutud Riigimetsa Majandamise Keskusele, kes oli nõus antud tehnoloogiat katsetama.



Joonis 4.4 Põlevkivituhaga töödeldud katsekeha vasakul ja töötlemata katsekeha paremal asetatuna vette [erakogu]

4.4.1 Põlevkivituhaga stabiliseerimise ajaloo

Põlevkivituhaga stabiliseerimist alustati 1961. aastal. Väidetavalt oli esimeseks objektiks 0,5 km pikkune teelõik Saarel, Jõhvi-Tartu-Valga maanteel, mida ehitas TEV-3 ja mis 1970-ndate keskel kaeti mustkatte kihiga. Massiliselt alustati põlevkivituhaga stabiliseeritud teekatete ja -aluste ehitamisega 1970-ndate aastate algul. Tõuke sellele andis Balti ja Eesti Soojuselektrijaamade käikuandmine, kus elektritootmise tööstusjäätisena tekkis üle 6 miljoni tonni põlevkivilendtuhka aastas. Aastatel 1971-1986 kasutati põlevkivilendtuhka 100-120 tuhat tonni aastas ja ehitati selle aja jooksul ligi 1000 km põlevkivituhaga stabiliseeritud katteid, mis on säilinud tänaseni. [17]

Toona puudusid stabiliseerimisel kindlad tehnoloogiad ja masinad, millega antud töid teha. Probleemideks oli tuha doseerimine ja segamine, kuna vajalikke masinaid ja

seadmieid ei olnud lihtsalt võtta. Sellest tingituna ei olnud stabiliseeritud segud homogeenised ja tuha jagunemine tee ristlõikes oli erinev. [17]

Alates 1990-ndate aastate keskpaigast on Eestis hakatud teostama asfaltbetoon- ja mustkatete renoveerimistöid. Algselt teostasid teekatte taastustöid Soome ehitusettevõtted, seda peamiselt kahel põhjusel. Esiteks polnud Eesti ehitusettevõtetel piisavalt kogemusi ja spetsialiste antud tööde teostamiseks. Teiseks põhjuseks olid puudulikud ehitus- ja projekteerimisjuhendid stabiliseerimistöödeks. [6]

1996. aastal võeti kasutusele stabiliseeritud katendikihtide ehitamise juhend, mis tugines põhjamaade juhenditele ja normidele. Järgmisel aastal ka stabiliseeritud katendikihtide projekteerimisjuhend. [6]

2010. aastal algatati OSAMAT projekt, mille eesmärk oli katsetada põlevkivituhka teede ehitusmaterjalina looduslikes tingimustes kahes pilootlõigus kaasaegsete teedeehitustehnoloogiate abil. Projekti tulemused on sisendandmed taaskasutatavate materjalide turgudel tuha edendamiseks ning standardiseerimiseks kohalikul ja Euroopa tasemel. OSAMAT projekti koordinaatoriks oli Eesti Energia AS. Partneritena osalesid projektis Eesti Energia tütarettevõtte EE Narva Elektri jaamad ja ehitusfirma Nordecon AS. Projekti kaasfinantseerijaks oli Eesti Maanteeamet. Põlevkivituhka katsetati kahe pilootlõigu ehitamisel kahe erineva ehitustehnoloogia järgi: tee ülemise kihi stabiliseerimisel (NarvaMustajõe pilootlõik) ja turba mass-stabiliseerimisel Simuna-Vaiatu pilootlõigul. [18]

OSAMAT projekti raames tehti teiste seas järgnevad järeldused: [18]

- CFB tuhal on kõrge kasutuspotentsiaal EVS-EN 16907 (pinnase modifitseerimine) ja EVS-EN 14227 (pinnase stabiliseerimine) kasutusvaldkondades. Tuhk asetseb oma omadustelt tsemendi ja lubja vahepeal.
- hea ettevalmistuse ja sobiliku segu koostise korral oleks võimalik CFB tuhka kasutada ka (madalaklassiliste) teede aluste stabiliseerimisel (ehk standardi EVS-EN 13286 või EVS 925 valdkond), kuid vastavad tingimused tuleb veel välja töötada.

Teisisõnu tähendab eelnev seda, et uue tüübi põlevkivituhkadega saaks edukalt parandada objektile olemasolevate pinnaste omadusi, mis ei taga vajaminevat kandevõimet pealmise teekonstruktsiooni ehitamisel või mis on külmakartlikud. Nimelt saab modifitseerimise ja stabiliseerimisega vähendada savikate liivade ja kruusade (moreenide) vee- ja külmatundlikkust, mis on väga heaks ja majanduslikult

otstarbekaks võimaluseks kruusateede remontimisel, samuti uute madalamaklassiliste teede ehitusel – meetodikat saab rakendada LIFE+OSAMAT projekti tehniline järelmonitooring II 2020.a. 60 RailBaltica hooldusteede, kagupiiri teede, metsateede jm. taoliste infrastruktuuriobjektide ehitamisel, aga ka riigiteede osas. [18]

Simuna-Vaiatu teelõigu põhjal saab järeldada, et keevkihikatelde tuhad sobivad edukalt madalamaklassiliste teede seisukorra parandamisel. Nii tihendatud kui massstabiliseeritud turba lõikudel toimus CFB tuhaga stabiliseeritud alus paremini, kui tavapärane kompleksstabiliseeritud alus. [18]

Varasemad uuringud, mis on tehtud põlevkivituha sobilikuse väljaselgitamiseks stabiliseerimises, on andnud piisavalt infot, et antud tehnoloogiat võiks laialdasemalt kasutada kruusa- ja metsateede stabiliseerimisel. Joonisel 4.5 on näha kui hästi on vastu pidanud tuhkstabiliseeritud kate. Katsekeha on välja puuritud 2005. aastal Harku-Rannamõisa teelt nr 11191. Visuaalselt meenutab väljapuuritud katsekeha betooni proovikeha, kuna pole üldse pragunenud ja on väga hästi säilinud, kuigi 2004. aasta liiklusloenduse andmete põhjal on keskmine liiklussagedus 3540 autot ööpäevas. Küllaltki palju liigub antud teelõigul ka raskeveokeid. Tänu suhteliselt paksule tuhkkattele on kogu konstruktsioon hästi vastu pidanud. Tugeva tuhkkatte eeliseks on siin olnud ka see, et katte pinnal ei ole tekkinud roobast. [17]



Joonis 4.4 Harku-Rannamõisa teelt välja puuritud katsekehad [17]

Antud objekti projektdokumentatsioonist võib lugeda, et stabiliseerimisel pidi kasutatama tehiskruusa (60% Padise sõelmeid ja 40% Padise killustikku).

Põlevkivituhka oli ette nähtud kasutada 20%. Tuhkkatte kaitsmiseks oli ette nähtud katmine põlevkiviõliga ja seejärel pindamine paekillustikuga ning teine kord mustkillustikuga. Puurkehade vaatlusel selgub, et tuhkkatte paksuseks on 130-160 mm ja pindamiskihtide paksuseks on 25-30 mm. Puurimispinna järgi paistab, et stabiliseerimisel on tõesti kasutatud sõelmeid ja killustikku. Parempoolsel puurkehal on pindamiskiht tugevasti kinni tuhkkatte küljes, teistel nake tuhkkatte ja pindamiskihi vahel puudub, mis on probleemiks enamustel tuhkkatetel. Puurkehad jäid kõik puurimisel terveks ja see võimaldas määrata kahest tuhkkatte puurkehast ka survetugevuse. Survetugevuse määramiseks saeti puurkehad 100 mm pikkusteks katsekehadeks. Ühe proovikeha survetugevus oli 18,7 MPa ja teisel 22,9 MPa ning kahe proovikeha keskmine 20,8 MPa. [17]

Sellise tehnoloogiaga saaks viia olemasolevad kruusateed mustkatte alla ja uuringute tulemused lubavad teha oletusi, et need peavad liikluskoormusele edukalt vastu.

5. RMK KATSELÕIK

Autori bakalaureuse töö laboratoorsed katsed näitasid põlevkivituha suurt potsntsiaali kruusateede stabiliseerimiseks ja sellise tehnoloogia katsetusest oli huvitatud Riigimetsa Majandamise Keskus.

Käesoleva töö eesmärgiks oli välja selgitada sideaine lisamise mõju metsateede kandevõimele. Esimeses etapis sai välja selgitatud laboratoorsete katsetega võimalikud parimad lahendused ja teises etapis kasutati saadud tulemusi katselõikude pinnaste stabiliseerimiseks.

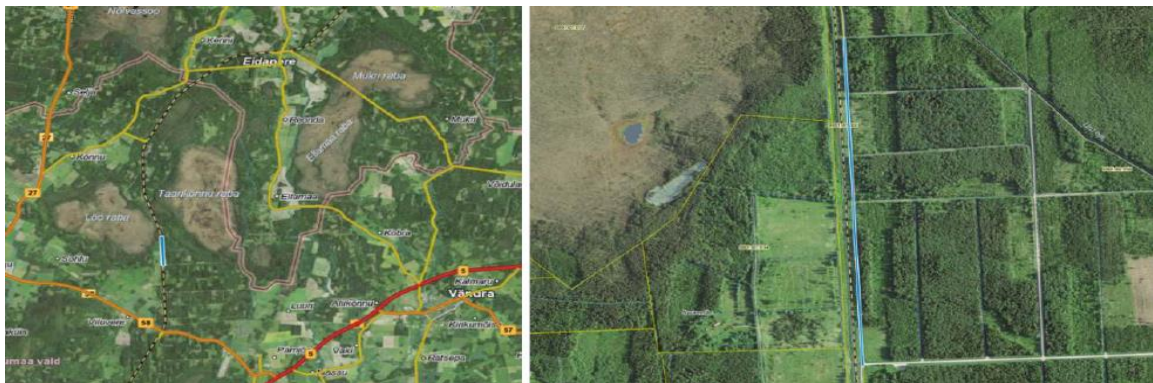
Pinnaseproovid sai võetud kolmelt erinevalt teelõigult, kuid ehitusse läks neist üks. Tööd teostati küll kahel erineval, kuid kõrvuti asetseval teelõigul, millest üks oli liivase- ja teine suurema orgaanikasisaldusega pinnas. Teadaolevalt on see esimene selline uuring, kus metsateede kandevõimet soovitakse tõsta sideaine lisamisega.

Uuringu tulemusena soovitakse saavutada võimalikult väikeste ehitus- ja korrashoiu kuludega metsateede kasutamine raskeveokitele.

5.1 Üldosa

Remonditööde eesmärk oli metsatee nr 9300538 Taarikõnnu tee ja metsatee nr 9300506 Rahigu tee põlevkivituha stabiliseeritud katselõigu ehitamine.

Taarikõnnu tee, riiklik number 9300538, Pikkus 1,829 km, Pärnu maakond; (joonis 5.1). Tööd sooritati km 0,0 – 1,26 (1260 m), teelõigu lõppu rajati ümberpööramise koht. Rahingu teel (riiklik number 9300506), mis on Taarikõnnu teega paralleelne tee (joonis 5.2), teostati töid 600 m teelõigul, mis jääb märgistatud punaste markeeringute vahemikku.



Joonis 5.1 Taarikõnnu tee asukohaskeem [erakogu]



Joonis 5.2 Rahingu tee asukohaskeem [erakogu]

Algselt oli plaanis ehitada katselõigud Taarikõnnu teele, Viira teele ja Võru metsasihile, mille osas teostati uuringud ja koostati teetööde tehnilised kirjeldused, kuid tellija ehk RMK plaanid seoses raietöödega muutusid ning aastal 2020 ehitati katselõigud Taarikõnnu teele ning Viira tee asemel Rahingu teele. Viimase osas puudusid varasemad uuringuandmed, mistõttu kasutati seal ehituse ajal sama lähenemist ja nõudeid (sh põlevkivituha kogus) kui Taarikõnnu teel.

5.2 Proovivõtt

Kõigilt kolmelt objektilt sai võetud pinnaseproovid, mõõdetud olemasolevat kandevõimet ja sooritatud löök penetratsiooni katse.

5.2.1 Taarikõnnu tee

Taarikõnnu tee oli oma olemuselt pinnasteel, nagu näha jooniselt 5.3. Pinnas, millest tee oli ehitatud, pärines külgekraavidest, mille seisukord hetkel oli hea, kuna neid oli hiljuti puhastatud (joonis 5.3). Kraavi kaevates on pinnas tõstetud kraavi kõrvale ja hiljem on seda hakatud kasutama teena. Pinnas on tõstetud olemasoleva huumuse ja metsakõdu peale, see tähendab, et tee alt ei ole kooritud ära kasvupinnast. Seega on terve tee ulatuses mineraalse kihi all, mis on nõrga kandevõimega metsakõdu kiht, mida saaks stabiliseerida. Kuna kraavist tunud mineraalne materjal oli ka segi kaevatud orgaanilise materjaliga, esines visuaalselt küllaltki palju orgaanikat. Kandevõime mõõtmiseks eemaldati tee peal kasvav murukamar, mis kohati oli kuni 10 cm paks. Kandevõime mõõtmiseks kasutati seadet Dynatest LWD (joonis 5.3).



Joonis 5.3 Olemasolev pinnastee (vasakul), puhastatud kraavid (keskel), kandevõime mõõtmine Dynatest LWD'ga (paremal) [erakogu]

Lisaks kandevõimele sai tehtud pinnase penetratsiooni katse (joonis 5.4), et saada aimu millise tihedusega kihid on tee all. Penetratsiooni katset tehes sai selgelt eristatud mineraalse ja orgaanilise pinnase kihid. Pinnaseproove võttes oli näha, et murukamara all oli 5...20cm mineraalset pinnast, mis oli omaorda segunenud kaevamise käigus kraavi kohal olnud orgaanilise pinnasega (joonis 5.4).



Joonis 5.4 Pinnase penetratsiooni katse (vasakul), läbilõige teekonstruktsioonist (paremal) [erakogu]

Taarikõnnu teel sai võetud kahest erinevast kohast pinnaseproov laboratoorseks katsetamiseks. Proovi võtmiseks eemaldati murukamar ja huumus, mis olid tekkinud mineraalse kihi peale. Jooniselt 5.5 näeb, et mõlemad pinnaseproovid sisaldasid ka huumust, mis oli sinna sattunud kraavide kaevamise käigus. Mineraalse kihi all oli rohkelt metsakõdu ja huumust.



Joonis 5.5 Teelt võetud pinnaseproovid [erakogu]

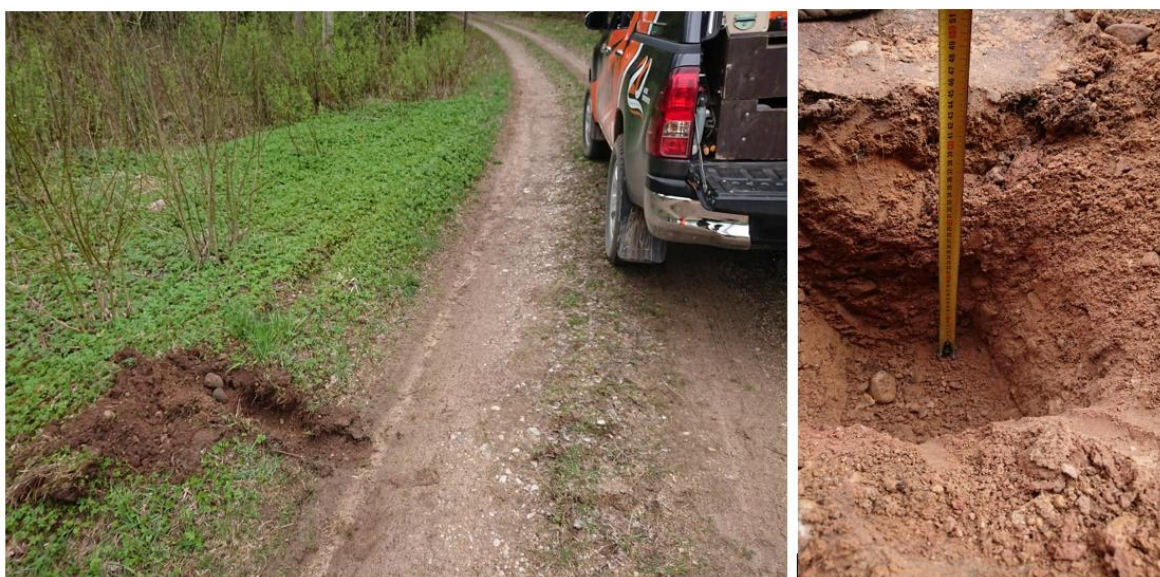
5.2.2 Viira tee

Järgmine teelõik asus Viljandimaal ja kandis nimetust Viira tee, mille riiklik number on: 3600027, pikkus 1 km, Viljandi - Kilingi-Nõmme maantee poolne ots. Antud juhul oli tegemist kruusateega, mille seisukord oli tegelikult rahuldav. Vähesel liikluskoormusel oli küll tee keskel ja servades hakanud kasvama murukamar, kuid sõidujäljes oli näha kruusa (joonis 5.6). Vähesel hooldusel tulemusena oli tekkinud tee servadesse vallid, mis takistavad vee pääsemist kattel maha ja seetõttu esines kohati lompe (joonis 5.6).



Joonis 5.6 vaade Viira teele (vasakul), servavallide tõttu teele tekkinud lombid (paremal)
[erakogu]

Servavalle kaevates selgus, et murukamara all oli kruusakiht, mis oli katte pealt servadesse sõidetud ja mida oleks saanud hõõveldamisega teele tagasi kanda (joonis 5.7). Teelt mõõdetud kandevõimed olid ka rahuldavad, ainult mõni üksik punkt oli liigniiskuse tõttu madala kandevõimega. Penetratsioonikatset teest ei olnud võimalik teha, sest kruusakihi kiht oli niivõrd tugev, et penetromeeter ei suutnud sisse tungida. Pinnaseproovi võttes selgus, et olemasoleva tee kruusakihi paksus on üle 40 cm (joonis 5.7).



Joonis 5.7 Servavalli sõidetud kruus murukamara all (vasakul), läbilõige teest (paremal)
[erakogu]

Seoses RMK raietööde plaani muutusega veeti metsamaterjal välja mööda olemasolevat teed ja selle teelõigu stabiliseerimise plaan jäi ära. Vaadates andmeid, mis antud teelõigul kogutud sai, oleks saanud teelõigu korda hõõvliga profiili parandades ja servavalli eemaldades ning antud teelõigu stabiliseerimine ei olekski olnud vajalik. Sellise teelõigu stabiliseerimist tasuks kaaluda kui oleks plaan ehitada sinna peale mustkate.

5.2.3 Võru maakonna metsasiht

Viimane teelõik oli Võru maakonna metsasiht (Metsasiht SP094/SP095, pikkus 0,6 km. Antud asukohas tee puudus. Oli ainult metsasiht, mis asus paralleelselt kõrgepingeliiniga ja seega kasvas seal väike võsa ja hein (joonis 5.8). Pinnaseproovi

võttes oli näha, et murukamara all oli liiv, nagu võis asukoha põhjal ka eeldada (joonis 5.8).



Joonis 5.8 Vaade metsasihile (vasakul), sihilt võetud pinnaseproov (paremal) [erakogu]

Antud katselõik oligi valitud liivpinnasesse, et näha kuidas pinnase stabiliseerimise abiga on võimalik liivpinnas sõidetavaks muuta, sest Lõuna-Eestis on RMK-l väga palju liivpinnasega teid. Kuna metsasihi maastik oli muutuva reljeefiga, nagu Lõuna-Eestis esineb, siis oleks tulnud lisaks stabiliseerimistöödele teha veel ulatuslikult pinnasetöid, seega loobuti ka antud lõigust.

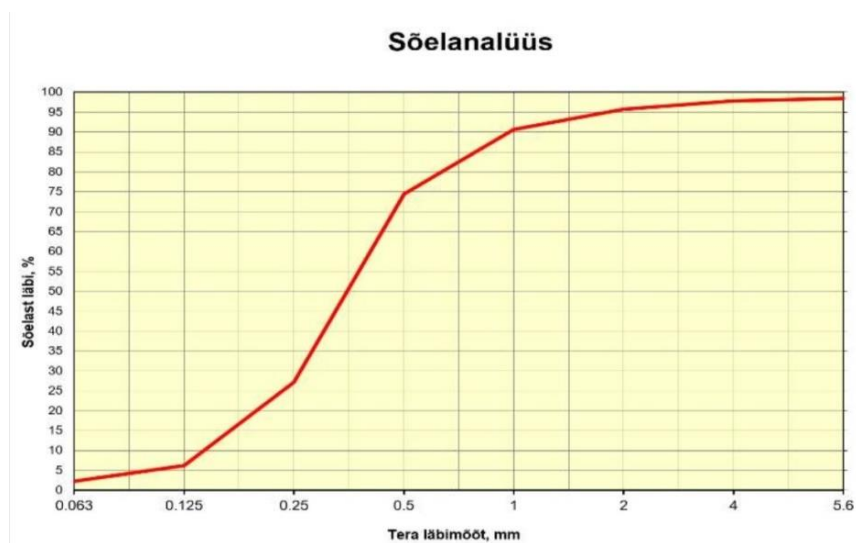
5.3 Laboratoorsed katsed

Taarikõnnu ja Viira teelt ning Võru metsasihilt võeti pinnaseproovid, mida katsetati laboris, et teha kindlaks pinnase omadused ja leida sobilik seguresept. Laboris tehti järgmised katsed:

- optimaalse veesisalduse ja maksimaalse tiheduse leidmine standardse Proctorteimiga (EVS-EN 13286-2)
- ICC (initial consumption of cement) ehk minimaalse vajamine hüdraulilise sideaine koguse määramine kasutades pH mõõtmisi;
- orgaanikasisaldus kuumutuskao meetodil (EVS-EN 1744-1);
- terastikulise koostise määramine (EVS-EN 933-1);
- põlevkivituhaga segatud pinnase survetugevuse määramine (EVS-EN 13286-41).

Kuna eelnevalt uuritud teedest ehitati valmis vaid Taarikõnnu tee, siis alljärgnevalt käsitletakse täpsemalt vaid selle tulemusi.

Taarikõnnu teel oli vahelduva paksusega (5...20 cm) tee kattekiht ühtlaseterine (Cu \approx 3) suhteliselt madala peenosisesisaldusega (0,063 mm < 5%) keskliiv (terakoostis joonisel 5.9). Liivakihi peal oli läbikasvanud taimestiku kiht, mis eemaldati enne stabiliseerimise töid. Pealmise taimestiku eemaldamis0074 vähenes liivakihi paksus kohati selliselt, et olemasolevaks pinnaseks jäigi alles vaid metsakõdu kiht (joonis 5.10).



Joonis 5.9 Pinnase sõelkõver [erakogu]



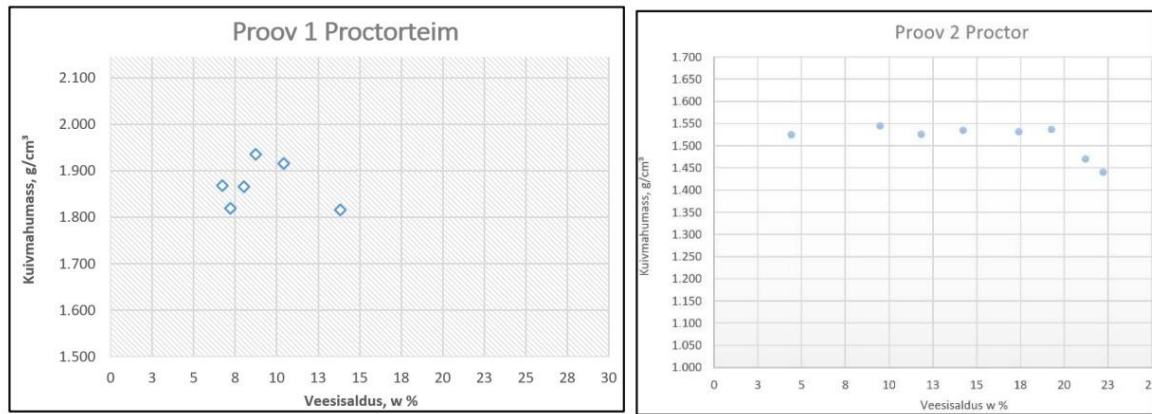
Joonis 5.10 Taimestikust läbikasvanud pealmise kihi koorimine peale mida jäi kohati alles vaid metsakõdu kiht [erakogu]

Taarikõnnu teelt võeti katsetamiseks kaks proovi: üks suurema metsakõdu sisaldusega ja teine väiksemaga. Proovi 1 orgaanikasisaldus kuumutuskaotusmeetodil oli 3,5% ja proovil 2 5,0% ehk tegemist oli vähese orgaanilise aine sisaldusega pinnasega. Katsed siiski ei arvestanud seda, et kohati oli liiva osakaal teekattes väiksem, mis selgus peale taimestikuga läbikasvanud kihi eemaldamist. Proov 1 ja 2 on enne ja pärast kuumutuskaotus testi läbiviimist kujutatud fotodel 5.11.



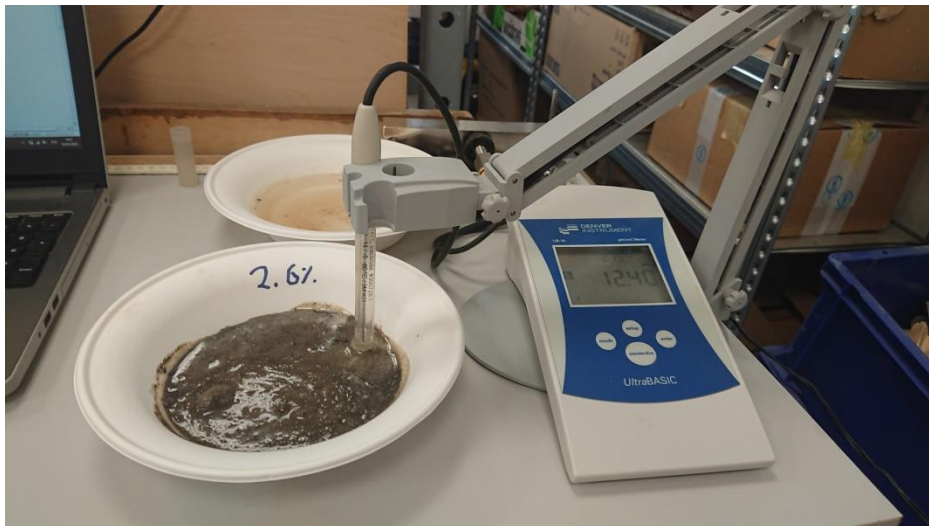
Foto 5.11 Proovid 1 ja 2 enne (vasakul) ja pärast (paremal) kuumutuskaotus määramist: orgaanikasisaldused olid proovidel vastavalt 3,5 ja 5,0% [erakogu]

Standardse Proctorteimi graafikud on kujutatud joonisel 5.12, mille järgi oli proovi 1 optimaalne veesisaldus 8,7% ja maksimaalne kuivmahumass 1,94 Mg/m³. Proovi 2 tulemused on tugevalt mõjutatud orgaanilise aine sisaldusest ja Proctori graafikult ei joonistu välja selget optimaalset veesisaldust. Proovi 2 maksimaalne kuivmahumass oli umbes 1,53 Mg/m³.

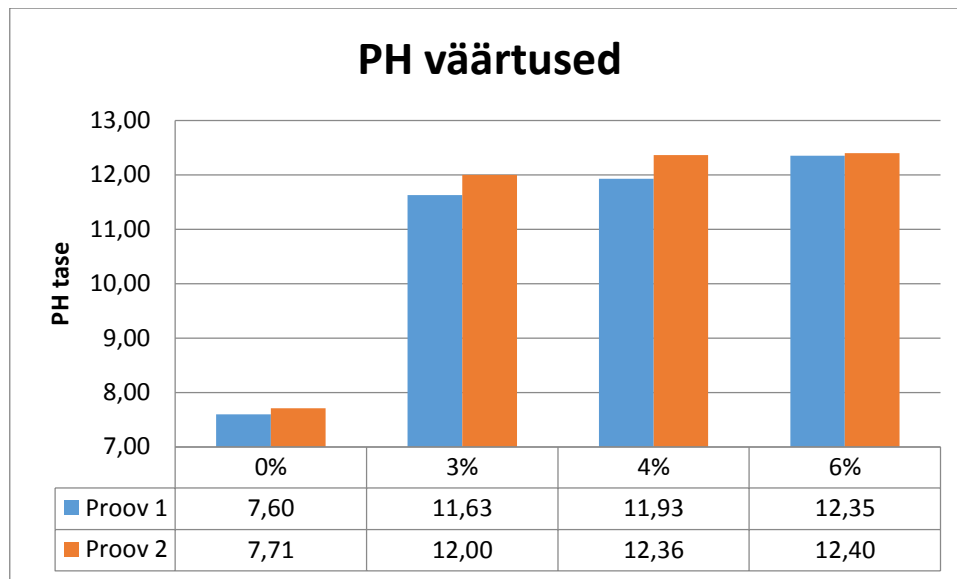


Joonis 5.12 Proctor graafikud [erakogu]

Järgmiseks segati pinnas põlevkivituhaga ja määrati minimaalne hüdraulilise sideaine kogus põhinedes pH väärtusele. ICC (initial consumption of cement) on test, millega määratakse see sideainekogus, mis tagab pH 12,40 peale ühte tundi pinnase ja sideaine omavahelist segamist (BS 1924: part 2). Taoline pH tagab hüdrauliliste sidemete ajas püsivuse. Testi jaoks segatakse 200 g pinnast koos erinevate sideainekogustega ning veega (vett nii palju, et segu oleks kergelt üleküllastatud). Ühe tunni jooksul mõõdetakse segu pH taset (joonis 5.13), mille väärtused on näidatud joonisel 5.14. [19]



Joonis 5.13 PH taseme mõõtmine pinnaseproovi vesilahusest [erakogu]



Joonis 5.14 Pinnaseproovi PH väärtuste muutumine põlevkivi tuha koguse muutumisel

PH taseme määramine näitas, et proovikehasid peaks valmistama 4% ja 6% sideaine sisaldusega. Proovikehad valmistati standardse Proctoriga, ehk proovikeha läbimõõt oli 100mm ja kõrgus 120mm. Proovikehad tihendati kolmes osas ja seejärel pandi kuivama. Proovikehad hoiustati $+20\pm 5^\circ$ ja $90\pm 5\%$ suhtelise õhuniiskuse tingimustes. Segu veesisaldusena kasutati 11%, mis tagant järele vaadates oli liiga kõrge ja tegelikkuses oleks pidanud kasutama väiksemat väärtust.

Proovi nr 2 pinnasega segatud 4% põlevkivituhaga saadi 7p survetugevuseks (joonis 5.15) 0,19 MPa ja 6% 0,28 MPa, mis on mõlemad ebapiisavad (eesmärk oli minimaalselt 0,5 MPa, ideaalis 1,0 MPa). Varasemalt oli üks katseeria ebaõnnestunud, kuna kasutati ekslikult liiga suurt lisatava vee kogust ja seetõttu ei jagunud enam pinnast, et teha täiendavaid katseid veel suurema põlevkivituha sisaldusega. Seega andmed ekstrapoleeriti selliselt, et töömaal kasutamiseks ja teetööde tehnilise kirjelduse koostamiseks valiti lisatava põlevkivituha koguseks 8%, mis oli kasutatava stabiliseerimistehnoloogia ja segatava kihipaksuse korral praktiline ülemine piir.

Nimelt, esiteks võeti proovide 1 ja 2 maksimaalsete kuivmahumasside keskmine saades 1750 Mg/m³. Segatavaks kihipaksuseks valiti 25 cm. Sellest tulenevalt 8% põlevkivituhka on 35 kg/m², mis tuli pinnasega segada kahekordse segamisega, s.t ühe segamisega oli tuha kogus 17,5 kg/m² (stabiliseerimise freesiga on praktiline segamise piir ca 20 kg/m²).



Joonis 5.15 survetugevustesti sooritamine [erakogu]

5.4 Katselõigu ehitamine

Katselõigu ehitamine algas ettevalmistustöödega, milleks oli ehituseks sobimatu pinnase eemaldamine. Tee peal olnud murukamar eemaldati ja planeeriti tee kõrvale. Joonisel 5.16 on näha ettevalmistatud lõik, millelt on eemaldatud sobimatu pinnas ehk murukamar. Kui murukamar oli eemaldatud, siis pind profileeriti. Näha on ka, et stabiliseeritavas pinnas on näha suure huumuse sisaldusega kohti. Ühtlasi eemaldati ka teest välja ulatuvad kivid, mis takistavad segamisfreezi tööd. Teelõigu lõppu rajati kruusast tagasipööramise koht (joonis5.16). Sellega ka lõppesid ettevalmistustööd.



Joonis 5.16 murukaar on eemaldatud ja pind profileeritud (vasakul), kruusast tagasipöördekoht (paremal) [erakogu]

Stabiliseerimistööd algasid 18. augustil. Esimese tööna laotati tsemendilaoturiga (joonis 5.17) teele esimene kiht sideainet, milleks oli põlevkivi keevkihiklatla elektrifiltrituhk CFB. Sideaine kogus oli 35 kg/m^2 mida laotati kahes võrdses jaos. Seejärel segati stabilisaatoriga (joonis 5.17) esimese käiguga kuivalt ja teise käiguga koos vee lisamisega. Segamise käigus tuli pinnasest välja hulganisti kive, mis lõhkusid

freesi terasid ja jääd „kaasa sõitma“ segamisfreesi kolu sisse, seetõttu tuli need eemaldada käsitsi (joonis 5.18). Freesi järes sõitis pinnaserull, mis tihendas läbi segatud pinnase ära.



Joonis 5.17 Põlevkivituha laotamine tsemendilaoturiga (vasakul), stabiliseerimisfreesiga segamine (paremal) [erakogu]

Sisuliselt määras töö tegemise tempo põlevkivituha laotamine koos punkri täitmisega (joonis 5.18). Üks punkritäis võttis aega ca tund. Teiseks kulutasid pinnases olevad kivid stabilisaatori terasid, mistõttu tuli teha terade seisukorra kontroll ja kulunud terade vahetus peale iga paani läbimist (joonis 5.18). Terade vahetuseks võis kuluda olenevalt terade seisukorrast kuni 1 tund.

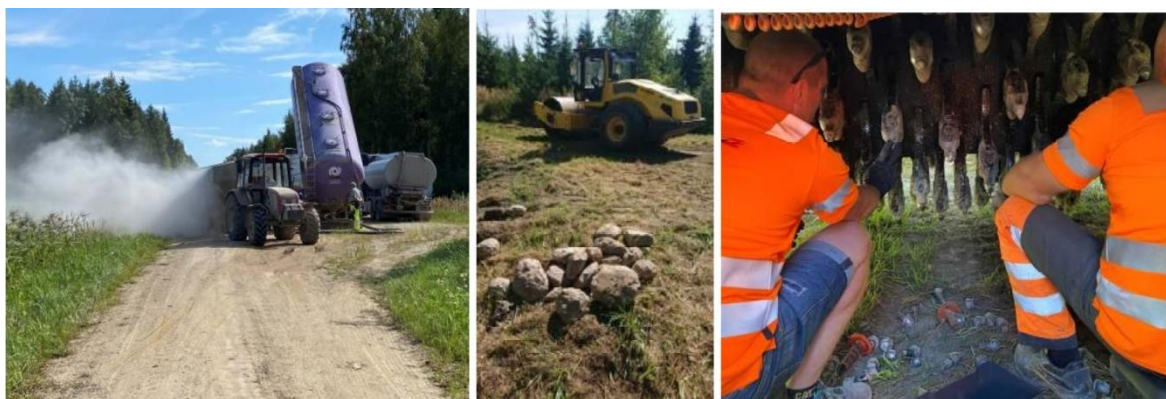


Foto 5.18 Tsemendi laoturi täitmine põlevkivituha (vasakul), freesi kolust eemaldatud kivid (keskel), freesi terade vahetamine (paremal) [erakogu]

Põlevkivituha kulus Rahingu teele kokku 87,28 tonni ja Taarikõnnu teele 204,26 tonni, mis on, arvestades tee laiusiks 4,5 m, vastavalt 32,3 kg/m² ja 37,8 kg/m². Rahingu teel olevaks pinnaseks oli moreen, mille kuivmahumassiks võib hinnata ca 2,0 Mg/m³, millele vastavalt oli lisatud põlevkivituha kogus ca 6,5%. Taarikõnnu tee pinnase kuivmahumassiks võib seoses orgaanikasisaldusega hinnata ca 1,6 Mg/m³, mis teeb lisatud põlevkivituha koguseks ca 9,4%.

Peale esimest segamist ja tihendamist laotas tsemendilaotur uue kihi põlevkivituhka. Teine segamine toimus märjalt ehk frees lisas segamise ajal segusse ka vett. Vee segamisel ilmnisid mõned probleemid.

Esimene probleem oli, et ei olnud teada olemasoleva pinnase hetkeline looduslik veesisaldus, see tegi omakorda raskeks otsuse, kui palju vett on vaja segusse lisada. Segamist alustati 7% veega, aga nagu kiirelt selgus, oli vee kogus liiga suur ja tihendades jäi vesi pinnase peale. Vett vähendati 4% ja hiljem 3,5% peale ning see osutus visuaalselt ja „tunnetuslikult“ sobilikuks. Tulevikus peaks kindlasti töövõtja määrama kohapeal pinnase loodusliku veesisalduse, et saaks järgida täpselt seguretsepti.

Autori hinnangul tuleks kasutada väiksemat veesisaldust kui on katseline optimaalne vee sisaldus, sest väga väike kogus üle optimaalse piiri muudab olukorra objektil tunduvalt halvemaks. Kui pinnas on liigniiske, siis selle tihendamine ei ole võimalik ja see kaotab ka kandevõime, eriti juhul kui vee kogus on selliselt ületatud, et tihendades jääb pinnase peale vee kiht. Pigem tuleks eelistada umbes 75-90% optimaalsest veesisaldusest ja selle võrra rohkem tihendada, ehk teha rulliga mõned läbikud rohkem. Tulemus on kindlasti parem kui juhul mil ületada optimaalse veesisalduse piiri.

Teine probleem oli seotud vee transpordiga. Kuna tavaliselt stabiliseeritakse katteid mille peal on võimalik veoautoga sõita, siis kasutatakse vee transpordiks tavalisi veoautosid, millel ei ole erilisi maastikusõiduki omadusi. Kuna antud projekti puhul oli stabiliseeritud pinnas tavaliste veoautodega sõitmiseks liiga sõmer, pidi frees veoautot enda järgi vedama ja kohati muutus see nii raskeks, et ka frees hakkas kinni jääma. Eriti problemaatiline oli veeautode vahetamine kui ühel sai vesi otsa ja pidi tulema järgmine auto. Vahetuse ajaks jäi fees seisma, kuid uue täis tsisterniga raske auto veerema tõmbamine oli nii raske, et see võttis isegi freesil rattad all ringi käima. Sellega ilmnis järgmine probleem. Kuna masina automaatika, mis doseerib vett, saab infot masina liikumise kiiruse kohta ratastelt, kuid masina rattad käisid veeautot tõmmates kohapeal ringi, sai segamisfrees ekslikult infot, et masin justkui liiguks. Selle eksliku infoga doseeris segamisfrees vett juurde sellises mahus, et tavaliselt liikudes sattus ühe koha peale liiga palju vett ja tekkis üks masina laiune ja paari meetri pikkune ala kus pinnas oli liigniiske ja kaotas kandevõime. See ala muutus nii märjaks, et selle peale ei olnud sama päev enam võimalik ühegi masinaga sõita. Kui tingimata on vajalik vee lisamine, siis tulevikus võiks kaaluda traktori kasutamist sellistel teedel, kus veoautodega sõitmine on raskendatud.

Järgmine probleem oli seotud tee profileerimisega. Autori bakalaureuse töö tulemusena tuli välja, et tee profileerimine ja tihendamine peab toimuma 2 tundi peale segamist, sest põlevkivituhal on väga kiire tardumisaja algus, ning hilisemal materjali liigutamisel lõhutakse ära sidemed mis on jõudnud juba tekkida ja kandevõimes toimub langus. Antud töö käigus seda nõuet ei täidetud, sest töövõtjal läks greider katki ja alles järgmise päeva hommikuks sai asendusgreideri. Autori bakalaureuse töö katse näitas, et peale 3 tundi segamist langes katsekehade kandevõime 40% võrreldes sellega kui oli segatud 2 tunni möödudes. Kuna rull sai stabiliseeritud pinna ära tihendada, siis stabiliseeritud kihi alumist osa enam hiljem profileerimise käigus ei liigutatud ja sellega ilmselt probleeme ei ole. Probleemaatiline on ülemine kiht, ehk umbes 5cm paksune kiht, mida greider hiljem profileerimiseks liigutas. See ilmselt tõi kaasa selle, et stabiliseeritud kihi ülemine osa omas vähem sidemeid ja seega on justkui lahtiselt stabiliseeritud kihi peal.

Selline katselõik tõi välja problemaatilised kohad mida tuleb parandada ja arvesse võtta järmistel stabiliseerimistel.

5.5 Järelmonitooring

Järelmonitooring hõlmas stabiliseeritud segu laboratoorset katsetamist ja objektil kandevõime mõõtmist ning sisaldas järgmisi toiminguid:

- Objektilt seguproovide võtmine;
- Seguproovi veesisalduse määramine;
- Proovikehade valmistamine;
- 7 ja 28 päeva survetugevuse määramine;
- 1, 3, 7, 28 ja 56 päeva kandevõime mõõtmine objektil.

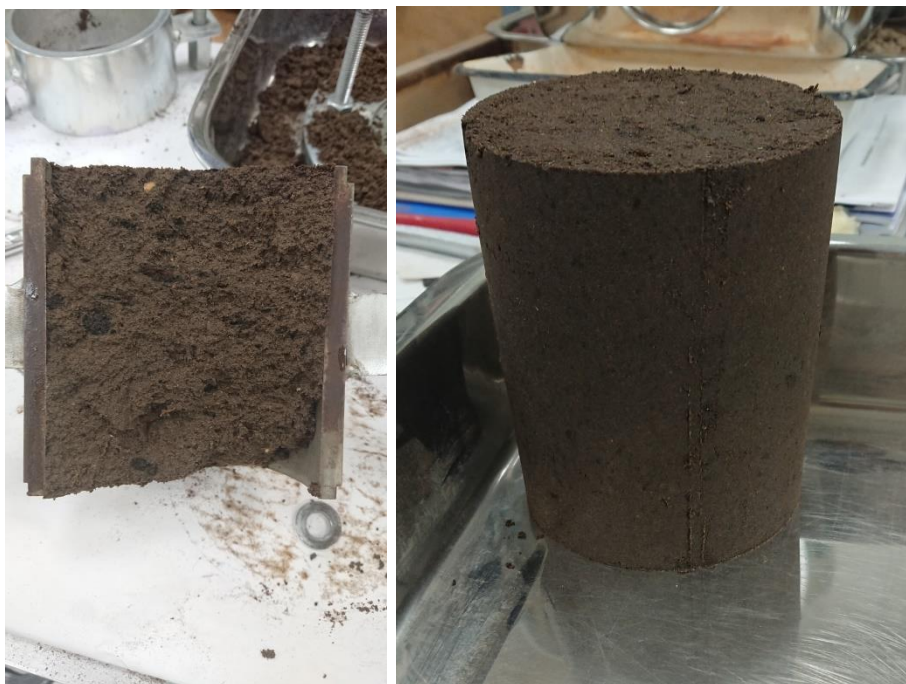
Vahetult peale segamist võeti stabilisaatori tagant seguproov ja viidi laborisse, et määrata segu veesisaldus ning valmistada proovikehad. Peale segu kuivatamist selgus, et Rahingu tee stabiliseeritud segu veesisaldus oli 19%, seega võib eeldada, et hoolimata kuivadest ilmadest oli stabiliseeritava pinnase looduslik niiskus suhteliselt kõrge. Taarikõnnu tee segu loodusliku veesisaldusena saadi 16,6%. Optimaalne oleks olnud ca 10%. Seega segamise ajal segusse lisatud vee kogus oli liiga kõrge ja võimalik, et vett ei oleks pidanud üldse kasutamagi või teise variandina oleks pidanud lisama vett vaid tihendamise ja/või järeltöötluse ajal.

Proovikehasid valmistades oli samuti näha, et veesisaldus on liiga kõrge ja mitmed proovikehad lagunesid valmistamise käigus (joonis 5.19), ning Proctor vorm, mille

sisse proovikehad valmistati, oli samuti peale proovikeha eemaldamist märg. Objektilt võetud segust tehtud proovikehade survetugevused olid samas suurusjärgus, mis laboris määratud:

- Taarikõnnu teel 7p: 0,18 MPa ja 28p: 0,3 MPa (kuivmahumass 1,6...1,7 Mg/m³);
- Rahingu teel 7p: 0,20 MPa ja 28p: 0,30 MPa (kuivmahumass 1,65 Mg/m³).

Kuivmahumasside ja survetugevuste põhjal on Taarikõnnu ja Rahingu tee pinnased sarnased, kuigi objektil visuaalselt hinnates oli olukord erinev. Nii 7 kui 28p survetugevused on oluliselt madalamad, kui oodati. Tõenäoliselt põhjuseks sellele on objektil lisatud liiga suur kogus vett ning orgaanilise aine (sh taimejuured) sisaldus segus.



Joonis 5.19 Vormi avamisel pikuti purunenud proovikeha (vasakul), terve proovikeha (paremal) [erakogu]

Nii Taarikõnnu kui Rahingu teel mõõdeti kandevõimed (joonis 5.20) enne segamist ning teatud perioodi vältel peale segamist. Taarikõnnu teel oli 56 päeva möödudes toimunud juba metsavedu, mille tulemusi on käsitletud allpool. Kandevõimeväärtused on esitatud tabelites 5.1 ja 5.2.



Joonis 5.20 Kandevõimemõõtmised Rahingu teel (vasakul) ja Taarikõnnu teel (paremal)
Dynatest LWD seadmega 28p peale põlevkivituhaga segamist [erakogu]

Tabel 5.1 Taarikõnnu tee kandevõime

Taarikõnnu				
Enne segamist oli kandevõime 10...20 Mpa				
Punkti nr	Asukoht	7p	28p	Peale metsavedu
1	0	66	57	40
2	100	40	58	55
3	200	30	49	58
4	300	23	34	22 (45)
5	400	43	68	30
6	500	22	43	43
7	600	37	36	44
8	700	13	14	31
9	800	22	25	20
10	900	22	40	27
11	1000	38	80	39
12	1100	26	144	27
13	1200	88	104	-
14	mahasõit	51	-	55
	keskmine	36	58	38

Tabel 5.2 Rahingu tee kandevõime

Rahingu						
Enne segamist 40...60 Mpa						
Punkti nr	Asukoht	1p	3p	7p	28p	56p
1	0	-	-	25	25	25
2	50	-	17	86	-	-
3	100	48	35	53	40	57
4	150	-	30	37	-	-
5	200	42	53	65	122	147
6	250	-	43	77	-	-
7	268	-	100	82	174	-
8	300	-	114	65	195	130
9	350	-	30	66	101	130
10	400	-	50	53	113	75
11	430	10	30	35	47	45
12	450	38	44	71	-	-
13	485	-	-	98	-	-
14	500	56	90	88	210	244
15	525	38	145	118	121	-
16	lõpp	-	-	94	61	70
				teelõigu lõpus olnud pinnas:		43
	keskmine	39	60	70	93	103

Peale põlevkivituhaga segamist on mõlemal teel kasvanud kandevõime kahekordseks. Taarikõnnu teel on kandevõime peale metsavedu langenud, mille põhjus on see, et raskeliiklus on lõhkunud hüdraulilised sidemed ja altpoolt on dünaamilise koormuse tagajärjel tõusnud vesi üles.

Olukord Taarikõnnu teel peale metsavedu on kujutatud joonisel 5.21, millest selgub, et kui põlevkivituhaga oli segatud liiv, on teekatte seisukord hea, kuid kus on segusse sattunud metsakõdu, on toimunud lagunemine (joonis 5.22). Sellest järeldub ka see, et uuringu faasis nähtud väike survetugevus (alla 0,5 MPa) on kajastunud selles, et ehitatud tee ei ole täielikult täitnud oma eesmärki. Teelõigu lõpus on olnud probleemiks ka see, et teekate on pealt muutunud ligaseks/libedaks, mis on raskendanud tee kasutamist.



Joonis 5.21 Teelõigu alguses olev liivane osa on metsaveole hästi vastu pidanud (vasakul), teelõigu otsas on teekate muutunud ligaseks ja libedaks (paremal) [erakogu]



Joonis 5.22 Kohtades, kus on segusse sisse tulnud rohkem orgaanikat (metsakõdu), on vähemal või suuremal määral lagunened [erakogu]

6. MAJANDUSLIK TASUVUS

Pinnaste stabiliseerimine on alternatiiv pinnaste väljavahetamiseks. Traditsiooniiselt kaevatakse sobimatud pinnased välja ja asendatakse uutega, kuid kui tegemist on mineraalse pinnasega, siis on võimalik neid pinnaseid modifitseerida ja saada ehituseks sobiv materjal. See kõik aitab kokku hoida väga suure summa raha, mis muidu kuluks materjali transpordile, ning kui stabiliseerimiseks kasutada põlevkivituhka, siis on sideainele kuluv raha kordades väiksem kui tsemendi puhul, vaatamata sellele, et tsemendi kulub poole vähem. Lisaks selline tehnoloogia aitab kokku hoida väga suure hulga CO₂ mis traditsioonilisel meetodil õhku paisatakse ja CO₂ kvoodid on väärtuslik „valuuta“, mille hind on aja jooksul üha kerkinud ja kerkib edasi ning millega ettevõtted ja riigid kauplevad. Ühtlasi aitab antud teema edendada ringmajandust millest üha rohkem räägitakse. Süsihappegaasi emissioon ja ringmajandus on täiesti eraldi haru millest antud töö puhul rääkida ja käesolev rahaline kulu võrdlus neid teemasid ei kajasta.

Antud metsateede stabiliseerimise maksumuse info pärineb Riigimetsa Majandamise Keskuselt ning omavahel on võrreldud Taarikõnnu tee stabiliseerimise maksumust ja Taarikõnnu teeni viiva kruusatee- Rahingu tee rekonstrueerimise hinda. Neid kahte teed on hea omavahel võrrelda, kuna asukohast tingitud hinna erinevus puudub.

Taarikõnnu tee stabiliseerimise lepinguline maht on järgmine:

- Pikkus: 1260 m
- Laius 4 m
- Kihi paksus 25 cm
- Pindala 5040 m²
- Maksumus 43 939,5 €

Rahingu tee rekonstrueerimise lepinguline maht on järgmine:

- Pikkus: 3140 m
- Laius 4,5 m
- Kihi paksus 30cm
- Pindala 14 130 m²
- Masumus 104 750,6 €

Taarikõnnu tee konstruktsioon oli 25 cm põlevkivituhaga stabiliseeritud pinnast, mille sideaine kulunorm oli 35 kg/m². Rahingu tee konstruktsioon nägi ette geotekstiili peale 20+10 cm kruusa, kokku 30 cm.

Kui jagada ehitusmaksumus ruutmeetritega, siis saame ruutmeetri hinna. Rahingu tee puhul on see 7,41 €/m² ja stabiliseeritud lõigul 8,72 €/m². Eeldada võis, et

stabiliseerimine on odavam kui uue tee ehitamine, kuid antud numbrid seda fakti ei kinnita. Sellel on mitu põhjust. Esiteks oli tegemist katselõigu ehitusega ja kuna sellisel viisil ei ole kunagi varem Eestis teed ehitatud, siis on ehitajal kõrgemad riskid, kui tööde puhul, mis laialdasemalt levinud, ja need riskid kajastuvad ka hinnas. Ühtlasi on sarnaste katselõikude ehitamise konkurents ka madalam. Teiseks erinesid nende teede saisukorrad enne tee ehitust. Rahingu tee oli juba olemasolev kruusatee mida rekonstrueeriti, seega oli projekteeritud konstruktsioon nõrgem kui see oleks pidanud olema Taarikõnnu tee ehitusel. Taarikõnnu tee oli olemuselt pinnastee ja selle traditsiooniliseks ehituseks oleks pidanud konstruktsioon olema vähemalt 40 cm kruusa geotekstiilil. Seda fakti nentis ka RMK, nende nägemus oli antud tee konstruktsioonist kruus 30+10 cm geotekstiilil. Kui võrrelda nende kahe tee ehituse maksumust, siis on tulemus paremas seoses.

Võrreldes Rahingu tee 30 cm kruusatee ehitust Taarikõnnu tee 40 cm kruusatee ehitusega, saab Rahingu tee ehituse kuupmeetri hinna korrutades kihipaksuse ruutmeetritega ja tulemuseks saab 4239 m³. Kui ehituse maksumus jagada kuupmeetritega, saab ühe kuupmeetri ehituse hinnaks 24,7 €/m³. Taarikõnnu tee ehitamine kruusast oleks mahuks olnud 2016 m³. Kui see maht korrutada läbi Rahingu tee kuupmeetri hinnaga, saab maksumuseks 49 815,36 €, mis on üle 5800€ rohkem kui stabiliseerimine. Kui see hind jagada ruutmeetritega, saab tulemuseks 9,88 €/m², mis on 1,17 €/m² kallim kui stabiliseerimine. Tabelis 6.1 on kõik numbrid välja toodud.

Tabel 6.1. Hinnavõrdlus

	Rahingu tee REK	Taarikõnnu stabiliseerimine	Alternatiiv stabiliseerimisele
Konstruktsioon	10+20+GT	25 Stabi	10+30+GT
Kihi paksus (m)	0,3	0,25	0,4
Pikkus (m)	3140	1260	1260
Laius (m)	4,5	4	4
m ²	14130	5040	5040
m ³	4239	1260	2016
Maksumus	104750,6	43 939,50 €	49 815,36 €
m ² hind	7,41	8,72	9,88
m ³ hind	24,71	34,87	24,71

Antud teema kokkuvõtteks saab öelda, et kui Taarikõnnu tee oleks ehitatud kruusast ja kogu kihi paksus oleks olnud 40 cm, siis oli stabiliseerimine odavam tehnoloogia. Autori arvates läheb järgmiste katselõikude ühiku hind odavamaks kui antud katselõigu hind, sest sellest õppisid kõik osapooled ning järgmine kord saab eksitud vigu teha efektiivsemalt. Hinda mõjutab kindlasti ka objekti asukoht, kuna

stabiliseerimiseks kasutatav põlevkivi tuhk asub Ida-Virumaal ja mida kaugemale tuleb tuhka transportida, seda kulukamaks see läheb.

7. JÄRELDUSED JA SOOVITUSED

Eestis ei ole taolisel viisil kunagi varem teed ehitatud ning seega oli antud katsete näol tegemist uue ja unikaalse kogemusega, mille põhjal on võimalik kasutatud meetodikat edasi arendada. Taarikõnnu ja Rahingu tee kogemuse põhjal nähti, et teede kandevõimed ja seisukorrad paranesid, kuid mitte tingimata veel sellisele tasemele, mis oleks olnud vajalik.

Järgnevates alapeatükkides on autori soovitusel, mida tuleks järgida järgmisi katselõike ehitades.

7.1 Pinnase stabiliseerimise eesmärk

Esmalt tuleks välja mõelda mis on antud teeremondi eesmärk. Nagu RMK uuringus välja tuli, siis üks välja pakutud katselõik osutus niivõrd heaks, et seda polnudki vaja stabiliseerida, sest olemasolev kruusakihiki paksus oli üle 40cm ja kandevõime täiesti rahuldav. Tihtipeale piisab kruusateede seisukorra paremaks muutmiseks aastatega tekkinud servavalli eemaldamine ja kraavide korda tegemine. Sellega juhitakse vesi tee kattelt kraavidesse ja suur hulk probleeme lahenebki ära.

Stabiliseerimise eelduseks on mineraalsest materjalist tee olemasolu, mille paksus sõltuvalt eesmärgist võiks olla vähemalt 20 cm.

Stabiliseerimist tuleks kaaluda ka juhul kui on plaan viia olemasolev kruusatee mustkatte alla, seda siis juhul kui olemasolev kruusatee ei oma piisavat kandevõimet liigniiskuse tõttu või kui kruusatee on ehitatud kruusast kus ei ole piisavalt peenosist. Kandevõime kadumine liigniiskuse tõttu on suur probleem paljudel kruusateedel, eriti just kevadeti ja paljudele teedele seatakse massipiiranguid. Kuid kui selline tee on viidud kuival ajal, kui kandevõime on enam kui piisav, mustkatte alla, siis see tee võib märjal perioodil uuesti laguneda ning hiljem on selle remont juba tunduvalt keerulisem kui kruusateede puhul. Vähene peenosise sisaldus kruusas, võib viia selleni, et raskeveoki, näiteks prügiauto, ratta all tekib kruusatee kandvas kihis niivõrd suured nihkepingsed, et kruusatee deformeerub ja sellele paigaldatud kergkate võib puruneda. Mõlema probleemi korral aitaks stabiliseerimine siduda osakesi niivõrd palju, et tekiks seotud kiht.

7.2 Uuringud objektil

Objektile tuleks teha geoloogiline uuring, kas puurimise või surfiaukude näol, et teha kindlaks stabiliseeritava kihi paksus ning selgitamiseks mis on stabiliseeritava kihi all. Ühtlasi tuleks mõõta kandevõimeid, et mõista kuidas olemasolev olukord toimib.

Kui on probleeme pinnaseveega, siis tuleks teha kindlaks kas vett on võimalik teest eemale juhtida. Vajadusel tuleks ehituse käigus rajada kraavid ja puhastada eelvoolud.

Objektilt tuleks võtta pinnaseproove piisavas koguses, et saaks laboris teha kõik vajalikud katsetused. Kui pinnas objekti lõikes oluliselt ei muutu, siis piisab ka ühest proovist, kuid võimalusel võiks olla vähemalt kaks erinevat proovivõtu kohta, et tulemus oleks täpsem. Pinnaseproovi täpne kogus sõltub katsetest, mida tahetakse läbi viia.

7.3 Laboratoorsed katsed

Laboratoorsete uuringute eesmärk on selgitada välja pinnase omadused ja koostada parim võimalik seguretsept. Selle jaoks on vajalik teha järgmised katsed:

- optimaalse veesisalduse ja maksimaalse tiheduse leidmine standardse Proctorteimiga (EVS-EN 13286-2)
- terastikulise koostise määramine (EVS-EN 933-1);
- orgaanikasisaldus kuumutuskaos meetodil (EVS-EN 1744-1);
- ICC (initial consumption of cement) ehk minimaalse vajamine hüdraulilise sideaine koguse määramine kasutades pH mõõtmisi. Vajalik oleks pH üle 12,4, et tagada stabiliseeritud segu stabiilsus;
- põlevkivituhaga segatud pinnase survetugevuse määramine (EVS-EN 13286-41).

Tööde teostamise järjekord peaks olema sama mis on ülaltoodud nimekirjas. Kui stabiliseeritav pinnas on mineraalne ja ei sisalda orgaanikat, siis võib kuumutuskatse ära jätta. Nidusate pinnaste stabiliseerimisel tuleb määrata ka plastsusarv. Juhul kui plastsusarv on üle 10, tuleb enne tsementstabiliseerimist pinnast töödelda kustutatud lubjaga. Kui kasutada põlevkivituhka, siis see vajalik ei ole, sest põlevkivituhk kuivatab pinnast.

Lõpliku seguretsepti, ehk kui palju sideainet ja vett stabiliseerimisel kasutama peab, määrab ära survetugevus. Survetugevus sõltub eesmärgist, kuid minimaalne survetugevus pinnaste stabiliseerimisel peaks olema vähemalt 0,5 MPa.

On tugevalt soovituslik, et laboris kontrollitakse üle lubatav aeg segamise ja lõpliku tihendamise vahel objektile olevate õhutemperatuuride juures, sest erinevatel sideainetel on erinev tardumisaeg. Laboriuuringute käigus võiks koostada graafiku õhutemperatuur vs aeg vs survetugevus.

7.4 Ehitustööd

Et tagada stabiliseeritud kihi kvaliteet, ei tohiks stabiliseerimistöode käigus õhutemperatuur langeda alla 5°C ega tõusta üle 40°C. Kui õhutemperatuur tõuseb üle 25°C, siis tuleb tööd teostada lühikeste lõikudena, et vältida kiiresti tekivate sidemete lõhkumist.

Sideaine laotamine peab toimuma vahetult enne segamist. Sideainet ei ole soovitatav laotada tugeva tuulega, sest tuul võib seda minema lennutada ja täpne doseerimine ei ole sellisel juhul tagatud. Enne laotamist tuleb sideaine laotur seadistada vastavalt retseptis antud kulunormile ning seda tuleb kontrollida nn presendi või panni katsega, kus kaalutakse ära realselt teele laotatav kogus. Laotatav sideaine ei tohiks olla vanem kui 3 kuud. Kui on kahtlusi sideaine kvaliteedis, siis tuleb laboris kontrollida sideaine tugevusparameetreid. Vältida tuleks peeneks jahvatatud ja kiiresti kõvanevaid sideaineid. Kui sideaine laotamise järgselt sajab vihma, siis tuleb segamine teostada koheselt või sideaine teelt uuesti eemaldada.

Segamine peab toimuma vahetult peale sideaine laotamist. Soovituslik segamise kiirus on 8-12 m/min. Kui segamise käigus lisatakse vett, siis seda tuleb teha kontrollitult ning tuleb järgida, et mitte mingil juhul ei ületataks segu optimaalset veesisaldust. Kui vee transport toimub pehmetel pinnastel, siis tuleb seda teha masinaga, mis on suuteline sellisel pinnasel liikuma, vältimaks segufreesi kinnijäämist juhul, kui ta peab tõmbama enda järel veeautot. Suurte sideaine kulunormide korral tuleb jälgida, et segamisfreesi kolu ei hakkaks lükkama sideainet buldooserina enda ees.

Segamise ajal tuleb võtta seguproove vahetult segamisfreesi tagant ja proovide katsekehadeks vormimine peaks toimuma sama ajaga, kui toimub teel segatud materjali tihendamine ja profileerimine.

Tihendamine peab toimuma ühevaltsilise vibrorulliga ja kasutada tuleb kõrgeamplituudiga vibratsiooni. Tihendusmasina mass tuleb valida vastavalt kihi paksusele. Esmase läbiku korral ei tohi rulli kiirus ületada 3 km/h ja läbikute arv peab olema piisav, et tihendada kiht vähemalt tiheduskoefitsendini $k=0,97$. Kaaluda tuleks tapprulli, kui kihi paksus ületab 20cm või kui on tegemist nidusate pinnastega. Tapprull võimaldab väga suurt tihendamisenergiat, mis võimaldab kasutada väiksemat vee kogust segus.

Profileerimine peaks toimuma vahetult peale esmast tihendamist, et vältida juba tekkinud sidemete lõhkumist hilisema profileerimise käigus. Maksimaalne aeg, mille jooksul peale segu segamist tuleb kiht tihendada ja profileerida, sõltub sideainest ja see info võiks tulla koos segureseptiga laborist. Tsementstabiliseerimisel on maksimaalne aeg 4 tundi ja põlevkivituhaga stabiliseerides on see 2 tundi.

Peale stabiliseeritud kihi valmimist ei tohi lasta 7 päeva jooksul kihil ära kuivada, kuna see põhjustab kihi pinnal kahanemispragusid. Kuivamise vältimiseks tuleb kihti pidevalt kasta. Kuivamise perioodil ei tohi teele lasta raskeliiklust, välja arvatud kastmisauto.

Kuna antud projekt oli metsatee stabiliseerimine, ning stabiliseeritav materjal pärines tee kõrvalt kuivenduskraavide kaevamise käigus ülejäävast pinnasest, mis oli laiali planeeritud „tulevase“ tee kohale, siis see mineraalne pinnas oli segunenud orgaanilise pinnasega ja metsakõduga. Suur orgaanika sisaldus stabiliseeritavas pinnases aga vähendas oluliselt töö tulemust ning kohati tekkisid probleemsed kohad, mis lagunesid täielikult. Kuna praktikas kasutatakse sellist tehnoloogiat endiselt, kus kraavist tõstetav pinnas planeeritakse kraavi kõrvale ja sellest tekib metsatee, siis on üks soovitus kuidas sellist tööd teha nii, et hiljem antud teelõik oleks paremini kasutatav. Vältimaks huumuse ja mineraalse pinnase segunemist, tuleks koorida kaevatava kraavi ja sinna rajatava tee alt kogu kasvumuld ja kraavist tuleva mineraalse pinnase saab siis juba asetada tee alla jääva mineraalse pinnase peale. Sellise tehnoloogiaga rajatav tee omab suuremat kandevõimat kui huumusega segatud pinnase puhul. Ühtlasi on sellise tee stabiliseerimise tulemus ühtlasem ja parema kvaliteediga ning kergesti lagunevaid kohti ei tohiks tekkida.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö tulemuste põhjal võib väita, et põlevkivituhk sobib metsateede stabiliseerimiseks ja sellel on otsene majanduslik eelis traditsioonilise kruusast katendi ehitamise ees. Ehitatud katselõigult saadi väga vajalikku infot, mida teha järgmine kord paremini. Antud katselõigu ehitamine näitas metsateede stabiliseerimise suurt potentsiaali ning see on tehnoloogia mida arendades saaks kasutada palju laialdasemalt kui ainult metsateed.

Põlevkivituhk parandab pinnase omadusi mitmel moel. Nimelt põlevkivituhaga on võimalik pinnaseid kuivatada, et tagada nende töödeldavus, see on eriti vajalik nidusate pinnaste puhul, mille looduslik kuivamine võtaks liiga kaua aega. Teisalt tõstab põlevkivituhk pinnase kandevõimet ja see on vajalik looduslikult nõrkade pinnaste kasutamiseks.

Metsateede stabiliseerimise sobilikkus algab kõik projekteerimisest. Iga teelõigu puhul on vaja välja selgitada töö eesmärk ning seejärel võimalused selle teostamiseks. Stabiliseerimise eelduseks on mineraalse pinnase olemasolu piisavas koguses, et tagada vajalik tee laius ja stabiliseerimise sügavus vähemalt 20 cm. Nagu antud töö ka välja selgitas, ei tohiks mineraalne pinnas sisaldada liiga palju orgaanikat, sest see vähendab stabiliseeritud tee vastupidavust väga olulisel määral. Iga stabiliseerimise projekti eelduseks on õige seguretsept. Seguretsept tuleb koostada kasutades stabiliseeritavalt lõigult võetud pinnaseproove. Pinnaseproovist tuleb teha laboris mitmesuguseid katseid, et selgitada välja parim võimalik lahendus. On kindlasti juhtumeid kus stabiliseerimine ei ole majanduslikult otstarbekas ja sellisel juhul tuleks kasutada traditsioonilisi meetodeid.

Stabiliseerimisel on väga palju tegureid, millega peab tööde käigus arvestama ja mitte midagi neist ei tohiks alahinnata, vastasel juhul võib töö tulemus kannatada. Katselõigu ehitus tõi välja pinnaste stabiliseerimise kitsaskohad, mida arvestades on võimalik järgmistel kordadel saavutada parem eesmärk.

Autori varasem bakalaureusetöö ja käesolev töö lubab teha järeldusi, et pinnaste stabiliseerimisel on palju suurem potentsiaal kui varem võis arvata. Maailmas on pinnaste stabiliseerimine ja modifitseerimine laialdasemalt levinud ja seda võimalust peaks kasutama kindlasti ka Eestis, sest sellega on võimalik saavutada majanduslik kokkuvõtteid ja väga suur kokkuvõtteid energiale, mis kuluks muidu pinnaste kaevandamisele, väljavahetamisele jne. Antud tehnoloogia soosib ka ringmajandust,

sest selle abil saab ära kasutada ühte energiatööstuse jääki, milleks on põlevkivituhk ja teisalt saab kasutada ära pinnased mis varem olid ehituseks mittesobilikud.

Antud töö jätkuks tuleks ehitada katselõik kus kasutatakse põlevkivituhka kruusateede stabiliseerimiseks, sest senised labori tulemused näitavad, et selliselt on võimalik tõsta kruusateede kandevõimet ja seeläbi parandada nende vastupidavust. See oleks eriti vajalik kui riigil on paan väga suur hulk kruusateid muuta tolmuvabaks ja see võiks olla üks tehnoloogiatest, mida sellise eesmärgi saavutamiseks kasutada.

SUMMARY

Possibilities to use oil shale ashes has been investigated for decades and even today there is several ongoing studies. Reason for continuous research is changing composition due to changed technologies. Previously ash has been used for building materials, but also for stabilizing lower layers of roads (dust free covering, built in 1970.-80's and OSAMAT research). Recent studies, using ashes from circulating fluidized bed combustion (CFB), has shown great potential for usage for soil modifications.

One ambition of current study is to find alternative technologies for construction of forest roads. Until now it is mainly used gravel or other materials that needs to be transported to forest roads. Soil modification technology allows to assume, that in addition to classical construction possibilities, there may be alternative method to stabilize existing mineral soil with oil shale ash. In addition to forest roads, this technology could be considered to be used in gravel and other roads.

Second area, addressed by current study, is the usage of one the residue of energy industry in road construction. By improving soil, that initially would be unsuitable as construction material, unnecessary waste can be avoided. Estonia, together with EU, is moving towards climate neutrality goal. Technology of using oil shale ash in road construction could be excellent way to support this goal by using waste materials and therefore reducing CO2 footprint.

Current study allows to conclude, that oil shale ash is suitable for stabilizing forest roads, and it has financial advantage over traditional gravel road construction. Test road, that was constructed as part of this study, gave a lot of valuable information regarding improvements needed using this technology. It also shows great potential of this technology in forest roads but also much wider possible usage.

There is more than one way oil shale ash is improving parameters of soil. It is possible to use it for drying soil for better handling, that is especially relevant in case of fine aggregates, in which case it would take too long time to dry naturally. Secondly oil shale ash is improving load capacity of soil, what is needed in case of soft soil.

Possibility to use this technology for forest roads must be investigated during road design and calculations. The purpose of road in each case must be analyzed and optimal options considered. There are certain parameters needed for stabilization technology – there must be enough mineral soil to secure needed width of the road

and depth needed for stabilization for at least 20 cm. Also, as a current study has established, there should not be too many organics in the soil that could reduce endurance significantly. Therefore, thorough prior studies of soil need to be conducted to evaluate the possibility to use this method. In specific cases it may be concluded that modification method is financially not most optimal in which case traditional construction methods should be preferred.

There are several factors to be considered in modification technology and none of them should be underestimated to secure the quality of result. Current study and test road has brought many of them to attention, so improvements are possible in planning of modification technology.

Current study as well as bachelor thesis of the same author led to conclusion that potential of modification technology in soil has much bigger than expected previously. In other countries this technology is more widely used, and it's possibilities should be explored also in Estonia. It's main benefits are financial savings but also savings of energy, which would be used in traditional methods for excavation and transportation. Modification technology contributes into circular economy by using waste from energy industry and enables usage of other ways unusable soil.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] (2021) Taltech. [Online]. <https://www.taltech.ee/et/polevkivi-kompetentsikeskus-polevkivist>
- [2] (2018) Keskkonnaministeerium. [Online]. <https://www.envir.ee/et/uudised/uuring-selgitab-polevkivituha-ohtlikke-omadusi>
- [3] Rauno Leppik. (2019) [Online]. <https://eprints.ttkk.ee/id/eprint/4663/>
- [4] Saksamaa) Marek Truu (AS Teede Tehnokeskus) Gerald Müller (Asphalta. (2019, Apr.) Asfaldiliit. [Online]. https://www.asfaldiliit.ee/_vana/files/ettekanded/asfaldipaev_11_2011/2011-11-30%20Polevkivituha%20stabiliseerimine%20teedeehituses_G.Muller_M.Truu.pdf
- [5] Lembi-Merike Raado, *Ehitusmaterjalid*, Ivo Pilve, Ed. Tallinn: Sihtasutus Professor Karl Öigeri Stipendiumifond, 2018.
- [6] Sandor Laanemäe, "STABILISEERITUD KATENDIKIHTIDE ANALÜÜS JA OLEMUS EESTIS," Tallinn, 2015.
- [7] Mikk Raud, "PINNASTE KIHTSTABILISEERIMINE, KUI ALTERNATIIV PINNASTE ASENDAMISEL. KESKKONNA- JA MAJANDUSLIKU MÕJU HINDAMINE," TTÜ, Tallinn, 2016.
- [8] Wirtgen. (2004) WIRTGEN KÜLMSTABILISEERIMISE KÄSIRAAMAT. [Online]. <https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/wirtgen.pdf>
- [9] Wirtgen. (2021) [Online]. <https://www.wirtgen-group.com/en-us/news-and-media/wirtgen-group/soil-stabilization-operations-with-ws-250/>
- [10] Wirtgen. (2016) [Online]. <https://www.wirtgen-group.com/en-us/news-and-media/wirtgen/bauma-2016-s-pack/>
- [11] Moviter. (2021) Moviter. [Online]. <https://moviter.pt/en/l/industrial-brands/streumaster-sw-16-mc/>
- [12] Stehr. (2021) Stehr. [Online]. <https://www.stehr.com/stehr-bodenstabilisierung/stehr-bindemittelstreuer/sbs-3000>
- [13] Merilin Paalo. (2018) [Online]. <https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/60164/MerilinPaaloMag.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] Standardikeskus. (2011) [Online]. <https://www.evs.ee/et/evs-en-197-1-2011>
- [15] Wirtgen GmbH, *Base Layers with Hydraulic Binders*. Windhagen, Germany: Wirtgen Group.
- [16] Christopher Holt. (2010) [Online]. <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2010/docs/d1/holt-2.pdf>
- [17] AS Teede Tehnokeskus. (2021, Apr.) MNT. [Online]. <https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/tuhkkatted.pdf>
- [18] ERC Konsultatsiooni OÜ. LIFE + OSAMAT projekti lõplik tehniline järelmonitooring. [Online]. https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/life_osamat_erc-21-2020_0.pdf
- [19] TalTech. (2019, Apr.) Keskkonnaministeerium. [Online]. <https://www.ttu.ee/a-sutused/polevkivi-kompetentsikeskus/polevkivi/mis-on-polevkivi/?highlight=meie>